

Auslaugverhalten von Zementsuspensionen

T 3309

T 3309

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

2014

ISBN 978-3-8167-9315-1

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

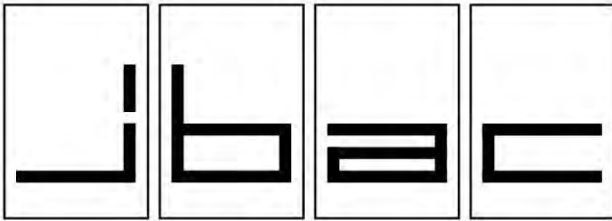
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

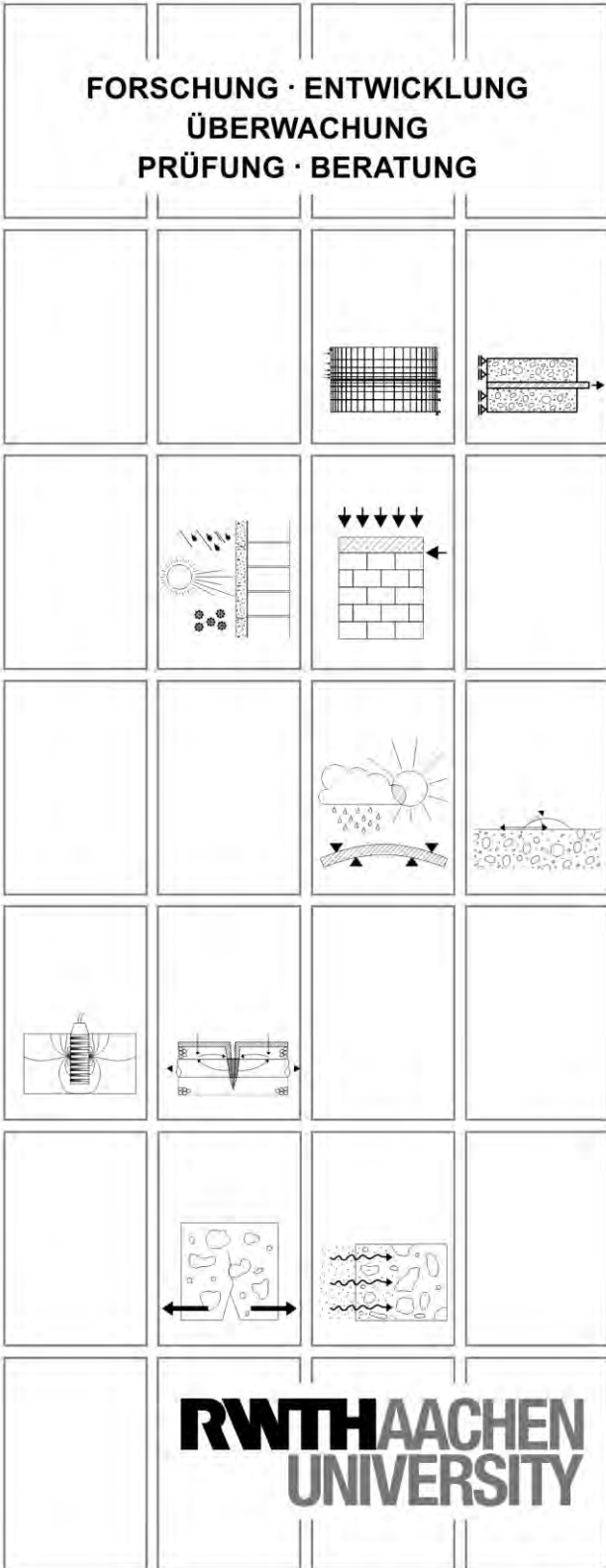
E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG AACHEN

FORSCHUNG · ENTWICKLUNG
ÜBERWACHUNG
PRÜFUNG · BERATUNG



Forschungsbericht F 7093

Auslagerverhalten von
Zementsuspensionen

Lin/Fk

2. Ausfertigung

THEMA

Auslaugverhalten von Zementsuspensionen

- ABSCHLUSSBERICHT -

Forschungsbericht Nr.

F 7093

vom 16.09.2013

Projektbearbeitung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Brameshuber
M.Sc. X. Lin
Dr.-Ing. A. Vollpracht

Auftraggeber/Förderer

Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstr. 30 L
10829 Berlin

Vertragsdatum/Auftragsbestätigung 28.12.2011

Ihr Aktenzeichen

P 52-5-20.73-1409/12

Dieser Bericht umfasst 73 Seiten, davon 59 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.

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

1	EINLEITUNG.....	1
1.1	Allgemeines.....	1
1.2	Injektionsverfahren und baupraktische Randbedingungen beim Einsatz von Zementsuspensionen	1
1.3	Zusammensetzung üblicher Zementsuspensionen für Injektionen in den Boden.....	2
1.4	Laborversuche	3
2	VERSUCHSAUFBAU UND DURCHFÜHRUNG	4
2.1	Übersicht.....	4
2.2	Charakterisierung und Verarbeitung der Zementsuspension	4
2.3	Frischbetonstandtest nach /Bra07/	6
2.4	Modifizierter Frischbetonstandtest im PP-Behälter mit Sandüberdeckung.....	8
2.5	Langzeitstandtest nach /DAf05/.....	9
3	THEORETISCHE VORÜBERLEGUNGEN	10
3.1	Vereinfachte Diffusionsmodelle	10
3.2	Betrachtung der verschiedenen Szenarien	14
3.2.1	Allgemeines.....	14
3.2.2	Auslaugung des Festbetons im Langzeitstandtest.....	16
3.2.3	Auslaugung des Frischbetons im Frischbetonstandtest.....	17
3.2.4	Auslaugung des frisch hergestellten Gemischs	17
4	AUSWERTUNG DER AUSLAUGVERSUCHE	18
4.1	Bestimmung der kumulativen Freisetzung	18
4.2	Bestimmung der Auslaugraten	19
5	ERGEBNISSE	20
5.1	Frischbetonstandtest und modifizierter Frischbetonstandtests	20
5.1.1	Blindversuche mit Sandboden	20
5.1.2	Zementsuspension	21
5.1.2.1	Allgemeines.....	21
5.1.2.2	ph-Wert, Redoxpotential und elektrische Leitfähigkeit	22
5.1.2.3	Natrium, Kalium, Chlorid und Sulfat.....	25
5.1.2.4	Spurenelemente und Barium	29
5.1.2.5	Gegenüberstellung der Freisetzungen.....	35
5.2	Langzeitstandtest nach DAfStb-Richtlinie	37
5.2.1	Allgemeines.....	37
5.2.2	pH-Wert, Redoxpotential und elektrische Leitfähigkeit.....	38
5.2.3	Natrium, Kalium und Sulfat.....	39
5.2.4	Spurenelemente und Barium	42
5.2.5	Gegenüberstellung der Freisetzungen.....	46
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSLICK.....	48
7	LITERATUR	52
	TABELLEN.....	A1-A13
	BILDER	B1

1 EINLEITUNG

1.1 Allgemeines

Bei der bauaufsichtlichen Zulassung eines Baustoffes ist in den Zulassungsprüfungen die Verträglichkeit für Boden und Grundwasser nachzuweisen. Zu diesem Zweck wurde das Grundsatzpapier „Grundsätze zur Bewertung der Auswirkung von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ erstellt, welches auf die Geringfügigkeitsschwellen (GFS) für das Grundwasser zurückgreift. Teil I gibt das generelle Nachweiskonzept vor. In Teil II werden in unterschiedlichen Kapiteln die produktspezifischen Prüfverfahren und Beurteilungskriterien festgelegt. Vorgaben zu Injektionsmitteln sind in Kapitel 2 „Schleierinjektionen“ und Kapitel 3 „Kanalsanierungsmittel“ enthalten. Neben organischen Injektionsmitteln, wie Acrylatgelen und Polyurethanen, beinhalten diese Kapitel auch die Zementsuspensionen.

1.2 Injektionsverfahren und baupraktische Randbedingungen beim Einsatz von Zementsuspensionen

Die Zementsuspension ist eines der wichtigsten Injektionsmittel im Baubetrieb. Neben der Verfüllung von Hohlräumen, Rissen oder Fugen eines Bauteils, werden Zementsuspensionen oft bei Bodenbehandlungen eingesetzt. Durch die Injektion von Zementsuspensionen in den Boden können zahlreiche Bodeneigenschaften positiv beeinflusst werden. So wird beispielsweise die Tragfähigkeit des Baugrunds verbessert, die Wasserdurchlässigkeit des Bodens minimiert oder auch die Auslaugbarkeit der Schadstoffe im Bodenmaterial reduziert.

Bezüglich der Auslaugung kann bei der Injektion der Zementsuspensionen in den Boden zwischen vier Szenarien unterschieden werden:

- Injektion in teilgesättigten Boden
- Injektion in die Grundwasserwechselzone
- Injektion in einen wassergesättigten Boden ohne Grundwasserbewegung
- Injektion in einen wassergesättigten Boden mit Grundwasserbewegung

Bei den Injektionsverfahren wird zwischen der Niederdruckinjektion, der Hebungsinjektion und der Hochdruckinjektion (HDI bzw. DSV (Düsenstrahlverfahren)) unterschieden. Bei der Niederdruckinjektion und der Hebungsinjektion wird eine Bindemittelsuspension allein durch Druck in den Boden eingebracht. Die Eindringgeschwindigkeit und die Eindringtiefe

sind stark von den rheologischen Eigenschaften und der Korngröße der Zementsuspension sowie von der Durchlässigkeit des Bodenmaterials abhängig.

Die Anwendungsgrenzen in Abhängigkeit von Materialien und Injektionsuntergrund ist in Bild 1 dargestellt. Zementsuspensionen eignen sich demnach überwiegend für Kiesboden. Mit Einsatz eines Ultrafeinzements kann auch Sandboden mit Zementsuspensionen behandelt werden.

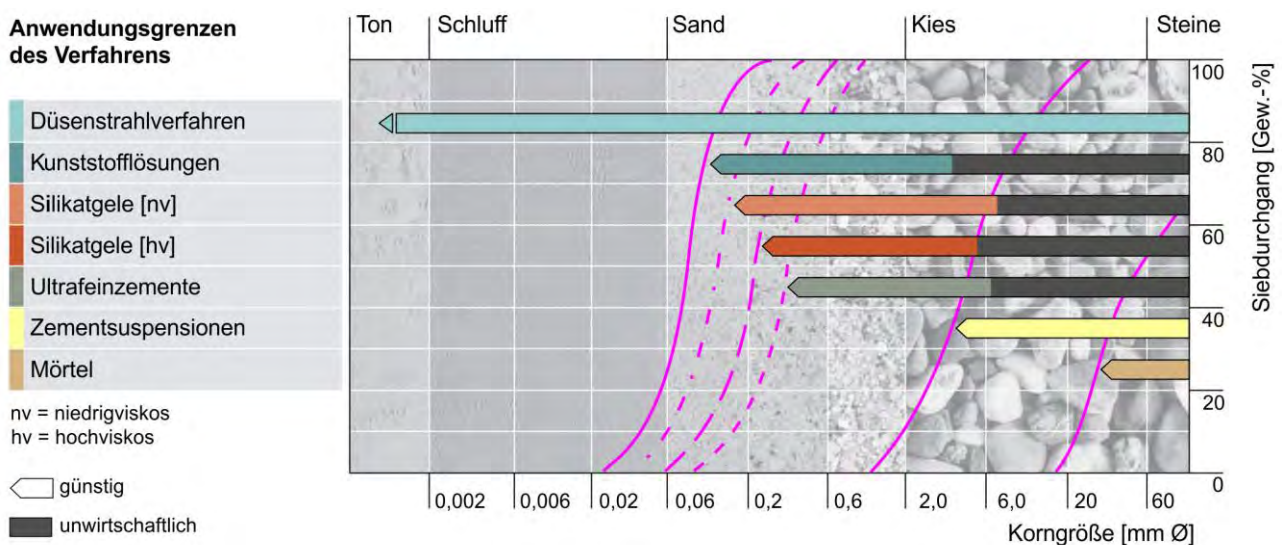


Bild 1: Anwendungsgrenzen von Injektionsverfahren /Kel03/

Beim Injektionsverfahren unterhalb des Grundwasserspiegels wird Grundwasser durch die eindringende Suspension aus den Poren des Bodens verdrängt. Während dieses Prozesses könnte Zementsuspension mit Wasser vermischt und ausgelaugt werden.

Bei Injektionen für Verpressanker oder Verpresspfähle wird freies Wasser aus der Suspension und Synäreswasser aus dem injizierten Bereich verdrängt und gelangt in das Grundwasser. Daher haben die Verpresskörper anschließend einen kleineren w/z-Wert als die frische Suspension.

Bei der Hochdruckinjektion (HDI) wird ein Bohrgestänge mit Düsen auf die gewünschte Tiefe versenkt. Durch einen Wasser- oder Suspensions-Strahl wird die Struktur des Bodens unter hohem Druck zerstört und mit Bindemittel vermischt. Das Gestänge wird unter ständigem Drehen nach oben gezogen, um ein säulenförmiges Boden-Zementsuspension-Gemisch herzustellen. Wenn der Prozess mit einer Überschneidung der bestehenden Säule wiederholt wird, kann eine wasserdichte Wand hergestellt werden (s. Bild 2).

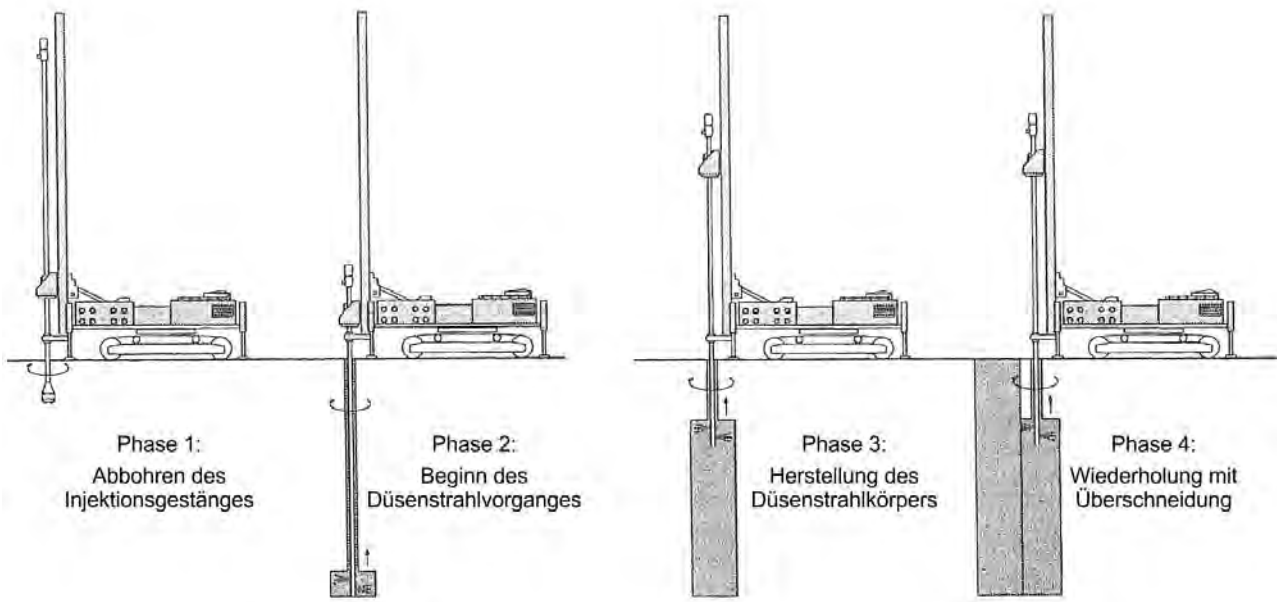


Bild 2: Schematische Darstellung des HDI-Verfahrens /Sch98/

Das durch das HDI-Verfahren erstellte Gemisch aus Boden und Zementsuspension ist porös, da Luft mit verdüst wird, die in der verfestigten Schicht eingeschlossen wird. Es ergibt sich eine Dichte von etwa $1,9 \text{ g/cm}^3$. Nach Informationen von Prof. Borchert, GuD Consult, ist davon auszugehen, dass die Luftporen nicht miteinander verbunden sind. Daher beeinflussen sie den Diffusionswiderstand voraussichtlich nicht negativ.

Die Einsatzmöglichkeiten des HDI-Verfahrens sind in /Sch98/ genannt und in Bild 3 dargestellt:

- *Im Bereich der Gründungs- und Bodenverfestigungsmaßnahmen :*
 - *Neugründungen*
 - *Unterfangungen (oben links)*
 - *Baugrubensicherungen*
 - *Gründungsanierungen historischer Bauten*
 - *Gründungsänderungen bei Nutzungsänderungen oder Umbauten*
 - *Tiefergründungen (oben Mitte)*
 - *Schirminjektion als Vortriebsicherung beim Tunnelbau (unten rechts)*
 - *Gleitfugenvernagelung*

- *Im Bereich der Abdichtungsmaßnahmen:*
 - *Dammabdichtungen*
 - *Dichtsohlen (unten links)*
 - *Fugenabdichtung zwischen Spund-, Pfahl- oder Schlitzwänden, die infolge von vorhandenen Leitungen nicht kontinuierlich hergestellt werden können*
 - *Dichtungswände im Deponiebau*
 - *Wasserdichter Schachverbau*
 - *Lückenschluß zwischen Verbauelementen*

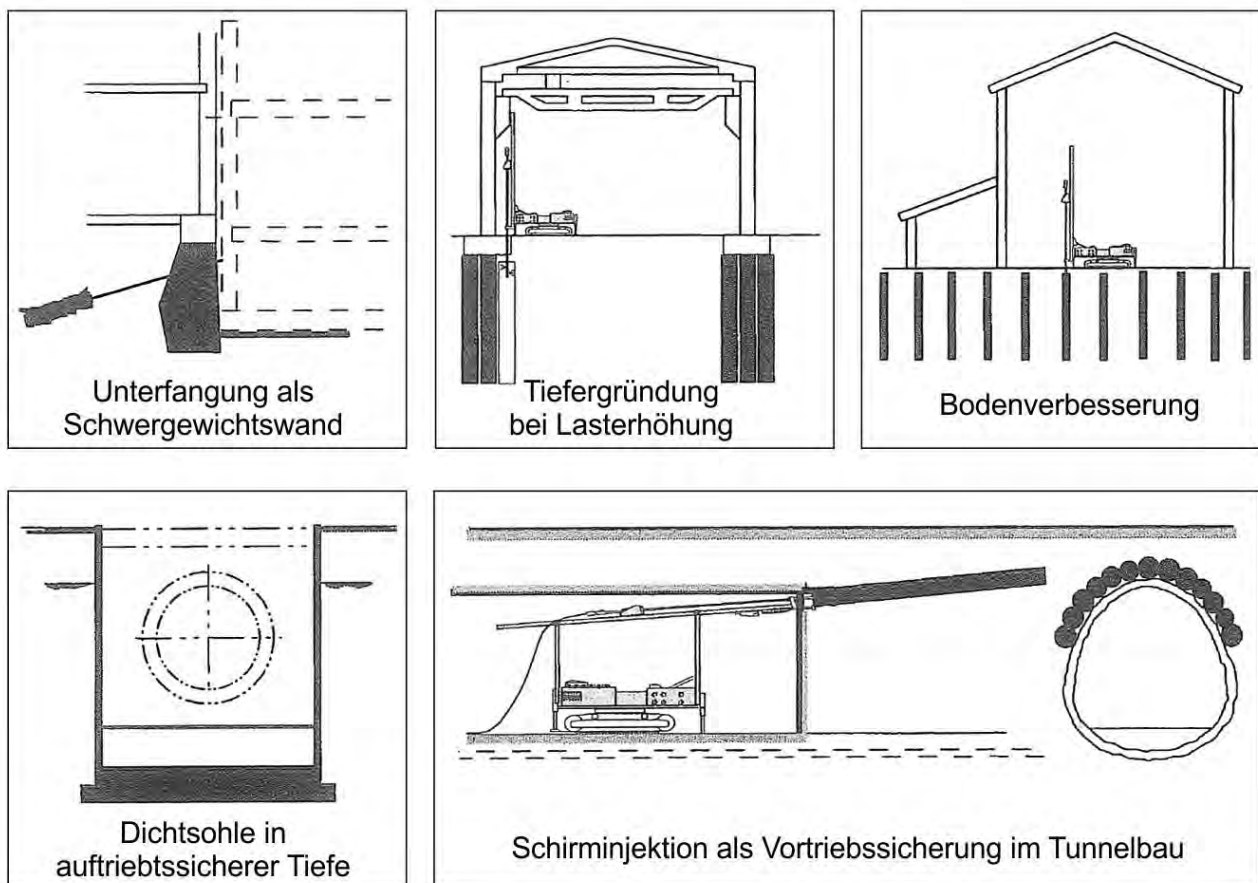


Bild 3: Anwendungsbeispiele des HDI-Verfahrens /Sch98/

Die Kohäsion des Bodens ist der maßgebende Einflussfaktor bei der HDI /Gir12/. Die Einflüsse der Korngröße der Zementsuspension und der Durchlässigkeit des Bodenmaterials sind bei der HDI untergeordnet.

1.3 Zusammensetzung üblicher Zementsuspensionen für Injektionen in den Boden

In Zementsuspensionen werden oft Portlandzemente oder Hochofenzemente eingesetzt. Die einfachste Zementsuspension ist ein Zwei-Komponenten-System (Wasser + Zement). Für bestimmte Zwecke können die Suspensionen mit verschiedenen Zusätzen angereichert werden. Vor allem kann Bentonit die Sedimentationsstabilität von Zementsuspensionen sowie die Fließigenschaften und die Pumpbarkeit verbessern. Wenn der Bentonitgehalt zu hoch ist, verlieren die Zementsuspensionen jedoch an Festigkeit /Ose08, Smo01/. Als Zusatzstoffe können Füller (wie z. B. Quarzmehl oder Kalksteinmehl), latent hydraulische Stoffe (wie z. B. Hüttensand) oder puzzolanische Stoffe (wie z. B. Flugasche) eingesetzt werden /Ose08/. Als Zusatzmittel können Fließmittel, Stabilisierer, Verzögerer, etc. verwendet werden /Gir12/. Die w/z-Werte der Zementsuspensionen sollen für eine Abdichtung mit Niederdruckinjektion zwischen 0,8 und 1,0 liegen /Gir12/. Beim Einsatz des HDI-Verfahrens erstreckt sich der Bereich der w/z-Werte von 0,5 bis 1,5 /Ber02, Smo01/.

Für Zementsuspensionen wird die Feinheit des verwendeten Zements mit d_{95} beschrieben. d_{95} bezeichnet den Korndurchmesser bei einem Siebdurchgang von 95 %. Die Zemente werden in Bezug auf die Feinheit in drei Klassen unterteilt: Standardzement ($d_{95} > 40 \mu\text{m}$), Feinzement ($40 \mu\text{m} > d_{95} > 20 \mu\text{m}$) und Feinstzement ($d_{95} < 20 \mu\text{m}$) /Ose08/. Bei der Herstellung einer Zementsuspension mit einem Feinstzement wird mehr Anmachwasser (w/z 5 – 8) und eine höhere Mischintensität benötigt als bei Standardzement /Kol11/. In Regionen, in denen das Grundwasser hohe Sulfat-Konzentrationen aufweist, muss die Sulfatbeständigkeit des Zements bei der Bodeninjektion beachtet werden. Bis dato wurde allerdings noch nicht die Umweltverträglichkeit der Zementsuspensionen bei Sulfatangriff untersucht.

1.4 Laborversuche

Zur Bewertung des Auslaugverhaltens müssen möglichst realitätsnahe Auslaugversuche im Labor durchgeführt werden. Für Schleierinjektionsmittel wird nach /DIB11/ ein Säulenversuch mit umgekehrter Fließrichtung vorgegeben (inverser Säulenversuch nach Schössner). In diesem Versuch wird die Aushärtungsphase mit erfasst. Dieser Säulenversuch wurde in /Bra09/ herangezogen. Bei der Prüfung von Zementsuspensionen in diesem Versuch wurden jedoch überproportional große Mengen an Inhaltsstoffen ausgewaschen. Dies ist in erster Linie auf die lange Aushärtezeit des Zements und die hohe Fließge-

schwindigkeit des Wassers in dem Säulenversuch zurückzuführen. Es ist davon auszugehen, dass der Versuch das Auslaugverhalten von Zementinjektionen nicht realistisch abbildet (s. auch /Bra10/ und /Bra09/). Um dieser Problematik zu begegnen, wurde bei einem der inversen Säulenversuche in /Bra09/ eine Zementsuspension nach einer Aushärungszeit von 24 Stunden geprüft. Bei dieser Überprüfung waren mit der gewählten Analyse-methode (ICP-OES) keine Freisetzungen mehr messbar. Die Auslaugung ist demnach bei angemessener Aushärtezeit deutlich geringer, es können jedoch aufgrund der hohen Verdünnung keine differenzierten Aussagen zu der Auslaugung gemacht werden.

Es scheint daher empfehlenswert, für Zementsuspensionen eine andere Versuchsmethodik anzuwenden. Die in /Bra04/ beschriebenen statischen und dynamischen Versuche zur Untersuchung von Frischbeton in Kontakt mit einem wassergesättigten Sandbett könnten an den Anwendungsfall „Zementinjektionen“ angepasst werden. Die Reproduzierbarkeit des statischen Versuchs ist jedoch schlecht. In /Bra01/ wurde festgestellt, dass die Chromfreisetzung bei Betonen ohne FM aus teilgesättigten Böden höher als aus gesättigten Böden ist. Die Ursache könnte das kapillare Saugen des Bodenmaterials sein. Dieser Effekt wurde bei weiteren Untersuchungen mit demselben Sandboden (gleiche Korngrößenverteilung) nur beim Parameter Sulfat bestätigt. Die Ergebnisse von /Bra03/ zeigen, dass die meisten Elemente bei gesättigten Böden stärker ausgelaugt wurden als bei teilgesättigten Böden. Zusätzlich zu der schlechten Reproduzierbarkeit sind die Versuchsaufbauten des statischen und des dynamischen Versuchs sehr aufwendig. Für die Zulassungsprüfungen ist eine realitätsnahe und kostengünstige alternative Versuchsmethode notwendig.

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es daher, einen geeigneten Versuch für das Zulassungsverfahren vorzuschlagen und Empfehlungen für die Beurteilung der Versuchsergebnisse zu geben. Einige in der praktischen Anwendung auftretende Effekte können im Labor kaum realistisch nachgestellt werden. Hierzu gehören die Verdüsung von Luft bei der HDI und das Auspressen von Porenwasser des Bodens und freiem Wasser aus der Suspension. Es ist grundsätzlich schwierig, einen homogenen Probekörper mit definierter Oberfläche im Labor durch Injektion herzustellen. In diesem Projekt wurde die Zementsuspension daher analog zur HDI mit dem Bodenmaterial vermischt. Es könnte sein, dass dieses Gemisch nicht den ungünstigsten Fall abbildet, es stellt jedoch einen Kompromiss zwischen Praxisnähe und Praktikabilität der Laborversuche dar. An dem Zementsuspension-Boden-Gemisch wurden unterschiedliche Auslaugversuche durchgeführt, die in Abschnitt 2 beschrieben werden.

2 VERSUCHSAUFBAU UND DURCHFÜHRUNG

2.1 Übersicht

Als Standardversuch zur Bestimmung des Auslaugverhaltens während der Frischphase wurde ein Frischbetonstandtest (s. Abschnitt 2.3, /Bra07/) entwickelt. Die Versuchsdurchführung und der Aufbau des Frischbetonstandtests sind nur wenig aufwendiger als bei dem für erhärteten Beton üblichen Langzeitstandtest nach /DAf05/ (s. Abschnitt 2.5), der hier ebenfalls getestet wird. Im Frischbetonstandtest kann während der Beaufschlagung des Frischbetons mit dem Eluenten eine Störung der Oberfläche auftreten, die zu Streuungen der Auslaugrate führen kann. Bei der ersten Wasser-Beaufschlagung wird oft ein Aufschwimmen der feinen Partikel von der Betonoberfläche beobachtet. Um die Prüfung sicherer und unkomplizierter durchzuführen, wurde der Frischbetonstandtest dahingehend modifiziert, dass ein PP-Behälter und eine Sandüberdeckung verwendet werden (s. Abschnitt 2.4). In diesem Projekt waren alle Versuchseinrichtungen nicht vollkommen luftdicht. Dies führte zu einer Absenkung der pH-Werte durch CO₂-Zutritt und möglicherweise zu einer Erhöhung der Freisetzung von Schwermetallen (wie z. B. Vanadium).

Tabelle 1: Übersicht über die Versuchsdurchführung

Auslaugversuch	Umfang
1	2
Frischbetonstandtest	eine Doppelbestimmung
mod. Frischbetonstandtest	eine Doppelbestimmung
Langzeitstandtest	eine Doppelbestimmung

Die Eluate der Auslaugversuche wurden auf die umweltrelevanten Stoffe Antimon, Arsen, Barium, Blei, Bor, Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Molybdän, Nickel, Quecksilber, Selen, Thallium, Vanadium, Zink sowie Chlorid, Cyanid, Fluorid und Sulfat untersucht. Zusätzlich wurden der pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit, das Redoxpotential sowie der Natrium- und der Kaliumgehalt bestimmt.

2.2 Charakterisierung und Verarbeitung der Zementsuspension

Für dieses Forschungsprojekt wurde eine kommerzielle Zementsuspension ausgewählt, die in /Bra09/ bereits im Säulenversuch getestet worden ist (entspricht ZS4 in /Bra09/). Die TOC-Freisetzung dieser Zementsuspension war im inversen Säulenversuch deutlich höher als die Freisetzung der beiden anderen Zementsuspensionen, obwohl die organischen Anteile sehr gering sind (Glühverlust < 1,5 M.-%).

Laut dem technischen Merkblatt des Herstellers basiert diese Zementsuspension auf einem sehr feinen ($d_{95} < 12 \mu\text{m}$), sulfatbeständigen (< 3,5 % C_3A) Portlandzementklinker. Die chemischen Zusammensetzungen der Zemente sind in Tabelle A1 angegeben. Die Gehalte der Hauptelemente der Zementsuspension wurden gemäß DIN 196-2:2005-05 chemisch analysiert. Sulfat- und Kohlenstoffgehalt wurden im Kohlenstoff-Schwefel-Analysator (CSA 2003) gemessen, die Gehalte an Alkalien sowie die Hauptbestandteile wurden mittels Röntgenfluoreszenzanalyse gemäß DIN 51418-1:1996-09 bestimmt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Natrium mit dieser Methode nicht vollständig erfasst wird, da es beim Aufschluss teilweise verdampft. Die Gehalte der Spurenelemente wurden nach Königswasseraufschluss (gemäß DIN EN ISO 13346:2001-04) mit der ICP-OES (DIN EN ISO 11885:2009-09) ermittelt. Die Korngrößenverteilung dieser Zementsuspension wurde mittels Lasergranulometrie gemessen und ist in Tabelle A2 und Bild B1 dargestellt. Laut technischem Merkblatt soll der Erstarrungsbeginn nach DIN EN 196-3:2009-02 95 Minuten betragen, allerdings wurden im Laborversuch nur 50 Minuten gemessen.

Im technischen Merkblatt wird ein w/z-Wert im Bereich von 0,8 bis 3,0 empfohlen. Hier wurde w/z = 1,0 gewählt, da dieses Produkt in /Bra09/ bereits mit w/z = 1,0 im Säulenversuch getestet worden war.

Wie in Abschnitt 1.4 dargelegt, wurde in diesem Projekt die Zementsuspension analog zur HDI mit dem Bodenmaterial vermischt. Hierfür wurde ein Mörtelmischer verwendet. Als Bodenmaterial wurde ein Quarzsand mit der Körnung 1 / 2 mm gewählt. Dieser Sand wurde auch als Sandüberdeckung im modifizierten Frischbetonstandtest verwendet. Die Schüttdichte des Sandes betrug 1400 kg/m^3 .

Durch Vorversuche wurde ermittelt, dass das Gefüge des Gemischs am dichtesten ist, wenn der Zementgehalt 320 kg/m^3 beträgt (s. Bild 4).

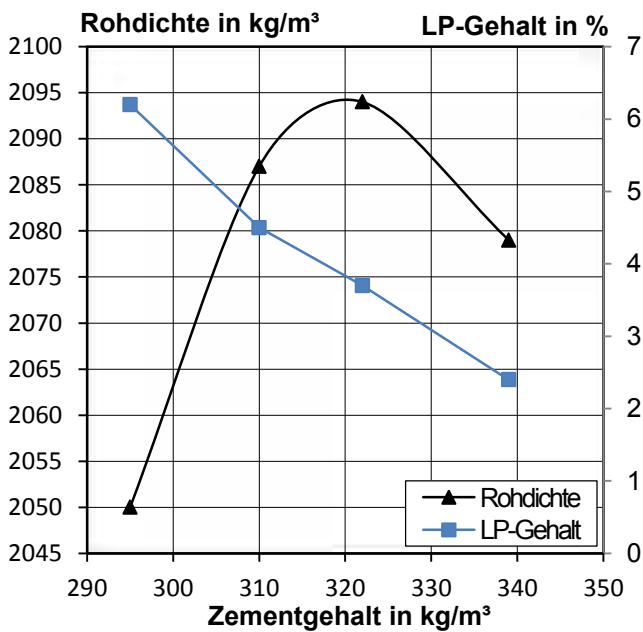


Bild 4: Darstellung der Rohdichte und des Luftgehalts des frischen Zementsuspension-Sand-Gemischs mit unterschiedlichen Zementgehalten

Die Zusammensetzung des Zementsuspension-Sand-Gemisches ist in Tabelle 2 dargestellt. Dieses Gemisch wurde für alle Laborversuche verwendet.

Tabelle 2: Zusammensetzung des Zementsuspension-Sand-Gemischs

Zementgehalt	Sandgehalt	w/z	LP-Gehalt	Ausbreitmaß
kg/m³	kg/m³	-	%	mm
1	2	3	4	5
320	1510	1,0	3,7	188

2.3 Frischbetonstandtest nach /Bra07/

Die Versuchseinrichtung für den Frischbetonstandtest nach /Bra07/ ist in Bild 5 dargestellt.

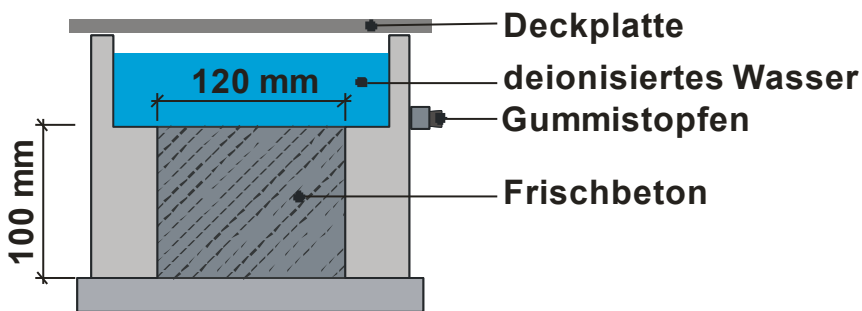


Bild 5: Schematische Darstellung des Frischbetonstandtests, /Bra07/

In diesem Versuch wurde anstelle des Betons ein Sandboden mit der Zementsuspension verwendet. Das Zementsuspension-Sand-Gemisch wurde in den unteren Teil der Form eingefüllt und verdichtet. Dies wurde durch die Vibration des Rütteltisches unterstützt. Anschließend wurde die Oberfläche sorgfältig abgestrichen, so dass sich auf dem auskragenden Rand der Form keine Zementsuspension bzw. Sand befand. Der Eluent (deionisiertes Wasser) wurde vorsichtig von der Seite her in den oberen Teil der Form eingefüllt, um eine Störung der Oberfläche des Frischbetons zu vermeiden. Das Wasser wurde über einen verschließbaren Auslass gewechselt, wobei jeweils eine Probe entnommen wurde. Das Verhältnis von Volumen des Eluenten zur Oberfläche des Probekörpers betrug $V/O = 80 \text{ l/m}^2$.

Neben der Auslaugung während der Frischbetonphase wurde auch die Freisetzung der in Abschnitt 2.1 benannten Parameter aus dem erhärteten verfestigten Boden bestimmt. Hierzu wurde ein Langzeitstandtest (in Anlehnung an /DAf05/) direkt an den Frischbetonstandtest angeschlossen. In Tabelle 3 sind die gewählten Entnahmezeiten angegeben. Die Prüfung wurde als Doppelbestimmung durchgeführt. Eine unbehandelte Sandprobe wurde als Blindprobe geprüft.

Tabelle 3: Entnahmezeiten für den Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest

Eluat Nr.	Versuch	Einheit	Entnahmezeiten
1	2	3	4
1	Frischbetonstandtest	h	0,5
2			2,0
3			4,5
4			8,0
5			14,0
6			24,0
7	anschließender Langzeitstandtest	d	2
8			4
9			8
10			17
11			33
12			57

2.4 Modifizierter Frischbetonstandtest im PP-Behälter mit Sandüberdeckung

Die Versuchseinrichtung für diesen modifizierten Frischbetonstandtest ist in Bild 6 dargestellt. Ein PP-Behälter wurde mit dem Zementsuspension-Sand-Gemisch bis circa 0,5 cm unter die Oberkante gefüllt. Anschließend wurde eine Überdeckung aus gewaschenem Sand aufgebracht, sodass die PP-Schale bis zur Oberkante gefüllt war. Der Probekörper wurde mit dem PP-Behälter in Wasser eingetaucht und geprüft. Die Lagerung der Sandüberdeckung mit der Körnung 1 / 2 mm war sehr locker. Das Verhältnis von Volumen des Eluents (deionisiertes Wasser) zur Oberfläche des Probekörpers betrug wie beim Frischbetonstandtest $V/O = 80 \text{ l/m}^2$. Es wurden die Auslaugbehälter vom Langzeitstandtest verwendet. Weil die auszulaugende Oberfläche hier $0,025 \text{ m}^2$ (anstatt $0,06 \text{ m}^2$ wie beim Langzeitstandtest) betrug, verblieb sehr viel Luft im Behälter. Um eine Karbonatisierung des Eluates zu vermeiden, wurde ein Stück mit Epoxidharz beschichtetes Styrodur eingesetzt, welches auf Wasser schwimmt. Beim Wechseln des Wassers wurden das Styrodur und der Probekörper herausgehoben; das Eluat wurde entnommen, beprobt und analysiert. Die Entnahmezeiten waren identisch mit den in Abschnitt 2.3 genannten Zeiten. Die Prüfung wurde als Doppelbestimmung durchgeführt. Auch hier wurde eine unbehandelte Sandprobe als Blindprobe geprüft.

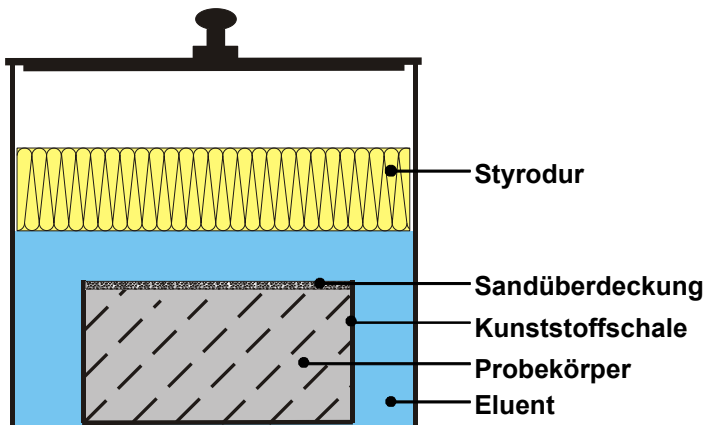


Bild 6: Schematische Darstellung des modifizierten Frischbetonstandtests

2.5 Langzeitstandtest nach /DAf05/

Neben den Auslaugversuchen am Frischbeton wurden Langzeitstandtests in Anlehnung an /DAf05/ durchgeführt. Zur Herstellung der Probekörper wurde eine mit Kunststoffolie beschichtete Würfelschalung mit 100 mm Kantenlänge verwendet. Die anschließende Lagerung erfolgte im Feuchtraum bei 20 °C und 95 % rel. Feuchte. Die Probekörper wurden nach 24 Stunden ausgeschalt, in Kunststoffolie luftdicht verpackt und weiter im Feuchtraum gelagert. Im Alter von 56 Tagen begann der Langzeitstandtest (s. Bild 7). Nach 1, 3, 7, 16, 32 und 56 Tagen wurde der Eluent gewechselt und analysiert. Das Volumen des Eluenten betrug jeweils 4,8 l (entspricht $V/O = 80 \text{ l/m}^2$). Der Versuch wurde in Doppelbestimmung durchgeführt.

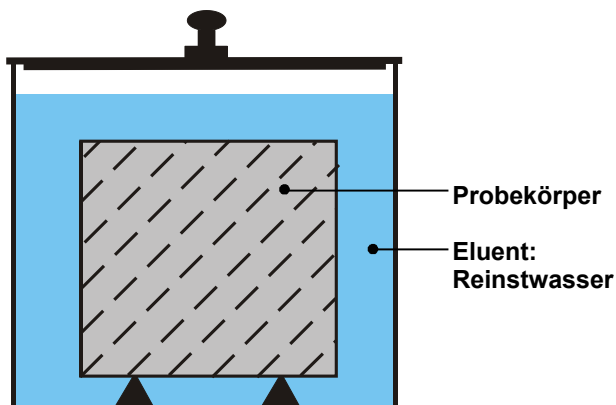


Bild 7: Schematische Darstellung des Langzeitstandtests

3 THEORETISCHE VORÜBERLEGUNGEN

3.1 Vereinfachte Diffusionsmodelle

Gemäß Diffusionsmodell verläuft die Auslaugung des Zementsuspension-Sand-Gemischs bei allen im Abschnitt 2 genannten Standtests durch Diffusion der betrachteten Ionen von einer Quelle (Baustoff) in den Eluenten (Wasser). Die grenzflächennahen Konzentrationen sinken in der Quellenphase theoretisch mit der Zeit ab (vgl. Bild 8) /Bra13a/.

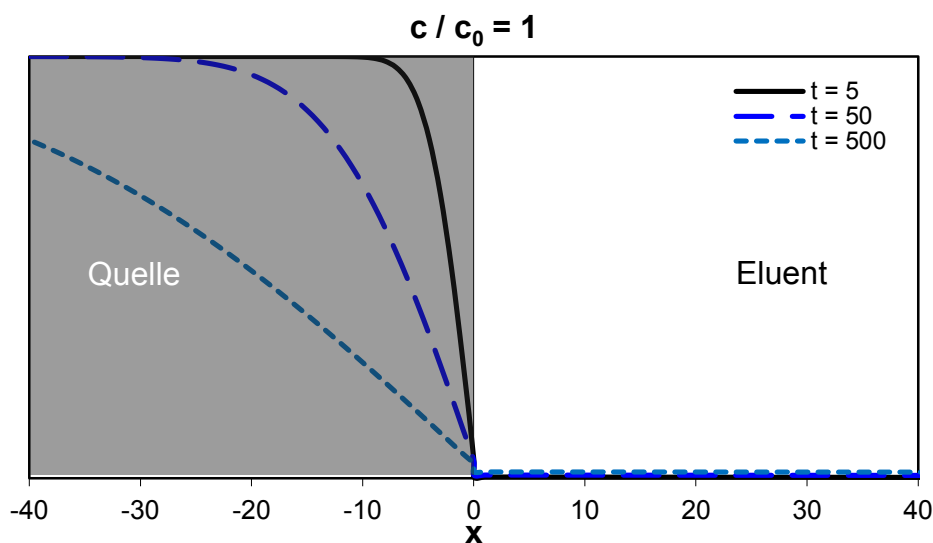


Bild 8: Schematische Darstellung der Konzentrationsverteilung in einem eindimensionalen System mit Diffusionskoeffizient $D_{\text{Quelle}} \gg D_{\text{Eluent}}$ bei unterschiedlichen Zeitpunkten. (t: Zeit, c: Konzentration, c_0 : Gehalt bzw. Anfangskonzentration in der Quellephase) /Bra13a/

Der Diffusionskoeffizient in erhärteten zementgebundenen Baustoffen ist in aller Regel sehr gering. Im Vergleich zu den Feststoffgehalten, sind die ausgelaugten Mengen nach einer 56-tägigen Elution daher ebenfalls sehr gering (s. /Bra13a, Bra13b/). Bei allen im Abschnitt 2 genannten Standtests wird der Probekörper mit einer großen Wassermenge (80 l/m^2) ausgelaugt und das Wasser wird in festgelegten Intervallen gewechselt. Aufgrund der Randbedingungen können Quelle und Eluent als zwei annähernd unendlich große Phasen angenommen werden. Der Frischbetonstandtest (s. Abschnitt 2.3) und der Langzeitstandtest (s. Abschnitt 2.5) können vereinfachend mit einem eindimensionalen Modell beschrieben werden (s. Bild 9).

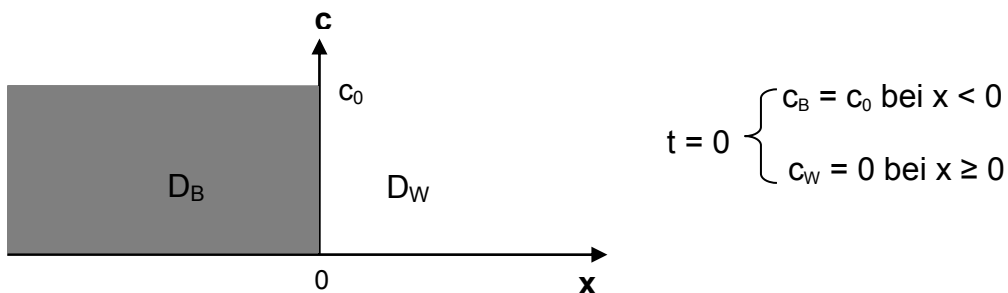


Bild 9: Darstellung der Randbedingungen des Langzeitstandtests bzw. des Frischbetonstandtests (c_B : Konzentration im Baustoff bzw. im Bereich $x < 0$, c_W : Konzentration im Wasser bzw. im Bereich $x \geq 0$, D_B : Diffusionskoeffizient des Baustoffs, D_W : Diffusionskoeffizient des Wassers, x : Position)

Mit der Annahme, dass die Freisetzung diffusionskontrolliert ist, wurden die Freisetzung und die Auslaugrate in /Bra13a/ abgeleitet:

$$E = 2 \cdot \frac{c_0}{k_D} \sqrt{\frac{t}{\pi}} \quad (1)$$

$$J = \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{c_0}{k_D \cdot \sqrt{\pi \cdot t}} \quad (2)$$

wobei
$$k_D = \frac{\sqrt{D_B} + \sqrt{D_W}}{\sqrt{D_B \cdot D_W}} = \frac{1}{\sqrt{D_B}} + \frac{1}{\sqrt{D_W}}$$

E: Freisetzung

J: Auslaugrate bzw. Freisetzungsgeschwindigkeit

c_0 : Anfangskonzentration in der Quelle ($x \leq 0$) (Konstante)

t: Zeit

D_B : Diffusionskoeffizient in der Quelle ($x \leq 0$) (Konstante)

D_W : Diffusionskoeffizient im Eluenten ($x > 0$) (Konstante)

k_D : Funktion von D_B und D_W , steigt mit abnehmendem D_B auf.

Beim modifizierten Frischbetonstandtest wurde eine Sandüberdeckung aus gewaschenem Sand mit der Körnung 1 / 2 mm auf die Oberfläche des Baustoffs aufgebracht. Da diese Sandüberdeckung möglicherweise die Elution behindern könnte, wurde die Sandüberdeckung im Modell als eine Grenzschicht angenommen. Unter Diffusionskontrolle werden die Randbedingungen des Modells in Bild 10 dargestellt:

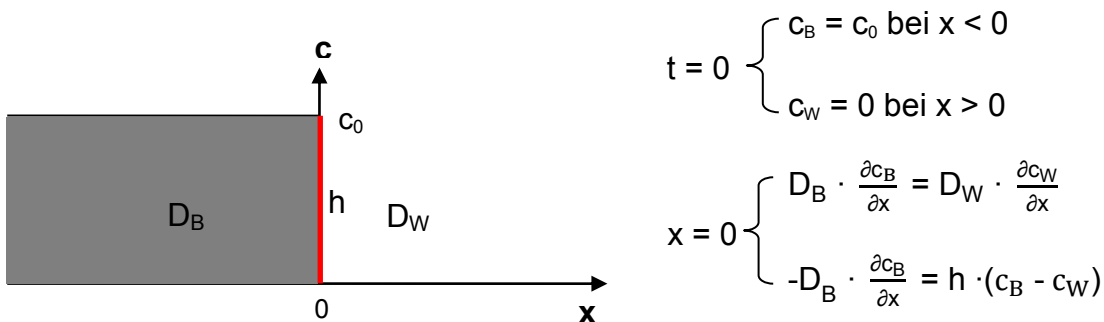


Bild 10: Darstellung der Randbedingungen des Modells für den modifizierten Frischbetonstandtest mit einer Grenzschicht (c_B : Konzentration im Baustoff bzw. im Bereich $x < 0$, c_W : Konzentration im Wasser bzw. im Bereich $x \geq 0$, D_B : Diffusionskoeffizient des Baustoffs, D_W : Diffusionskoeffizient des Wassers, h : Durchlässigkeit der Grenzschicht, x : Position) /Bra13a/

Die Gleichungen für die Freisetzung und die Auslaugrate wurden in /Bra13a/ ebenso abgeleitet:

$$E_G = \frac{2 \cdot c_0}{k_D} \sqrt{\frac{t}{\pi}} + \frac{c_0}{h \cdot k_D^2} \left(\operatorname{erfc}(h \cdot k_D \sqrt{t}) \cdot e^{h^2 \cdot k_D^2 \cdot t} - 1 \right) \quad (3)$$

$$J = h \cdot c_0 \cdot \operatorname{erfc}(h \cdot k_D \sqrt{t}) \cdot e^{h^2 \cdot k_D^2 \cdot t} \quad (4)$$

E_G : Freisetzung bei Vorhandensein einer Grenzschicht

J : Auslaugrate bzw. Freisetzungsgeschwindigkeit

c_0 : Anfangskonzentration in der Quelle ($x \leq 0$) (Konstante)

t : Zeit

h : Durchlässigkeit der Grenzschicht (Konstante)

D_B : Diffusionskoeffizient in der Quelle ($x \leq 0$) (Konstante)

D_W : Diffusionskoeffizient im Eluenten ($x > 0$) (Konstante)

k_D : Funktion von D_B und D_W (s. o.), steigt mit abnehmendem D_B an

Im Vergleich zu Gleichung (1) wird die Freisetzung durch den Einsatz einer Grenzschicht vermindert. Die Differenz beträgt:

$$\Delta E = E_{o.G.} - E_G = \frac{c_0}{h \cdot k_D^2} \left(1 - \operatorname{erfc}(h \cdot k_D \sqrt{t}) \cdot e^{h^2 \cdot k_D^2 \cdot t} \right) \quad (5)$$

$E_{o.G.}$: Freisetzung ohne Grenzschicht (s. Gleichung (1))

E_G : Freisetzung mit Grenzschicht

Mit $\eta = h \cdot k_D \cdot \sqrt{t}$ gilt:

$$\Delta E = \frac{c_0}{h \cdot k_D^2} \left(1 - \operatorname{erfc}(\eta) \cdot e^{\eta^2} \right) \quad (6)$$

Der Term $\operatorname{erfc}(\eta) \cdot e^{\eta^2}$ kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wie Bild 11 verdeutlicht.

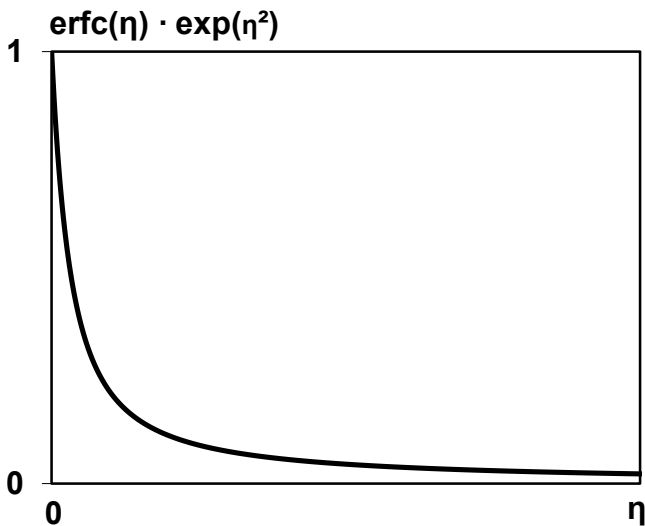


Bild 11: Darstellung der Wert von $\operatorname{erfc}(\eta) \cdot e^{\eta^2}$ im Verlauf von η

Daher ist die Freisetzungsdifferenz wie folgt begrenzt:

$$0 \leq \Delta E < \frac{c_0}{h \cdot k_D^2} \quad (7)$$

In Bild 12 ist ΔE über der Zeit aufgetragen. Die Freisetzungsdifferenz steigt am Anfang der Elution stark an und nähert sich nach einer kurzen Zeit asymptotisch dem Wert $c_0 / (h \cdot k_D^2)$.

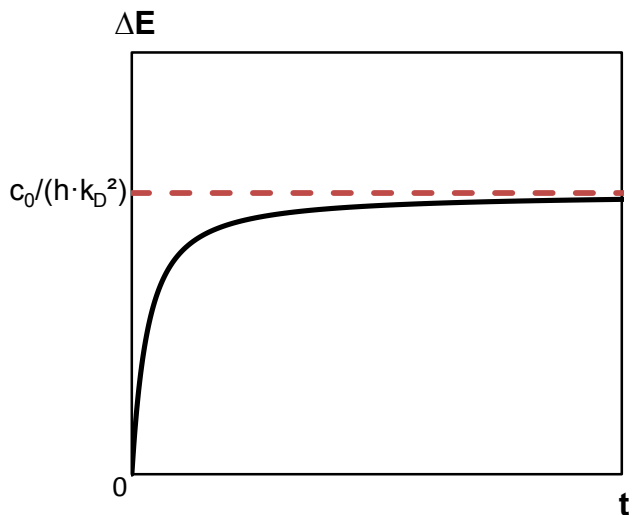


Bild 12: Darstellung der Freisetzungsdifferenz $\Delta E = E_{o,G.} - E_G$ im Verlauf der Zeit

Aus dem Grenzwert $c_0 / (h \cdot k_D^2)$ ergibt sich, dass der Einfluss der Grenzschicht mit abnehmender Durchlässigkeit der Grenzschicht und abnehmender Gefügedichte des Baustoffs zunimmt.

3.2 Betrachtung der verschiedenen Szenarien

3.2.1 Allgemeines

Um die in Abschnitt 3.1 vorgestellten Gleichungen zu erläutern, werden die Gleichungen hier für die frisch hergestellte Mischung aus Zementsuspension und Sand, die frühe Erhärtungsphase und bei weitgehend abgeschlossener Hydratation unter realitätsnahen Randbedingungen diskutiert. Der Parameter Natrium wird für die Diskussion als Beispiel ausgewählt. Tabelle 4 zeigt die beispielhaft angenommenen Werte für die relevanten Parameter.

Tabelle 4: Beispielhaft angenommene Randbedingungen für die Natrium-Auslaugung

Parameter	Beschreibung	Einheit	Wert
1	2	3	4
D_W	Diffusionskoeffizient im Wasser	m^2/s	$1,18 \cdot 10^{-9}$
$D_{BF}^{1)}$	Diffusionskoeffizient im frisch hergestellten Gemisch (Startphase, 0 - 4,5 h, Wassermenge = 320 kg/m^3)	m^2/s	$3,78 \cdot 10^{-10}$
$D_{BJ}^{2)}$	Diffusionskoeffizient in der Erhärtungsphase (4,5 h – 7 d)	m^2/s	$1 \cdot 10^{-11}$
$D_{BL}^{3)}$	Diffusionskoeffizient bei weitgehend abgeschlossener Hydratation (Endphase, ab 7 d)	m^2/s	$5,79 \cdot 10^{-12}$
k_{DF}	Startphase $k_{DF} = (1/\sqrt{D_{BF}}) + (1/\sqrt{D_W})$	$s^{0,5}/m$	$8,1 \cdot 10^4$
k_{DJ}	Erhärtungsphase $k_{DJ} = (1/\sqrt{D_{BJ}}) + (1/\sqrt{D_W})$	$s^{0,5}/m$	$3,5 \cdot 10^5$
k_{DL}	Endphase $k_{DL} = (1/\sqrt{D_{BL}}) + (1/\sqrt{D_W})$	$s^{0,5}/m$	$4,4 \cdot 10^5$
c_0	Anfangskonzentration im Baustoff	mg/m^3	350.000
$h_5^{4)}$	Durchlässigkeit der Sandüberdeckung	m/s	$9,44 \cdot 10^{-8}$
$h_{10}^{4)}$	Durchlässigkeit der Sandüberdeckung	m/s	$4,72 \cdot 10^{-8}$
$D_{Boden}^{5)}$	Diffusionskoeffizient im Baustoff	m^2/s	$1,18 \cdot 10^{-10}$

- 1) Vor der Erhärtung (Startphase) findet der Diffusionsprozess im Zugabewasser statt. Bei einer Wassermenge von 320 kg/m^3 (entspricht $w/z = 1$ bei Zementmenge = 320 kg/m^3) gilt $D_{BF} = 0,32 \cdot D_W$
- 2) Angenommener Wert zwischen D_{BL} und D_{BF}
- 3) Anhand der Freisetzung im DAfStb-Langzeitstandtest ($E_{56d} = 1976 \text{ mg/m}^2$, vgl. Tabelle A13) nach Gleichung (1) berechneter Wert
- 4) Die Dicke der Sandüberdeckung beträgt $d_G = 5$ bzw. 10 mm . Die Porosität der Grenzschicht beträgt $n_{e,G} = 40 \%$. Hier werden Sorptionseffekte und die Tortuosität in der Grenzschicht vernachlässigt. Die Durchlässigkeit der Sandüberdeckung wird zu $h = n_{e,G} \cdot D_W / d_G$ angesetzt
- 5) Ein Bodenmaterial mit einer Porosität von $n_{e,Boden} = 0,1$ wird als Eluent angesehen. Hier werden die Sorption und die Tortuosität im Bodenmaterial vernachlässigt. Die Durchlässigkeit des Bodens sollte $D_{Boden} = n_{e,Boden} \cdot D_W$ betragen

Da alle in Abschnitt 3.1 abgeleiteten Gleichungen von einem konstanten Diffusionskoeffizienten ausgehen ist es leider nicht möglich, auf analytischem Wege den gesamten Prozess der Auslaugung vom Einbringen der Suspension in den Boden bis zum vollständig hydratisierten Baustoff abzubilden. Dies wäre nur auf numerischem Wege möglich. Um dennoch einen Anhaltspunkt für den Einfluss der Grenzschicht und damit indirekt auch für den Einfluss des Diffusionskoeffizienten im Boden auf den Auslaugprozess zu erhalten, werden in den folgenden Abschnitten drei Fälle berechnet:

- Der Baustoff kommt erst bei weitgehend abgeschlossener Hydratation mit dem Eluenten in Kontakt (Abschnitt 3.2.2)
- Der Baustoff kommt während der Erhärtungsphase mit dem Eluenten in Kontakt (Abschnitt 3.2.3)
- Der Baustoff kommt unmittelbar nach Herstellung mit dem Eluenten in Kontakt (Abschnitt 3.2.4)

3.2.2 Auslaugung des erhärteten Baustoffs

Mit den angenommenen Werten aus Tabelle 4 können Freisetzungen mit und ohne Sandüberdeckung mit Gleichung (1) und Gleichung (3) berechnet werden. Es wird der Diffusionskoeffizient D_{BL} aus Tabelle 4 angesetzt, d. h. es wurde davon ausgegangen, dass der Baustoff erst nach weitgehend abgeschlossener Hydratation mit dem Eluenten in Kontakt kommt. Eine Zusammenstellung zeigt Tabelle 5.

Tabelle 5: Gegenüberstellung der Natriumfreisetzungen aus dem erhärteten Baustoff bei Variation der Randbedingungen

Quelle	Grenzschicht	Zeitraum	Freisetzung
1	2	3	4
erhärtetes Gemisch	keine	56 d	1953 mg/m ²
	5 mm Sandüberdeckung		1934 mg/m ²
	10 mm Sandüberdeckung		1916 mg/m ²

Die Minderung der Freisetzung durch den Einsatz einer 5 mm dicken Sandüberdeckung beträgt 19 mg/m². Beim Einsatz einer 10 mm dicken Sandüberdeckung beträgt die Minderung 37 mg/m² (vgl. Gleichung (5)). In beiden Fällen liegen die Minderungen der Freisetzung unter 2 %. 90 Prozent dieser Minderungen treten in den ersten 4,9 Stunden (5 mm Sandüberdeckung) bzw. in den ersten 19,5 Stunden (10 mm Sandüberdeckung) auf. Nach diesen Zeiträumen sind die Minderungen so gering, dass die Auslaugraten nahezu konstant bleiben.

Im Vergleich zum erhärteten Baustoff ist der Diffusionskoeffizient in der Sandüberdeckung sehr hoch. Daher sind die Einflüsse des Einsatzes der Sandüberdeckung untergeordnet.

3.2.3 Auslaugung während der Erhärtungsphase

Mit den Gleichungen (1) und (3) und dem Diffusionskoeffizient D_{BJ} aus Tabelle 4 wird der Einfluss der Sandschicht im Zeitraum bis 7 d berechnet (s. Tabelle 6).

Tabelle 6: Gegenüberstellung der Natriumfreisetzungen während der Erhärtungsphase bei Variation der Randbedingungen

Quelle	Grenzschicht	Zeitraum	Freisetzung
1	2	3	4
Baustoff während der Erhärtungsphase	keine	7 d	889 mg/m ²
	5 mm Sandüberdeckung		859 mg/m ²
	10 mm Sandüberdeckung		830 mg/m ²

Die Minderung der Freisetzung durch den Einsatz einer 5 mm dicken Sandüberdeckung beträgt 30 mg/m². Beim Einsatz einer 10 mm dicken Sandüberdeckung beträgt die Minderung 59 mg/m² (vgl. Gleichung (5)). Die Minderungen der Freisetzung liegen 3,4 % (5 mm Sandüberdeckung) bzw. 6,6 % (10 mm Sandüberdeckung).

Im Vergleich zum Baustoff während der Erhärtungsphase ist der Diffusionskoeffizient in der Sandüberdeckung relativ hoch. Daher kann der Einfluss der Sandüberdeckung vernachlässigt werden.

3.2.4 Auslaugung des frisch hergestellten Gemischs

Analog zum Abschnitt 3.2.2 wurde die Freisetzung aus dem frisch hergestellten Gemisch mit dem Diffusionskoeffizienten D_{BF} aus Tabelle 4 berechnet. Als Zeitraum wurde 4,5 h gewählt, da nach dem Erstarren der angenommene Diffusionskoeffizient, der auf einem Wassergehalt von 320 l/m³ beruht, höchst wahrscheinlich nicht mehr angesetzt werden kann. Zum Vergleich wurde die Freisetzung während der Erhärtungsphase (D_{BJ}) und nach Erhärtung (D_{BL}) ebenfalls im Zeitraum 4,5 h berechnet. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 7.

Tabelle 7: Gegenüberstellung der Kaliumfreisetzungen aus dem Zementsuspension-Sand-Gemisch in während der unterschiedlichen Hydratationsphasen bei Variation der Randbedingungen, Elutionszeitraum 4,5 Stunden

Quelle	keine Grenzschicht	5 mm Sandüberdeckung	10 mm Sandüberdeckung
-	mg/m ²		
1	2	3	4
frisch hergestelltes Gemisch	624	302	194
Baustoff in der Erhärtungsphase	146	119	99
erhärteter Baustoff	113	96	83

Unter gleichen Randbedingungen sind die Freisetzungen des frischen Gemischs erheblich höher als die Freisetzungen des Baustoffs während und nach der Erhärtung. Weil der Diffusionskoeffizient D_{BF} im frischen Stadium wesentlich größer als im erhärteten Baustoff ist, beeinflussen die Sandüberdeckungen und der Diffusionskoeffizient des Eluenten (Wasser bzw. Sandboden) stark die Freisetzung, besonders zu Elutionsbeginn. Durch eine Sandüberdeckung wird die Freisetzung des frischen Gemischs in den ersten 4,5 Stunden um 51,6 % reduziert.

Im realen Fall wird das Gefüge des Baustoffs zunehmend dichter. Das heißt, dass der Diffusionskoeffizient mit der Zeit abnimmt. Daher geht der Einfluss der Sandüberdeckung im Verlauf der Zeit stark zurück. Der Einfluss der Sandüberdeckung auf die Freisetzung sollte deshalb überwiegend in den ersten Wechsellagerungen des Frischbetonstandtests deutlich werden.

4 AUSWERTUNG DER AUSLAUGVERSUCHE

4.1 Bestimmung der kumulativen Freisetzung

Zunächst wurde die Freisetzung E_i in jedem einzelnen Elutionsschritt i berechnet. Die kumulative Freisetzung ergibt sich durch Aufsummierung von E_i (s. Gleichung (8)).

$$E_n = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \frac{V}{O} \quad (8)$$

E_n : kumulative Freisetzung am Ende von Intervall n in mg/m^2

E_i : Freisetzung während des Auslaugintervalls i in mg/m^2

c_i : Konzentration im Eluat bei Elutionsschritt i in mg/l

V/O : Verhältnis des Eluenten-Volumens zur Oberfläche des Prüfkörpers, $V/O = 80 \text{ l}/\text{m}^2$

Wenn die Eluatkonzentration (c_i) unterhalb der Bestimmungsgrenze lag, wurde c_i bei Abschätzung der maximalen kumulativen Freisetzungen ($E_{n,\text{max}}$) in Höhe der Bestimmungsgrenze gewählt. Zur Ermittlung der minimalen kumulativen Freisetzungen ($E_{n,\text{min}}$) wurde c_i zu Null gewählt.

Für den DAfStb-Langzeitstandtest kann die zulässige Gesamtfreisetzung für Festbeton nach 56 Tagen (zul. $E_{56\text{d}}$) aus der Geringfügigkeitsschwelle (GFS) berechnet werden, /DIB11/:

$$\text{zul. } E_{56\text{d}} = \text{GFS} / 0,97 \quad (9)$$

(zul. $E_{56\text{d}}$ in mg/m^2 und GFS in $\mu\text{g}/\text{l}$)

4.2 Bestimmung der Auslaugraten

Neben der Freisetzung (E) wurden die Auslaugraten (J) berechnet. Die Auslaugrate entspricht der Geschwindigkeit der Freisetzung.

$$J_i = \frac{E_i}{t_i - t_{i-1}} \quad (10)$$

J_i : mittlere Auslaugrate im Elutionsschritt i, in $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

t_i : Zeit am Ende des Elutionsschritts i in d

t_{i-1} : Zeit am Ende des Elutionsschritts (i-1) bzw. am Anfang des Elutionsschritts i in d

J_i ist nach Gleichung (10) die mittlere Auslaugrate eines Elutionsschritts. Für die Darstellung des Auslaugverhaltens im Verlauf der Zeit im $J - t$ - bzw. $\lg(J) - \lg(t)$ -Diagramm ist es notwendig, jedem J_i einen entsprechenden Zeitpunkt $t_{M,i}$ zuzuordnen. Bei diffusionskontrollierten Auslaugprozessen aus einem porösen Festkörper ohne Grenzschicht tritt ein lineares Verhalten zwischen $\lg(J)$ und $\lg(t)$ auf /Bra13a/. Daher wurde die Auslaugrate J beschrieben als:

$\lg(J) = f \cdot \lg(t) + \lg(m)$ bzw.

$$J(t) = m \cdot t^f \quad (11)$$

f, m : Konstanten

Weiterhin gilt:

$$J_i = J(t_{M,i}) = \frac{E_i}{t_i - t_{i-1}} = \frac{\int_{t_{i-1}}^{t_i} J \cdot dt}{t_i - t_{i-1}} = \frac{\int_{t_{i-1}}^{t_i} m \cdot t^f \cdot dt}{t_i - t_{i-1}} = \frac{m}{f+1} \cdot \frac{t_i^{f+1} - t_{i-1}^{f+1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (12)$$

Aus den Gleichungen (11) und (12) folgt:

$$t_{M,i} = \left(\frac{t_i^{f+1} - t_{i-1}^{f+1}}{(f+1) \cdot (t_i - t_{i-1})} \right)^{\frac{1}{f}} \quad (13)$$

$t_{M,i}$ muss iterativ anhand der ermittelten Steigung bestimmt werden.

Beim Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest wurde die Auslaugrate nur für die Festbeton- bzw. Jungbetonphase berechnet. Bei einigen Parametern ergab sich hier in der doppeltlogarithmischen Darstellung keine Gerade, d. h. Gleichung (11) ist nicht gültig. Aus diesem Grund kann Gleichung (13) nicht angewendet werden. Bei diesen Parametern (insbesondere Sulfat und Vanadium) wurde J_i über der Mitte des Zeitintervalls aufgetragen.

5 ERGEBNISSE

5.1 Frischbetonstandtest und modifizierter Frischbetonstandtests

5.1.1 Blindversuche mit Sandboden

Zum Vergleich mit dem verfestigten Sandboden wurden Blindversuche mit demselben Sand ohne Zementsuspension durchgeführt. Hierfür wurden die Versuchseinrichtungen des Frischbetonstandtests und des modifizierten Frischbetonstandtests verwendet und die Versuche jeweils incl. anschließendem Langzeitstandtests nachgestellt. Es wurden unbehandelte Sandproben (1 / 2 mm, nicht gewaschen) verwendet und mit deionisiertem Wasser ausgelaugt.

Die Konzentrationen der Eluate sind im Anhang in den Tabellen A3 und A4 zusammengestellt.

In deionisiertem Wasser (Eluent) betragen der pH-Wert ca. 6,5 und das Redoxpotential ca. 450 mV. Das Eluat wies pH-Werte bis etwa 9 (Mittelwert 7,5) und Redoxpotentiale bis rd. 800 mV (Mittelwert ca. 500 mV) auf (s. Tabellen A3 und A4). Die Konzentrationen von Chlorid und Sulfat lagen in fast allen Elutionsschritten oberhalb der Bestimmungsgrenze. Z. T. wurden Sulfatkonzentrationen über 5 mg/l gefunden. Chlorid lag dagegen bei < 1 mg/l. Die Konzentrationen von Natrium und Kalium waren erst in den letzten drei bis fünf Elutionsschritten quantifizierbar und lagen auf sehr niedrigem Niveau (< 1 mg/l). Die Konzentrationen der übrigen Elemente lagen zumeist unterhalb der Bestimmungsgrenze. Ausgenommen sind Barium, Blei, Kupfer und Zink, deren Konzentrationen in der Regel ungefähr auf Höhe der Bestimmungsgrenze lagen.

Auffällig ist, dass die Konzentrationen von Zink im modifizierten Verfahren immer oberhalb der Bestimmungsgrenze lagen, im Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest dagegen oft unterhalb der Bestimmungsgrenze. Wahrscheinlich wurde Zink beim modifizierten Verfahren von der eingesetzten PP-Schale freigesetzt. Ansonsten gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Prüfverfahren.

Offenbar ist der verwendete Rheinsand nicht vollkommen inert, sondern setzt z. B. Sulfat frei. Mit der Zugabe der Zementsuspension können manche Parameter eingebunden werden.

5.1.2 Zementsuspension

5.1.2.1 Allgemeines

Im folgenden Abschnitt werden nur die Freisetzungen aus dem Frischbetonstandtest bzw. aus dem modifizierten Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest ausgewertet. Die Kinetik der Auslaugung wird in Abschnitt 5.2 im Vergleich zum Langzeitstandtest dargestellt.

Die Konzentrationen der Eluate sind im Anhang in den Tabellen A5 bis A8 zusammengestellt. Die Konzentrationen von Cyanid, Fluorid, Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Quecksilber, Selen und Thallium lagen in allen Eluaten unterhalb der Bestimmungsgrenzen. Die Konzentrationen von Bor, Kobalt, Nickel waren jeweils nur in einem Eluat quantifizierbar. Daher wurden die obengenannten 12 Parameter nicht ausgewertet. Wie bei den Blindversuchen (Abschnitt 5.1.1) festgestellt, wurde Zink aus der PP-Schale freigesetzt. Daher wird Zink im modifizierten Frischbetonstandtest nicht ausgewertet. Für Stoffe, die nur in einem Teil der Eluate nachgewiesen wurden, ist neben der maximalen Freisetzung, die sich ergibt, wenn die nicht messbaren Eluatkonzentrationen auf die Bestimmungsgrenzen gesetzt werden, auch die minimale Freisetzung berechnet worden, bei der die nicht nachweisbaren Konzentrationen zu Null gesetzt wurden.

5.1.2.2 pH-Wert, Redoxpotential und elektrische Leitfähigkeit

Der Verlauf der pH-Werte der Eluate aus den Zementsuspension-Sand-Gemischen ist in Bild 13 dargestellt. Die pH-Werte aus dem Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest waren jeweils höher als die Werte aus dem modifizierten Verfahren. Ab dem neunten (8 d) bzw. zehnten (17 d) Elutionsschritt waren die Differenzen der pH-Werte zwischen den beiden Verfahren relativ klein. Dies bestätigt die theoretischen Überlegungen nach denen der Einfluss der Grenzschicht mit zunehmender Gefügedichte des Baustoffs, zurück geht. Bei den Elutionsschritten 2 d und 4 d wurden erhöhte pH-Werte gemessen. Dies ist wahrscheinlich auf eine falsche Kalibrierung der Messgeräte zurückzuführen, denn bei den Leitfähigkeiten, die maßgeblich von den ausgelaugten Hydroxidionen bestimmt werden, ist dieser Anstieg nicht vorhanden (s. Bild 11). In /Bra13b/ zeigten alle getesteten Betone zum Ende des anschließenden Langzeitstandtest nach dem Frischbetonstandtest, insbesondere in den letzten beiden Eluaten abnehmende pH-Werte. Im vorliegenden Versuch war dieser Trend nicht zu beobachten. Im Gegensatz dazu stieg der pH-Wert zum Versuchsende an (s. Bild 13). Die in Bild 13 gezeigten pH-Werte sind generell höher als die pH-Werte in /Bra13b/. Das heißt, dass die Freisetzung der Hydroxidionen (OH^-) aus den Frischbetonen, die in /Bra13b/ geprüft wurden, höher und langfristiger als bei den Bindemitteln ist.

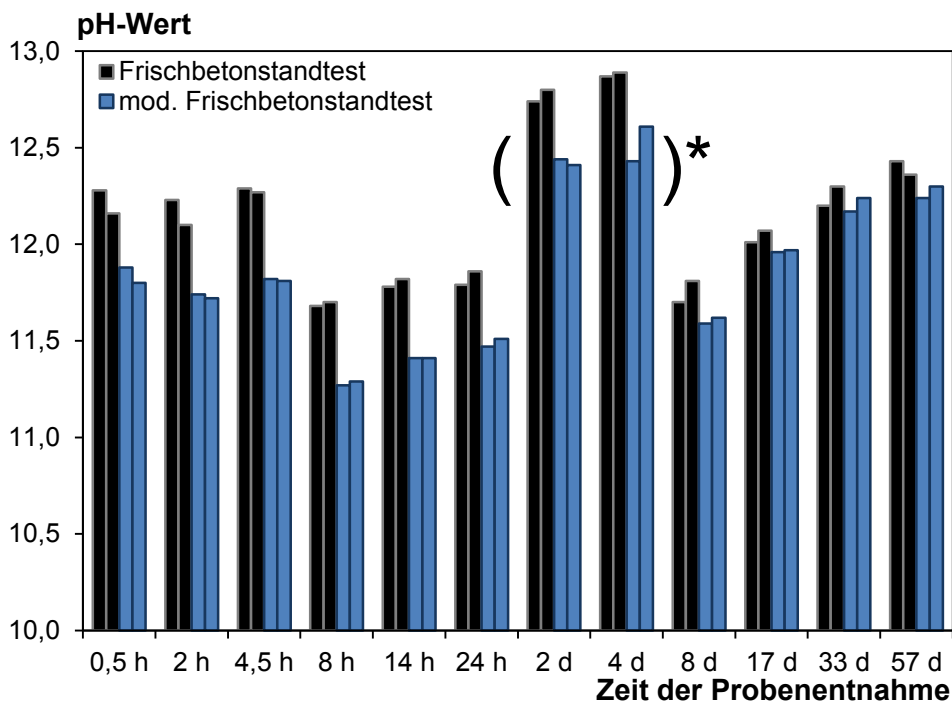


Bild 13: pH-Werte der Eluate aus dem Frischbetonstandtest und dem modifizierten Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest
 * wahrscheinlich falsche Kalibrierung der pH- Elektrode

Der Verlauf der Redoxpotentiale der Eluate der Betone ist in Bild 14 dargestellt. Das Redoxpotential in deionisiertem Wasser beträgt ca. 400 mV (s. /Bra13b/). Durch die Auslaugung der Zementsuspension wurde das Redoxpotential deutlich reduziert. Wie auch in /Bra13b/ gezeigt, wiesen die Redoxpotentiale der Eluate eine umgekehrte Korrelation mit den pH-Werten auf. Die Redoxpotentiale der Eluate waren beim Frischbetonstandtest nach /Bra07/ geringer als beim modifizierten Verfahren. Zum Versuchsende sanken die Redoxpotentiale ab, während die pH-Werte anstiegen.

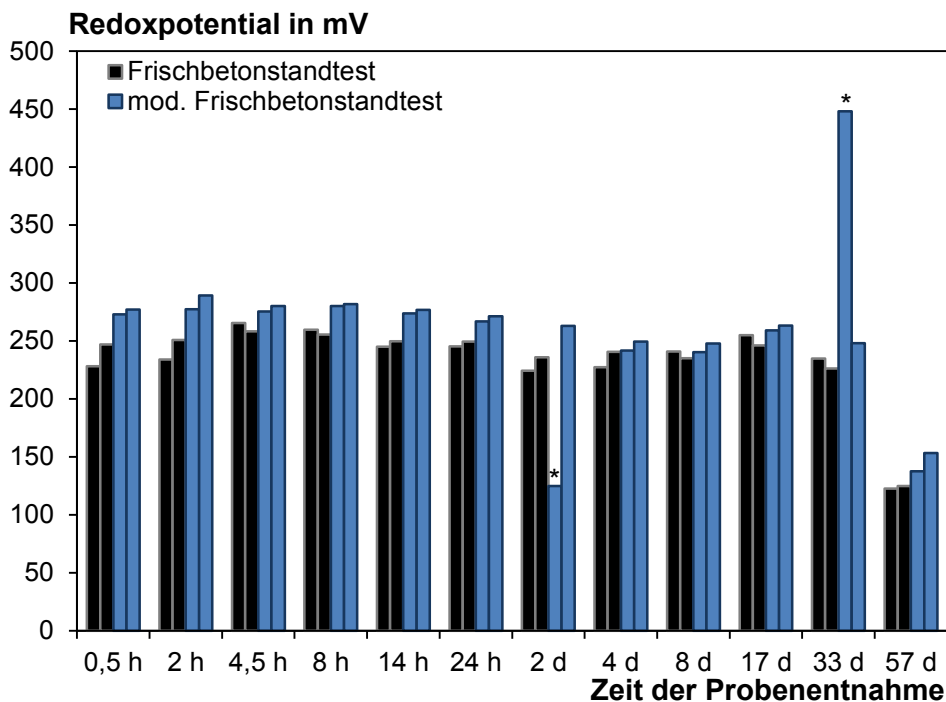


Bild 14: Redoxpotentiale der Eluate aus dem Frischbetonstandtest und dem modifizierten Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest
* Ausreißer

In Bild 15 ist die elektrische Leitfähigkeit dargestellt. In den ersten vier Elutionsschritten waren die elektrischen Leitfähigkeiten nahezu konstant. Durch die längeren Kontaktzeiten stiegen die elektrischen Leitfähigkeiten bei den folgenden Eluaten mit den zunehmenden pH-Werten an. Ein absinkender Verlauf zum Ende des Versuchs ergab sich im Gegensatz zu /Bra13b/ nicht.

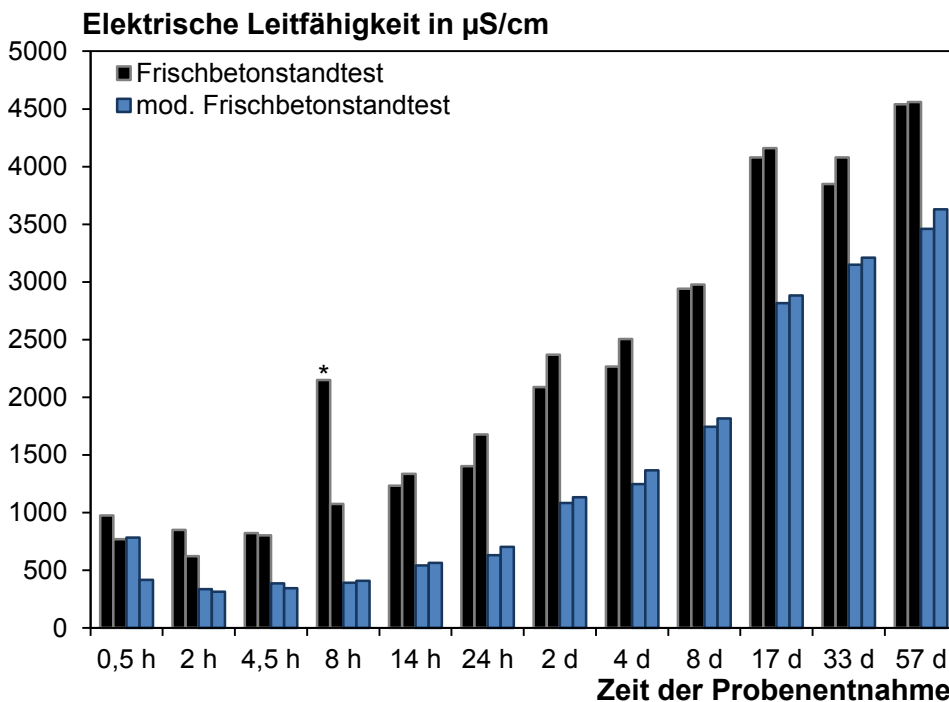


Bild 15: Elektrische Leitfähigkeiten der Eluate aus dem Frischbetonstandtest und dem modifizierten Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest
*: Ausreißer

5.1.2.3 Natrium, Kalium, Chlorid und Sulfat

Bild 16 zeigt für beide Prüfverfahren die Eluatkonzentrationen von Natrium und Kalium. Wie bei pH-Wert und Leitfähigkeit werden im mod. Frischbetonstandtest niedrigere Werte ermittelt. Der Unterschied zwischen den Eluatkonzentrationen war in den ersten Wechsellösungen besonders hoch, und nahm mit der Zeit ab.

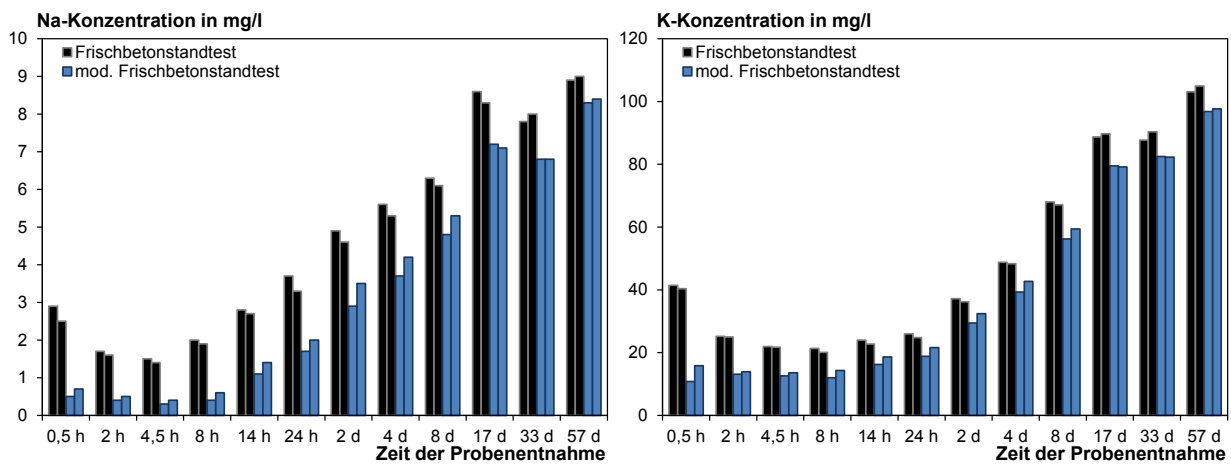


Bild 16: Eluatkonzentrationen von Natrium und Kalium

Die kumulativen Freisetzungen wurden nach Abschnitt 4.1 berechnet. Die kumulativen Freisetzungen von Natrium und Kalium sind in den Bildern 17 und 18 separat für die ersten 24 Stunden (links) und für den gesamten Versuch (rechts) dargestellt.

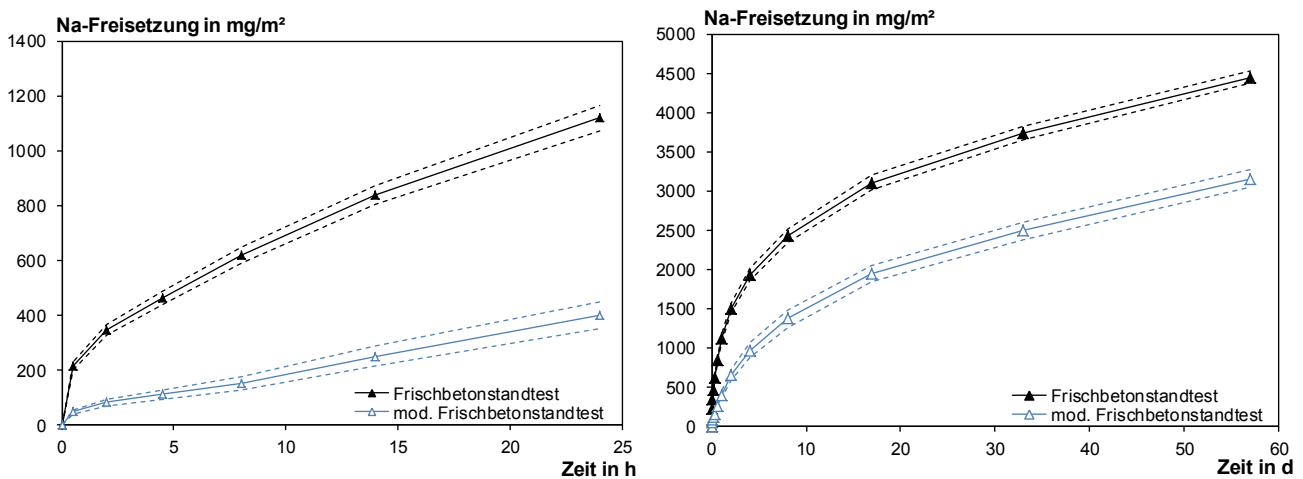


Bild 17: Kumulative Freisetzung von Natrium (links: Frischbetonstandtest (0 bis 24 h), rechts: gesamte Versuchslaufzeit (57 d))

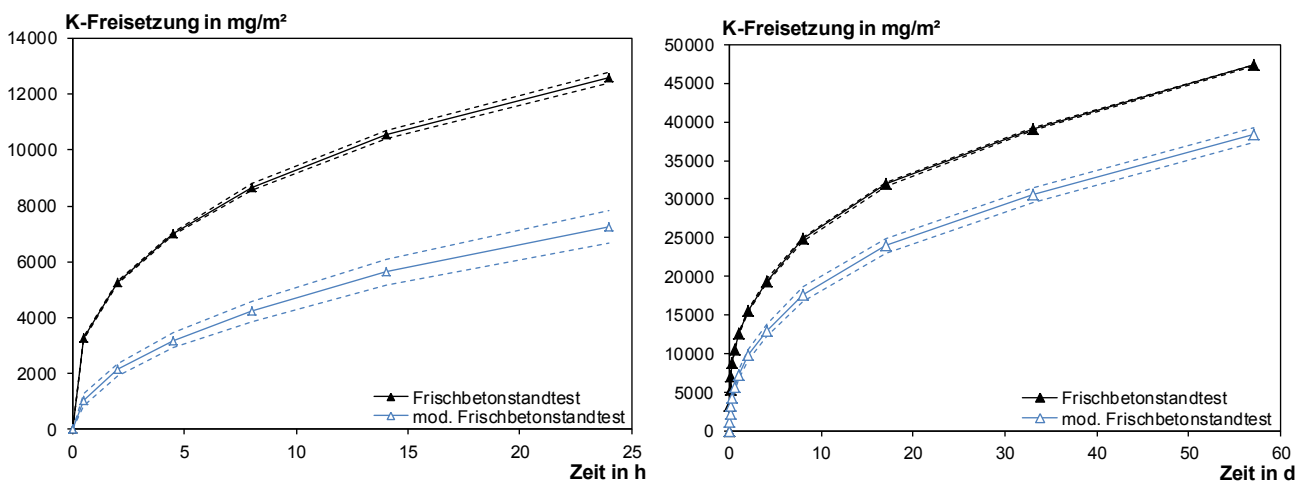


Bild 18: Kumulative Freisetzung von Kalium (links: Frischbetonstandtest (0 bis 24 h), rechts: gesamte Versuchslaufzeit (57 d))

In den Bildern 17 und 18 ist es ersichtlich, dass die Differenz zwischen beiden Versuchen bei fortgeschrittener Versuchsdauer nicht mehr so groß ist, wie sie in den ersten 24 Stunden war. Die Differenz der Konzentrationen des modifizierten Verfahrens und des Verfahrens ohne Sandüberdeckung wurde nach dem ersten Elutionstag immer kleiner. Dieses Verhalten des Unterschieds stimmt mit dem Aussage von Abschnitt 3.2 überein.

Die Ergebnisse aus /Bra13b/ zeigen, dass Chlorid und Sulfat fast nur am Anfang der Elution freigesetzt werden. Dieses Elutionsverhalten wurde in den beiden Auslagungsverfahren in diesem Forschungsvorhaben verifiziert (s. Bild 19).

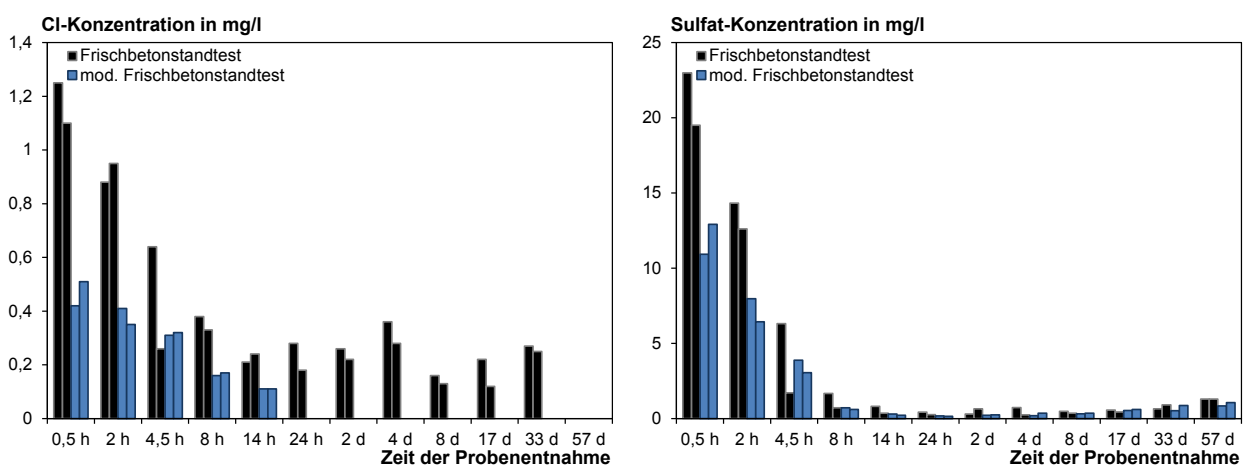


Bild 19: Eluatkonzentrationen von Chlorid und Sulfat

Ungefähr 75 % Chlorid und 90 % Sulfat wurden am ersten Elutionstag freigesetzt (s. Bilder 20 und 21). Weil die Sandüberdeckung am Anfang der Elution einen größeren Effekt als während der darauf folgenden Elution hat, war der Einfluss der Sandüberdeckung bei den beiden Parametern erheblich. Am Ende des Versuchs sind die kumulative Freisetzung von Sulfat durch Einsatz einer Sandüberdeckung auf 60 % reduziert (vgl. Bild 21). Die Konzentrationen von Chlorid lagen beim Einsatz der Sandüberdeckung ab dem fünften Elutionschritt (14 h) unterhalb der Bestimmungsgrenze (s. Tabellen A5 bis A8).

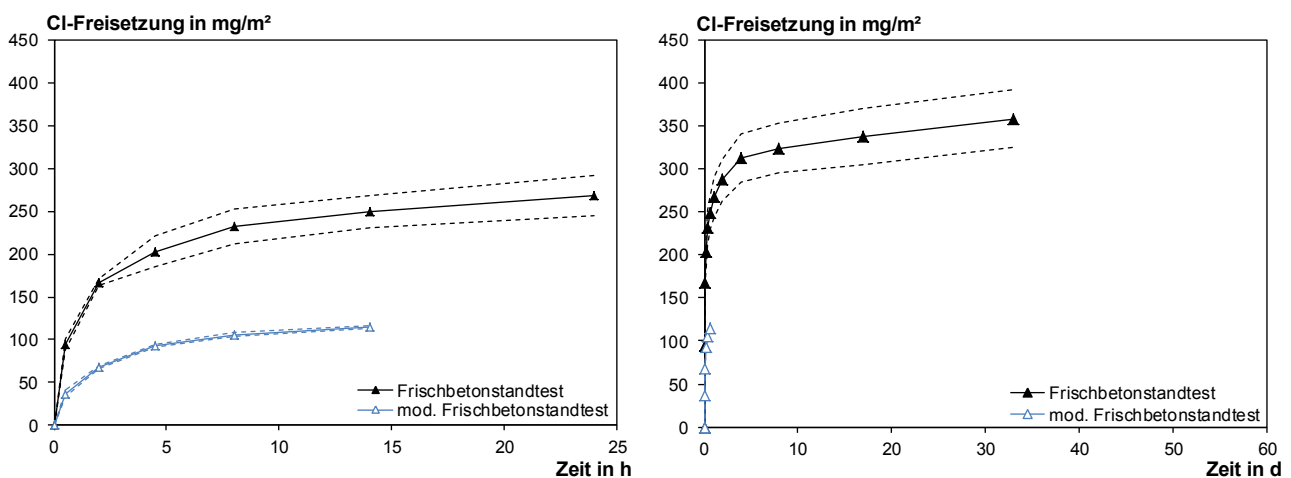


Bild 20: Kumulative Freisetzung von Chlorid (nach der 33 Tagen (beim Frischbetonstandtest) bzw. 14 Stunden (beim modifizierten Verfahren) lagen die Chloridkonzentrationen unterhalb der Bestimmungsgrenze)

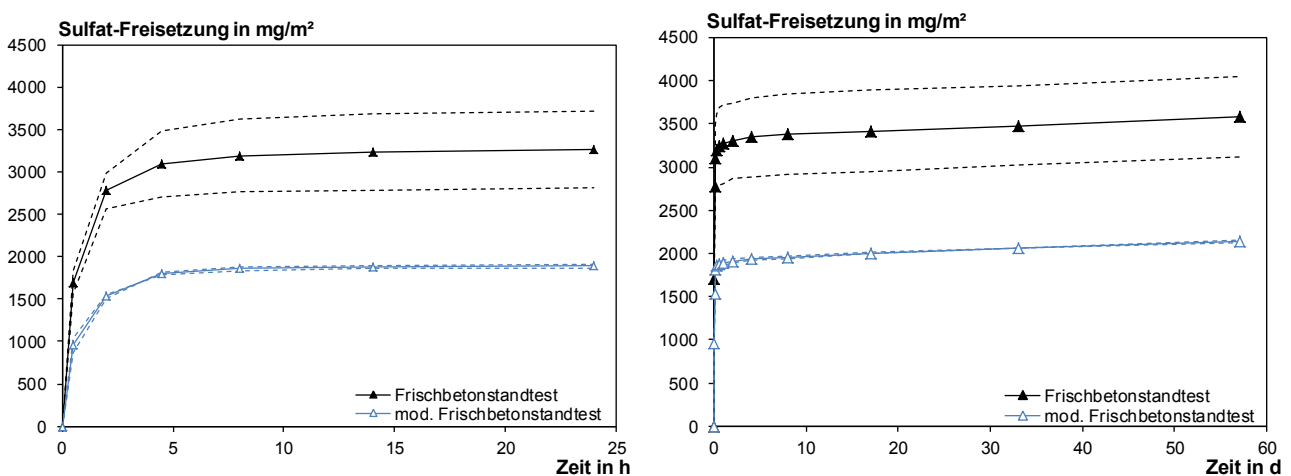


Bild 21: Kumulative Freisetzung von Sulfat

5.1.2.4 Spurenelemente und Barium

Die Konzentrationen der Eluate lagen nur bei Barium, Chrom, Kupfer, Molybdän und Vanadium i. d. R. oberhalb der Bestimmungsgrenze. Zink kann beim modifizierten Versuch nicht ausgewertet werden (vgl. Abschnitt 5.1.2.1).

Barium zeigte über die gesamte Versuchslaufzeit im Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest höhere Konzentrationen als im modifizierten Verfahren (s. Bild 22). Hier geht der Einfluss der Sandüberdeckung anscheinend über die in Abschnitt 3.2 hergeleitete Verminderung des diffusiven Transports hinaus. Denkbar sind eine Adsorption am Sand, oder eine Ausfällung von Bariumsulfat in der Sandschicht.

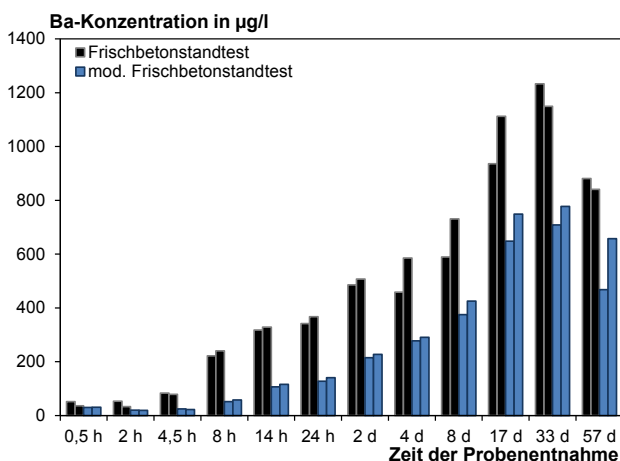


Bild 22: Eluatkonzentrationen von Barium

Die Freisetzungen von Barium waren dementsprechend im Frischbetonstandtest sowie in dem anschließenden Langzeitstandtest deutlich höher als beim modifizierten Verfahren (Bild 20). Die Freisetzung betrug im modifizierten Frischbetonstandtest (E_{1d}) 35 % und im anschließenden Langzeitstandtest (E_{1-57d}) 65 %.

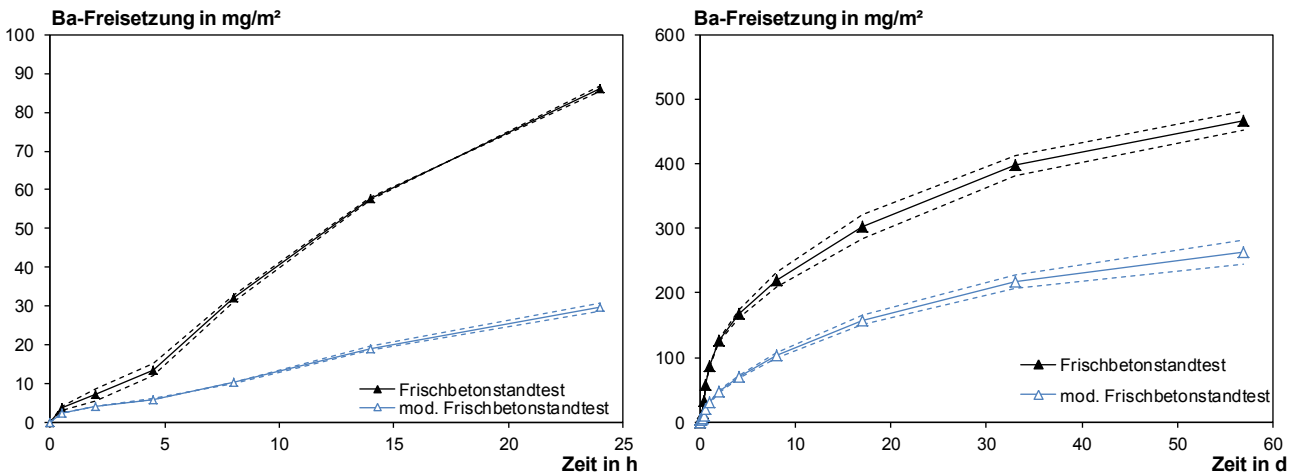


Bild 23: Kumulative Freisetzung von Barium

Chrom wurde im Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest ebenfalls in höherem Maße ausgelaugt als in dem modifizierten Verfahren. Die Differenz der Eluatkonzentrationen ist am Anfang der Elution allerdings deutlich kleiner als nach dem Erstarren (von 1 d bis 57 d) (s. Bild 24).

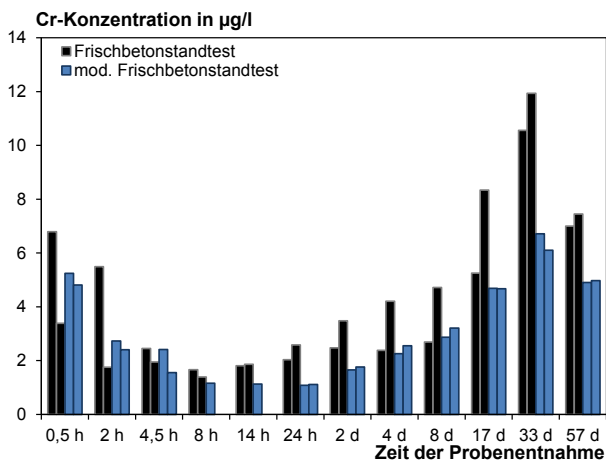


Bild 24: Eluatkonzentrationen von Chrom

Daraus ergibt sich, dass die Differenz zwischen den Freisetzungen am Anfang der Elution nicht so groß ist, wie bei den übrigen Parametern (z. B. Natrium und Kalium) (s. Bild 25). Im weiteren Verlauf des Versuchs nehmen die Unterschiede in der Chromfreisetzung zu. Auch hier scheint es chemische Wechselwirkungen mit der Sandschicht zu geben.

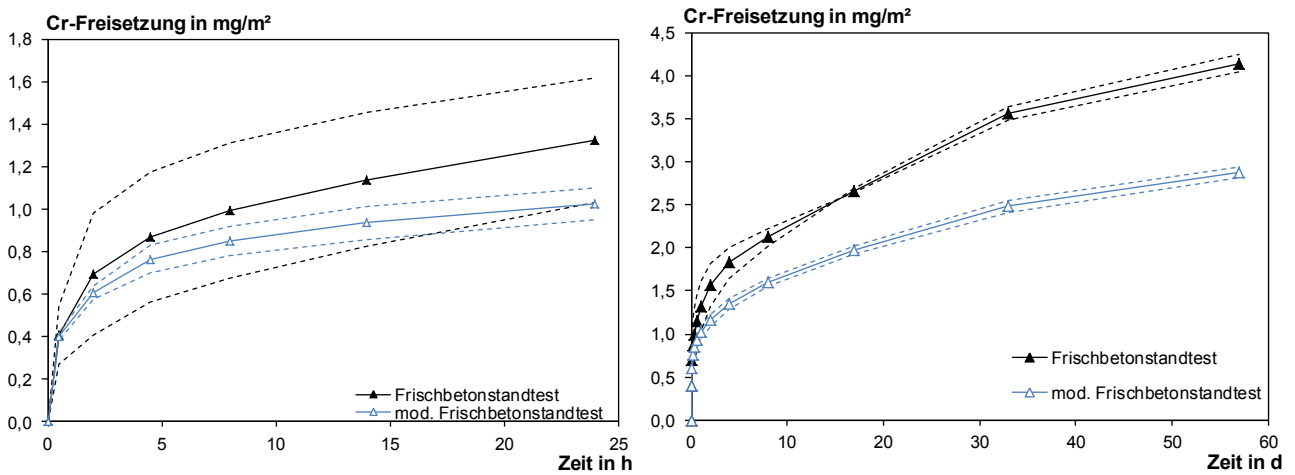


Bild 25: Kumulative Freisetzung von Chrom

Die Streuungen der Eluatkonzentrationen waren bei Kupfer sehr stark (s. Tabellen A5 bis A8). Im Vergleich zu der Streuung ist die Differenz zwischen den beiden Verfahren vernachlässigbar (s. Bilder 26 und 22).

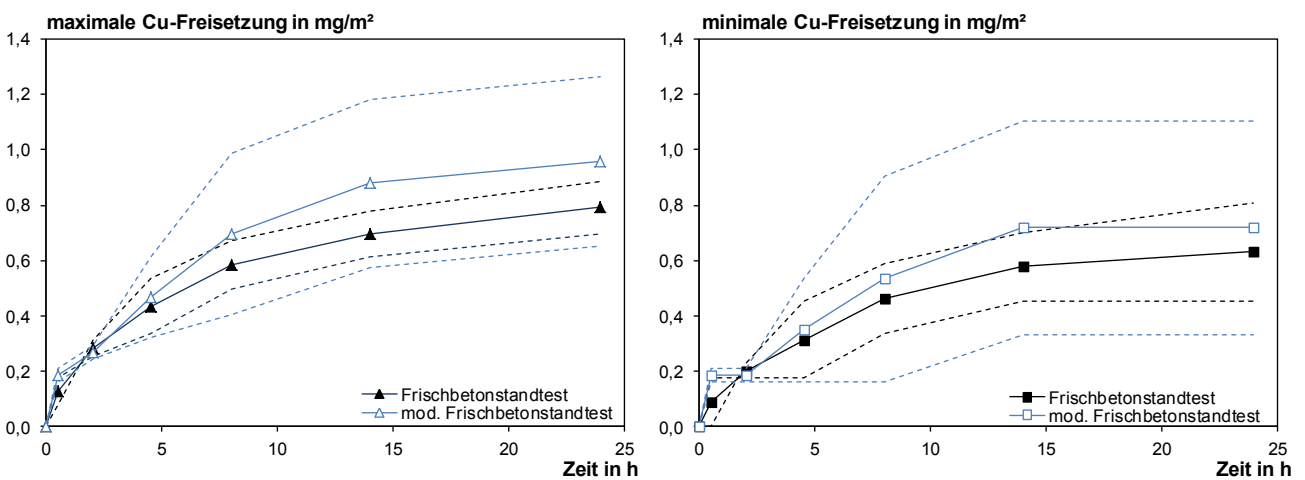


Bild 26: Kumulative Freisetzung von Kupfer im Frischbetonstandtest

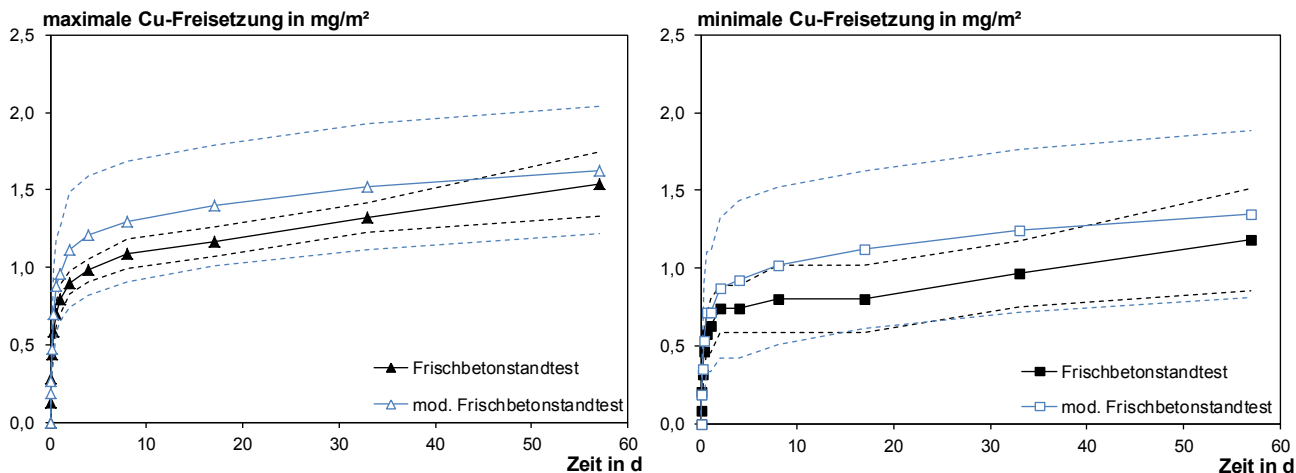


Bild 27: Kumulative Freisetzung von Kupfer im Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest

Ähnlich wie bei Sulfat und Chlorid wird Molybdän hauptsächlich am Anfang der Elution freigesetzt /Bra13b/. Daher waren die Einflüsse der Sandüberdeckung auf die Molybdän-Auslaugung stark (s. Bild 28). Die Eluatkonzentrationen von Molybdän lagen bei dem Frischbetonstandtest und dem anschließenden Langzeitstandtest immer oberhalb der Bestimmungsgrenze und im modifizierten Verfahren ab dem vierten Elutionsschritt (8 h) unterhalb oder ungefähr auf Höhe der Bestimmungsgrenze (1 µg/l) (s. Tabellen A5 bis A8).

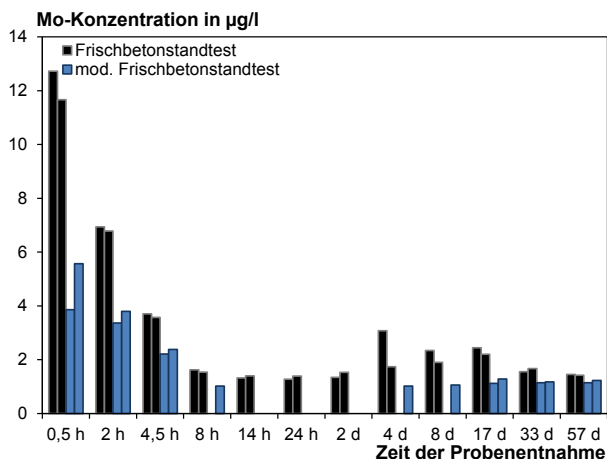


Bild 28: Eluatkonzentrationen von Molybdän

Die Molybdänfreisetzung zeigt Bild 29. Über den gesamten Elutionsprozess betrug die Minderung der Freisetzungen 47,4 % (ΔE_{57d} bezogen auf $E_{57d,o.G.}$).

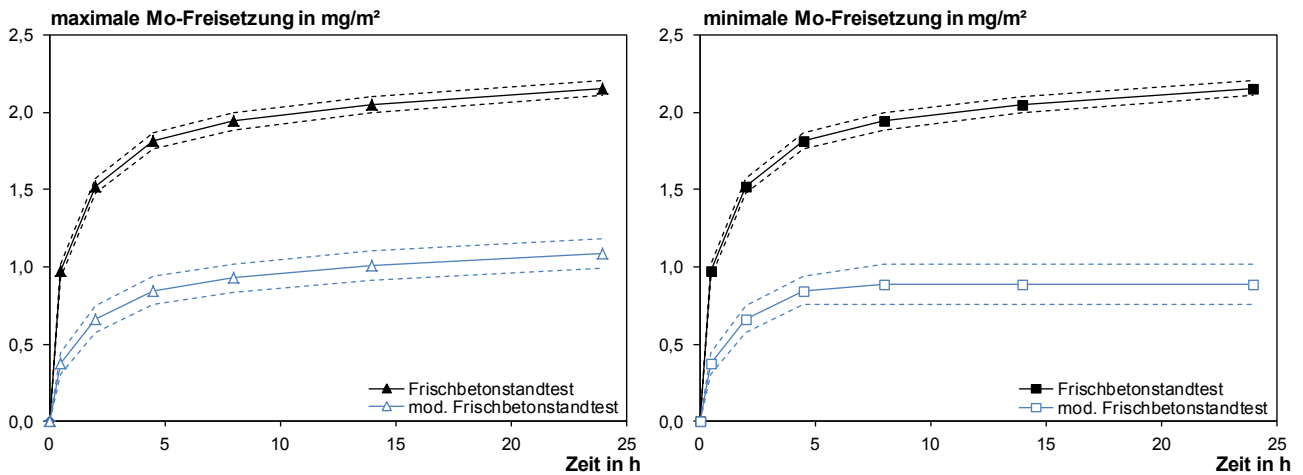


Bild 29: Kumulative Freisetzung von Molybdän im Frischbetonstandtest

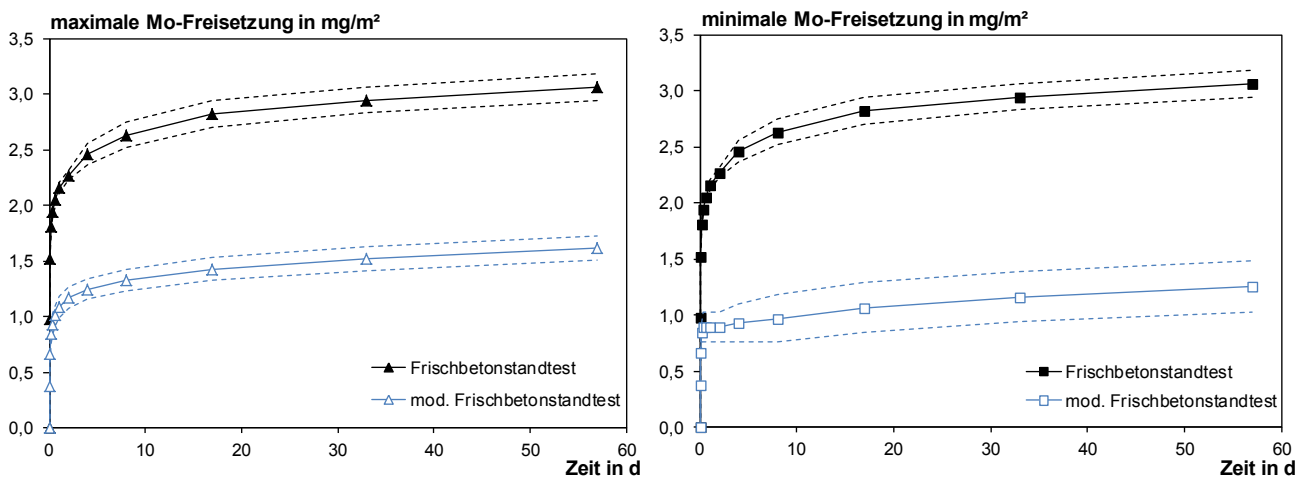


Bild 30: Kumulative Freisetzung von Molybdän im Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest

Im Frischbetonstandtest wurde Vanadium nur am Anfang der Elution freigesetzt. Eine große Streuung trat allerdings zwischen den parallelen Proben auf. Ab dem fünften Elutionsschritt (14 h) lagen die Vanadium-Konzentrationen in dem Frischbetonstandtest sowie dem anschließenden Langzeitstandtests ungefähr auf Höhe oder unterhalb der Bestimmungsgrenze (s. Bild 31). Im modifizierten Verfahren mit der Sandüberdeckung wurde Vanadium am Anfang der Elution ebenso stark freigesetzt wie im Frischbetonstandtest. Vom vierten Elutionsschritt (8 h) bis zum achten Elutionsschritt (4 d) lagen die Vanadium-Konzentrationen unterhalb der Bestimmungsgrenze. Ab dem neunten Elutionsschritt (8 d) waren die Vanadium-Konzentrationen in den Eluaten wieder quantifizierbar (s. Tabellen A5 bis A8). Die gesamten Freisetzungen unterschieden sich in den beiden Prüfverfahren nicht (s. Bilder 32 und 33).

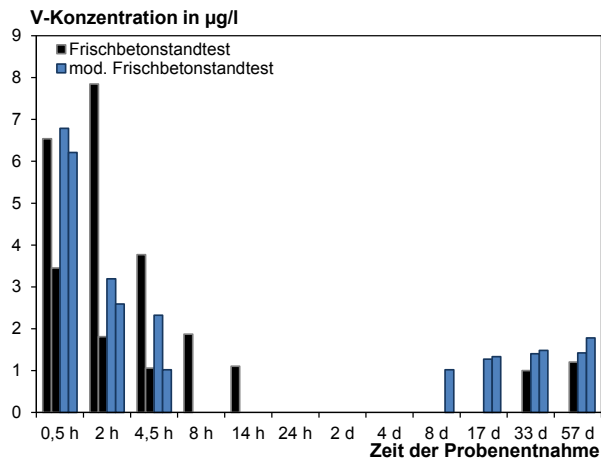


Bild 31: Eluatkonzentrationen von Vanadium

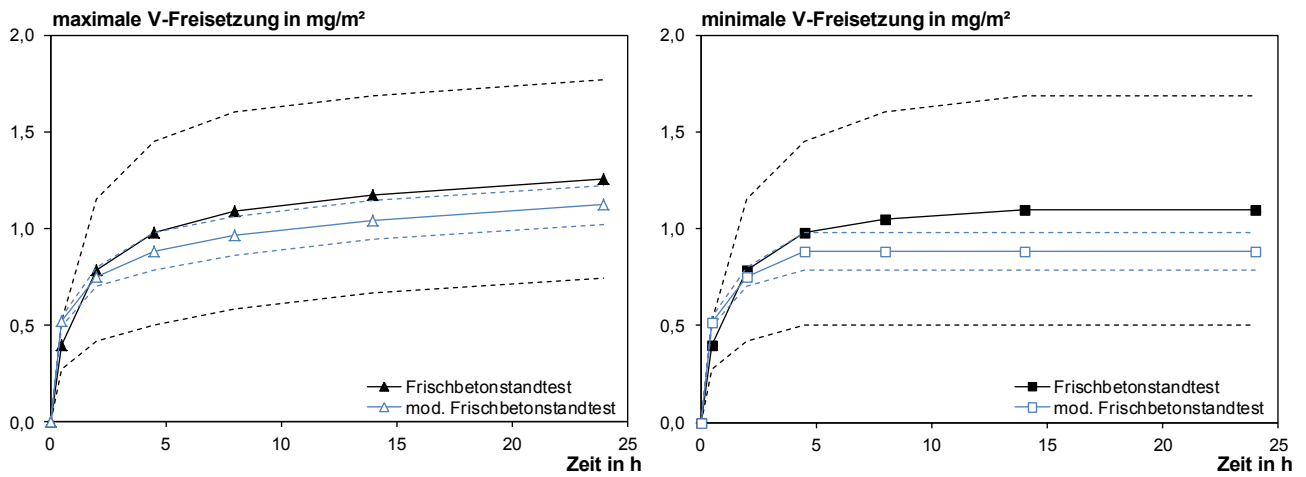


Bild 32: Kumulative Freisetzung von Vanadium im Frischbetonstandtest

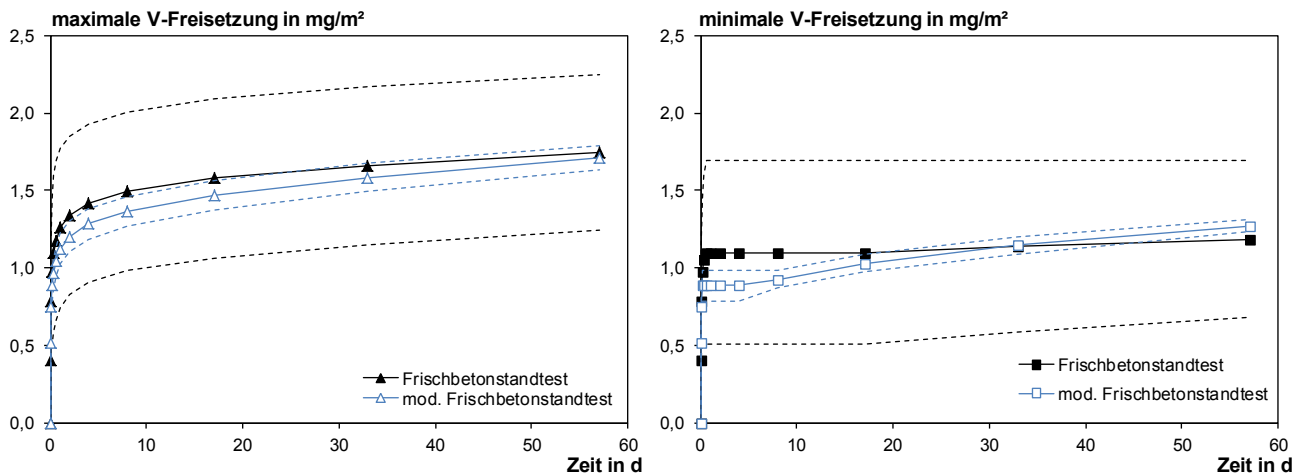


Bild 33: Kumulative Freisetzung von Vanadium im Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest

5.1.2.5 Gegenüberstellung der Freisetzungen

Zum Vergleich mit den theoretischen Berechnungen in Abschnitt 3.2 werden die Freisetzungen in den Versuchen in den Zeitabschnitten 0 bis 4,5 Stunden ($E_{4,5h}$), 4,5 Stunden bis 7 Tage ($E_{4,5h-7d}$) und 7 bis 57 Tage (E_{7-57d}) sowie für die gesamte Elution (E_{57d}) berechnet. Die Freisetzung nach 7 Tagen wurde dabei linear zwischen den Ergebnissen für 4 und 8 Tage interpoliert. Tabelle 8 gibt die Mittelwerte der Doppelbestimmungen wieder. Die Ergebnisse der Einzelbestimmungen wurden im Anhang in Tabellen A10 bis A12 zusammengefasst.

Tabelle 8: Darstellung der kumulativen Freisetzungen (Mittelwert) im Frischbeton- bzw. modifizierten Frischbetonstandtest und dem anschließenden Langzeitstandtest

Parameter	zul. E_{56d} ¹⁾	Frischbetonstandtest				mod. Frischbetonstandtest			
		$E_{4,5h}$	$E_{4,5h-7d}$	E_{7-57d}	E_{57d}	$E_{4,5h}$	$E_{4,5h-7d}$	E_{7-57d}	E_{57d}
-		mg/m ²							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Natrium	-	464	1844	2148	4456	112	1163	1885	3160
Kalium	-	7024	16429	23936	47389	3192	13280	21876	38348
Chlorid	257732	203	118	37-45	359-367	93	22-52	0-26	115-171
Sulfat	247423	3098	271	214	3583	1807	147	184	2137
Barium	351	13	194	259	467	6	88	168	263
Chrom	7,22	0,87	1,18	2,10	4,15	0,77	0,69-0,77	1,34	2,80-2,88
Kupfer	14,4	0,32-0,44	0,47-0,62	0,39-0,48	1,18-1,54	0,35-0,47	0,64-0,80	0,36	1,35-1,63
Molybdän	36,1	1,82	0,78	0,47	3,06	0,85	0,11-0,46	0,29-0,30	1,25-1,61
Vanadium	4,12	0,98	0,12-0,50	0,09-0,27	1,19-1,75	0,88	0,03-0,46	0,36-0,37	1,27-1,71
Zink	59,8	0-0,24	0-0,46	0-0,26	0-0,96	nicht auswertbar			

¹⁾ zulässige 56-tägige Freisetzung nach /DIB11/. zul. E_{56d} = GFS / 0,97, gilt nur für die Auslaugung von Festbeton im Langzeitstandtest nach /DAf05/ und gilt nicht für Zementsuspension (s. /Bra13a/)

Spalte 2 der Tabelle 8 zeigt die zulässigen Freisetzungen im Zeitraum von 56 Tagen gemäß /DIB11/. Die Werte gelten für diffusionskontrollierte Auslaugung aus Festbeton und dienen hier nur der Orientierung. Nach der 57-tägigen Elution mit 12 Elutionsschritten wäre zul. E_{56d} für die meisten Parameter eingehalten. Die einzige Ausnahme ist Barium, dessen 57-tägige Freisetzung E_{57d} beim Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest die zul. E_{56d} leicht überschreitet. Die Freisetzungen im modifizierten Versuch waren aufgrund der ca. 5 mm dicken Sandüberdeckung geringer. Die Minderung der Freisetzung ist in Tabelle 9 als absolute Werte sowie prozentual bezogen auf $E_{o.G.}$ angegeben.

Tabelle 9: Minderung der maximalen kumulativen Freisetzungen (Mittelwert) durch den Einsatz der Sandüberdeckung

Parameter	$\Delta E_{4,5h}$	$\Delta E_{4,5h-7d}$	ΔE_{7-57d}	$\Delta E_{4,5h}$	$\Delta E_{4,5h-7d}$	ΔE_{7-57d}
-	mg/m ²			% von E _{o.G.}		
1	2	3	4	5	6	7
Natrium	352	681	263	75,9	36,9	12,2
Kalium	3832	3149	2060	54,6	19,2	8,6
Chlorid	110	66	- ¹⁾	54,3	56,0	- ¹⁾
Sulfat	1291	124	30	41,7	45,9	14,2
Barium	8	105	91	56,6	54,4	35,1
Chrom	0,11	0,41	0,75	12,3	34,6	35,9
Kupfer	keine signifikanten Unterschiede			keine signifikanten Unterschiede		
Molybdän	0,97	0,31	0,17	53,3	40,3	35,6
Vanadium	keine signifikanten Unterschiede			keine signifikanten Unterschiede		

1) Alle Eluatkonzentrationen von Chlorid lagen in dieser Phase beim modifizierten Versuch unter der Bestimmungsgrenze. Daher entfällt die Berechnung

Nach den beispielhaften Annahmen aus Abschnitt 3.2 für Natrium ergab sich eine theoretische Minderung der Freisetzung durch die Sandüberdeckung von 51,6 % während der ersten 4,5 Stunden, 3,4 % während der Erhärtungsphase und 1,0 % beim erhärteten Baustoff, wobei zu berücksichtigen ist, dass diese Berechnungen die jeweils vorhergehenden Hydratationsphasen nicht berücksichtigen (vgl. Abschnitt 3.2). Im Experiment geht der Einfluss der Sandschicht, wie bei theoretischen Berechnungen vorhergesagt, mit fortschreitender Hydratation zurück. Aufgrund der sehr groben Abschätzung bei der Berechnung stimmen die absoluten Zahlen insbesondere für $t > 4,5$ h nicht überein.

Diese theoretischen und experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die Grenzschicht während der Frischbetonauslaugung erheblichen Einfluss hat. Dies bedeutet allerdings auch, dass die Freisetzung im Frischbetonstandtest nicht direkt auf die Verhältnisse im Boden angewendet werden kann, da der Diffusionskoeffizient des Eluenten in dieser Hydratationsphase maßgeblichen Einfluss auf die Auslaugung hat. Auf diesen Aspekt wird im Ausblick (Abschnitt 6) noch eingegangen.

Für Kalium, Chlorid, Sulfat, Barium und Molybdän wurde innerhalb der ersten 4,5 h eine Minderung der Freisetzung im Bereich von 50 % durch die Sandüberdeckung festgestellt, wie dies im Modell für eine diffusionskontrollierte Freisetzung am Beispiel von Natrium berechnet wurde (s. Tabelle 9). Für Chrom, Kupfer und Vanadium trifft die Berechnung nicht zu. Die drei Schwermetalle zeigen ein von Natrium, bzw. von der theoretischen Diffusionsberechnung, deutlich abweichendes Verhalten. Gründe hierfür können in veränderlichen Porenlösungskonzentrationen im Verlauf der Hydratation, in der teilweise zu geringen Analysegenauigkeit oder in chemischen Wechselwirkungen innerhalb der Sandschicht liegen. Letztere Effekte dürfen nach den Vorgaben des DIBt bei der Bewertung nicht in Ansatz gebracht werden. Es ist ebenfalls möglich, dass der Diffusionsansatz für die Auslaugung einiger Parameter nicht zutrifft. Bei Auslaugprozessen, die von der Löslichkeit schwermetallhaltiger Verbindungen bestimmt sind, sollten die Versuche identische Eluatkonzentrationen liefern. Dies könnte möglicherweise bei Kupfer und Vanadium der Fall sein, die in beiden Versuchen sehr ähnliche Ergebnisse aufweisen.

5.2 Langzeitstandtest nach DAfStb-Richtlinie

5.2.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die Freisetzungen und die Auslaugraten der relevanten Parameter im DAfStb-Langzeitstandtest dargestellt. Vergleichend werden die Auslaugraten während des Langzeitstandtests nach dem Frischbetonstandtest dargestellt. Da eine Sandüberdeckung in dem modifizierten Verfahren eingesetzt wurde, kann die Kinetik der Auslaugung nicht direkt mit den anderen Verfahren verglichen werden (vgl. Abschnitt 3).

Die Konzentrationen der Eluate aus dem Langzeitstandtest nach Abschnitt 2.5 sind im Anhang in Tabelle A9 aufgeführt. Da die Konzentrationen von Cyanid, Fluorid, Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Quecksilber, Thallium in allen Eluaten des Frischbeton- bzw. des modifizierten Frischbetonstandtests und den anschließenden Langzeitstandtests unterhalb der Bestimmungsgrenzen lagen, wurden diese Elemente im DAfStb-Langzeitstandtest nicht analysiert.

5.2.2 pH-Wert, Redoxpotential und elektrische Leitfähigkeit

In den Bildern 34 bis 36 sind die pH-Werte, die Redoxpotentiale und die Leitfähigkeiten im DAfStb-Langzeitstandtest den Ergebnissen der angeschlossenen Langzeitstandtests nach Abschnitt 2.3 gegenübergestellt. Im Gegensatz zum angeschlossenen Langzeitstandtest sind die pH-Werte, Redoxpotentiale sowie elektrische Leitfähigkeiten beim DAfStb-Langzeitstandtest während der sechs Elutionsschritte nahezu konstant. Der Grund hierfür ist die weitgehend abgeschlossene Hydratation im Prüfalter von 56 Tagen.

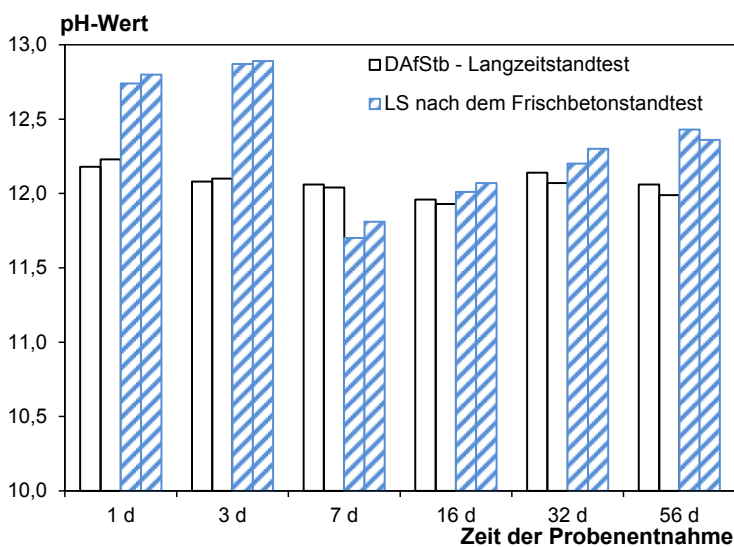


Bild 34: Gegenüberstellung der pH-Werte der Eluate während der Festbetonauslaugung in den verschiedenen Auslaugversuchen

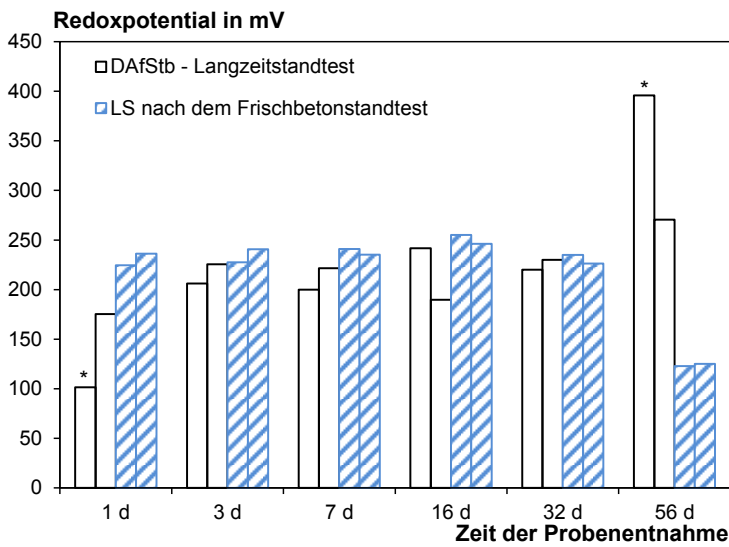


Bild 35: Gegenüberstellung der Redoxpotentiale der Eluate während der Festbetonauslaugung in den verschiedenen Auslaugversuchen
*: Ausreißer

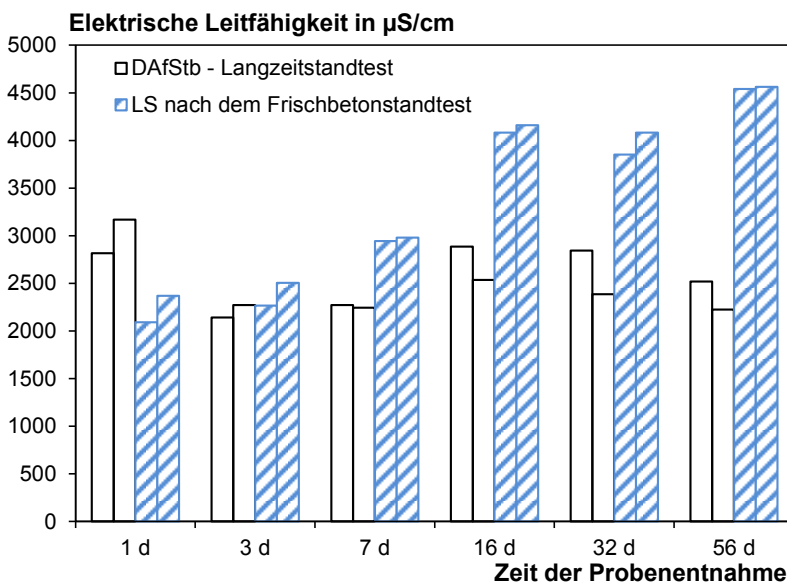


Bild 36: Gegenüberstellung der elektrischen Leitfähigkeiten während der Festbetonauslaugung in den verschiedenen Auslaugversuchen

5.2.3 Natrium, Kalium und Sulfat

Für Natrium, Kalium und Sulfat wurden die kumulativen Freisetzungen aus Festbeton während des DAfStb-Langzeitstandtests berechnet. Die Natrium- und Kaliumfreisetzungen waren deutlich geringer als die Freisetzung aus jungem Beton in den anschließenden Langzeitstandtests (s. Bild 37). Dies kann auf den höheren Hydratationsgrad und das dichtere Gefüge des Festbetons beim DAfStb-Langzeitstandtest zurückzuführen sein.

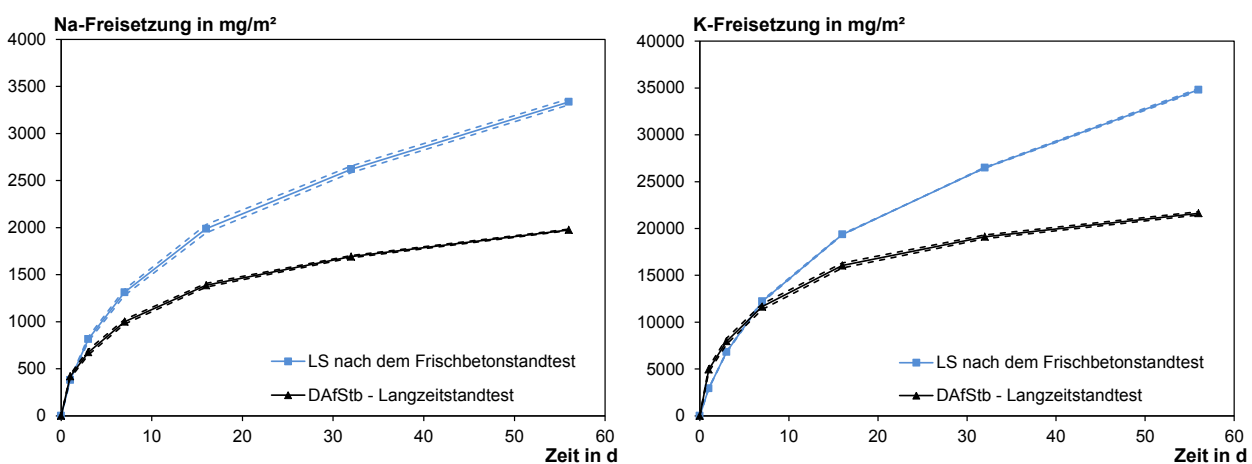


Bild 37: Kumulative Freisetzung von Natrium und Kalium in den Langzeitstandtests

Die Auslaugraten von Natrium und Kalium wurden gemäß Abschnitt 4.2 berechnet und sind in Bild 38 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass im DAfStb-Langzeitstandtest ein deutlich stärkerer Abfall der Auslaugraten auftritt als bei den anschließenden Langzeitstandtests. Ab dem zweiten Elutionsschritt waren die Natrium- bzw. Kaliumauslaugraten im DAfStb-Langzeitstandtest niedriger als in den anschließenden Langzeitstandtests.

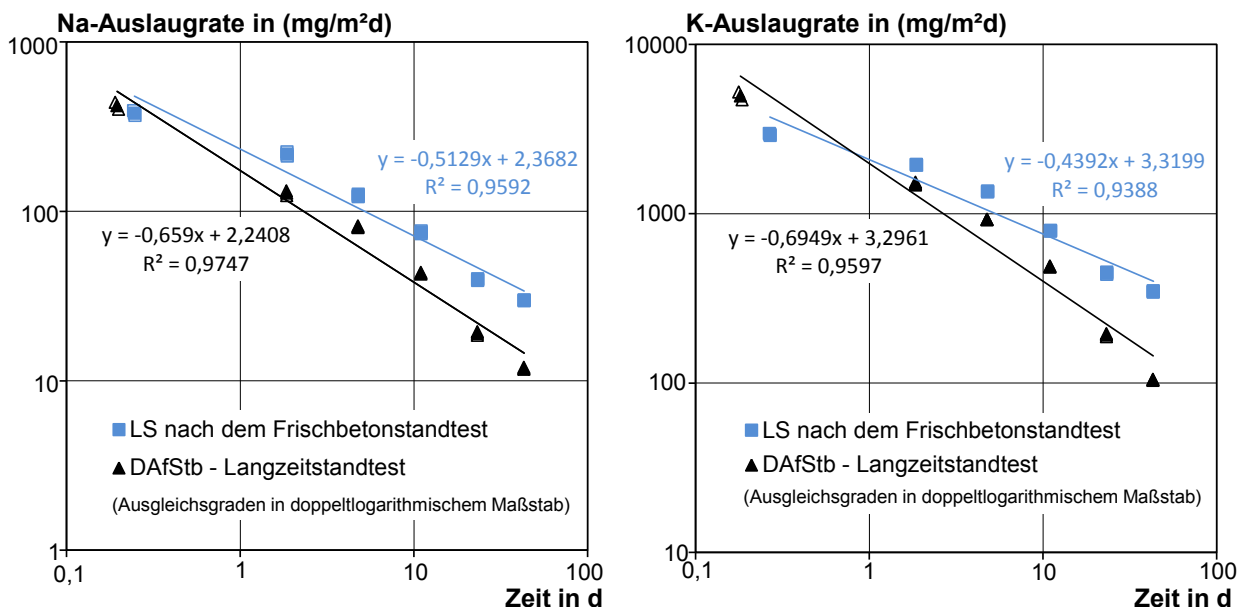


Bild 38: Auslaugraten von Natrium und Kalium in den Langzeitstandtests

Im Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest traten 95 % der Sulfat-Freisetzung in der Frischbetonphase auf (s. Abschnitt 5.1.2.3). Die kumulative Freisetzung aus der anschließenden Festbetonphase war deutlich geringer als die Freisetzung im DAfStb-Langzeitstandtest (s. Bild 39). Vermutlich liegt durch die vorangegangene Frischbetonauslaugung eine Verarmung der Sulfatphasen im oberflächennahen Bereich vor.

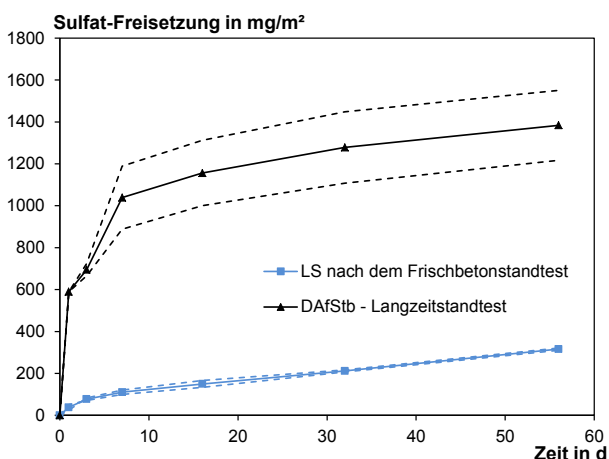


Bild 39: Kumulative Freisetzung von Sulfat in den Langzeitstandtests

Die Auslaugrate von Sulfat wurde nach 4.2 berechnet (s. Bild 40). Es ist ersichtlich, dass im DAfStb-Langzeitstandtest ein deutlich stärkerer Abfall der Auslaugraten auftritt als bei den anschließenden Langzeitstandtests. Eine ansteigende Auslaugrate zu Versuchsende, wurde hier im Gegensatz zu /Bra13b/ nicht beobachtet. Im Unterschied zu /Bra13b/ lagen die pH-Werte hier in beiden Verfahren über pH 11. Daher trat keine Zersetzung von Ettringit auf.

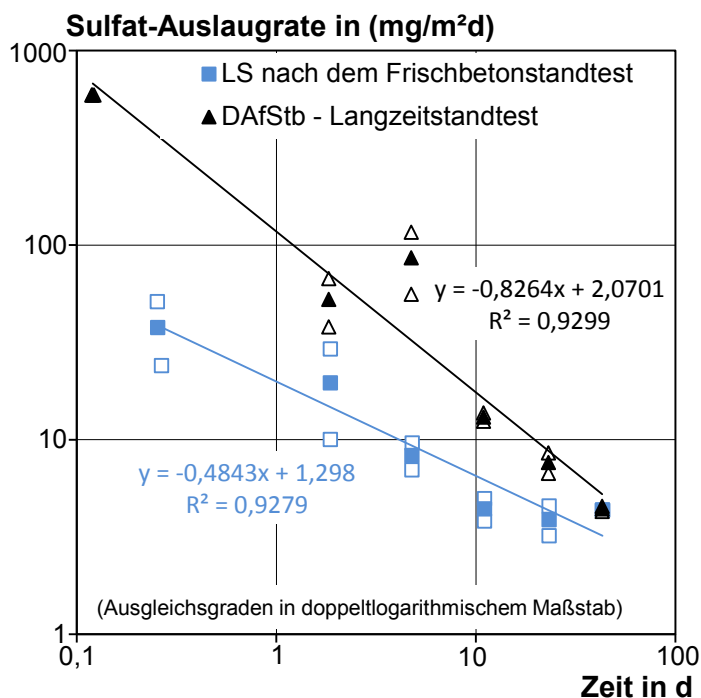


Bild 40: Sulfatauslaugraten in den Langzeitstandtests

5.2.4 Spurenelemente und Barium

Die Konzentrationen von Barium und Chrom waren in allen Eluat in beiden Versuchen gut quantifizierbar. Die Freisetzungen von Barium und Chrom im DAfStb-Langzeitstandtest waren deutlich kleiner als die Freisetzungen im anschließenden Langzeitstandtest nach Frischbetonstandtest (s. Bild 41). Die Auslaugraten von Barium und Chrom fielen im DAfStb-Langzeitstandtest deutlich stärker ab als in dem anschließenden Langzeitstandtest. Die Steigung im DAfStb-Langzeitstandtest betrug ca. -0,6. Die Steigungen in den anschließenden Langzeitstandtests lagen zwischen -0,4 und -0,5.

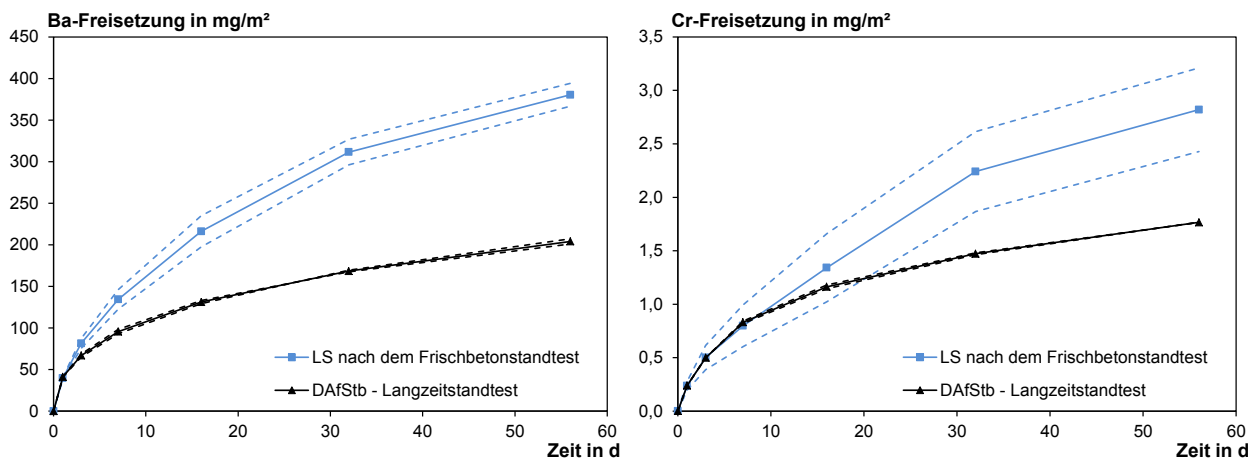


Bild 41: Kumulative Freisetzung von Barium und Chrom in den Langzeitstandtests

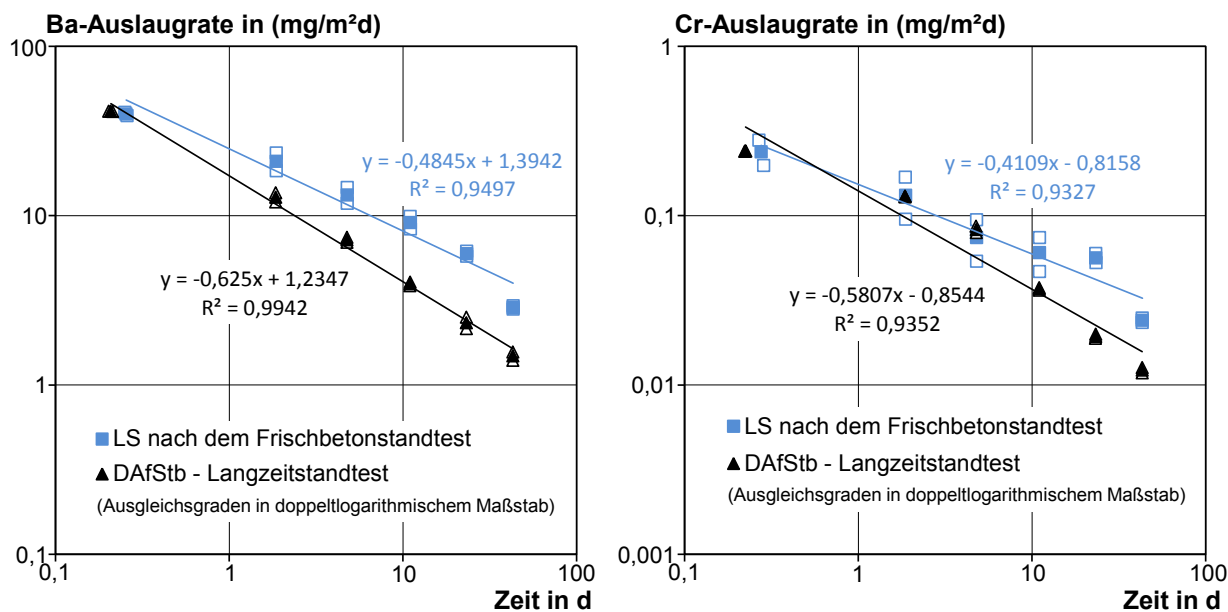


Bild 42: Auslaugraten von Barium und Chrom in den Langzeitstandtests

Die Streuungen der Eluatkonzentrationen waren bei Kupfer in den anschließenden Langzeitstandtests groß. Da die Konzentrationen teilweise unter der Bestimmungsgrenze lagen, zeigt Bild 43 die maximale und die minimale Freisetzung. Es kann kein signifikanter Unterschied zwischen den Freisetzungen aus den beiden Prüfverfahren festgestellt werden.

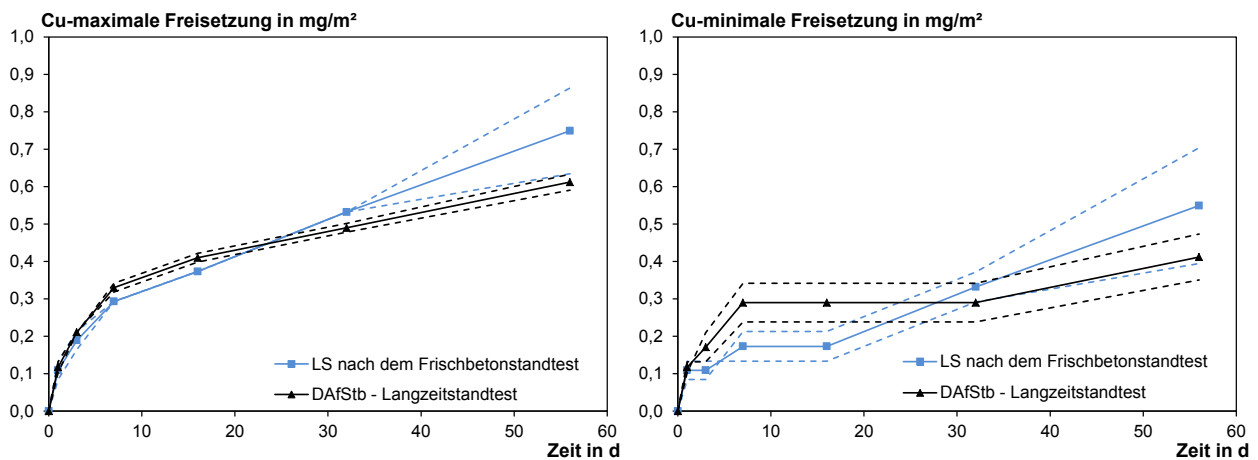


Bild 43: Kumulative Freisetzung von Kupfer in den Langzeitstandtests

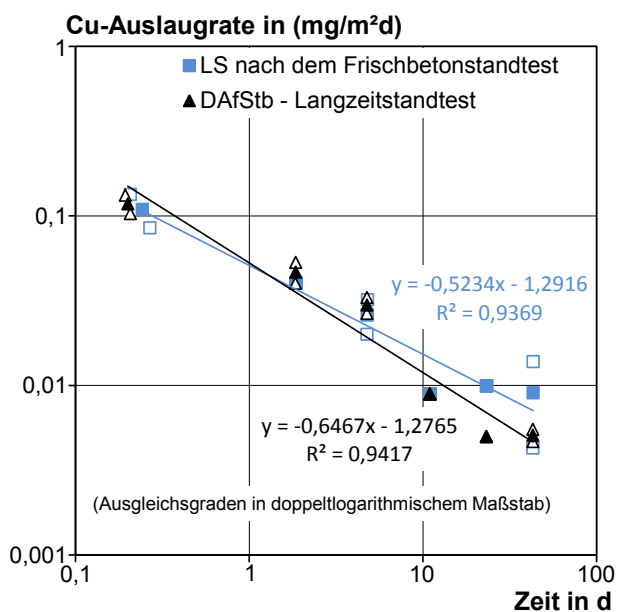


Bild 44: Kupferauslaugraten in den Langzeitstandtests

Aufgrund des dichteren Gefüges des Betons wurde auch bei Molybdän im DAFStb-Langzeitstandtest eine geringere Freisetzung festgestellt, als beim angeschlossenen Langzeitstandtest. Die Auslaugkinetik war bei allen beiden Verfahren ähnlich. Die Steigungen der Auslaugraten betragen etwa -0,6.

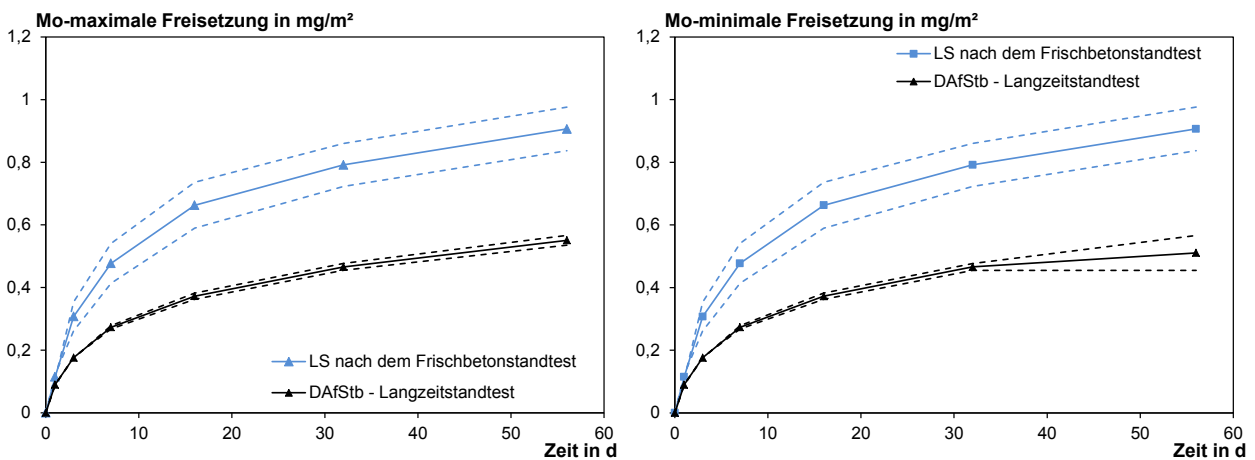


Bild 45: Kumulative Freisetzung von Molybdän in den Langzeitstandtests

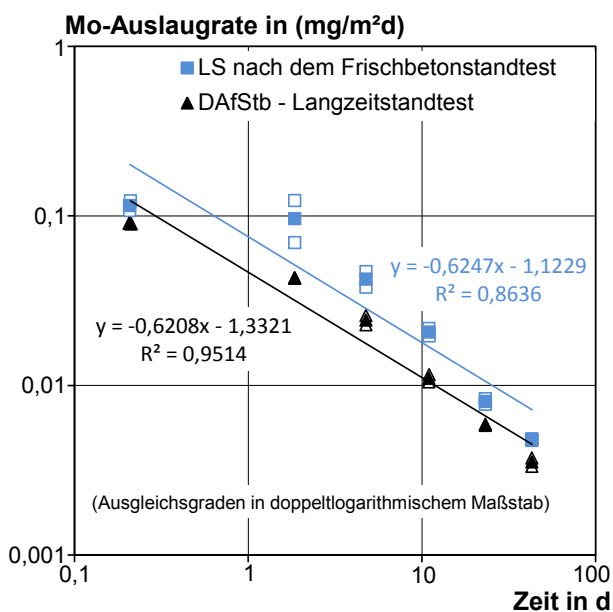


Bild 46: Molybdänauslaugraten in den Langzeitstandtests

Die Vanadium-Konzentrationen lagen zumeist ungefähr auf Höhe oder leicht oberhalb der Bestimmungsgrenze. Bild 47 zeigt die maximale und die minimale Freisetzung. Auf die Berechnung der Auslaugrate wurde aufgrund der vielen Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze verzichtet.

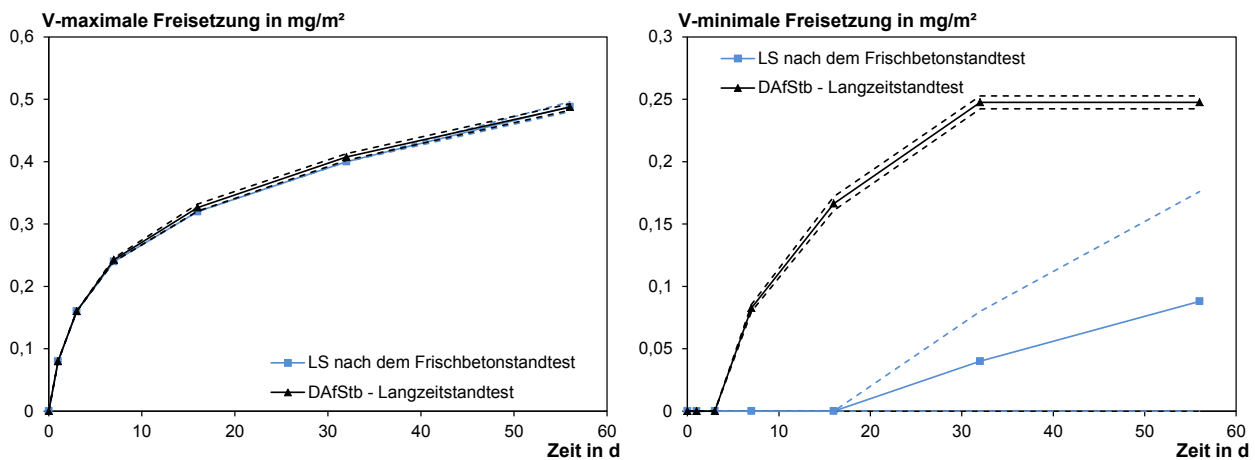


Bild 47: Kumulative Freisetzung von Vanadium in den Langzeitstandtests

5.2.5 Gegenüberstellung der Freisetzungen

Die kumulativen Freisetzungen wurden nach 56 Tagen (E_{56d}) berechnet und im Anhang in Tabelle A13 zusammengefasst. Für Stoffe, die nur in einem Teil der Eluate nachgewiesen wurden, sind sowohl die maximale als auch die minimale Freisetzung angegeben. Die Konzentrationen von Bor, Chlorid, Kobalt, Nickel und Selen waren in den Eluaten im DAfStb-Langzeitstandtest nur vereinzelt quantifizierbar. Sie werden daher in den folgenden Ausführungen nicht weiter behandelt. Die Mittelwerte der Freisetzungen der gut messbaren Parameter sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Zum Vergleich sind die zulässigen Freisetzungen (zul. E_{56d}) und die Freisetzungen im Frischbetonstandtest mit dem anschließenden Langzeitstandtest nach Abschnitt 2.3 angegeben. Die zulässigen Freisetzungen gelten für diesen Anwendungsfall nicht, sie sollen nur als grobe Anhaltswerte für die Einstufung der Ergebnisse dienen. Die Freisetzungen im DAfStb-Langzeitstandtest waren i. d. R. kleiner als die Freisetzungen in den Frischbetonstandtests mit den Langzeitstandtests und lagen deutlich unter den maximal zulässigen 56-tägigen Freisetzungen (zul. E_{56d}). Lediglich Blei und Zink wiesen im DAfStb-Langzeitstandtest höhere Freisetzungen auf. In allen Eluaten des Frischbetonstandtests mit anschließendem Langzeitstandtest lagen die Blei- und Zink-Konzentration unter der Bestimmungsgrenze.

Tabelle 10: Kumulative Freisetzungen in den Standtests (Mittelwerte)

Parameter	zul. E _{56d} *	DAfStb- Langzeitstandtest	Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest
		E _{56d}	E _{57d}
-	mg/m ²		
1	2	3	4
Natrium	-	1976	4456
Kalium	-	21624	47389
Sulfat	247423	1384	3583
Barium	351	204	467
Blei	7,22	0,77 - 1,09	0 - 0,96
Chrom	7,22	1,77	4,15
Kupfer	14,4	0,41 - 0,61	1,18 - 1,54
Molybdän	36,1	0,51 - 0,55	3,06
Vanadium	4,12	0,25 - 0,49	1,19 - 1,75
Zink	59,8	0,92 - 1,04	0 - 0,96

* zul. E_{56d} gilt nach /DIB11/ nur für Beton und Betonausgangstoffe, nicht für Zementsuspension

Wie in den vorangegangenen Abschnitten dargestellt, wurden die Auslaugraten in den Langzeitstandtests gemäß Abschnitt 4.2 berechnet und im doppeltlogarithmischen Maßstab eine Steigung ermittelt. Die Steigungen sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Die Auslaugraten im DAfStb-Langzeitstandtest fielen bei den meisten beobachteten Parametern deutlich stärker ab als die Auslaugraten in dem Langzeitstandtest nach der Frischbetonauslaugung. Die Steigung der diffusionskontrollierten Parameter im DAfStb-Langzeitstandtest sollte laut /Bra13b/ etwa -0,65 betragen. Der Bereich $-0,65 \pm 0,05$ umfasst nahezu alle Steigungen der quantifizierbaren Parameter.

Tabelle 11: Darstellung der Steigungen im $\lg(J)$ - $\lg(t)$ -Diagramm in Fest- bzw. Jungbetonphase in den verschiedenen Versuchen

Parameter	DAfStb	LS nach FS
1	2	3
Natrium	-0,66	-0,51
Kalium	-0,69	-0,44
Sulfat	-0,83	-0,48
Barium	-0,63	-0,48
Blei	- ¹⁾	- ²⁾
Chrom	-0,58	-0,41
Kupfer	-0,65	-0,52 ³⁾
Molybdän	-0,62	-0,62
Vanadium	- ¹⁾	- ¹⁾
Zink	-0,62	- ²⁾

¹⁾ Es lagen nicht ausreichend quantifizierbare Eluatkonzentrationen für die Abschätzung einer Steigung im $\lg(J)$ - $\lg(t)$ -Diagramm vor

²⁾ Alle Eluatkonzentrationen lagen unterhalb der Bestimmungsgrenze

³⁾ Zwischen den beiden Parallelproben trat eine große Streuung der Eluatkonzentrationen auf

Die Gegenüberstellung zeigt, dass der DAfStb-Langzeitstandtest zur Prüfung des Auslaugverhaltens eines mit Zementsuspension behandelten Bodens nicht geeignet ist. Neben der Vernachlässigung der teilweise erheblichen Freisetzung unmittelbar nach dem Einbau werden auch die längerfristigen Freisetzungen unterschätzt, da einerseits die Freisetzung der meisten umweltrelevanten Parameter im DAfStb-Standtest kleiner war als die Freisetzung in Langzeitstandtest nach der Frischbetonauslaugung und andererseits die Auslaugraten im DAfStb-Langzeitstandtest bei den meisten umweltrelevanten Parametern deutlich stärker abfielen.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSLICK

Eine Überprüfung der Verträglichkeit für Boden und Grundwasser ist im Rahmen von Zulassungsprüfungen für Injektionsmittel vorgesehen. Ein Bewertungskonzept für die Schleierinjektionen wurde in Kapitel 2 des Teils II des Grundsatzpapiers „Grundsätze zur Bewertung der Auswirkung von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ erarbeitet /DIB11/.

Für eines der wichtigsten Injektionsmittel im Baubetrieb, die Zementsuspensionen, ist der vorgegebene inverse Säulenversuch jedoch nicht geeignet, da er das Auslaugverhalten von Zementinjektionen nicht realistisch abbildet (s. /Bra10/ und /Bra09/). Als Alternative wurde hier ein Frischbetonstandtest nach /Bra07/ als Standardversuch herangezogen. In diesem Versuch wird Frischbeton in eine speziell angefertigte Form eingefüllt und die Frischbetonoberfläche mit deionisiertem Wasser beaufschlagt, welches zu festgelegten Zeiten gewechselt wird. Zusätzlich wurde versucht, den Frischbetonstandtest weiter zu vereinfachen und Prüfstreuungen zu reduzieren. Hierzu wurde der Baustoff in einen handelsüblichen PP-Behälter gefüllt und eine Sandüberdeckung verwendet (modifizierter Frischbetonstandtest, s. Abschnitt 2.4). Auf diese Weise konnte die übliche Versuchseinrichtung des DAfStb-Langzeitstandtests verwendet werden.

Aus einer Zementsuspension und einem Sand der Körnung 1 / 2 mm wurde ein Gemisch hergestellt, das einen Boden nach HDI-Injektion simulieren soll. An dem Gemisch wurden ein Frischbetonstandtest (ohne Sandüberdeckung) und ein modifizierter Frischbetonstandtest (mit Sandüberdeckung) durchgeführt. Die Versuche wurden bis zum Alter von 57 Tagen fortgeführt, um die Auslaugung aus jungem Beton nach der Frischbetonauslaugung zu erfassen. Zum Vergleich wurde das erhärtete Gemisch mit dem Langzeitstandtest nach /DAf05/ untersucht. In den Eluaten wurden der pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit, das Redoxpotential und die Konzentrationen von Natrium, Kalium, Chlorid, Cyanid, Fluorid und Sulfat sowie Antimon, Arsen, Barium, Blei, Bor, Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Molybdän, Nickel, Quecksilber, Selen, Thallium, Vanadium und Zink bestimmt. Die Konzentrationen von Cyanid, Fluorid, Antimon, Arsen, Cadmium, Quecksilber, Selen und Thallium lagen in allen Eluaten unter den Bestimmungsgrenzen. Die Konzentrationen von Bor, Kobalt und Nickel waren nur teilweise oder gar nicht messbar, die Gesamtfreisetzungen lagen jeweils deutlich unter 1 mg/m². Für diese Parameter wurde keine Auswertung des Freisetzungsvorgangs durchgeführt.

Es wurde festgestellt, dass die beiden Frischbetonstandtests erhebliche Unterschiede in den gemessenen Konzentrationen aufweisen. Der Einsatz der Sandschicht führte zu einer deutlichen Verringerung der Auslaugung insbesondere während der ersten Stunden der Hydratation. Eine Berechnung basierend auf der Diffusionsgleichung zeigte, dass dieses Ergebnis plausibel ist. Das Zementsuspension-Sand-Gemisch weist unmittelbar nach dem Mischen einen hohen Diffusionskoeffizienten auf, da sich noch kein zusammenhängendes Gefüge gebildet hat und gelöste Ionen frei im Anmachwasser diffundieren können. Die Sandüberdeckung behindert das Ausdiffundieren der Ionen, die Auslaugrate sinkt. Innerhalb der ersten 4,5 Stunden wurde für Natrium eine theoretische Verringerung der Frei-

setzung um 51,6 % im Vergleich zur Auslaugung ohne Sandschicht berechnet. Im Versuch war der Einfluss der Sandschicht für Natrium, Kalium, Chlorid, Barium und Molybdän sogar noch größer für Sulfat etwas geringer. Für die folgenden Elutionsschritte können auf analytischem Wege keine verlässlichen Berechnungen mehr aufgestellt werden, da sich der Diffusionskoeffizient mit fortschreitender Hydratation verringert, die angewendete Diffusionsgleichung jedoch von einem konstanten Diffusionskoeffizienten ausgeht. Eine Näherungsrechnung und die Versuche zeigen jedoch, dass mit fortschreitender Reaktion der Einfluss der Sandschicht stark zurückgeht. Im erhärteten Gemisch liegt der Diffusionskoeffizient für Natrium etwa zwei Größenordnungen unter dem Startwert. Die Freisetzung wird hier fast nur von der Diffusionsgeschwindigkeit im Baustoff und nicht mehr von der Diffusion im Eluenten bestimmt.

Für Chrom, Kupfer und Vanadium trifft die Berechnung nicht zu. Die drei Schwermetalle zeigen ein von Natrium, bzw. von der theoretischen Diffusionsberechnung, deutlich abweichendes Verhalten. Gründe hierfür können in veränderlichen Porenlösungskonzentrationen im Verlauf der Hydratation, in der teilweise zu geringen Analysegenauigkeit oder in chemischen Wechselwirkungen innerhalb der Sandschicht liegen. Letztere Effekte dürfen nach den Vorgaben des DIBt bei der Bewertung nicht in Ansatz gebracht werden. Es ist ebenfalls möglich, dass der Diffusionsansatz für die Auslaugung einiger Parameter nicht zutrifft. Bei Auslaugprozessen, die von der Löslichkeit schwermetallhaltiger Verbindungen bestimmt sind, sollten die Versuche identische Eluatkonzentrationen liefern. Dies könnte möglicherweise bei Kupfer und Vanadium der Fall sein, die in beiden Versuchen sehr ähnliche Ergebnisse aufweisen.

Die Modifizierung des Frischbetonstandtests hat sich in diesem Projekt nicht bewährt. Die Reproduzierbarkeit ist gegenüber dem üblichen Frischbetonstandtest nicht höher und die Kunststoffschale und die Sandschicht stellen potentielle Kontaminationsquellen dar (z. B. für Zink). Zudem sind Wechselwirkungen zwischen Sand und eluierten Stoffen (Adsorption, Fällungsreaktionen) nicht auszuschließen. Solche Wechselwirkungen dürfen jedoch nach DIBt-Grundsatzpapier nicht in Ansatz gebracht werden.

Zur Beurteilung der Eignung des DAfStb-Langzeitstandtests sind in Tabelle 12 die Freisetzungen der quantifizierbaren Schwermetalle im Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest den Ergebnissen des DAfStb-Langzeitstandtests gegenübergestellt. Im ungünstigsten Fall (Molybdän) war die Freisetzung um Faktor 6 höher als im DAfStb-Langzeitstandtest.

Tabelle 12: Kumulative Freisetzungen der Schwermetalle in den Standtests (Mittelwerte)

Parameter	zul. E _{56d} *	DAfStb- Langzeitstandtest	Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest
		E _{56d}	E _{57d}
-	mg/m ²		
1	2	3	4
Barium	351	204	467
Blei	7,22	0,77 - 1,09	0 - 0,96
Chrom	7,22	1,77	4,15
Kupfer	14,4	0,41 - 0,61	1,18 - 1,54
Molybdän	36,1	0,51 - 0,55	3,06
Vanadium	4,12	0,25 - 0,49	1,19 - 1,75
Zink	59,8	0,92 - 1,04	0 - 0,96

* zul. E_{56d} gilt nach /DIB11/ nur für Beton und Betonausgangstoffe, nicht für Zementsuspension

Der DAfStb-Langzeitstandtest unterschätzt somit die Freisetzung. Ausnahmen sind Blei und Zink, wobei die Konzentrationen von beiden Parametern auf sehr niedrigem Niveau lagen (häufig unterhalb der Bestimmungsgrenze). Der DAfStb-Langzeitstandtest bildet für die Prüfung von Zementsuspensionen nicht den ungünstigsten Fall ab, da er die Frischbetonphase nicht erfasst und auch die Auslaugung während der folgenden Erhärtung der Zementsuspension unterschätzt. Die zeitliche Entwicklung der Auslaugrate stimmt in den beiden Langzeitstandtests nicht überein. Ob eine differenzierte Untersuchung der Erhärtungsphase für Zementsuspensionen im Rahmen von Zulassungsprüfungen gefordert wird, oder eine Bewertung auf Basis des DAfStb-Langzeitstandtests als ausreichend angesehen wird, ist in den Gremien des DIBt festzulegen. Die Untersuchungen dieses Projekts liefern hierzu eine Entscheidungsgrundlage.

Wenn eine separate Bewertung der Zementsuspension gefordert wird, ist der Frischbetonstandtest incl. des anschließenden Langzeitstandtests grundsätzlich geeignet, allerdings ist zu beachten, dass insbesondere während der ersten drei Elutionsschritte (bis 4,5 Stunden) die Freisetzung erhöht ist. In der Praxis liegt wassergesättigter Boden als Eluent vor, der (wie die Sandschicht im Versuch) das Ausdiffundieren der gelösten Ionen bremst. In /DIB11/ wird im Bewertungskonzept für Beton ein Bodenmaterial mit einer Porosität von $n_{e,Boden} = 0,1$ beschrieben. Gleichung (14) beschreibt die Freisetzung in wassergesättigtem Boden in Relation zur Freisetzung in Wasser (Frischbetonstandtest).

$$\frac{E_{\text{Boden}}}{E_{\text{Wasser}}} = \frac{K_{D,\text{Wasser}}}{K_{D,\text{Boden}}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{D_{\text{Baustoff}}}} + \frac{1}{\sqrt{D_{\text{Wasser}}}}}{\frac{1}{\sqrt{D_{\text{Beton}}}} + \frac{1}{\sqrt{D_{\text{Boden}}}}} \quad (14)$$

Wenn man die zeitliche Änderung des Diffusionskoeffizient des Betons während der ersten 4,5 Stunden vernachlässigt ist, ergibt sich für die ersten drei Elutionsschritte eine Verminderung von 44 %, die bei einer Modellrechnung für Zementsuspensionen in Ansatz gebracht werden könnte. Für die folgenden Elutionsschritte sollten im Sinne einer Abschätzung auf der sicheren Seite die Freisetzungen im Frischbetonstandtest in voller Höhe angesetzt werden. Eine Extrapolation des Freisetzungsverlaufs bis zum Alter von 6 Monaten (Bewertungszeitraum) müsste dann anhand der Diffusionsgleichung (1) erfolgen.

Mit diesem Schadstoffeintrag könnten anhand von numerischen Transportberechnungen zulässige Freisetzungen für den Frischbetonstandtest (incl. des anschließenden Langzeitstandtests) ermittelt werden. Hierfür wäre vom DIBt ein passendes Modellgebiet festzulegen. Ein entsprechender Vorschlag ist in /Bra10/ enthalten. Zu beachten ist, dass insbesondere die relevanten Schwermetalle Chrom und Vanadium keine diffusionskontrollierte Freisetzung gezeigt haben. Inwieweit Lösungsprozesse die Freisetzung bestimmen, muss noch eingehender erforscht werden. Hilfreich wären Porenlösungsanalysen im Verlauf der Hydratation und eine Gegenüberstellung mit den Eluatkonzentrationen (analog zu /Vol12/).

7 LITERATUR

- /Abr64/ Abramowitz, M.; Stegun, I. A.: Handbook of Mathematical Functions With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables (AMS55), Verlag: Dover Publ Inc; Auflage: Juni 1964, ISBN 0486612724
- /Ber02/ Berg, J.: Das Düsenstrahlverfahren im Spezialtiefbau: Voraussetzungen - Planung – Ausführung. Band 19 von Baupraxis + Dokumentation, 2002, ISBN 3816921183
- /Bra01/ Brameshuber, W.; Uebachs, S.: Zusätzliche Untersuchungen zur Auslaugung von Frischbeton. Aachen: Institut für Bauforschung, 2001. - Ergebnisbericht Nr. F 763
- /Bra03/ 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
- /Bra04/ 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
- /Bra07/ Brameshuber, W.; Vollpracht, A.: Erarbeitung eines Bewertungskonzepts zur Auslaugung aus Frischbeton. Aachen: Institut für Bauforschung, 2007. – Forschungsbericht Nr. F 944
- /Bra09/ Brameshuber, W.; Vollpracht, A.: Untersuchungen zum Auslaugverhalten von Abdichtungs- und Injektionsstoffen: Investigation of the Leaching Behaviour of Sealing Materials and Soil Injections. Aachen: Institut für Bauforschung, RWTH Aachen University, 2009. - Forschungsbericht Nr. F 7048
- /Bra10/ Brameshuber, W.; Vollpracht, A.: Bewertung der Umweltverträglichkeit von Abdichtungs- und Injektionsstoffen: Evaluation of the Environmental Compatibility of Sealing Materials and Soil Injections. Aachen: Institut für Bauforschung, RWTH Aachen University, 2010. - Forschungsbericht Nr. F 7039
- /Bra13a/ Brameshuber, W.; Lin, X.; Vollpracht, A.: Literaturrecherche zur Auslaugkinetik von zementgebundenen Baustoffen. Aachen: Institut für Bauforschung, 2013. – Forschungsbericht Nr. F 7091
- /Bra13b/ Brameshuber, W.; Lin, X. ; Vollpracht, A.: Erstellung einer Datenbasis zum Auslaugverhalten von Frischbeton unterschiedlicher Zusammensetzung. Aachen: Institut für Bauforschung, 2013. – Forschungsbericht Nr. F 7058, noch nicht veröffentlicht

- /DIB09/ Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser – Teil I (Allgemeines Bewertungskonzept). DIBt-Mitteilung 40, S. 180, Juli 2009, Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik
- /DIB11/ Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser – Teil II (Bewertungskonzepte für spezielle Bauprodukte), September 2011, Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik
- /DAf05/ DAfStb, TA Umwelt: DAfStb-Richtlinie „Bestimmung der Freisetzung anorganischer Stoffe durch Auslaugung aus zementgebundenen Baustoffen“. – Ausgabe Mai 2005
- /Geh00/ Gehlen, C.: Probabilistische Lebensdauerermessung von Stahlbetonbauwerken : Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Berlin: Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (2000), Nr. 510 = Dissertation
- /Gir12/ Girmscheid, G.: Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau. John Wiley & Sons, 2012, ISBN 3433601933
- /Hoh02/ Hohberg, I.: Charakterisierung, Modellierung und Bewertung des Auslaugverhaltens umweltrelevanter, anorganischer Stoffe aus zementgebundenen Baustoffen. Berlin: Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (2003), Nr. 542, Dissertation
- /Kol11/ Kolymbas, D.: Geotechnik: Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau. Springer DE, 2011, ISBN 364220482
- /Kel03/ Keller Grundbau: Das Soilcrete®-Verfahren, Prospekt 67-03 D, www.kellergrundbau.de/files/download/file.pdf
- /Ose08/ Osebold, R.: Entwicklung und Erprobung mineralischer Injektionssuspensionen zur Sanierung von Grundleitungsnetzen. Aachen: Institut für Baumaschinen und Baubetrieb, RWTH Aachen University, 2008
- /Sch98/ Schmidt, H.G.; Seitz, J.: Grundbau. Sonderdruck aus dem Beton-Kalender 1998, Ernst & Sohn Verlag
- /Smo01/ Smolczyk, U.: Grundbau-Taschenbuch 2: Geotechnische Verfahren. John Wiley & Sons, 2001, ISBN 3433014485
- /Vol12/ Vollpracht, A.: Einbindung von Spurenelementen in Portlandzementstein. In: Schriftenreihe Aachener Beiträge zur Bauforschung, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (2012), zugl.: Aachen, technische Hochschule, Dissertation 2012, ISBN 3-86130-635-2

Tabelle A1: Chemische Zusammensetzung des Zements bezogen auf die getrocknete Probe

Bestandteil		Einheit	Gehalt
1		2	3
Glühverlust, Atmosphäre		M.-%	1,47
Gesamtschwefel als SO ₃ (CSA)			2,68
Gesamtkohlenstoff als CO ₂ (CSA)			0,54
Gesamtkohlenstoff als C			0,15
Chlorid			0,017
Na ₂ O			0,15
K ₂ O			0,67
Na ₂ O-Äquivalent			0,59
MgO			0,98
Al ₂ O ₃			3,91
SiO ₂			21,23
P ₂ O ₅			0,08
CaO			62,91
TiO ₂			0,24
MnO			0,25
Fe ₂ O ₃			4,26
Spuren- elemente	Antimon	mg/kg	3,46
	Arsen		3,46
	Barium		321
	Blei		3,03
	Bor		38,0
	Cadmium		<0,1
	Chrom		70,2
	Kobalt		5,58
	Kupfer		21,1
	Molybdän		1,47
	Nickel		17,8
	Quecksilber		0,0144
	Selen		<0,1
	Thallium		1,47
Vanadium	72,3		
Zink	82,0		

CSA: Kohlenstoffschwefelanalysator

Tabelle A2: Korngrößenverteilung
des Zements
(Lasergranulometrie)

Korngröße	Durchgang
µm	Vol.-%
1	2
< 20	98,52
< 10	90,57
< 8	85,99
< 6	77,45
< 5	71,50
< 4	64,33
< 3	55,63
< 2	44,06
< 1	26,64
< 0,5	14,13
< 0,1	1,98

Tabelle A3: Eluatkonzentrationen der Sandprobe im Frischbetonstandtest

Parameter	Einheit	Eluat												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
		nach												
		0,5	2	4	8	14	24	2	4	8	17	33	57	
		h						d						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
pH-Wert	-	8,06	7,79	8,31	8,42	8,21	8,54	8,93	6,71	8,34	7,81	7,97	6,57	
Redox-potential	mV	781,4	521,2	532,0	534,0	528,8	496,6	453,0	498,0	459,6	473,0	507,6	356,6	
Leitfähigkeit	µS/cm	12,02	10,68	12,02	28,57	17,22	44,30	29,34	33,80	56,80	92,30	78,60	13,48	
Natrium	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,50	0,10	0,20	
Kalium		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,10	0,20	0,50	0,50	0,60
Chlorid		0,22	0,16	0,12	< 0,1	< 0,1	0,13	0,16	0,26	0,39	0,88	1,11	0,26	
Sulfat		0,46	0,49	0,34	0,32	0,40	0,40	0,65	1,01	1,36	7,64	4,82	2,17	
Cyanid		< 0,002												n. b.
Fluorid		< 0,1												n. b.
Antimon		µg/l	< 1,0											
Arsen	< 1,0													
Barium	2,30		1,67	1,54	8,68	1,88	1,25	1,22	1,76	2,46	3,53	4,23	3,90	
Blei	< 1,0		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1,04	1,04	1,02	1,75	< 1,0	
Bor	< 10													
Cadmium	< 1,0													
Chrom	< 1,0													
Kobalt	< 1,0													
Kupfer	1,12		< 1,0	< 1,0	< 1,0	1,01	< 1,0	< 1,0	< 1,0	2,05	< 1,0	1,54	< 1,0	
Molybdän	< 1,0													
Nickel	< 1,0													
Quecksilber	< 0,1													
Selen	< 1,0													
Thallium	< 1,0													
Vanadium	< 1,0													
Zink	< 1,0		< 1,0	3,36	< 1,0	1,54	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1,78	6,92	3,64	

fettgedruckt: ausreisserverdächtige Werte

n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A4: Eluatkonzentrationen der Sandprobe im mod. Frischbetonstandtest

Parameter	Einheit	Eluat												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
		nach												
		0,5	2	4	8	14	24	2	4	8	17	33	57	
		h						d						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
pH-Wert	-	8,83	8,27	8,62	7,50	7,40	7,28	7,79	6,48	7,82	6,88	5,44	6,21	
Redox-potential	mV	504,6	647,4	560,6	470,6	527,1	543,0	554,0	558,2	525,0	566,0	522,4	482,6	
Leitfähigkeit	µS/cm	10,97	8,20	8,51	14,70	9,47	11,37	11,45	6,97	23,31	71,70	14,86	14,55	
Natrium	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,30	0,30	0,20	
Kalium		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,10	0,20	0,40	0,60	0,60
Chlorid		0,26	0,19	0,19	0,15	0,12	0,16	0,18	0,32	0,37	0,54	0,38	0,25	
Sulfat		5,01	1,73	0,98	0,76	0,73	0,71	0,80	1,12	1,24	2,81	2,92	2,44	
Cyanid		< 0,002												
Fluorid		< 0,1												
Antimon		< 1,0												
Arsen	< 1,0													
Barium	1,33	0,92	27,01	1,69	0,90	4,51	1,09	1,12	1,46	2,80	3,37	4,52		
Blei	< 1,0													
Bor	< 10													
Cadmium	< 1,0													
Chrom	< 1,0											1,04		
Kobalt	< 1,0													
Kupfer	µg/l	< 1,0	1,96	1,55	1,08	< 1,0	1,20	< 1,0	2,06	< 1,0	< 1,0	1,32	< 1,0	
Molybdän	< 1,0													
Nickel	< 1,0													
Quecksilber	< 0,1													
Selen	< 1,0													
Thallium	< 1,0													
Vanadium	< 1,0													
Zink	4,55	2,52	1,45	2,05	1,81	1,33	1,25	3,40	1,32	1,69	1,84	2,90		

fettgedruckt: ausreisserverdächtiger Wert

Tabelle A5: Eluatkonzentrationen der Zementsuspension im Frischbetonstandtest

Parameter	Einheit	Eluate											
		1		2		3		4		5		6	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
-	-	nach											
		0,5		2		4		8		14		24	
		h											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
pH-Wert	-	12,28	12,16	12,23	12,10	12,29	12,27	11,68	11,70	11,78	11,82	11,79	11,86
Redox-potential	mV	228	247	234	251	266	258	260	256	245	250	245	249
Leitfähigkeit	µS/cm	976	769	851	624	823	802	2149	1074	1233	1337	1402	1679
Natrium	mg/l	2,9	2,5	1,7	1,6	1,5	1,4	2,0	1,9	2,8	2,7	3,7	3,3
Kalium		41,4	40,4	25,2	25,0	21,9	21,7	21,3	20,1	24,0	22,7	26,0	24,8
Chlorid		1,3	1,1	0,9	1,0	0,6	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2
Sulfat		23,0	19,5	14,3	12,6	6,3	1,7	1,7	0,7	0,8	0,4	0,4	0,3
Cyanid		< 0,002											
Fluorid		< 0,1											
Antimon		< 1,0											
Arsen	< 1,0												
Barium	51,5	36,1	53,3	33,2	83,1	78,6	222,0	240,7	317,6	329,0	341,5	367,4	
Blei	< 1,0												
Bor	11,00	< 10											
Cadmium	< 1,0												
Chrom	6,79	3,39	5,49	1,75	2,45	1,95	1,66	1,39	1,81	1,86	2,03	2,58	
Kobalt	< 1,0												
Kupfer	µg/l	2,19	< 1,0	< 1,0	2,90	< 1,0	2,79	2,05	1,68	1,46	1,37	< 1,0	1,34
Molybdän	12,73	11,67	6,94	6,78	3,70	3,57	1,62	1,54	1,32	1,40	1,27	1,39	
Nickel	< 1,0												
Quecksilber	< 0,1												
Selen	< 1,0												
Thallium	< 1,0												
Vanadium	6,54	3,45	7,85	1,81	3,77	1,06	1,87	< 1,0	1,10	< 1,0	< 1,0	< 1,0	
Zink	< 1,0												

fettgedruckt: ausreisserverdächtiger Wert, bei der Auswertung wurde der Wert der Parallelprobe gewählt

Tabelle A6: Eluatkonzentrationen der Zementsuspension im anschließenden Langzeitstandtest nach dem Frischbetonstandtest

Parameter	Einheit	Eluate											
		7		8		9		10		11		12	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
		nach											
-	-	2		4		8		17		33		57	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
pH-Wert	-	12,74	12,80	12,87	12,89	11,70	11,81	12,01	12,07	12,20	12,30	12,43	12,36
Redox-potential	mV	224	236	227	241	241	235	255	246	235	226	123	125
Leitfähigkeit	µS/cm	2089	2369	2266	2504	2942	2978	4080	4160	3850	4080	4540	4560
Natrium	mg/l	4,9	4,6	5,6	5,3	6,3	6,1	8,6	8,3	7,8	8,0	8,9	9,0
Kalium		37,2	36,2	48,8	48,3	68,0	67,1	88,7	89,7	87,7	90,4	103,1	105,0
Chlorid		0,3	0,2	0,4	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1	0,3	0,3	< 0,1	< 0,1
Sulfat		0,3	0,6	0,7	0,3	0,5	0,4	0,6	0,4	0,6	0,9	1,3	1,3
Cyanid		< 0,002											
Fluorid		< 0,1											
Antimon		< 1,0											
Arsen	< 1,0												
Barium	485,6	507,7	458,9	585,3	589,2	731,3	936,1	1112	1233	1150	881,1	840,8	
Blei	< 1,0												
Bor	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	10,56	< 10
Cadmium	< 1,0												
Chrom	2,47	3,48	2,38	4,21	2,69	4,72	5,25	8,34	10,56	11,94	7,00	7,45	
Kobalt	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1,27	1,23	< 1,0	< 1,0	
Kupfer	1,67	1,06	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1,60	< 1,0	< 1,0	1,98	1,99	1,28	4,15	
Molybdän	1,34	1,53	3,08	1,74	2,34	1,90	2,44	2,20	1,55	1,67	1,45	1,42	
Nickel	< 1,0												
Quecksilber	< 0,1												
Selen	< 1,0												
Thallium	< 1,0												
Vanadium	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1,00	< 1,0	1,20	
Zink	< 1,0												
													5,05

fettgedruckt: ausreisserverdächtiger Wert, bei der Auswertung wurde der Wert der Parallelprobe gewählt

Tabelle A7: Eluatkonzentrationen der Zementsuspension im mod. Frischbetonstandtest

Parameter	Einheit	Eluate											
		1		2		3		4		5		6	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
		nach											
		0,5		2		4		8		14		24	
		h											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
pH-Wert	-	11,88	11,80	11,74	11,72	11,82	11,81	11,27	11,29	11,41	11,41	11,47	11,51
Redox-potential	mV	273	277	277	289	275	280	280	282	274	277	267	271
Leitfähigkeit	µS/cm	784	417	336	314	386	345	391	409	541	565	631	703
Natrium	mg/l	0,5	0,7	0,4	0,5	0,3	0,4	0,4	0,6	1,1	1,4	1,7	2,0
Kalium		10,8	15,8	13,1	13,9	12,6	13,6	12,0	14,3	16,2	18,6	18,8	21,6
Chlorid		0,4	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	< 0,1	< 0,1
Sulfat		10,9	12,9	8,0	6,4	3,9	3,1	0,7	0,6	0,3	0,2	0,2	0,1
Cyanid		< 0,002											
Fluorid		< 0,1											
Antimon		< 1,0											
Arsen	< 1,0												
Barium	30,0	30,5	19,9	19,1	24,4	22,1	51,3	57,6	106,1	116,0	127,6	140,7	
Blei	< 1,0												
Bor	< 10												
Cadmium	< 1,0												
Chrom	5,24	4,81	2,73	2,40	2,41	1,55	1,16	< 1,0	1,13	< 1,0	1,08	1,11	
Kobalt	< 1,0												
Kupfer	2,66	2,05	< 1,0	< 1,0	4,04	< 1,0	4,62	< 1,0	2,48	2,12	< 1,0	< 1,0	
Molybdän	3,86	5,57	3,36	3,80	2,21	2,38	< 1,0	1,02	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	
Nickel	< 1,0												
Quecksilber	< 0,1												
Selen	< 1,0												
Thallium	< 1,0												
Vanadium	6,79	6,21	3,19	2,59	2,32	1,02	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	
Zink	5,50	11,11	2,76	2,91	2,22	2,92	1,58	1,67	2,79	2,50	2,07	2,48	

Tabelle A8: Eluatkonzentrationen der Zementsuspension im anschließenden Langzeitstandtest nach modifiziertem Frischbetonstandtest

Parameter	Einheit	Eluate											
		7		8		9		10		11		12	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
-	-	nach											
-	-	2		4		8		17		33		57	
-	-	d											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
pH-Wert	-	12,44	12,41	12,43	12,61	11,59	11,62	11,96	11,97	12,17	12,24	12,24	12,30
Redox-potential	mV	125	263	242	249	240	248	259	263	448	248	137	153
Leitfähigkeit	µS/cm	1084	1133	1247	1366	1743	1816	2816	2882	3150	3210	3460	3630
Natrium	mg/l	2,9	3,5	3,7	4,2	4,8	5,3	7,2	7,1	6,8	6,8	8,3	8,4
Kalium		29,4	32,4	39,3	42,7	56,2	59,4	79,5	79,2	82,5	82,3	96,8	97,7
Chlorid		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Sulfat		0,2	0,3	0,2	0,4	0,3	0,4	0,5	0,6	0,5	0,9	0,8	1,1
Cyanid		< 0,002											
Fluorid		< 0,1											
Antimon		< 1,0											
Arsen	< 1,0												
Barium	214,7	227,3	277,4	291,0	375,1	425,0	648,4	748,8	708,4	777,7	468,2	657,8	
Blei	< 1,0												
Bor	< 10												
Cadmium	< 1,0												
Chrom	1,65	1,76	2,26	2,55	2,87	3,21	4,69	4,67	6,71	6,10	4,90	4,97	
Kobalt	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1,07	< 1,0	1,06	< 1,0	< 1,0	
Kupfer	2,78	1,07	1,31	< 1,0	1,18	1,06	1,30	1,32	1,73	1,30	1,45	1,26	
Molybdän	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1,02	< 1,0	1,06	1,12	1,28	1,14	1,17	1,14	1,23	
Nickel	< 1,0											< 1,0	
Quecksilber	< 0,1												
Selen	< 1,0												
Thallium	< 1,0												
Vanadium	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1,02	1,27	1,33	1,40	1,48	1,42	1,78	
Zink	5,34	2,78	8,00	3,49	3,98	4,47	2,61	4,02	2,13	4,79	1,63	3,71	

fettgedruckt: ausreisserverdächtiger Wert, bei der Auswertung wurde der Wert der Parallelprobe gewählt.

Tabelle A9: Eluatkonzentrationen des Langzeitstandtests nach /DAf05/

Parameter	Einheit	Eluate											
		7		8		9		10		11		12	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
		nach											
		1		3		7		16		32		56	
		d											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
pH-Wert	-	12,18	12,23	12,08	12,10	12,06	12,04	11,96	11,93	12,14	12,07	12,06	11,99
Redox-potential	mV	101	175	206	226	200	222	242	190	220	230	396	271
Leitfähigkeit	µS/cm	2817	3170	2141	2272	2271	2244	2886	2536	2844	2387	2520	2224
Natrium	mg/l	5,0	5,5	3,1	3,3	4,1	4,0	4,9	4,8	3,9	3,7	3,6	3,5
Kalium		58,7	65,3	36,9	38,3	46,4	45,9	55,3	54,4	39,2	37,5	31,6	31,1
Chlorid		0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,2	< 0,1
Sulfat		7,4	0,9	1,7	1,0	5,8	2,8	1,5	1,4	1,7	1,3	1,3	1,4
Cyanid		n. b.											
Fluorid		n. b.											
Antimon		< 1,0											
Arsen	n. b.												
Barium	516,1	518,1	301,6	342,4	347,3	372,3	455,4	433,6	502,6	429,3	471,4	420,0	
Blei	7,1	9,7	1,2	1,4	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	
Bor	2,1	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	
Cadmium	n. b.												
Chrom	3,0	3,0	3,2	3,3	4,3	4,0	4,2	4,1	3,8	4,0	3,5	3,8	
Kobalt	< 1,0												
Kupfer	µg/l	1,3	1,7	1,3	< 1,0	1,7	1,3	< 1,0	1,0	< 1,0	< 1,0	1,7	1,4
Molybdän	1,1	1,1	1,1	1,1	1,3	1,1	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	< 1,0	
Nickel	< 1,0												
Quecksilber	n. b.												
Selen	< 1,0												
Thallium	n. b.												
Vanadium	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1,00	1,07	1,01	1,08	1,02	1,01	< 1,0	< 1,0	
Zink	7,48	2,65	3,05	< 1,0	1,47	1,71	< 1,0	< 1,0	2,40	1,29	22,62	2,70	

fettgedruckt: ausreisserverdächtiger Wert, bei der Auswertung wurde der Wert der Parallelprobe gewählt

n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A10: Gesamtfreisetzungen (E_{57d}) in beiden Frischbetonstandtests mit anschließenden Langzeitstandtests

Parameter	Einheit	Verfahren nach /Bra07/		Modifiziertes Verfahren	
		a	b	a	b
1	2	3	4	5	6
Natrium	mg/m ²	4536	4376	3048	3272
Kalium		47465	47313	37376	39320
Chlorid		393 - 401	325 - 333	113 - 169	117 - 173
Sulfat		4042	3123	2126	2149
Cyanid		0 - 1,92	0 - 1,92	0 - 1,92	0 - 1,92
Fluorid		0 - 96	0 - 96	0 - 96	0 - 96
Antimon		0 - 0,96	0 - 0,96	0 - 0,96	0 - 0,96
Arsen		0 - 0,96	0 - 0,96	0 - 0,96	0 - 0,96
Barium		452,23	480,96	244,11	281,08
Blei		0 - 0,96	0 - 0,96	0 - 0,96	0 - 0,96
Bor		1,72 - 9,73	0 - 9,6	0,19 - 9,6	0 - 9,6
Cadmium		0 - 0,96	0 - 0,96	0 - 0,96	0 - 0,96
Chrom		4,05	4,24	2,95	2,65 - 2,81
Kobalt		0,1 - 0,98	0,1 - 0,98	0 - 0,96	0,17 - 0,97
Kupfer		0,85 - 1,33	1,51 - 1,75	1,88 - 2,04	0,81 - 1,21
Molybdän		3,18	2,94	1,03 - 1,51	1,48 - 1,72
Nickel		0 - 0,96	0 - 0,96	0 - 0,96	0,1 - 0,98
Quecksilber		0 - 0,096	0 - 0,096	0 - 0,096	0 - 0,096
Selen		0 - 0,96	0 - 0,96	0 - 0,96	0 - 0,96
Thallium		0 - 0,96	0 - 0,96	0 - 0,96	0 - 0,96
Vanadium	1,69 - 2,25	0,68 - 1,24	1,31 - 1,79	1,23 - 1,63	
Zink	0 - 0,96	0 - 0,96	3,25	3,75	

Tabelle A11: Freisetzungen im Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest nach /Bra07/ in den verschiedenen Hydratationsphasen

Parameter	Einheit	E _{4,5h}		E _{4,5h-7d}		E _{7-57d}	
		a	b	a	b	a	b
1	2	3	4	5	6	7	8
Natrium	mg/m ²	488	440	1898	1790	2150	2146
Kalium		7080	6968	16664	16194	23721	24151
Chlorid		222	185	129	108	42 - 50	32 - 40
Sulfat		3490	2706	343	199	210	218
Cyanid		0 - 0,48	0 - 0,48	0 - 0,92	0 - 0,92	0 - 0,52	0 - 0,52
Fluorid		0 - 24	0 - 24	0 - 46	0 - 46	0 - 26	0 - 26
Antimon		0 - 0,24	0 - 0,24	0 - 0,46	0 - 0,46	0 - 0,26	0 - 0,26
Arsen		0 - 0,24	0 - 0,24	0 - 0,46	0 - 0,46	0 - 0,26	0 - 0,26
Barium		15,0	11,8	181,4	206,3	255,8	262,9
Blei		0 - 0,24	0 - 0,24	0 - 0,46	0 - 0,46	0 - 0,26	0 - 0,26
Bor		0,88 - 2,48	0 - 2,40	0 - 4,60	0 - 4,60	0,84 - 2,64	0 - 2,60
Cadmium		0 - 0,24	0 - 0,24	0 - 0,46	0 - 0,46	0 - 0,26	0 - 0,26
Chrom		1,18	0,57	0,99	1,36	1,88	2,31
Kobalt		0 - 0,24	0 - 0,24	0 - 0,46	0 - 0,46	0,10 - 0,28	0,10 - 0,28
Kupfer		0,18 - 0,34	0,46 - 0,54	0,41 - 0,63	0,53 - 0,61	0,26 - 0,36	0,52 - 0,60
Molybdän		1,87	1,76	0,83	0,72	0,48	0,46
Nickel		0 - 0,24	0 - 0,24	0 - 0,46	0 - 0,46	0 - 0,26	0 - 0,26
Quecksilber		0 - 0,24	0 - 0,24	0 - 0,46	0 - 0,46	0 - 0,26	0 - 0,26
Selen		0 - 0,24	0 - 0,24	0 - 0,46	0 - 0,46	0 - 0,26	0 - 0,26
Thallium		0 - 0,24	0 - 0,24	0 - 0,46	0 - 0,46	0 - 0,26	0 - 0,26
Vanadium	1,45	0,51	0,24 - 0,54	0 - 0,46	0 - 0,26	0,18 - 0,28	
Zink	0 - 0,24	0 - 0,24	0 - 0,46	0 - 0,46	0 - 0,26	0 - 0,26	

Tabelle A12: Freisetzungen im mod. Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest in den verschiedenen Hydratationsphasen

Parameter	Einheit	E _{4,5h}		E _{4,5h-7d}		E _{7-57d}	
		a	b	a	b	a	b
1	2	3	4	5	6	7	8
Natrium	mg/m ²	96	128	1072	1254	1880	1890
Kalium		2920	3464	12628	13932	21828	21924
Chlorid		91	94	22 - 52	22 - 52	0 - 26	0 - 26
Sulfat		1822	1792	146	147	157	210
Cyanid		0 - 0,48	0 - 0,48	0 - 0,92	0 - 0,92	0 - 0,52	0 - 0,52
Fluorid		0 - 24	0 - 24	0 - 46	0 - 46	0 - 26	0 - 26
Antimon		0 - 0,24	0 - 0,24	0 - 0,46	0 - 0,46	0 - 0,26	0 - 0,26
Arsen		0 - 0,24	0 - 0,24	0 - 0,46	0 - 0,46	0 - 0,26	0 - 0,26
Barium		5,9	5,7	84,7	92,1	153,5	183,2
Blei		0 - 0,24	0 - 0,24	0 - 0,46	0 - 0,46	0 - 0,26	0 - 0,26
Bor		0 - 2,4	0 - 2,40	0 - 4,6	0 - 4,60	0,19 - 2,60	0 - 2,60
Cadmium		0 - 0,24	0 - 0,24	0 - 0,46	0 - 0,46	0 - 0,26	0 - 0,26
Chrom		0,83	0,70	0,75	0,63 - 0,79	1,36	1,32
Kobalt		0 - 0,24	0 - 0,24	0 - 0,46	0 - 0,46	0 - 0,26	0,17 - 0,27
Kupfer		0,54 - 0,62	0,16 - 0,32	0,97 - 1,05	0,32 - 0,56	0,38	0,33
Molybdän		0,75	0,94	0 - 0,46	0,23 - 0,47	0,27 - 0,29	0,32
Nickel		0 - 0,24	0 - 0,24	0 - 0,46	0 - 0,46	0 - 0,26	0,10 - 0,28
Quecksilber		0 - 0,024	0 - 0,024	0 - 0,046	0 - 0,046	0 - 0,026	0 - 0,026
Selen		0 - 0,24	0 - 0,24	0 - 0,46	0 - 0,46	0 - 0,26	0 - 0,26
Thallium		0 - 0,24	0 - 0,24	0 - 0,46	0 - 0,46	0 - 0,26	0 - 0,26
Vanadium	0,98	0,79	0 - 0,46	0,06 - 0,46	0,33 - 0,35	0,39	
Zink	0,84	1,36	1,82	1,30	0,59	1,09	

Tabelle A13: Freisetzungen im Langzeitstandtest
nach /DAf05/

Parameter	Einheit	E ₅₆	
		a	b
1	2	3	4
Natrium	mg/m ²	1968	1984
Kalium		21448	21800
Chlorid		14 - 54	0 - 48
Sulfat		1551	1217
Cyanid		n. b.	n. b.
Fluorid		n. b.	n. b.
Antimon		0 - 0,48	0 - 0,48
Arsen		n. b.	n. b.
Barium		207,24	200,94
Blei		0,66 - 0,98	0,88 - 1,2
Bor		0,17 - 0,57	0 - 0,48
Cadmium		n. b.	n. b.
Chrom		1,76	1,77
Kobalt		0 - 0,48	0 - 0,48
Kupfer		0,47 - 0,63	0,35 - 0,59
Molybdän		0,57	0,46 - 0,54
Nickel		0 - 0,48	0 - 0,48
Quecksilber		n. b.	n. b.
Selen		0 - 0,48	0 - 0,48
Thallium		n. b.	n. b.
Vanadium	0,24 - 0,48	0,25 - 0,49	
Zink	1,27 - 1,35	0,57 - 0,73	

n. b.: nicht bestimmt

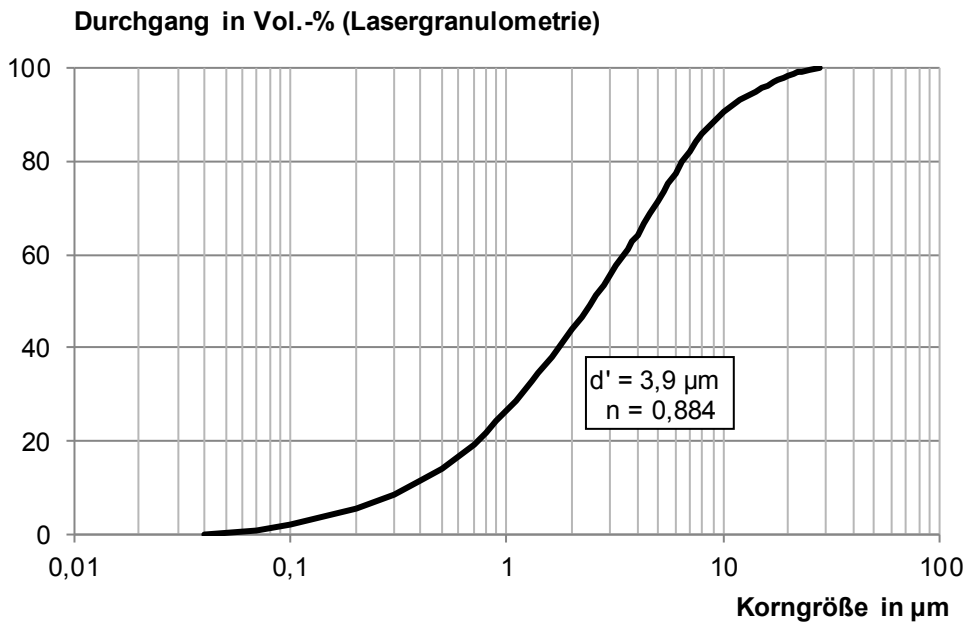


Bild B1: Darstellung der Korngrößenverteilung der Zementsuspension aus Lasergranulometrie