

**Prüfverfahren und Entwicklung  
von Prüfkriterien zur Bewertung  
der Auslaugung umweltrelevanter  
Stoffe aus Frischbeton.  
Fortsetzungsprojekt**

**T 3101**

T 3101

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2006, ISBN 3-8167-7013-4

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

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

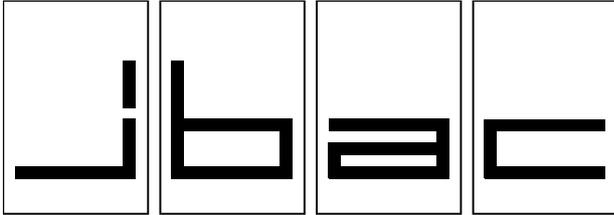
Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

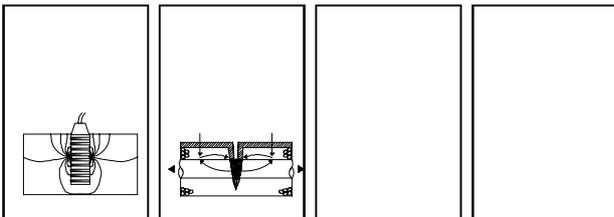
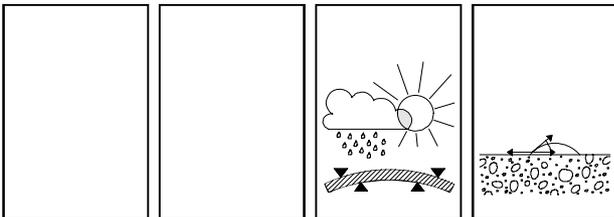
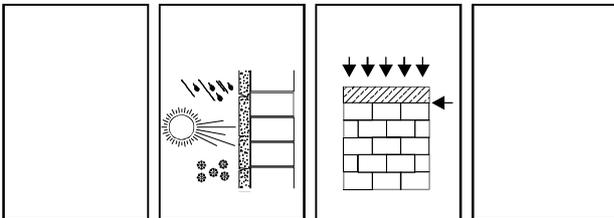
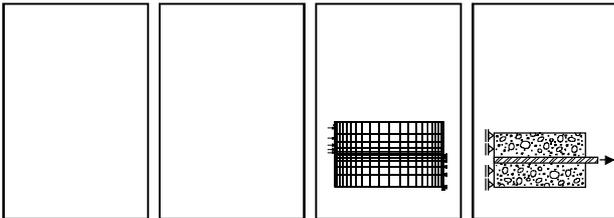
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

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

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



INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG AACHEN



FORSCHUNG · ENTWICKLUNG  
 ÜBERWACHUNG  
 PRÜFUNG · BERATUNG

RHEINISCH-  
 WESTFÄLISCHE  
 TECHNISCHE  
 HOCHSCHULE  
 AACHEN

**RWTH**  
 AACHEN  
 UNIVERSITY

## Forschungsbericht F 817/1

Prüfverfahren und Entwicklung von  
 Prüfkriterien zur Bewertung der  
 Auslaugung umweltrelevanter Stoffe  
 aus Frischbeton – Fortsetzungsprojekt

VP/Fk

5. Ausfertigung

## **THEMA**

Prüfverfahren und Entwicklung von Prüf-  
kriterien zur Bewertung der Auslaugung  
umweltrelevanter Stoffe aus Frischbeton –  
Fortsetzungsprojekt

**ABSCHLUSSBERICHT**

**Forschungsbericht Nr.**

F 817/1  
vom 04.11.2005

**Projektbearbeitung**

Prof. Dr.-Ing. W. Brameshuber

Dipl.-Ing. A. Vollpracht

**Auftraggeber/  
Förderer**

Deutsches Institut für Bautechnik  
Kolonnenstr. 30 L

10829 Berlin

**Auftragsdatum  
Aktenzeichen**

19.04.2004

-

Dieser Bericht umfasst 58 Seiten, davon 34 Textseiten.

Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet. Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung. Die auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichtes, seine Verwendung für Werbezwecke sowie die inhaltliche Übernahme in Literaturdatenbanken bedürfen der Genehmigung des ibac.

<b><u>INHALTSVERZEICHNIS</u></b>		<b>Seite</b>
1	EINLEITUNG .....	1
2	UNTERSUCHUNGEN .....	2
2.1	Übersicht.....	2
2.2	Untersuchte Parameter .....	2
2.3	Statischer Versuch.....	3
2.3.1	Versuchsbeschreibung .....	3
2.3.2	Ergebnisse der statischen Versuche.....	4
2.3.2.1	Anhaltswerte für den Freisetzungverlauf während der Frischbetonauslaugung .....	4
2.3.2.2	Vergleich der Freisetzung bei unterschiedlichen Sanden .....	7
2.4	Frischbetonstandtest.....	8
2.4.1	Versuchsbeschreibung .....	9
2.4.2	Ergebnisse des Frischbetonstandtests .....	10
2.5	Untersuchungen zur Bestimmung des Einflusses der Fließgeschwindigkeit	14
2.5.1	Versuchsbeschreibung .....	15
2.5.1.1	Versuchseinrichtung .....	15
2.5.1.2	Verwendete Mischung .....	16
2.5.1.3	Durchführung des Versuchs.....	16
2.5.1.4	Untersuchung der Probekörper nach Versuchsende .....	17
2.5.2	Ergebnisse der Elution im modifizieren dynamischen Versuch.....	18
2.5.3	Ergebnisse der Untersuchung der eluierten Mörtelproben aus dem modifizierten dynamischen Versuch .....	23
3	GESAMTAUSWERTUNG .....	24
3.1	Beschreibung der Modellrechnungen .....	24
3.2	Statischer Versuch.....	26
3.3	Frischbetonstandtest.....	28
3.4	Schlussfolgerung .....	29
4	ZUSAMMENFASSUNG .....	30
5	LITERATUR.....	32
	TABELLEN.....	A1-A20
	BILDER.....	B1-B4

## 1 EINLEITUNG

In dem Forschungsvorhaben „Prüfverfahren und Entwicklung von Prüfkriterien zur Bewertung der Auslaugung umweltrelevanter Stoffe aus Frischbeton - F 817“ /1/ sollte die Auslaugung aus Frischbeton quantifiziert werden. Ziel war es, Laborversuche auf ihre Reproduzierbarkeit zu testen und Bewertungskriterien und Grenzwerte vorzuschlagen, die dem jeweiligen Gefährdungspotential in adäquater Weise Rechnung tragen. Dafür wurden zwei Versuchseinrichtungen entwickelt, die stehendes Grundwasser (statischer Versuch) und strömendes Grundwasser (dynamischer Versuch) im Labormaßstab abbilden sollten. Die Bewertung sollte auf der Grundlage von Transportsimulationen erfolgen. Dabei hat sich gezeigt, dass die im dynamischen Versuch ermittelten Konzentrationen mit den Daten aus dem statischen Versuch nicht errechnet werden können. Die Freisetzung im dynamischen Versuch ist offenbar deutlich höher als im statischen Versuch. Dieses Ergebnis kann auf mehrere Ursachen zurückzuführen sein:

- Im dynamischen Versuch wurde der Frischbeton so eingebaut, dass die Unterkante ca. 5 cm unter dem Wasserspiegel lag. Es ist daher möglich, dass der Beton in frischem Zustand teilweise durchströmt wurde und so größere Auslaugtiefen entstanden sind.
- Durch den Abtransport der Schadstoffe beim dynamischen Versuch kann das Lösen weiterer Schadstoffe begünstigt werden (Einfluss der Fließgeschwindigkeit).
- Der dynamische Versuch wurde mit einem gröberen Versuchssand durchgeführt, dadurch kann die Adsorption verringert und ggf. die Freisetzung erhöht werden.

Im Rahmen dieses Fortsetzungsprojektes ist der Einfluss der Fließgeschwindigkeit und der Einfluss des als Bodenkörper verwendeten Versuchssands genauer untersucht worden, um die Mechanismen bei der Freisetzung besser zu verstehen. Zusätzlich sind Versuche mit dem Ziel durchgeführt worden, den Freisetzungsverlauf während der Verarbeitungsphase festzustellen und einen Quellterm zu ermitteln, der für Transportsimulationen benötigt wird.

## 2 UNTERSUCHUNGEN

### 2.1 Übersicht

In Tabelle 1 sind die im Rahmen dieses Forschungsprojekts durchgeführten Versuche zusammengestellt.

Tabelle 1: Übersicht des Versuchsprogramms

Versuch	verwendeter Baustoff	Auslaugmedium	Versuchsdauer	Zielsetzung des Versuchs
1	2	3	4	5
Statischer Versuch (Abschnitt 2.3)	Beton B1, s. Tabelle A3	Sand, 1/2 mm, mit stehendem Leitungswasser	8 h 12 h 24 h	- Bestimmung von Anhaltswerten für den Freisetzungsvorgang - Vergleich der Auslaugung bei feinem Sand (0/4 mm) aus /1/ mit der Auslaugung bei Sand der Körnung 1/2 mm
Frischbetonstandtest (Abschnitt 2.4)	Beton B1, s. Tabelle A3	Leitungswasser	71,5 h bzw. 81,5 h	Bestimmung des Freisetzungsvorgangs
Modifizierter dynamischer Versuch (Abschnitt 2.5)	Mörtel, s. Tabelle A3	Sand, 1/2 mm, mit strömendem Leitungswasser variierender Fließgeschwindigkeit	24 h 48 h	- Bestimmung des Einflusses der Fließgeschwindigkeit - Untersuchung der Auslaugtiefe eluierter Proben

### 2.2 Untersuchte Parameter

In /1/ wurden an den gewonnenen Eluaten der pH-Wert, die Leitfähigkeit sowie die Gehalte an Aluminium, Arsen, Chrom, Kalium, Natrium, Sulfat, Vanadium und Zink bestimmt. Die Konzentrationen von Arsen, Kupfer und Zink lagen häufig an oder unter der Nachweisgrenze bzw. im Streubereich der Blindwerte. Aluminium und Sulfat wurden nicht in umweltrelevanten Konzentrationen freigesetzt. Diese Elemente wurden in diesem Projekt nicht mehr betrachtet. Ergänzend zu den bisher untersuchten Parametern sind hier Barium, Cadmium und Molybdän untersucht worden, um Informationen über diese bisher wenig betrachteten Elemente zu sammeln. Der Parameterumfang ergibt sich damit zu:

- Allgemeine Parameter: pH-Wert, Leitfähigkeit,
- Nebenelemente: Kalium, Natrium,
- Spurenelemente: Barium, Cadmium, Chrom, Molybdän, Vanadium.

## 2.3 Statischer Versuch

Mit dem statischen Versuch wurde in /1/ die gesamte Schadstofffreisetzung innerhalb von 24 h bei wassergesättigtem Boden mit stehendem Grundwasser und bei Teilsättigung bestimmt. Der Verlauf der Freisetzung wurde mit diesem Versuch bisher nicht nachvollzogen. Im Rahmen dieses Fortsetzungsprojektes wurden kürzere Versuchszeiträume angesetzt, um hier Anhaltspunkte zu erhalten. Zusätzlich wurde der Einfluss der Durchlässigkeit des Sandbettes untersucht.

### 2.3.1 Versuchsbeschreibung

Die statischen Versuche wurden analog zu /1/ durchgeführt. Bild 1 zeigt die Versuchseinrichtung für dieses Verfahren. Im Unterschied zu den Versuchen in /1/ wurde Sand der Körnung 1/2 mm eingesetzt, um den Einfluss der Durchlässigkeit des Sandes zu ermitteln. Es wurden nur Versuche mit wassergesättigtem Sand durchgeführt.

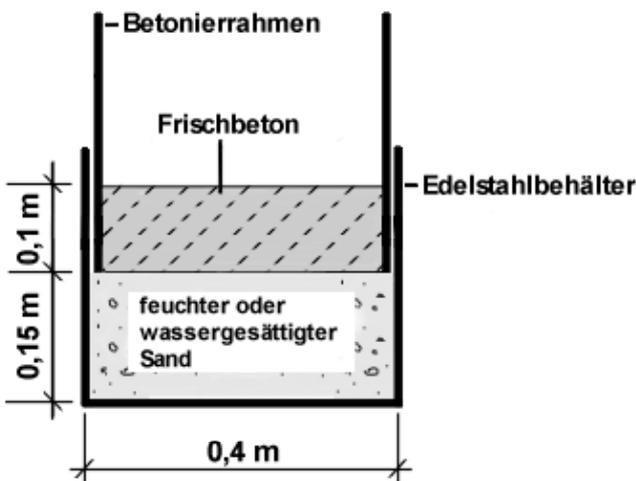


Bild 1: Schematische Darstellung des statischen Versuches /1/

Der Frischbeton wird auf das Sandbett aufgebracht und zu Versuchsende abgehoben. Die Kontaktzeit des Betons mit dem Boden kann variiert werden, eine ausreichende Erhärtung des Betons ist jedoch für das Abheben notwendig. Die Entnahme der Sandproben erfolgt dann schichtweise. Nach einer Trocknung bei 105 °C werden die Proben mit destilliertem Wasser (L/S = 5/1) 24 h lang eluiert. Das Eluat wird anschließend analysiert. Auf diese Weise kann ein Tiefenprofil der ausgelaugten Stoffe erstellt werden.

Um Anhaltspunkte für den Verlauf der Freisetzung zu erhalten, wurden neben der üblichen Kontaktzeit von 24 h Zeiten von 8 h und 12 h gewählt. Es wurden jeweils zwei Doppelbestimmungen durchgeführt. Ursprünglich war eine Verkürzung auf 6 h Kontaktzeit vorgesehen, allerdings ist das Abheben der Betonplatte zu diesem Zeitpunkt nur in einem von vier Versuchen gelungen, da die Festigkeit noch nicht ausreichend war.

Der statische Versuch wurde mit dem Beton B1 aus /1/ durchgeführt. Tabelle A3 gibt die Betonzusammensetzung und die Frischbetoneigenschaften wieder. Die Hauptbestandteile und Spurenelemente des verwendeten Zements sind in den Tabellen A1 und A2, Spalte 3 angegeben.

### **2.3.2 Ergebnisse der statischen Versuche**

Die Ergebnisse der statischen Versuche sind in den Tabellen A4a bis A7b zusammengestellt. Die Tabellen mit dem Index a geben den pH-Wert und die Leitfähigkeit in den Eluat-ten der Sandschichten für die unterschiedlichen Versuchslaufzeiten wieder. Die Tabellen b und c zeigen jeweils die Gehalte der untersuchten stofflichen Parameter im Sand. Ausreißer sind in den Tabellen fettgedruckt ausgewiesen.

#### **2.3.2.1 Anhaltswerte für den Freisetzungsverlauf während der Frischbetonauslaugung**

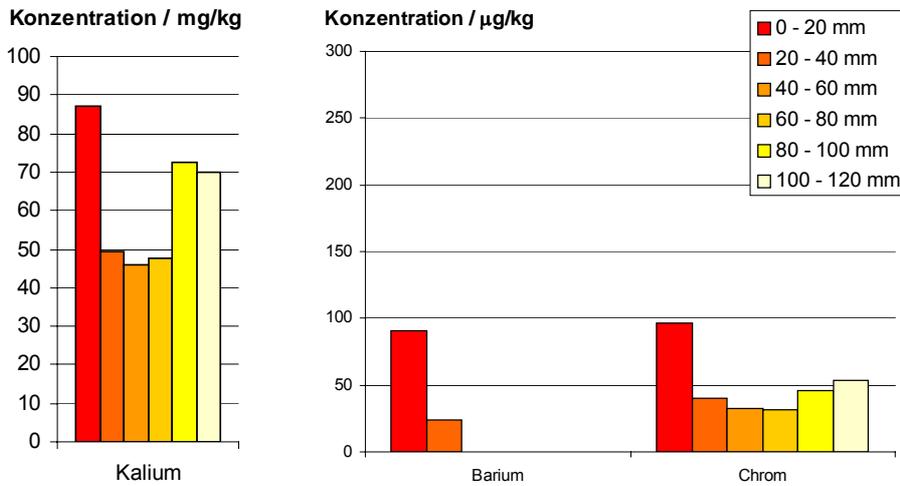
In der Tabelle 2 sind die ausreißerbereinigten, entsprechend log-normal-Verteilung gemittelten Werte der Wiederholungsversuche und der Blindproben für die stofflichen Parameter zusammengestellt. Die Versuchsdauer von 6 h wurde nicht ausgewertet, da eine Einzelmessung nicht als repräsentativ gewertet werden kann.

**Tabelle 2:** Wasserlösliche Gehalte der betrachteten Spurenelemente und Alkalien im Versuchssand, bezogen auf das Trockengewicht des Sandes – Mittelwerte

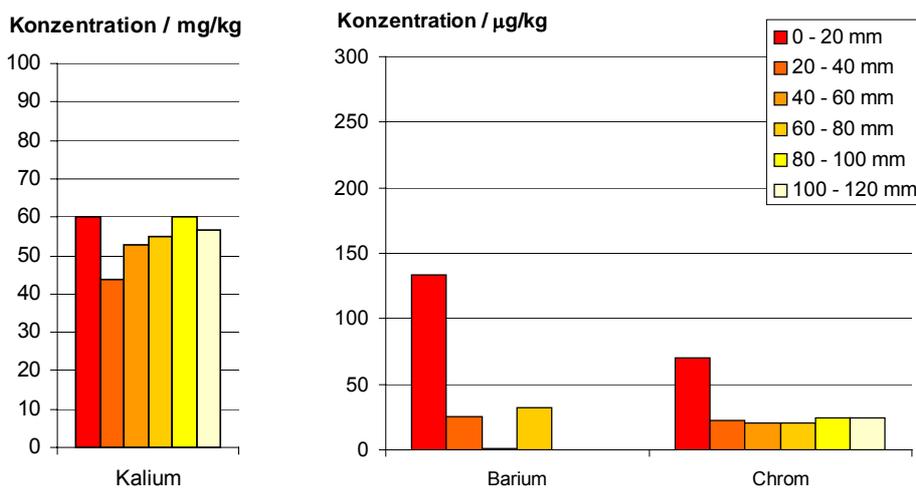
Versuchsdauer	Entnahmetiefe	Wasserlösliche Gehalte im Versuchssand						
		Natrium	Kalium	Barium	Cadmium	Chrom	Molybdän	Vanadium
h	mm	mg/kg		µg/kg				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Blindwert	-	6,0	7,4	55	0,15	7	< 5	8
8	0 - 20	10,4	94,4	145	0,05	103	8	54
	20 - 40	5,2	56,7	79	0,06	47	6	66
	40 - 60	7,8	53,5	49	0,07	39	5	51
	60 - 80	5,3	55,0	46	0,13	38	6	38
	80 - 100	7,4	80,0	36	0,07	52	7	38
	100 - 120	7,6	77,3	49	0,07	60	9	44
12	0 - 20	7,4	67,4	189	0,05	77	7	80
	20 - 40	4,8	51,0	81	0,16	29	5	35
	40 - 60	5,9	60,2	56	0,13	27	7	24
	60 - 80	7,3	62,2	87	0,18	27	5	30
	80 - 100	6,6	67,6	48	0,13	31	5	31
	100 - 120	12,7	78,6	53	0,08	32	6	36
24	0 - 20	8,0	62,4	347	0,18	88	8	21
	20 - 40	4,7	47,8	68	0,17	28	5	12
	40 - 60	5,2	43,8	52	0,10	28	6	21
	60 - 80	7,4	66,4	56	0,11	39	5	11
	80 - 100	9,2	73,9	74	0,16	50	6	15
	100 - 120	9,5	69,3	80	0,17	58	5	17

Eine signifikante Erhöhung der wasserlöslichen Gehalte ist für die Elemente Kalium, Barium, Chrom und Vanadium festzustellen. Bei Vanadium treten jedoch sehr große Streuungen auf, so dass eine genaue Auswertung aus statistischen Gründen nicht sinnvoll erscheint. Für Kalium, Barium und Chrom ist die Verteilung im Boden in den Bildern 2 bis 4 graphisch dargestellt, wobei die Blindwerte von den Messwerten subtrahiert wurden. Wie in Tabelle 2 wurden die ermittelten Freisetzungen in den Bildern auf das Trockengewicht des Sandes bezogen.

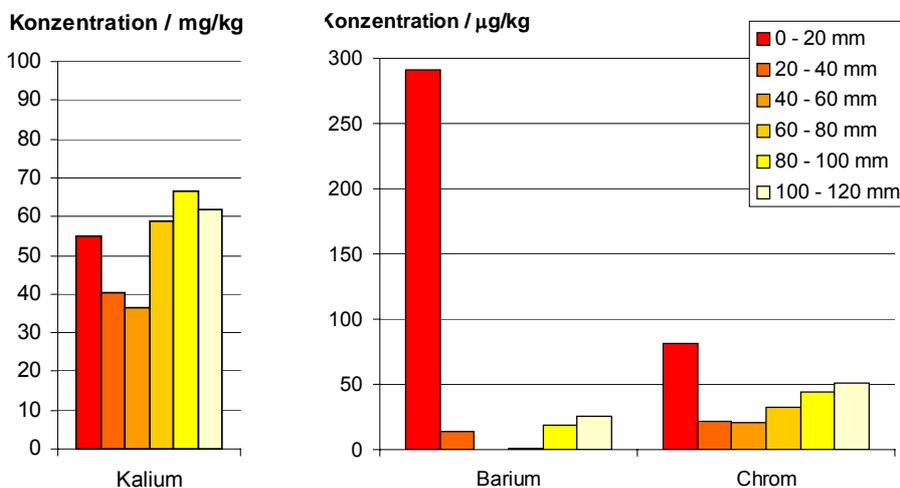
Die Natrium-, Cadmium- und Molybdängehalte liegen im Streubereich der Blindwerte und werden nicht näher betrachtet, da die Auslaugung hier vernachlässigbar ist.



**Bild 2:** Tiefenprofil der Stoffe Kalium, Barium und Chrom nach 8 Stunden Versuchsdauer, blindwertbereinigt



**Bild 3:** Tiefenprofil der Stoffe Kalium, Barium und Chrom nach 12 Stunden Versuchsdauer, blindwertbereinigt

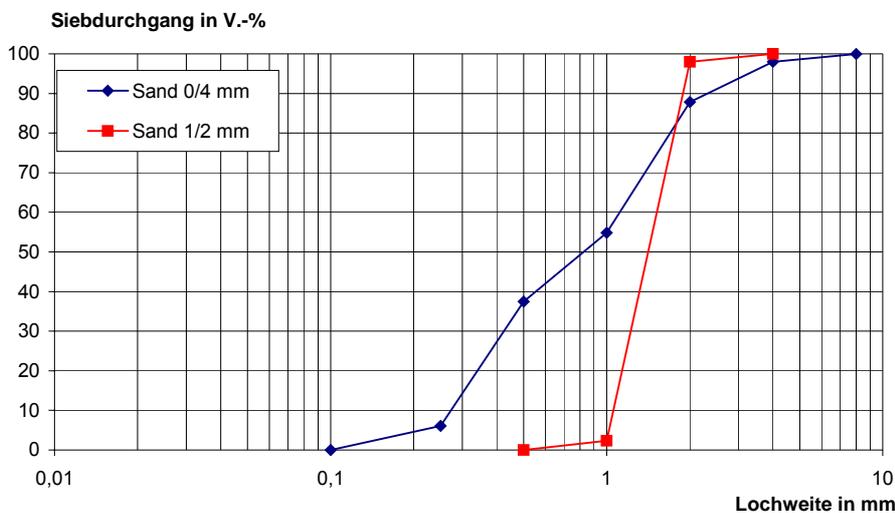


**Bild 4:** Tiefenprofil der Stoffe Kalium, Barium und Chrom nach 24 Stunden Versuchsdauer, blindwertbereinigt

Die Tiefenprofile zeigen, wie auch schon bei früheren Untersuchungen /1/, deutliche Sprünge, die meist auf Schwankungen in den Blindwerten zurückzuführen sind. Mit Ausnahme von Barium ist kein signifikanter Anstieg der Konzentrationen mit der Versuchszeit feststellbar. Teilweise werden sogar geringere Werte nach 24 h gemessen als nach 8 und 12 h. Unter Umständen tritt hier eine Umwandlung in schlechter lösliche Verbindungen auf. Im Rahmen der Versuchsgenauigkeit kann davon ausgegangen werden, dass zwischen 8 und 24 h kein signifikanter Eintrag der Elemente Kalium und Chrom mehr stattfindet. Bei Barium wird dagegen ein deutlicher Anstieg festgestellt, der sich nach der Erhärtung des Betons fortsetzt (s. auch Abschnitt 2.4.2).

### 2.3.2.2 Vergleich der Freisetzung bei unterschiedlichen Sanden

In /1/ wurden mit demselben Beton statische Versuche mit einem Versuchssand der Körnung 0/4 mm durchgeführt. Die Sieblinien der Versuchssande sind in Bild 5 dargestellt.



**Bild 5:** Sieblinien der verwendeten Sande

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der statischen Versuche mit den beiden Sanden gegenübergestellt. Angegeben ist die Gesamtfreisetzung bezogen auf die Oberfläche des Betons.

**Tabelle 3:** Gesamtfreisetzung im statischen Versuch bei 24 h Versuchsdauer, bezogen auf die Oberfläche des Betons

Parameter	Einheit	Freisetzung in Sand	
		0/4 mm, /1/	1/2 mm
1	2	3	4
Kalium	mg/m <sup>2</sup>	7563,5	9388,5
Barium		n. b.	10,21
Chrom		4,01	7,37
Vanadium		< 0,82	1,46

n. b. nicht bestimmt

n. n. nicht nachweisbar

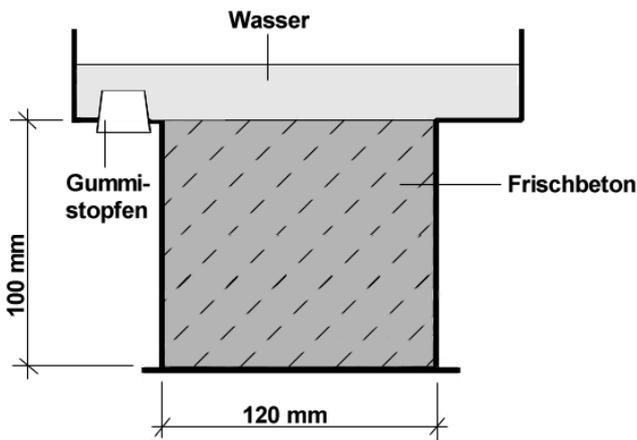
Vergleicht man die Ergebnisse, so wird deutlich, dass in dem durchlässigeren Boden (Sand 1/2 mm) etwas höhere Schadstoffmengen freigesetzt werden. Es ist jedoch auch denkbar, dass in dem feineren Sand höhere Schadstoffmengen durch Adsorption gebunden werden und daher im Eluat geringere Konzentrationen bestimmt werden.

## 2.4 Frischbetonstandtest

Die Ermittlung des Freisetzungsverlaufs ist im statischen Versuch nur eingeschränkt möglich, da keine Werte < 8 h ermittelt werden konnten. Daher wurde zur genaueren Bestimmung der Frischbetonstandtest entwickelt. In diesem Versuch wird die Freisetzung von Schadstoffen aus Frischbeton bei direktem Kontakt zu Grundwasser simuliert. Dies hat zusätzlich den Vorteil, dass die Versuchsdurchführung erheblich vereinfacht wird und die Streuung der Hintergrundwerte geringer ausfällt.

### 2.4.1 Versuchsbeschreibung

Die Versuchseinrichtung für den Frischbetonstandtest ist in Bild 6 dargestellt.



**Bild 6:** Schematische Darstellung des Frischbetonstandtests

Der Frischbeton wird in den unteren Teil der Form eingefüllt, verdichtet und sorgfältig abgestrichen, so dass sich auf dem auskragenden Rand der Form kein Beton befindet. Das Wasser wird vorsichtig von der Seite her in den oberen Teil eingefüllt. Die Betonoberfläche soll dabei möglichst wenig gestört werden. Der Versuch wird mit einem Verhältnis von Wasservolumen zu Oberfläche Beton von  $V/O = 75 \text{ l/m}^2$  durchgeführt. Das Wasser wird durch Herausziehen des Gummistopfens gewechselt, wobei jeweils eine Probe genommen wird.

Es wurden drei Doppelbestimmungen mit einer Betonmischung durchgeführt; die Entnahmezeiten sind in Tabelle 4 angegeben. Auch bei diesem Versuch wurden Blindproben untersucht.

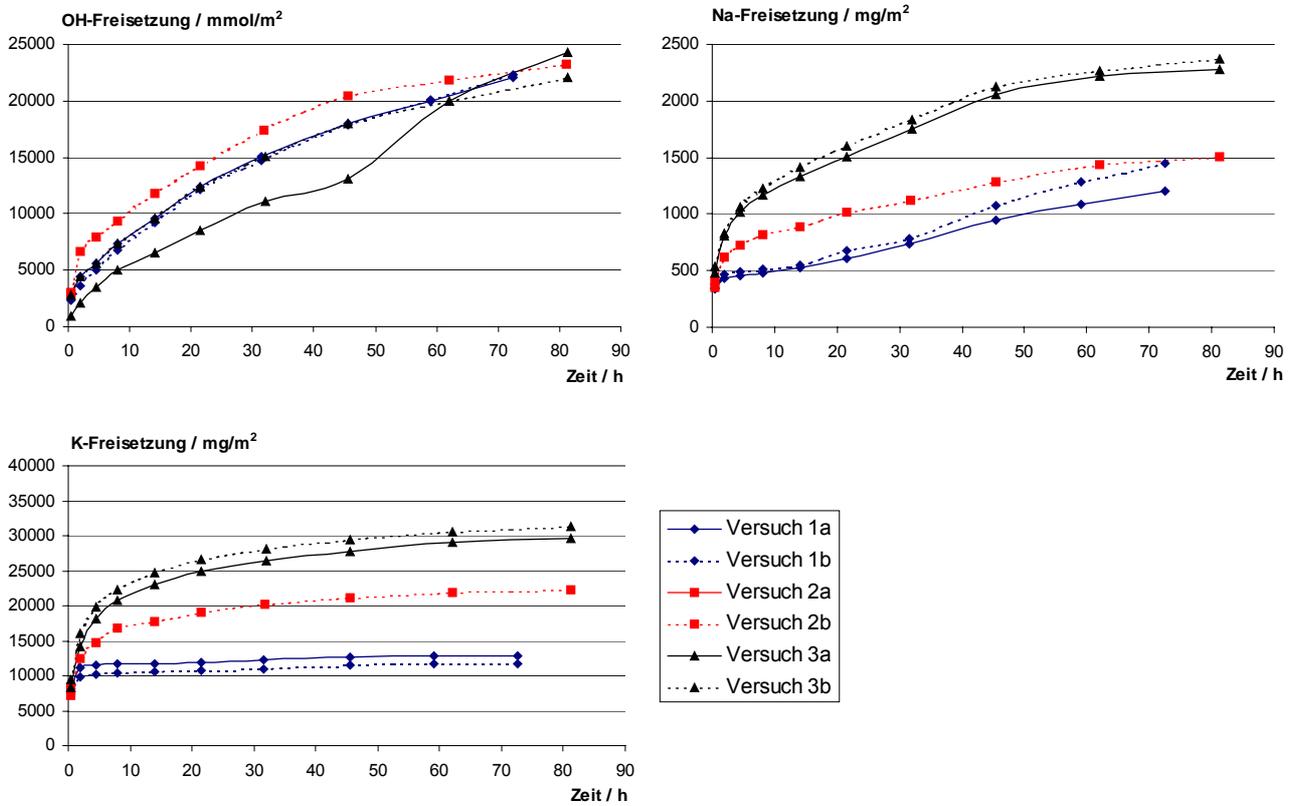
**Tabelle 4:** Entnahmezeiten beim Frischbetonstandtest

Eluat Nr.	Entnahmezeiten		
	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
-	h		
1	2	3	4
1	0,5	0,5	0,5
2	2,0	2,0	2,0
3	4,5	4,5	4,5
4	8,0	8,0	8,0
5	14,0	14,0	14,0
6	21,5	21,5	21,5
7	31,5	31,8	32,0
8	45,5	45,5	45,5
9	59,0	62,0	62,0
10	72,5	81,2	81,3

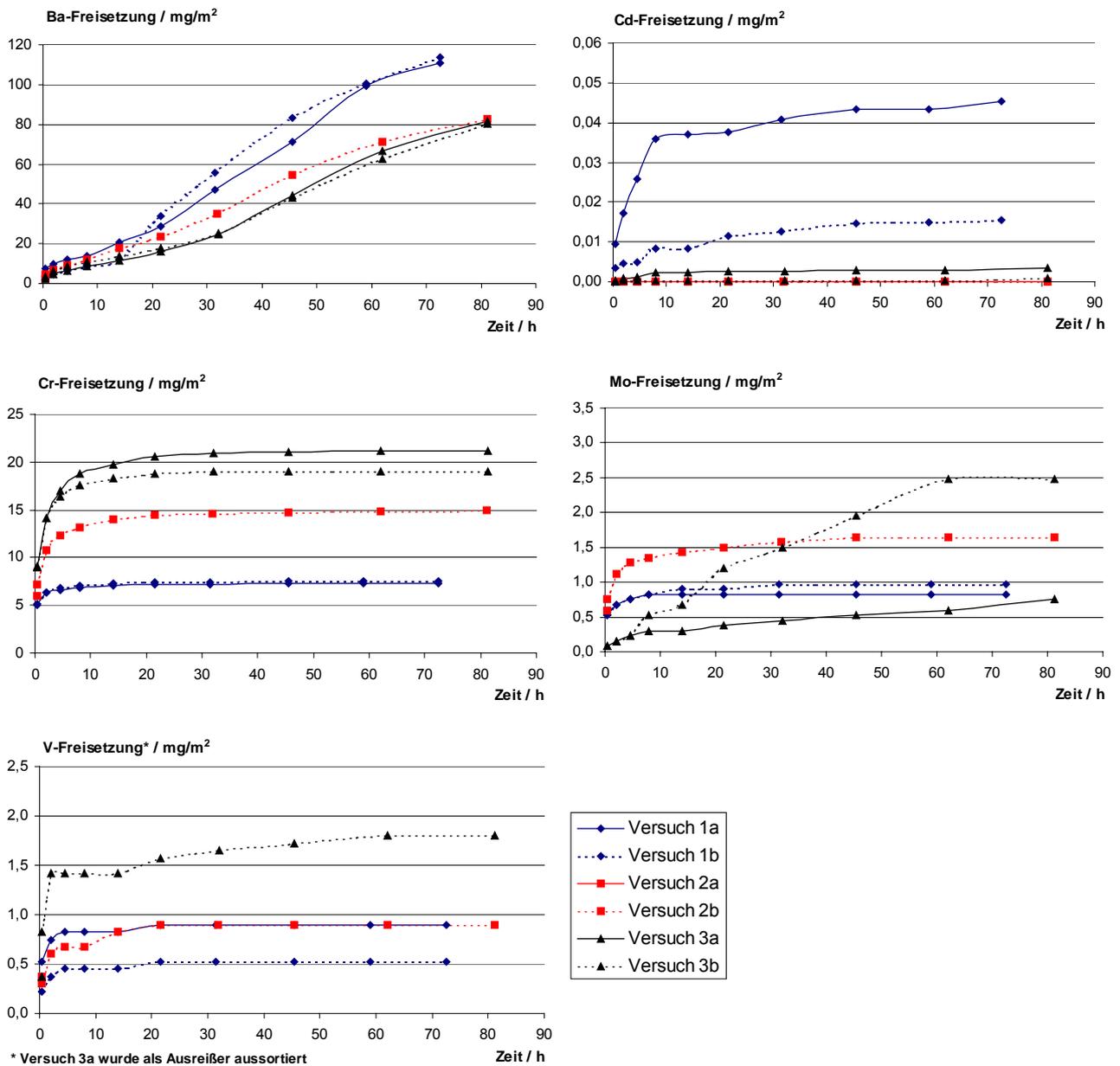
Der Frischbetonstandtest wurde ebenfalls mit dem Beton B1 aus /1/ durchgeführt (s. Tabelle A3). Die Hauptbestandteile und Spurenelemente des verwendeten Zements sind in den Tabellen A1 und A2, Spalte 3, angegeben.

## 2.4.2 Ergebnisse des Frischbetonstandtests

Die Ergebnisse der Eluatanalysen sind in den Tabellen A9 und A10 enthalten. Die Blindwerte sind in Tabelle A8 wiedergegeben. Es zeigte sich, dass die Blindwerte bei den Einzelversuchen unterschiedlich waren, so dass bei der weiteren Berechnung jeweils der Blindwert des betreffenden Versuchs berücksichtigt wurde anstatt eine Mittelung der Blindwerte vorzunehmen. Lag der Versuchswert unter dem Blindwert, so wurde die blindwertbereinigte Konzentration zu Null angesetzt. Aus den Konzentrationen wurde die Freisetzung bezogen auf die Oberfläche des Frischbetons berechnet und über die Versuchsdauer aufsummiert. Die Freisetzungsverläufe sind in den folgenden Bildern dargestellt.



**Bild 7:** Freisetzung von OH<sup>-</sup>-Ionen, Natrium und Kalium im Frischbetonstandtest bei drei Wiederholungsmessungen (Doppelbestimmungen) an einer Betonrezeptur



**Bild 8:** Freisetzung der untersuchten Spurenelemente im Frischbetonstandtest bei drei Wiederholungsmessungen (Doppelbestimmungen) an einer Betonrezeptur

Die Freisetzung von Kalium, Cadmium, Chrom, Molybdän und Vanadium klingt i. d. R. nach 5 h deutlich ab. Nach 10 bis 24 h ist häufig kein Austrag mehr festzustellen. Dies erklärt, warum im statischen Versuch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchslaufzeiten von 8, 12 und 24 h festgestellt wurden. Die OH<sup>-</sup>-Ionen und Natrium werden über die gesamte Versuchszeit in gut messbaren Konzentrationen ausgelaugt, allerdings geht auch hier die Auslaugrate mit der Zeit zurück. Barium wird in den ersten 10 h nur wenig ausgelaugt, dann steigt die Freisetzung deutlich an. Nach ca. 60 h flacht die Steigung der Kurve leicht ab, d. h. die Auslaugrate geht zurück. Dieses Auslaugverhalten von Barium wurde auch in /2/ festgestellt (wobei die Versuche dort nur über einen Zeitraum von 24 h durchgeführt wurden) und wird durch die Ergebnisse des statischen Versuchs bestätigt.

Der Grund für den Anstieg der Bariumauslaugung könnte darin liegen, dass Barium zunächst als Sulfat und/oder Chromat ausfällt. Nach ca. 10 h geht die Freisetzung von Chrom auf annähernd Null zurück. Die Sulfatfreisetzung wurde hier nicht bestimmt; aus /2/ liegen jedoch einige Ergebnisse vor, die zeigen, dass auch Sulfat nach 8 bis 10 h praktisch nicht mehr freigesetzt wird. Dieser Rückgang der Anionen im Eluat könnte zu einem Anstieg der Bariumkonzentration führen.

Gegen diese Theorie spricht, dass die Löslichkeiten von Bariumchromat und Bariumsulfat hier deutlich unterschritten werden. Bei reinem Bariumchromat liegt das Löslichkeitsprodukt bei  $1,6 \cdot 10^{-10} \text{ mol}^2/\text{l}^2$  /8/. Das entspricht einer Bariumkonzentration von 1,74 mg/l. Im Versuch wurden in den ersten Stunden nach Versuchsbeginn maximal 98 µg/l gemessen. Auch die im Versuch gemessene Chromkonzentration von maximal 122 µg/l lag deutlich unter dem theoretischen Wert von 658 µg/l, der sich aus dem Löslichkeitsprodukt für reines Bariumchromat ergibt.

Bariumsulfat hat ein Löslichkeitsprodukt von  $1 \cdot 10^{-10} \text{ mol}^2/\text{l}^2$ , /8/, und weist damit in der Sättigungskonzentration 1,37 mg/l Barium und 0,96 mg/l Sulfat auf. Die Bariumkonzentration wird im Versuch nicht erreicht (s. o.). Sulfat wurde hier nicht bestimmt, in /2/ wurden jedoch deutlich höhere Sulfatwerte, bis rd. 40 mg/l gemessen. Geht man von dieser Sulfatkonzentration aus, so fällt aufgrund des Löslichkeitsprodukts die Bariumkonzentration ab; es würden dann nur noch 33 µg/l in der Lösung vorliegen. Dieser Wert kommt den gemessenen Werten deutlich näher.

Weiterhin ist zu beachten, dass der pH-Wert und die anderen Ionen in der Lösung Einfluss auf die Löslichkeit haben. Das Ausfallen von Bariumchromat/-sulfat in den ersten Stunden des Versuchs kann daher anhand der vorliegenden Daten weder eindeutig belegt noch ausgeschlossen werden.

Betrachtet man die Reproduzierbarkeit der Versuche, so ist festzustellen, dass Abweichungen um einen Faktor 2 bis 3 auftreten können. Bei den Stoffen, die in einem gut messbaren Konzentrationsbereich liegen (Natrium, Kalium, Barium und Chrom), liefern die Parallelmessungen an Proben derselben Charge meist gut übereinstimmende Werte, die Abweichungen der Versuche untereinander sind jedoch groß. Hierfür sind zwei Erklärungsansätze denkbar: Es ist möglich, dass der lösliche Gehalt an Schadstoffen in den Ausgangsstoffen nicht homogen ist. Dafür sind die Streuungen allerdings sehr groß. Desweiteren könnten Schwankungen in der Reaktionsgeschwindigkeit zu unterschiedlichen Freisetzungen führen.

Bei Cadmium, Molybdän und Vanadium kommen zu den Schwankungen in den Ausgangsstoffen noch die analytischen Streuungen hinzu, so dass auch die Parallelmessungen teilweise deutlich voneinander abweichen.

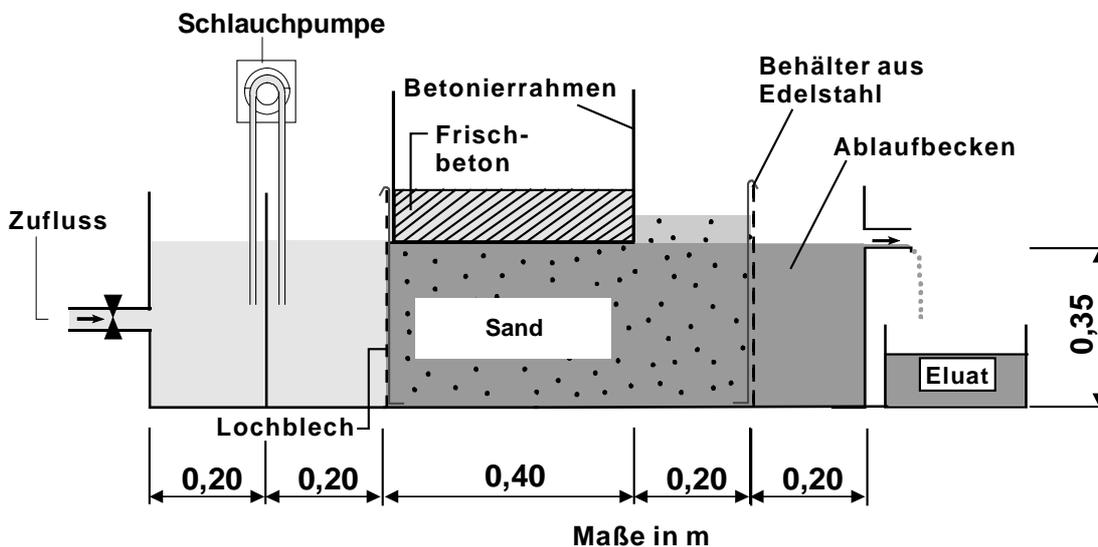
## **2.5 Untersuchungen zur Bestimmung des Einflusses der Fließgeschwindigkeit**

Neben den statischen Versuchen sind in /1/ Versuche mit strömendem Grundwasser mit einer Fließgeschwindigkeit von ca. 1 m/d durchgeführt worden. Es wurde der Verlauf der Schadstoffkonzentrationen in ausgewählten Abständen von der Betonauflage ermittelt. In diesem dynamischen Versuch traten deutlich höhere Freisetzungen auf als bei den statischen Versuchen. Daher sollte der Einfluss der Fließgeschwindigkeit in diesem Fortsetzungsprojekt näher untersucht werden. Da der dynamische Versuch nach /1/ sehr aufwendig ist und eine sehr hohe Anzahl an Eluatn produziert wird, sollte ein modifizierter Versuch mit geringerem Prüfumfang entwickelt werden. In diesem Versuch wurde die Fließgeschwindigkeit variiert. Die Versuchsdurchführung ist im folgenden Abschnitt beschrieben.

## 2.5.1 Versuchsbeschreibung

### 2.5.1.1 Versuchseinrichtung

Die Versuchseinrichtung zum dynamischen Versuch aus /1/ wurde so umgebaut, dass sich die Fließstrecke von 2,4 m auf 0,6 m verkürzt. Die bisher durchgeführte Einstellung der Fließgeschwindigkeit über die Höhendifferenz  $\Delta h$  des Einlauf- und Ablaufbeckens war nun nicht mehr möglich, da  $\Delta h$  über diese Entfernung bei den angestrebten Fließgeschwindigkeiten zu klein wird. Deshalb wurde eine Pumpe angeschafft, mit der die gewünschten niedrigen Fließgeschwindigkeiten eingestellt werden können. Die Versuchseinrichtung ist in Bild 9 dargestellt.



**Bild 9:** Schematische Darstellung des modifizierten dynamischen Versuchs

Vor Versuchsbeginn wird der Sand ca. 2 d lang mit einer Fördermenge von ca. 5 l/h Leitungswasser gespült. Dann wird die Fördermenge  $q$  entsprechend der gewählten Fließgeschwindigkeit eingestellt (s. Gleichung (1)).

$$q = \frac{v \cdot V_{\text{Wasser}}}{\frac{l}{2} \cdot 24 \frac{h}{d}} \tag{1}$$

$q$  : Fördermenge in l/h

$v$  : Fließgeschwindigkeit in m/d

$l$  : Fließstrecke;  $l = 0,6$  m

$V_{\text{Wasser}}$  : Wassermenge im Sandbett;  $V_{\text{Wasser}} = 37,2$  l

### 2.5.1.2 Verwendete Mischung

Dieser Versuch wurde mit Mörtel anstelle von Beton durchgeführt, da neben den Eluatanalysen auch Analysen an eluierten Probekörpern durchgeführt werden sollten. Durch die Verwendung von Mörtel wird eine homogenere Probenzusammensetzung bei den relativ kleinen Probemengen erreicht. Es ist dabei jedoch nicht auszuschließen, dass die Verwendung von Mörtel statt Beton einen Einfluss auf die Freisetzung hat. Die Zusammensetzung des Mörtels ist in Tabelle A3 gegeben. Da die Restbestände des Zements aus /1/ aufgebraucht waren, musste ein neuer Zement eingesetzt werden (s. Tabelle A1 und A2).

### 2.5.1.3 Durchführung des Versuchs

Der Frischbeton bzw. -mörtel wird direkt nach Beendigung des Mischvorgangs auf der Zulaufseite des Sandbetts auf der Höhe des Wasserspiegels aufgebracht. Hierfür wird ein Betonierahmen verwendet. Schalöl wird nicht eingesetzt. Die Messung der Schadstoffkonzentration erfolgt, wie im Bild 9 dargestellt, im Überlauf des Ablaufbeckens. Das Eluat wird über festgelegte Zeiträume gesammelt und dann beprobt. Diese Vorgehensweise hat gegenüber der Beprobung in /1/ (Einzelproben zu ausgewählten Zeitpunkten) den Nachteil, dass die gemessene Konzentration einen Mittelwert über das Zeitintervall darstellt und der genaue Wert zum Zeitpunkt der Probenahme nicht erfasst wird. Dafür ist hier jedoch sichergestellt, dass die am Überlauf ausgetragene Schadstoffmenge vollständig erfasst wird. Zusätzlich zu der Beprobung am Überlauf wurde am Ende des Versuchs eine Probe aus dem Ablaufbecken genommen.

Es wurden drei Fließgeschwindigkeiten festgelegt und entsprechende Entnahmezeitpunkte für das Eluat bestimmt (s. Tabelle 5). Die Versuchslaufzeiten sind so festgelegt worden, dass die Wassermenge im Sandbett mindestens dreimal ausgetauscht wurde ( $V \geq 3 \cdot V_{\text{Wasser}} = 111,5 \text{ l}$ ). Aufgrund der Arbeitszeiten wurden jeweils ganze Tage gewählt. Mit jeder Fließgeschwindigkeit wurden zwei Versuche durchgeführt.

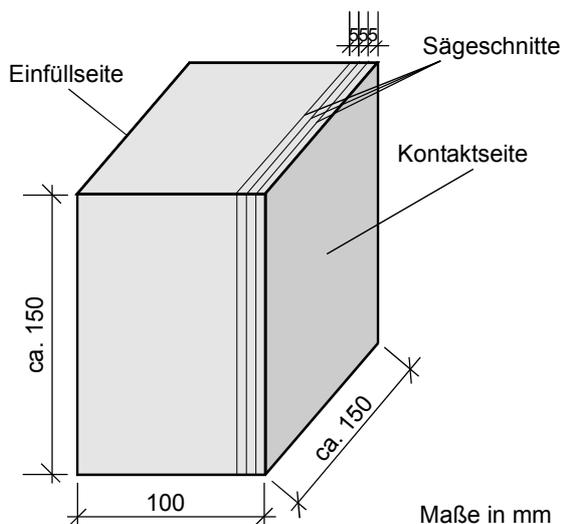
**Tabelle 5:** Angaben zur Versuchsdurchführung der modifizierten dynamischen Versuche

Ver- such	Förder- menge	Fließge- schwindigkeit	Mittlere Fließ- geschwindigkeit	Versuchs- dauer	Entnahme- zeiten	Gesamt- wassermenge <sup>1)</sup>
-	l/h	m/d	m/d	h		l
1	2	3	4	5	6	7
V1a	2,11	0,41	0,39	48	6, 12, 24, 36, 48	129,3
V1b	1,94	0,38				121,3
V2a	4,33	0,84	0,86	24	1, 2, 4, 6, 8, 12, 16, 24	131,9
V2b	4,55	0,88				136,9
V3a	6,94	1,35	1,36	24	3, 6, 9, 12, 16, 24	194,7
V3b	7,07	1,37				197,8

1) am Überlauf aufgefangene Wassermenge + Inhalt des Ablaufbeckens

### 2.5.1.4 Untersuchung der Probekörper nach Versuchsende

Für die Untersuchung der eluierten Probekörper wurden die Versuche V1 und V3 ausgewählt. Nach Beendigung des Versuchs wurden die erhärteten Mörtelplatten ausgebaut. Da kein Schalöl verwendet wurde, musste der Mörtel aus dem Betonrahmen ausgestemmt werden. Dann wurde jeweils aus der Mitte der Platte ein Probekörper mit einer Oberfläche von ca.  $0,15 \cdot 0,15 \text{ m}^2$  herausgesägt. Um ein Auslaugprofil aufstellen zu können, wurden an der Kontaktseite drei 5 mm dicke Schichten abgesägt (s. Bild 10).


**Bild 10:** Probenpräparation bei der Analyse der eluierten Mörtelplatten

Alle Sägearbeiten wurden trocken durchgeführt. Die Breite der Schnittfuge lag bei 2 mm, so dass die Proben aus einer Tiefe von 0 bis 3 mm, 5 bis 8 mm und 10 bis 13 mm stammen. Zum Vergleich wurde eine Probe an der nicht eluierten Einfüllseite entnommen. Die einzelnen Schichten wurden bei 105 °C getrocknet, < 125 µm aufgemahlen und analysiert (s. Abschnitt 2.5.3).

## 2.5.2 Ergebnisse der Elution im modifizierten dynamischen Versuch

Vor Beginn jedes Versuchs wurden am Überlauf einige Blindproben genommen. Für alle Parameter lagen je Versuch drei bis fünf Einzelwerte vor. Tabelle A11 zeigt die berechneten Mittelwerte für die untersuchten Parameter. Die Ergebnisse der Eluatanalysen nach Aufbringen des Mörtels sind in den Tabellen A12 und A13 und den Bildern B1 und B2 dargestellt. Bei der graphischen Darstellung wurde die ermittelte Konzentration jeweils über der Mitte des Zeitintervalls aufgetragen, in dem das Eluat angefallen ist.

Aus den Bildern B1 und B2 ist ersichtlich, dass die Versuche in Anbetracht der bei Experimenten dieser Art üblichen Schwankungsbreiten eine gute Reproduzierbarkeit zeigen. Die Freisetzungen von Natrium, Barium und Cadmium sind so klein, dass nur eine geringfügige oder keine Erhöhung der Hintergrundkonzentration auftritt. Die Geringfügigkeitsschwellen von Barium, Cadmium und Molybdän werden deutlich unterschritten (Ba: GFS = 340 µg/l; Cd: GFS = 0,5 µg/l, Mo: GFS = 35 µg/l, /5/), d. h. diese Elemente werden nicht in umweltrelevantem Maße freigesetzt. Da bei Molybdän jedoch gut messbare Konzentrationserhöhungen auftraten, wurde das Element mit ausgewertet. Bei der Leitfähigkeit tritt eine Überlagerung mit der Streuung des Leitungswassers auf, so dass größere Schwankungen auftreten als beispielsweise beim pH-Wert.

In Bild 11 sind die gemittelten Verläufe von pH-Wert sowie Kalium-, Chrom-, Molybdän- und Vanadiumkonzentration für die drei Fließgeschwindigkeiten dargestellt. Auf diese Parameter soll im folgenden näher eingegangen werden. Die nicht ausgefüllten Marker zeigen die Konzentration im Ablaufbecken zum Versuchsende an.

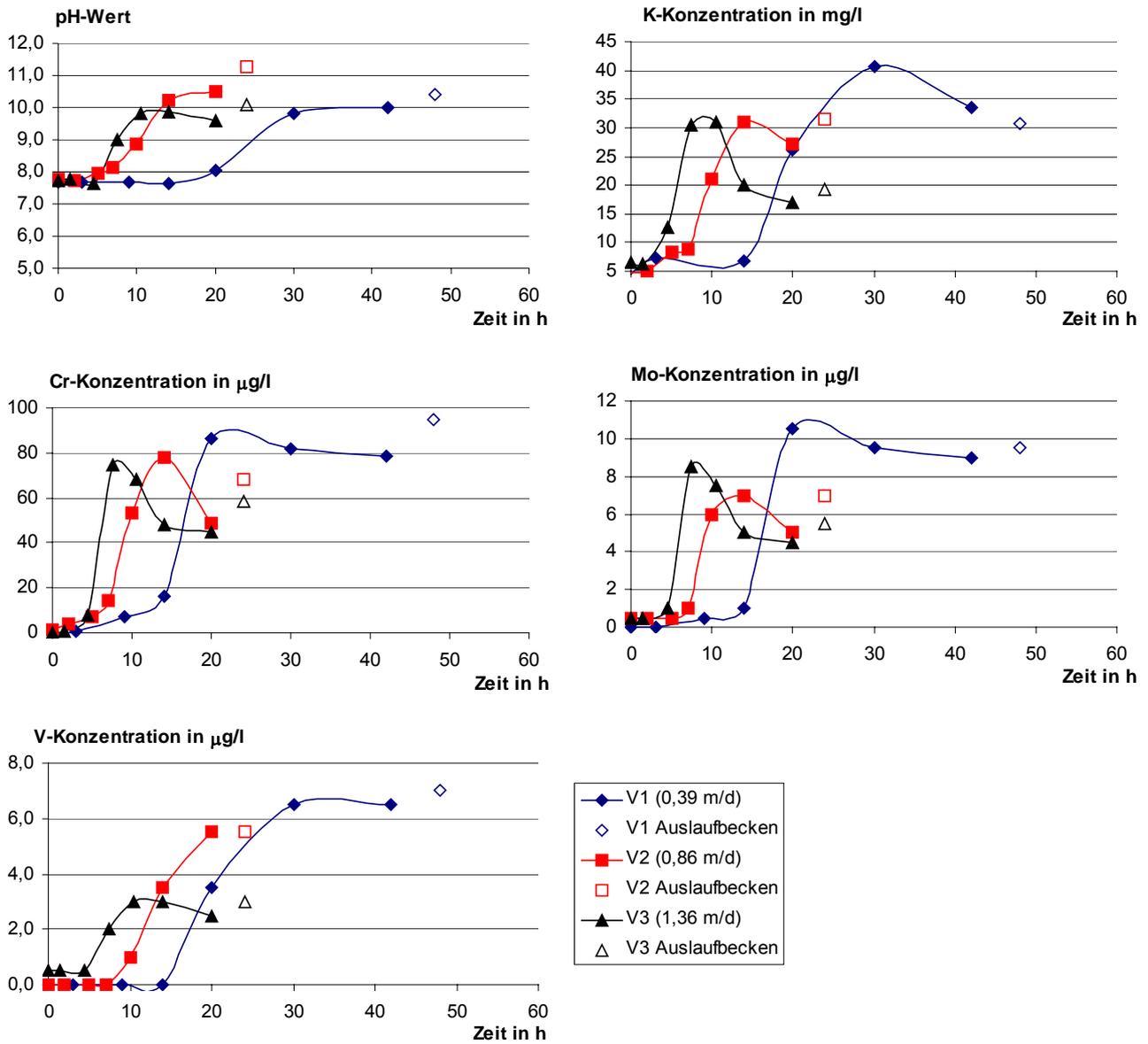


Bild 11: Entwicklung des pH-Werts sowie der Kalium-, Chrom-, Molybdän- und Vanadiumkonzentration im Überlauf des modifizierten dynamischen Versuchs

Es ist ersichtlich, dass der Anstieg der Konzentrationen von Kalium, Chrom und Molybdän für alle Fließgeschwindigkeiten einige Stunden vor dem pH-Wert-Anstieg beginnt. Das lässt darauf schließen, dass die pH-Wert-Änderung im Sand zunächst abgepuffert wird. Dieser Effekt wurde auch schon in /1/ festgestellt. Dass Kalium, Chrom und Molybdän ihre maximalen Konzentrationen unabhängig vom pH-Wert zu gleichen Zeiten erreichen, lässt darauf schließen, dass hier der Transport durch die Strömungsgeschwindigkeit bestimmt wird und chemische Prozesse durch pH-Wert-Änderungen im Sand keinen signifikanten Einfluss haben. Die Vanadiumkonzentrationen dagegen steigen fast durchgehend zeitgleich mit dem pH-Wert an. Nach /3/ steigt die Löslichkeit von Vanadium in zementgebundenen Materialien ab pH 8 an und erreicht ca. bei pH 9 ein Maximum. Daher tritt offenbar keine messbare Vanadiumfreisetzung auf, solange der pH im neutralen Bereich abgepuffert wird.

Bezüglich des Einflusses der Fließgeschwindigkeit lassen sich nur tendenzielle Aussagen treffen, da dieser Effekt von der Versuchsstreuung überlagert wird. Es deutet sich jedoch an, dass mit abnehmender Fließgeschwindigkeit höhere Konzentrationen erreicht werden und ein langsamerer Rückgang der Konzentration auftritt. Dies ist auf die größere Verdünnung bei den höheren Fließgeschwindigkeiten zurückzuführen. Um den Einfluss der Verdünnung auszuschalten, sollen die Freisetzungen betrachtet werden. Hier ist zu beachten, dass die gemessenen Konzentrationen im Überlauf und im Ablaufbecken nicht die gesamte freigesetzte Menge der Stoffe wiedergeben, da die Schadstoffmengen, die im Sandbett adsorbiert und im dort befindlichen Wasser gelöst sind, nicht erfasst werden. Die ermittelte Freisetzung ist daher als Quellterm nur bedingt geeignet. Um alle gelösten Anteile zu erfassen, müsste der Versuch über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden, bis die Konzentration am Überlauf wieder auf die Hintergrundkonzentration abgesunken ist.

In Bild 12 ist die Freisetzung von Kalium, Chrom, Molybdän und Vanadium, bezogen auf die Betonoberfläche, über der Wassermenge aufgetragen, die im Überlauf aufgefangen worden ist. Der letzte Datenpunkt jeder Kurve gibt die freigesetzte Schadstoffmenge im Ablaufbecken wieder. Die Berechnung der Freisetzung erfolgte nach Gleichung (2).

$$E_j = \sum_{i=1}^j \frac{(c_i - c_0) \cdot V_i}{A} \quad (2)$$

$E_j$  : Gesamtfreisetzung nach Zeitintervall  $j$  in  $\text{mg}/\text{m}^2$

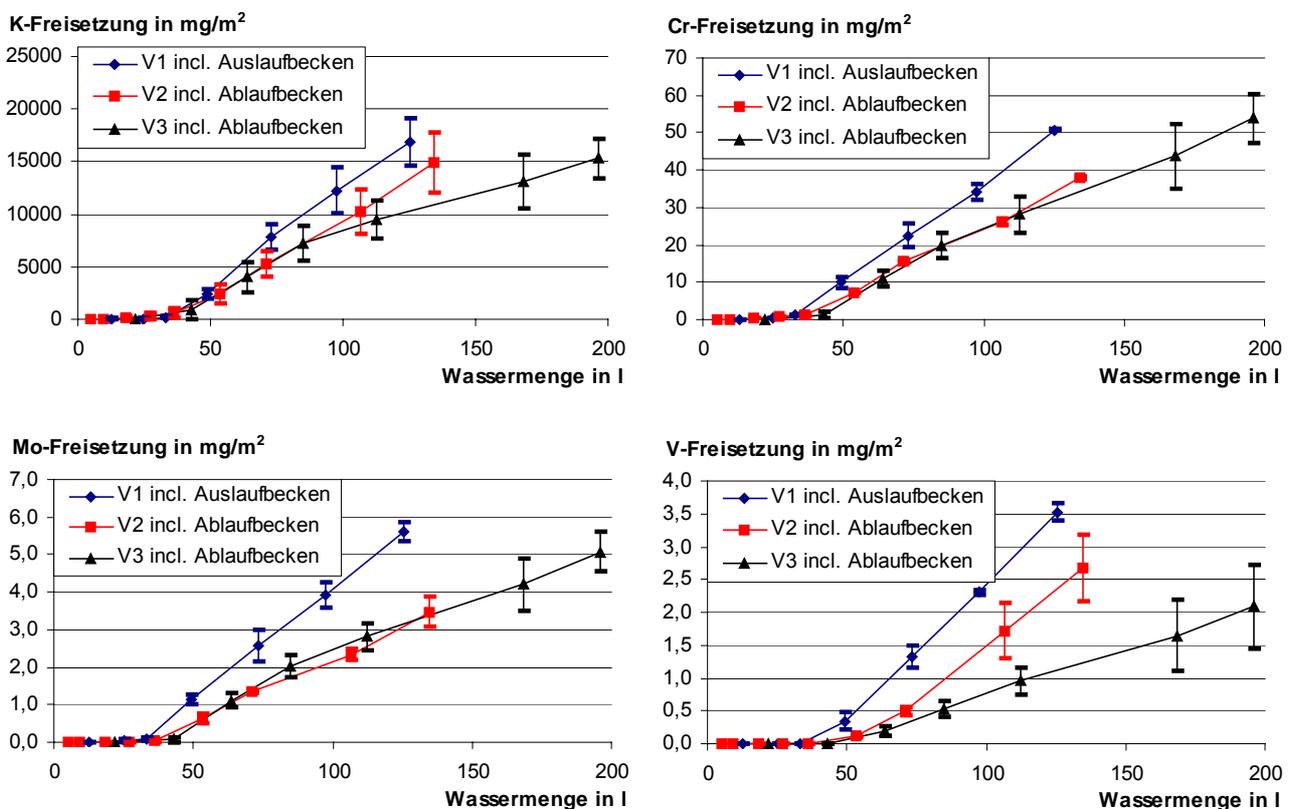
$c_i$  : gemessene Konzentration im Eluat des Zeitintervalls  $i$  in  $\text{mg}/\text{l}$  (s. Tabelle A11 / A12)

$c_0$  : Hintergrundkonzentration in  $\text{mg}/\text{l}$  (s. Tabelle 5)

$V_i$  : Wassermenge in  $\text{l}$ , die im Zeitintervall  $i$  im Überlauf aufgefangen wurde bzw. bei der letzten Messung im Ablaufbecken vorhanden war.

$A$  : Oberfläche des Betons,  $A = 0,16 \text{ m}^2$

Als Bezugsgröße wurde die Wassermenge anstelle der Zeit gewählt, weil die bewegte Wassermenge für den Schadstofftransport wesentlicher ist als die dafür benötigte Zeit. Der Anstieg der im Überlauf gemessenen Freisetzung beginnt daher für alle Fließgeschwindigkeiten in einem Punkt. Dies ermöglicht einen besseren Vergleich der Ergebnisse.



**Bild 12:** Im Überlauf und Ablaufbecken gemessene Freisetzung von Kalium, Chrom, Molybdän und Vanadium (in  $\text{mg}/\text{m}^2$  Betonoberfläche) aufgetragen über der Wassermenge ( $v_1 = 0,39 \text{ m}/\text{d}$ ,  $v_2 = 0,86 \text{ m}/\text{d}$ ,  $v_3 = 1,36 \text{ m}/\text{d}$ )

Der Anstieg der Freisetzung beginnt jeweils bei knapp 40 l. Bei Kalium, Chrom und Molybdän steigt die Freisetzung ab dem Eintreffen der ersten Schadstoffe linear an. Bei Vanadium verläuft der Anstieg zunächst etwas flacher. Dies entspricht der verzögerten Konzentrationserhöhung aufgrund des abgepufferten pH-Werts. Innerhalb des untersuchten Zeitraums ist i. d. R. kein Abklingen der Freisetzung festzustellen. Nur Kalium und Molybdän zeigen bei der schnellsten Fließgeschwindigkeit ein Abflachen der Kurve bei ca. 85 l Wassermenge.

Der Vergleich der Fließgeschwindigkeiten zeigt, dass die geringste Fließgeschwindigkeit den steilsten Freisetzungsanstieg liefert (der Unterschied zwischen der mittleren und der schnellen Fließgeschwindigkeit ist meist weniger signifikant). Dieser Effekt tritt nur auf, wenn man die Freisetzung über der Wassermenge aufträgt. Wählt man die Zeit als Bezugsgröße, so wird bei der langsamsten Fließgeschwindigkeit eher eine geringere Steigung festgestellt. Dies spricht dafür, dass hier die Kinetik der Lösungsvorgänge eine wichtige Rolle spielt. Bei langsam fließendem Wasser kann eine stärkere Aufkonzentration erreicht werden, daher steigt die Kurve in Bild 12 steiler an. Trägt man die Freisetzung über der Zeit auf, so wird bei der langsamen Fließgeschwindigkeit in der gleichen Zeit eine geringere Menge belastetes Wasser ausgetragen. Dadurch ist der Freisetzungsanstieg im Verlauf der Zeit flacher. Anhand der Versuche kann leider noch nicht abgeschätzt werden, welche Fließgeschwindigkeit den höchsten Gesamtaustrag liefert. Die Versuchszeiten wurden anhand des dynamischen Versuchs /1/ abgeschätzt. Dort zeigte sich nach 8 h bereits ein weitgehender Rückgang der Schadstoffkonzentration in einer Entfernung von 0,15 bis 0,3 m von der Betonaufgabe. Nach 24 h war der Wert auf den Hintergrundwert abgefallen. Es ist zu vermuten, dass durch das zwischengeschaltete Ablaufbecken im modifizierten Versuch eine Verdünnung der Schadstoffe auftritt und der Austrag am Überlauf über einen längeren Zeitraum gestreckt wird.

Um weitere Aufschlüsse über die Auslaugung zu erhalten, wurden die eluierten Mörtelplatten untersucht. Dies ist im folgenden Abschnitt beschrieben.

### 2.5.3 Ergebnisse der Untersuchung der eluierten Mörtelproben aus dem modifizierten dynamischen Versuch

Aus den eluierten Mörtelplatten der Versuche V1 und V3 wurden entsprechend Abschnitt 2.5.1.4 Proben aus einer Tiefe von 0 bis 3 mm, 5 bis 8 mm und 10 bis 13 mm gewonnen. Die Proben wurden im  $\text{pH}_{\text{stat}}$ -Verfahren bei pH 12 sowie im Königswasser-aufschluss analysiert. Beim  $\text{pH}_{\text{stat}}$ -Verfahren wurde eine Auslaugzeit von 1 h angesetzt, da keine signifikanten Unterschiede zur Elution über 24 h auftraten.

Zu Vergleichszwecken wurden Proben von der nicht eluierten Oberseite der Mörtelplatten entnommen. Die Ergebnisse der Untersuchung dieser Referenzproben sind in Tabelle A14 gegeben. Die Ausreißer wurden nach Dixon bestimmt. Sie sind in der Tabelle fettgedruckt ausgewiesen. Die Tabellen A15 und A16 zeigen die Ergebnisse für einzelnen Schichten der Kontaktseite. Zur Veranschaulichung sind die Ergebnisse für die nachweisbaren Parameter in Bild B3 ( $\text{pH}_{\text{stat}}$ -Verfahren) und B4 (Gesamtgehalte nach Königswasser-aufschluss) graphisch dargestellt. Die gemessenen Werte wurden dabei jeweils über der Mitte der entnommenen Schicht aufgetragen.

Im  $\text{pH}_{\text{stat}}$  Versuch konnte eine deutliche Abnahme der Alkalienkonzentration in den ersten zwei untersuchten Schichten festgestellt werden. Der Kaliumgehalt beträgt auch in der 3. Schicht noch unter 50 M.-% der Ausgangsmenge. Bei den Spurenelementen konnte tendenziell ein Rückgang gegenüber der Referenzprobe bei Chrom und Molybdän festgestellt werden. In Anbetracht der Versuchsstreuungen kann hier jedoch keine gesicherte Aussage getroffen werden. Die löslichen Bariumgehalte liegen etwas höher als die Referenzwerte. Dies ist jedoch wahrscheinlich durch die Ungenauigkeiten der Analytik zu begründen. Cadmium und Vanadium aus dem  $\text{pH}_{\text{stat}}$ -Verfahren bei pH 12 sind meist nicht nachweisbar. Die Cadmiumgehalte sind sehr gering und in diesem pH-Bereich schlecht löslich. Die Vanadiumgehalte liegen zwar höher, aber es ist unter diesen Bedingungen praktisch unlöslich (s. auch /3/). Zur Verdeutlichung dieser Problematik sind in Tabelle 6 die bei pH 12 löslichen Anteile der Gesamtgehalte zusammengestellt (Mittelwert über alle durchgeführten Versuche).

**Tabelle 6:** Bei pH 12 eluierbare Anteile der Gesamtgehalte der untersuchten Spurenelemente (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung)

Parameter	Eluierbarer Anteil
-	M.-%
1	2
Barium	12,5 $\pm$ 2,4
Cadmium	< 3,0 bis 6,6
Chrom	21,6 $\pm$ 5,6
Molybdän	34,7 $\pm$ 15,9
Vanadium	< 1,0 bis 2

Bei der Analyse der Gesamtgehalte wurden nur die Spurenelemente betrachtet. Ein Rückgang der Gehalte in der äußersten Schicht ist ansatzweise bei Barium, bei Vanadium und bei Chrom in 2 von 4 Versuchen erkennbar. Bei Molybdän und Cadmium schwanken die Gehalte um den Wert der Referenzprobe.

Ein Unterschied zwischen den Fließgeschwindigkeiten ist in beiden Versuchen bei keinem Parameter festzustellen. Die Streuungen in den Schwermetallgehalten und bei der Analytik sind in diesem Versuch zu groß, um differenzierte Aussagen über die Auslaugmechanismen geben zu können.

### 3 GESAMTAUSWERTUNG

Ziel der Untersuchungen dieses Forschungsprojekts war es, den Freisetzungverlauf während der Frischbetonphase und im Übergang zum Festbeton zu ermitteln und einen Quellterm für die Transportsimulation zu ermitteln. In den folgenden Abschnitten soll überprüft werden, inwieweit die Ergebnisse der durchgeführten Versuche für diese Fragestellungen verwertbar sind. Dazu werden die Freisetzungen in ein Transportprogramm eingegeben und der dynamische Versuch aus /1/ nachgerechnet. Im folgenden Abschnitt werden daher zunächst das Modellgebiet und die Randparameter des Bodens beschrieben.

#### 3.1 Beschreibung der Modellrechnungen

Das Modellgebiet entspricht dem ursprünglichen dynamischen Versuch nach /1/ und ist in Bild 13 dargestellt.


**Bild 13:** Modellgebiet, Aufsicht

Die Modellparameter sind wie in /1/ festgelegt worden und in Tabelle 7 angegeben.

**Tabelle 7:** Modellparameter bei der Modellierung des dynamischen Versuchs, /1/

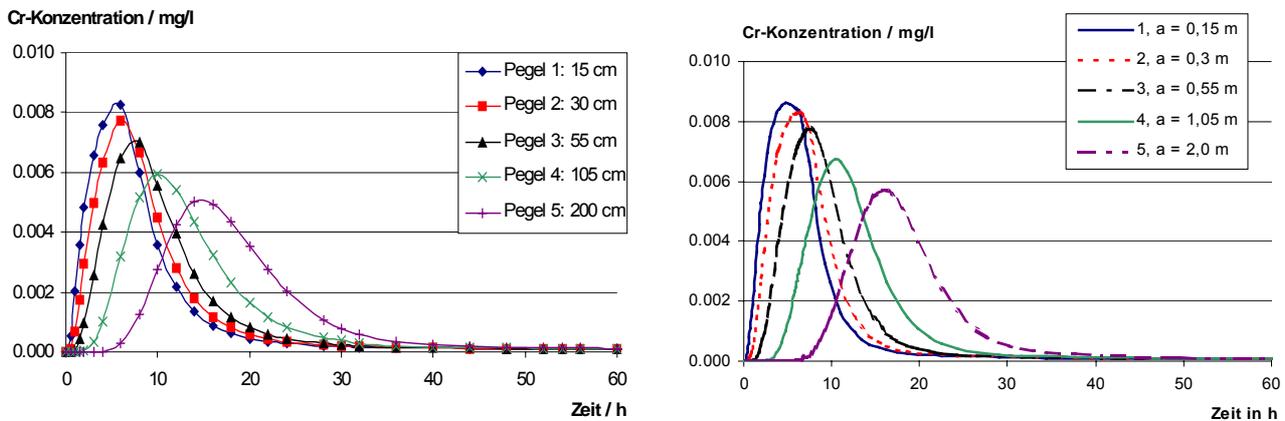
Parameter	Symbol	Einheit	gewählte Größe
1	2	3	4
Modellgröße	-	m · m	0,4 · 2,4
Durchlässigkeitsbeiwert	$k_f$	m/s	0,0123 <sup>1)</sup>
effektive Porosität	$n_e$	-	0,39 <sup>2)</sup>
Grundwassergefälle	$i$	-	$1,33 \cdot 10^{-3}$
Anisotropiefaktor	-	-	1
longitudinale Dispersionslänge <sup>3)</sup>	$\alpha_L$	m	0,1
Retardierungsfaktor	R	-	1,8

1) berechnet nach Darcy aus der gemessenen Fließgeschwindigkeit im dynamischen Versuch

2) Gesamtporosität  $n = V_p/V_{ges} = 0,44$ ; nach /6/ ist  $n_e$  bei diesem Boden um ca. 0,05 geringer.

3) Die Dispersion ist abhängig von der betrachteten Ausdehnung des Aquifers /7/.

Für die in diesem Projekt durchgeführten Modellierungen wurde das Transportprogramm FEFLOW eingesetzt, da die Eingabe des Schadstoffeintrags bei diesem Programm deutlich unkomplizierter ist als bei MODFLOW. Zum Vergleich der beiden Rechenprogramme wurde die in /1/ durchgeführte Modellierung an den Originaldaten wiederholt. Das Ergebnis ist in Bild 14 dargestellt



**Bild 14:** Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Rechenprogramme: links: MODFLOW, /1/, rechts: FEFLOW

Es ist ersichtlich, dass die Ergebnisse beider Transportprogramme sehr gut übereinstimmen. Tendenziell liefert FEFLOW etwas höhere Konzentrationen.

In /1/ wurde eine Retardierung von  $R = 1,8$  bestimmt. Bei FEFLOW wird die Retardierung durch Sorptionsisothermen berücksichtigt. Es wurde hier der einfachste Fall der Henry-Isothermen gewählt. Es gilt Gleichung (4), /4/.

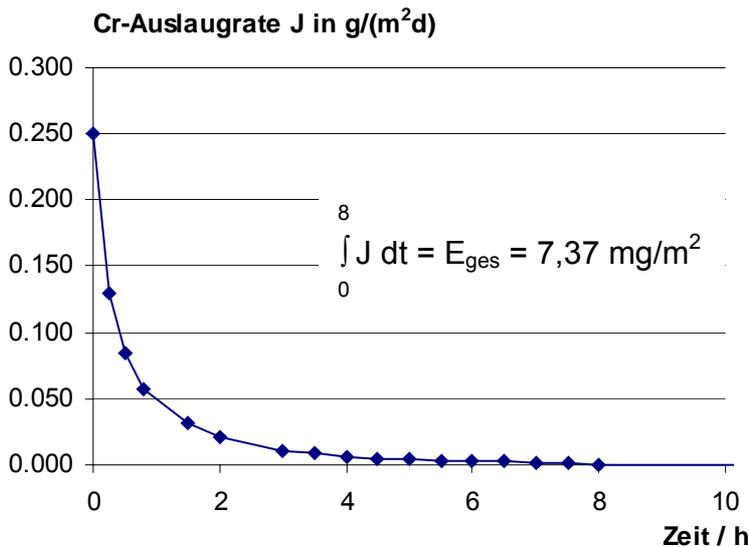
$$R = 1 + \frac{(1 - n_e)}{n_e} \kappa \quad (4)$$

Mit  $R = 1,8$  und  $n_e = 0,39$  ergibt sich der Sorptionskoeffizient zu  $\kappa = 0,51$ . Dieser Wert wird in FEFLOW eingegeben.

### 3.2 Statischer Versuch

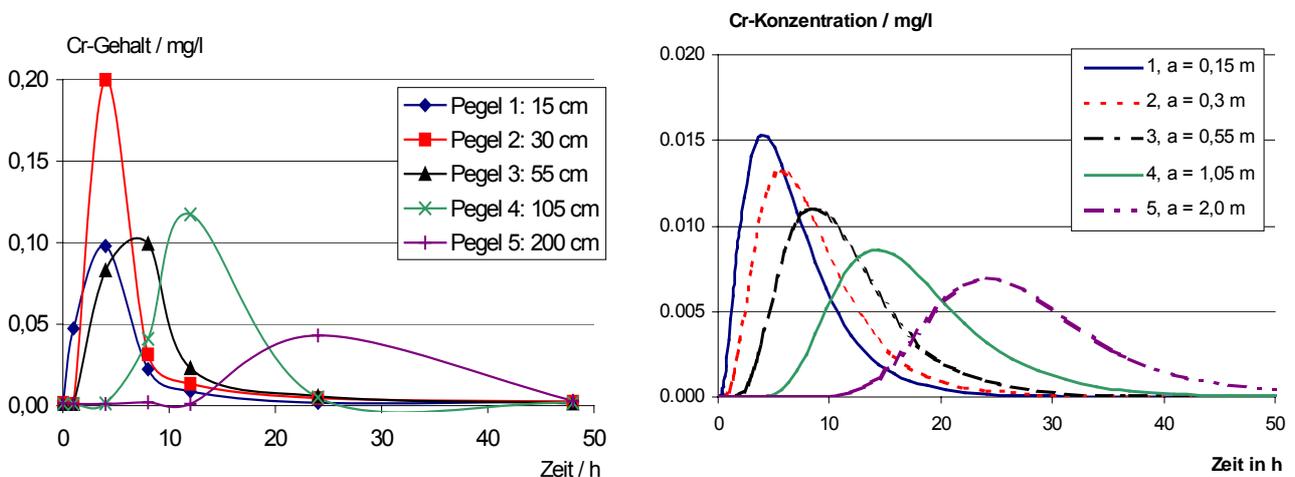
In /1/ hat sich gezeigt, dass die ermittelten Konzentrationen im dynamischen Versuch mit den Daten des statischen Versuchs nicht errechnet werden konnten. Offenbar wurden im statischen Versuch wesentlich geringere Schadstoffmengen freigesetzt als im dynamischen Versuch. Da die beiden Versuche mit unterschiedlichem Versuchssand durchgeführt worden sind, ist der statische Versuch in diesem Projekt mit dem gröberen Sand wiederholt worden (s. Abschnitt 2.3). In Tabelle 3 sind die Ergebnisse gegenübergestellt worden. Für das Beispiel Chrom, an dem die Transportsimulation durchgeführt wurde, sind mit dem gröberen Versuchssand etwas höhere Freisetzungen ermittelt worden. Die Modellierung wurde daher mit den neuen Daten wiederholt.

Die statischen Versuche mit kürzerer Laufzeit haben gezeigt, dass nach 8 h kein Eintrag mehr stattfindet. Weitere Ansatzpunkte für den Freisetzungsverlauf liefert der statische Versuch nicht. Daher ist der Verlauf der Freisetzung zwischen 0 und 8 h willkürlich festgelegt worden. Dabei wurde die Gesamtfreisetzung des Versuchs berücksichtigt (s. Bild 15).



**Bild 15:** gewählter Freisetzungsverlauf für den statischen Versuch mit Sand 1/2 mm (für  $t > 8 \text{ h}$  wird  $J = 0 \text{ g/(m}^2\text{d)}$  angesetzt)

Die berechneten Konzentrationen an den Beobachtungspunkten sind in Bild 16 den Messwerten aus /1/ gegenübergestellt.



**Bild 16:** Vergleich der im dynamischen Versuch gemessenen Konzentrationen, /1/ (links), mit den Werten, die aus der Freisetzung im statischen Versuch (Sandkörnung 1/2 mm) berechnet wurden (rechts)

Mit den hier verwendeten Ausgangsdaten werden etwas höhere Konzentrationen erzielt als in Bild 14. Das zeigt, dass der Versuchssand einen gewissen Einfluss hat; er ist jedoch offensichtlich nicht der wesentlichste Einflussfaktor, da in /1/ die Konzentrationen immer noch weit unter den im dynamischen Versuch gemessenen Werten liegen.

Der statische Versuch ist auch mit dem passenden Versuchssand zu Bestimmung des Quellterms ungeeignet.

### 3.3 Frischbetonstandtest

Der Frischbetonstandtest hat gegenüber dem statischen Versuch den Vorteil, dass neben dem Gesamtaustrag der Freisetzungverlauf bestimmt wird. Hieraus können die Eingabeparameter für das Transportprogramm direkt berechnet werden. In Bild 17 ist der mittlere Freisetzungverlauf der Messungen aus Abschnitt 2.4.2 mit der in den einzelnen Zeitabschnitten ermittelten Auslaugraten (s. Gleichung (3)) dargestellt.

$$J_i = \frac{(c_i - c_0) \cdot V}{A \cdot \Delta t_i} \quad (3)$$

$J_i$  : Auslaugrate im Zeitintervall  $i$  in  $\text{g}/(\text{m}^2\text{d})$

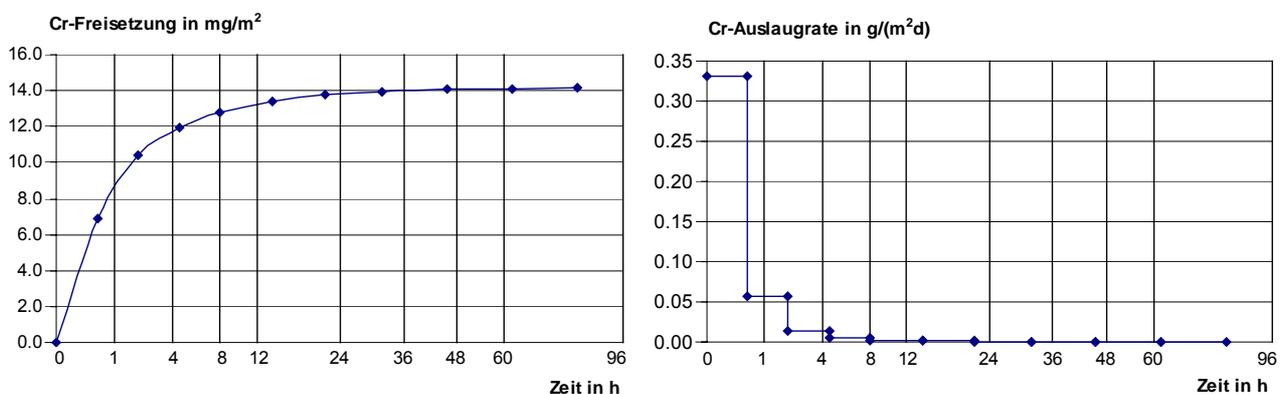
$c_i$  : gemessene Konzentration im Eluat des Zeitintervalls  $i$  umgerechnet in  $\text{g}/\text{l}$

$c_0$  : Hintergrundkonzentration umgerechnet in  $\text{g}/\text{l}$

$V$  : Volumen des Eluenten in  $\text{l}$

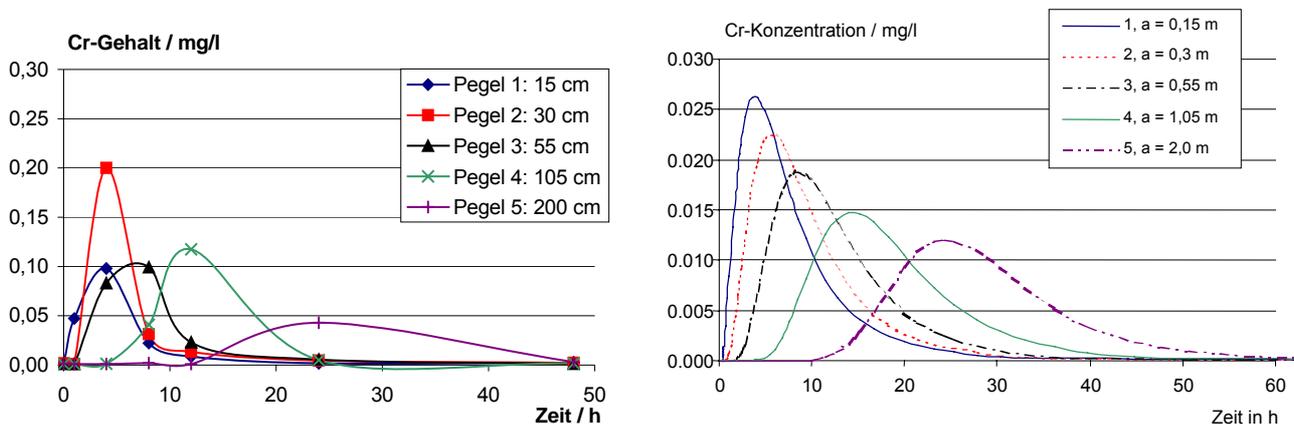
$\Delta t_i$  : Länge des Zeitintervalls  $i$  in  $\text{d}$

$A$  : Oberfläche des Betons in  $\text{m}^2$



**Bild 17:** Mittlere Freisetzung im Frischbetonstandtest (links) mit der entsprechenden Auslaugrate (rechts) im Verlauf der Zeit

Bild 18 zeigt die Ergebnisse der Modellierung im Vergleich zu den gemessenen Werten (dynamischer Versuch, /1/).



**Bild 18:** Vergleich der im dynamischen Versuch gemessenen Konzentrationen, /1/ (links), mit den Werten, die aus der Freisetzung im Frischbetonstandtest berechnet wurden (rechts)

Der Freisetzungsverlauf scheint im Frischbetonstandtest relativ gut abgebildet zu werden. Dennoch werden um etwa Faktor 10 zu geringe Werte erreicht. Das zeigt, dass auch der Frischbetonstandtest nicht geeignet ist, um den dynamischen Versuch abzubilden.

### 3.4 Schlussfolgerung

Die Abbildung des dynamischen Versuchs durch einfache Versuche mit stehendem Grundwasser oder Leitungswasser ist nicht möglich. Dies wird auch durch die Freisetzungen im modifizierten dynamischen Versuch belegt. Dieser Versuch wurde mit einem anderen Zement und mit Mörtel anstelle von Beton durchgeführt, daher sind die Ergebnisse nur begrenzt vergleichbar, sie können allerdings Anhaltspunkte liefern. In /1/ wurde die Gesamtfreisetzung im dynamischen Versuch nicht gemessen. Im modifizierten dynamischen Versuch ist dagegen das Erfassen der ausgetragenen Fracht möglich. Allerdings konnte hier der Gesamtaustrag nicht ermittelt werden, weil die Konzentration am Überlauf nach Ende der Versuchszeit noch nicht auf den Hintergrundwert abgesunken war. Die vorhandenen Daten zeigen jedoch, dass die Chromfreisetzung mehr als  $50 \text{ mg/m}^2$  beträgt (s. Bild 12). Im Frischbetonstandtest werden im Mittel nur rund  $14 \text{ mg/m}^2$  freigesetzt. Der qualitative Freisetzungsverlauf wird allerdings im Frischbetonstandtest zutreffend ermittelt.

Für die Berechnung der unter realen Einbausituationen auftretenden Grundwasserkonzentrationen werden nun Faktoren benötigt, um aus den einfachen Versuchen die Freisetzung in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit zu berechnen und damit auf einfachem Wege einen Quellterm für die Transportprognose zu bestimmen. Es erscheint sinnvoll, weitere Versuche mit dem modifizierten dynamischen Versuch durchzuführen, um einen funktionellen Zusammenhang zwischen Freisetzung und Fließgeschwindigkeit zu ermitteln. Auf der bisher vorliegenden Datengrundlage ist dies nicht möglich. Für die weiteren Versuche sollte der modifizierte dynamische Versuch dahingehend verbessert werden, dass im Ablaufbecken eine Mischvorrichtung eingebaut wird.

#### **4 ZUSAMMENFASSUNG**

In dem Forschungsvorhaben „Prüfverfahren und Entwicklung von Prüfkriterien zur Bewertung der Auslaugung umweltrelevanter Stoffe aus Frischbeton - F 817“ /1/ sollte die Auslaugung aus Frischbeton quantifiziert werden. Ziel war es, Laborversuche auf ihre Reproduzierbarkeit zu testen und Bewertungskriterien und Grenzwerte vorzuschlagen, die dem Gefährdungspotential in adäquater Weise Rechnung tragen. Die Bewertung sollte anhand eines möglichst einfachen Versuchs durchgeführt werden. Zur Abbildung von In-situ-Bedingungen sollten dann Transportberechnungen herangezogen werden. Anhand einer Kalibrierung an dem sehr aufwendigen dynamischen Versuch, der fließendes Grundwasser simuliert, konnte jedoch gezeigt werden, dass die im einfachen Laborversuch bei stehendem Grundwasser ermittelte Freisetzung als Quellterm ungeeignet ist. In diesem Projekt sollten deshalb verschiedene Einflussfaktoren auf die Gesamtfreisetzung untersucht sowie der Freisetzungsverlauf ermittelt werden.

Die untersuchten Einflussfaktoren waren:

- 1) Auslaugmedium:
  - wassergesättigter Sand mit an den dynamischen Versuch angepasster Körnung (1/2 mm),
  - Leitungswasser,
- 2) Fließgeschwindigkeit des Grundwassers.

Als weiterer möglicher Einfluss wurde in /1/ die Eintauchtiefe des Frischbetons in das Grundwasser erwähnt. Dies wurde hier nicht untersucht. Betrachtet wurden die Elemente Kalium, Natrium, Barium, Cadmium, Chrom, Molybdän und Vanadium.

Die Freisetzung in wassergesättigten Sand wurde im statischen Versuch bestimmt (s. Abschnitt 2.3). Es zeigte sich, dass der verwendete Sand einen Einfluss auf den Schadstoffaustrag hat. Es wurde hier nur der wasserlösliche Anteil der ausgetragenen Schadstoffe bestimmt. Daher kann dieser Effekt auf eine unterschiedlich starke Adsorption bei unterschiedlich feinen Sanden zurückzuführen sein. Der statische Versuch ist zur Bestimmung des Freisetzungsverlaufs ungeeignet, da die wesentlichen Prozesse in den ersten Stunden ablaufen und in diesem Versuch erst nach ausreichender Erhärtung des Beton (hier nach ca. 8 h) Ergebnisse ermittelt werden können. Der Gesamtaustrag liegt deutlich unter dem bei strömendem Grundwasser auftretendem Austrag. Es wird empfohlen, zukünftig auf die Durchführung statischer Versuche zu verzichten, da kein wesentlicher Erkenntnisgewinn zu erwarten ist.

Die Ermittlung der Freisetzung bei direktem Kontakt mit Wasser im Frischbetonstandtest ist in Abschnitt 2.4 beschrieben. Dieser Versuch ermöglicht die Ermittlung des Freisetzungsverlaufs. Dabei hat sich gezeigt, dass die Freisetzung der umweltrelevanten Parameter Chrom, Molybdän und Vanadium nur in den ersten Stunden erhöht ist, dann aber unter die Nachweisgrenze abfällt. Durchgeführte Modellrechnungen zeigen, dass dieser Verlauf wahrscheinlich qualitativ gut mit dem Freisetzungsverlauf bei strömendem Grundwasser übereinstimmt. Die ermittelte Gesamtfreisetzung liegt in diesem Versuch zwar höher als im statischen Versuch, aber immer noch deutlich zu niedrig, um die im dynamischen Versuch bestimmten Konzentrationen zu modellieren. Die hier durchgeführte Versuche zeigen eine relativ große Versuchsstreuung. Durch die Verwendung von deionisiertem Wasser und einer Homogenisierung der Ausgangsstoffe sind hier aber wahrscheinlich noch Verbesserung zu erzielen.

Um den Einfluss der Fließgeschwindigkeit zu erfassen, wurde der dynamische Versuch modifiziert (s. Abschnitt 2.5). Es wurden drei Fließgeschwindigkeiten betrachtet: 0,39 m/d, 0,86 m/d und 1,36 m/d. Durch den Einfluss der Verdünnung werden bei der niedrigsten Fließgeschwindigkeit die höchsten Konzentrationen erreicht. Ein Vergleich der Gesamtfreisetzung war anhand der Daten leider noch nicht möglich, da die Versuchslaufzeit nicht ausreichend war. Es konnte jedoch festgestellt werden, dass für die Parameter Chrom, Molybdän und Vanadium deutlich höhere Freisetzungen ermittelt werden als im Frischbetonstandtest. Bei Kalium liegen die Werte bisher in ähnlicher Größenordnung. Natrium, Barium und Cadmium wurden hier nicht ausgewertet, da der Konzentrationsanstieg zu gering im Vergleich zu den Hintergrundgehalten war.

Es sollten weitere Versuche mit dem modifizierten dynamischen Versuch durchgeführt werden, um den Einfluss der Fließgeschwindigkeit auf die Gesamtfreisetzung zu quantifizieren. Es wäre damit möglich, Faktoren in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit festzulegen, mit denen die Ergebnisse des Frischbetonstandtests multipliziert werden. Diese Werte könnten dann in das Transportprogramm einfließen.

## 5 LITERATUR

- /1/ Brameshuber, W. ; Vollpracht, A.: Prüfverfahren und Entwicklung von Prüfkriterien zur Bewertung der Auslaugung umweltrelevanter Stoffe aus Frischbeton. Aachen : Institut für Bauforschung, 2003. - Forschungsbericht Nr. F 817
- /2/ Brameshuber, W. ; Vollpracht, A.: Konzept zur Bewertung des Auslaugverhaltens mineralischer Baustoffe/körper durch Sicker- und Kontaktgrundwasserprognose – Teil 2: Bestimmung der Quellstärke für Boden und Grundwasser in Kontakt mit Betonfundamenten und Bodeninjektionen. Aachen : Institut für Bauforschung, 2004. - Forschungsbericht Nr. F 645
- /3/ Slood van der, H.A. ; Hoede, D. ; Rietra, R.P.J.J. ; ECN ; ET AL: Environmental Criteria for Cement Based Products : ECRICEM. Phase I: Ordinary Portland Cements. Petten : Energy Research Centre of the Netherlands, 2001. - Forschungsbericht Nr. ECN-C--01-069
- /4/ H.-J.G. Diersch: WASY Software FEFLOW – Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System – Reference Manual. Berlin : Institut for Water Resources Planning and Systems Research Ltd., 2002
- /5/ Länderarbeitsgemeinschaft Wasser ; LAWA: Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser (Ausgabe Dezember 2004). Düsseldorf : Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, LAWA, 2004
- /6/ Smoltczyk, U.: Grundbau-Taschenbuch; Teil 2. 5. Aufl. Berlin : Ernst und Sohn, 1996
- /7/ Kinzelbach, W. ; Rausch, R.: Grundwassermodellierung. Eine Einführung mit Übungen. Stuttgart : Borntraeger, 1995
- /8/ Küster, F. W. ; Thiel, A.: Rechentafeln für die chemische Analytik. 102. Auflage. Berlin; New York : de Gruyter Verlag, 1982

**Tabelle A1:** Chemische Zusammensetzung der verwendeten Zemente, Hauptbestandteile

Prüfgröße	Einheit	Gehalt in	
		CEM I 32,5 aus /1/	CEM I 32,5 neu <sup>1)</sup>
1	2	3	4
Glühverlust, Luft	M.-%	2,34	2,73
Kohlenstoff als $\frac{\text{CO}_2}{\text{C}}$		1,94	2,49
		0,53	0,68
Sulfat, SO <sub>4</sub>		4,00	3,18
Chlorid		0,047	0,037
SiO <sub>2</sub>		19,75	19,62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		5,35	4,78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		2,70	3,15
CaO		62,59	67,33
MgO		1,31	1,02
MnO		0,06	0,05
TiO <sub>2</sub>		0,27	0,22
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0,06	0,22
Na <sub>2</sub> O		0,17	0,22
K <sub>2</sub> O	0,82	0,56	

1) Für die Versuche zum Einfluss der Fließgeschwindigkeit musste ein neuer Zement eingesetzt werden, da die Restbestände aus /1/ aufgebraucht waren

**Tabelle A2:** Chemische Zusammensetzung der verwendeten Zemente, Spurenelemente

Prüfgröße	Einheit	Gehalt in	
		CEM I 32,5 R aus /1/	CEM I 32,5 R neu <sup>1)</sup>
1	2	3	4
Antimon, Sb	mg/kg	2,5	< 2
Barium, Ba		718	250
Blei, Pb		32,7	41
Cadmium, Cd		0,5	0,45
Chrom (gesamt), Cr		34,5	44
Molybdän, Mo		3	3
Thallium, Tl		0,37	3,4
Vanadium		51	36

1) Für die Versuche zum Einfluss der Fließgeschwindigkeit musste ein neuer Zement eingesetzt werden, da die Restbestände aus /1/ aufgebraucht waren

**Tabelle A3:** Beton- und Mörtelzusammensetzung und Frischbeton- bzw. Frischmörtel-Eigenschaften

Bestandteil / Prüfgröße	Einheit	Mischung	
		Beton	Mörtel
1	2	3	4
Zement	-	CEM I 32.5 R aus /1/	CEM I 32,5 R neu
Zementgehalt	kg/m <sup>3</sup>	351	490
Wassergehalt		193	245
w/z-Wert	-	0,55	0,5
Gesteinskörnung	-	Sieblinie A/B 16	Sand 0/2
Zuschlaggehalt	kg/m <sup>3</sup>	1786	1444
Ausbreitmaß	mm	560	171
Frischbetonrohddichte	kg/m <sup>3</sup>	2344	2184
Luftporengehalt	V.-%	1,6	5,2

**Tabelle A4a:** Ergebnisse der statischen Versuche über 8 h – allgemeine Parameter

Parameter	Einheit	Entnahmetiefe	Allgemeine Parameter im Eluat der Sandschichten					
			Versuch 1 <sup>1)</sup>			Versuch 2 <sup>1)</sup>		
			Blindwert	a	b	Blindwert	a	b
1	2	3	4	5	6	7	8	9
pH-Wert	-	0 - 20 mm	7,67	10,5	11,3	6,92	12,17	11,95
		20 - 40 mm		10,9	11,2		9,22	10,02
		40 - 60 mm		10,5	10,5		8,23	9,53
		60 - 80 mm		10,9	9,1		7,46	8,39
		80 - 100 mm		10,9	7,5		8,28	8,22
		100 - 120 mm		10,8	7,6		8,21	8,06
Leitfähigkeit	μS/cm	0 - 20 mm	18,7	210	411	35,1	1543	1851
		20 - 40 mm		300	445		138	107
		40 - 60 mm		185	191		147	84
		60 - 80 mm		261	87		106	66
		80 - 100 mm		263	96		100	100
		100 - 120 mm		232	65		113	107

1) Blindwert: Analyse des Sandes vor Versuchsdurchführung; a: erste Messung; b: zweite Messung

Tabelle A4b: Ergebnisse der statischen Versuche über 8 h - Nebenelemente

Parameter	Entnahmetiefe	Wasserlösliche Gehalte im Versuchssand					
		Versuch 1 <sup>1)</sup>			Versuch 2 <sup>1)</sup>		
		Blindwert	a	b	Blindwert	a	b
-	mm	mg/kg					
1	2	3	4	5	6	7	8
Natrium, Na	0 - 20	3,0	9,5	15,5	7,5	6,0	13,0
	20 - 40		3,5	8,0		6,0	4,5
	40 - 60		6,5	7,0		18,5	4,5
	60 - 80		6,5	7,0		5,0	3,5
	80 - 100		9,5	10,0		3,5	9,0
	100 - 120		8,0	6,5		6,0	10,5
Kalium, K	0 - 20	5,5	79,0	136,0	9,0	70,0	105,5
	20 - 40		40,5	83,5		60,0	51,0
	40 - 60		59,5	69,0		38,5	52,0
	60 - 80		57,5	73,0		48,5	45,0
	80 - 100		85,0	91,0		54,0	98,0
	100 - 120		80,0	56,5		71,0	111,5

1) Blindwert: Analyse des Sandes vor Versuchsdurchführung; a: erste Messung; b: zweite Messung

Tabelle A4c: Ergebnisse der statischen Versuche über 8 h - Spurenelemente<sup>1)</sup>

Parameter	Entnahmetiefe	Wasserlösliche Gehalte im Versuchssand					
		Versuch 1			Versuch 2		
		Blindwert	a	b	Blindwert	a	b
-	mm	µg/kg					
1	2	3	4	5	6	7	8
Barium, Ba	0 - 20	45	50	70	70	315	405
	20 - 40		55	105		70	95
	40 - 60		50	35		80	40
	60 - 80		30	40		45	80
	80 - 100		30	40		35	40
	100 - 120		25	65		90	40
Cadmium, Cd	0 - 20	0,10	0,15	0,05	0,20	0,05	< 0,05
	20 - 40		0,05	0,10		0,25	< 0,05
	40 - 60		0,15	0,05		0,65	0,05
	60 - 80		0,10	0,10		0,25	0,10
	80 - 100		< 0,05	0,05		0,15	0,05
	100 - 120		< 0,05	0,05		0,85	0,15
Chrom, Cr	0 - 20	15	65	100	5	120	145
	20 - 40		45	55		50	40
	40 - 60		55	40		30	35
	60 - 80		60	40		25	35
	80 - 100		70	60		30	60
	100 - 120		65	45		60	75
Molybdän, Mo	0 - 20	< 5	10	10	5	5	10
	20 - 40		5	10		5	5
	40 - 60		5	5		5	5
	60 - 80		10	5		5	5
	80 - 100		10	10		5	5
	100 - 120		<b>30</b>	5		5	10
Vanadium, V	0 - 20	10	65	95	20	40	35
	20 - 40		75	100		50	50
	40 - 60		65	65		40	40
	60 - 80		70	35		25	35
	80 - 100		70	35		25	35
	100 - 120		65	35		45	35

1) Ausreißer fettgedruckt

**Tabelle A5a:** Ergebnisse der statischen Versuche über 12 h – allgemeine Parameter

Parameter	Einheit	Entnahmetiefe	Allgemeine Parameter im Eluat der Sandschichten					
			Versuch 1 <sup>1)</sup>			Versuch 2 <sup>1)</sup>		
			Blindwert	a	b	Blindwert	a	b
1	2	3	4	5	6	7	8	9
pH-Wert	-	0 – 20 mm	9,63	11,81	12,23	6,44	12,06	11,91
		20 – 40 mm		8,69	10,88		9,86	9,63
		40 – 60 mm		8,32	10,34		9,12	8,21
		60 – 80 mm		10,21	8,98		7,99	7,99
		80 – 100 mm		9,87	8,97		9,65	7,96
		100 – 120 mm		9,66	9,29		9,79	7,93
Leitfähigkeit	μS/cm	0 – 20 mm	36,8	848	1617	26,0	1206	908
		20 – 40 mm		104	104		75	63
		40 – 60 mm		93	77		77	82
		60 – 80 mm		65	108		83	70
		80 – 100 mm		101	84		90	77
		100 – 120 mm		132	81		91	83

1) Blindwert: Analyse des Sandes vor Versuchsdurchführung; a: erste Messung; b: zweite Messung

**Tabelle A5b:** Ergebnisse der statischen Versuche über 12 h – Nebenelemente<sup>1)</sup>

Parameter	Entnahmetiefe	Wasserlösliche Gehalte im Versuchssand					
		Versuch 1 <sup>2)</sup>			Versuch 2 <sup>2)</sup>		
		Blindwert	a	b	Blindwert	a	b
-	mm	mg/kg					
1	2	3	4	5	6	7	8
Natrium, Na	0 - 20	15,0	15,0	10,0	6,5	5,0	4,0
	20 - 40		9,0	10,0		3,0	2,0
	40 - 60		3,0	15,0		5,5	5,0
	60 - 80		10,0	10,0		7,0	4,0
	80 - 100		10,0	7,0		5,5	5,0
	100 - 120		40,0	6,0		5,0	21,5
Kalium, K	0 - 20	10,0	105,0	75,0	5,5	48,0	54,5
	20 - 40		48,5	90,0		37,0	42,0
	40 - 60		55,0	70,0		50,5	67,5
	60 - 80		60,0	76,5		60,0	54,5
	80 - 100		<b>125,0</b>	63,0		72,5	67,5
	100 - 120		<b>145,0</b>	63,5		72,0	57,5

1) Ausreißer fettgedruckt

2) Blindwert: Analyse des Sandes vor Versuchsdurchführung; a: erste Messung; b: zweite Messung

Tabelle A5c: Ergebnisse der statischen Versuche über 12 h – Spurenelemente<sup>1)</sup>

Parameter	Entnahmetiefe	Wasserlösliche Gehalte im Versuchssand					
		Versuch 1			Versuch 2		
		Blindwert	a	b	Blindwert	a	b
-	mm	µg/kg					
1	2	3	4	5	6	7	8
Barium, Ba	0 - 20	55	120	290	35	220	165
	20 - 40		115	75		75	65
	40 - 60		50	90		85	25
	60 - 80		85	125		135	40
	80 - 100		60	<b>1050</b>		30	60
	100 - 120		170	50		20	45
Cadmium, Cd	0 - 20	0,20	< 0,05	< 0,05	0,10	< 0,05	0,05
	20 - 40		0,40	0,15		0,10	0,10
	40 - 60		0,20	0,15		0,10	0,10
	60 - 80		0,20	0,15		0,10	0,35
	80 - 100		0,10	0,15		0,20	0,10
	100 - 120		0,15	0,10		0,05	< 0,05
Chrom, Cr	0 - 20	5	70	105	5	75	65
	20 - 40		40	35		20	25
	40 - 60		25	35		30	20
	60 - 80		25	35		30	20
	80 - 100		40	30		30	25
	100 - 120		<b>95</b>	30		30	35
Molybdän, Mo	0 - 20	< 5	10	10	< 5	5	5
	20 - 40		5	5		< 5	< 5
	40 - 60		5	10		5	10
	60 - 80		< 5	5		5	5
	80 - 100		5	5		5	< 5
	100 - 120		10	5		5	5
Vanadium, V	0 - 20	10	80	55	5	95	100
	20 - 40		35	35		35	35
	40 - 60		<b>15</b>	30		35	30
	60 - 80		30	30		35	25
	80 - 100		30	30		35	30
	100 - 120		<b>45</b>	30		35	35

1) Ausreißer fettgedruckt

**Tabelle A6a:** Ergebnisse der statischen Versuche über 24 h – allgemeine Parameter

Parameter	Einheit	Entnahmetiefe	Allgemeine Parameter im Eluat der Sandschichten								
			Versuch 1 <sup>1)</sup>			Versuch 2 <sup>1)</sup>			Versuch 3 <sup>1)</sup>		
			Blindwert	a	b	Blindwert	a	b	Blindwert	a	b
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
pH-Wert	-	0-20 mm	9,64	11,8	11,7	7,4	12,0	12,3	8,04	11,1	12,1
		20-40 mm		9,83	9,19		10,4	10,0		9,70	9,07
		40-60 mm		9,46	9,22		9,45	9,52		9,62	8,06
		60-80 mm		9,32	8,92		9,17	9,88		9,34	7,99
		80-100 mm		9,36	9,41		8,99	9,79		9,53	8,05
		100-120 mm		9,49	9,42		8,81	9,64		8,72	8,59
Leitfähigkeit	μS/cm	0-20 mm	16,3	1157	925	39,1	1542	2538	75,5	1723	1335
		20-40 mm		56	62		160	86		101	60
		40-60 mm		55	60		121	73		76	58
		60-80 mm		67	84		91	100		81	63
		80-100 mm		108	95		78	93		82	87
		100-120 mm		107	88		97	88		68	88

1) Blindwert: Analyse des Sandes vor Versuchsdurchführung; a: erste Messung; b: zweite Messung

Tabelle A6b: Ergebnisse der statischen Versuche über 24 h - Nebenelemente<sup>1)</sup>

Parameter	Entnahmetiefe	Wasserlösliche Gehalte im Versuchssand								
		Versuch 1 <sup>2)</sup>			Versuch 2 <sup>2)</sup>			Versuch 3 <sup>2)</sup>		
		Blindwert	a	b	Blindwert	a	b	Blindwert	a	b
-	mm	mg/kg								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Natrium, Na	0 - 20	2,0	4,0	4,0	12,5	17,5	9,0	12,0	20,5	5,0
	20 - 40		2,0	4,0		12,0	4,0		8,0	3,5
	40 - 60		2,5	3,5		12,0	5,0		5,0	7,5
	60 - 80		<b>5,0</b>	8,0		7,0	7,0		8,0	7,0
	80 - 100		11,0	14,0		7,5	7,5		8,0	8,5
	100 - 120		6,5	16,0		10,0	16,0		5,5	8,0
Kalium, K	0 - 20	7,50	44,0	48,5	11,00	92,5	65,5	7,50	100,0	45,5
	20 - 40		36,0	43,5		59,5	46,5		74,5	37,0
	40 - 60		38,5	42,0		<b>97,0</b>	48,0		54,0	38,5
	60 - 80		55,0	70,5		64,5	78,5		72,0	60,5
	80 - 100		96,5	85,0		56,5	63,5		73,5	75,0
	100 - 120		77,5	61,5		79,5	75,5		52,5	73,5

1) Ausreißer fettgedruckt

2) Blindwert: Analyse des Sandes vor Versuchsdurchführung; a: erste Messung; b: zweite Messung

Tabelle A6c: Ergebnisse der statischen Versuche über 24 h - Spurenelemente<sup>1)</sup>

Parameter	Entnahmetiefe	Wasserlösliche Gehalte im Versuchssand								
		Versuch 1			Versuch 2			Versuch 3		
		Blindwert	a	b	Blindwert	a	b	Blindwert	a	b
-	mm	µg/kg								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Barium, Ba	0 - 20	55	255	545	115	230	615	40	375	235
	20 - 40		125	110		85	100		35	25
	40 - 60		110	65		50	80		45	15
	60 - 80		120	80		30	100		20	55
	80 - 100		110	250		55	20		45	120
	100 - 120		215	170		40	35		105	50
Cadmium, Cd	0 - 20	0,15	0,40	0,20	0,10	0,10	0,05	2,55	0,75	0,10
	20 - 40		0,15	0,20		0,10	0,25		0,15	0,20
	40 - 60		0,15	0,15		0,05	0,05		0,15	0,15
	60 - 80		0,10	0,20		0,05	0,15		0,10	0,15
	80 - 100		0,15	0,20		0,15	0,05		0,10	0,65
	100 - 120		0,20	0,20		0,05	0,15		0,15	0,50
Chrom, Cr	0 - 20	15	75	60	260	80	125	5	125	85
	20 - 40		30	25		40	40		40	10
	40 - 60		30	30		50	35		30	10
	60 - 80		45	55		40	60		30	20
	80 - 100		75	100		35	40		45	35
	100 - 120		90	70		55	60		35	50
Molybdän, Mo	0 - 20	< 5	< 5	< 5	15	10	5	< 5	15	5
	20 - 40		< 5	< 5		5	< 5		5	5
	40 - 60		< 5	5		10	< 5		5	5
	60 - 80		5	< 5		5	5		5	5
	80 - 100		< 5	5		5	< 5		5	10
	100 - 120		< 5	< 5		5	5		5	5
Vanadium, V	0 - 20	5	< 5	< 5	10	65	10	5	55	90
	20 - 40		5	< 5		5	25		30	25
	40 - 60		< 5	<b>250</b>		20	< 5		30	20
	60 - 80		< 5	< 5		20	< 5		30	25
	80 - 100		5	25		20	5		30	25
	100 - 120		5	25		20	15		25	30

1) Ausreißer fettgedruckt

Tabelle A7a: Ergebnisse der statischen Versuche über 6 h – allgemeine Parameter

Versuch	Entnahmetiefe	Allgemeine Parameter im Eluat der Sandschichten	
		pH-Wert	Leitfähigkeit
-	mm	-	μS/cm
1	2	3	4
Blindwert	-	6,39	17,5
1. Versuch <sup>1)</sup>	0 - 20	12,1	1317
	20 - 40	9,6	67
	40 - 60	9,9	126
	60 - 80	9,4	82
	80 - 100	9,0	90
	100 - 120	8,8	65

1) Abheben der Betonplatte war nur in einem Fall möglich

Tabelle A7b: Ergebnisse des statischen Versuchs über 6 h – Neben- und Spurenelemente<sup>1)</sup>

Versuch	Entnahmetiefe	Wasserlösliche Gehalte im Versuchssand						
		Natrium	Kalium	Barium	Cadmium	Chrom	Molybdän	Vanadium
-	mm	mg/kg			μg/kg			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Blindwert	-	2,5	5,5	10	<b>0,75</b>	5	< 5	5
1. Versuch <sup>2)</sup>	0 - 20	8,0	54,0	225	0,15	75	5	55
	20 - 40	6,5	29,5	615	0,25	20	50	90
	40 - 60	5,0	47,0	20	0,30	20	5	55
	60 - 80	7,5	57,5	25	0,10	25	5	20
	80 - 100	7,5	74,0	20	0,10	35	10	20
	100 - 120	5,5	49,5	15	0,15	30	5	20

1) Ausreißer fettgedruckt

2) Abheben der Betonplatte war nur in einem Fall möglich

Tabelle A8: Analyseergebnisse der Blindproben des Frischbetonstandtests<sup>1)</sup>

Parameter	Einheit	Versuch Nr.					
		1a	1b	2a	2b	3a	3b
1	2	3	4	5	6	7	8
pH-Wert	-	8,92	8,99	6,65	5,12	6,55	6,03
Leitfähigkeit	μS/cm	23,8	23,5	14,6	34,6	13,0	10,5
Natrium, Na	mg/l	0,2	0,2	0,6	<b>4,5</b>	1,5	1,4
Kalium, K		5,1	4,6	2,0	0,1	0,1	0
Barium, Ba	μg/l	<b>32</b>	5	2	1	2	5
Cadmium, Cd		0,03	0,02	0,03	0,05	0,02	0,03
Chrom, Cr		1	1	< 1	1	< 1	2
Molybdän, Mo		< 1	< 1	< 1	< 1	1	< 1
Vanadium, V		< 1	< 1	< 1	< 1	<b>4</b>	< 1

1) Ausreißer fettgedruckt

**Tabelle A9:** Analyseergebnisse der Eluate aus den Frischbetonstandtests; blindwertbereinigt – allgemeine Parameter und betrachtete Nebenelemente

Versuch Nr.	Auslaugzeit	pH-Wert		Leitfähigkeit		Natrium		Kalium	
		a	b	a	b	a	b	a	b
-	h	-		µS/cm		mg/l			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,5	11,5	11,4	996	734	4,5	4,6	109,2	99,4
	2,0	11,3	11,2	403	431	1,3	1,6	40,4	31,8
	4,5	11,1	11,2	374	401	0,3	0,4	4,4	5,1
	8,0	11,3	11,3	512	533	0,3	0,2	1,3	2,3
	14,0	11,4	11,5	642	719	0,6	0,5	1,6	1,6
	21,5	11,5	11,5	804	875	1,1	1,7	3,0	3,2
	31,5	11,5	11,5	721	739	1,7	1,5	4,8	3,4
	45,5	11,5	11,5	799	875	2,9	3,9	5,1	6,9
	59,0	11,4	11,4	633	656	1,8	2,7	1,2	2,9
	72,5	11,4	11,4	589	623	1,5	2,3	0,4	1,0
2	0,5	11,5	11,5	1001	962	4,6	5,4	94,7	108,1
	2,0	Abgebrochen da Anlage defekt	11,6	Abgebrochen da Anlage defekt	840	Abgebrochen da Anlage defekt	2,9	Abgebrochen da Anlage defekt	57,0
	4,5		11,1		612		1,4		32,5
	8,0		11,2		749		1,2		27,0
	14,0		11,5		910		1,0		11,4
	21,5		11,4		1002		1,6		18,2
	31,8		11,6		847		1,5		14,9
	45,5		11,5		893		2,1		12,9
	62,0		11,2		745		2,0		9,9
	81,2		11,2		564		1,0		5,5
3	0,5		11,0		11,1		758		966
	2,0	11,1	11,2	572	778	4,4	4,0	77,7	88,5
	4,5	11,2	11,1	608	597	2,9	3,2	52,5	50,3
	8,0	11,2	11,1	617	599	2,1	2,1	34,7	33,9
	14,0	11,2	11,3	731	740	2,2	2,6	30,9	31,5
	21,5	11,4	11,5	839	866	2,4	2,6	25,6	25,6
	32,0	11,5	11,3	862	773	3,4	3,1	20,3	19,9
	45,5	11,4	11,4	898	807	4,0	3,9	18,4	18,2
	62,0	11,9	11,8	822	665	2,2	2,0	15,5	14,6
	81,3	11,7	11,5	605	582	0,9	1,4	9,1	10,9

**Tabelle A10:** Analyseergebnisse der Eluate aus den Frischbetonstandtests;  
blindwertbereinigt – Spurenelemente

Versuch Nr.	Auslaug- zeit	Barium		Cadmium		Chrom		Molybdän		Vanadium	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
-	h	µg/l									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,5	98	33	0,125	0,045	68	67	7	7	7	3
	2,0	35	27	0,105	0,015	16	18	2	2	3	2
	4,5	25	27	0,115	0,005	4	6	1	1	1	1
	8,0	25	29	0,135	0,045	3	3	1	1	< 1	< 1
	14,0	96	42	0,015	0	3	4	< 1	1	< 1	< 1
	21,5	102	295	0,005	0,045	2	1	< 1	< 1	1	1
	31,5	246	290	0,045	0,015	0	0	< 1	1	< 1	< 1
	45,5	325	370	0,035	0,025	1	1	< 1	< 1	< 1	< 1
	59,0	371	228	0	0,005	0	1	< 1	< 1	< 1	< 1
72,5	152	175	0,025	0,005	0	0	< 1	< 1	< 1	< 1	
2	0,5	65	29	0	0	81	97	8	10	5	4
	2,0	Anlage defekt	61	Anlage defekt	0	Anlage defekt	49	Anlage defekt	5	Anlage defekt	4
	4,5		34		0		21		2		1
	8,0		39		0		13		1		< 1
	14,0		76		0		12		1		2
	21,5		79		0		7		1		1
	31,8		151		0		3		1		< 1
	45,5		264		0		3		1		< 1
	62,0		221		0		2		< 1		< 1
	81,2		154		0		2		< 1		< 1
3	0,5		33		49		0,005		0		120
	2,0	27	38	0,005	0,005	70	68	1	1	< 1	8
	4,5	27	28	0,005	0	40	32	1	1	4	< 1
	8,0	33	30	0,015	0	25	17	1	4	12	< 1
	14,0	38	38	0	0	14	10	< 1	2	< 1	< 1
	21,5	61	59	0,005	0	12	7	1	7	18	2
	32,0	112	96	0	0	5	4	1	4	7	1
	45,5	262	240	0,005	0	3	2	1	6	< 1	1
	62,0	302	259	0	0	2	1	1	7	6	1
	81,3	199	241	0,005	0,005	2	1	2	< 1	< 1	< 1

Tabelle A11: Mittlere Blindwerte im modifizierten dynamischen Versuch<sup>1)</sup>

Versuch	Parameter								
	pH-Wert	Leitfähigkeit	Na	K	Ba	Cd	Cr	Mo	V
-	-	µS/cm	mg/l		µg/l				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V1a	7,59	251	19,7	3,4	21	0,05	< 1	< 1	< 1
V1b	7,74	286	19,5	5,5	19	0,05	1	< 1	< 1
V2a	7,80	183	9,7	2,3	16	< 0,1	1	1	< 1
V2b	7,72	197	11,3	7,2	19	< 0,1	1	1	< 1
V3a	7,65	263	18,1	8,1	18	0,04	1	1	1
V3b	7,82	277	19,1	5,2	22	0,08	1	1	< 1

1) Werte unter der Nachweisgrenze werden bei der Auswertung zu Null angesetzt (Abschätzung auf der sicheren Seite)

**Tabelle A12:** Analyseergebnisse der Eluate aus dem modifizierten dynamischen Versuch – allgemeine Parameter und betrachtete Nebenelemente

Fließgeschwindigkeit	Entnahmepunkt	pH-Wert		Leitfähigkeit		Natrium		Kalium	
		a	b	a	b	a	b	a	b
-	h	-		μS/cm		mg/l			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
v <sub>1</sub> 0,39 m/d	6	7,6	7,7	243	282	19,4	19,6	3,5	7,3
	12	7,6	7,8	344	354	19,7	19,2	3,2	2,6
	16	7,6	7,7	260	299	19,9	19,9	5,7	7,7
	24	7,9	8,3	327	346	29,0	22,2	28,9	23,6
	36	9,7	10,0	394	367	22,8	22,5	43,6	37,5
	48	10,0	10,1	377	361	22,7	22,8	36,8	30,3
	48 <sup>1)</sup>	10,3	10,5	387	371	22,9	23,5	30,2	31,1
v <sub>2</sub> 0,86 m/d	1	7,8	7,5	175	188	9,8	11,2	2,0	3,5
	2	7,8	7,8	172	190	9,5	11,2	1,8	7,9
	4	7,8	7,9	172	208	9,5	11,3	1,7	12,8
	6	7,8	8,2	179	244	9,9	11,6	3,7	13,1
	8	7,9	8,6	188	215	9,8	11,8	4,3	13,3
	12	9,1	8,7	240	274	11,7	12,8	14,2	27,7
	16	10,4	10,1	285	308	12,2	13,1	26,3	35,5
	24	10,6	10,4	281	302	11,9	12,8	21,2	33,2
	24 <sup>1)</sup>	11,4	11,2	442	484	12,0	12,8	25,2	38,0
v <sub>3</sub> 1,36 m/d	3	7,6	8,0	265	271	18,1	19,5	8,2	4,6
	6	7,6	7,7	326	280	20,4	17,9	21,7	3,4
	9	9,0	9,0	355	522	21,4	19,7	36,4	24,6
	12	9,7	9,9	346	509	20,8	19,5	34,4	27,6
	16	9,8	9,9	318	504	19,9	19,2	22,5	17,6
	24	9,7	9,5	321	325	20,1	19,1	20,7	13,3
	24 <sup>1)</sup>	10,0	10,3	309	382	19,4	20	16,7	21,6

1) Probe aus dem Ablaufbecken

**Tabelle A13:** Analyseergebnisse der Eluate aus dem modifizierten dynamischen Versuch – Spurenelemente<sup>1)</sup>

Fließgeschwindigkeit	Entnahmepunkt	Barium		Cadmium		Chrom		Molybdän		Vanadium	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
-	h	µg/l									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
v <sub>1</sub> 0,39 m/d	6	21	16	0,04	0,05	1	<1	<1	<1	<1	<1
	12	20	19	0,06	0,06	6	8	1	<1	<1	<1
	16	22	21	0,05	0,03	14	18	1	1	<1	<1
	24	31	40	0,03	0,13	98	75	11	10	2	5
	36	26	25	0,02	0,03	90	74	11	8	6	7
	48	20	22	0,03	0,02	67	90	8	10	7	6
	48 <sup>2)</sup>	22	24	0,02	0,02	82	107	9	10	8	6
v <sub>2</sub> 0,86 m/d	1	14	19	< 0,1	< 0,1	1	1	1	<1	<1	<1
	2	17	18	< 0,1	< 0,1	10	2	1	<1	<1	<1
	4	16	20	< 0,1	< 0,1	3	5	1	<1	<1	<1
	6	15	18	< 0,1	< 0,1	4	10	1	<1	<1	<1
	8	13	21	< 0,1	< 0,1	8	20	1	1	<1	<1
	12	22	30	< 0,1	< 0,1	58	49	8	4	1	1
	16	21	30	< 0,1	< 0,1	76	80	1	7	3	4
	24	17	34	< 0,1	< 0,1	48	50	6	4	4	7
	24 <sup>2)</sup>	24	25	< 0,1	< 0,1	71	66	9	5	5	6
v <sub>3</sub> 1,36 m/d	3	20	23	0,04	0,09	1	<1	1	<1	1	<1
	6	18	20	0,04	0,07	14	2	2	<1	1	<1
	9	32	30	0,05	0,06	86	64	10	7	3	1
	12	26	26	0,02	0,02	79	58	9	6	4	2
	16	24	25	0,03	0,15	57	39	6	4	4	2
	24	19	21	0,02	0,04	56	33	6	3	4	1
	24 <sup>2)</sup>	27	24	0,04	0,04	46	71	5	6	4	2

1) Ausreißer fettgedruckt (Ausreißer wurde bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt)

2) Probe aus dem Ablaufbecken

**Tabelle A14:** Untersuchung der gemahlene Schichten der Probekörper aus dem modifizierten dynamischen Versuch<sup>1)</sup> – Referenzproben<sup>2)</sup>

Analytik	Parameter	Einheit	Versuch				Mittelwert
			V1a	V1b	V3a	V3b	
1	2	3	4	5	6	7	8
bei pH12 lösliche Gehalte (pH <sub>stat</sub> - Verfahren)	Natrium	mg/kg	<b>692</b>	474	467	467	469
	Kalium		<b>2801</b>	989	1390	1066	1561
	Sulfat		4906	3521	3839	4173	4110
	Barium		6,56	5,44	4,50	7,50	6,00
	Cadmium		< 0,020	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002
	Chrom		<b>6,16</b>	2,87	3,00	3,45	3,11
	Molybdän		0,40	0,49	0,20	0,20	0,32
	Vanadium		< 0,10	< 0,10	0,10	< 0,10	< 0,10
Königswasser- aufschluss	Barium		57,7	55,0	53,0	58,3	56,0
	Cadmium		0,09	0,08	0,09	0,09	0,09
	Chrom		17,1	13,2	11,4	12,0	12,2
	Molybdän		0,80	0,05	0,43	0,43	0,43
	Vanadium		11,7	10,3	9,7	10,5	10,6

1) Ausreißer fettgedruckt (Ausreißer wurde bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt)

2) nicht eluierte Proben von der Oberseite der Mörtelplatten

**Tabelle A15:** Untersuchung der gemahlten Schichten der Probekörper aus dem modifizierten dynamischen Versuch<sup>1)</sup> – Fließgeschwindigkeit  $v_1$

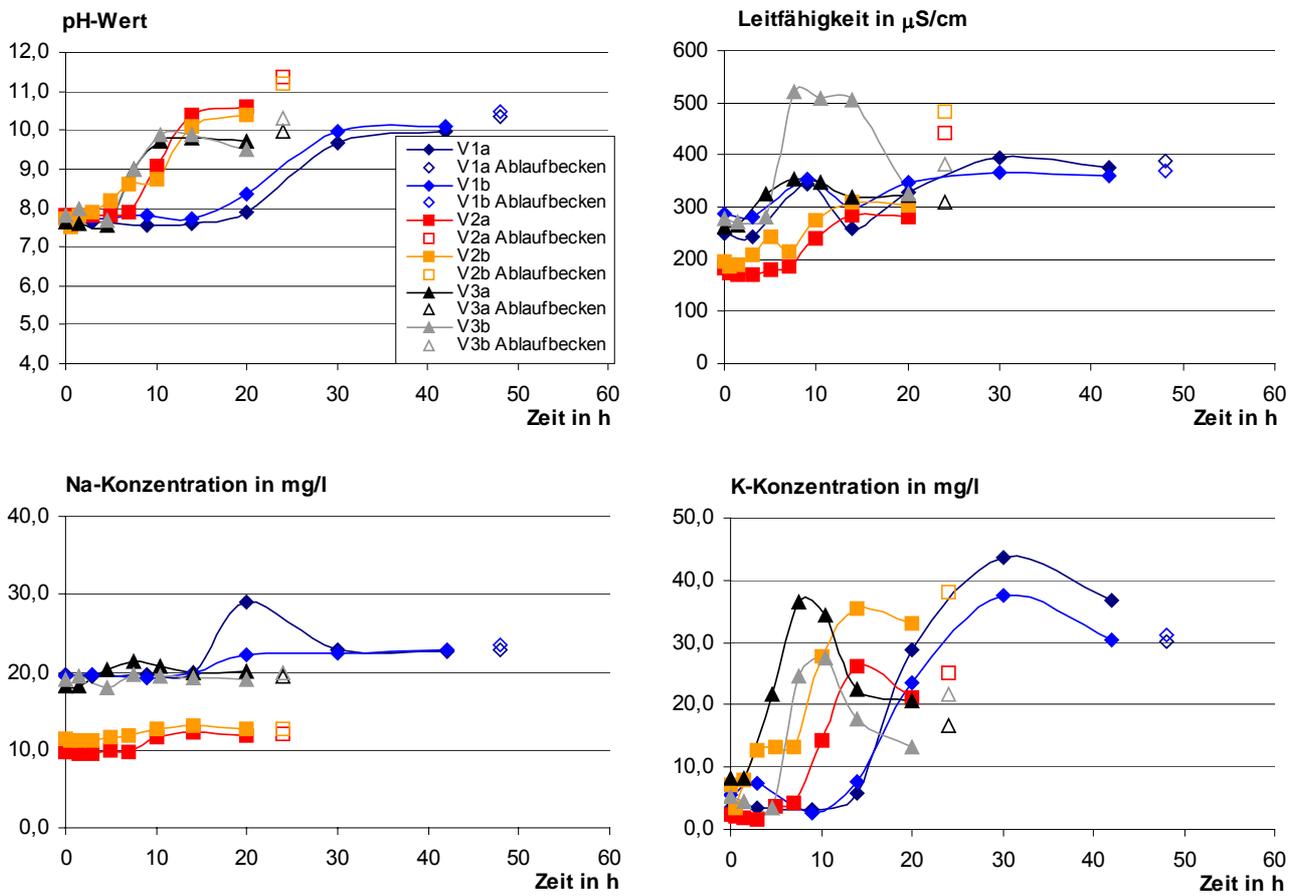
Analytik	Parameter	Stoffgehalt in den einzelnen Schichten					
		Entnahmetiefe 0 – 3 mm		Entnahmetiefe 5 – 8 mm		Entnahmetiefe 10 – 13 mm	
		V1a	V1b	V1a	V1b	V1a	V1b
-	-	mg/kg					
1	2	3	4	5	6	7	8
bei pH12 lösliche Gehalte (pH <sub>stat</sub> -Verfahren)	Natrium	285	297	374	384	439	454
	Kalium	170	140	159	343	289	546
	Sulfat	3611	3481	3198	3499	3278	3388
	Barium	5,89	7,18	5,38	7,55	6,98	8,25
	Cadmium	< 0,02	0,004	< 0,02	0,002	0,006	< 0,002
	Chrom	2,59	2,49	1,79	2,45	1,99	2,38
	Molybdän	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
	Vanadium	0,10	0,10	0,10	< 0,10	0,10	< 0,10
Königswasser- aufschluss	Barium	51	48	56,7	50	52,7	56
	Cadmium	0,087	0,083	0,09	0,093	0,090	0,087
	Chrom	12,5	11,1	12,5	11,8	11,7	12,8
	Molybdän	0,4	0,47	0,53	0,47	0,43	0,6
	Vanadium	9,9	9,4	10,8	10	10,3	10

1) Ausreißer fettgedruckt (Ausreißer wurde bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt)

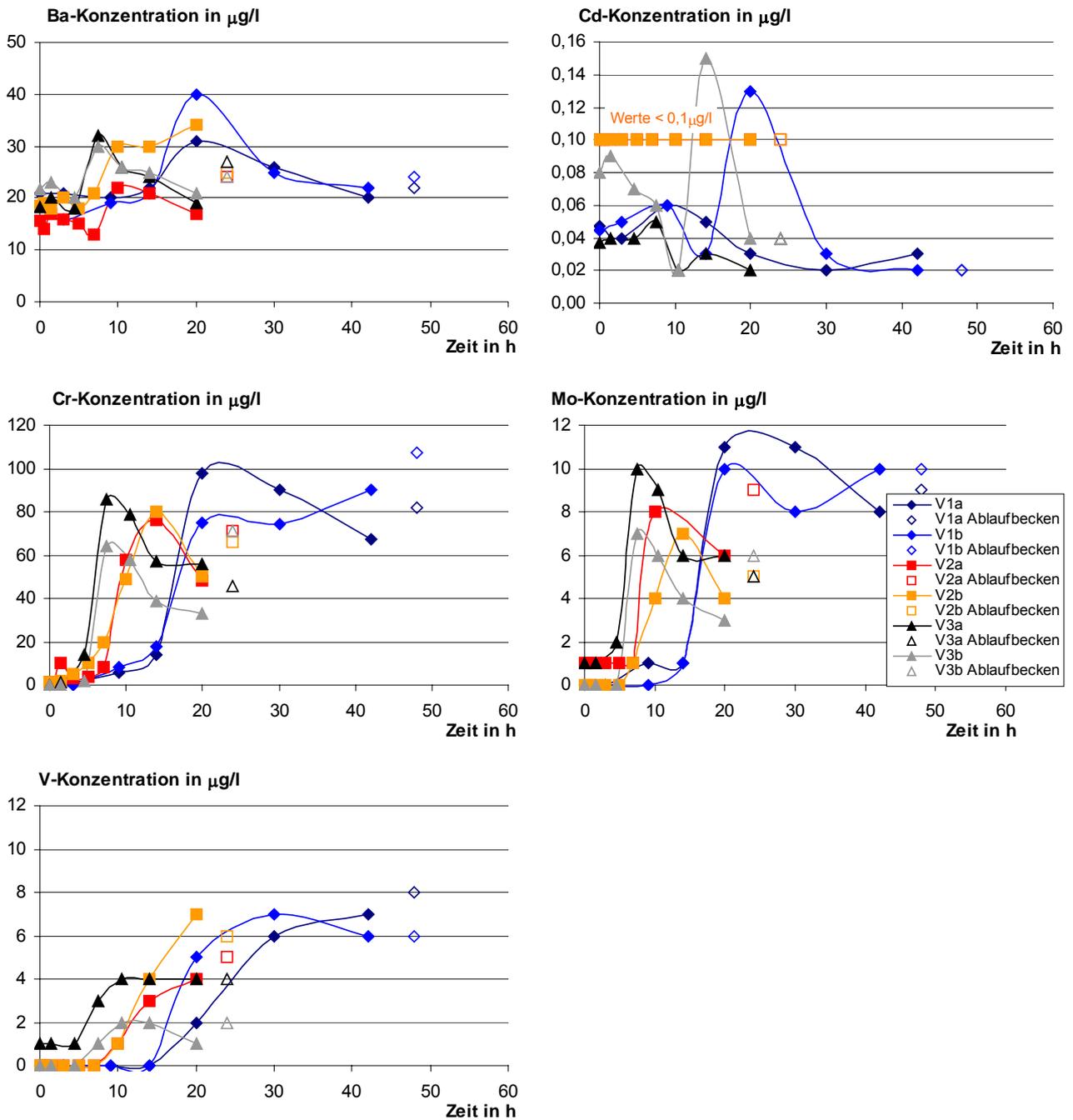
**Tabelle A16:** Untersuchung der gemahlene Schichten der Probekörper aus dem modifizierten dynamischen Versuch – Fließgeschwindigkeit  $v_3$

Analytik	Parameter	Stoffgehalt in den einzelnen Schichten					
		Entnahmetiefe 0 – 3 mm		Entnahmetiefe 5 – 8 mm		Entnahmetiefe 10 – 13 mm	
		V3a	V3b	V3a	V3b	V3a	V3b
-	-	mg/kg					
1	2	3	4	5	6	7	8
bei pH12 lösliche Gehalte (pH <sub>stat</sub> -Verfahren)	Natrium	289	<b>418<sup>1)</sup></b>	392	337	532	462
	Kalium	168	188	487	505	702	756
	Sulfat	3274	3508	3706	3624	3373	3309
	Barium	5,03	6,84	9,14	8,02	7,32	7,27
	Cadmium	< 0,002	< 0,002	< 0,002	0,004	< 0,002	< 0,002
	Chrom	1,48	2,18	2,48	2,38	2,18	2,55
	Molybdän	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,20
	Vanadium	0,20	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Königswasser- aufschluss	Barium	52,7	55	54,3	56	58,3	58,3
	Cadmium	0,087	0,09	0,093	0,083	0,093	0,087
	Chrom	12,3	10,3	10,6	10,9	12,3	11,4
	Molybdän	0,4	0,23	0,33	0,33	0,37	0,27
	Vanadium	9	9,7	10	9,9	10,6	10,1

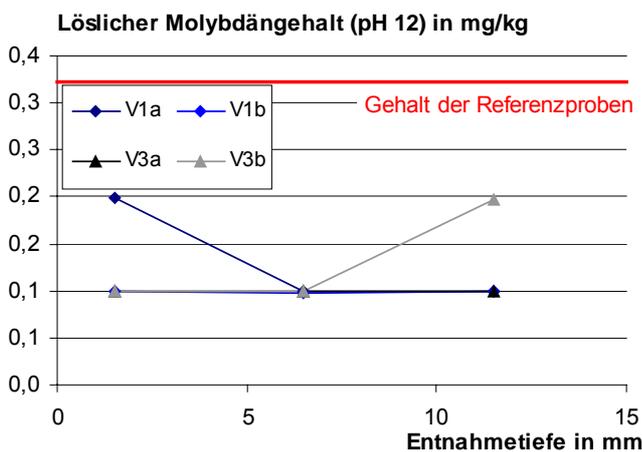
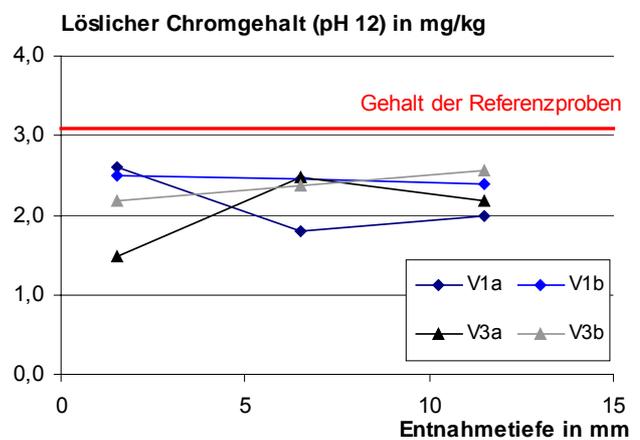
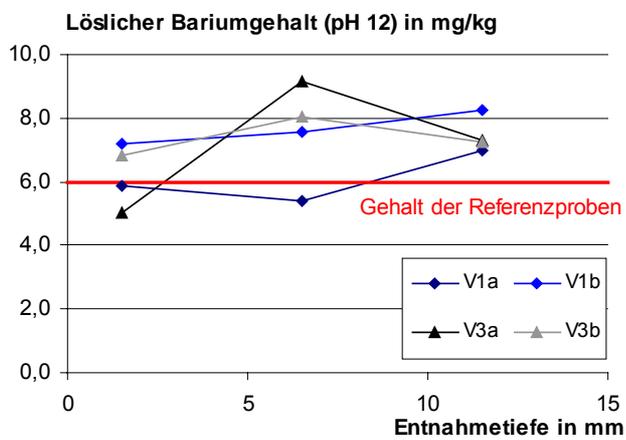
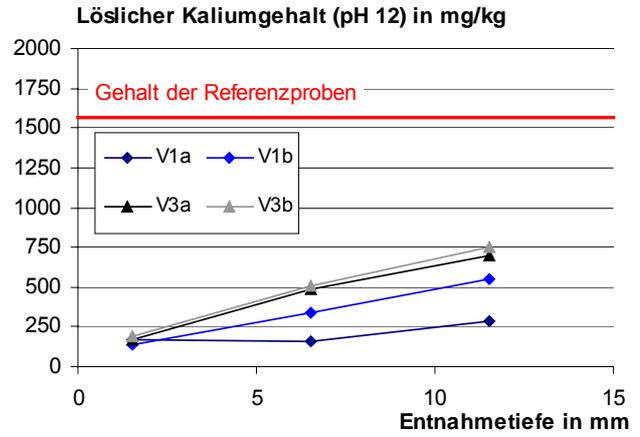
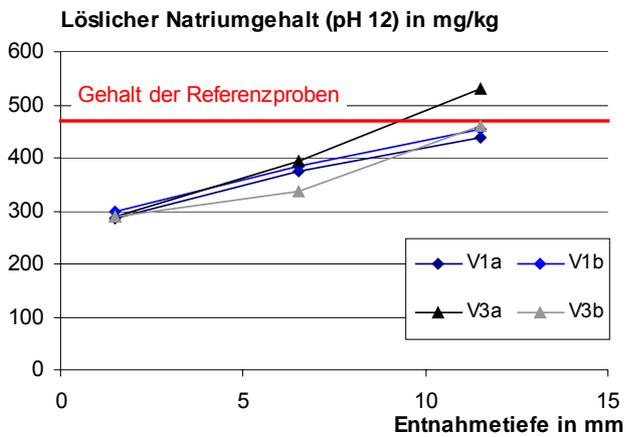
1) Wert im Vergleich zur Parallelmessung und zum Versuch V1 erhöht, wird daher als Ausreißer betrachtet



**Bild B1:** Ergebnisse der Eluatanalysen am Überlauf und im Ablaufbecken für die Fließgeschwindigkeiten  $v_1 = 0,39 \text{ m/d}$ ,  $v_2 = 0,86 \text{ m/d}$ ,  $v_3 = 1,36 \text{ m/d}$  – allgemeine Parameter und Alkalien



**Bild B2:** Ergebnisse der Eluatanalysen am Überlauf und im Ablaufbecken für die Fließgeschwindigkeiten  $v_1 = 0,39 \text{ mg/d}$ ,  $v_2 = 0,86 \text{ m/d}$ ,  $v_3 = 1,36 \text{ m/d}$  – Spurenelemente



**Bild B3:** Ergebnisse der  $pH_{stat}$ -Versuche an Schichten der eluierten Mörtelproben aus dem modifizierten dynamischen Versuch (Fließgeschwindigkeiten:  $v_1 = 0,39$  mg/d,  $v_3 = 1,36$  m/d)