

Bewertung der Umweltverträglichkeit von Zementsuspensionen

T 3357

T 3357

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

2018

ISBN 978-3-7388-0194-1

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
und Lehrstuhl für
Baustoffkunde

RWTHAACHEN
UNIVERSITY

**FORSCHUNG
ENTWICKLUNG
ÜBERWACHUNG
PRÜFUNG
BERATUNG**

www.ibac.rwth-aachen.de

Forschungsbericht

F7101

Bewertung der Umweltverträglichkeit von Zementsuspensionen





THEMA	Bewertung der Umweltverträglichkeit von Zementsuspensionen
Forschungsbericht-Nr.	F7101 vom 14.02.18
Projektbearbeitung	Xiaochen Lin, M.Sc Prof. Dr.-Ing Anya Vollpracht
Auftraggeber/Förderer	Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) Postfach 62 02 29 D-10792 Berlin
Vertragsdatum / Auftragsbestätigung	03.03.2015 03.03.2015
Ihr Aktenzeichen	P 52-5-20.86-1475/15

Dieser Bericht umfasst 135 Seiten.

Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet. Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Experimentelle Untersuchungen	3
2.1	Übersicht des Versuchsprogramms.....	3
2.2	Auswahl der Ausgangsstoffe.....	5
2.3	Mischungskonzeption und Probenherstellung.....	7
2.4	Versuchsbeschreibungen.....	9
2.4.1	Langzeitstandtest.....	9
2.4.2	Frischbetonstandtest.....	10
2.4.3	Säulenversuch nach Schössner.....	11
2.4.4	Wärmeflusskalorimetrie.....	12
3	Ergebnisse und Auswertung der Auslaugversuche	12
3.1	Standtests.....	12
3.2	Säulenversuch nach Schössner.....	26
3.3	Ergebnisse der Wärmeflusskalorimetrie.....	40
4	Modellrechnung im Grundwasser	43
4.1	Allgemeines.....	43
4.2	Modell.....	43
4.2.1	Allgemeine Angaben und Vorüberlegungen zum Modellgebiet.....	43
4.2.2	Beschreibung des Modellgebiets.....	44
4.2.3	Berechnung des Schadstoffeintrags.....	46
4.2.4	Ort der Beurteilung.....	48
4.2.5	Transportmodellierung von Chrom.....	49
4.2.6	Transportmodellierung von Vanadium.....	53
4.2.7	Ableitung von zulässigen Freisetzungen im Versuch.....	57
5	Zusammenfassung und Ausblick	60
6	Literatur	62
	Anhang A – Tabellen	A1
	Anhang B – Bilder	B1

1 Einleitung

Im Sinne des Grundsatzpapiers „Grundsätze zur Bewertung der Auswirkung von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ /DIB11/ ist die Verträglichkeit eines Baustoffs für Boden und Grundwasser bei der bauaufsichtlichen Zulassung nachzuweisen. Von besonderer Bedeutung sind dabei Baustoffe, die in Kontakt mit Boden und Grundwasser aushärten. Dies trifft neben Betonfundamenten auch auf Zementsuspensionen zu (z. B. als Kanalsanierungsmittel oder als Injektionsmittel für das HDI-Verfahren). Das DIBt hat daher in die o. g. Grundsätze ein Kapitel für Kanalsanierungsmittel aufgenommen, das auch die Zementsuspensionen berücksichtigt. Als Prüfverfahren wurde der inverse Säulenversuch nach Schössner ausgewählt. Bei der Prüfung von Zementsuspensionen in Vorprojekten /Bra09a, Bra10/ wurden mit diesem Versuch jedoch überproportional große Mengen an Inhaltsstoffen ausgewaschen. Dies ist in erster Linie auf die lange Aushärtezeit des Zements und die hohe Durchströmungsgeschwindigkeit zurückzuführen. Es ist davon auszugehen, dass der Versuch das Auslagverhalten von Zementinjektionen nicht realistisch abbildet. Um dieser Problematik zu begegnen, wurde bei einem der inversen Säulenversuche in /Bra09a/ eine Zementsuspension nach einer Aushärtezeit von 24 Stunden geprüft, es waren jedoch aufgrund der hohen Verdünnung mit der gewählten Analyseverfahren (ICP-OES) keine Freisetzung mehr messbar. Es wurde daher ein Forschungsprojekt vom DIBt finanziert mit dem Ziel, ein geeignetes Prüfverfahren für Zementsuspensionen zu finden /Bra13a/. Zusätzlich sollte die Frage beantwortet werden, ob eine Beurteilung analog zum Kapitel der DIBt-Bewertungsgrundsätze „Betonausgangsstoffe und Beton“ /DIB11/ anhand eines Langzeitstandtests möglich ist. Dann könnten die Zementsuspensionen in allen üblichen Anwendungsfällen dort abgehandelt werden. Im Kapitel „Betonausgangsstoffe und Beton“ wird die Frischbetonphase derzeit noch nicht beurteilt.

Das Forschungsprojekt /Bra13a/ hat gezeigt, dass das Auslagverhalten während der Erhärtung der Zementsuspension relativ realitätsnah und zuverlässig mit einem sog. Frischbetonstandtest untersucht werden kann. Ignoriert man die Frischbetonphase und wendet den DAfStb-Langzeitstandtest /DAf05/ an einer ausgehärteten Mischung von Zementsuspension und Sand an, so wird die Freisetzung unterschätzt. Im ungünstigsten Fall (Molybdän) war die Freisetzung um einen Faktor 6 geringer als bei der Berücksichtigung der Frischbetonphase. Ausnahmen sind die Elemente Blei und Zink, wobei deren Konzentrationen in allen Versuchen auf sehr niedrigem Niveau lagen (häufig unterhalb der Bestimmungsgrenze).

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 Diskussion in der Projektgruppe „Beton und zementgebundene Baustoffe“ vom 24.10.2013 hat hierzu noch keinen Beschluss getroffen. Es wurde vorgeschlagen, ein weiteres Forschungsprojekt zu dieser Thematik durchzuführen, in dem die drei derzeit diskutierten Auslagverfahren (inverser Säulenversuch, Frischbetonstandtest und Langzeitstandtest) für verschiedene Zementsuspensionen verglichen werden sollen. Die Zielsetzung, Zementsuspensionen, die im Erd- und Grundbau eingesetzt werden, in das Kapitel „Betonausgangsstoffe und Beton“ mit aufzunehmen, bleibt bestehen. Hieraus ergeben sich jedoch zu-

sätzlich zu der bereits diskutierten Problematik bzgl. der Erhärtungsphase weitere Punkte, die genauer erforscht werden müssen:

1. Das Kapitel „Beton Ausgangsstoffe und Beton“ gibt eine Betonrezeptur mit einem w/z-Wert von 0,6 vor, Zementsuspensionen haben jedoch i. d. R. deutlich höhere Wassergehalte bezogen auf den Zement.
2. Der Zementgehalt in der Betonrezeptur beträgt 280 kg/m^3 . Bei der Injektion können sich pro m^3 injiziertem Boden höhere Zementanteile ergeben.

Es muss geklärt werden, welche Unterschiede sich hieraus ergeben.

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass in /Bra04/, /Bra09a/ und /Bra13a/ nur vier Zementsuspensionen untersucht wurden. Ergebnisse zum Auslaugverhalten von Frischbeton zeigen, dass das Auslaugverhalten stark von den Zusammensetzungen der Bindemittel beeinflusst wird /Bra13b/. Die Zusammensetzungen von Zementsuspensionen sind sehr variabel. Für bestimmte Zwecke können die Suspensionen mit verschiedenen Zusätzen, wie z. B. Flugasche, Hüttsandmehl oder Bentonit angereichert werden. Zudem werden als Bindemittel für Zementsuspensionen oft sehr fein gemahlene Feinstzemente verwendet. Die Zusammensetzungen der bisher untersuchten Zementsuspensionen decken die Spannweite der kommerziellen Produkte in Deutschland nicht ab.

2 Experimentelle Untersuchungen

2.1 Übersicht des Versuchsprogramms

Um die Spannweite der in Deutschland eingesetzten Zementsuspensionen abzudecken, wurden die Zusammensetzungen der kommerziellen Zementsuspensionen in Rücksprache mit den Industriepartnern, HeidelbergCement AG und Dyckerhoff GmbH, erfasst und in Rahmenrezepturen (RR) unterteilt. Aus 30 kommerziellen Zementsuspensionen, die diesen Rahmenrezepturen zugeordnet sind, sollte stellvertretend für jede Gruppe je ein Produkt für weitere Untersuchungen ausgewählt werden. Um die Auswahl der Zementsuspensionen einzugrenzen, wurden die Gesamtgehalte der Spurenelemente und Schwermetalle herangezogen. Zur Bestimmung des Auslaugverhaltens wurden die drei derzeit diskutierten Auslaugverfahren, inverser Säulenversuch nach Schössner (s. Kapitel 2.4.3), Frischbetonstandtest (s. Kapitel 2.4.2) und Langzeitstandtest (s. Kapitel 2.4.1) an den ausgewählten Produkten angewendet.

Zementsuspensionen werden oft in Boden injiziert. Zur Abbildung eines injizierten Bodens im Versuch, wurden analog zu /Bra13a/ Mischungen aus Zementsuspension und Sand hergestellt. Der Wasser / Bindemittelwert (w/b-Wert) wurde unter Beachtung der Herstellerangaben dabei möglichst hoch gewählt, da mit steigendem w/b-Wert der Diffusionswiderstand sinkt und deshalb höhere Auslaugraten erwartet werden. Die Menge der Zementsuspension wurde so eingestellt, dass der Porenraum im Sand, der bei gleichkörnigem Sand ca. $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ beträgt, vollständig mit dem Zementleim gefüllt wird. Diese mörtelähnlichen Zementsuspension-Sand-Gemische werden im Folgenden als „Mörtel“ bezeichnet. Um zu

überprüfen, ob die Zementsuspensionen in das Kapitel „Betonausgangsstoffe und Beton“ mit aufgenommen werden können, sollten zusätzlich Mischungen analog der Betonrezeptur aus /DIB11/, Kapitel „Betonausgangsstoffe und Beton“, mit einer Gesteinskörnung der Sieblinie A/B 16 hergestellt werden. Statt des Zements wurden hier die Trockenmischungen der Zementsuspensionen verwendet. Der Gehalt der Trockenmischungen sollte gemäß /DIB11/ bei 280 kg/m^3 mit dem w/b-Wert von 0,6 liegen. Der Zementleimgehalt im Beton beträgt $0,26 \text{ m}^3/\text{m}^3$ und liegt somit deutlich unter dem Leimgehalt der Zementsuspension-Sand-Gemische. Die Zementsuspensionen weisen aufgrund ihrer Zusammensetzungen und Feinheiten einen sehr unterschiedlichen Wasserbedarf auf. Besonders bentonithaltige Produkte benötigen viel Wasser. Daher konnte ein Wasser / Bindemittelwert von w/b = 0,6 häufig nicht eingehalten werden. Eine direkte Übertragung des Betonkonzepts auf Zementsuspensionen ist somit nicht möglich.

Abweichend vom ursprünglichen Versuchsplan wurde daher entschieden, den w/b-Wert der „Beton“-Mischungen anhand der Vorgaben des Herstellers der Zementsuspension festzulegen. In Anlehnung an die „Mörtel“-Mischungen und zur Erfassung des ungünstigsten Falls wurde der w/b-Wert möglichst hoch gewählt. Um den Einfluss des Bindemittelgehalts zu erfassen, wurde der Zementleimgehalt in den Betonmischungen analog zur Betonzusammensetzung des DIBt auf $0,26 \text{ m}^3/\text{m}^3$ festgelegt. Daraus folgt für die Mischungszusammensetzung, dass bei einer Überschreitung des w/b-Wertes von 0,6 ein Zementleimgehalt von $0,26 \text{ m}^3/\text{m}^3$ maßgebend war. Wurde vom Hersteller ein maximaler w/b-Wert unter 0,6 angegeben, wurde für die Zusammensetzung ein Zementgehalt von 280 kg/m^3 gewählt (vgl. Abschnitt 2.2, Tabelle 5).

Da die Zementsuspensionen i. d. R. in frischem Zustand in Boden und Grundwasser eingebracht werden, sollte das Auslaugverhalten in der Erhärtungsphase im Rahmen des Projekts berücksichtigt werden. Ein geeignetes Prüfverfahren für frische Zementsuspensionen ist die Kombination aus Frischbetonstandtest und anschließendem Langzeitstandtest /Bra13a/. Da dieser Versuch relativ aufwendig und kostenintensiv ist, wurde überlegt, stattdessen einen Langzeitstandtest anzuwenden. Der Langzeitstandtest beginnt üblicherweise im Probenalter von 56 d /DIB11/ und erfasst somit nicht die Erhärtungsphase. Für die Bewertung von Frischbetonen und Zementsuspensionen erscheint der Versuch daher nicht geeignet, da sich das Auslaugverhalten von Festbetonen und Frischbeton unterscheidet und die Freisetzung des Frischbetons z. T. stark unterschätzt wird /Bra13a/. Im Rahmen des Projekts wurden die Probekörper im Sinne eines Kompromisses zusätzlich unmittelbar nach dem Ausschalen im Langzeitstandtest untersucht, um das Auslaugverhalten in möglichst jungem Betonalter zu ermitteln. Zur Übersicht ist das Versuchsprogramm in seiner aktualisierten und mit dem DIBt abgestimmten Fassung in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Versuchsprogramm

Versuch	Baustoff	Vorlagerung bzw. Alter	Anzahl der zu untersuchenden Produkte
Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest	„Mörtel“	0,5 h	5
Langzeitstandtest	„Mörtel“	56 d	2
	„Mörtel“	48 - 72 h	5
	„Beton“	56 d	2
	„Beton“	48 - 72 h	2
Säulenversuch nach Schössner	„Mörtel“	0,5 h	2

2.2 Auswahl der Ausgangsstoffe

Nach Rücksprache mit den Industriepartnern wurden die Zusammensetzungen der kommerziellen Zementsuspensionen in vier Rahmenrezepturen unterteilt (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Rahmenrezepturen

Bestandteil / Parameter	RR1	RR2	RR3	RR4
	Dichtwand	Injektionen (CEM I)	Injektionen (CEM III)	Verfüllung und Schmalwand
Klinker	1 - 10	50 - 100	5 - 30	2 - 30
Flugasche	-	0 - 10	0 - 10	0 - 80
Hüttensandmehl	40 - 80	0 - 30	50 - 95	0 - 30
Betonit	10 - 30	0 - 5	0 - 5	0 - 10
Kalksteinmehl	0 - 30	0 - 30	0 - 30	0 - 85
Tonmehl	0 - 30	-	-	0 - 20
Naphthalinsulfonat	-	0 - 3	0 - 3	-
w/b-Wert	2 - 5	0,7 - 1,5	0,7 - 1,5	0,5 - 1,8

Für jede Rahmenrezeptur wurden 6 bis 9 Produkte ausgewählt (insgesamt 30 Trockenmischungen). An den Trockenmischungen wurden die chemischen Zusammensetzungen mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) sowie die Gesamtgehalte an umweltrelevanten, anorganischen Parametern (Antimon (Sb), Arsen (As), Barium (Ba), Blei (Pb), Bor (B), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Kobalt (Co), Kupfer (Cu), Molybdän (Mo), Nickel (Ni), Quecksilber (Hg), Selen (Se), Thallium (Tl), Vanadium (V), Zink (Zn)) nach Königswasseraufschluss im Rückflussverfahren nach DIN EN 16174:2012 bestimmt. Die Ergebnisse der chemischen Charakterisierung werden in den Tabellen A1 bis A4 und die Gesamtgehalte der Spurenelemente in den Tabellen A5 bis A8 im Anhang A dargestellt.

Anhand der Königswasseraufschlüsse sollte innerhalb jeder Rahmenrezeptur das Produkt mit den höchsten Gehalten an umweltrelevanten Stoffen ausgewählt werden. Die Produkte der Rahmenrezeptur 3 haben alle eher geringe Schwermetallgehalte (s. Tabelle A7). Allerdings weisen hüttensandmehlhaltige Bindemittel ein sehr niedriges Redoxpotential auf. Dies

kann die Mobilität von Schwermetallen beeinflussen. Daher ist es sinnvoll, ein Produkt mit hohem Gehalt an Hüttensandmehl in das Versuchsprogramm mit aufzunehmen. In den Rahmenrezepturen 2 und 4 ergeben sich je zwei möglicherweise relevante Produkte (s. Tabellen A6 und A8 im Anhang A). Daher wurden zunächst sechs Produkte in die engere Wahl gezogen: RR1.3, RR2.3, RR2.6, RR3.3, RR4.2 und RR4.4. RR1.3 besteht überwiegend aus Hüttensandmehl und weist einen Bentonit-Gehalt von ca. 25 % auf. RR2.3 ist sehr fein gemahlener Portlandzement. Bei der Anwendung von RR2.3 sollen 3 M.-% Fließmittel auf Naphtalinsulfonat-Basis zugesetzt werden. RR2.6 besteht aus Portlandzement und Kalksteinmehl mit einem CEM I/KSM-Verhältnis von ca. 4. RR3.3 besteht zu ~90 % aus Hüttensandmehl und weist geringere Portlandzement- und Bentonit-Gehalte auf. RR4.2 besteht aus Kalksteinmehl (ca. 60 M.-%), Hüttensandmehl und Portlandzement. RR4.4 besteht aus Flugasche (ca. 80 M.-%) und Hüttensandmehl sowie geringen Anteilen von Portlandzement und Bentonit. Am unreaktierten Feststoff dieser Proben wurde anschließend ein Schütteltest nach dem DEV-S4-Verfahren ($W/F = 10$) durchgeführt, um festzustellen, inwieweit die Schwermetalle bzw. Spurenelemente in löslicher Form vorliegen (s. Tabelle A9 im Anhang A). Anhand der Königswasseraufschlüsse und Schütteltests (siehe Bild 1 und Bild 2) sollte die Auswahl der Zementsuspensionen weiter eingegrenzt werden.

vertraulich

Bild 1: Schwermetall- und Spurenelementgehalte nach dem Königswasseraufschluss der ausgewählten Proben

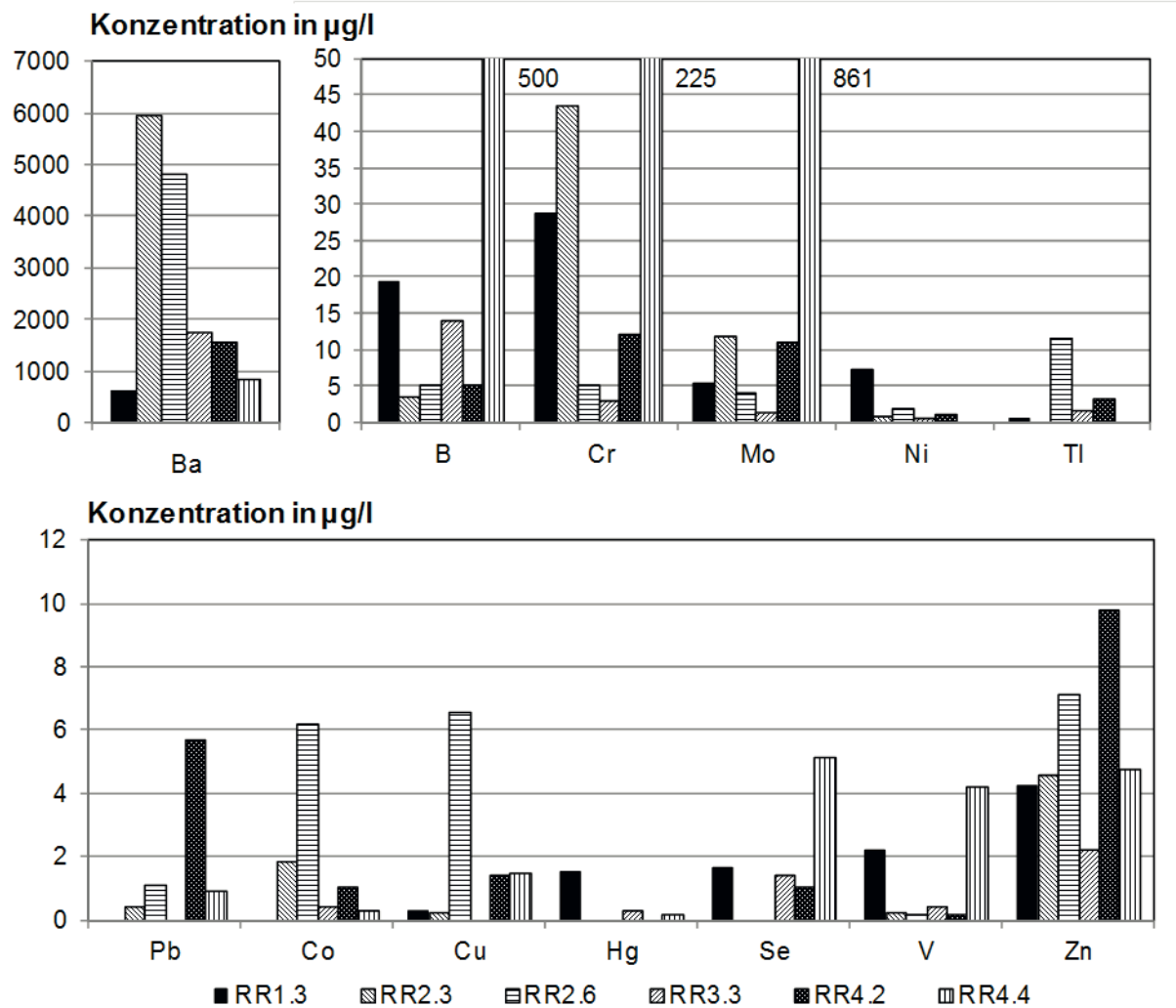


Bild 2: Eluatkonzentrationen nach Schütteltest DEV-S4 der sechs ausgewählten Produkte

RR4.2 wurde zunächst wegen seines hohen Thallium-Gehaltes ausgewählt. Allerdings spiegelte sich der hohe Tl-Gehalt im Feststoff nicht in dem im Schütteltest gewonnenen Eluat wider. Für die weiteren Versuche wurde die Rezeptur 4.2 daher nicht berücksichtigt. Die verbleibenden fünf Zementsuspensionen blieben im Versuchsprogramm. Dabei wiesen die Rezepturen RR2.6 und RR4.4 die höchsten Konzentrationen im Schütteltest auf und wurden daher für den Säulenversuch nach Schössner (s. Abschnitt 2.4.3) herangezogen.

2.3 Mischungskonzeption und Probenherstellung

Die Suspensionen wurden gemäß Herstellerangaben mit den in Tabelle 3 und Tabelle 4 aufgelisteten w/b-Werten hergestellt. Für die Untersuchungen im Langzeitstandtest und Säulenversuch wurden die Suspensionen mit Sand 1/2 mm (Langzeitstandtest) und Sand Frechen F36 (Säulenversuch) vermischt. Dazu wurde zunächst die Trockenmischung mit der vorgegebenen Menge Wasser in einem Hochleistungszementsuspensionsmischer, fann® 686 CS, hergestellt. Anschließend wurde die Suspension in einem Eimermischer mit dem Sand ho-

mogenisiert. Das Volumen der hinzugegebenen Zementsuspension entsprach jeweils dem Porenraum im Sand ($n = 0,41$ bei Sand 1/2 mm und $0,43$ bei Sand Frechen F36).

Tabelle 3: Rezepturen der „Mörtel“-Mischungen für die Standtests

Ausgangsstoff / Parameter	Einheit	RR1.3	RR2.3	RR2.6	RR3.3	RR4.4
Suspension	kg/m ³	82,5	270	311	311	500
Wasser		384	324	311	311	250
Sand 1/2 mm		1550	1550	1550	1550	1550
Naphtalinsulfonat		-	8,1	-	-	-
w/b-Wert	-	4,65	1,2	1,0	1,0	0,5

Tabelle 4: Rezepturen der „Mörtel“-Mischungen für die Säulenversuche nach Schössner

Ausgangsstoff / Parameter	Einheit	RR2.6	RR4.4
Suspension	kg/m ³	325	525
Wasser		325	262,5
Sand Frechen F36		1500	1500
w/b-Wert	-	1,0	0,5

Für die „Beton“-Probekörper wurden die Ausgangsstoffe in einem Zwangsmischer homogenisiert. Die Rezepturen sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Rezepturen der „Beton“-Mischungen

Bestandteil / Parameter	Einheit	Zielrezeptur	RR1.3	RR4.4
Zement	kg/m ³	280	52	280
Wasser		168	242	140
Gesteinskörnung A/B 16		1900	1900	1970
w/b-Wert	-	0,6	4,65	0,5
Volumen des Zementleims	m ³ /m ³	0,259	0,259	0,230

Die „Beton“-Mischungen wurden in Absprache mit dem DIBt für die Proben RR2.3, RR2.6 und RR3.3 nicht berücksichtigt, da die Ergebnisse der Auslaugversuche an den Proben aus RR1.3 und RR4.4 gezeigt haben, dass der Unterschied zwischen „Mörtel“- und „Beton“-Probekörper sehr gering ist.

2.4 Versuchsbeschreibungen

2.4.1 Langzeitstandtest

Nach /DIB11/ ist der Langzeitstandtest gemäß DAfStb-Richtlinie /DAf05/ vorgesehen, dieser wird jedoch durch den europäisch harmonisierten Standtest, den sogenannten DSLT (dynamic surface leaching test) ersetzt /CEN14/. Inzwischen liegt ein Entwurf für eine Neufassung der DAfStb-Richtlinie vor, der an den DSLT angepasst ist /DAf15/. In diesem Projekt wurde daher der DSLT durchgeführt. Es wurden Zylinder mit $h = 149 \text{ mm}$ und $d = 100 \text{ mm}$ in deionisiertem Wasser ausgelaugt. Für die Herstellung wurden Rohre aus PVC als Schalung verwendet, welche mit einem passend hergestellten und mit Folie ausgeschlagenen Deckel einseitig verschlossen wurden. Die Probekörper wurden abgedeckt in der Schalung bei 20 °C , 95 % r. F bis zum Ausschalen gelagert.

Da die Zusammensetzungen der Zementsuspensionen sehr unterschiedlich sind, erhärten die Zementsuspensionen sehr unterschiedlich schnell. Die Rezeptur RR4.4 konnte nach 48 h ausgeschalt und eluiert werden. Bei der Mischung RR1.3 lag dagegen nach 48 h noch keine ausreichende Festigkeit vor. In Abstimmung mit dem DIBt und den Zementherstellern wurde die Vorlagerungszeit daher für RR1.3, RR2.3, RR2.6 und RR3.3 einheitlich auf 72 h festgelegt. Für die DSLT mit kurzer Vorlagerungszeit fingen die Versuche direkt nach der Ausschaltung an. Für die herkömmlichen DSLT wurden die Zylinder nach dem Ausschalen direkt in PE-Folie verpackt und derart luftdicht versiegelt bis zum Alter von 56 Tagen bei 20 °C gelagert. Die Probekörper wurden dann in luftdicht verschlossenen Weithalsbehältern aus PE mit deionisiertem Wasser beaufschlagt (s. Bild 3), wobei das Volumen des Eluenten 5 l betrug ($V/O = 80 \text{ l/m}^2$). Gemäß /CEN14/ wurde das Wasser nach 0,25 / 1 / 2,25 / 4 / 9 / 16 / 36 und 64 Tagen gewechselt und analysiert. Der Versuch wurde als Doppelbestimmung durchgeführt.

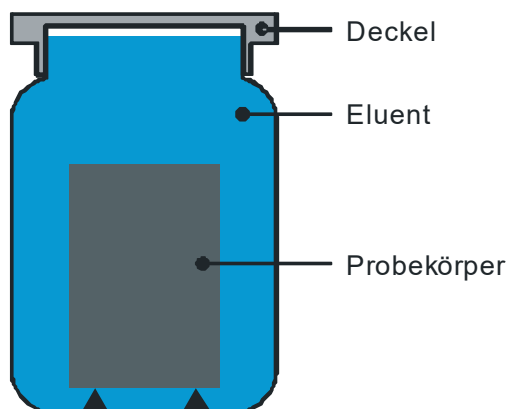


Bild 3: Schematische Darstellung des Langzeitstandtests

An den Eluaten wurden die Konzentrationen der Schwermetalle bzw. Spurenelemente Antimon, Arsen, Barium, Blei, Bor, Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Molybdän, Nickel, Quecksilber, Selen, Thallium, Vanadium, Zink mittels ICP-MS bestimmt. Zusätzlich wurden pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Redoxpotential sowie die Konzentrationen von Natrium, Kalium, Chlorid, Sulfat und TOC ermittelt.

2.4.2 Frischbetonstandtest

Beim Frischbetonstandtest (FBST) wurde der zu untersuchende Baustoff in frischem Zustand direkt mit Wasser beaufschlagt. Die verwendete Versuchseinrichtung ist in Bild 4 dargestellt. Die Mischung wurde in den unteren Teil der Form eingefüllt und sorgfältig abgestrichen. Der Eluent (deionisiertes Wasser) wurde unmittelbar nach dem Befüllen der Form (ca. 0,5 h nach dem Mischen) mit einem Trichter vorsichtig in den oberen Teil eingefüllt, so dass möglichst keine Verwirbelungen an der Oberfläche des Baustoffs auftraten. Das Wasser wurde über einen verschließbaren Auslass gewechselt, wobei jeweils eine Probe genommen wurde. Die Auslaugrate der anorganischen Stoffe nimmt normalerweise mit der Zeit ab. Daher wurden die Wechselzeiten so gewählt, dass die Elutionsdauer mit jedem Elutionsschritt zunimmt. Das V/O-Verhältnis betrug analog zum DSLT 80 l/m².

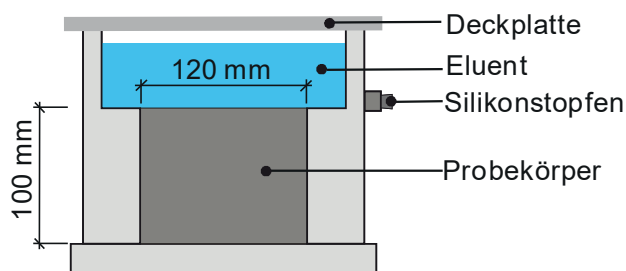


Bild 4: Schematische Darstellung des Frischbetonstandtests /Bra13b/

Nach der Auslaugung während der Frischbetonphase wurde die Untersuchung am erhärteten Beton fortgeführt, um den Einfluss der Frischbetonauslaugung auf die Freisetzungen während der Festbetonphase zu erfassen. Die Wechselzeiten orientierten sich am DSLT /CEN14/. Der Beton verblieb in der Versuchseinrichtung. In Tabelle 6 sind die gewählten Entnahmezeiten angegeben. Die Prüfung wurde als Doppelbestimmung durchgeführt.

Tabelle 6: Entnahmezeiten für den FBST

Eluat Nr.	Versuch	Einheit	Entnahmezeiten
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			3,25
9			5
10			10
11			17
12			37
13			65

An den Eluaten wurden analog zum DSLT die Konzentrationen der Schwermetalle / Spurenelemente Antimon, Arsen, Barium, Blei, Bor, Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Molybdän, Nickel, Quecksilber, Selen, Thallium, Vanadium, Zink mittels ICP-MS bestimmt. Zusätzlich werden pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Redoxpotential sowie die Konzentrationen von Natrium, Kalium, Chlorid, Sulfat und TOC ermittelt.

2.4.3 Säulenversuch nach Schössner

Zum Vergleich wurden zwei Zementsuspensionen im Säulenversuch nach Schössner geprüft. Die Versuchseinrichtung ist in Bild 5 schematisch dargestellt. Die Säule (Durchmesser 30 cm, Länge 50 cm) wurde mit Sand (Frechen F36) gefüllt und mindestens 24 Stunden (Fließrate 4 l/h) mit Leitungswasser gespült. Unmittelbar vor Versuchsbeginn wurde eine Blindprobe aus dem Abfluss der Säule genommen. Üblicherweise wird 1 l Suspension in die Mitte der Säule injiziert. Abweichend davon wurde im Rahmen des Projekts der gespülte Sand bis zur Mitte der Säule entnommen und eine Mulde in der Säule erstellt. In die Mulde wurden 2,34 l des Zementsuspension-Sand-Gemisches gemäß Tabelle 3 gefüllt. Dies entspricht einem Volumen von 1 l Zementsuspension. Für die Vorbereitung der Probe und den Einbau wurden 30 Minuten benötigt. Anschließend wurde Leitungswasser mit einer Fließgeschwindigkeit von 4 l/h durch die Säule gepumpt. Die vollständige Sättigung der Säule war nach weiteren 30 Minuten erreicht. Zu Beginn der Eluatgewinnung war die Probe somit ca. eine Stunde alt. Es wurde eine maximale Versuchsdauer von 28 Tagen gewählt.

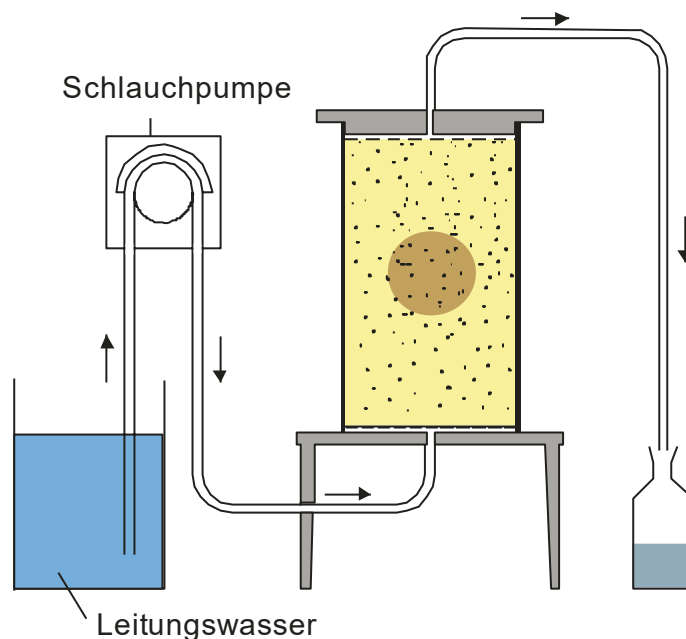


Bild 5: Schematischer Aufbau des inversen Säulenversuchs

Während der ersten 8 Stunden nach dem Durchbruch des Wassers wurden kontinuierlich Proben im Abstand von 0,5 Stunden in 2-Liter-Fractionen aufgefangen. Am 2. und 3. Tag wurden jeden Tag zwei Proben (je 1 Liter) im Abstand von 8 Stunden gewonnen. Am 5. und 7. Tag wurde eine Probe (je 1 Liter) pro Tag gewonnen. Zur Überprüfung des „Abklingverhal-

tens“ wurde am 14. und ggf. 28 Tag eine Probe (1 Liter) entnommen. Zum Vergleich wurde das Leitungswasser an jedem Entnahmetag beprobt. Der Versuch wurde in Doppelbestimmung durchgeführt.

Die Schwermetall-Konzentrationen werden beim Säulenversuch nach Schössner üblicherweise nur in einem Mischeluat aus der Maximalphase und in einem Mischeluat aus der Abklingphase analysiert. Um die Freisetzung zu berechnen ist es jedoch erforderlich, den genauen Konzentrationsverlauf zu bestimmen. Daher wurden alle Eluate vollständig analysiert (pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Redoxpotential, Natrium, Kalium, Chlorid, Sulfat, TOC, Antimon, Arsen, Barium, Blei, Bor, Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Molybdän, Nickel, Quecksilber, Selen, Thallium, Vanadium und Zink). Es wurden die Suspensionen RR4.4 und RR2.6 im Säulenversuch nach Schössner untersucht.

2.4.4 Wärmeflusskalorimetrie

Zur optimierten Bestimmung der Ausschaltzeit der Zementsuspensionen wurde die Entwicklung der Hydratationswärme mittels eines isothermen Wärmeflusskalorimeters über sieben Tage bestimmt.

Dazu wurden jeweils 3 g des Feststoffs einer Zementsuspension mit einer Menge Wasser gemäß des w/b-Wertes aus Tabelle 3 in eine PE-Ampulle eingewogen und händisch vermischt. Diese wurde verschlossen und in das auf 20 °C temperierte Kalorimeter gestellt. Da das Kalorimeter nach dem Einsetzen der Proben zunächst wieder einen stationären Zustand erreichen musste, konnte die Messung der Hydratationswärme erst nach 1,5 Stunden begonnen werden. Es wurden die Rezepturen RR 1.3, RR 2.3, RR 3.3 und RR 4.4 untersucht.

3 Ergebnisse und Auswertung der Auslaugversuche

3.1 Standtests

Die Analyseergebnisse der verschiedenen Standtests sind in den Tabelle A10 bis A30 im Anhang A dargestellt. Zwei Produkte, RR1.3 und RR4.4, wurden als „Beton“- sowie „Mörtel“-Mischungen in unterschiedlichem Alter (48 h bzw. 72 h und 56 d) im DSLT eluiert. Mit den Ergebnissen kann der Einfluss des Probenalters abgeschätzt werden. Die pH-Werte und elektrischen Leitfähigkeiten liegen bei den Frischbetonstandtests und den DSLTs mit kurzer Vorlagerungszeit höher als beim herkömmlichen DSLT mit 56 d Vorlagerung. Die zwei Parameter waren bei den „Mörteln“ geringfügig höher als bei den „Betonen“. Dies könnte auf den höheren Zementleimanteil der „Mörtel“-Mischungen zurückzuführen sein (vgl. Bild 6 und Bild 7).

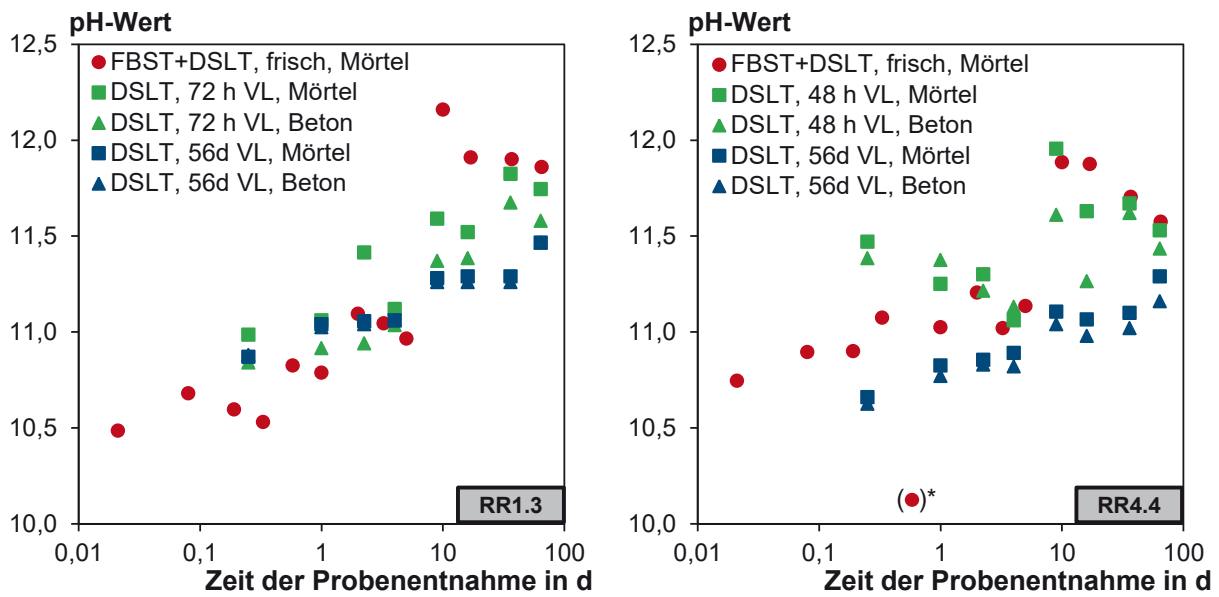


Bild 6: Verlauf der pH-Werte der Eluate bei den Standtests (*: Ausreißer)

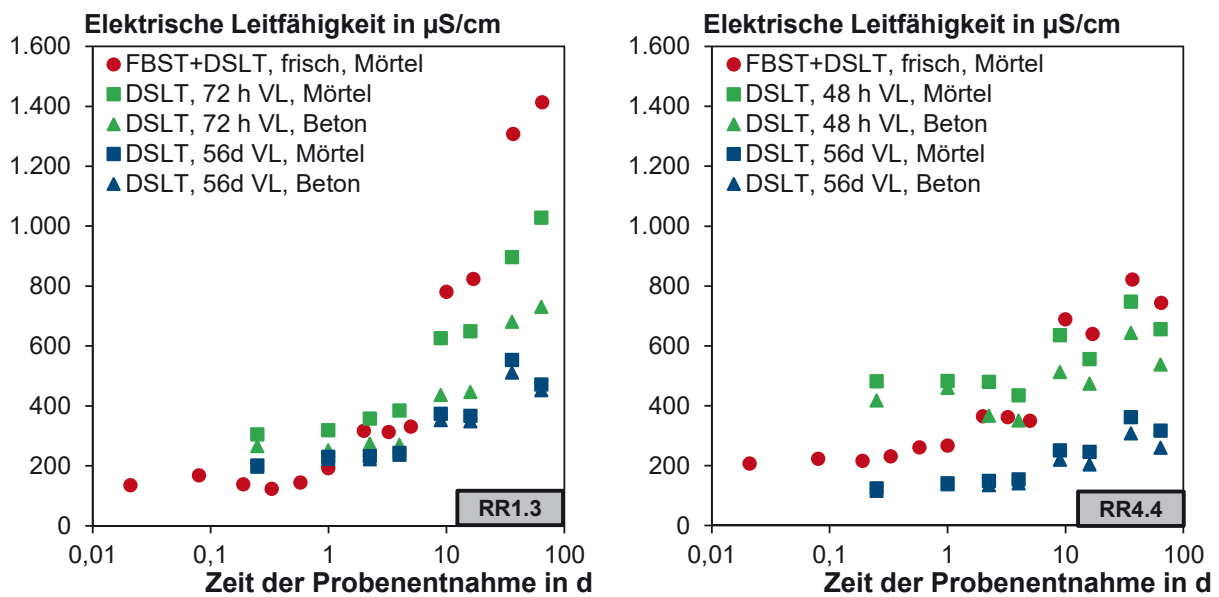


Bild 7: Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit der Eluate bei den Standtests

Die Konzentrationen von Cadmium, Selen und Thallium lagen in allen Eluaten der Standtests unter oder an der Bestimmungsgrenze. Die Antimon- und Arsenkonzentrationen der Proben RR1.3 lagen stets unter der Bestimmungsgrenze. Bei den Zinkkonzentrationen traten große Streuungen auf. Dies ist bei diesem Parameter häufig der Fall, weil sehr leicht Kontaminationen entstehen. Die gemessenen Konzentrationen sind jedoch gering im Vergleich zur Toxizität dieses Elements. Cd, Se, Tl und Zn wurden daher nicht ausgewertet. Für die übrigen Stoffe wurde die kumulative Freisetzung gemäß Gleichung (1) berechnet.

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

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 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 in Höhe der Bestimmungsgrenze gewählt. Die kumulativen Freisetzungen während des gesamten Versuchs sind in den Tabellen A31 und A32 aufgelistet. Die kumulativen Freisetzungen der unterschiedlichen Standtests sind in den Bildern 8 und 9 zusammengestellt.

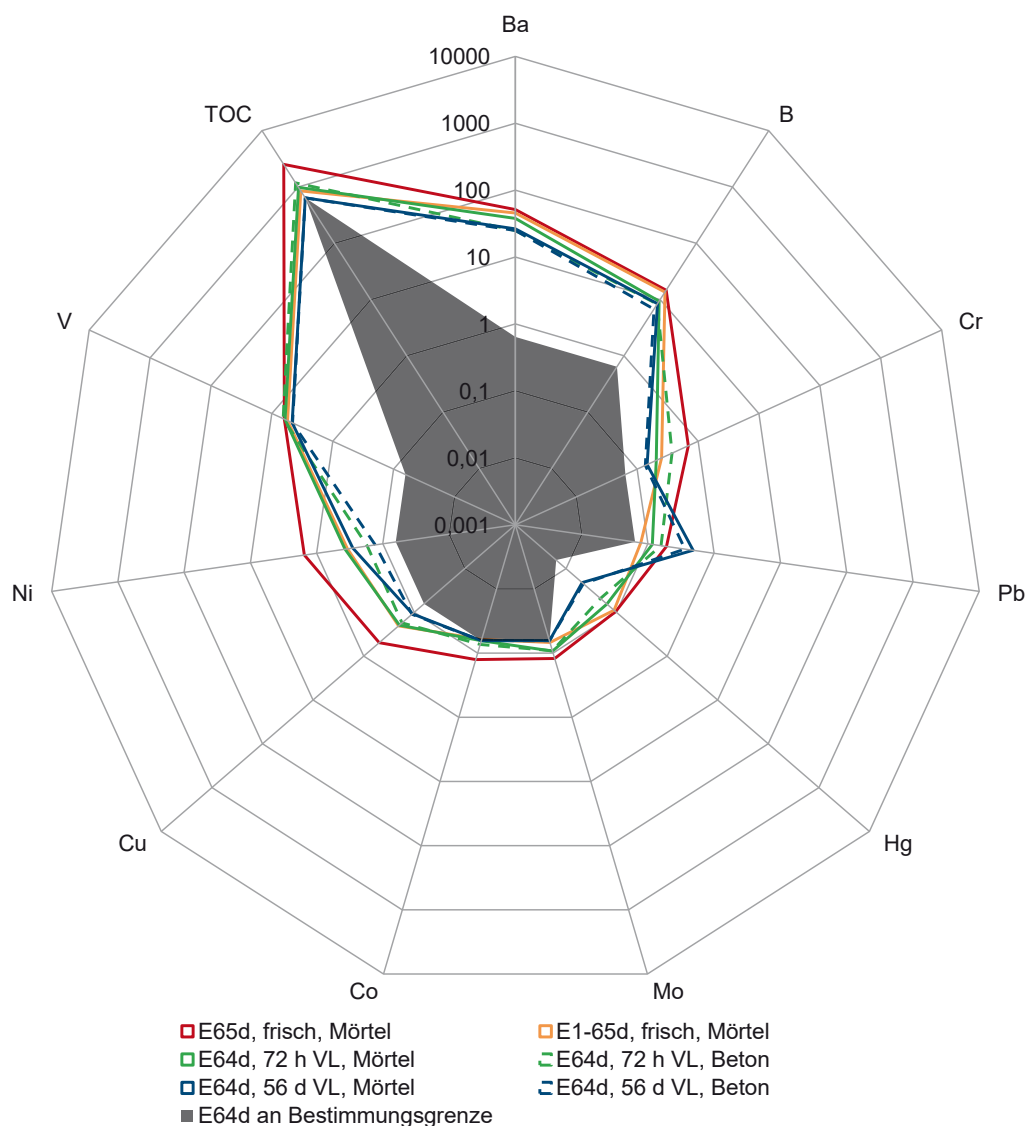


Bild 8: Kumulative Freisetzung der Proben RR1.3 unter unterschiedlichen Standtests, in mg/m^2

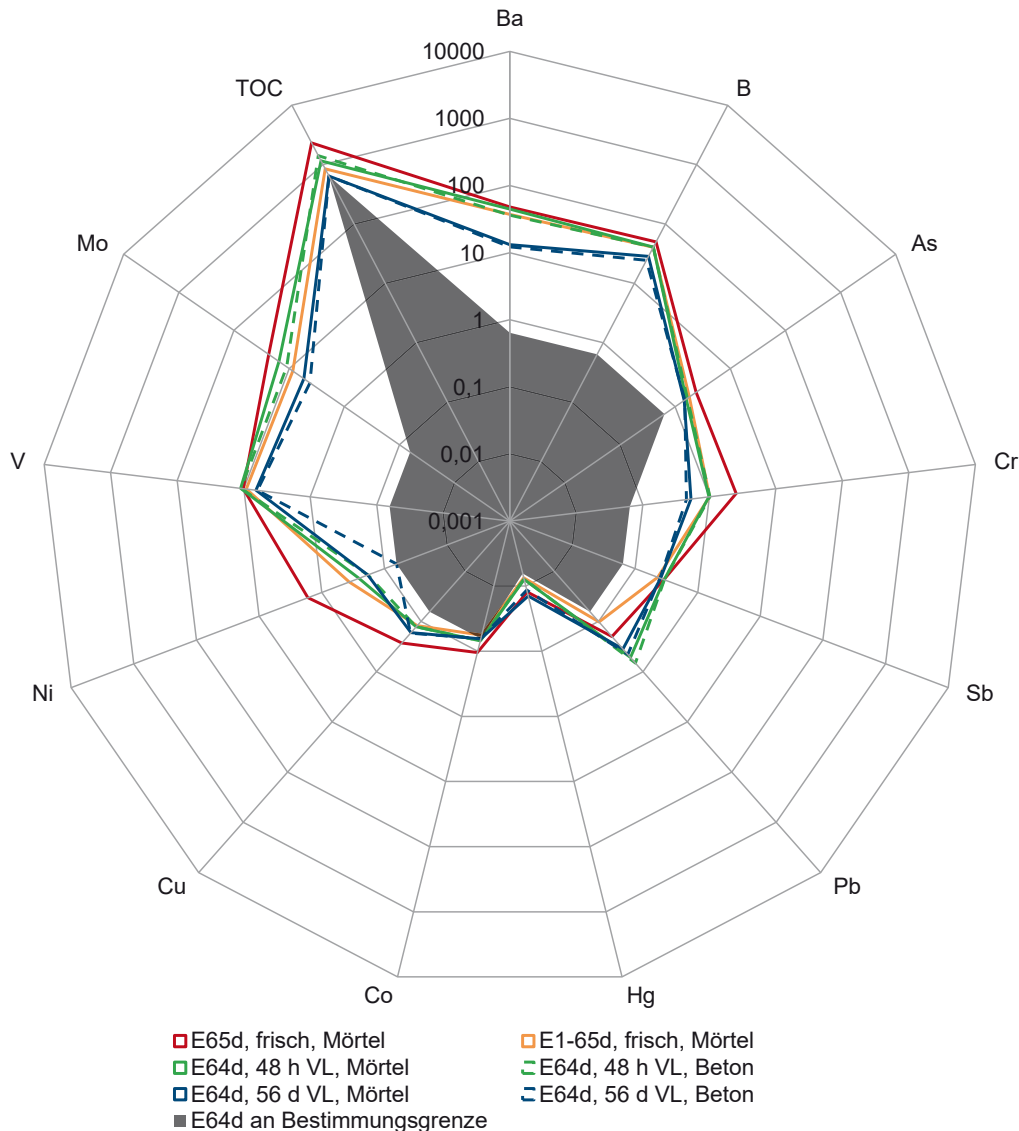


Bild 9: Kumulative Freisetzung der Proben RR4.4 unter unterschiedlichen Standtests, in mg/m^2

Der Unterschied zwischen den „Mörtel“- und „Beton“-Mischungen ist sehr gering, weil beide Mischungen aufgrund der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Probleme bei der Herstellung sehr ähnlich zusammengesetzt waren. Die „Mörtel“-Mischungen wiesen lediglich einen etwas höheren Zementleimanteil und ein kleineres Größtkorn der Gesteinskörnung auf. Auf eine weitere Untersuchung der „Beton“-Mischungen wurde daher verzichtet.

Die Freisetzungen der meisten umweltrelevanten Parameter sind bei den Frischbetonstandtests am größten. Die DSLTs mit kurzer Vorlagerungszeit (48 oder 72 h) ergeben Freisetzungsraten in derselben Größenordnung. Die geringsten Freisetzungsraten werden meistens beim herkömmlichen Standtest mit einer Vorlagerungszeit von 56 d festgestellt. Die Freisetzung ist also in hohem Maße vom Probenalter abhängig. Zur Überprüfung des Auslaugverhaltens während der Herstellungsphase scheint der DSLT mit 56 d Vorlagerung weniger geeignet, da er, mit Ausnahme von Blei, nicht dem Worst-Case entspricht. Die Blei-Freisetzung

beim DSLT mit 56 d Vorlagerung war allerdings bei beiden Produkten (RR1.3 und RR 4.4) deutlich höher als beim Frischbetonstandtest (mit anschließendem DSLT).

Die Bedeutung der Erhärtungsphase für die Freisetzung wird aus dem Verhältnis der Freisetzungen beim FBST mit anschließendem DSLT und den DSLTs deutlich. Das Verhältnis wird in Tabelle 7 mit dem Index E_{65d} / E_{64d} dargestellt.

Tabelle 7: Index E_{65d} / E_{64d} zur Beschreibung des Unterschieds zwischen der Freisetzung bei den DSLTs und den FBSTs mit dem anschließenden DSLT

Parameter	DSLT mit 72 bzw. 48 h VL		DSLT mit 56 d VL	
	RR1.3	RR4.4	RR1.3	RR4.4
Antimon, Sb	- ¹⁾	0,99	- ¹⁾	1,13
Arsen, As	- ¹⁾	1,51	- ¹⁾	1,64
Barium, Ba	1,36	1,08	1,94	3,65
Blei, Pb	1,64	0,38	0,40	0,57
Bor, B	1,57	1,22	1,74	1,75
Chrom, Cr	3,36	2,56	4,75	4,78
Kupfer, Cu	2,51	2,11	4,55	1,61
Molybdän, Mo	- ¹⁾	1,53	- ¹⁾	4,34
Nickel, Ni	4,11	6,53	5,39	9,03
Quecksilber, Hg	1,49	1,56	4,59	0,87
Vanadium, V	1,03	0,91	1,34	1,56
TOC	2,56	2,00	- ¹⁾	- ¹⁾

- 1) Die meisten Konzentrationen lagen unterhalb oder nah an der Bestimmungsgrenze. Daher wurde der Index nicht berechnet.

Die Indizes beim DSLT mit kurzer Vorlagerung sind i.d.R. kleiner als die Indizes beim DSLT mit 56 d Vorlagerung (s. Tabelle 7). Je größer der Index, desto größer ist der Unterschied zwischen dem DSLT und dem FBST mit anschließendem DSLT und desto größer ist die Bedeutung der Frischphase. Ein Index < 1 bedeutet, dass die Freisetzung des DSLTs höher ist, als die des FBST mit anschließendem DSLT. Tabelle 7 zeigt, dass der Index parameterspezifisch ist. Es gibt oft keinen signifikanten Unterschied zwischen den Produkten. Bei den Parametern Antimon, Arsen, Barium, Bor, Quecksilber und Vanadium sind die Indizes des DSLT mit kurzer Vorlagerung deutlich kleiner als 2. Daher hat die Frischphase bei den o.g. Parametern wenig Einfluss. Dagegen ist bei Chrom, Kupfer, Molybdän, Nickel und TOC die Freisetzung in der Frischphase erhöht ($E_{65d} / E_{64d} > 2$).

Zur Bewertung der Auslaugkinetik ist der Verlauf der Freisetzungen in den Bildern 10 bis 19 dargestellt. Bei Barium, Bor, Chrom, Kupfer, Molybdän und Quecksilber ist der Verlauf beim FBST mit anschließendem DSLT etwas steiler als bei den DSLTs (s. Bilder 10 bis 15). Bei Nickel, Vanadium und dem TOC verläuft die Freisetzung beim FBST mit anschließendem DSLT parallel zu den DSLTs an erhärtetem Beton (s. Bilder 16 bis 18). Bei Blei sind die Frei-

setzungen beim DSLT an erhärtetem Beton ungünstiger als bei dem FBST mit anschließendem DSLT (s. Bild 19).

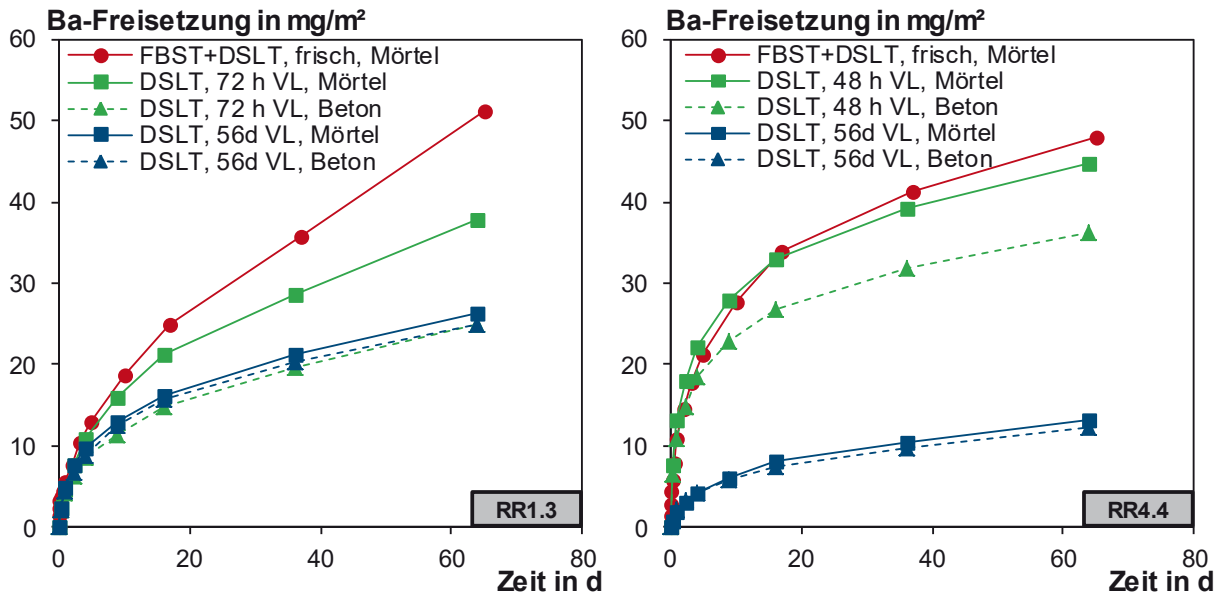


Bild 10: Kumulative Freisetzung von Barium in den unterschiedlichen Standtests

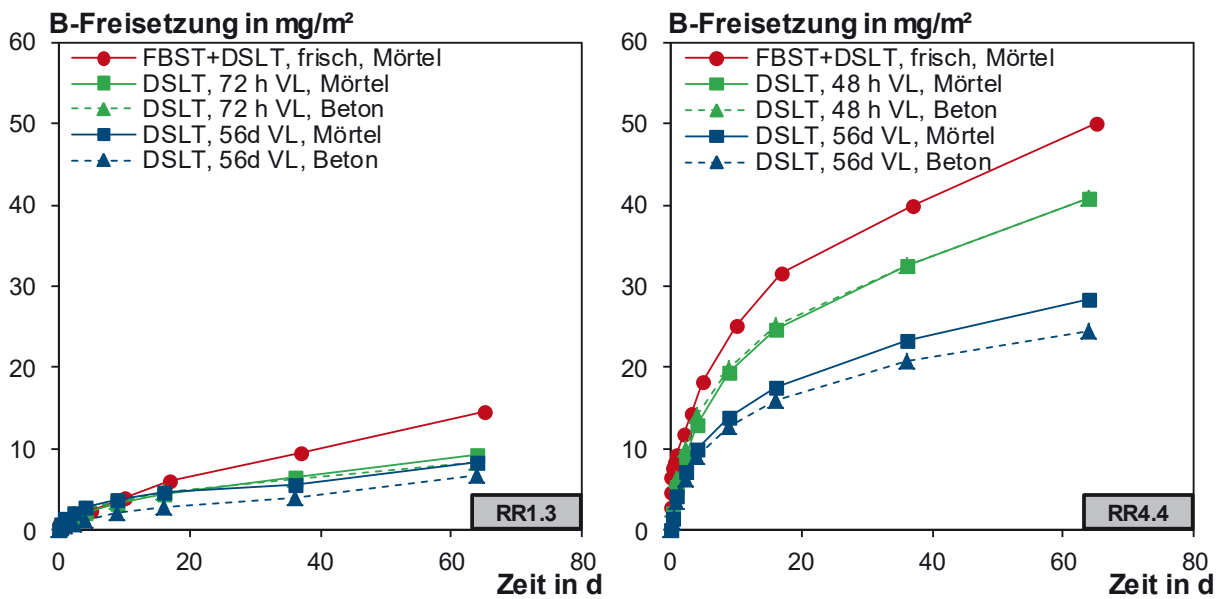


Bild 11: Kumulative Freisetzung von Bor in den unterschiedlichen Standtests

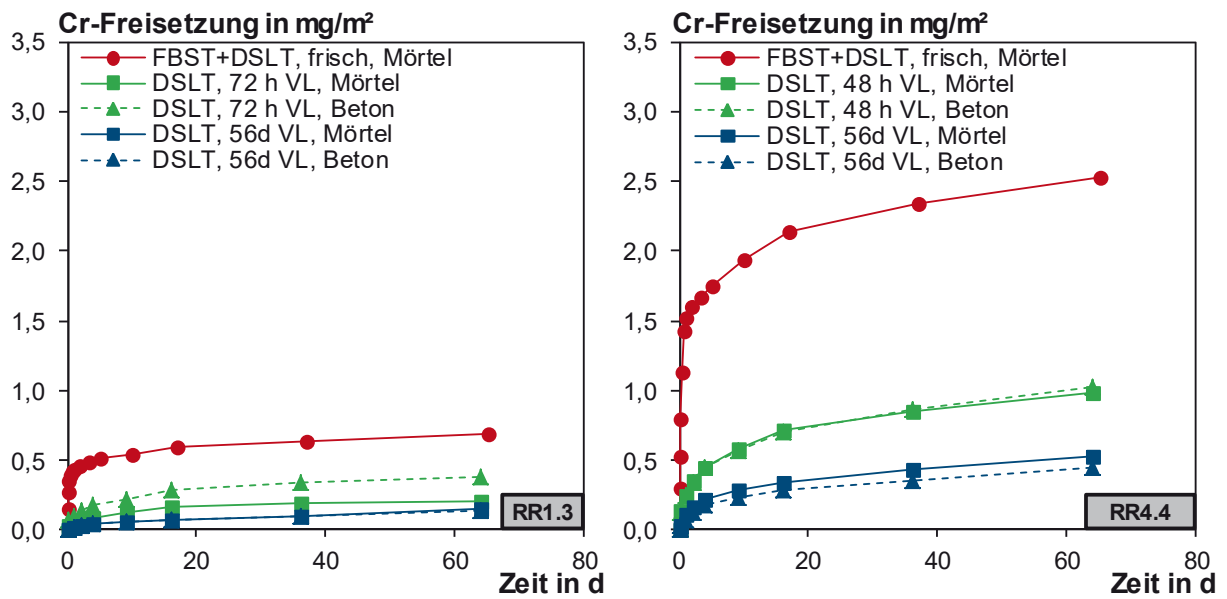


Bild 12: Kumulative Freisetzung von Chrom in den unterschiedlichen Standtests

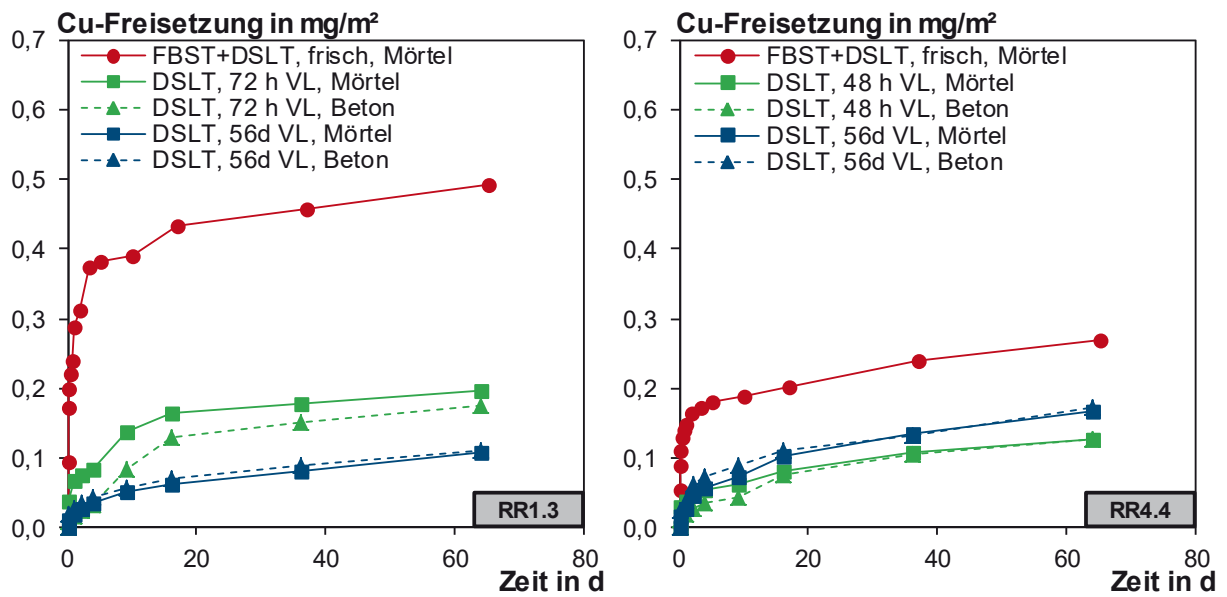


Bild 13: Kumulative Freisetzung von Kupfer in den unterschiedlichen Standtests

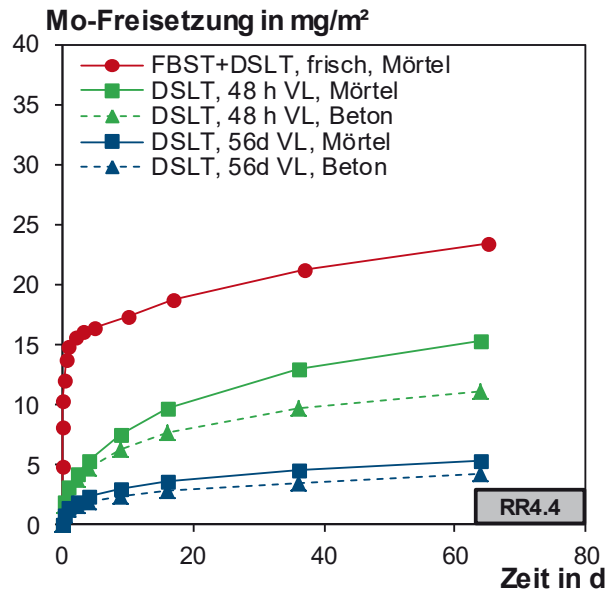


Bild 14: Kumulative Freisetzung von Molybdän in den unterschiedlichen Standtests

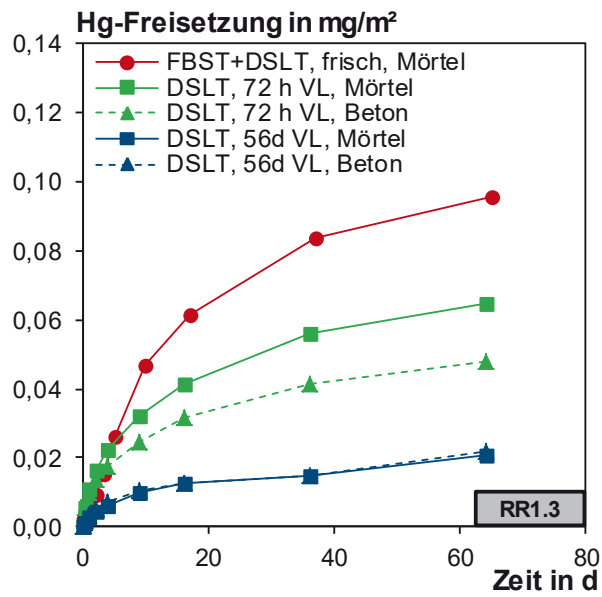


Bild 15: Kumulative Freisetzung von Quecksilber in den unterschiedlichen Standtests

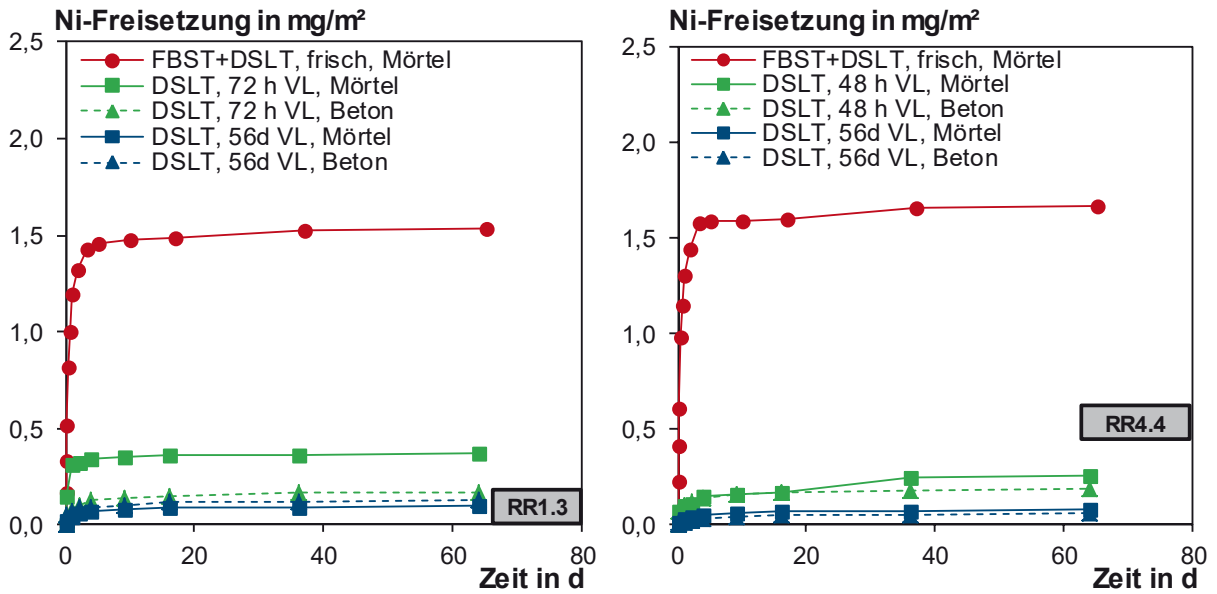


Bild 16: Kumulative Freisetzung von Nickel in den unterschiedlichen Standtests

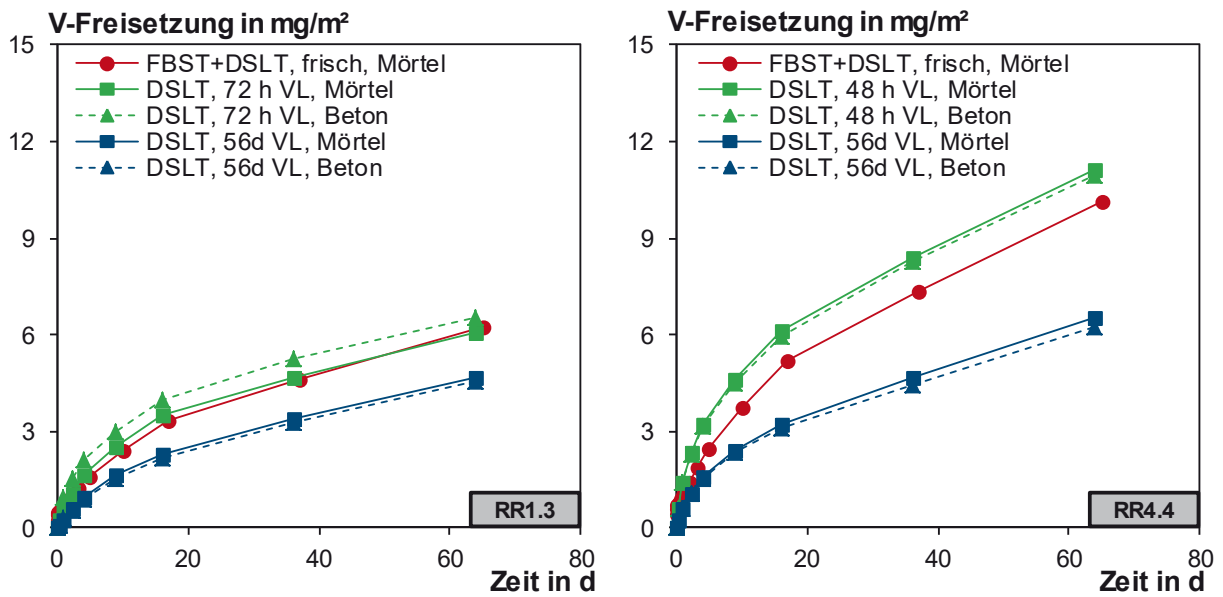


Bild 17: Kumulative Freisetzung von Vanadium in den unterschiedlichen Standtests

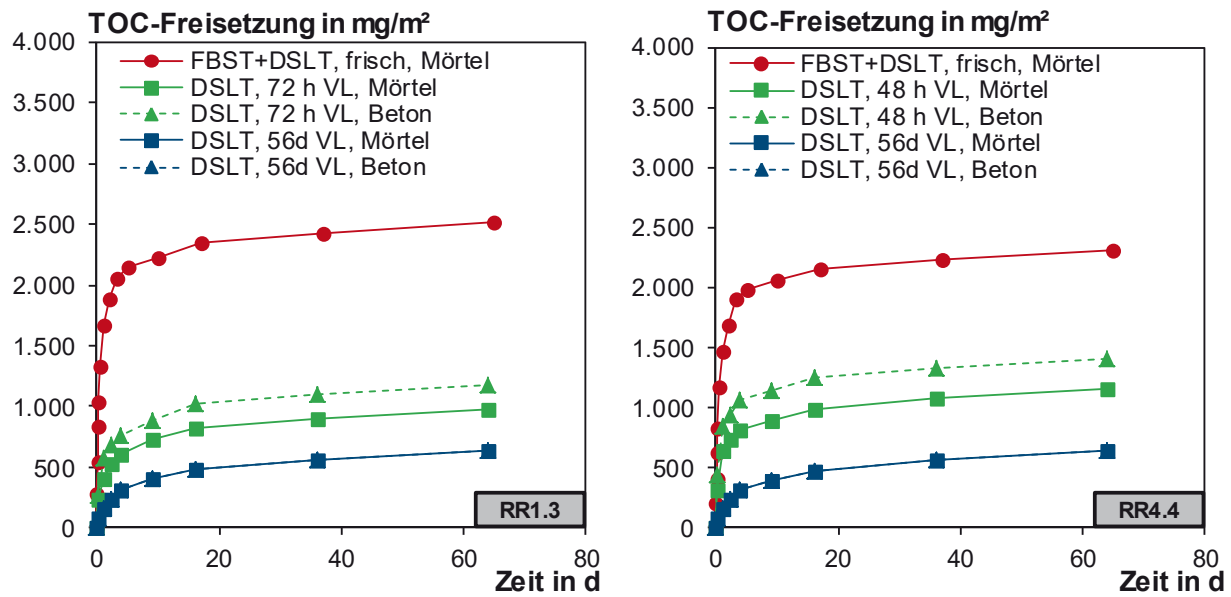


Bild 18: Kumulative Freisetzung von TOC in den unterschiedlichen Standtests

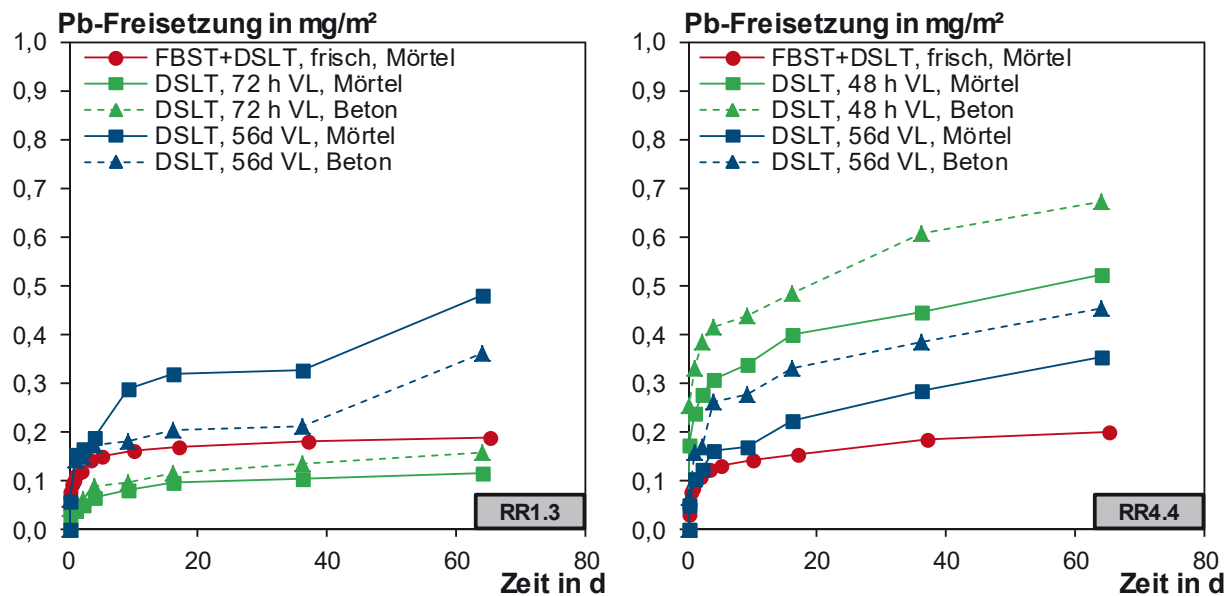


Bild 19: Kumulative Freisetzung von Blei in den unterschiedlichen Standtests

Unter den durchgeführten Standtests weist der FBST mit anschließendem DSLTL die realistischsten Versuchsrandbedingungen auf. Allerdings ist ein speziell angefertigter Behälter erforderlich und mit 26 Eluatn bei einer Doppelbestimmung entstehen nicht unerhebliche Kosten. Daher ist eine vereinfachte Versuchsdurchführung, wie z. B. der DSLTL, wirtschaftlich vorteilhaft. Der herkömmliche DSLTL mit 56 d Vorlagerung wird für Festbeton eingesetzt und kann das Auslaugverhalten während der Frischbetonphase nicht erfassen. Als Kompromiss könnte ein DSLTL, der unmittelbar nach der Ausschallfrist beginnt, dienen. Da die Zusammensetzungen der Zementsuspensionen sehr unterschiedlich sind, erhärten die Zementsuspensionen sehr unterschiedlich schnell. Die Rezeptur RR4.4 konnte nach 48 h ausgeschalt und

eluiert werden. Bei der Mischung RR1.3 lag dagegen nach 48 h noch keine ausreichende Festigkeit vor. In Abstimmung mit dem DIBt und den Zementherstellern wurde die Vorlagerungszeit daher für RR1.3, RR2.3, RR2.6 und RR3.3 einheitlich auf 72 h festgelegt. Die Ergebnisse ausgewählter, umweltrelevanter Parameter aus FBST+DSLIT und DSLIT mit verkürzter Vorlagerungszeit sind in den Bildern 20 bis 24 vergleichend dargestellt.

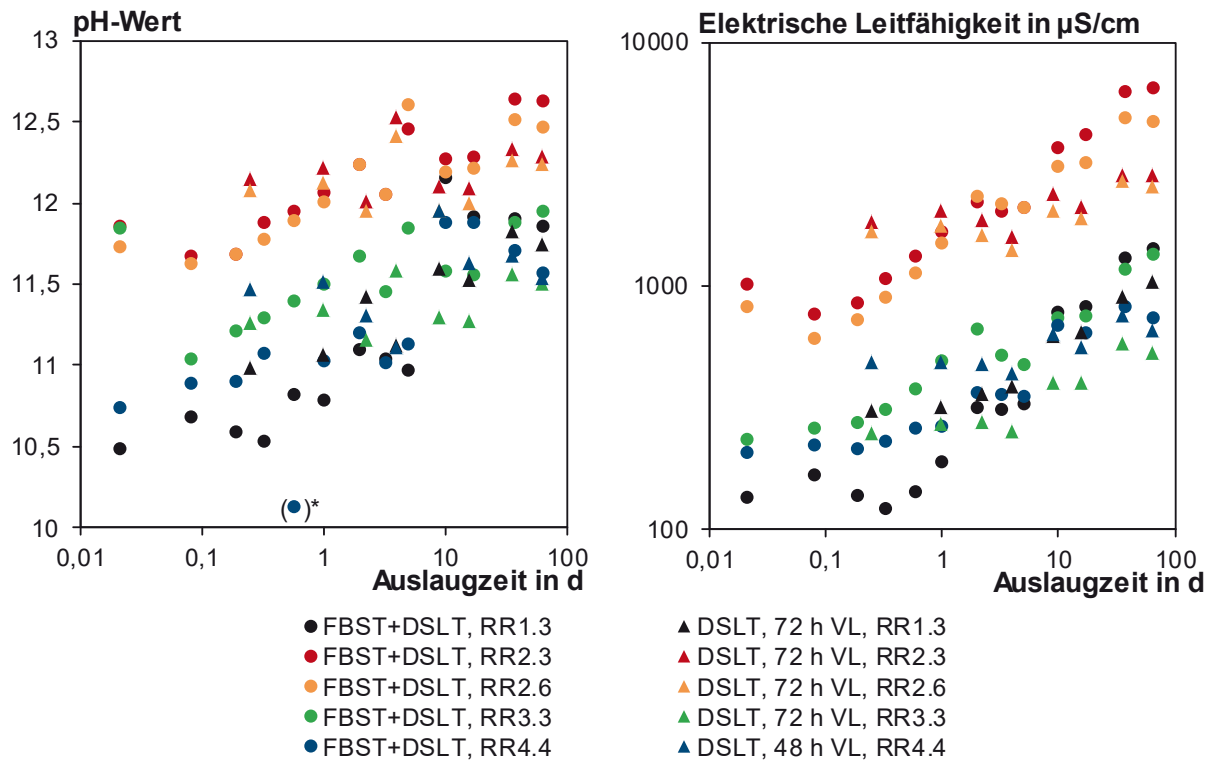


Bild 20: Verlauf der pH-Werte und elektrischen Leitfähigkeiten der Eluate bei den Frischbetonstandtests mit anschließenden DSLITs und den DSLITs mit verkürzter Vorlagerungszeit (*: Ausreißer)

Die pH-Werte und die elektrischen Leitfähigkeiten beim FBST+DSLIT waren etwas höher als beim DSLIT mit verkürzter Vorlagerungszeit. Die Rahmenrezepturen 2 und 3 haben einen höheren Klinkergehalt und erhärten daher schneller als RR1. Die Unterschiede zwischen den beiden Auslaugversuchen beim pH-Wert und der Leitfähigkeit sind daher bei den Produkten der Rahmenrezeptur RR2 und RR3 am größten (s. Bild 20). Bei dem langsam reagierenden Produkt RR1.3, und bei RR4.4 mit kurzer Vorlagerungszeit waren die Unterschiede zwischen beiden Versuchsmethoden sehr gering. Im Nachhinein muss somit festgehalten werden, dass die Wahl einer einheitlichen Vorlagerungszeit kontraproduktiv war. Es ist zu empfehlen, eine an die Erhärtungsgeschwindigkeit der Suspension angepasste Vorlagerungszeit zu wählen.

Zum Vergleich der Freisetzung im FBST+DSLIT bzw. DSLIT mit verkürzter Vorlagerung wurde der Index E_{65d} / E_{64d} berechnet (s. Tabelle 8). Die Konzentrationen der Spurenelemente waren z. T. niedrig und lagen unterhalb oder an der Bestimmungsgrenze. Besonders die Konzentration von Cadmium und Selen lagen bei allen untersuchten Produkten meistens unter-

halb der Bestimmungsgrenze. Daher wurde der Index E_{65d} / E_{64d} für diese Elemente nicht berechnet.

Tabelle 8: Index E_{65d} / E_{64d} zur Beschreibung des Unterschieds zwischen der Freisetzung im FBST+DSLTL (E_{65d}) bzw. im DSLTL mit verkürzter Vorlagerung (E_{64d})

Parameter	Probe				
	RR1.3	RR2.3	RR2.6	RR3.3	RR4.4
Natrium, Na	1,73	2,53	2,21	4,38	1,46
Kalium, K	1,52	2,43	1,85	3,43	1,36
Calcium, Ca	1,37	1,89	1,77	2,61	1,19
Sulfat, SO_4^{2-}	2,92	13,30	9,07	9,66	4,68
Chlorid, Cl^-	1,73	2,53	2,21	4,38	1,46
Antimon, Sb	- ¹⁾	0,99	0,74	- ¹⁾	0,99
Arsen, As	- ¹⁾	- ¹⁾	- ¹⁾	- ¹⁾	1,51
Barium, Ba	1,36	3,60	2,84	4,22	1,08
Blei, Pb	1,64	0,32	0,41	- ¹⁾	0,38
Bor, B	1,57	6,07	5,96	4,39	1,22
Chrom, Cr	3,36	3,09	2,83	2,30	2,56
Kobalt, Co	- ¹⁾	2,14	1,22	- ¹⁾	- ¹⁾
Kupfer, Cu	2,51	6,30	5,51	6,38	2,11
Molybdän, Mo	- ¹⁾	6,16	6,65	- ¹⁾	1,53
Nickel, Ni	4,11	3,53	- ¹⁾	- ¹⁾	6,53
Quecksilber, Hg	1,49	- ¹⁾	- ¹⁾	2,39	1,56
Thallium, Tl	- ¹⁾	- ¹⁾	2,23	- ¹⁾	- ¹⁾
Vanadium, V	1,03	2,60	1,64	1,41	0,91
Zink, Zn	2,49	1,08	3,31	2,79	2,67
TOC	2,56	5,12	- ¹⁾	- ¹⁾	2,00

1) Die meisten Konzentrationen lagen unterhalb oder nah an der Bestimmungsgrenze. Daher wurde der Index nicht berechnet.

Der Index liegt meistens über 1. Das heißt, dass die Freisetzung bei einer Auslaugung im DSLTL mit verkürzter Vorlagerung i. d. R. unterschätzt wird. Ausgenommen sind Antimon und Blei. Die Zahlenwerte des Indexes variieren bei den unterschiedlichen Produkten, was an der nicht optimalen Vorlagerungszeit liegen kann. Die Indices der meisten untersuchten Parameter waren bei der langsam reagierenden Suspension RR1.3 und der früher ausgeschalteten Suspension RR4.4 niedriger als bei den schnell reagierenden Produkten RR2.3, RR2.6 und RR3.3 mit 72 h Ausschaltzeit. Evtl. kann eine produktspezifische Vorlagerungszeit, die an das

Erhärtungsverhalten des Produkts angepasst ist, helfen, die Ergebnisse des DSLTs an die des FBST+DSLTLT anzunähern.

Bei Antimon und Blei lag der Index E_{65d} / E_{64d} z. T. unter 1. Hier ist die Verarbeitungsphase demnach nicht relevant. Die Freisetzung von Antimon war bei zwei Produkten am Ende der beiden Versuche quasi identisch. Blei wurde bevorzugt aus den erhärteten Proben freigesetzt. Eine Ausnahme bildete hier die bentonithaltige Suspension RR1.3 (s. Bild 21). Die Konzentration bzw. die Freisetzung von Antimon und Blei waren generell niedrig und nicht umweltrelevant.

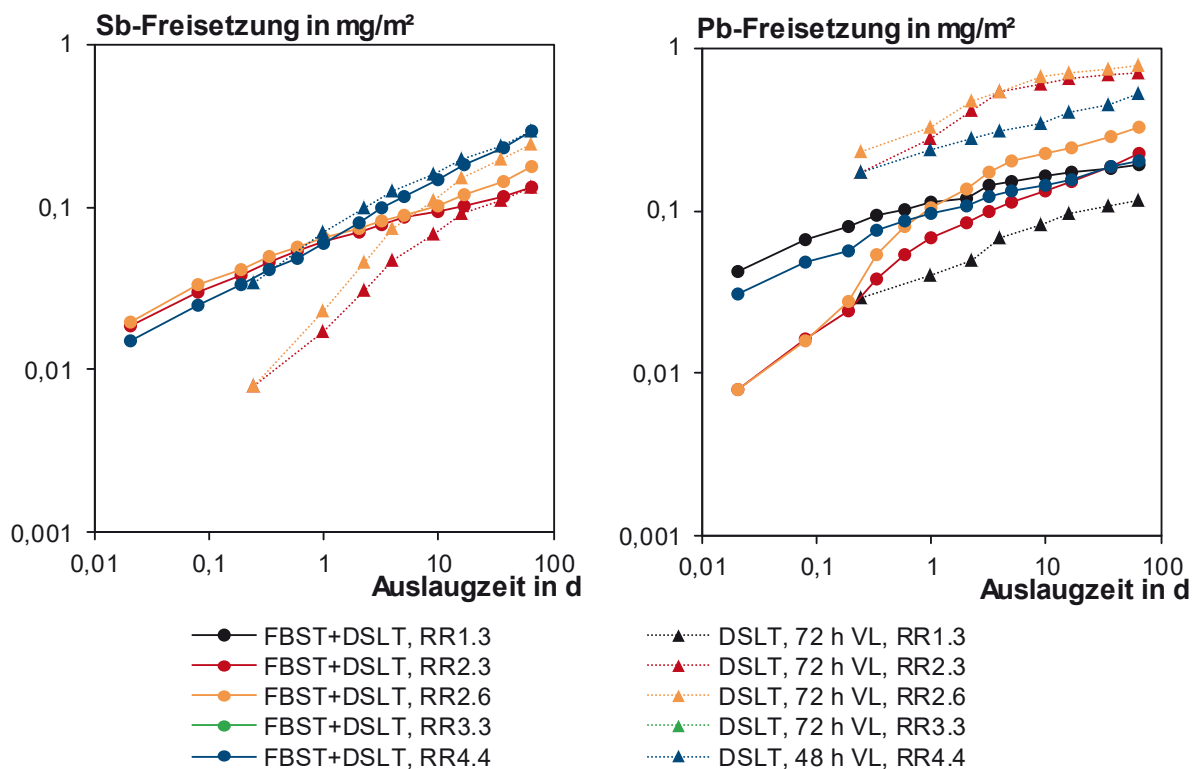


Bild 21: Verlauf der Antimon- und Blei-Konzentrationen in den Eluaten bei den Frischbetonstandtests mit anschließendem DSLTLT und den DSLTLT mit verkürzter Vorlagerungszeit

Die Freisetzung von Sulfat, Chlorid, Bor, Kupfer, Molybdän und Nickel waren beim FBST+DSLTLT meist deutlich höher als beim DSLTLT mit verkürzter Vorlagerungszeit (s. Bild 22 bis Bild 24), wobei die Unterschiede zwischen den zwei Versuchsmethoden bei RR1.3 und RR4.4 für viele Elemente kleiner sind als bei den auf CEM I bzw. CEM III basierten Produkten. Dies ist möglicherweise auf die 72-stündige Vorlagerungszeit zurückzuführen.

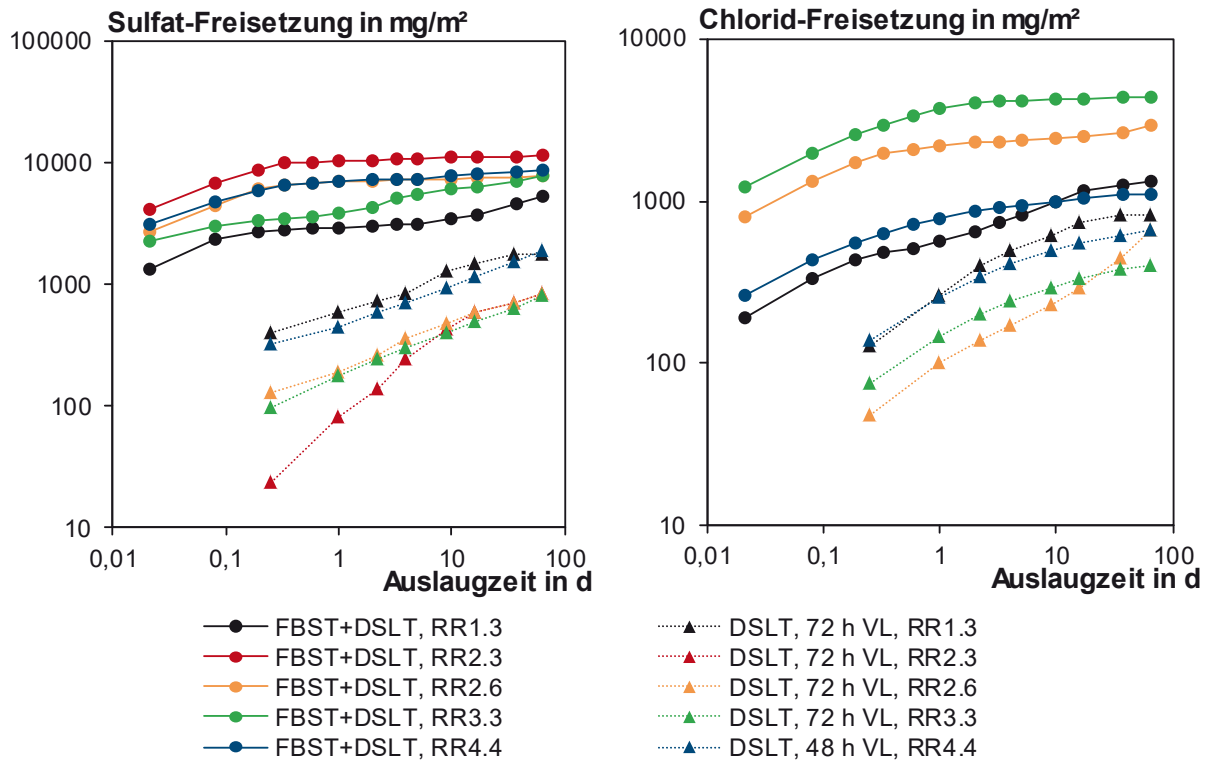


Bild 22: Verlauf der Sulfat- und Chlorid-Konzentrationen in den Eluaten bei den Frischbetonstandtests mit anschließendem DSLT und den DSLT mit verkürzter Vorlagerungszeit

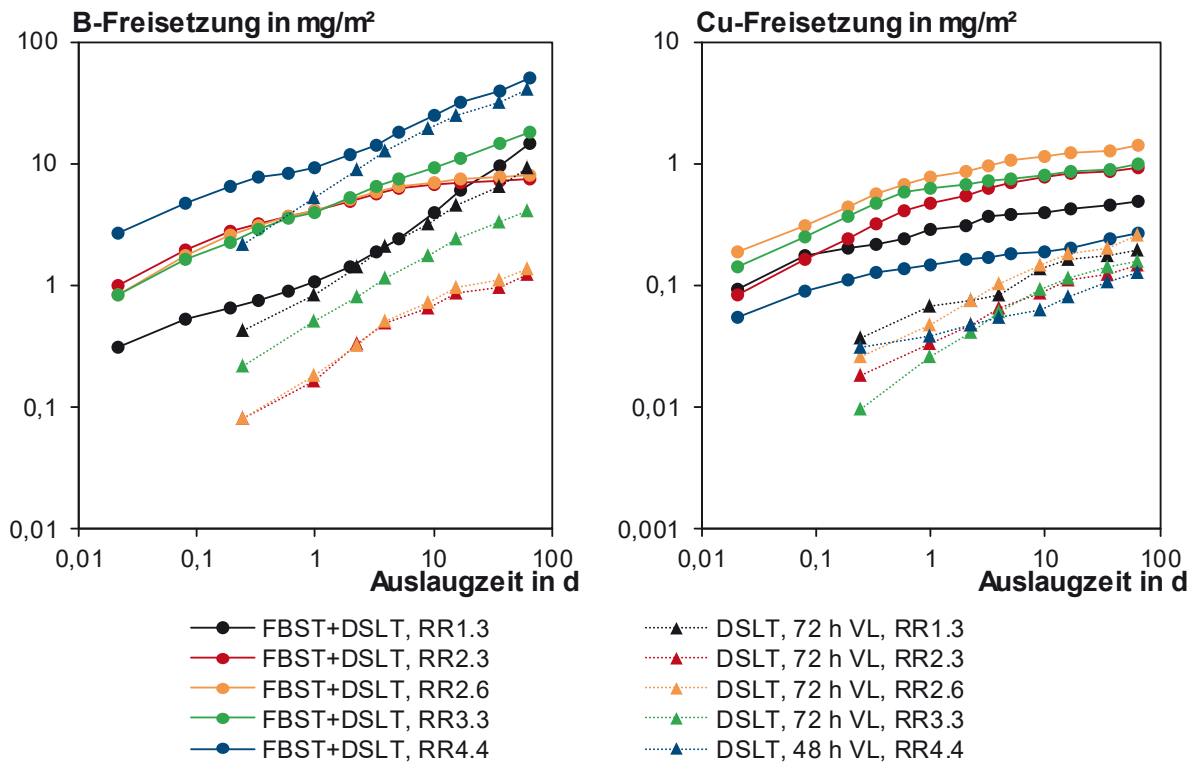


Bild 23: Verlauf der Bor- und Kupfer-Konzentrationen in den Eluaten bei den Frischbetonstandtests mit anschließendem DSLT und den DSLT mit verkürzter Vorlagerungszeit

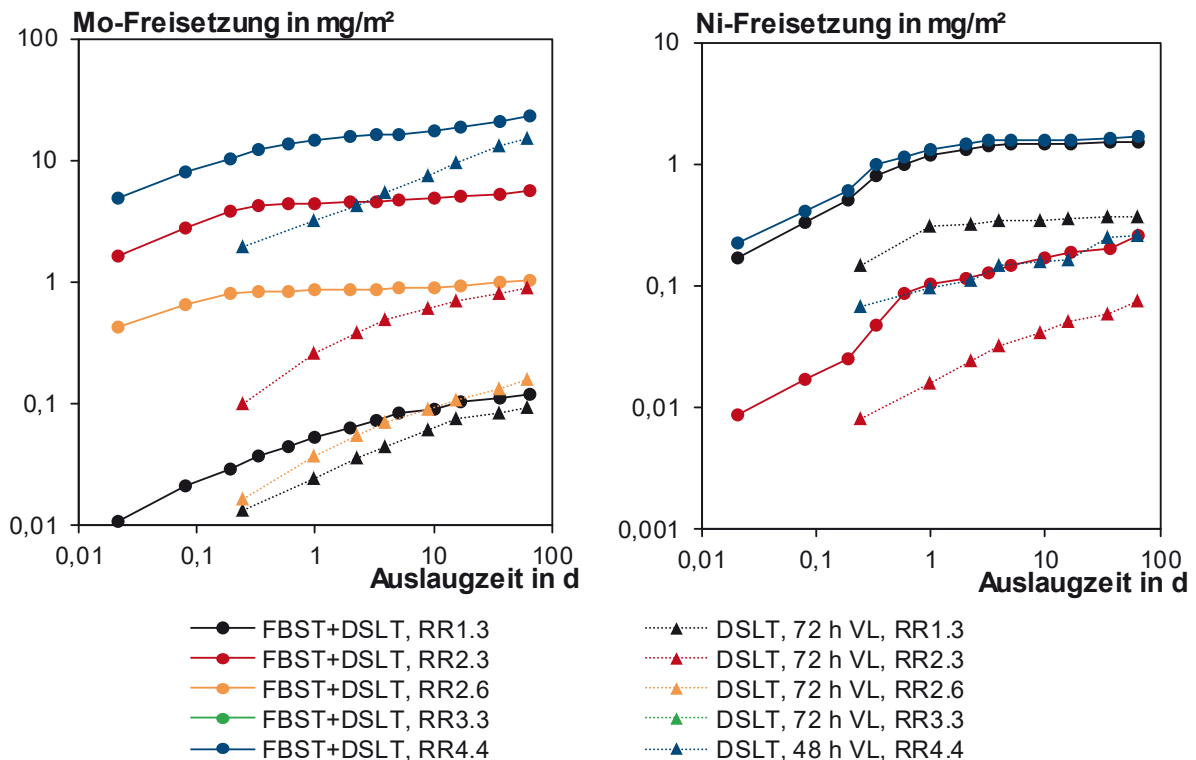


Bild 24: Verlauf der Molybdän- und Nickel-Konzentrationen in den Eluaten bei den Frischbetonstandtests mit anschließendem DSLT und den DSLT mit verkürzter Vorlagezeit

3.2 Säulenversuch nach Schössner

Die Ergebnisse des Säulenversuchs nach Schössner mit den Produkten RR2.6 und RR4.4 sind in Tabelle A33 bis Tabelle A38 im Anhang A dargestellt. In den Tabellen sind auch die Blindwerte angegeben. Die Blindproben wurden am ersten Tag vor Versuchsbeginn am Abfluss der Säulen sowie an jedem Entnahmetag am Zulauf des Leitungswassers genommen. Aus dem Sand wurde bei einer Versuchsreihe Bor (RR4.4) in geringfügiger Konzentration ausgelaugt. Kupfer, Nickel und Zink aus dem Leitungswasser wurden vom Sand aller Säulen adsorbiert (vgl. Tabelle A33 und Tabelle A36 im Anhang A).

In Bild 25 und Bild 26 sind die Verläufe des pH-Wertes sowie der Leitfähigkeit dargestellt. Bild 27 bis Bild 30 zeigen die Konzentrationsverläufe der nachweisbaren Parameter. Die Konzentrationen erreichen meist nach 1,5 bis 3,5 Stunden ihre maximalen Werte. Anschließend sinken sie z. T. schnell ab. Allerdings sind die Retentionszeiten der verschiedenen Elemente sehr unterschiedlich lang. Während sich die Konzentrationen der Alkalien sehr schnell wieder dem Blindwertniveau annähern, benötigen Elemente wie z. B. Vanadium mehr Zeit, weil Sorptionseffekte auftreten. Der pH-Wert zeigt auch nach dem Absinken der Alkalikonzentration noch erhöhte Werte und klingt langsam ab. Dieses Verhalten ist aus den früheren Untersuchungen bekannt (z. B. /Bra09a/). Calcium wurde bei RR2.6 adsorbiert und bei RR4.4 freigesetzt.

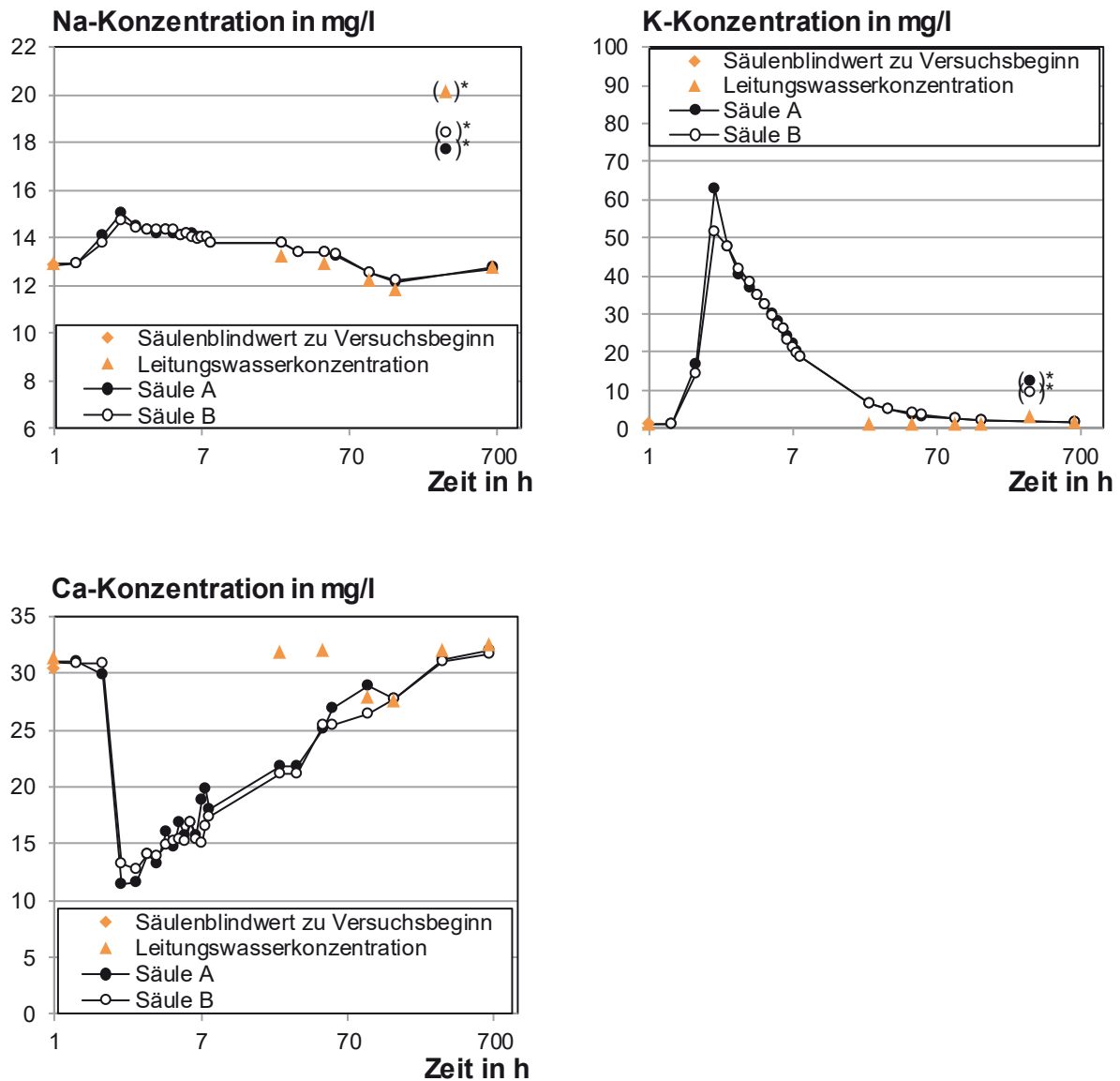


Bild 27: Natrium-, Kalium- und Calciumkonzentrationen im Säulenversuch nach Schössner an der Zementsuspension RR 2.6. (*: Ausreißer, z. T. wegen erhöhter Leitungswasserkonzentration)

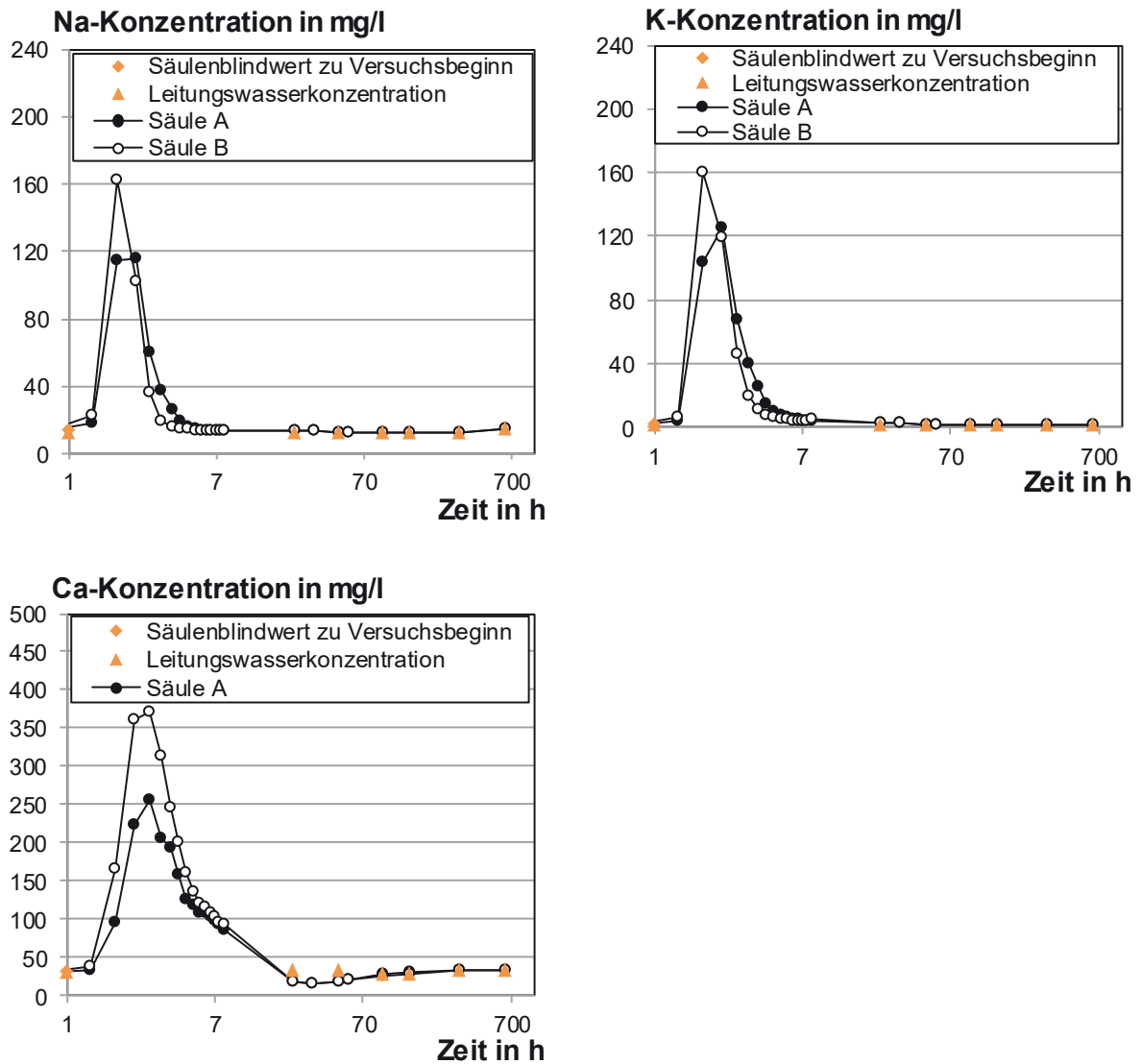


Bild 28: Natrium-, Kalium- und Calciumkonzentrationen im Säulenversuch nach Schössner an der Zementsuspension RR4.4

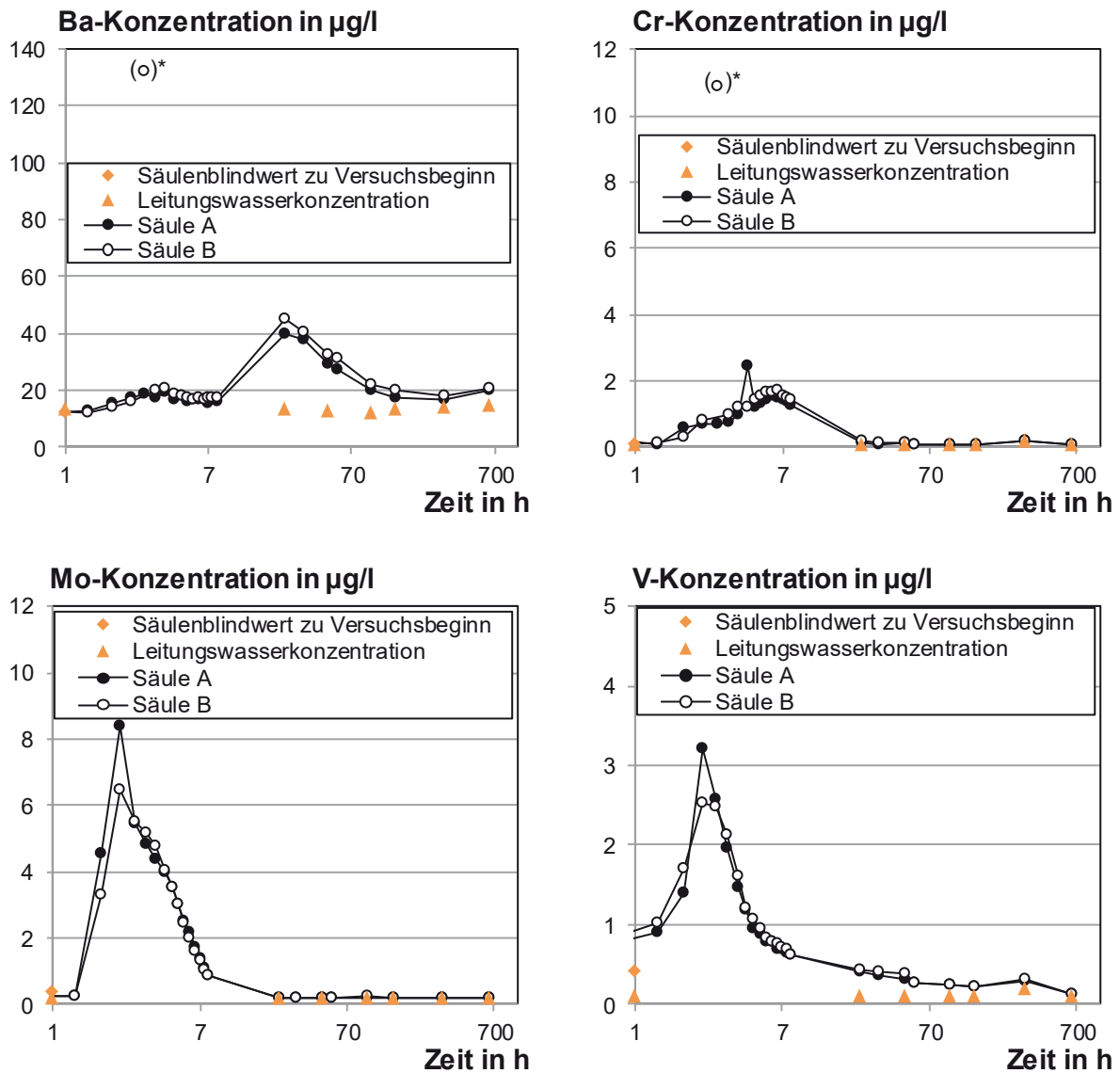


Bild 29: Barium-, Chrom-, Molybdän- und Vanadiumkonzentrationen im Säulenversuch nach Schössner an der Zementsuspension RR 2.6. (*: vermutlich Ausreißer)

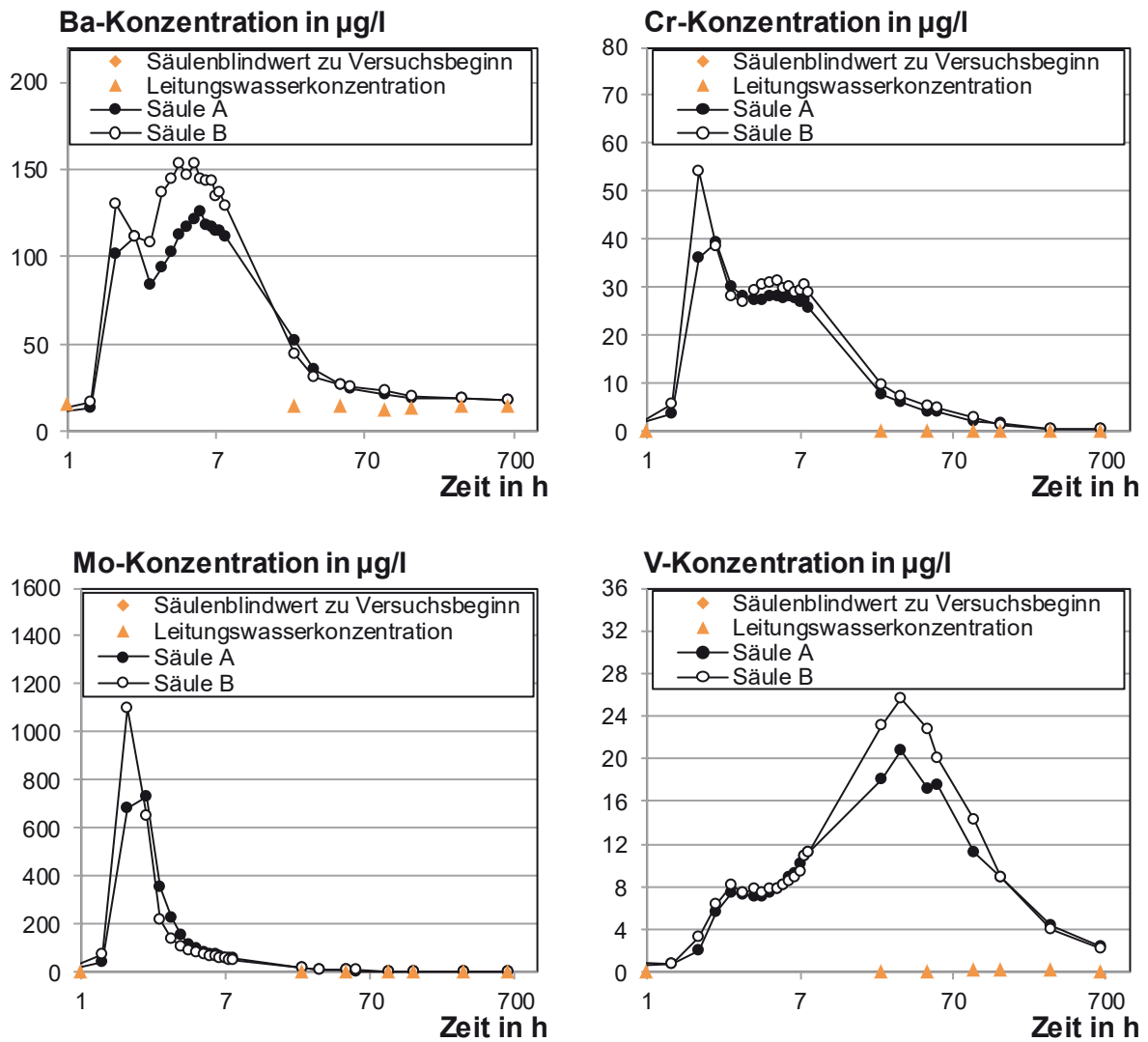


Bild 30: Barium-, Chrom-, Molybdän- und Vanadiumkonzentrationen im Säulenversuch nach Schössner an der Zementsuspension RR4.4

Die Ergebnisse des Säulenversuchs sollen nun mit den Standtests verglichen werden. Hierzu wurde die Freisetzung bezogen auf die Probekörperoberfläche herangezogen. Da Leitungswasser als Elutionsmedium verwendet wurde, ist eine Blindwertkorrektur notwendig. Tabelle A33 und Tabelle A36 zeigen die Zusammenstellung der Blindwerte. Aus diesen Daten wurde für jeden Versuch ein Blindwert abgeleitet, der zur Auswertung herangezogen wurde (s. Tabelle 9).

Tabelle 9: Angesetzte Blindwerte zur Auswertung der Säulenversuche

Parameter	Einheit	RR2.6			RR4.4			
		Säulenabfluss vor Versuchsbeginn	Mittelwert Leitungswasser *	angesetzter Blindwert	Säulenabfluss vor Versuchsbeginn	Mittelwert Leitungswasser *	angesetzter Blindwert	
pH	-	8,08	8,31	8,3	8,4	8,3	8,4	
Redoxpotential	mV	412	428	400	385	416	400	
Leitfähigkeit	µS/cm	262	303	260	239	285	240	
Natrium, Na ⁺	mg/l	12,9	13,7	13	12,9	12,6	12,5	
Kalium, K ⁺		1,20	1,46	1,2	1,6	1,6	1,6	
Calcium, Ca ²⁺		30,5	30,8	30	29,3	31,4	30	
Chlorid, Cl ⁻		14,4	15,0	15	15,9	15,9	16	
Sulfat, SO ₄ ²⁻		28,4	29,9	29	26,5	26,5	26,5	
Antimon, Sb		µg/l	0,131	0,105	0,15	0,164	0,122	0,15
Arsen, As	< 1		< 1	0	< 1	< 1	0	
Barium, Ba	12,2		13,3	12,5	10,7	14,1	10	
Blei, Pb	1,27		0,433	1,3	< 0,1	0,692	0	
Bor, B	7,38		8,26	7,5	24,0	12,049	24	
Cadmium, Cd	0,146		0,109	0,15	< 0,1	0,135	0	
Chrom, Cr	< 0,1		0,109	0	< 0,1	0,151	0	
Kobalt, Co	< 0,1		< 0,1	0	< 0,1	< 0,1	0	
Kupfer, Cu	1,255		3,39	1,5	0,903	5,759	1	
Molybdän, Mo	0,3425		0,185	0,35	0,241	0,205	0,2	
Nickel, Ni	0,132		0,643	0,15	0,115	1,119	0,1	
Quecksilber, Hg	< 0,01		0,011	0	< 0,01		0	
Selen, Se	< 1		< 1	0	2,51	1,08	2,5	
Thallium, Tl	< 0,1		< 0,1	0	< 0,1	< 0,1	0	
Vanadium, V	0,406		0,114	0,4	0,332	0,121	0,3	
Zink, Zn	11,2		61,5	15	13,9	85,7	15	
TOC	mg/l		< 2	< 2	0	1,23	1,64	1,2

* Die Konzentration, die unter der Bestimmungsgrenze liegt, wurde in der Höhe von der Bestimmungsgrenze angesetzt.

Während der ersten 8 Stunden wurde kontinuierlich beprobt (vgl. Abschnitt 2.4.3). Die kumulative Freisetzung wurde gemäß Gleichung (2) berechnet.

$$E_n = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n (c_i - c_0) \cdot (t_i - t_{i-1}) \frac{Q}{O} \quad (2)$$

E_n : kumulative Freisetzung am Ende von Intervall n in mg/m^2 , $n \leq 16$

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

c_i : Konzentration im Eluat i in mg/l

c_0 : Hintergrundkonzentration im Leitungswasser in mg/l

t_i : Zeitpunkt des Endes der Eluatentnahme in h

Q : Durchflussrate, $4 \text{ l}/\text{h}$

O : Oberfläche der Probekörper (Annahme: kugelförmiger Probekörper, daher ist $O = 0,085 \text{ m}^2$)

Nach den ersten 8 Stunden wurden nur noch stichprobenartig Eluate entnommen. Die Konzentrationen zwischen den Entnahmezeitpunkten wurden linear interpoliert. Die kumulative Freisetzung ergibt sich somit nach Gleichung (3).

$$E_n = E_{16} + \sum_{i=17}^n E_i = E_{16} + \sum_{i=17}^n \left(\frac{c_i + c_{i-1}}{2} - c_0 \right) \cdot (t_i - t_{i-1}) \frac{Q}{O} \quad (3)$$

E_n : kumulative Freisetzung am Ende von Intervall n in mg/m^2 , $n > 16$

Bild 31 zeigt die pH-Werte und Bild 32 die elektrischen Leitfähigkeiten der unterschiedlichen Versuche im Vergleich. Es ist ersichtlich, dass die Verläufe sehr unterschiedlich sind.

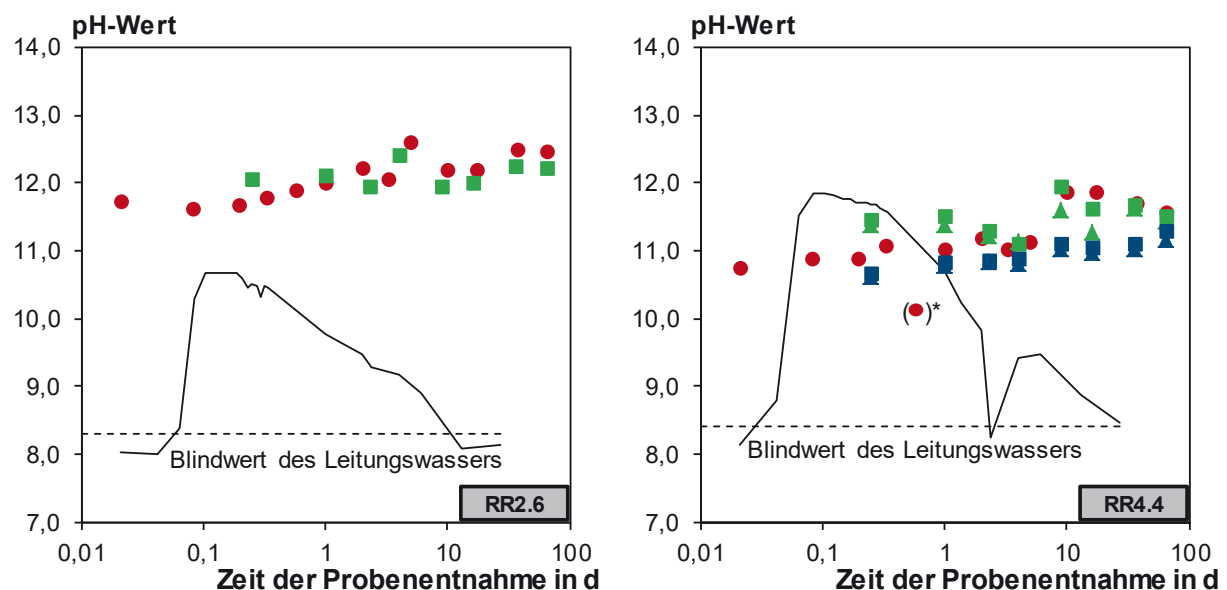


Bild 31: Verlauf der pH-Werte (*: Ausreißer)

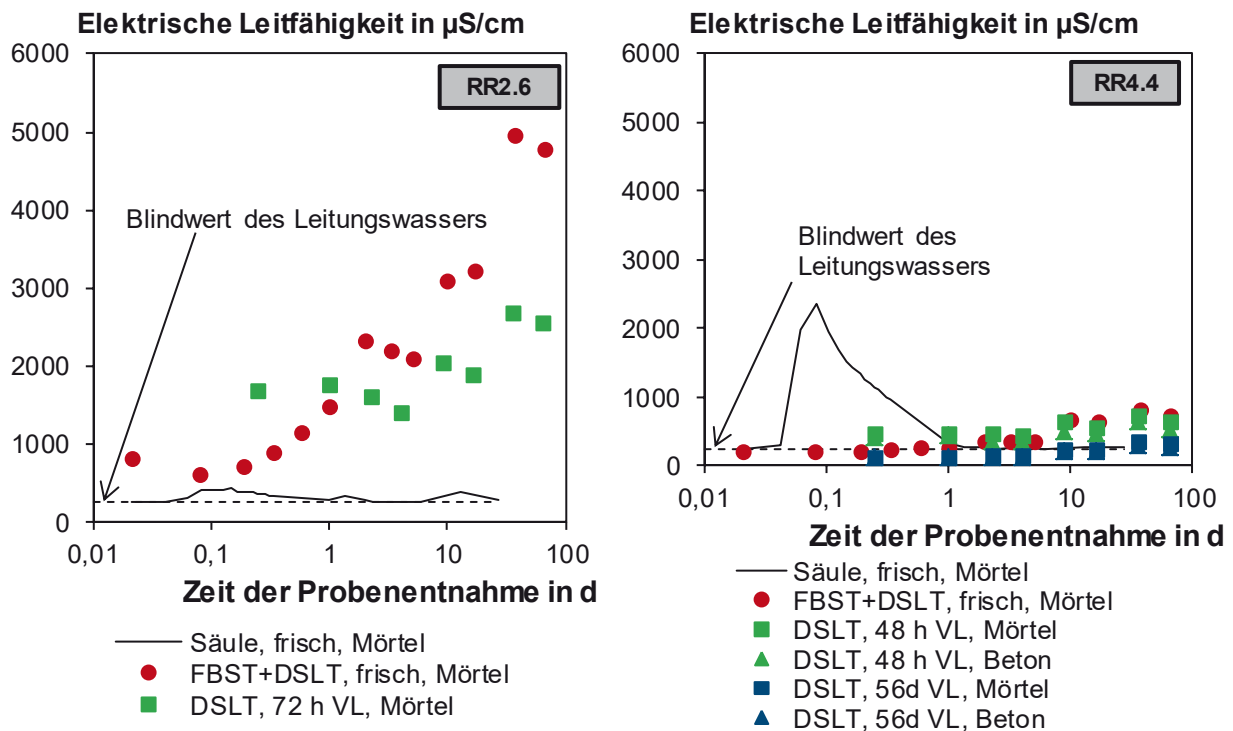


Bild 32: Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit (*: Ausreißer)

Die Freisetzungen sind in Bild 33 bis Bild 42 in doppelt-logarithmischem Maßstab dargestellt. Die Ergebnisse von Säulenversuch und Standtests korrelieren nicht miteinander. Bei den Säulenversuchen wurden anstelle des deionisierten Wassers Leitungswasser verwendet. Dies kann die Ergebnisse leicht beeinflussen. Ganz wesentlich für die unterschiedliche Auslaugung im Vergleich zum Langzeitstandtest ist jedoch die hohe Fließgeschwindigkeit im Säulenversuchen (4 l/h). Dies führt dazu, dass die umweltrelevanten Parameter am Anfang (vor dem Erstarren) verstärkt ausgewaschen werden. Durch die hohe Verdünnung sinken die Konzentrationen anschließend schnell auf den Hintergrundwert ab, die kumulative Freisetzung steigt nicht mehr an.

Die Gesamtfreisetzungen von Natrium, Kalium, Calcium und Chlorid in den Säulenversuchen sind ähnlich wie in den Standtests oder leicht erhöht. Bei den Versuchen an der Suspension RR4.4 waren die Gesamtfreisetzungen an Sulfat und den nachweisbaren Spurenelementen im Säulenversuchen oft 10- bis 100-fach höher als in den Standtests. Die Konzentration bei RR2.6 klang oft schon während des ersten Tages ab. Wegen der sehr hohen Wassermenge des Säulenversuchs hat die Streuung der Hintergrundkonzentration in diesem Fall großen Einfluss auf die berechnete Freisetzung.

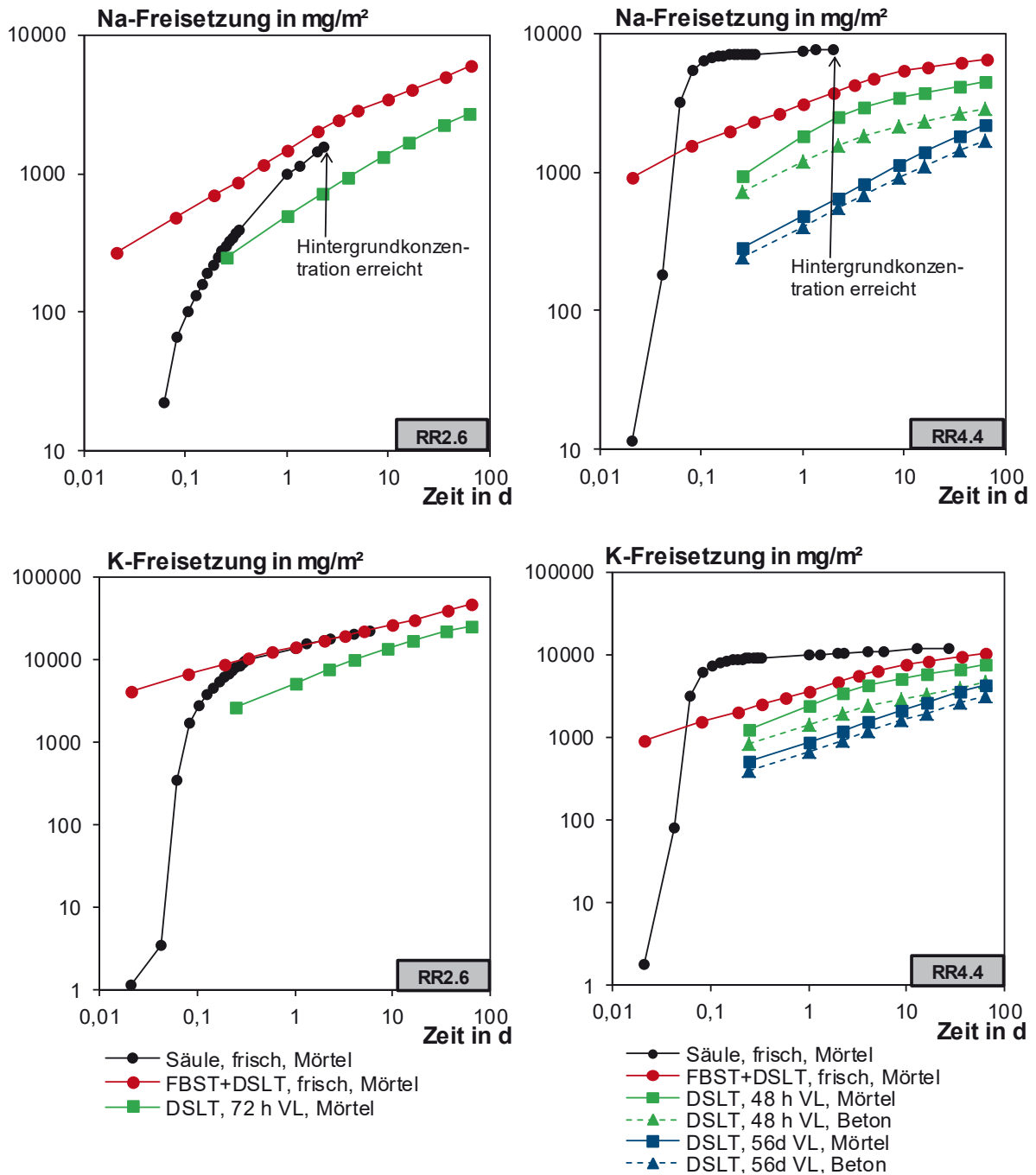


Bild 33: Kumulative Freisetzungen von Natrium und Kalium

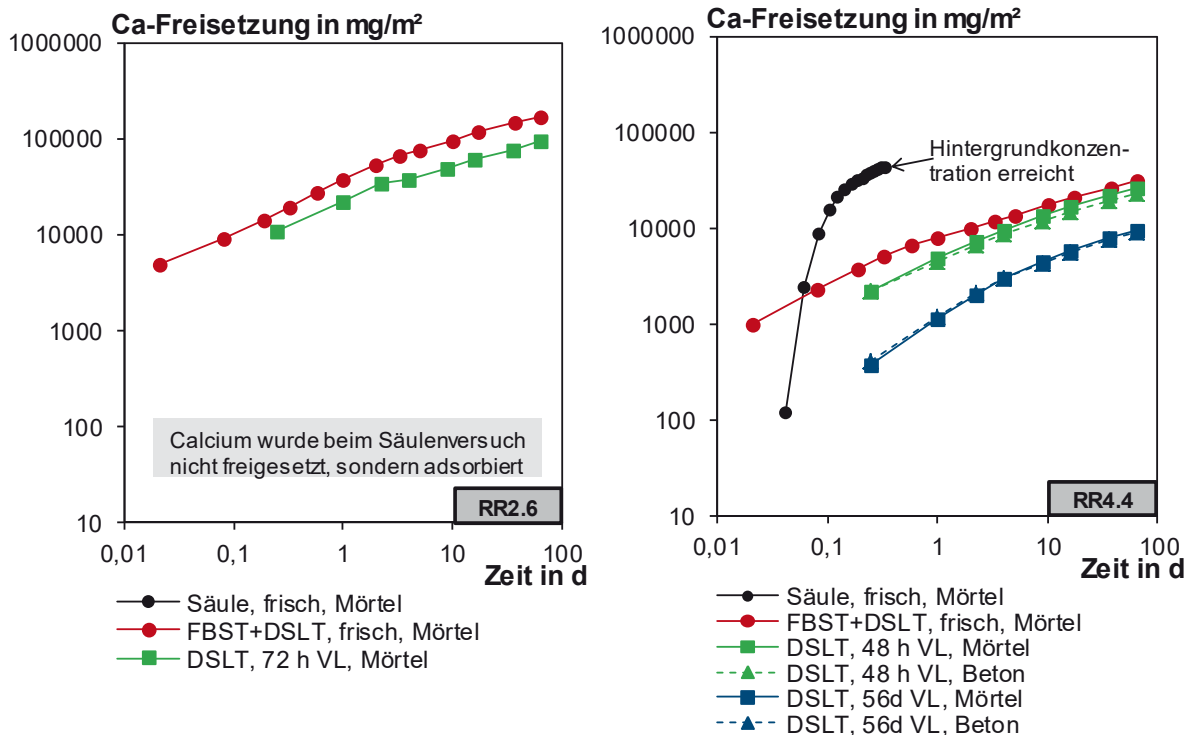


Bild 34: Kumulative Freisetzung von Calcium

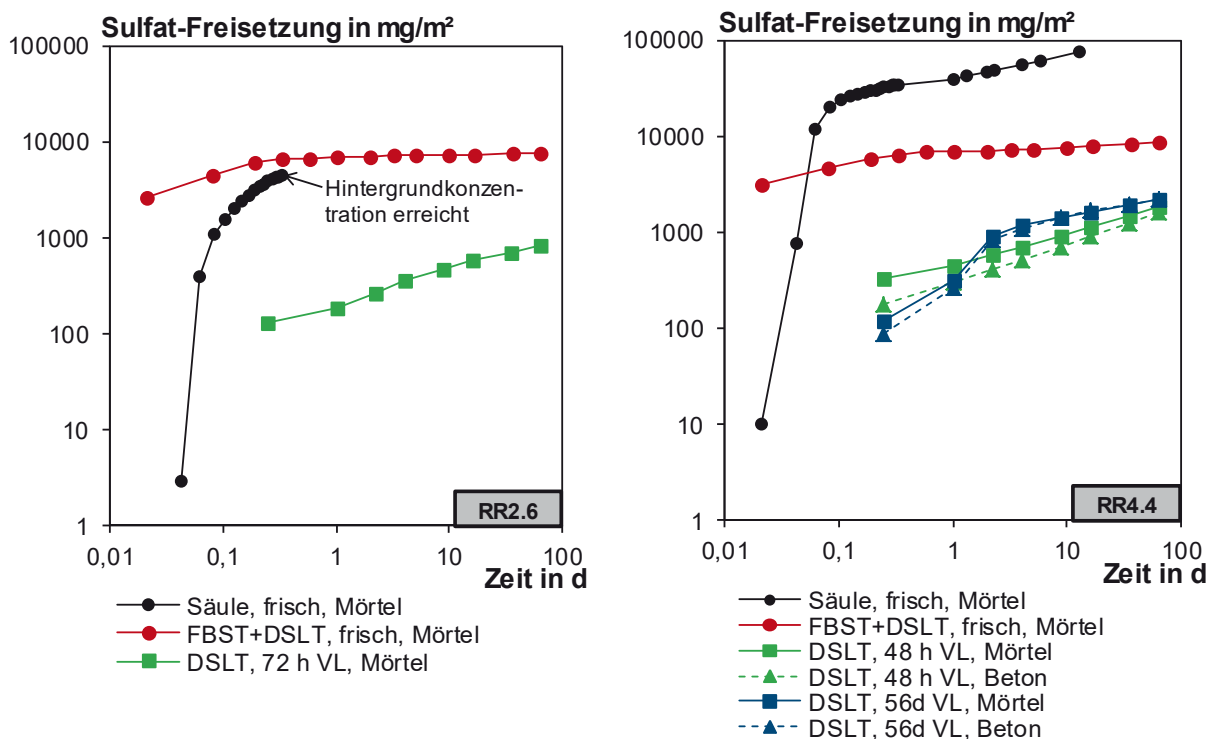


Bild 35: Kumulative Freisetzung von Sulfat

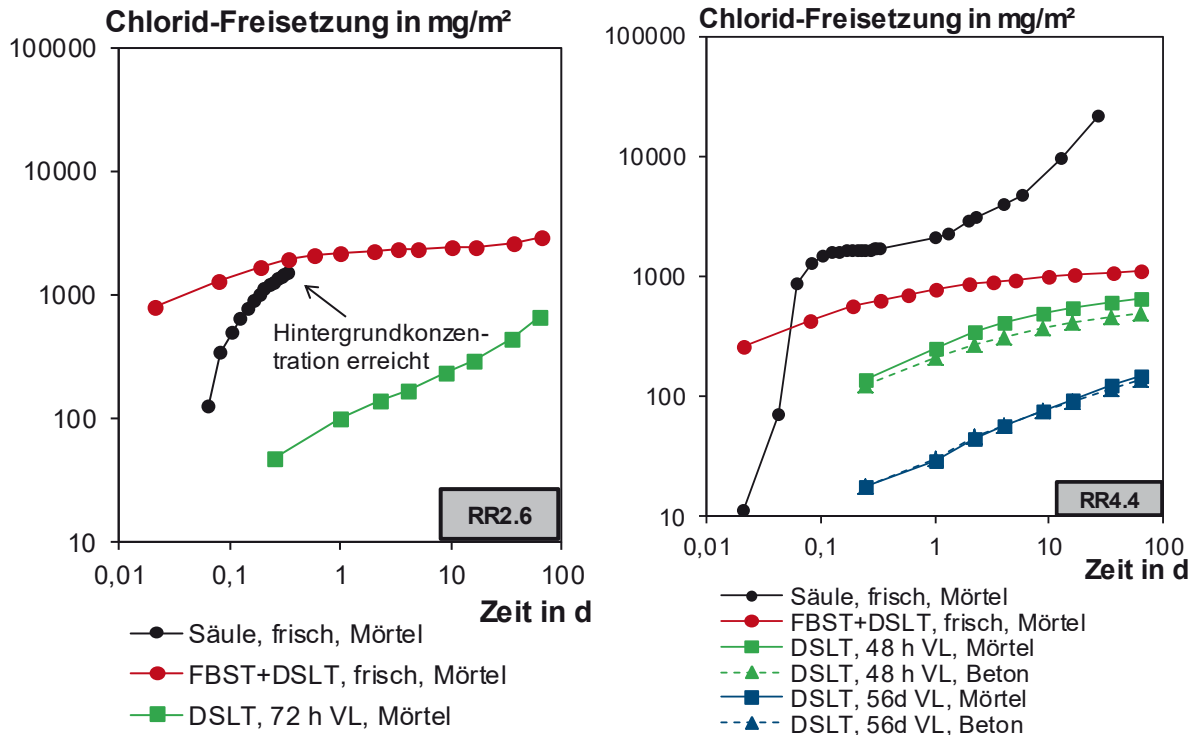


Bild 36: Kumulative Freisetzung von Chlorid

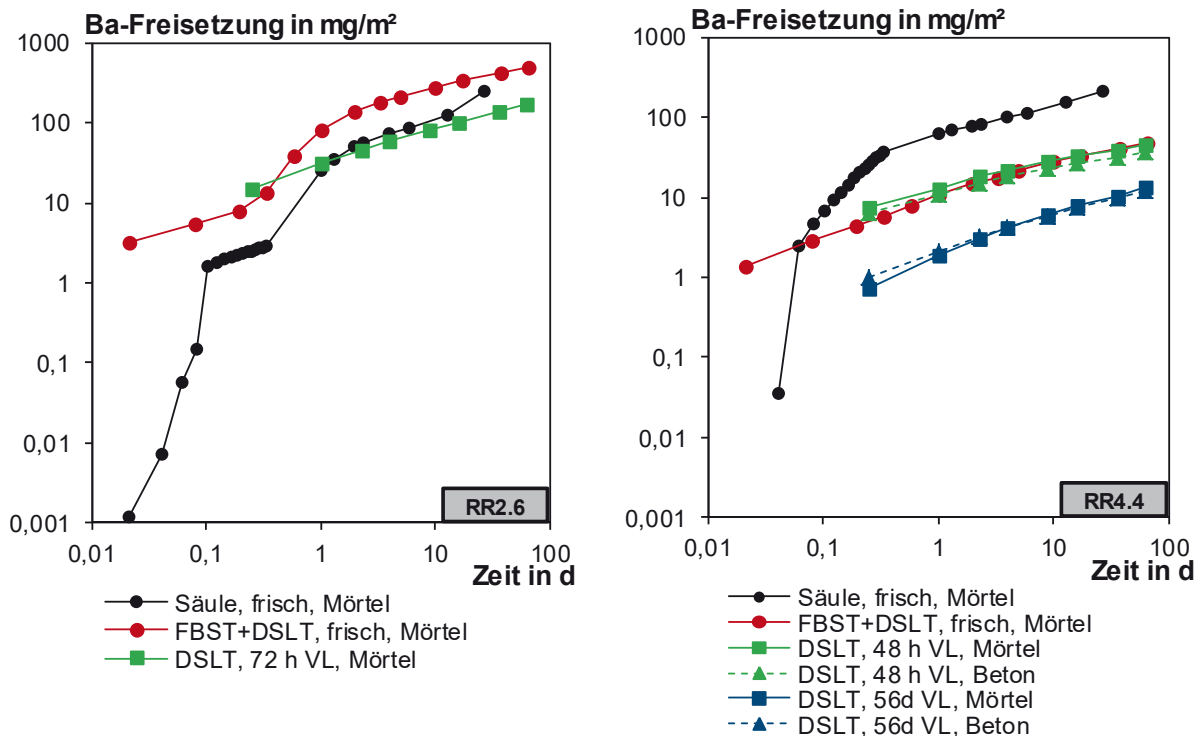


Bild 37: Kumulative Freisetzung von Barium

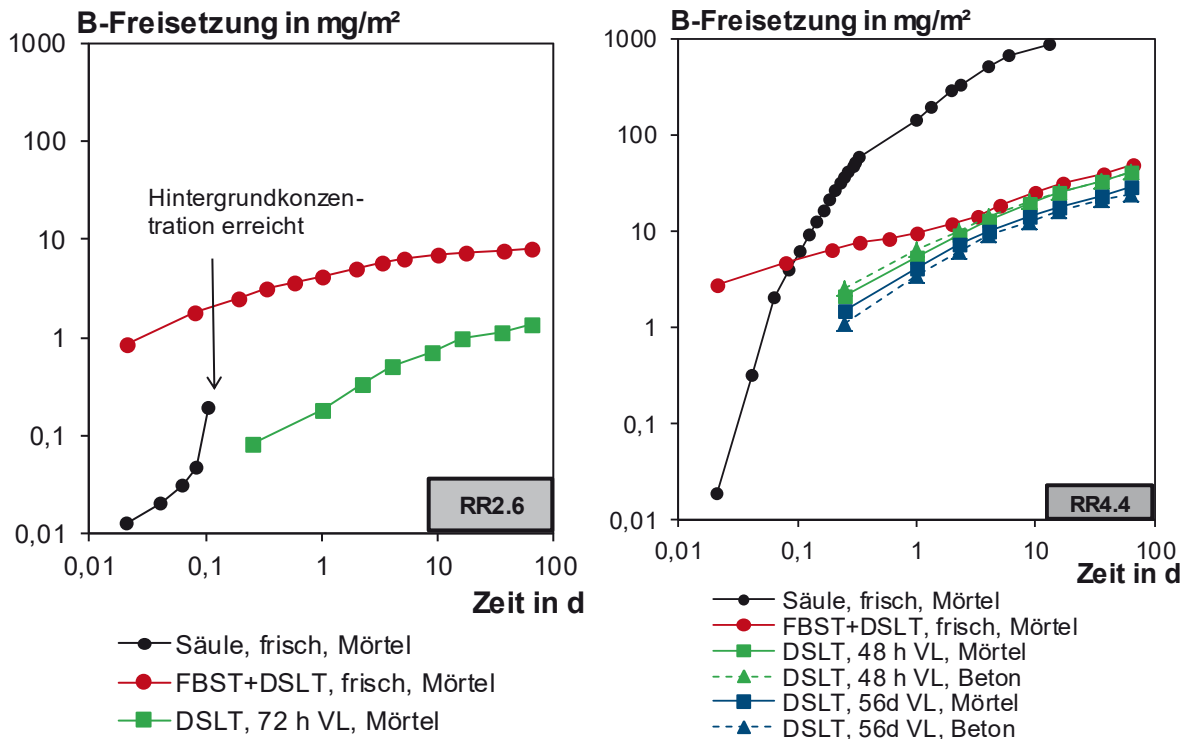


Bild 38: Kumulative Freisetzung von Bor

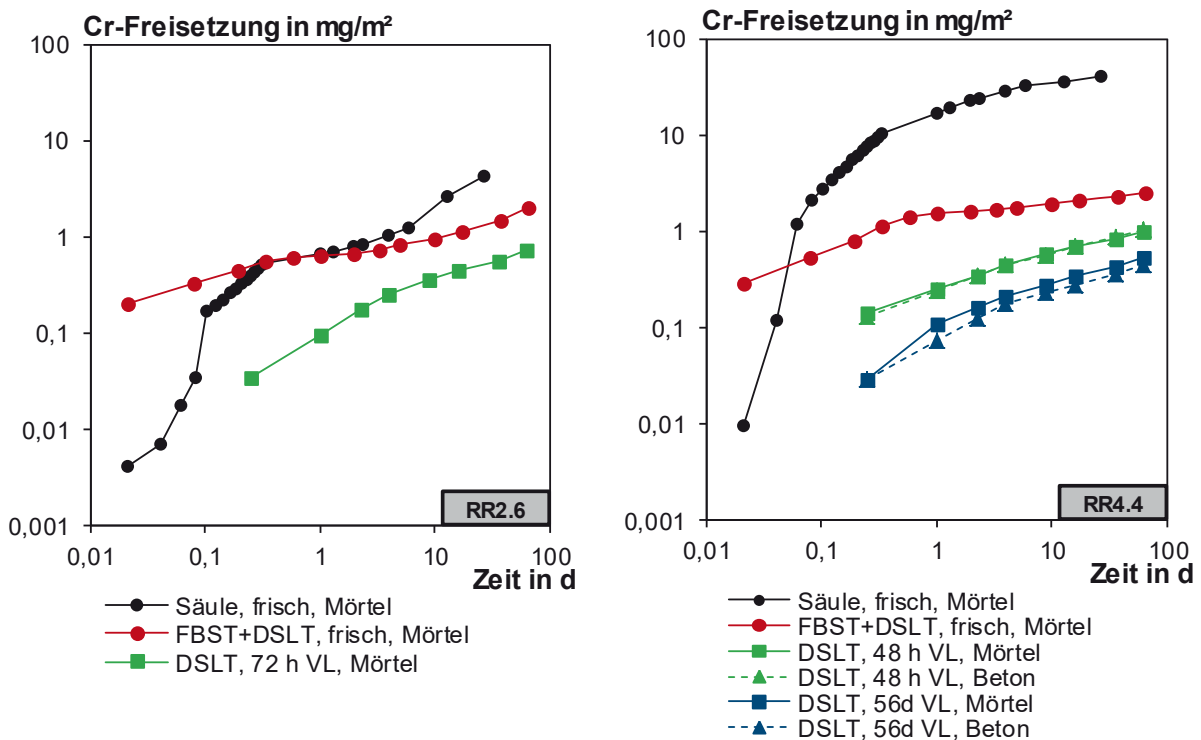


Bild 39: Kumulative Freisetzung von Chrom

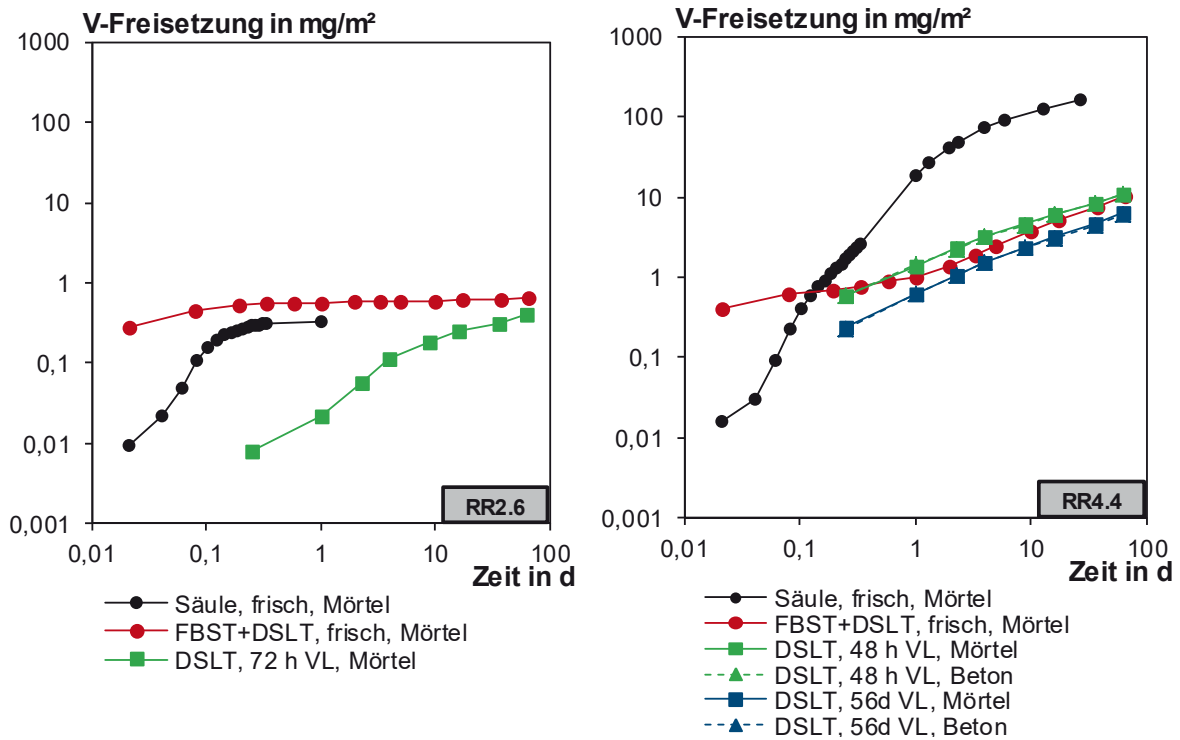


Bild 40: Kumulative Freisetzung von Vanadium

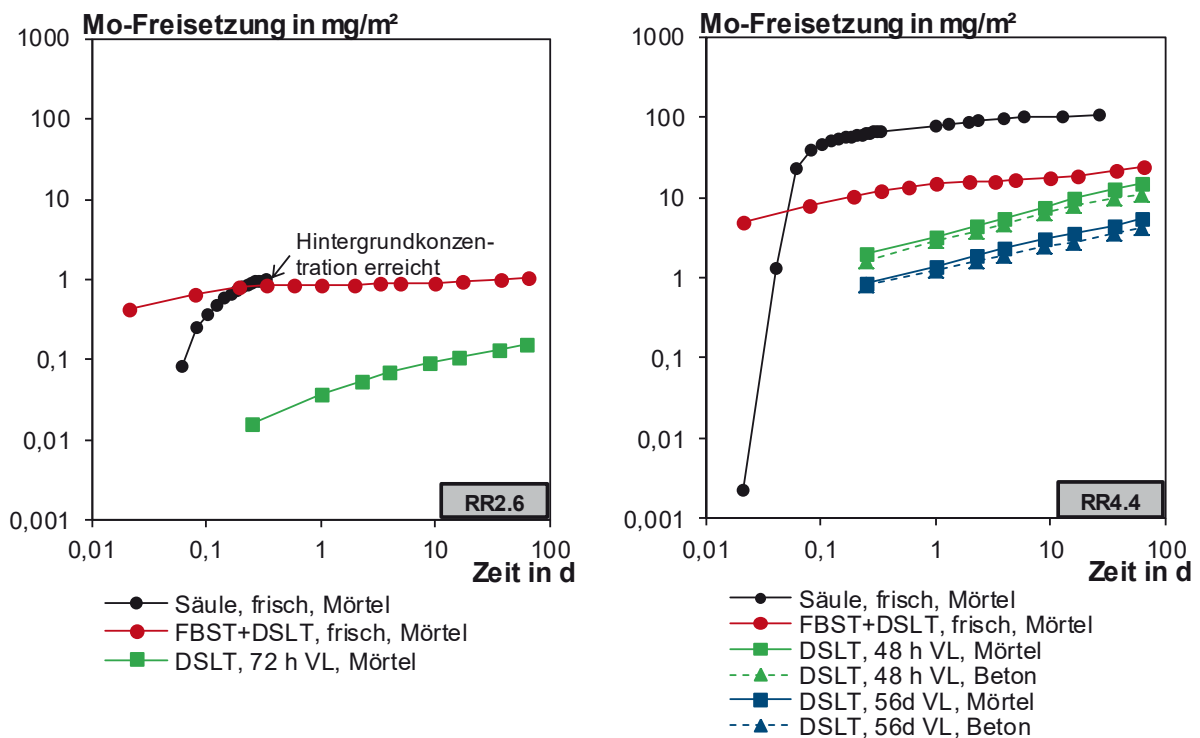


Bild 41: Kumulative Freisetzung von Molybdän

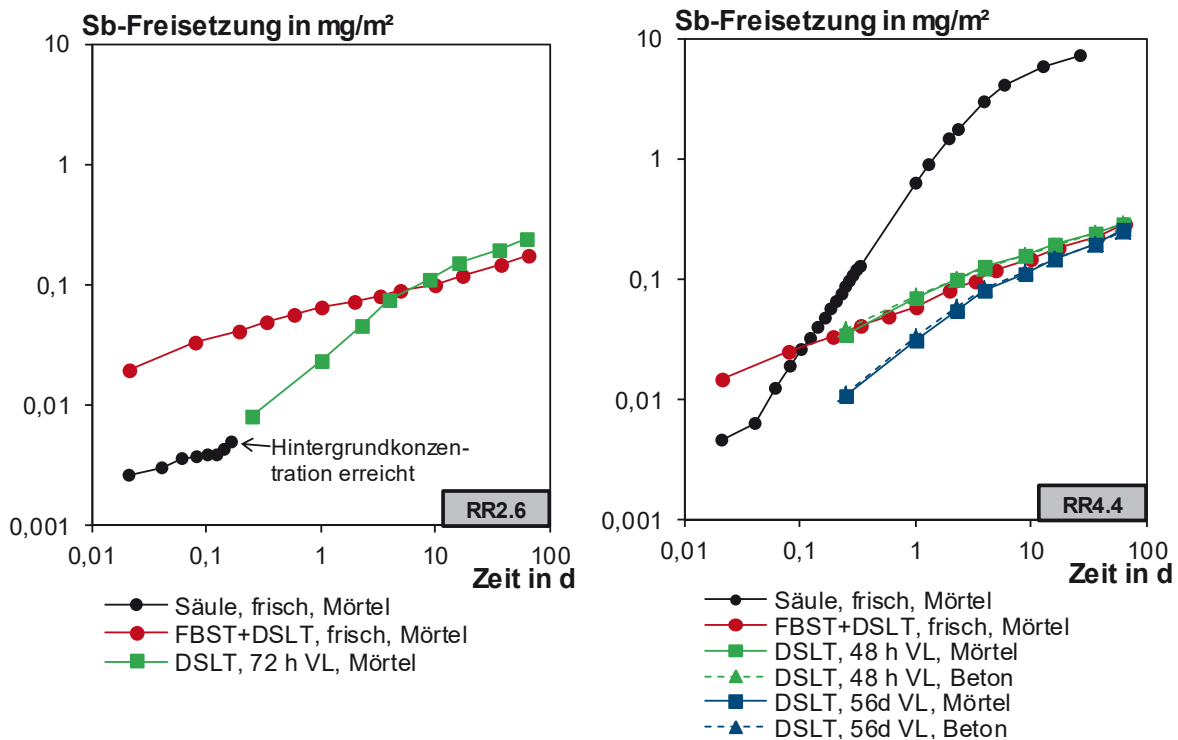


Bild 42: Kumulative Freisetzung von Antimon

3.3 Ergebnisse der Wärmeflusskalorimetrie

Zur besseren Bestimmbarkeit der Ausschaltfrist einer Zementsuspension wurde gemäß Kapitel 2.4.4 die Hydratationswärme der Mischungen RR1.3, RR2.3, RR3.3 und RR4.4 bestimmt. In den folgenden Bildern (Bild 43 bis Bild 46) ist der Verlauf des Wärmeflusses der Zementsuspensionen dargestellt. Das Maximum der Beschleunigungsperiode ist markiert. Dieses könnte als Orientierung für einen frühestmöglichen Ausschaltzeitpunkt herangezogen werden. Hierzu sind zukünftig jedoch noch Ausschalttests durchzuführen und die Auslaugung bei frühestmöglichem Ausschaltermin zu wiederholen.

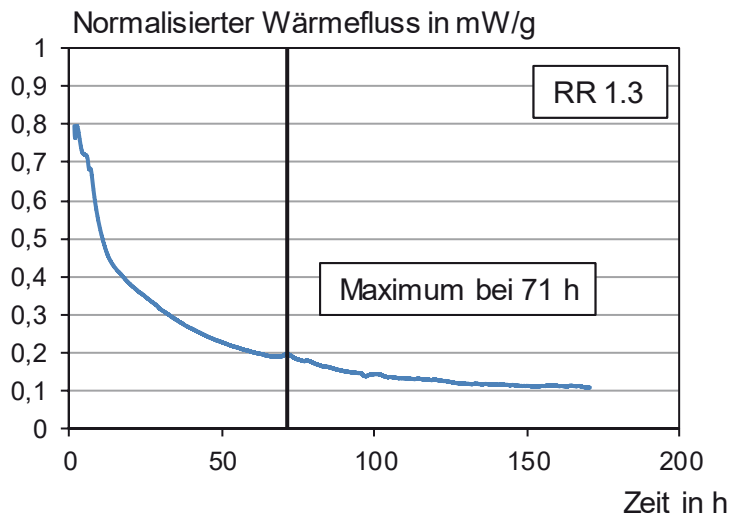


Bild 43: Normalisierter Wärmefluss der Zementsuspension RR1.3 und Endzeitpunkt der Beschleunigungsperiode

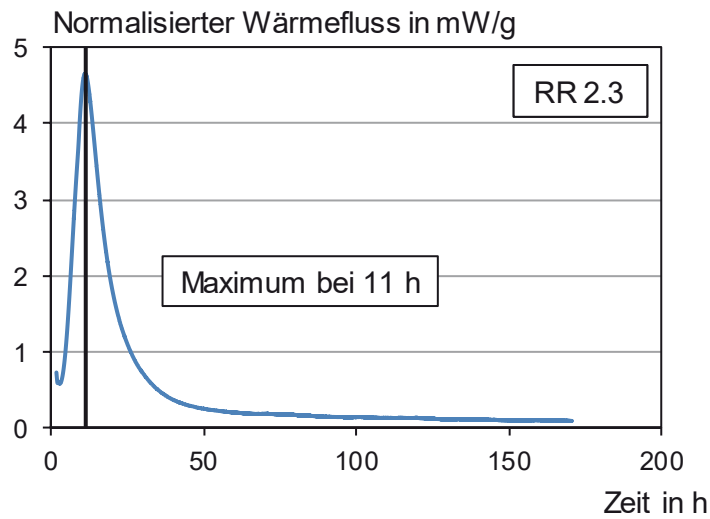


Bild 44: Normalisierter Wärmefluss der Zementsuspension RR2.3 und Endzeitpunkt der Beschleunigungsperiode

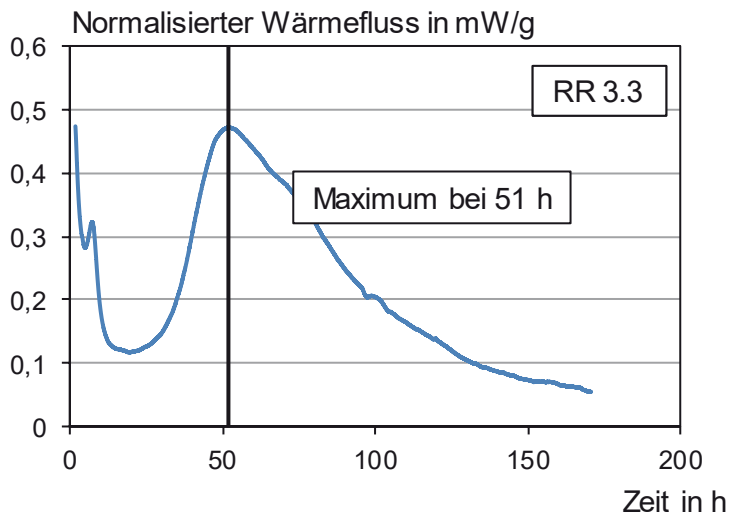


Bild 45: Normalisierter Wärmefluss der Zementsuspension RR3.3 und Endzeitpunkt der Beschleunigungsperiode

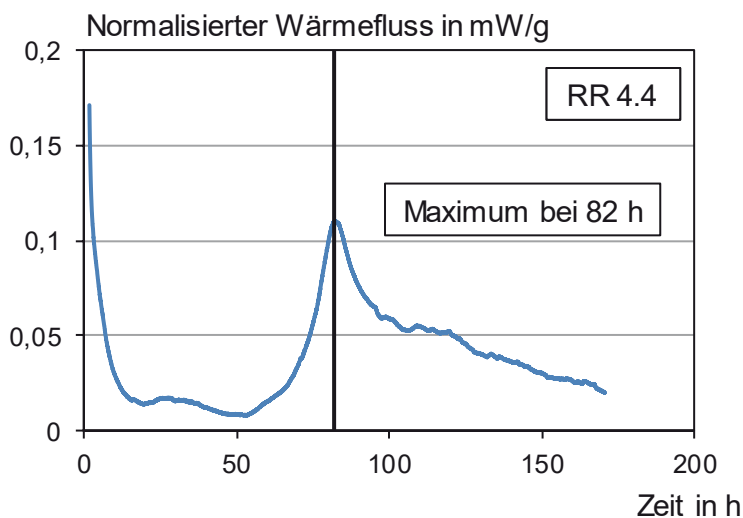


Bild 46: Normalisierter Wärmefluss der Zementsuspension RR4.4 und Endzeitpunkt der Beschleunigungsperiode

Wie zu erkennen ist, reagieren die Zementsuspensionen mit hohem Klinkeranteil am schnellsten (RR2.3 und RR3.3). Ein hoher Flugaschegehalt (RR4.4) verlangsamt die Reaktion und damit die Festigkeitsbildung deutlich. Auch die Suspension mit hohem Hüttensandmehlgehalt (RR1.3) zeigt eine verlangsamt Hydratation. Zudem sind die einzelnen Hydratationsperioden schlechter differenzierbar. Anhand der gemessenen Kurven lassen sich die Ausschalfzeiten näher eingrenzen und optimieren.

4 Modellrechnung im Grundwasser

4.1 Allgemeines

Die im Folgenden beschriebenen Simulationen wurden mit dem Transportprogramm FEFLOW 6.2 durchgeführt. Es handelt sich hierbei um ein dreidimensionales Finite-Elemente-Programm zur Berechnung der Schadstoffausbreitung bei Altlasten oder nach ungeplanter Einleitung von Schadstoffen in das Grundwasser. Mit dem Programm können beliebige Modellgeometrien und hydrogeologische Bedingungen einschließlich der ungesättigten Bodenzone simuliert werden. Die Diskretisierung erfolgt i. d. R. durch Dreieckselemente. Bei der dreidimensionalen Modellierung wird der Bodenkörper in mehrere Schichten (layer) unterteilt, die durch sogenannte Slices abgegrenzt werden. Die einzelnen Elemente haben dann die Form von Prismen mit der Höhe der jeweiligen Schicht. Der Schadstoffeintrag kann punktuell oder flächenhaft und einmalig oder zeitabhängig erfolgen. Der flächenhafte Eintrag kann sowohl auf einer horizontalen als auch an einer vertikalen Ebene erfolgen. Die Schadstoffe können damit direkt am Rand des Bauteils aufgegeben werden. Der zeitliche Verlauf der Schadstofffreisetzung kann als Wertetabelle eingegeben werden und das Programm interpoliert automatisch zwischen den Punkten. Dadurch kann ein beliebiger Freisetzungverlauf ohne großen Aufwand eingegeben werden. In diesem Vorhaben soll ein Modell zum Einsatz kommen, welches bereits erfolgreich zur Simulation einer Weichgelinjektion verwendet wurde. Zur Berechnung des Schadstoffeintrags wurde die Freisetzung bezogen auf die Baustoffoberfläche gemessen im Frischbeton- und Langzeitstandtest herangezogen.

4.2 Modell

4.2.1 Allgemeine Angaben und Vorüberlegungen zum Modellgebiet

Für die durchzuführenden Simulationen wurde im SVA zunächst die Eignung des im Folgenden beschriebenen Transportmodells diskutiert. Die in Abschnitt 2.2 beschriebenen Rahmenrezepturen decken eine Vielzahl von Anwendungen mit sehr unterschiedlichen Einbaubedingungen ab. Es ist daher nicht möglich, ein Modell zu finden, das alle Anwendungen realistisch abbildet. Auf der anderen Seite bestand im SVA Einigkeit darüber, dass nicht für jede spezifische Anwendung von Zementsuspensionen ein eigenes Transportmodell konzipiert und Grenzwerte abgeleitet werden können. Es musste daher ein Kompromiss gefunden werden. Das in diesem Projekt herangezogene Modell basiert auf der Simulation einer Weichgelinjektionssohle und wurde vom SVA genehmigt.

Im ersten Schritt sollte festgelegt werden, welche Versuche zur Berechnung des Schadstoffeintrags in das Modellgebiet heranzuziehen sind. Da die Randbedingungen in den Standtests stark vom Säulenversuch nach Schössner abweichen, wurde entschieden, dass die Simulationen mit an die Experimente angepassten Fließgeschwindigkeiten durchzuführen sind. Der Schadstoffeintrag aus dem DSLT mit kurzer Vorlagerung sowie der des Frischbetonstandtests mit anschließendem DSLT wurden mit einer langsamen Fließgeschwindigkeit des Grundwassers kombiniert und die Ausbreitung der Stoffe im Grundwasser simuliert. Der

Schadstoffeintrag aus dem Säulenversuch erfolgte bei einer schnelleren Fließgeschwindigkeit. Dies wurde durch eine Variation des Grundwassergefälles in das Modell implementiert.

4.2.2 Beschreibung des Modellgebiets

Das Modell bildet eine Baugrube mit einer Grundfläche von 2025 m² und einer Tiefe von 11,5 m ab. Die Grundfläche wurde in 20 gleich große Teilabschnitte ($A = 101,25 \text{ m}^2$) gegliedert. Spundwände mit einer Dicke von 0,5 m und einem Überstand von 0,5 m unter der Sohle sorgen für die seitliche Abdichtung. Die mit Zementsuspension abgedichtete Bodenschicht mit einer Dicke von $d = 1 \text{ m}$ beginnt in einer Tiefe von 10,5 m. In der Baugrube sind fünf Pumpen (Pumpleistung bis 30 l/s) zur Wasserhaltung angeordnet. Die Bilder Bild 47 und Bild 48 zeigen schematisch das verwendete Modellgebiet.

Pro Tag wird ein Abschnitt von 101,25 m² injiziert, nach 5 Injektionstagen folgt jeweils eine Arbeitspause von 2 Tagen (Wochenende). Die Reihenfolge der Injektionsabschnitte ist in Bild 47 dargestellt. Sie soll den ungünstigsten Bauablauf abbilden. Mit der Injektion wird die Durchlässigkeit der Elemente herabgesetzt. Nachdem alle Teilflächen injiziert wurden, beginnt das Lenzen der Baugrube (5 m Absenkung).

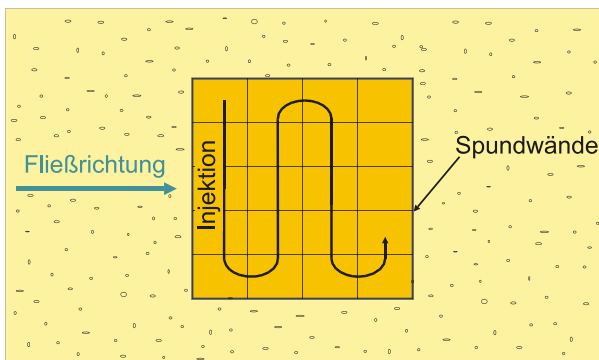


Bild 47: Modellgebiet, Aufsicht

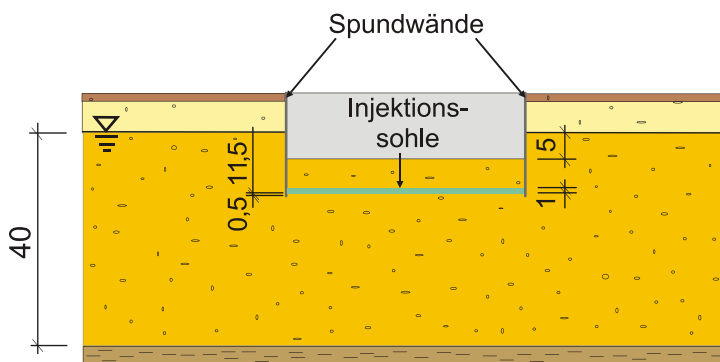


Bild 48: Modellgebiet, Seitenansicht

Wie in Abschnitt 4.2.1 erwähnt, wurde die Fließgeschwindigkeit an die Randbedingungen im Versuch angepasst, um die Modellierung möglichst realistisch zu gestalten. Für die Standtests sollte die Fließgeschwindigkeit niedrig sein. Analog zum Betonmodell /DIB11/ wurde hier ein Grundwassergefälle von 10^{-3} eingestellt. Die mittlere Fließgeschwindigkeit im Modell ergab sich damit zu 0,086 m/d. Im Säulenversuch ist die Strömungsgeschwindigkeit des

Wassers wesentlich höher, rd. 1,36 m/d. Das Grundwassergefälle wurde daher auf $1,7 \cdot 10^{-2}$ erhöht und entspricht damit in etwa der Strömungsgeschwindigkeit im Säulenversuch nach Schössner. Tabelle 10 fasst die Modellparameter zusammen.

Tabelle 10: Randparameter des Modells

Parameter	Symbol	Einheit	Wert	
Länge der Baugrube in Fließrichtung	l	m	45	
Breite der Baugrube	b	m	45	
Mächtigkeit des Aquifers	h	m	40	
Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens	k_f	m/s	10^{-3} (x,y), 10^{-4} (z)	
Durchlässigkeitsbeiwert der Sohle	k_f	m/s	$1,8 \cdot 10^{-7}$	
Durchlässigkeitsbeiwert der Baugrubenwand	k_f	m/s	undurchlässig	
Gesamtporosität*	n	-	0,3	
effektive Porosität	n_e	-	0,2	
Packungsdichte des Bodens	ρ	g/cm ³	1,855	
Grundwassergefälle	Langsame Fließgeschwindigkeit (rd. 0,086 m/d)	i	-	10^{-3}
	Schnelle Fließgeschwindigkeit (rd. 1,4 m/d)	i	-	$1,7 \cdot 10^{-2}$
Anisotropiefaktor x:z	-	-	10 : 1	
Retardierung, chemischer- oder biologischer Abbau	-	-	ohne	
longitudinale Dispersionslänge	α_L	m	3	
transversale Dispersionslänge	α_T	m	0,3	
Tiefe der Sohlenunterkante	-	m	11,5	
Wasserhaltung	-	m	5	

*: Anmerkung aus dem Beraterkreis des Forschungsvorhabens: Realistischer wäre eine Gesamtporosität im Bereich von 0,4 bis 0,5. Bei den hier durchgeführten Modellierungen wirkt sich dies nicht aus, weil für den Transport nur die effektive Porosität von Bedeutung ist. Bei Berücksichtigung von Sorptionseffekten sollte jedoch ein höherer Wert für die Gesamtporosität gewählt werden.

Die Bilder Bild 49 und Bild 50 zeigen die Strömungsgeschwindigkeit im Modell nach Fertigstellung der Injektionssohle (180 Tage Simulationszeit). Die Grundwasserfließgeschwindigkeit bei der Simulation des Säulenversuchs ist wesentlich schneller als in der Simulation des DSLTs bzw. des Frischbetonstandtest mit anschließendem DSLT.

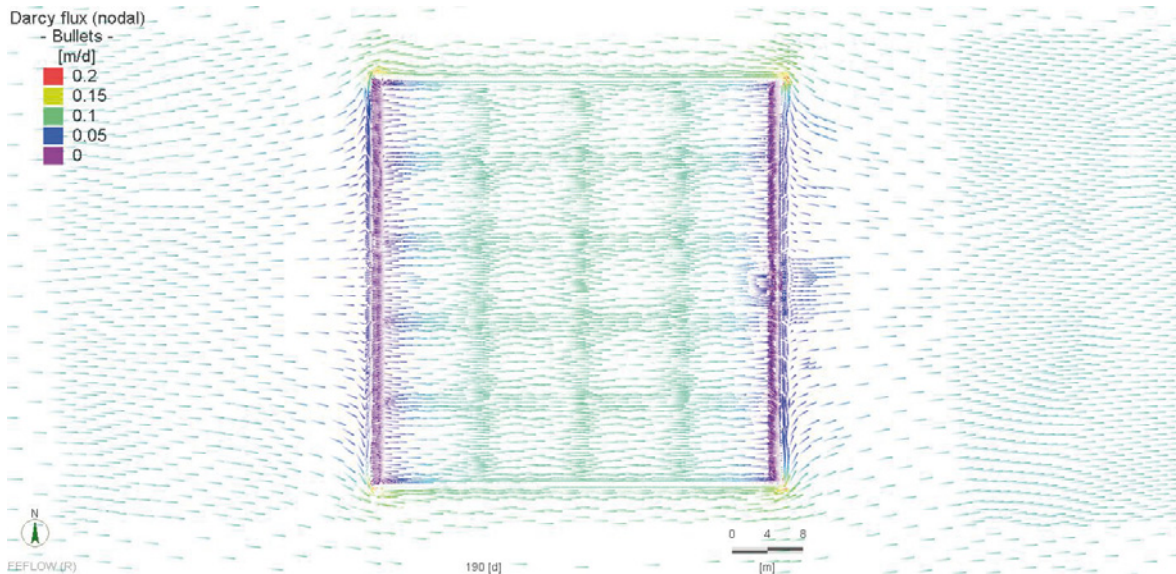


Bild 49: Fließgeschwindigkeit – DSLT und Frischbetonstandtest + DSLT nach 180 Tagen, 0,5 m unterhalb der Sohle

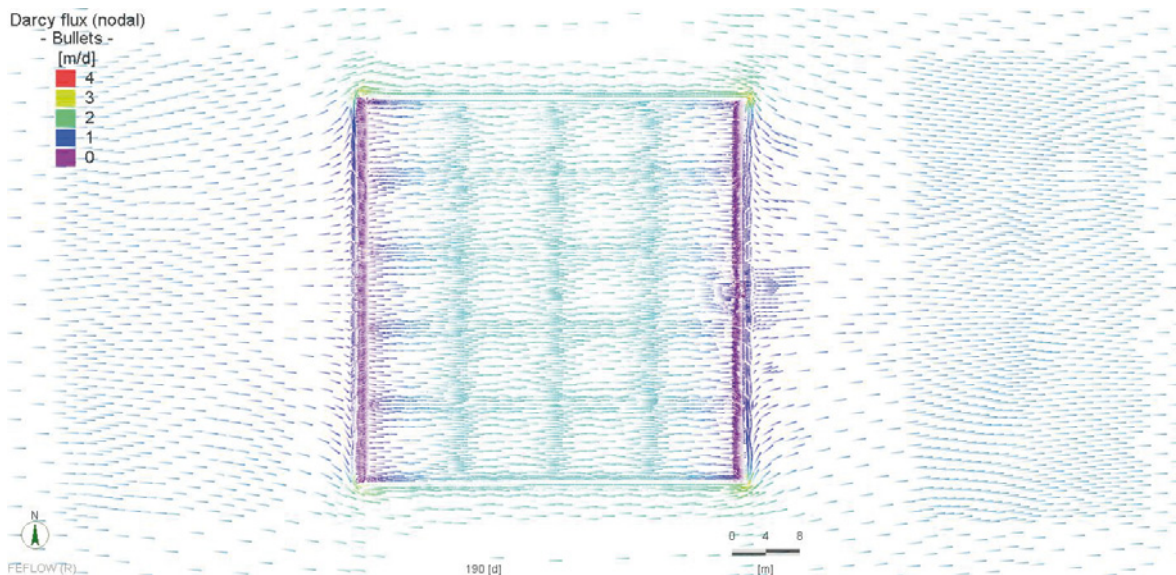


Bild 50: Fließgeschwindigkeit – Säulenversuch nach Schössner nach 180 Tagen, 0,5 m unterhalb der Sohle

4.2.3 Berechnung des Schadstoffeintrags

Der Eintrag von Stoffen in das Grundwasser wird über die sog. „Flux-Randbedingung“ vorgenommen. Diese entspricht in diesem Fall einer zeitabhängigen Auslaugrate in $g/(m^2d)$, die auf die Kontaktfläche der Zementsuspension zum Grundwasser bezogen wird.

In dem Programm FEFLOW kann der Schadstoffeintrag im Verlauf der Zeit durch eine Wertetabelle vorgegeben werden. Das Programm interpoliert dann linear zwischen den Punkten. Üblicherweise ist der Verlauf der Freisetzung jedoch nicht linear, sondern kann meist relativ gut durch eine Potenzfunktion angenähert werden, wie im folgenden Bild 51 beispielhaft gezeigt ist. Bei diffusionsgesteuerter Auslaugung ergibt sich ein Exponent von 0,5.

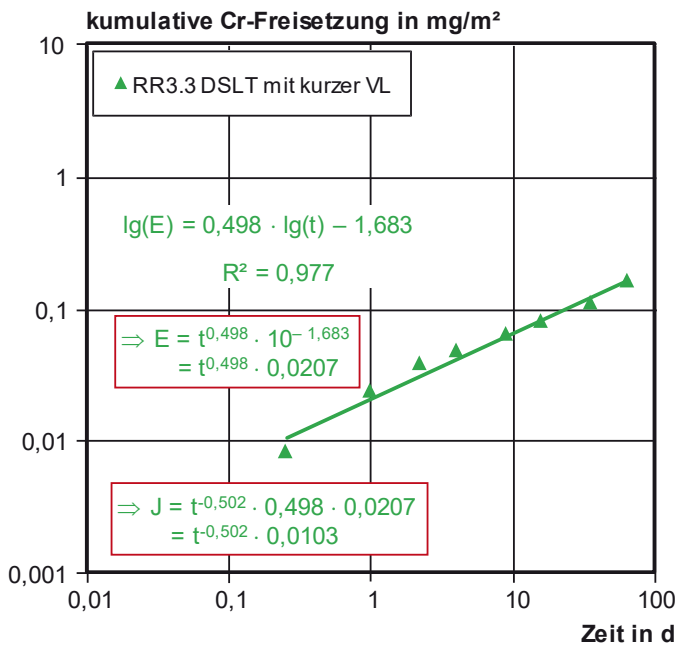


Bild 51: Chromfreisetzung der Rahmenrezeptur RR3.3 im DSLT mit kurzer Vorlagerung

Durch Ableitung der Freisetzung E nach der Zeit erhält man die Potenzfunktion für die Auslaugrate J , wie in Bild 51 exemplarisch gezeigt. Die lineare Interpolation durch das Programm ist daher immer fehlerhaft. Der Fehler kann klein gehalten werden, indem anstelle der experimentell bestimmten Auslaugraten in den Elutionsschritten eine feiner abgestufte Wertetabelle mit der Ausgleichsfunktion berechnet wird. Dieses Vorgehen wurde auch in früheren Forschungsprojekten gewählt (s. z. B. /Bra09b, Bra10/). Die Funktion erlaubt dann auch eine Extrapolation der Auslaugrate über den Versuchszeitraum hinaus.

Die meisten Versuchsergebnisse ließen sich nicht mit ausreichender Genauigkeit durch eine geschlossene Funktion beschreiben. Wenn der Unterschied zwischen der experimentell ermittelten Gesamtfreisetzung und der anhand einer Ausgleichsfunktion berechneten Freisetzung über 10 % des Versuchsergebnisses lag, wurde der Freisetzungsverlauf abschnittsweise approximiert, wie im Anhang in Bild B1 bis Bild B6 für alle modellierten Versuche dargestellt.

Mit den ermittelten Funktionen wurde die Auslaugrate abgeleitet und eine Wertetabelle erstellt. Die sich durch die lineare Interpolation ergebenden Gesamtfreisetzungen während der Versuchslaufzeit wurden dann nochmals mit der experimentell ermittelten Gesamtfreisetzung verglichen. Die Abweichung lag bei allen Versuchen unter 5 %, d. h. die Freisetzung im Versuch konnte sehr gut angenähert werden.

Bei der Berechnung des Stoffeintrags in das Modell wurde anschließend noch eine weitere Umrechnung vorgenommen (s. Gleichung (4)).

$$J_{\text{Eintrag}} = - \frac{J_{\text{Versuch}}}{1000} \cdot f_0 \quad (4)$$

J_{Eintrag} Schadstoffeintrag in das Modellgebiet in $\text{g}/(\text{m}^2\text{d})$ (nach Vorzeichenkonvention des Programms negativ)

J_{Versuch} approximierter Auslaugrate im Versuch in $\text{mg}/(\text{m}^2\text{d})$

f_0 Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der unebenen Unterseite der Sohle, $f_0 = 1,8$

Aufgrund der kugelförmigen Ausbreitung der Zementsuspension im Erdreich und der damit einhergehenden Oberflächenvergrößerung im Vergleich zu einer ebenen Fläche, wurde ein Korrekturfaktor von $f_0 = 1,8$ für den Schadstoffeintrag angesetzt. Dies entspricht der Oberfläche, die sich bei Halbkugeln ergibt.

Die Simulation wurde über einen Zeitraum von 6 Monaten durchgeführt. Hierzu wurde die Auslaugrate über den Versuchszeitraum hinaus anhand der letzten Ausgleichsfunktion bis zum Alter von 180 d extrapoliert.

4.2.4 Ort der Beurteilung

Der Schadstoffeintrag wurde nach Rücksprache mit dem SVA Umwelt in einem Bereich von $2 \cdot 2 \cdot 2 \text{ m}^3$ bewertet. Der Ort der Beurteilung ist in Bild 52 in der Aufsicht dargestellt.

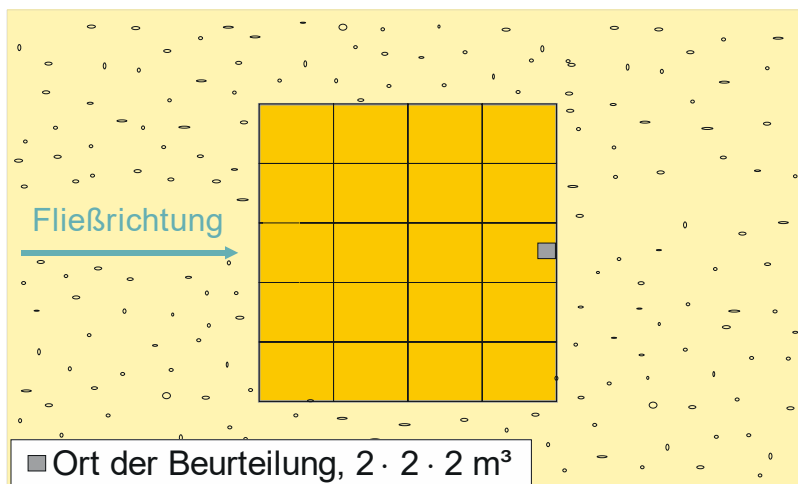


Bild 52: Lage der Beobachtungspunkte – Aufsicht

Zur Berechnung der mittleren Konzentration in diesem Grundwasservolumen wurden je 45 Beobachtungspunkte auf 6 Ebenen (Slice 4 – Slice 9) gesetzt. Die Beobachtungspunkte besitzen in x-Richtung einen äquidistanten Abstand von 0,25 m und in y-Richtung einen Abstand von 0,5 m (s. Bild 53).

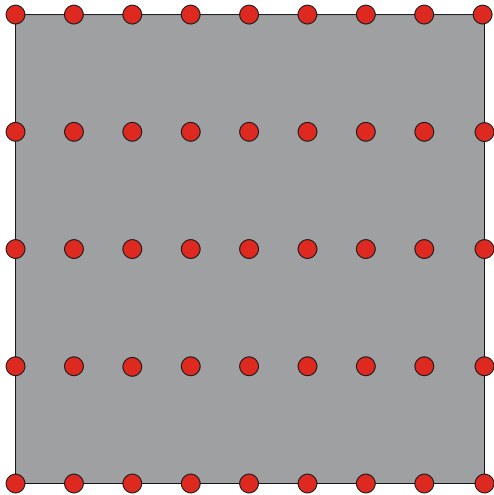


Bild 53: Beobachtungspunkte in der x-y-Ebene

Die Abstände in z-Richtung sind in Bild 54 dargestellt. Hier wurden die Abstände mit zunehmender Entfernung von der Sohle größer gewählt, um den Bereich mit höherer Konzentration nah an der Sohle genauer aufzuschlüsseln.

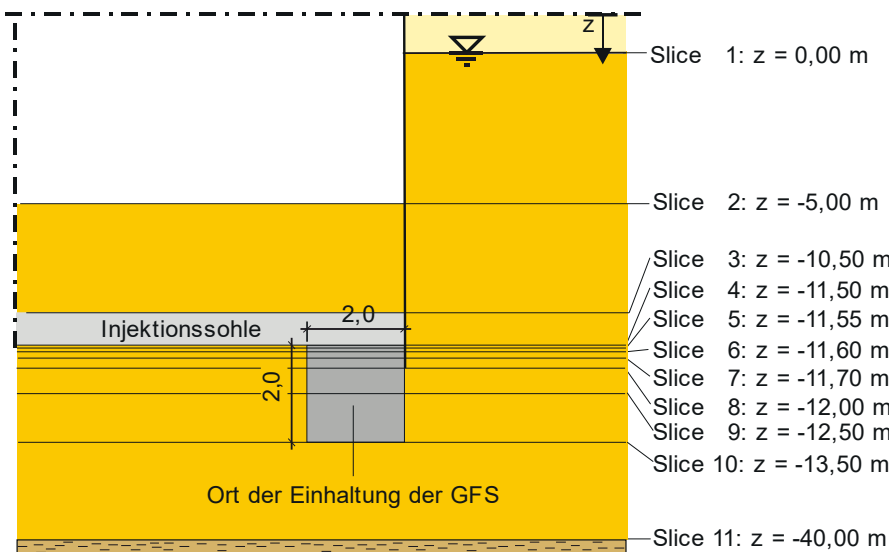


Bild 54: Lage der Beobachtungspunkte – vertikaler Schnitt

4.2.5 Transportmodellierung von Chrom

Im ersten Schritt wurde die Transportmodellierung für das Element Chrom an der Rezeptur RR4.4 mit den nach Gleichung 4 berechneten Auslaugraten aus den drei Versuchen (DSLTL mit verkürzter Vorlagerung, Frischbetonstandtest mit anschließendem DSLTL und Säulenversuch nach Schössner) durchgeführt.

Aus den simulierten Konzentrationsverläufen von Chrom in den lokalen Beobachtungspunkten wurde durch numerische Integration eine räumlich gemittelte Konzentration am Ort der Beurteilung berechnet und im Verlauf der Zeit dargestellt (s. Bild 55). Dieser Konzentrationsverlauf wurde anschließend über einen Zeitraum von 180 Tagen gemittelt.

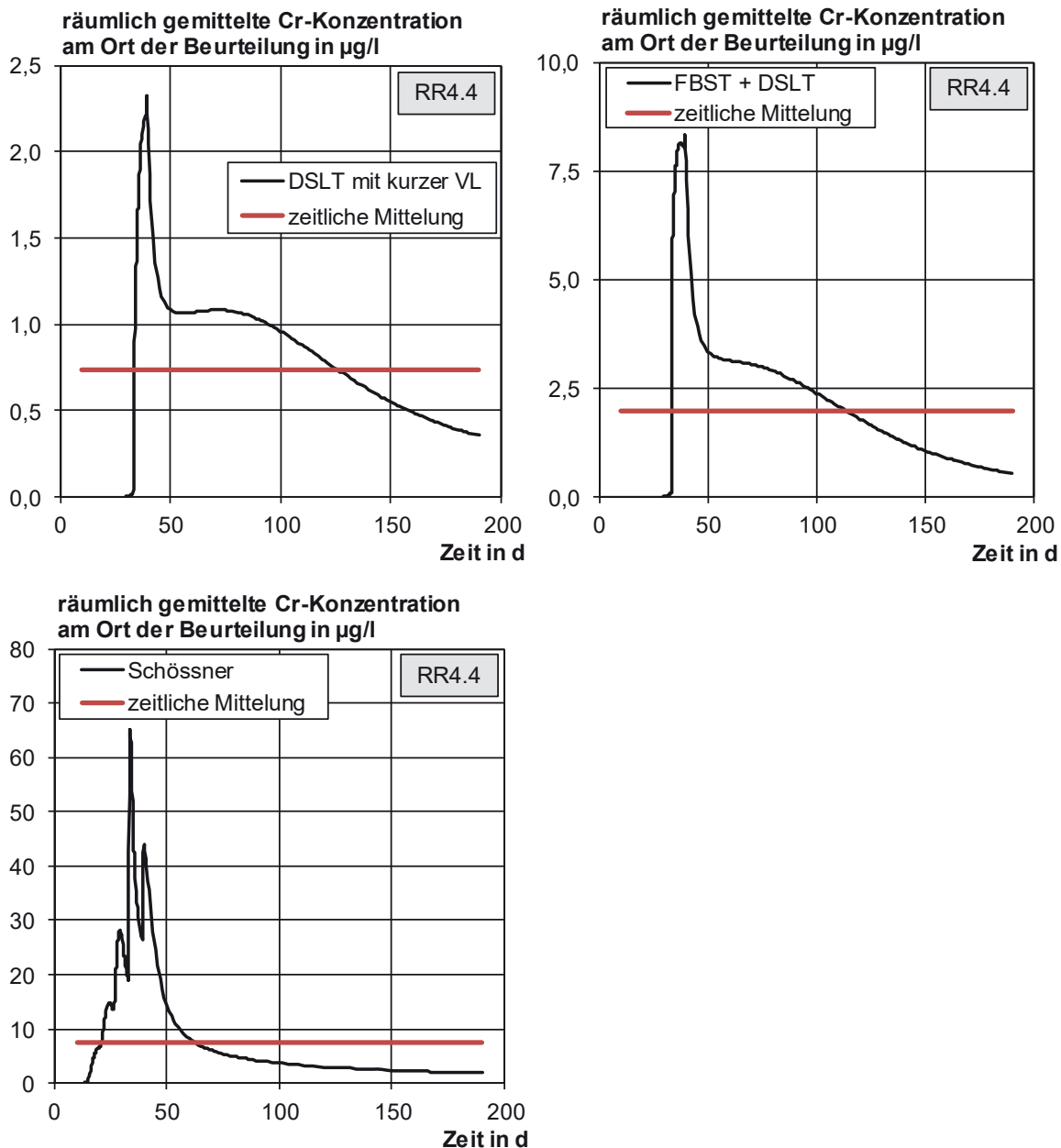


Bild 55: Verlauf der räumlich gemittelten Chromkonzentration im Kontaktgrundwasser am Ort der Beurteilung für die Rahmenrezeptur RR4.4; oben: langsame Fließgeschwindigkeit, unten: schnelle Fließgeschwindigkeit

Die derzeit vom DIBt herangezogene Geringfügigkeitsschwelle für das Grundwasser liegt für Chrom bei $7 \mu\text{g/l}$, /LAW04/. Die räumlich und zeitlich gemittelte Konzentration liegt beim DSLT mit kurzer Vorlagerung bei $0,74 \mu\text{g/l}$, beim Frischbetonstandtest mit anschließendem DSLT bei $2,0 \mu\text{g/l}$ und beim Säulenversuch bei $7,4 \mu\text{g/l}$. Somit tritt nur beim Säulenversuch nach Schössner eine leichte Überschreitung der GFS von 2004 auf.

Im Sachverständigenausschuss wurde entschieden, den Schwerpunkt auf die Standtests zu legen und mit der langsamen Fließgeschwindigkeit zu modellieren, da dieser Fall als realisti-

scher angesehen wurde. Im Folgenden wird daher der Säulenversuch nach Schössner nicht mehr betrachtet.

In Bild 56 und Bild 57 sind die Ergebnisse der übrigen Modellrechnungen für Chrom dargestellt. Im Anhang sind einige Beispielbilder aus der Simulation für die Rezeptur 3.3 mit dem Eintrag aus Frischbetonstandtests mit anschließendem DSLT dargestellt (s. Anhang B, Bild B7 bis Bild B9)

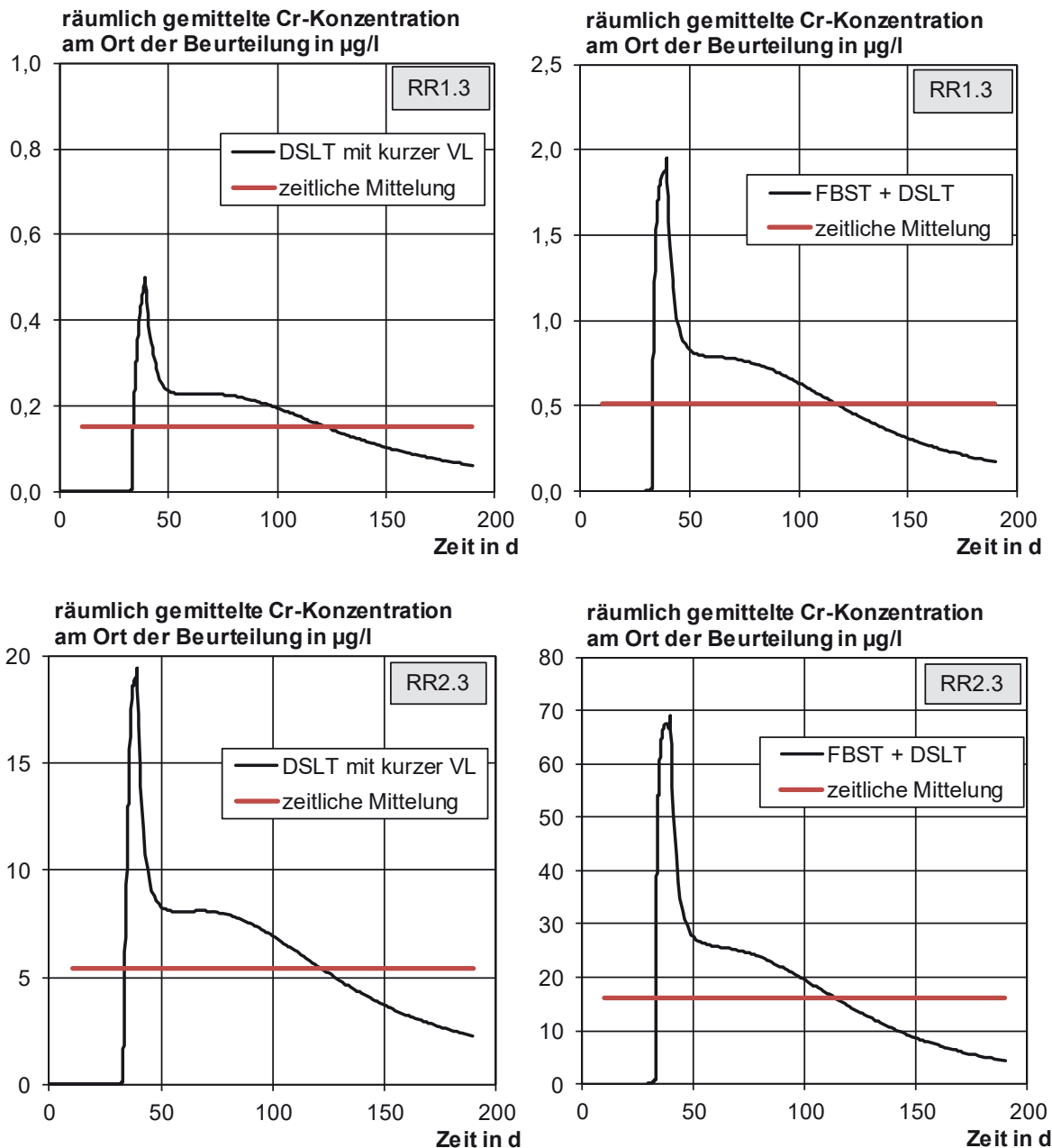


Bild 56: Verlauf der räumlich gemittelten Chromkonzentration im Kontaktgrundwasser am Ort der Beurteilung für die Rahmenrezepturen RR1.3 und 2.3

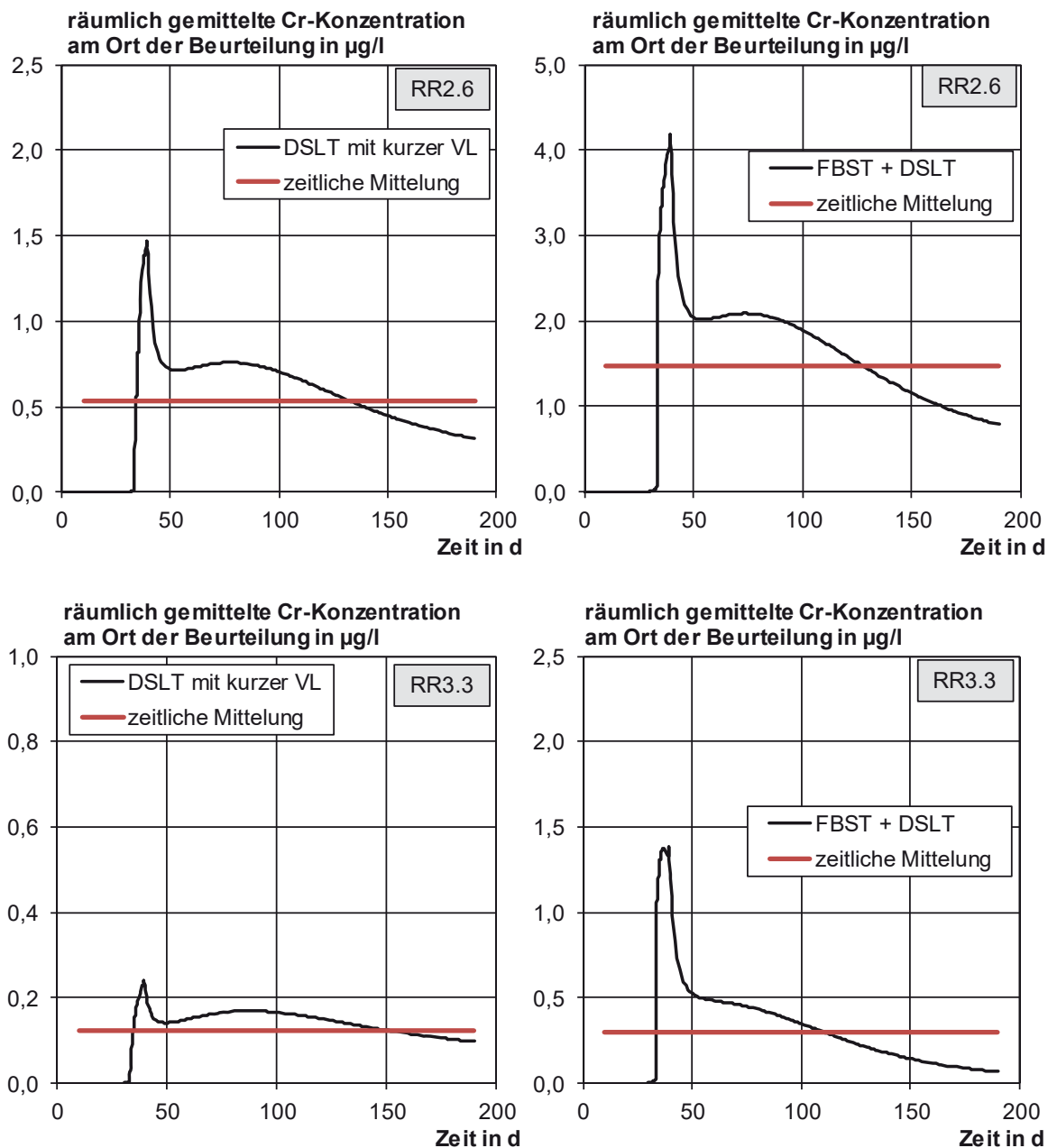


Bild 57: Verlauf der räumlich gemittelten Chromkonzentration im Kontaktgrundwasser am Ort der Beurteilung für die Rahmenrezepturen RR2.6 und 3.3

Eine Zusammenstellung der zeitlichen und räumlich gemittelten Konzentrationen zeigt Tabelle 11. Zum Vergleich sind die Gesamtfreisetzungen in den Auslaugversuchen angegeben.

Tabelle 11: Räumlich und zeitlich gemittelte Chromkonzentration aus den Transportmodellierungen im Vergleich zur Freisetzung im Versuch

Versuch	Suspension	Gemittelte Chromkonzentration über 180 Tage am Ort der Beurteilung	Gesamtfreisetzung im Versuch
	-	µg/l	mg/m ²
DSLTL mit verkürzter Vorlagerung	RR1.3	0,15	0,21
	RR2.3	5,40	7,05
	RR2.6	0,53	0,72
	RR3.3	0,12	0,16
	RR4.4	0,74	0,99
Frischbetonstandtest + DSLTL	RR1.3	0,51	0,69
	RR2.3	16,2	21,8
	RR2.6	1,47	2,01
	RR3.3	0,30	0,37
	RR4.4	1,98	2,53

Fett: Überschreitung der GFS von 2004

Die in der Tabelle 11 angegebenen Konzentrationen am Ort der Beurteilung zeigen, dass nur bei der Zementsuspension RR2.3 eine Überschreitung der Geringfügigkeitsschwelle berechnet wurde. Diese Rezeptur hat eine außergewöhnlich hohe Chromauslaugung.

4.2.6 Transportmodellierung von Vanadium

Als weiterer Parameter für die Transportmodellierung wurde Vanadium ausgewählt, da für diesen Parameter in den Versuchen meist Konzentrationen über der Bestimmungsgrenze ermittelt wurden und der Verlauf der Freisetzung z. T. deutlich von Chrom abweicht. Die Ergebnisse der räumlichen und zeitlichen Mittelung am Ort der Beurteilung sind in Bild 58 bis Bild 60 dargestellt. Die Geringfügigkeitsschwelle von Vanadium für das Grundwasser liegt bei 4 µg/l. Diese GFS wird derzeit jedoch vom DIBt nicht herangezogen.

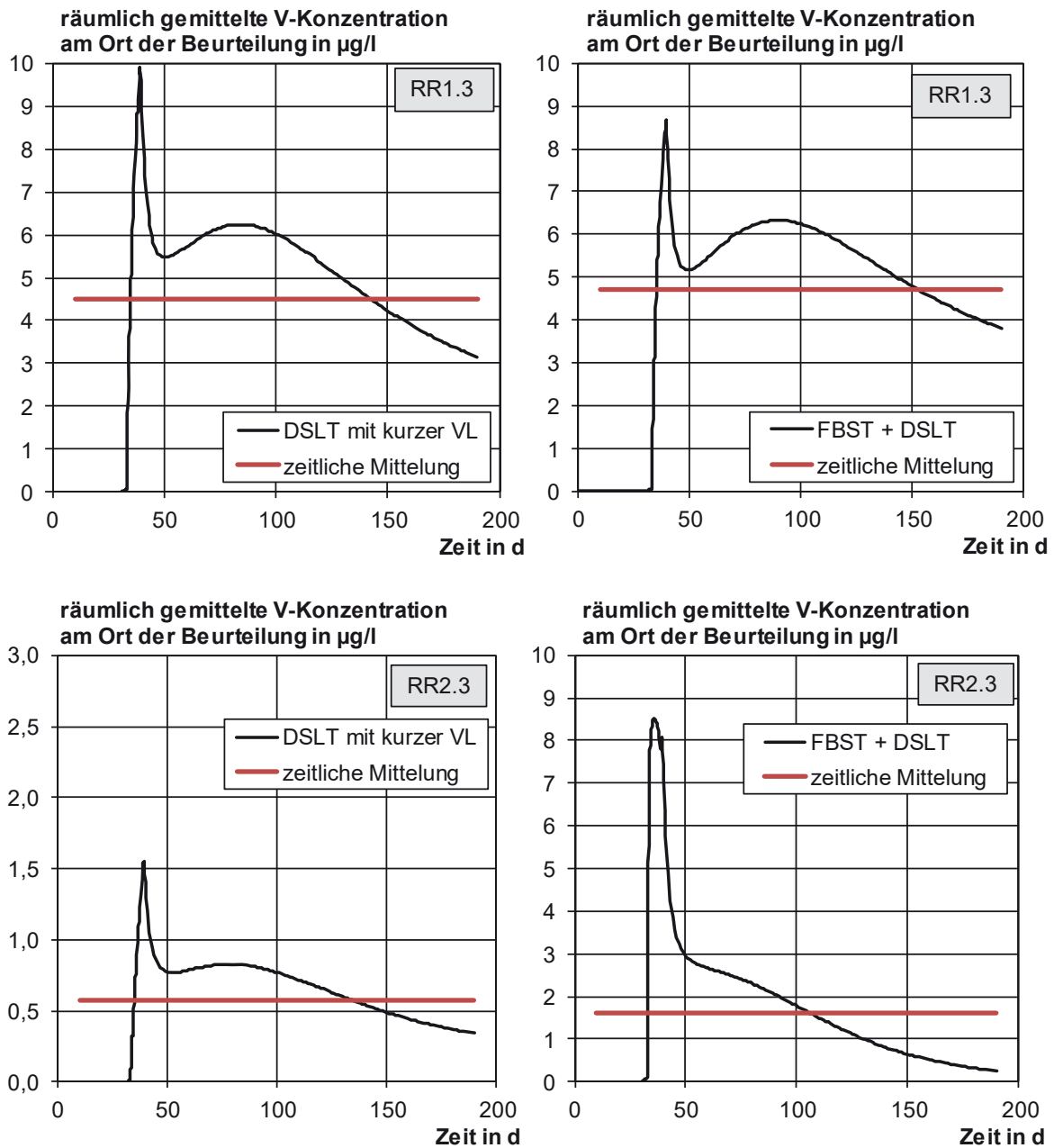


Bild 58: Verlauf der räumlich gemittelten Vanadiumkonzentration im Kontaktgrundwasser am Ort der Beurteilung für die Rahmenrezepturen RR1.3 und 2.3

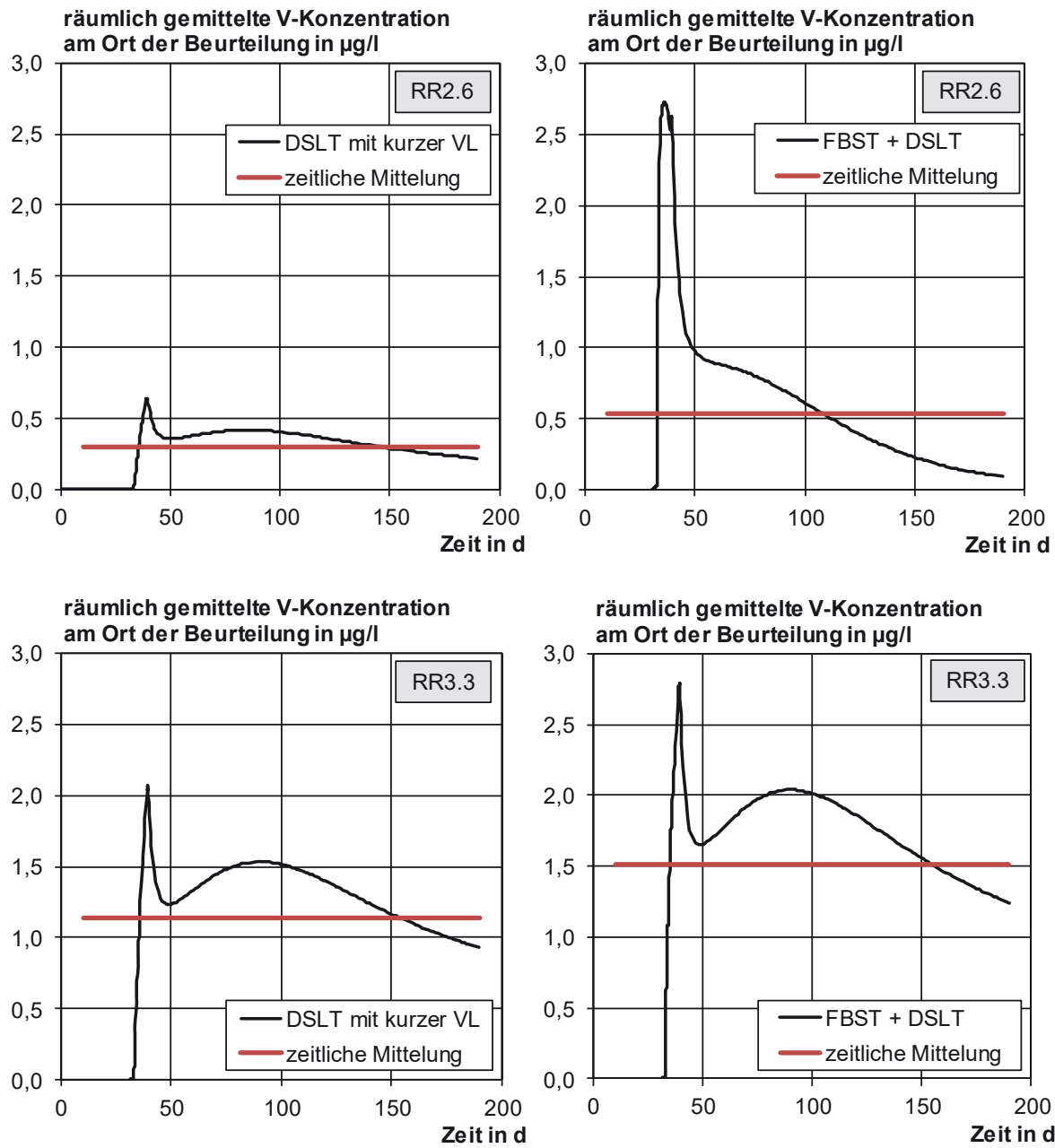


Bild 59: Verlauf der räumlich gemittelten Vanadiumkonzentration im Kontaktgrundwasser am Ort der Beurteilung für die Rahmenrezepturen RR2.6 und 3.3

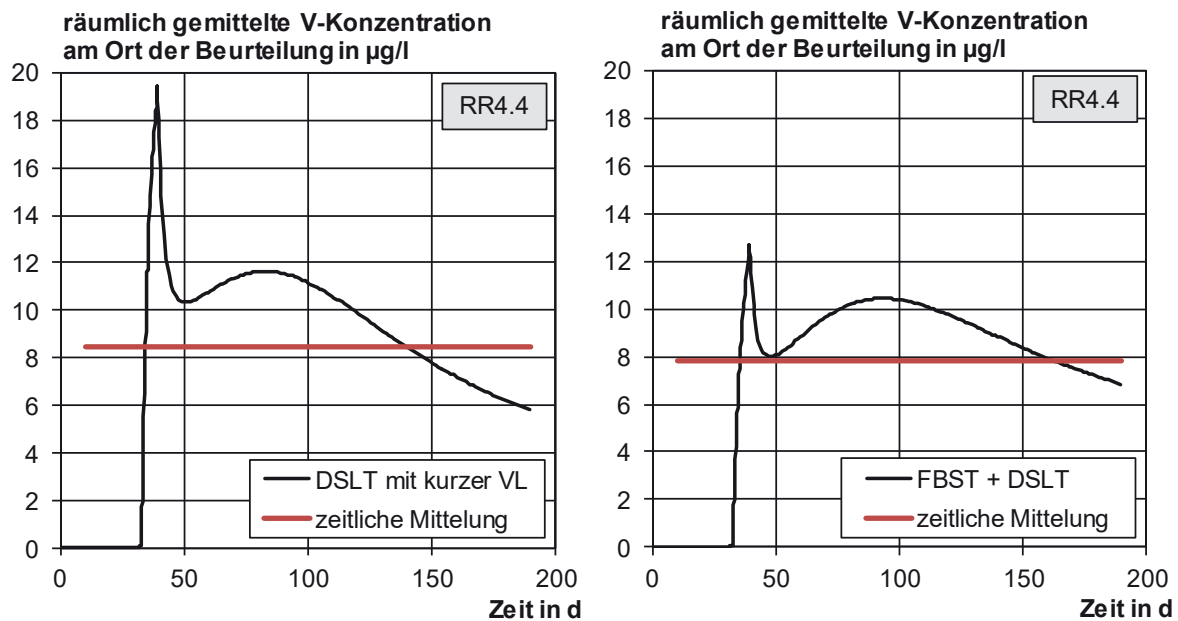


Bild 60: Verlauf der räumlich gemittelten Vanadiumkonzentration im Kontaktgrundwasser am Ort der Beurteilung für die Rahmenrezeptur RR4.4

Die zeitlich und räumlich gemittelten Konzentrationen zeigt Tabelle 12. Auch für diese Ergebnisse wurde eine Gegenüberstellung der mittleren Kontaktgrundwasserkonzentration und der Versuchsdaten vorgenommen.

Tabelle 12: Räumlich und zeitlich gemittelte Vanadium-Konzentration aus den Transportmodellierungen ohne Sorption im Vergleich zur Freisetzung im Versuch

Versuch	Suspension	Gemittelte Vanadiumkonzentration über 180 Tage am Ort der Beurteilung	Gesamtfreisetzung im Versuch nach 64 bzw. 65 d
	-	µg/l	mg/m ²
DSLIT mit verkürzter Vorlage-rung	RR1.3	4,51	6,07
	RR2.3	0,57	0,77
	RR2.6	0,30	0,40
	RR3.3	1,13	1,50
	RR4.4	8,43	11,12
Frischbetonstand-test + DSLT	RR1.3	4,70	6,25
	RR2.3	1,60	2,00
	RR2.6	0,54	0,66
	RR3.3	1,52	2,11
	RR4.4	7,81	10,16

Fett: Überschreitung der GFS von 2004

Die ermittelten Konzentrationen am Ort der Beurteilung zeigen, dass die Vanadium-GFS bei zwei Suspensionen mit den Daten aus beiden Versuchen nicht eingehalten wurde. Konzentrationen über der GFS treten bei diesem Parameter auch bei anderen Baustoffen in unter-

schiedlichen Einbauszenarien auf. Eine Berücksichtigung der Wechselwirkung mit dem Boden wäre hilfreich, um eine realistischere Bewertung der Umweltwirkungen dieses Schwermetalls zu erreichen. Hier ist eine detailliertere Literaturrecherche erforderlich, um geeignete Koeffizienten festzulegen.

4.2.7 Ableitung von zulässigen Freisetzungen im Versuch

Für die DSLTs mit verkürzter Vorlagerung sowie die Frischbetonstandtests wurde für jede Rezeptur die zeitlich (180 d) und räumlich (2 · 2 · 2 m³) gemittelte Chromkonzentration aus Tabelle 11 bzw. Tabelle 12 über der Gesamtfreisetzung in den jeweiligen Versuchen aufgetragen (s. Bild 61 und Bild 62).

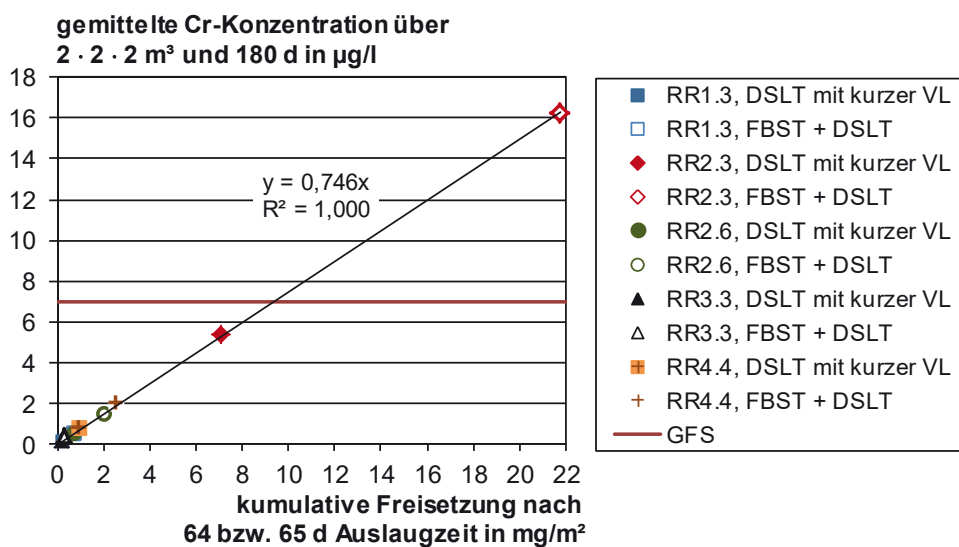


Bild 61: Korrelation zwischen der gemittelten Cr-Konzentration im Grundwasser und der Gesamtfreisetzung im DSLT mit kurzer Vorlagerungszeit bzw. im FBST + DSLT

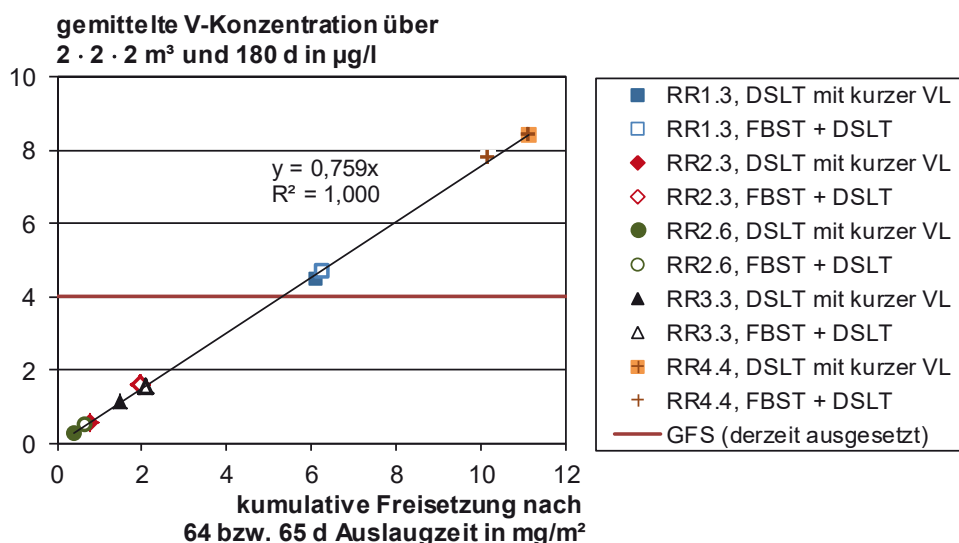


Bild 62: Korrelation zwischen der gemittelten V-Konzentration im Grundwasser und der Gesamtfreisetzung im DSLT mit kurzer Vorlagerungszeit bzw. im FBST + DSLT

Die Bilder zeigen, dass sich die Geradengleichungen trotz etwas unterschiedlichen Freisetzungsverläufen nur marginal unterscheiden. Die beiden Versuche lassen sich durch eine Gradengleichung sehr gut beschreiben. Es kann demnach bei Vernachlässigung der Wechselwirkungen mit dem Boden allgemein eine Steigung von 0,75 angesetzt werden. Somit ergibt sich die zulässige Freisetzung aus der Geringfügigkeitsschwelle gemäß Gleichung (5).

$$\text{zul } E_{64 \text{ d} / 65 \text{ d}} = \frac{\text{GFS}}{0,75} \quad (5)$$

zul $E_{64 \text{ d} / 65 \text{ d}}$ zulässige Gesamtfreisetzung im Versuch in $\text{mg}/(\text{m}^2\text{d})$

GFS Geringfügigkeitsschwelle in $\mu\text{g}/\text{l}$

Auch wenn der Korrelationsfaktor identisch ist, muss natürlich berücksichtigt werden, dass die Freisetzung im Frischbetonstandtest mit anschließendem DSLT bei manchen Parametern, wie z. B. Chrom, wesentlich höher ist als im DSLT mit verkürzter Vorlagerung. Wenn die Bewertung auf Basis des DSLT erfolgen soll, wäre es also zweckmäßig, neben dem Korrelationsfaktor parameterspezifische Faktoren zur Berücksichtigung der Frischbetonphase festzulegen.

Unter der Annahme, dass der Korrelationsfaktor auch für alle anderen Parameter gilt, wurden die zulässigen Freisetzungen aus den GFS berechnet und in Tabelle 13 den ermittelten Freisetzungen gegenüber gestellt. Es ist ersichtlich, dass Überschreitungen bei den Parametern Barium, Chrom, Thallium und Vanadium aufgetreten sind. Eine erhöhte Thalliumauslaugung ist bei der Zementsuspension RR 2.6 aufgetreten, die einen erhöhten Gesamtgehalt und eine hohe Konzentration im Schütteltest gezeigt hat. Diese Suspension ist wahrscheinlich nicht repräsentativ. Die beiden Suspensionen mit Überschreitungen bei Barium haben auch im Schütteltest erhöhte Bariumkonzentrationen gezeigt, obwohl die Gesamtgehalte unauffällig waren. Die erhöhte Chromfreisetzung bei der Suspension RR2.3 könnte ggf. auf eine unzureichende Chromatreduzierung zurückzuführen sein. Die Überschreitungen bei Vanadium sind systematisch. Eine Einhaltung der GFS in der Transportmodellierung kann hier wahrscheinlich bei einer Vielzahl von Produkten nur bei einer Berücksichtigung der Wechselwirkungen mit dem Boden erreicht werden.

Tabelle 13: Gegenüberstellung der abgeleiteten zulässigen Freisetzung mit den Versuchsergebnissen

Versuch	Parameter	GFS von 2004	zulässige Freisetzung Gl. (5)	Gesamtfreisetzung im Versuch nach 64 bzw. 65 d				
				RR1.3	RR2.3	RR2.6	RR3.3	RR4.4
				µg/l	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²
DSLIT mit verkürzter Vorlagerung	Antimon	5	6,67	< 0,064	0,133	0,242	< 0,064	0,292
	Arsen	10	13,3	< 0,64	< 0,64	< 0,64	< 0,64	1,59
	Barium	340	453	37,8	232	174	22,3	44,7
	Blei	7	9,33	< 0,117	0,705	0,782	< 0,067	0,522
	Bor	740	987	9,34	1,22	1,37	4,12	40,8
	Cadmium	0,5	0,67	< 0,064	< 0,064	< 0,064	< 0,064	< 0,064
	Chrom	7	9,33	0,206	7,05	0,719	0,162	0,988
	Kobalt	8	10,7	< 0,064	0,115	0,357	< 0,064	< 0,069
	Kupfer	14	18,7	0,196	0,150	0,258	0,158	< 0,128
	Molybdän	35	46,7	0,0931	0,906	0,157	< 0,064	15,3
	Nickel	14	18,7	0,37	< 0,074	< 0,070	< 0,064	0,256
	Quecksilber	0,2	0,27	0,0646	< 0,006	< 0,006	< 0,007	< 0,008
	Selen	7	9,33	< 0,64	< 0,64	< 0,64	< 0,64	< 0,64
	Thallium	0,8	1,07	< 0,064	< 0,064	0,810	< 0,064	< 0,064
	Vanadium	4	5,33	6,07	0,769	0,400	1,50	11,1
Zink	58	77,3	2,74	14,5	5,83	5,43	4,62	
Frischbetonstandtest + DSLIT	Antimon	5	6,67	< 0,104	< 0,131	< 0,178	< 0,104	< 0,290
	Arsen	10	13,3	< 1,04	< 1,04	< 1,04	< 1,04	< 2,40
	Barium	340	453	51,2	834	493	94,1	48,1
	Blei	7	9,33	0,191	0,223	0,324	< 0,134	0,200
	Bor	740	987	14,6	7,39	8,16	18,1	49,9
	Cadmium	0,5	0,67	< 0,104	< 0,104	< 0,104	< 0,104	< 0,104
	Chrom	7	9,33	0,692	21,8	2,03	< 0,373	2,53
	Kobalt	8	10,7	< 0,126	0,246	0,436	< 0,107	< 0,105
	Kupfer	14	18,7	0,492	0,944	1,42	1,01	< 0,269
	Molybdän	35	46,7	0,121	5,59	1,04	< 0,171	23,5
	Nickel	14	18,7	1,53	0,263	< 0,167	< 0,104	< 1,67
	Quecksilber	0,2	0,27	0,096	< 0,015	< 0,010	< 0,017	< 0,012
	Selen	7	9,33	< 1,04	< 1,04	< 1,04	< 1,48	< 1,05
	Thallium	0,8	1,07	< 0,104	< 0,104	1,81	< 0,175	< 0,104
	Vanadium	4	5,33	6,25	2,00	< 0,656	2,11	10,2
Zink	58	77,3	6,83	15,7	19,3	15,1	12,4	

Fett: Überschreitung der GFS

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projekts wurde die Umweltverträglichkeit von Zementsuspensionen untersucht. Dazu wurde eine Auswahl von 30 Zementsuspensionen analysiert, welche in Absprache mit den Industriepartnern nach ihrer Zusammensetzung und Anwendung in vier Rahmenrezepturen eingeteilt wurden. Anhand der Feststoffgehalte an Spurenelementen und Schwermetallen sowie mittels Schütteltests wurde die Auswahl auf fünf Produkte eingegrenzt. Diese wurden mit verschiedenen Auslaugverfahren geprüft. Angewendet wurde der europäisch harmonisierte Standtest, der sogenannte DSLT (dynamic surface leaching test) mit unterschiedlichen Vorlagerungszeiten, ein Frischbetonstandtest mit anschließendem DSLT und der Säulenversuch nach Schössner. Die gewonnenen Eluate wurden auf ihre Spurenelement- bzw. Schwermetallkonzentrationen analysiert. Die Ergebnisse wurden ausgewertet und verglichen. Es zeigte sich, dass die Versuche systematische Unterschiede aufweisen. Dies ist vor allem auf die unterschiedlichen Probenalter bzw. Reaktionsgrade zu Versuchsbeginn zurückzuführen. Ein weiterer Faktor ist die Fließgeschwindigkeit des Eluents. So unterscheidet sich das Auslaugverhalten im Säulenversuch nach Schössner maßgeblich von dem der anderen Experimente. Da der Versuch vor dem Erstarren der Zementsuspension gestartet wird, können überproportional große Mengen an umweltrelevanten Stoffen ausgewaschen werden. Die Bewertung der Ergebnisse ist daher problematisch.

Die Ergebnisse der Auslaugversuche wurden in ein Transportmodell implementiert. Anhand der Versuchsdaten sollte eine realitätsnahe Simulation des Schadstoffeintrages erfolgen, um die Konzentrationen im Grundwasser zu prognostizieren und eine Bewertung der Umweltverträglichkeit zu ermöglichen. Dazu wurden Simulationen für die Schwermetalle Chrom und Vanadium an einem spezifischen Modellgebiet durchgeführt.

Nach der für Festbeton üblichen Vorgehensweise wurde die Retardierung der Schwermetalle im Boden vernachlässigt und eine räumlich und zeitlich gemittelte Kontaktgrundwasserkonzentration berechnet. Es wurde gezeigt, dass die Versuchsdaten mit den Simulationen korrelieren. Daher lassen sich Obergrenzen für die Freisetzung im Versuch ableiten, die der Geringfügigkeitsschwelle entsprechen.

Diese Grenzwerte werden im Fall von Chrom in aller Regel eingehalten, lediglich bei einer Rezeptur mit ungewöhnlich hoher Chromauslaugung ergaben sich stark erhöhte Werte.

Bei Vanadium lag die Freisetzung in den Versuchen bei mehreren Zementsuspensionen über der Obergrenze. Hier wäre eine Berücksichtigung der Wechselwirkungen mit dem Boden empfehlenswert, um zu einer realitätsnäheren Bewertung zu kommen. Bisher wird der Parameter Vanadium vom DIBt nicht bewertet. Bei einzelnen Produkten können bei einer Berücksichtigung der Frischbetonphase auch Überschreitungen bzgl. Barium und Thallium auftreten.

Zur Erstellung eines Bewertungskonzepts für die Zementsuspensionen sind noch weitere Schritte erforderlich. Es muss entschieden werden, welcher Versuch als Bewertungsgrundlage dienen soll und somit auch zur Ermittlung des Schadstoffeintrags im Modell heranzuziehen ist. Wenn Wechselwirkungen mit dem Boden berücksichtigt werden sollen, sind die

Freundlich-Koeffizienten stoffspezifisch zu wählen und jeder umweltrelevante Parameter separat zu simulieren.

Auf Grundlage der im Projekt erzielten Ergebnisse wird folgender Vorschlag für das weitere Vorgehen unterbreitet:

1) Auswahl eines geeigneten Versuchs:

Da mit dem DSLT ein europäisch harmonisierter Versuch zur Verfügung steht, der mit vertretbarem Laboraufwand durchzuführen ist, wird diese Versuchsmethodik empfohlen. Allerdings sollte der Versuch in möglichst jungem Probenalter beginnen. Im ersten Optimierungsschritt soll dazu eine Vorgehensweise zur Ermittlung des frühestmöglichen Ausschaltzeitpunkts festgelegt werden. Diese Ausschaltfrist ist produktspezifisch anhand des Reaktionsverlaufs zu wählen. Zur Festlegung eines geeigneten Zeitpunkts kann z. B. die Wärmeflusskurve oder die Flügelscherfestigkeit herangezogen werden.

2) Optimierung des Schadstoffeintrags

Da im DSLT trotz kurzer Vorlagerung die Frischbetonphase nicht betrachtet wird, sollte überprüft werden, ob parameterspezifisch eine Hochrechnung der Freisetzung erforderlich ist. Nach den Ergebnissen dieses Projekts erscheint eine Hochrechnung z. B. für Chrom angemessen. Ein entsprechender Faktor könnte durch einen Vergleich der Freisetzungen im DSLT mit minimaler Vorlagerungszeit und dem Frischbetonstandtest abgeleitet werden und sollte an mehreren Mischungen bestätigt werden.

3) Festlegung des Modellgebiets

In diesem Projekt wurde ein Modellgebiet für sehr unterschiedliche Rahmenrezepturen gewählt. Es ist unmöglich, alle Anwendungsfälle von Zementsuspensionen in einem Modell abzubilden. Es sollte daher entschieden werden, ob mehrere Modelle für unterschiedliche Einsatzgebiete konzipiert werden sollen, oder ob eine beispielhafte Bewertung anhand des hier gewählten Modells einer HDI-Injektionssohle ausreicht.

4) Ableitung von Grenzwerten für den DSLT mit minimaler Vorlagerungszeit

Mit dem optimierten Schadstoffeintrag könnte für einige Parameter, wie z. B. Vanadium, Modellrechnungen mit einer Berücksichtigung der Retardierung durchgeführt werden. Die Sorption ist stark vom pH-Wert abhängig, daher spielt die Pufferung des pH-Werts im Grundwasserleiter eine wesentliche Rolle. Um realistische Sorptionskoeffizienten ansetzen zu können, sollte die Pufferwirkung anhand von Literaturdaten abgeschätzt oder ggf. geochemisch modelliert werden. Auf diese Weise könnte auch der Bereich, in dem eine pH-Wert-Änderung auftritt, genauer spezifiziert werden. Dieses grundsätzliche Vorgehen sowie ggf. die expliziten Freundlich-Koeffizienten sind mit der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser abzustimmen. Analog zum Vorgehen in diesem Projekt kann dann eine Korrelation zwischen mittlerer Kontaktgrundwasserkonzentration und der Freisetzung im Laborversuch abgeleitet und eine Obergrenze festgelegt werden, die der geringfügigkeitsschwelle entspricht.

5) Anwendung des Bewertungskonzepts im Zulassungsverfahren

Bei der konkreten Umsetzung im Zulassungsverfahren ist eine Vorgehensweise festzulegen, die mit angemessenem Aufwand umgesetzt werden kann. Da Rezepturen teilweise ganz spezifisch für konkrete Anwendungsfälle konzipiert werden, erscheint es nicht zweckmäßig, für jede Rezeptur eine Zulassung zu beantragen. Dies könnte durch eine übergreifende Zulassung von Rahmenrezepturen vermieden werden. Der Hersteller müsste hierzu eine Auswahl an Suspensionen herstellen, die die Bandbreite der Rahmenrezeptur abdecken. Anhand von Vorversuchen könnte dann analog zu diesem Projekt eine Auswahl für die Auslaugung im DSLT getroffen werden.

6) Zusätzlicher Aspekt: Huminstoff-Mobilisierung

Neben der Auslaugung von Schwermetallen ist ein weiterer Aspekt bzgl. der Umweltwirkungen von Zementsuspensionen zu beachten: Durch die pH-Wert Erhöhung können im Boden enthaltene Huminstoffe mobilisiert werden. Diese Stoffe sind in der Wasseraufbereitung schwer beherrschbar und können Schwermetalle in Form von löslichen organischen Komplexen mobilisieren. Eine Mobilisierung von Huminstoffen ist daher unerwünscht und es wäre zu von Interesse, in welchem Bereich um die Injektionsmaßnahme eine relevante pH-Wert Erhöhung auftritt. Dies hängt mit der unter Punkt 4 erwähnten Pufferkapazität des Bodens zusammen. An dieser Stelle besteht noch Forschungsbedarf.

6 Literatur

- /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
- /Bra09a/ Brameshuber, W.; Vollpracht, A.: Untersuchungen zum Auslaugverhalten von Abdichtungs- und Injektionsstoffen. Aachen: Institut für Bauforschung, RWTH Aachen University, 2009. - Forschungsbericht Nr. F 7048
- /Bra09b/ Brameshuber, W.; Vollpracht, A.: Modellrechnungen zur Untersuchung der Auswirkungen der neuen LAWA-Regelungen auf die Bewertung der Umweltverträglichkeit von Beton. Aachen: Institut für Bauforschung, 2005. - Forschungsbericht Nr. F 909
- /Bra10/ Brameshuber, W.; Vollpracht, A.: Bewertung der Umweltverträglichkeit von Abdichtungs- und Injektionsstoffen. Aachen: Institut für Bauforschung, RWTH Aachen University, 2010. - Forschungsbericht Nr. F 7039
- /Bra13a/ Brameshuber, W.; Lin, X.; Vollpracht, A.: Auslaugverhalten von Zementsuspensionen. Aachen: Institut für Bauforschung, 2013. – Forschungsbericht Nr. F 7093
- /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

- /CEN14/ CEN/TC 351/WG: Bauprodukte – Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen – Teil 2: Horizontale dynamische Oberflächenauslaugprüfung; deutsche Fassung CEN/TS 16637-2, Nov. 2014
- /DAf05/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie - Bestimmung der Freisetzung anorganischer Stoffe durch Auslaugung aus zementgebundenen Baustoffen, Beuth Verlag, 2005
- /DAf15/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb); TA Umwelt: DAfStb-Richtlinie - Bestimmung der Freisetzung umweltrelevanter Stoffe aus zementgebundenen Baustoffen in der dynamischen Oberflächenauslaugprüfung; - Entwurf November 2015
- /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
- /LAW04/ Bund / Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellen für das Grundwasser, erhältlich bei Kulturbuch-Verlag GmbH, Postfach 47 04 49, 12313, Dezember 2004

Anhang A – Tabellen

Tabelle A1: Chemische Zusammensetzung der Rahmenrezepturen 1 bestimmt mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) in M-%

vertraulich

Tabelle A2: Chemische Zusammensetzung der Rahmenrezepturen 2 bestimmt mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) in M-%

vertraulich

Tabelle A3: Chemische Zusammensetzung der Rahmenrezepturen 3 bestimmt mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) in M-%

vertraulich

Tabelle A4: Chemische Zusammensetzung der Rahmenrezepturen 4 bestimmt mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) in M-%

vertraulich

Tabelle A5: Schwermetall- / Spurenelementgehalte nach Königwasseraufschluss mit Mikrowellenbehandlung nach DIN EN 16174:2012 der Rahmenrezepturen 1

vertraulich

Tabelle A6: Schwermetall- / Spurenelementgehalte nach Königwasseraufschluss mit Mikrowellenbehandlung nach DIN EN 16174:2012 der Rahmenrezepturen 2

vertraulich

Tabelle A7: Schwermetall- / Spurenelementgehalte nach Königwasseraufschluss mit Mikrowellenbehandlung nach DIN EN 16174:2012 der Rahmenrezepturen 3

vertraulich

Tabelle A8: Schwermetall- / Spurenelementgehalte nach Königwasseraufschluss mit Mikrowellenbehandlung nach DIN EN 16174:2012 der Rahmenrezepturen 4

vertraulich

Tabelle A9: Schwermetall- / Spurenelementkonzentrationen in den Schütteltest-Eluaten (Wasser : Feststoff = 10 : 1) an den ausgewählten Produkten

Parameter	Eluatkonzentrationen in µg/l					
	RR1.3	RR2.3	RR2.6	RR3.3	RR4.2	RR4.4
Sb	0,11	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
As	<1	<1	<1	<1	<1	2,16
Ba	642	5950	4835	1755	1585	859
Pb	<1	0,42	1,14	<1	5,69	0,93
B	19,2	3,40	5,10	14,0	5,08	500
Cd	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,29
Cr	28,7	43,6	4,98	2,75	12,0	225
Co	<0,1	1,83	6,17	0,45	1,03	0,33
Cu	0,27	0,27	6,54	<0,1	1,44	1,49
Mo	5,34	11,6	4,02	1,28	10,9	861
Ni	7,22	0,76	1,79	0,31	0,89	0,32
Hg	1,51	<0,01	0,01	0,33	<0,01	0,21
Se	1,62	<1	<1	1,40	1,01	5,10
Tl	0,61	<0,1	11,33	1,46	3,25	0,19
V	2,22	0,22	0,16	0,44	0,19	4,17
Zn	4,24	4,57	7,10	2,25	9,76	4,72

Tabelle A10: Analyseergebnisse der Eluate aus dem Frischbetonstandtest an der „Mörtel“-Probe mit RR1.3

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von					
			0,02 d	0,08 d	0,19 d	0,33 d	0,58 d	1 d
pH	A	-	10,53	10,68	10,60	10,56	10,89	10,61
	B		10,44	–	10,59	10,50	10,76	10,97
Leitfähigkeit	A	µS/cm	141	168	147	138	154	202
	B		129	–	128	109	134	181
Redoxpotential	A	mV	110	100	118	122	101	89
	B		116	–	125	125	107	96
Natrium, Na	A	mg/l	13,7	10,5	7,4	5,3	5,7	7,4
	B		12,2	–	6,8	4,3	5,4	7,2
Kalium, K	A		1,0	0,8	0,6	0,6	0,7	1,0
	B		0,8	–	0,6	0,5	0,6	0,9
Calcium, Ca	A		8,5	13,2	11,6	9,5	10,1	12,9
	B		7,9	–	10,0	7,1	9,0	10,9
Sulfat, SO ₄ ²⁻	A		17,99	12,24	5,73	1,94	1,30	0,71
	B		15,27	–	3,94	1,26	0,28	0,12
Chlorid, Cl ⁻	A		2,47	1,85	1,12	0,77	0,49	0,64
	B		2,27	–	1,24	0,36	0,41	0,59
TOC	A		3,57	3,37	3,24	2,57	2,02	2,87
	B		3,37	–	3,92	2,60	5,37	5,39

–.: nicht bestimmt

Tabelle A10: Fortsetzung

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von																																																																																																																																																																																																									
			0,02 d	0,08 d	0,19 d	0,33 d	0,58 d	1 d																																																																																																																																																																																																				
Antimon (Sb)	A	µg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1																																																																																																																																																																																																							
	B			–						Arsen (As)	A	< 1	< 1	< 1					B	–	Barium (Ba)	A	17,33	13,63	8,33	6,69	8,87	19,80	B	17,11	–	9,87	4,60	9,61	13,26	Blei (Pb)	A	0,58	0,30	0,15	0,20	< 0,1	0,20	B	0,47	–	0,18	0,14	< 0,1	Bor (B)	A	4,00	2,84	1,39	0,99	1,68	2,33	B	3,79	–	1,78	< 1	1,95	2,54	Cadmium (Cd)	A	< 0,1	< 0,1	< 0,1					B	–	Chrom (Cr)	A	1,91	1,61	1,15	0,68	0,29	0,23	B	1,77	–	0,90	0,35	0,31	0,20	Kobalt (Co)	A	0,31	0,12	< 0,1					B	0,27	–	Kupfer (Cu)	A	1,34	0,99	0,30	0,39	0,22	0,42	B	1,03	–	0,34	0,15	0,23	0,81	Molybdän (Mo)	A	0,13	0,13	0,10	< 0,1				B	0,14	–	< 0,1	Nickel (Ni)	A	2,03	2,05	2,18	4,96	3,95	3,27	B	2,25	–	2,27	2,68	0,59	1,49	Quecksilber (Hg)	A	0,02	0,01	0,02	0,02	< 0,01	0,02	B	0,02	–	0,01	< 0,01	0,01	Selen (Se)	A	< 1	< 1	< 1					B	–	Thallium (Tl)	A	< 0,1	< 0,1	< 0,1					B	–	Vanadium (V)	A	3,16	2,02	0,81	0,68	0,77	1,65	B	2,94	–	0,96	0,50	0,96	1,45	Zink (Zn)	A	4,47	4,27	2,00	4,34	1,96	20,98
Arsen (As)	A		< 1	< 1	< 1																																																																																																																																																																																																							
	B			–						Barium (Ba)	A	17,33	13,63	8,33	6,69	8,87	19,80	B	17,11	–	9,87	4,60	9,61	13,26	Blei (Pb)	A	0,58	0,30	0,15	0,20	< 0,1	0,20	B	0,47	–	0,18	0,14	< 0,1	Bor (B)	A	4,00	2,84	1,39	0,99	1,68	2,33	B	3,79	–	1,78	< 1	1,95	2,54	Cadmium (Cd)	A	< 0,1	< 0,1	< 0,1					B	–	Chrom (Cr)	A	1,91	1,61	1,15	0,68	0,29	0,23	B	1,77	–	0,90	0,35	0,31	0,20	Kobalt (Co)	A	0,31	0,12	< 0,1					B	0,27	–	Kupfer (Cu)	A	1,34	0,99	0,30	0,39	0,22	0,42	B	1,03	–	0,34	0,15	0,23	0,81	Molybdän (Mo)	A	0,13	0,13	0,10	< 0,1				B	0,14	–	< 0,1	Nickel (Ni)	A	2,03	2,05	2,18	4,96	3,95	3,27	B	2,25	–	2,27	2,68	0,59	1,49	Quecksilber (Hg)	A	0,02	0,01	0,02	0,02	< 0,01	0,02	B	0,02	–	0,01	< 0,01	0,01	Selen (Se)	A	< 1	< 1	< 1					B	–	Thallium (Tl)	A	< 0,1	< 0,1	< 0,1					B	–	Vanadium (V)	A	3,16	2,02	0,81	0,68	0,77	1,65	B	2,94	–	0,96	0,50	0,96	1,45	Zink (Zn)	A	4,47	4,27	2,00	4,34	1,96	20,98	B	17,16	–	10,31	2,90	9,53	2,95				
Barium (Ba)	A		17,33	13,63	8,33	6,69	8,87	19,80																																																																																																																																																																																																				
	B		17,11	–	9,87	4,60	9,61	13,26																																																																																																																																																																																																				
Blei (Pb)	A		0,58	0,30	0,15	0,20	< 0,1	0,20																																																																																																																																																																																																				
	B		0,47	–	0,18	0,14		< 0,1																																																																																																																																																																																																				
Bor (B)	A		4,00	2,84	1,39	0,99	1,68	2,33																																																																																																																																																																																																				
	B		3,79	–	1,78	< 1	1,95	2,54																																																																																																																																																																																																				
Cadmium (Cd)	A		< 0,1	< 0,1	< 0,1																																																																																																																																																																																																							
	B			–						Chrom (Cr)	A	1,91	1,61	1,15	0,68	0,29	0,23	B	1,77	–	0,90	0,35	0,31	0,20	Kobalt (Co)	A	0,31	0,12	< 0,1					B	0,27	–	Kupfer (Cu)	A	1,34	0,99	0,30	0,39	0,22	0,42	B	1,03	–	0,34	0,15	0,23	0,81	Molybdän (Mo)	A	0,13	0,13	0,10	< 0,1				B	0,14	–	< 0,1	Nickel (Ni)	A	2,03	2,05	2,18	4,96	3,95	3,27	B	2,25	–	2,27	2,68	0,59	1,49	Quecksilber (Hg)	A	0,02	0,01	0,02	0,02	< 0,01	0,02	B	0,02	–	0,01	< 0,01	0,01	Selen (Se)	A	< 1	< 1	< 1					B	–	Thallium (Tl)	A	< 0,1	< 0,1	< 0,1					B	–	Vanadium (V)	A	3,16	2,02	0,81	0,68	0,77	1,65	B	2,94	–	0,96	0,50	0,96	1,45	Zink (Zn)	A	4,47	4,27	2,00	4,34	1,96	20,98	B	17,16	–	10,31	2,90	9,53	2,95																																																											
Chrom (Cr)	A		1,91	1,61	1,15	0,68	0,29	0,23																																																																																																																																																																																																				
	B		1,77	–	0,90	0,35	0,31	0,20																																																																																																																																																																																																				
Kobalt (Co)	A		0,31	0,12	< 0,1																																																																																																																																																																																																							
	B		0,27	–						Kupfer (Cu)	A	1,34	0,99	0,30	0,39	0,22	0,42	B	1,03	–	0,34	0,15	0,23	0,81	Molybdän (Mo)	A	0,13	0,13	0,10	< 0,1				B	0,14	–	< 0,1	Nickel (Ni)	A	2,03	2,05	2,18	4,96	3,95	3,27	B	2,25	–	2,27	2,68	0,59	1,49	Quecksilber (Hg)	A	0,02	0,01	0,02	0,02	< 0,01	0,02	B	0,02	–	0,01	< 0,01	0,01	Selen (Se)	A	< 1	< 1	< 1					B	–	Thallium (Tl)	A	< 0,1	< 0,1	< 0,1					B	–	Vanadium (V)	A	3,16	2,02	0,81	0,68	0,77	1,65	B	2,94	–	0,96	0,50	0,96	1,45	Zink (Zn)	A	4,47	4,27	2,00	4,34	1,96	20,98	B	17,16	–	10,31	2,90	9,53	2,95																																																																																						
Kupfer (Cu)	A		1,34	0,99	0,30	0,39	0,22	0,42																																																																																																																																																																																																				
	B		1,03	–	0,34	0,15	0,23	0,81																																																																																																																																																																																																				
Molybdän (Mo)	A		0,13	0,13	0,10	< 0,1																																																																																																																																																																																																						
	B		0,14	–	< 0,1					Nickel (Ni)	A	2,03	2,05	2,18	4,96	3,95	3,27	B	2,25	–	2,27	2,68	0,59	1,49	Quecksilber (Hg)	A	0,02	0,01	0,02	0,02	< 0,01	0,02	B	0,02	–	0,01	< 0,01	0,01	Selen (Se)	A	< 1	< 1	< 1					B	–	Thallium (Tl)	A	< 0,1	< 0,1	< 0,1					B	–	Vanadium (V)	A	3,16	2,02	0,81	0,68	0,77	1,65	B	2,94	–	0,96	0,50	0,96	1,45	Zink (Zn)	A	4,47	4,27	2,00	4,34	1,96	20,98	B	17,16	–	10,31	2,90	9,53	2,95																																																																																																																		
Nickel (Ni)	A		2,03	2,05	2,18	4,96	3,95	3,27																																																																																																																																																																																																				
	B		2,25	–	2,27	2,68	0,59	1,49																																																																																																																																																																																																				
Quecksilber (Hg)	A		0,02	0,01	0,02	0,02	< 0,01	0,02																																																																																																																																																																																																				
	B		0,02	–	0,01	< 0,01		0,01																																																																																																																																																																																																				
Selen (Se)	A		< 1	< 1	< 1																																																																																																																																																																																																							
	B			–						Thallium (Tl)	A	< 0,1	< 0,1	< 0,1					B	–	Vanadium (V)	A	3,16	2,02	0,81	0,68	0,77	1,65	B	2,94	–	0,96	0,50	0,96	1,45	Zink (Zn)	A	4,47	4,27	2,00	4,34	1,96	20,98	B	17,16	–	10,31	2,90	9,53	2,95																																																																																																																																																										
Thallium (Tl)	A		< 0,1	< 0,1	< 0,1																																																																																																																																																																																																							
	B			–						Vanadium (V)	A	3,16	2,02	0,81	0,68	0,77	1,65	B	2,94	–	0,96	0,50	0,96	1,45	Zink (Zn)	A	4,47	4,27	2,00	4,34	1,96	20,98	B	17,16	–	10,31	2,90	9,53	2,95																																																																																																																																																																					
Vanadium (V)	A	3,16	2,02	0,81	0,68	0,77	1,65																																																																																																																																																																																																					
	B	2,94	–	0,96	0,50	0,96	1,45																																																																																																																																																																																																					
Zink (Zn)	A	4,47	4,27	2,00	4,34	1,96	20,98																																																																																																																																																																																																					
	B	17,16	–	10,31	2,90	9,53	2,95																																																																																																																																																																																																					

–: nicht bestimmt

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A11: Analyseergebnisse der Eluate aus dem an den Frischbetonstandtest anschließenden DSLT an der „Mörtel“-Probe mit RR1.3

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von						
			2 d	3,25 d	5 d	10 d	17 d	37 d	65 d
pH	A	-	11,13	11,08	10,96	12,02	11,84	11,90	11,87
	B		11,06	11,01	10,97	12,30	11,98	11,90	11,85
Leitfähigkeit	A	μS/cm	331	326	327	781	835	1332	1437
	B		301	299	334	780	812	1282	1390
Redoxpotential	A	mV	89	186	103	47	104	-9	91
	B		86	168	95	56	90	-23	84
Natrium, Na	A	mg/l	12,9	12,0	11,7	20,1	15,5	16,8	10,5
	B		13,3	11,7	11,9	20,3	15,8	17,2	10,6
Kalium, K	A		1,8	1,8	2,1	5,2	6,2	10,7	10,9
	B		1,8	1,8	2,1	5,1	6,2	10,5	10,7
Calcium, Ca	A		19,0	21,8	24,4	53,9	53,1	109,3	124,8
	B		18,7	19,3	24,5	51,9	60,9	103,8	118,0
Sulfat, SO ₄ ²⁻	A		0,89	0,78	1,00	3,92	4,31	9,05	9,09
	B		0,94	0,72	0,93	4,37	3,20	9,47	8,70
Chlorid, Cl ⁻	A		1,15	1,12	1,05	2,31	1,71	1,45	0,73
	B		1,10	1,06	1,12	1,76	2,34	1,47	0,74
TOC	A		2,65	1,61	< 1	< 1	1,18	1,14	< 1
	B		2,75	2,93		1,25	1,53	1,09	1,15

Tabelle A11: Fortsetzung

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von						
			2 d	3,25 d	5 d	10 d	17 d	37 d	65 d
Antimon (Sb)	A	µg/l	< 0,1						
	B								
Arsen (As)	A		< 1						
	B								
Barium (Ba)	A		25,72	40,70	32,96	68,29	83,90	139,77	194,56
	B		23,74	28,38	31,12	73,51	75,19	128,13	192,34
Blei (Pb)	A		< 0,1	0,36	< 0,1	0,10	0,13	< 0,1	< 0,1
	B			0,21		0,17	0,11		0,17
Bor (B)	A		3,85	5,62	7,36	19,62	27,19	45,83	66,50
	B		5,06	5,72	6,34	16,91	25,77	42,15	61,16
Cadmium (Cd)	A		< 0,1						
	B								
Chrom (Cr)	A		< 0,1	0,50	0,22	0,32	0,57	0,62	0,86
	B		0,26	0,47	0,17	0,66	0,48	0,46	0,64
Kobalt (Co)	A		< 0,1	0,14	< 0,1	< 0,1	< 0,1		0,12
	B			< 0,1		0,12			0,15
Kupfer (Cu)	A		0,19	1,05	< 0,1		0,63	0,39	0,51
	B		0,38	0,56			0,39	0,22	0,39
Molybdän (Mo)	A		0,14	0,11	0,14	0,10	0,14	0,10	0,11
	B		0,13	0,12	0,14	< 0,1	0,15	0,13	< 0,1
Nickel (Ni)	A		2,62	2,09	0,36	0,25	< 0,1	0,94	< 0,1
	B		0,64	0,71	0,15	0,31		< 0,1	
Quecksilber (Hg)	A		0,04	0,08	0,14	0,28	0,12	0,27	0,15
	B		0,04	0,07	0,13	0,24	0,25	0,28	0,16
Selen (Se)	A		< 1						
	B								
Thallium (Tl)	A		< 0,1						
	B								
Vanadium (V)	A	2,36	4,30	4,26	9,91	11,99	16,08	21,59	
	B	3,17	3,64	4,10	10,90	10,96	15,27	19,74	
Zink (Zn)	A	2,52	3,30	3,01	8,13	2,17	5,51	8,18	
	B	2,41	4,51	8,75	7,81	2,48	2,06	24,8	

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A12: Analyseergebnisse der Eluate aus dem Frischbetonstandtest an der „Mörtel“-
 Probe mit RR2.3

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von					
			0,02 d	0,08 d	0,19 d	0,33 d	0,58 d	1 d
pH	A	-	11,89	11,68	11,67	11,88	11,94	12,05
	B		11,82	11,67	11,70	11,88	11,96	12,07
Leitfähigkeit	A	μS/cm	1094	805	803	1049	1304	1645
	B		959	742	890	1084	1371	1701
Redoxpotential	A	mV	223	232	229	210	210	211
	B		208	220	218	199	186	200
Natrium, Na	A	mg/l	15,2	13,8	12,9	11,1	12,7	12,7
	B		15,3	12,5	12,9	9,3	10,0	9,3
Kalium, K	A		40,5	38,7	36,0	32,9	39,0	40,1
	B		41,2	36,4	33,9	26,0	29,6	30,5
Calcium, Ca	A		93,5	54,8	58,5	78,4	94,2	137
	B		81,2	52,4	68,2	85,6	111	173
Sulfat, SO ₄ ²⁻	A		55,8	38,9	24,2	14,7	3,33	1,74
	B		47,3	27,6	25,2	13,0	2,25	1,74
Chlorid, Cl ⁻	A		1,58	1,78	1,49	0,90	0,72	0,58
	B		1,87	1,73	1,58	0,89	0,58	0,75
TOC	A		11,7	10,6	7,93	8,26	5,36	5,49
	B		10,6	6,68	7,07	6,44	4,43	3,45

Tabelle A12: Fortsetzung

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von					
			0,02 d	0,08 d	0,19 d	0,33 d	0,58 d	1 d
Antimon (Sb)	A	µg/l	0,24	0,17	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
	B		0,22	0,11	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Arsen (As)	A		< 1					
	B							
Barium (Ba)	A		78,8	50,5	34,0	82,8	330	476
	B		68,8	40,1	39,0	98,4	367	497
Blei (Pb)	A		< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,19	0,19	0,20
	B			0,11		0,16	0,19	0,19
Bor (B)	A		12,4	12,7	10,5	5,55	7,26	4,91
	B		12,6	10,7	10,2	5,42	6,55	5,24
Cadmium (Cd)	A		< 0,1					
	B							
Chrom (Cr)	A		61,4	38,2	30,7	19,1	5,38	4,33
	B		56,5	33,2	34,1	16,5	5,02	4,86
Kobalt (Co)	A		0,14	< 0,1		0,12	0,13	0,15
	B		0,11			0,12	0,13	0,15
Kupfer (Cu)	A		1,09	0,80	0,95	1,07	1,10	0,87
	B		1,03	1,12	1,01	0,88	1,08	0,96
Molybdän (Mo)	A		21,5	14,5	12,8	6,55	1,34	0,89
	B		20,1	13,0	13,7	5,21	1,17	0,91
Nickel (Ni)	A		0,12	< 0,1		0,30	0,17	0,31
	B		< 0,1			0,26	0,82	0,12
Quecksilber (Hg)	A		0,12	< 0,01				
	B		< 0,01					
Selen (Se)	A		< 1					
	B							
Thallium (Tl)	A		< 0,1					
	B							
Vanadium (V)	A	14,2	8,17	2,01	1,34	0,62	0,33	
	B	11,6	4,29	2,45	1,78	0,30	0,22	
Zink (Zn)	A	29,5	10,8	2,85	10,9	7,78	3,96	
	B	7,43	8,21	46,6	3,22	8,59	3,09	

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A13: Analyseergebnisse der Eluate aus dem an den Frischbetonstandtest anschließenden DSLT an der „Mörtel“-Probe mit RR2.3

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von						
			2 d	3,25 d	5 d	10 d	17 d	37 d	65 d
pH	A	-	12,2	12,1	12,6	12,3	12,3	12,7	12,6
	B		12,2	12,1	12,3	12,3	12,3	12,6	12,6
Leitfähigkeit	A	μS/cm	2195	2016	2073	3670	4190	6310	6740
	B		2269	2047	2155	3780	4210	6200	6380
Redoxpotential	A	mV	182	169	189	183	171	164	127
	B		199	196	190	172	155	145	153
Natrium, Na	A	mg/l	15,6	12,1	11,5	19,7	17,9	28,6	29,3
	B		11,4	9,1	9,4	17,3	16,4	26,6	28,4
Kalium, K	A		52,3	43,6	44,6	83,1	75,5	115,3	113
	B		40,6	35,2	38,2	73,4	69,0	110,2	112
Calcium, Ca	A		163	150	41,2	282	332	503	519
	B		179	158	165	299	324	501	510
Sulfat, SO ₄ ²⁻	A		2,83	3,40	2,00	3,60	1,10	0,90	4,10
	B		1,67	1,50	1,40	0,80	0,90	1,10	2,30
Chlorid, Cl ⁻	A		0,80	0,40	0,30	0,30	0,20	0,20	0,30
	B		0,74	0,40	0,30	0,20	0,20	0,30	0,30
TOC	A		3,15	1,42	1,91	3,86	3,46	8,2	6,1
	B		2,35	1,05	1,33	2,50	2,80	8,7	3,0

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A13: Fortsetzung

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von						
			2 d	3,25 d	5 d	10 d	17 d	37 d	65 d
Antimon (Sb)	A	µg/l	< 0,1			0,10	0,11	0,16	0,18
	B					< 0,1	0,11	0,17	0,19
Arsen (As)	A		< 1						
	B								
Barium (Ba)	A		677	607	676	1430	1730	2490	2170
	B		709	619	677	1380	1600	2120	1790
Blei (Pb)	A		0,21	0,19	0,19	0,26	0,26	0,44	0,51
	B		0,19	0,15	0,16	0,26	0,22	0,39	0,44
Bor (B)	A		10,2	9,25	7,03	4,59	3,97	2,95	3,19
	B		9,51	9,67	6,88	5,00	3,56	2,19	2,83
Cadmium (Cd)	A		<0,1						
	B								
Chrom (Cr)	A		5,61	6,21	7,30	12,1	16,8	29,6	35,9
	B		6,68	7,19	8,43	13,7	17,0	31,5	37,9
Kobalt (Co)	A		0,20	0,22	0,24	0,33	0,36	0,37	0,68
	B		0,21	0,21	0,22	0,33	0,33	0,35	0,65
Kupfer (Cu)	A		1,01	1,16	0,91	0,79	0,71	0,36	1,12
	B		0,89	0,88	0,82	0,75	0,65	0,40	1,17
Molybdän (Mo)	A		1,08	1,08	1,18	1,93	2,10	3,37	2,80
	B		1,19	1,17	1,30	2,16	2,06	3,54	3,00
Nickel (Ni)	A		0,16	0,24	0,26	0,33	0,28	0,16	0,74
	B		0,12	0,14	0,12	0,25	0,31	0,16	0,73
Quecksilber (Hg)	A		< 0,01						
	B								
Selen (Se)	A		< 1						
	B								
Thallium (Tl)	A		< 0,1						
	B								
Vanadium (V)	A	0,18	0,33	0,32	0,25	0,16	0,12	0,25	
	B	0,10	0,12	0,13	0,15	0,14	0,11	0,28	
Zink (Zn)	A	34,9	35,7	6,13	3,86	3,10	18,6	24,7	
	B	3,87	31,4	11,7	2,64	3,23	5,17	64,3	

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A14: Analyseergebnisse der Eluate aus dem Frischbetonstandtest an der „Mörtel“-
 Probe mit RR2.6

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von					
			0,02 d	0,08 d	0,19 d	0,33 d	0,58 d	1 d
pH	A	-	11,68	11,66	11,67	11,78	11,92	12,02
	B		11,79	11,60	11,70	11,78	11,87	12,00
Leitfähigkeit	A	μS/cm	715	652	727	916	1121	1525
	B		932	569	721	886	1154	1465
Redoxpotential	A	mV	233	237	233	188	230	264
	B		196	218	216	248	215	242
Natrium, Na	A	mg/l	3,4	2,8	2,8	2,1	3,6	4,4
	B		3,3	2,7	2,6	2,0	3,4	4,0
Kalium, K	A		53,6	32,8	27,1	21,0	23,5	26,4
	B		50,1	30,3	24,2	19,1	22,3	24,4
Calcium, Ca	A		50,7	51,5	63,8	71,7	93,2	148
	B		73,4	50,2	62,1	71,4	94,7	128
Sulfat, SO ₄ ²⁻	A		32,1	23,5	20,3	7,52	2,04	2,00
	B		34,3	22,4	19,2	6,57	2,19	1,79
Chlorid, Cl ⁻	A		10,0	6,76	5,47	3,18	1,64	1,29
	B		32,1	23,5	20,3	7,52	2,04	2,00
TOC	A		2,48	1,41	2,45	1,85	1,02	1,83
	B		2,27	1,98	2,70	2,27	1,26	< 1

Tabelle A14: Fortsetzung

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von					
			0,02 d	0,08 d	0,19 d	0,33 d	0,58 d	1 d
Antimon (Sb)	A	µg/l	0,21	0,19	< 0,1			
	B		0,29	0,15				
Arsen (As)	A		< 1					
	B							
Barium (Ba)	A		34,9	30,5	31,3	65,7	329	576
	B		44,5	28,1	30,7	65,1	321	512
Blei (Pb)	A		< 0,1		0,16	0,33	0,32	0,35
	B				0,13	0,31	0,32	0,31
Bor (B)	A		10,6	11,3	10,1	7,54	6,44	5,99
	B		10,5	11,8	9,8	7,20	6,27	6,90
Cadmium (Cd)	A		< 0,1					
	B							
Chrom (Cr)	A		2,0	1,8	1,4	1,4	0,40	0,31
	B		3,0	1,5	1,7	1,4	0,42	0,29
Kobalt (Co)	A		0,13	0,12	0,15	0,23	0,23	0,31
	B		0,17	0,11	0,15	0,20	0,24	0,27
Kupfer (Cu)	A		2,40	1,65	1,70	1,53	1,31	1,37
	B		2,25	1,59	1,50	1,44	1,35	1,24
Molybdän (Mo)	A		5,5	2,9	2,0	0,67	0,11	< 0,1
	B		5,4	2,6	1,6	0,49	< 0,1	
Nickel (Ni)	A		< 0,1			0,15	0,13	< 0,1
	B					0,17	0,11	
Quecksilber (Hg)	A		< 0,01					
	B							
Selen (Se)	A		1,06	< 1				
	B		1,01					
Thallium (Tl)	A		< 0,1			0,15	0,39	0,88
	B					0,15	0,41	0,86
Vanadium (V)	A	2,9	2,47	0,84	0,28	< 0,1	< 0,1	
	B	4,3	1,91	0,76	0,34	0,16		
Zink (Zn)	A	9,1	5,5	3,60	6,6	35,1	6,10	
	B	104	3,51	3,0	18,1	57,7	4,66	

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A15: Analyseergebnisse der Eluate aus dem an den Frischbetonstandtest anschließenden DSLT an der „Mörtel“-Probe mit RR2.6

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von						
			2 d	3,25 d	5 d	10 d	17 d	37 d	65 d
pH	A	-	12,2	12,1	12,6	12,2	12,2	12,5	12,5
	B		12,2	12,0	12,6	12,2	12,2	12,5	12,5
Leitfähigkeit	A	μS/cm	2347	2248	2099	3080	3270	5140	4990
	B		2301	2134	2103	3120	3160	4760	4560
Redoxpotential	A	mV	206	208	199	181	178	162	159
	B		187	202	206	171	163	175	142
Natrium, Na	A	mg/l	7,0	5,5	4,5	7,3	7,2	12,1	12,5
	B		6,4	5,5	4,7	7,7	7,0	12,0	12,5
Kalium, K	A		38,4	31,3	27,8	53,1	55,6	103	107
	B		37,1	30,2	29,4	53,3	54,2	102	106
Calcium, Ca	A		186	183	113	245	277	411	109
	B		184	173	83,9	253	257	369	372
Sulfat, SO ₄ ²⁻	A		1,70	1,40	1,40	0,80	0,90	1,00	1,60
	B		2,07	1,20	1,00	0,70	0,80	1,30	1,60
Chlorid, Cl ⁻	A		1,19	0,70	0,40	0,60	0,80	2,10	4,00
	B		1,00	0,60	0,40	0,60	0,80	2,00	3,90
TOC	A		< 1	< 1	284	150	7,35	6,5	< 1
	B		< 1	41,7	2,09	< 1	< 1	99	< 1

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A15: Fortsetzung

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von							
			2 d	3,25 d	5 d	10 d	17 d	37 d	65 d	
Antimon (Sb)	A	µg/l	< 0,1				0,15	0,21	0,34	0,40
	B						0,15	0,21	0,34	0,42
Arsen (As)	A		< 1							
	B									
Barium (Ba)	A		720	558	481	769	777	1100	978	
	B		657	496	457	695	705	980	889	
Blei (Pb)	A		0,39	0,34	0,43	0,24	0,29	0,54	0,54	
	B		0,39	0,52	0,29	0,31	0,30	0,44	0,43	
Bor (B)	A		13,1	8,75	7,37	6,65	4,40	4,15	3,88	
	B		10,2	11,8	6,31	8,98	4,73	4,88	4,31	
Cadmium (Cd)	A		< 0,1							
	B									
Chrom (Cr)	A		0,74	0,79	1,09	1,5	2,4	4,42	7,50	
	B		0,64	0,84	1,03	1,6	2,0	4,10	6,53	
Kobalt (Co)	A		0,48	0,45	0,43	0,55	0,55	0,78	1,22	
	B		0,43	0,40	0,40	0,53	0,52	0,73	1,14	
Kupfer (Cu)	A		1,19	1,03	1,23	1,05	1,06	0,83	1,77	
	B		1,42	1,25	1,08	0,89	0,88	0,84	1,70	
Molybdän (Mo)	A		0,14	0,13	0,14	0,23	0,28	0,67	0,76	
	B		0,12	0,14	0,15	0,25	0,26	0,62	0,65	
Nickel (Ni)	A		0,12	0,13	0,14	0,19	0,42	0,10	0,44	
	B		0,14	0,14	0,13	0,17	0,20	0,10	0,38	
Quecksilber (Hg)	A		< 0,01							
	B									
Selen (Se)	A		< 1							
	B									
Thallium (Tl)	A		1,82	1,99	2,06	3,56	3,39	4,64	4,22	
	B		1,74	1,81	1,72	3,32	3,34	4,45	3,72	
Vanadium (V)	A	< 0,1				< 0,1	0,13	0,42		
	B					0,12	0,16	0,50		
Zink (Zn)	A	7,7	30,3	5,90	19,7	6,37	22,2	20,5		
	B	6,77	44,1	5,6	4,07	14,7	13,5	23,4		

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A16: Analyseergebnisse der Eluate aus dem Frischbetonstandtest an der „Mörtel“-Probe mit RR3.3

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von					
			0,02 d	0,08 d	0,19 d	0,33 d	0,58 d	1 d
pH	A	-	11,9	11,1	11,2	11,3	11,4	11,5
	B		11,8	11,0	11,2	11,3	11,4	11,5
Leitfähigkeit	A	μS/cm	240	234	272	303	373	496
	B		229	285	277	320	378	484
Redoxpotential	A	mV	234	196	181	215	135	89
	B		222	208	181	154	102	61
Natrium, Na	A	mg/l	13,7	8,9	7,5	5,4	5,3	5,9
	B		14,1	9,1	8,1	6,1	6,0	6,5
Kalium, K	A		21,0	14,4	12,5	9,6	9,8	11,2
	B		21,6	15,3	13,8	11,1	11,1	12,5
Calcium, Ca	A		14,6	16,7	19,3	23,1	29,1	37,1
	B		13,2	15,7	18,5	8,9	28,0	36,0
Sulfat, SO ₄ ²⁻	A		28,2	9,60	4,00	1,30	2,00	3,50
	B		28,7	9,40	2,80	1,70	2,50	3,10
Chlorid, Cl ⁻	A		14,8	8,90	7,00	4,90	4,60	4,30
	B		15,7	9,70	7,60	5,50	5,10	4,50
TOC	A		2,90	2,57	2,60	1,76	1,09	29,1
	B		3,84	2,71	2,98	< 1	< 1	< 1

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A16: Fortsetzung

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von					
			0,02 d	0,08 d	0,19 d	0,33 d	0,58 d	1 d
Antimon (Sb)	A	µg/l	< 0,1					
	B							
Arsen (As)	A		< 1					
	B							
Barium (Ba)	A		11,4	12,3	19,5	43,9	76,5	108
	B		14,1	14,2	21,0	48,9	85,7	122
Blei (Pb)	A		0,16	0,14	< 0,1	0,19	0,11	< 0,1
	B		0,34	0,19	0,13	0,26	< 0,1	
Bor (B)	A		10,4	10,0	7,92	7,27	8,08	5,66
	B		10,8	10,3	7,76	7,94	7,32	7,38
Cadmium (Cd)	A		< 0,1					
	B							
Chrom (Cr)	A		1,0	1,1	0,4	0,1	0,19	< 0,1
	B		1,1	1,0	0,4	0,1	< 0,1	< 0,1
Kobalt (Co)	A		< 0,1					
	B							
Kupfer (Cu)	A		1,65	1,30	1,53	1,42	1,22	0,70
	B		1,92	1,47	1,48	1,25	1,16	0,90
Molybdän (Mo)	A		0,6	0,3	0,2	0,10	0,11	< 0,1
	B		0,6	0,3	0,2	0,13	< 0,1	
Nickel (Ni)	A		< 0,1					
	B							
Quecksilber (Hg)	A		< 0,01			0,01	0,04	0,03
	B					< 0,01	0,04	0,03
Selen (Se)	A		< 1					1,39
	B							< 1
Thallium (Tl)	A		0,38	0,26	0,18	0,16	0,15	< 0,1
	B		0,41	0,26	0,17	0,14	0,11	< 0,1
Vanadium (V)	A	1,0	0,73	0,48	0,37	0,39	0,57	
	B	0,8	0,46	0,36	0,29	0,25	0,33	
Zink (Zn)	A	4,2	4,1	3,16	3,3	25,1	18,2	
	B	9,82	3,43	3,4	9,38	4,23	17,3	

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A17: Analyseergebnisse der Eluate aus dem an den Frischbetonstandtest anschließenden DSLT an der „Mörtel“-Probe mit RR3.3

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von						
			2 d	3,25 d	5 d	10 d	17 d	37 d	65 d
pH	A	-	11,7	11,5	11,9	11,6	11,6	11,9	12,0
	B		11,7	11,4	11,8	11,6	11,5	11,9	11,9
Leitfähigkeit	A	μS/cm	672	489	520	779	784	1178	1431
	B		655	554	428	711	714	1148	1288
Redoxpotential	A	mV	41	5	37	52	89	144	111
	B		11	225	22	77	116	117	130
Natrium, Na	A	mg/l	8,1	5,1	2,8	3,0	2,3	3,1	3,8
	B		9,0	4,9	2,8	2,8	2,2	3,0	3,5
Kalium, K	A		15,4	8,8	4,8	5,0	3,6	5,6	6,3
	B		16,9	8,7	4,7	4,6	3,3	5,2	5,4
Calcium, Ca	A		50,6	39,8	10,0	75,0	66,2	100	136
	B		50,0	47,1	21,6	69,0	63,7	114	125
Sulfat, SO ₄ ²⁻	A		4,40	9,80	6,80	6,80	4,00	7,00	10,3
	B		5,20	8,90	6,60	6,10	3,80	6,90	8,80
Chlorid, Cl ⁻	A		3,50	1,50	0,90	0,90	0,60	0,70	0,70
	B		3,90	1,40	0,90	0,80	0,50	0,60	0,50
TOC	A		4,92	< 1	< 1	< 1	< 1	180	< 1
	B		< 1	127	69,4	40,7	4	23	5,6

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A17: Fortsetzung

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von							
			2 d	3,25 d	5 d	10 d	17 d	37 d	65 d	
Antimon (Sb)	A	µg/l	< 0,1							
	B									
Arsen (As)	A		< 1							
	B									
Barium (Ba)	A		159	118	95	113	102	139	190	
	B		181	110	84	100	92	135	158	
Blei (Pb)	A		< 0,1						0,13	< 0,1
	B								< 0,1	
Bor (B)	A		13,1	15,2	14,8	21,8	24,5	42,3	47,2	
	B		16,9	15,3	13,6	20,9	23,0	38,8	44,1	
Cadmium (Cd)	A		< 0,1							
	B									
Chrom (Cr)	A		0,13	0,12	0,13	< 0,1	< 0,1	0,29	0,87	
	B		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	0,39	0,92	
Kobalt (Co)	A		<0,1							0,15
	B									0,14
Kupfer (Cu)	A		0,50	0,64	0,65	0,47	0,59	0,54	1,25	
	B		0,51	0,36	0,41	0,51	0,68	0,72	1,39	
Molybdän (Mo)	A		< 0,1							
	B									
Nickel (Ni)	A		< 0,1							
	B									
Quecksilber (Hg)	A		0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	
	B		0,02	< 0,01	< 0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	
Selen (Se)	A		5,53	3,05	< 1					
	B		2,63	3,48						
Thallium (Tl)	A		< 0,1						0,21	0,28
	B								0,24	0,23
Vanadium (V)	A	0,90	1,24	1,66	2,92	3,82	5,55	7,95		
	B	0,50	0,76	1,06	2,42	3,44	5,69	8,93		
Zink (Zn)	A	2,8	41,2	3,65	1,81	8,83	17,3	35,6		
	B	9,87	75,5	5,6	1,99	10,3	51,8	6,27		

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A18: Analyseergebnisse der Eluate aus dem Frischbetonstandtest an der „Mörtel“-Probe mit RR4.4

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von					
			0,02 d	0,08 d	0,19 d	0,33 d	0,58 d	1 d
pH	A	-	10,7	10,9	10,9	11,1	9,60	11,0
	B		10,8	10,9	10,9	11,1	10,7	11,0
Leitfähigkeit	A	μS/cm	205	218	210	225	266	275
	B		209	226	221	236	256	258
Redoxpotential	A	mV	167	155	180	207	135	128
	B		31	171	174	129	126	132
Natrium, Na	A	mg/l	11,3	7,6	5,2	4,1	4,8	5,3
	B		11,5	8,1	5,5	4,1	4,4	4,6
Kalium, K	A		11,4	7,9	6,0	5,6	6,7	7,7
	B		11,7	8,4	6,1	5,5	6,2	6,9
Calcium, Ca	A		12,1	16,6	18,0	18,0	18,5	17,4
	B		12,5	15,5	18,0	18,7	18,2	17,4
Sulfat, SO ₄ ²⁻	A		42,60	20,10	12,60	9,00	4,30	1,94
	B		35,25	21,03	13,14	8,87	3,98	1,46
Chlorid, Cl ⁻	A		3,30	2,05	1,50	1,00	1,00	0,96
	B		3,28	2,27	1,58	0,97	0,90	0,84
TOC	A		2,42	2,63	2,43	2,24	4,65	4,39
	B		2,80	2,48	2,96	2,77	3,82	3,10

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A18: Fortsetzung

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von					
			0,02 d	0,08 d	0,19 d	0,33 d	0,58 d	1 d
Antimon (Sb)	A	µg/l	0,18	0,15	< 0,1			0,13
	B		0,20	< 0,1	< 0,1			0,12
Arsen (As)	A		1,77	1,92	< 1			
	B		2,10	< 1	< 1			
Barium (Ba)	A		15,75	23,42	19,87	18,54	26,46	39,40
	B		17,87	14,74	16,79	19,72	24,66	33,97
Blei (Pb)	A		0,36	0,30	< 0,1	0,20	< 0,1	0,17
	B		0,41	0,13	0,10	0,31	0,15	< 0,1
Bor (B)	A		35,52	31,46	24,15	13,09	9,97	13,64
	B		32,98	19,43	20,02	15,69	6,94	11,88
Cadmium (Cd)	A		< 0,1					
	B		< 0,1					
Chrom (Cr)	A		3,48	3,22	3,36	4,23	4,28	1,36
	B		3,86	2,75	3,26	4,17	3,14	1,02
Kobalt (Co)	A		< 0,1					
	B		< 0,1					
Kupfer (Cu)	A		0,54	0,50	0,18	0,18	< 0,1	< 0,1
	B		0,81	0,40	0,36	0,26	0,17	
Molybdän (Mo)	A		59,53	38,48	26,92	22,96	21,52	14,63
	B		62,91	41,13	28,38	22,92	20,11	12,67
Nickel (Ni)	A		0,68	0,65	0,52	5,29	0,16	0,22
	B		4,98	4,11	4,21	4,22	3,78	3,78
Quecksilber (Hg)	A		0,01	< 0,01				
	B		< 0,01	< 0,01				
Selen (Se)	A		1,08	< 1				
	B		1,07	< 1				
Thallium (Tl)	A		< 0,1					
	B		< 0,1					
Vanadium (V)	A	4,81	3,42	1,06	0,80	1,33	1,78	
	B	5,49	1,65	1,03	1,39	1,10	1,54	
Zink (Zn)	A	9,91	67,71	20,57	5,71	16,03	26,74	
	B	2,94	2,49	2,62	2,72	1,83	25,94	

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A19: Analyseergebnisse der Eluate aus dem an den Frischbetonstandtest anschließenden DSLT an der „Mörtel“-Probe mit RR4.4

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von						
			2 d	3,25 d	5 d	10 d	17 d	37 d	65 d
pH	A	-	11,2	11,0	11,2	11,9	11,9	11,7	11,6
	B		11,2	11,1	11,1	11,9	11,9	11,7	11,6
Leitfähigkeit	A	µS/cm	380	363	352	696	643	832	753
	B		350	361	348	680	636	811	734
Redoxpotential	A	mV	134	211	136	120	168	116	168
	B		140	205	76	120	137	91	172
Natrium, Na	A	mg/l	8,6	7,2	6,5	7,9	4,6	5,4	4,6
	B		7,7	6,9	6,0	7,4	4,0	4,8	4,0
Kalium, K	A		13,0	11,3	10,9	15,1	10,5	14,2	13,5
	B		11,8	10,8	10,3	14,1	9,4	12,8	12,0
Calcium, Ca	A		25,3	20,7	23,7	47,5	48,9	63,8	57,0
	B		23,4	22,5	23,8	48,6	47,8	64,0	56,7
Sulfat, SO ₄ ²⁻	A		2,16	0,95	1,03	8,69	4,43	4,60	4,65
	B		1,79	0,92	0,75	3,22	2,61	4,26	4,89
Chlorid, Cl ⁻	A		1,15	0,49	0,34	0,78	0,95	0,48	0,42
	B		0,94	0,43	0,33	0,75	0,44	0,41	0,30
TOC	A		4,19	3,94	1,00	< 1	1,11	< 1	
	B		1,52	1,30	< 1		1,11		

Tabelle A19: Fortsetzung

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von							
			2 d	3,25 d	5 d	10 d	17 d	37 d	65 d	
Antimon (Sb)	A	µg/l	0,30	0,22	0,24	0,38	0,42	0,59	0,77	
	B		0,23	0,22	0,24	0,37	0,42	0,63	0,74	
Arsen (As)	A		< 1	1,16	2,00	4,38	4,50	4,58	4,89	
	B			1,18	1,94	4,36	4,36	4,80	4,99	
Barium (Ba)	A		47,22	42,38	42,23	80,95	77,33	97,74	84,41	
	B		46,19	40,39	40,46	82,52	74,66	91,59	82,07	
Blei (Pb)	A		< 0,1	0,20	< 0,1	0,17	0,10	0,42	0,17	
	B		0,15	0,19	0,11	0,13	0,17	0,38	0,18	
Bor (B)	A		38,54	30,61	52,15	86,31	80,29	103,63	126,77	
	B		24,30	30,78	47,32	83,54	81,47	104,49	123,58	
Cadmium (Cd)	A		< 0,1							
	B									
Chrom (Cr)	A		1,24	0,88	1,05	2,37	2,44	2,60	2,33	
	B		0,77	0,67	1,06	2,39	2,35	2,72	2,37	
Kobalt (Co)	A		< 0,1						0,12	< 0,1
	B								< 0,1	
Kupfer (Cu)	A		< 0,1	< 0,1			0,17	0,45	0,27	
	B		0,30				0,18	0,53	0,44	
Molybdän (Mo)	A		9,96	5,14	4,92	12,72	17,82	33,17	30,98	
	B		9,09	5,02	4,51	11,77	14,86	29,42	25,53	
Nickel (Ni)	A		0,20	0,58	0,12	< 0,1	< 0,1	1,38	< 0,1	
	B		3,30	2,73	< 0,1	0,13		< 0,1		
Quecksilber (Hg)	A		0,01	< 0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	< 0,01	
	B		< 0,01		0,01	0,02	0,02	< 0,01		
Selen (Se)	A		< 1							
	B									
Thallium (Tl)	A		< 0,1							
	B									
Vanadium (V)	A	5,54	6,12	7,17	16,49	18,24	26,27	35,41		
	B	4,19	5,24	7,14	16,71	17,73	26,91	35,55		
Zink (Zn)	A	10,15	3,16	7,20	2,51	22,53	26,28	2,90		
	B	6,62	4,04	2,76	25,10	1,76	5,88	2,73		

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A20: Analyseergebnisse der Eluate aus dem DSLT an der „Mörtel“-Probe mit RR1.3 bei einer Vorlagerungszeit von 72 Stunden

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von							
			0,25 d	1 d	2,25 d	4 d	9 d	16 d	36 d	64 d
pH	A	-	11,0	11,1	10,9	11,2	11,7	11,5	11,8	11,8
	B		11,0	11,0	11,9	11,1	11,5	11,5	11,8	11,7
Leitfähigkeit	A	μS/cm	313	327	360	389	637	647	877	1018
	B		295	309	355	380	615	650	915	1038
Redoxpotential	A	mV	156	81	-17,2	133	53,8	106	42	115
	B		164	91	-66,8	137	44,4	106	155	101
Natrium, Na	A	mg/l	13,3	13,9	12,3	8,8	13,5	9,3	10,0	6,3
	B		12,6	13,1	11,0	7,1	13,6	9,4	10,5	6,5
Kalium, K	A		1,8	2,3	2,3	2,0	3,9	3,9	6,1	6,3
	B		1,7	2,1	2,1	1,6	3,9	3,9	6,3	6,4
Calcium, Ca	A		14,6	20,2	23,5	25,4	44,7	49,9	76,9	83,3
	B		13,6	18,4	21,9	25,3	41,5	50,3	79,4	89,0
Sulfat, SO ₄ ²⁻	A		2,54	1,29	1,86	1,45	3,45	2,12	4,00	5,2
	B		7,43	3,54	1,69	1,38	7,16	2,91	3,89	5,1
Chlorid, Cl ⁻	A		1,76	1,56	1,90	1,24	1,63	1,29	1,12	0,5
	B		1,46	1,84	1,41	1,24	1,33	1,60	1,25	0,5
TOC	A		2,66	2,43	< 1	< 1	1,49	1,14	< 1	
	B		3,13	1,85	2,24		1,48	1,19		

Tabelle A20: Fortsetzung

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von								
			0,25 d	1 d	2,25 d	4 d	9 d	16 d	36 d	64 d	
Antimon (Sb)	A	µg/l	< 0,1								
	B										
Arsen (As)	A		< 1								
	B										
Barium (Ba)	A		26,5	28,1	37,7	40,5	60,8	66,8	92,8	113	
	B		31,2	31,4	36,7	41,3	64,6	66,7	88,7	118	
Blei (Pb)	A		0,26	< 0,1	0,12	0,26	0,13	0,17	< 0,1	< 0,1	
	B		0,46	0,19	< 0,1	0,21	0,20	0,21	0,14	0,16	
Bor (B)	A		4,98	4,72	6,61	7,66	14,18	17,78	25,82	32,35	
	B		5,86	5,74	7,76	8,32	13,66	16,59	24,84	36,74	
Cadmium (Cd)	A		< 0,1								
	B										
Chrom (Cr)	A		0,27	<0,1	0,34	0,33	0,48	0,41	0,30	0,22	
	B		0,36	0,18	0,27	0,42	0,54	0,49	0,20	0,25	
Kobalt (Co)	A		< 0,1	< 0,1							
	B		0,10								
Kupfer (Cu)	A		0,42	0,31	< 0,1		0,73	0,23	<0,1	0,22	
	B		0,51	0,45			0,62	0,44	0,22	0,23	
Molybdän (Mo)	A		0,16	0,14	0,14	0,11	0,22	0,19	0,11	< 0,1	
	B		0,18	0,13	0,16	0,12	0,20	0,16	< 0,1	0,12	
Nickel (Ni)	A		1,87	1,84	0,14	0,20	< 0,1				
	B		1,78	2,28	0,19	0,22					
Quecksilber (Hg)	A		0,07	0,07	0,07	0,07	0,13	0,12	0,19	0,12	
	B		0,07	0,07	0,07	0,08	0,12	0,12	0,17	0,10	
Selen (Se)	A		< 1								
	B										
Thallium (Tl)	A		< 0,1								
	B										
Vanadium (V)	A	2,61	3,96	6,02	6,78	10,77	12,43	15,05	17,17		
	B	3,28	4,53	6,72	6,98	11,04	12,31	14,69	17,35		
Zink (Zn)	A	1,67	1,99	16,23	2,87	2,57	1,40	14,69	2,29		
	B	3,98	2,23	2,39	2,32	4,14	3,09	3,03	3,69		

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A21: Analyseergebnisse der Eluate aus dem DSLT an der „Beton“-Probe mit RR1.3 bei einer Vorlagerungszeit von 72 Stunden

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von							
			0,25 d	1 d	2,25 d	4 d	9 d	16 d	36 d	64 d
pH	A	-	10,9	10,9	11,0	11,0	11,3	11,4	11,7	11,6
	B		10,8	10,9	10,9	11,0	11,4	11,4	11,7	11,6
Leitfähigkeit	A	μS/cm	276	254	278	265	450	432	692	734
	B		254	248	268	273	423	461	669	726
Redoxpotential	A	mV	152	108	-3,8	147	157	122	97	101
	B		159	104	5,4	164	168	123	90	116
Natrium, Na	A	mg/l	17,2	8,4	5,4	0,4	7,9	5,9	7,3	4,4
	B		16,2	8,0	7,4	3,7	7,7	5,7	6,9	4,2
Kalium, K	A		2,3	1,3	1,0	< 0,1	2,0	2,0	3,7	3,8
	B		2,2	1,3	1,2	0,7	1,9	2,0	3,6	3,7
Calcium, Ca	A		15,0	19,9	14,6	12,8	32,8	34,1	59,4	60,1
	B		14,0	19,0	15,2	15,1	31,6	36,2	56,8	60,9
Sulfat, SO ₄ ²⁻	A		3,31	2,43	0,95	1,78	1,91	2,39	3,50	3,11
	B		3,02	2,87	1,55	0,89	2,45	6,20	2,89	3,11
Chlorid, Cl ⁻	A		1,63	1,50	0,89	0,84	1,18	0,92	0,89	0,31
	B		1,58	1,48	1,46	0,74	1,21	1,01	1,17	0,31
TOC	A		3,46	3,84	1,77	< 1	1,47	1,49	< 1	
	B		3,12	3,78	1,11	1,02	1,70	1,79		

Tabelle A21: Fortsetzung

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von							
			0,25 d	1 d	2,25 d	4 d	9 d	16 d	36 d	64 d
Antimon (Sb)	A	µg/l	< 0,1							
	B									
Arsen (As)	A		< 1							
	B									
Barium (Ba)	A		26,54	23,19	24,79	27,89	35,35	44,57	59,87	64,94
	B		29,01	26,97	27,47	26,64	38,55	39,79	59,63	67,45
Blei (Pb)	A		0,51	< 0,1	< 0,1	0,14	0,13	0,22	0,42	0,22
	B		0,53		0,26	0,47	0,12	0,22	< 0,1	0,30
Bor (B)	A		7,11	8,15	9,78	8,62	13,15	14,53	20,13	24,77
	B		7,24	6,93	7,92	8,35	11,49	13,92	20,69	24,88
Cadmium (Cd)	A		< 0,1							
	B									
Chrom (Cr)	A		0,73	0,36	0,32	0,44	0,60	0,93	0,70	0,44
	B		0,95	0,48	0,52	0,49	0,55	0,78	0,57	0,46
Kobalt (Co)	A		0,18	< 0,1				0,16	< 0,1	
	B		0,18					0,11		
Kupfer (Cu)	A		< 0,1				0,65	0,62	0,34	0,29
	B						0,65	0,55	0,15	0,31
Molybdän (Mo)	A		0,20	0,17	0,16	< 0,1	0,18	0,11	< 0,1	< 0,1
	B		0,23	0,20	< 0,1		0,17	0,12	0,16	
Nickel (Ni)	A		0,60	0,30	0,19	0,25	< 0,1		0,24	< 0,1
	B		0,73	0,37	0,33	0,44			0,26	
Quecksilber (Hg)	A		0,06	0,06	0,05	0,05	0,09	0,09	0,13	0,08
	B		0,07	0,05	0,05	0,05	0,08	0,08	0,13	0,08
Selen (Se)	A		< 1							
	B									
Thallium (Tl)	A		< 0,1							
	B									
Vanadium (V)	A	4,88	7,00	7,14	7,39	11,16	12,99	15,83	16,74	
	B	4,94	6,85	6,77	7,17	11,30	11,38	16,14	15,52	
Zink (Zn)	A	5,50	2,75	2,78	2,44	1,95	14,37	3,64	3,05	
	B	11,42	12,88	2,81	7,90	2,08	2,35	2,47	3,50	

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A22: Analyseergebnisse der Eluate aus dem DSLT an der „Mörtel“-Probe mit RR2.3 bei einer Vorlagerungszeit von 72 Stunden

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von							
			0,25 d	1 d	2,25 d	4 d	9 d	16 d	36 d	64 d
pH	A	-	12,2	12,2	12,0	12,5	12,1	12,1	12,4	12,3
	B		12,1	12,2	12,0	12,5	12,1	12,1	12,3	12,3
Leitfähigkeit	A	μS/cm	1850	1985	1835	1537	2415	2095	2856	2849
	B		1784	2055	1870	1613	2322	2099	2860	2779
Redoxpotential	A	mV	218	228	159	203	202	158	217	173
	B		203	201	191	184	188	191	225	171
Natrium, Na	A	mg/l	9,0	8,8	8,2	7,5	12,3	9,4	12,7	9,90
	B		8,5	9,2	8,4	7,6	12,8	9,7	13,6	10,6
Kalium, K	A		33,1	32,4	30,8	28,0	46,6	36,8	48,6	34,0
	B		31,8	33,8	31,6	28,5	48,3	38,5	51,6	35,7
Calcium, Ca	A		144	165	193	65,9	180	154	218	239
	B		137	170	200	113	176	151	226	234
Sulfat, SO ₄ ²⁻	A		0,2	0,70	0,70	1,50	3,00	2,10	1,50	1,90
	B		0,4	0,70	0,80	1,10	1,60	1,80	1,40	1,90
Chlorid, Cl ⁻	A		<0,1	<0,1	<0,1				0,10	< 0,1
	B			0,10	<0,1				<0,1	0,20
TOC	A	1,51	1,30	1,23	< 1	1,93	1,5	2,7	< 1	
	B	1,55	1,42	1,54	1,04	1,59	1,8	2,8		

Tabelle A22: Fortsetzung

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von							
			0,25 d	1 d	2,25 d	4 d	9 d	16 d	36 d	64 d
Antimon (Sb)	A	µg/l	< 0,1	0,12	0,17	0,20	0,25	0,28	0,24	0,28
	B			0,11	0,18	0,21	0,26	0,29	0,26	0,28
Arsen (As)	A		< 1							
	B									
Barium (Ba)	A		293	256	233	213	382	368	551	595
	B		297	257	232	217	382	387	570	558
Blei (Pb)	A		1,72	0,74	1,20	1,57	0,64	0,70	0,67	0,29
	B		2,59	1,90	2,30	1,35	0,95	0,48	0,31	0,21
Bor (B)	A		1,0	1,1	2,22	2,10	2,28	2,91	1,13	3,24
	B		< 1	< 1	1,90	1,83	2,21	2,32	1,18	3,00
Cadmium (Cd)	A		<0,1							
	B									
Chrom (Cr)	A		6,8	12,0	13,1	11,4	12,30	9,68	9,42	11,1
	B		6,8	13,0	14,1	12,7	13,10	9,97	10,3	10,5
Kobalt (Co)	A		0,18	0,17	0,16	0,13	0,16	0,15	0,15	0,31
	B		0,18	0,18	0,16	0,14	0,16	0,15	0,16	0,32
Kupfer (Cu)	A		0,26	0,13	0,20	0,16	0,27	0,33	0,17	0,35
	B		0,20	0,26	0,16	0,29	0,22	0,35	0,10	0,29
Molybdän (Mo)	A		1,3	1,9	1,6	1,16	1,50	1,09	1,41	1,24
	B		1,2	2,1	1,7	1,26	1,49	1,08	1,49	1,17
Nickel (Ni)	A	< 0,1				0,11	0,13	0,10	0,20	
	B					0,12	< 0,1	0,10	0,21	
Quecksilber (Hg)	A	< 0,01								
	B									
Selen (Se)	A	< 1								
	B									
Thallium (Tl)	A	< 0,1								
	B									
Vanadium (V)	A	0,2	0,50	1,16	1,83	1,72	1,77	0,98	1,52	
	B	0,2	0,44	1,02	1,74	1,73	1,71	1,14	1,51	
Zink (Zn)	A	176	4,4	6,07	7,8	4,32	11,7	10,3	6,37	
	B	16,8	15,7	8,8	10,1	6,85	9,15	5,06	6,46	

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A23: Analyseergebnisse der Eluate aus dem DSLT an der „Mörtel“-Probe mit RR2.6 bei einer Vorlagerungszeit von 72 Stunden

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von							
			0,25 d	1 d	2,25 d	4 d	9 d	16 d	36 d	64 d
pH	A	-	12,1	12,1	11,9	12,4	11,9	12,0	12,3	12,2
	B		12,1	12,1	12,0	12,4	12,0	12,0	12,3	12,2
Leitfähigkeit	A	μS/cm	1700	1740	1630	1419	2048	1878	2670	2577
	B		1663	1771	1586	1384	2034	1898	2697	2537
Redoxpotential	A	mV	194	198	174	216	222	223	226	200
	B		217	190	204	209	186	214	221	194
Natrium, Na	A	mg/l	3,1	3,0	2,9	2,6	4,9	4,4	6,9	5,7
	B		3,1	3,1	2,9	2,7	4,9	4,5	7,0	5,7
Kalium, K	A		32,8	31,6	30,2	27,0	46,7	40,9	53,9	50,0
	B		32,7	32,4	30,0	27,3	47,3	41,8	64,2	50,1
Calcium, Ca	A		135	144	162	33,2	159	142	205	210
	B		133	145	157	21,1	159	140	206	207
Sulfat, SO ₄ ²⁻	A		2,5	1,00	1,10	1,20	1,40	1,60	1,50	1,80
	B		0,7	0,50	0,80	1,10	1,40	1,30	1,50	1,70
Chlorid, Cl ⁻	A		0,6	0,60	0,50	0,40	0,70	0,80	1,80	2,70
	B		0,6	0,70	0,50	0,40	0,80	0,80	1,90	2,80
TOC	A		< 1							
	B									

Tabelle A23: Fortsetzung

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von							
			0,25 d	1 d	2,25 d	4 d	9 d	16 d	36 d	64 d
Antimon (Sb)	A	µg/l	< 0,1	0,19	0,29	0,37	0,47	0,54	0,54	0,62
	B			0,19	0,28	0,35	0,43	0,50	0,52	0,55
Arsen (As)	A		< 1							
	B									
Barium (Ba)	A		193	194	175	165	284	286	434	439
	B		188	194	177	162	277	277	459	434
Blei (Pb)	A		2,31	1,19	1,95	0,95	1,11	0,33	0,65	0,39
	B		3,53	1,14	1,81	0,75	1,79	0,56	0,66	0,45
Bor (B)	A		< 1	1,3	1,79	2,46	2,51	2,76	1,71	3,03
	B		1,1	1,3	1,82	2,30	2,51	3,76	1,78	3,22
Cadmium (Cd)	A		< 0,1							
	B									
Chrom (Cr)	A		0,6	0,9	1,2	1,1	1,42	1,36	1,44	2,22
	B		0,3	0,7	0,9	0,8	1,14	1,02	1,24	1,74
Kobalt (Co)	A		0,56	0,47	0,42	0,31	0,54	0,51	0,72	0,98
	B		0,53	0,47	0,41	0,31	0,55	0,49	0,72	0,93
Kupfer (Cu)	A		0,32	0,28	0,35	0,36	0,42	0,52	0,27	0,72
	B		0,34	0,26	0,36	0,31	0,70	0,38	0,25	0,64
Molybdän (Mo)	A		0,2	0,3	0,2	0,21	0,28	0,22	0,32	0,32
	B		0,2	0,2	0,2	0,18	0,24	0,19	0,31	0,28
Nickel (Ni)	A		< 0,1				< 0,1	< 0,1		0,17
	B						0,11			0,16
Quecksilber (Hg)	A		< 0,01						< 0,01	< 0,01
	B								0,01	
Selen (Se)	A		< 1							
	B									
Thallium (Tl)	A		0,90	1,20	1,16	1,00	1,42	1,19	1,59	1,61
	B		0,89	1,30	1,16	1,02	1,43	1,23	1,58	1,57
Vanadium (V)	A	< 0,1	0,17	0,45	0,74	0,86	1,06	0,69	1,14	
	B		0,19	0,40	0,69	0,81	0,89	0,66	1,05	
Zink (Zn)	A	14,3	7,5	6,70	12,1	3,94	6,65	8,66	17,3	
	B	19,8	8,22	5,8	7,72	10,7	5,14	7,01	4,22	

Tabelle A24: Analyseergebnisse der Eluate aus dem DSLT an der „Mörtel“-Probe mit RR3.3 bei einer Vorlagerungszeit von 72 Stunden

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von								
			0,25 d	1 d	2,25 d	4 d	9 d	16 d	36 d	64 d	
pH	A	-	11,3	11,3	11,2	11,6	11,3	11,3	11,6	11,5	
	B		11,3	11,3	11,2	11,6	11,3	11,2	11,5	11,5	
Leitfähigkeit	A	μS/cm	249	269	276	251	394	402	573	528	
	B		247	271	271	255	402	390	578	527	
Redoxpotential	A	mV	121	122	102	125	150	165	163	139	
	B		92	101	110	105	230	218	130	155	
Natrium, Na	A	mg/l	3,6	2,9	2,1	1,4	2,1	1,4	2,0	1,60	
	B		3,8	3,0	2,1	1,5	2,1	1,6	2,2	1,50	
Kalium, K	A		7,1	5,7	4,5	3,3	4,6	3,5	5,0	4,10	
	B		7,3	5,9	4,6	3,4	4,7	3,6	5,1	4,10	
Calcium, Ca	A		16,8	21,6	21,4	16,8	33,6	17,8	49,3	47,8	
	B		17,8	22,1	22,0	18,0	34,5	33,3	50,9	47,9	
Sulfat, SO ₄ ²⁻	A		1,2	1,00	0,80	0,80	1,30	1,20	1,70	2,20	
	B		1,2	1,00	0,90	0,60	1,10	1,20	1,80	1,90	
Chlorid, Cl ⁻	A		0,9	0,90	0,70	0,50	0,70	0,50	0,50	0,30	
	B		1,0	0,90	0,70	0,50	0,60	0,50	0,60	0,20	
TOC	A			< 1							
	B										

Tabelle A24: Fortsetzung

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von							
			0,25 d	1 d	2,25 d	4 d	9 d	16 d	36 d	64 d
Antimon (Sb)	A	µg/l	< 0,1							
	B									
Arsen (As)	A		< 1							
	B									
Barium (Ba)	A		35,1	32,6	26,7	23,6	34,3	33	48	41,0
	B		36,6	31,8	28,4	25,0	35,5	36	48	41,7
Blei (Pb)	A		< 0,1	0,17	< 0,1					
	B			< 0,1						
Bor (B)	A		2,7	3,5	3,64	4,48	7,77	8,63	11,2	9,98
	B		2,8	3,5	3,84	4,30	8,02	7,71	11,1	9,87
Cadmium (Cd)	A		< 0,1							
	B									
Chrom (Cr)	A		< 0,1	0,1	0,2	< 0,1	0,18	0,20	0,34	0,70
	B		0,1	0,3	0,2	0,1	0,22	0,20	0,35	0,67
Kobalt (Co)	A		< 0,1							
	B									
Kupfer (Cu)	A		< 0,1	0,19	0,20	0,23	0,30	0,31	0,36	0,18
	B		0,14	0,22	0,19	0,28	0,45	0,29	0,37	0,16
Molybdän (Mo)	A		< 0,1							
	B									
Nickel (Ni)	A		< 0,1							
	B									
Quecksilber (Hg)	A		< 0,01				0,01	0,01	0,01	0,01
	B						0,01	< 0,01	0,01	0,01
Selen (Se)	A		< 1							
	B									
Thallium (Tl)	A		< 0,1							
	B									
Vanadium (V)	A	0,4	0,99	1,25	1,34	2,58	2,77	4,40	4,96	
	B	0,4	0,99	1,30	1,37	2,60	2,74	4,38	4,99	
Zink (Zn)	A	5,8	19,4	3,30	3,70	5,18	8,84	11,8	18,5	
	B	6,46	7,88	3,2	3,71	3,00	2,64	11,4	20,8	

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A25: Analyseergebnisse der Eluate aus dem DSLT an der „Mörtel“-Probe mit RR4.4 bei einer Vorlagerungszeit von 48 Stunden

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von							
			0,25 d	1 d	2,25 d	4 d	9 d	16 d	36 d	64 d
pH	A	-	11,4	11,0	11,3	11,0	11,9	11,7	11,8	11,5
	B		11,5	11,5	11,30	11,1	12,1	11,6	11,8	11,5
Leitfähigkeit	A	μS/cm	475	418	487	436	637	551	745	663
	B		488	547	472	434	634	559	750	648
Redoxpotential	A	mV	131	128	135	53	123	184	179	181
	B		124	128	133	52	111	187	207	179
Natrium, Na	A	mg/l	11,0	11,0	8,3	5,8	6,2	3,7	4,9	3,9
	B		12,4	11,0	8,5	5,8	6,4	3,8	4,9	3,8
Kalium, K	A		14,8	15,0	12,6	9,4	11,8	8,3	12,0	10,7
	B		16,1	15,1	12,8	9,4	11,9	8,6	12,1	10,6
Calcium, Ca	A		27,4	31,6	30,9	28,2	47,3	44,1	59,1	53,6
	B		28,7	32,5	31,0	28,4	47,2	44,7	59,8	53,9
Sulfat, SO ₄ ²⁻	A		1,15	0,96	1,19	1,26	2,40	2,38	4,57	4,21
	B		7,06	1,95	2,17	1,65	3,16	3,24	4,73	4,72
Chlorid, Cl ⁻	A		1,64	1,47	1,20	1,03	1,03	0,90	0,63	0,49
	B		1,81	1,42	1,10	0,66	0,91	0,73	0,93	0,44
TOC	A		4,13	4,35	1,06	< 1		1,34	< 1	
	B		3,95	3,78	1,25			< 1		

Tabelle A25: Fortsetzung

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von							
			0,25 d	1 d	2,25 d	4 d	9 d	16 d	36 d	64 d
Antimon (Sb)	A	µg/l	0,40	0,45	0,38	0,33	0,41	0,43	0,56	0,66
	B		0,46	0,44	0,37	0,32	0,41	0,46	0,58	0,64
Arsen (As)	A		1,11	1,17	2,01	2,19	3,08	3,24	3,31	3,44
	B		1,67	1,40	1,93	2,15	2,95	3,31	3,27	3,42
Barium (Ba)	A		91,47	68,90	62,34	51,77	71,41	63,48	77,61	67,25
	B		98,48	68,42	61,60	52,55	71,93	64,05	76,47	68,63
Blei (Pb)	A		2,24	0,89	0,56	0,18	0,29	0,48	0,46	1,21
	B		2,08	0,79	0,37	0,57	0,53	1,05	0,64	0,70
Bor (B)	A		25,00	41,54	48,61	47,49	82,60	67,08	96,85	105,75
	B		29,26	37,29	45,64	49,24	79,09	67,30	94,83	102,92
Cadmium (Cd)	A		< 0,1							
	B		< 0,1							
Chrom (Cr)	A		1,59	1,39	1,34	1,23	1,61	1,71	1,79	1,75
	B		1,94	1,33	1,24	1,27	1,54	1,66	1,65	1,69
Kobalt (Co)	A		0,12	< 0,1						
	B		0,21	< 0,1						
Kupfer (Cu)	A		< 0,1	< 0,1				0,23	0,25	0,21
	B		0,68	< 0,1				0,25	0,41	0,27
Molybdän (Mo)	A		22,78	16,33	13,81	13,20	26,94	27,41	41,73	28,32
	B		25,90	15,98	13,35	12,87	26,86	27,67	41,03	29,11
Nickel (Ni)	A	0,62	0,24	0,32	0,11	0,12	< 0,1	1,72	< 0,1	
	B	1,10	0,44	0,10	0,72	0,19		0,31		
Quecksilber (Hg)	A	0,01	<0,01	0,02	0,01	0,01	< 0,01			
	B	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	< 0,01			
Selen (Se)	A	< 1								
	B	< 1								
Thallium (Tl)	A	< 0,1								
	B	< 0,1								
Vanadium (V)	A	6,50	10,24	11,78	11,20	17,74	19,32	28,56	34,61	
	B	8,26	10,31	11,39	10,99	17,00	18,71	27,53	33,77	
Zink (Zn)	A	5,14	4,31	4,48	2,29	3,83	2,46	15,95	4,18	
	B	8,21	3,84	3,40	2,51	6,28	14,96	26,47	7,22	

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A26: Analyseergebnisse der Eluate aus dem DSLT an der „Beton“-Probe mit RR4.4 bei einer Vorlagerungszeit von 48 Stunden

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von							
			0,25 d	1 d	2,25 d	4 d	9 d	16 d	36 d	64 d
pH	A	-	11,4	11,4	11,2	11,2	11,6	11,2	11,6	11,4
	B		11,4	11,4	11,2	11,1	11,7	11,3	11,6	11,4
Leitfähigkeit	A	μS/cm	428	524	380	360	523	477	647	537
	B		408	396	353	342	501	470	640	537
Redoxpotential	A	mV	138	121	140	52	124	188	131	188
	B		126	127	134	45	121	187	194	187
Natrium, Na	A	mg/l	9,2	6,2	4,6	3,4	3,8	2,4	3,5	2,8
	B		8,6	6,0	4,5	3,2	3,8	2,5	3,4	2,7
Kalium, K	A		10,8	7,9	6,5	5,2	6,8	5,4	8,2	7,6
	B		9,9	7,6	6,2	5,0	6,7	5,4	8,2	7,3
Calcium, Ca	A		28,0	30,2	28,2	26,3	41,3	38,9	54,0	49,0
	B		26,6	29,5	26,9	24,7	39,4	38,3	52,7	45,8
Sulfat, SO ₄ ²⁻	A		2,16	1,45	1,60	1,45	2,00	2,55	4,35	4,97
	B		2,20	1,66	1,11	1,24	2,25	2,98	4,52	4,64
Chlorid, Cl ⁻	A		1,56	1,18	0,81	0,60	0,73	0,51	0,59	0,32
	B		1,49	0,96	0,68	0,53	0,70	0,61	0,57	0,32
TOC	A	5,85	4,01	1,35	1,94	< 1	1,37	< 1		
	B	5,00	6,19	< 1	1,11	1,08	1,39			

Tabelle A26: Fortsetzung

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von								
			0,25 d	1 d	2,25 d	4 d	9 d	16 d	36 d	64 d	
Antimon (Sb)	A	µg/l	0,45	0,43	0,34	0,33	0,40	0,45	0,59	0,69	
	B		0,50	0,46	0,33	0,29	0,40	0,44	0,59	0,66	
Arsen (As)	A		1,46	1,46	2,11	2,34	2,96	2,95	3,44	3,76	
	B		1,66	1,73	2,07	2,23	2,79	3,22	3,71	3,71	
Barium (Ba)	A		80,71	57,60	50,19	45,91	59,13	49,55	66,43	54,72	
	B		80,22	55,89	47,89	41,06	53,34	49,66	61,31	51,26	
Blei (Pb)	A		4,07	0,91	0,37	0,54	0,28	0,38	1,25	1,24	
	B		2,27	1,01	1,01	0,18	0,31	0,82	1,75	0,45	
Bor (B)	A		28,79	46,90	43,25	52,34	73,83	68,18	91,26	99,08	
	B		35,03	49,00	44,67	50,20	72,40	63,88	91,75	108,37	
Cadmium (Cd)	A		< 0,1					0,22	< 0,1		
	B							< 0,1			
Chrom (Cr)	A		1,40	1,36	1,18	1,43	1,56	1,59	1,92	2,09	
	B		1,88	1,45	1,26	1,23	1,48	1,72	2,05	1,94	
Kobalt (Co)	A		0,13	< 0,1							
	B		0,19								
Kupfer (Cu)	A		< 0,1	< 0,1				0,40	0,41	0,31	
	B		0,19					0,39	0,35	0,24	
Molybdän (Mo)	A		21,13	15,18	12,99	12,07	21,14	18,21	25,87	17,26	
	B		20,06	14,21	11,84	10,44	18,85	17,12	24,47	16,66	
Nickel (Ni)	A	0,92	0,20	0,26	0,27	0,17	< 0,1	0,17	< 0,1		
	B	0,98	0,46	0,22	0,19	0,25		< 0,1			
Quecksilber (Hg)	A	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	< 0,01				
	B	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02					
Selen (Se)	A	< 1									
	B										
Thallium (Tl)	A	< 0,1									
	B										
Vanadium (V)	A	6,85	10,06	10,43	11,31	17,80	18,17	28,34	34,93		
	B	7,99	10,75	10,45	10,51	16,69	18,43	28,76	32,89		
Zink (Zn)	A	12,09	6,13	3,75	4,20	4,10	4,04	37,0	10,88		
	B	7,49	16,8	5,76	2,31	4,58	2,40	15,75	3,55		

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A27: Analyseergebnisse der Eluate aus dem DSLT an der „Mörtel“-Probe mit RR1.3 bei einer Vorlagerungszeit von 56 Tagen

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von								
			0,25 d	1 d	2,25 d	4 d	9 d	16 d	36 d	64 d	
pH	A	-	10,9	11,0	11,1	11,1	11,3	11,3	11,3	11,5	
	B		10,9	11,1	11,0	11,1	11,2	11,3	11,3	11,5	
Leitfähigkeit	A	μS/cm	202	227	233	234	374	345	550	471	
	B		199	232	231	252	373	388	556	471	
Redoxpotential	A	mV	137	110	105	116	102	128	130	187	
	B		104	67	101	113	99	111	136	165	
Natrium, Na	A	mg/l	8,1	5,4	4,7	4,1	6,6	5,1	7,60	5,90	
	B		7,2	5,0	4,5	4,1	6,7	5,3	8,10	6,30	
Kalium, K	A		2,8	1,9	1,8	1,7	2,8	2,5	3,90	3,40	
	B		2,6	1,9	1,8	1,7	2,8	2,5	4,10	3,50	
Calcium, Ca	A		10,2	15,4	18,0	17,9	28,3	29,2	42,0	37,9	
	B		10,2	16,7	17,3	18,9	28,6	29,5	42,1	36,0	
Sulfat, SO ₄ ²⁻	A		1,52	1,46	1,52	1,46	1,54	1,23	1,20	1,43	
	B		1,55	2,68	1,56	2,69	0,98	1,18	0,95	1,43	
Chlorid, Cl ⁻	A		0,60	0,35	0,61	0,35	0,26	0,24	0,42	0,28	
	B		0,44	0,28	0,44	0,28	0,24	0,23	0,36	0,28	
TOC	A			< 1							
	B										

Tabelle A27: Fortsetzung

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von							
			0,25 d	1 d	2,25 d	4 d	9 d	16 d	36 d	64 d
Antimon (Sb)	A	µg/l	< 0,1							
	B									
Arsen (As)	A		< 1							
	B									
Barium (Ba)	A		30,97	31,06	37,72	24,34	41,06	39,74	59,04	63,29
	B		28,23	33,16	30,59	27,20	40,07	43,32	63,77	65,77
Blei (Pb)	A		1,30	0,43	0,14	0,26	0,11	0,45	< 0,1	2,93
	B		0,17	1,98	< 0,1	0,36	2,34	0,32	0,14	0,89
Bor (B)	A		9,36	9,22	10,33	7,99	12,98	12,37	13,70	37,53
	B		7,76	8,93	8,40	6,23	10,37	10,54	12,75	32,49
Cadmium (Cd)	A		< 0,1							
	B									
Chrom (Cr)	A		< 0,1	0,10	0,16	0,18	0,28	0,20	0,37	0,51
	B			0,10	< 0,1	0,16	0,14	0,19	0,39	0,56
Kobalt (Co)	A		< 0,1							
	B									
Kupfer (Cu)	A		0,15	< 0,1			0,27	< 0,1	0,24	0,30
	B		0,16				0,15	0,13	0,27	0,35
Molybdän (Mo)	A		< 0,1							
	B									
Nickel (Ni)	A		0,26	0,21	0,24	0,12	< 0,1	< 0,1		
	B		0,31	0,29	0,22	< 0,1	4,66			
Quecksilber (Hg)	A		0,02	0,02	0,02	0,02	0,05	0,03	0,03	0,08
	B		0,02	0,02	0,02	0,02	0,05	0,03	0,03	0,07
Selen (Se)	A		< 1							
	B									
Thallium (Tl)	A		< 0,1							
	B									
Vanadium (V)	A	1,01	2,52	4,34	4,72	8,79	8,52	13,80	16,85	
	B	0,98	2,39	3,54	4,51	7,61	8,08	13,27	15,21	
Zink (Zn)	A	38,4	34,9	15,0	3,14	9,29	1,85	6,59	4,07	
	B	11,80	40,2	23,1	4,67	15,6	16,4	1,43	3,50	

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A28: Analyseergebnisse der Eluate aus dem DSLT an der „Beton“-Probe mit RR1.3 bei einer Vorlagerungszeit von 56 Tagen

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von								
			0,25 d	1 d	2,25 d	4 d	9 d	16 d	36 d	64 d	
pH	A	-	10,9	11,0	11,0	11,1	11,3	11,3	11,3	11,4	
	B		10,9	11,0	11,0	11,1	11,3	11,3	11,3	11,5	
Leitfähigkeit	A	μS/cm	201	214	229	236	341	342	499	443	
	B		193	230	215	238	363	355	523	462	
Redoxpotential	A	mV	141	115	117	112	95	117	122	190	
	B		104	72	106	109	94	107	131	175	
Natrium, Na	A	mg/l	7,00	4,40	3,40	2,80	4,40	3,60	5,40	4,30	
	B		7,10	4,80	3,70	3,10	4,90	3,90	5,80	4,60	
Kalium, K	A		2,20	1,50	1,30	1,10	1,90	1,70	2,70	2,30	
	B		2,20	1,70	1,40	1,20	2,10	1,90	3,00	2,50	
Calcium, Ca	A		10,5	16,0	18,7	18,5	27,9	29,0	41,1	36,8	
	B		10,4	16,2	17,7	18,7	29,5	29,7	42,2	38,8	
Sulfat, SO ₄ ²⁻	A		1,28	1,35	1,47	1,14	1,94	1,00	1,72	1,20	
	B		1,33	1,38	1,36	0,66	1,29	1,39	1,56	0,79	
Chlorid, Cl ⁻	A		0,60	0,34	0,28	0,22	0,39	0,29	0,45	0,30	
	B		0,53	0,37	0,28	0,22	0,36	0,32	0,40	0,30	
TOC	A			< 1							
	B										

Tabelle A28: Fortsetzung

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von							
			0,25 d	1 d	2,25 d	4 d	9 d	16 d	36 d	64 d
Antimon (Sb)	A	µg/l	< 0,1							
	B									
Arsen (As)	A		< 1							
	B									
Barium (Ba)	A		29,27	27,35	29,97	26,84	42,44	40,34	56,34	56,83
	B		26,05	27,59	28,06	26,36	46,47	41,53	58,58	59,23
Blei (Pb)	A		0,66	1,24	< 0,1	0,12	< 0,1	0,40	0,11	1,85
	B		0,89	0,79		0,41		0,17	< 0,1	1,90
Bor (B)	A		3,74	4,77	4,04	5,53	10,41	10,23	13,75	30,07
	B		3,40	3,16	2,57	4,34	9,58	8,85	13,44	41,03
Cadmium (Cd)	A		< 0,1							
	B									
Chrom (Cr)	A		0,11	0,14	0,16	0,15	0,16	0,19	0,41	0,52
	B		0,11	0,12	0,12	0,17	0,15	0,16	0,33	0,41
Kobalt (Co)	A		< 0,1							
	B									
Kupfer (Cu)	A		0,29	< 0,1	0,12	< 0,1	0,18	0,19	0,23	0,34
	B		0,20	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,16	< 0,1	0,24	0,22
Molybdän (Mo)	A		< 0,1							
	B									
Nickel (Ni)	A		0,57	0,53	0,22	< 0,1		0,21	< 0,1	
	B		0,64	< 0,1	< 0,1			< 0,1		
Quecksilber (Hg)	A		0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,03	0,03	0,08
	B		0,02	0,02	0,03	0,02	0,04	0,03	0,03	0,11
Selen (Se)	A		< 1							
	B									
Thallium (Tl)	A		< 0,1							
	B									
Vanadium (V)	A	1,11	2,37	3,89	4,51	8,17	8,55	14,71	16,93	
	B	1,19	2,36	3,20	4,09	7,33	7,95	13,13	15,03	
Zink (Zn)	A	40,9	14,7	11,7	3,52	20,4	63,5	19,0	2,08	
	B	2,24	1,47	11,0	1,55	38,0	2,24	2,17	1,73	

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A29: Analyseergebnisse der Eluate aus dem DSLT an der „Mörtel“-Probe mit RR4.4 bei einer Vorlagerungszeit von 56 Tagen

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von							
			0,25 d	1 d	2,25 d	4 d	9 d	16 d	36 d	64 d
pH	A	-	10,7	10,8	10,9	10,9	11,1	11,1	11,1	11,3
	B		10,6	10,8	10,9	10,9	11,1	11,1	11,1	11,3
Leitfähigkeit	A	μS/cm	129	145	158	161	258	251	368	331
	B		119	137	139	147	244	241	356	303
Redoxpotential	A	mV	169	156	169	170	167	187	184	215
	B		144	127	168	164	163	179	189	201
Natrium, Na	A	mg/l	3,7	2,6	2,3	2,2	4,0	3,5	5,7	4,9
	B		3,4	2,3	2,0	2,0	3,6	3,2	5,3	4,4
Kalium, K	A		6,7	4,7	4,4	4,1	7,5	6,9	11,7	10,6
	B		6,1	4,3	4,0	3,8	7,0	6,4	11,0	9,6
Calcium, Ca	A		4,9	9,7	11,2	11,9	18,5	18,8	25,4	22,0
	B		4,6	9,3	11,0	11,8	18,0	18,2	24,4	22,0
Sulfat, SO ₄ ²⁻	A		1,43	2,57	10,1	2,96	3,40	2,74	3,49	3,97
	B		1,52	2,44	5,17	3,02	3,20	2,58	3,81	3,11
Chlorid, Cl ⁻	A		0,24	0,15	0,21	0,17	0,29	0,23	0,40	0,33
	B		0,19	0,12	0,17	0,15	0,20	0,20	0,37	0,27
TOC	A		< 1							
	B									

Tabelle A29: Fortsetzung

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von							
			0,25 d	1 d	2,25 d	4 d	9 d	16 d	36 d	64 d
Antimon (Sb)	A	µg/l	0,13	0,25	0,28	0,32	0,39	0,41	0,57	0,78
	B		0,14	0,27	0,29	0,33	0,41	0,47	0,60	0,75
Arsen (As)	A		< 1	< 1	1,51	1,44	2,61	2,65	3,73	4,25
	B		< 1	< 1	1,16	1,66	2,73	2,70	3,86	4,20
Barium (Ba)	A		8,54	13,50	14,24	15,10	23,42	23,46	31,35	34,80
	B		9,36	15,00	13,76	14,50	24,85	24,60	30,92	31,56
Blei (Pb)	A		0,50	< 0,1	0,20	0,15	< 0,1	0,25	0,30	0,49
	B		0,76	1,27	0,23	0,81	0,15	1,05	1,22	1,25
Bor (B)	A		21,24	34,25	39,62	33,88	47,43	47,70	67,19	67,44
	B		16,75	32,56	34,92	37,12	51,52	43,70	73,24	63,79
Cadmium (Cd)	A		< 0,1							
	B									
Chrom (Cr)	A		0,36	0,59	0,63	0,68	0,83	0,80	1,15	1,30
	B		0,35	1,43	0,67	0,69	0,81	0,74	1,04	1,17
Kobalt (Co)	A		< 0,1	< 0,1	< 0,1					
	B			0,11						
Kupfer (Cu)	A		< 0,1	< 0,1	0,13	0,12	0,20	0,32	0,47	0,46
	B		0,34	0,15	0,36	0,11	0,24	0,42	0,31	0,34
Molybdän (Mo)	A		10,76	7,01	5,92	5,87	9,58	7,43	13,28	12,33
	B		10,88	6,60	5,78	5,06	8,27	6,16	10,80	9,60
Nickel (Ni)	A		0,21	0,20	0,26	< 0,1	1,84	0,92	< 0,1	
	B		< 0,1	0,20	< 0,1		< 0,1	< 0,1		
Quecksilber (Hg)	A		< 0,01						0,01	0,10
	B								0,02	0,11
Selen (Se)	A		< 1							
	B									
Thallium (Tl)	A		< 0,1							
	B									
Vanadium (V)	A	3,13	4,85	5,67	6,20	10,40	10,42	18,30	24,61	
	B	2,83	4,72	5,60	6,23	10,28	10,06	17,86	22,19	
Zink (Zn)	A	7,31	9,89	8,33	4,92	14,67	12,90	5,15	2,22	
	B	18,5	38,5	3,00	3,66	23,0	19,49	2,88	1,84	

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A30: Analyseergebnisse der Eluate aus dem DSLT an der „Beton“-Probe mit RR4.4 bei einer Vorlagerungszeit von 56 Tagen

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von								
			0,25 d	1 d	2,25 d	4 d	9 d	16 d	36 d	64 d	
pH	A	-	10,6	10,8	10,8	10,8	11,0	11,0	11,0	11,2	
	B		10,6	10,8	10,8	10,8	11,1	11,0	11,0	11,2	
Leitfähigkeit	A	μS/cm	116	137	137	140	217	209	302	255	
	B		116	139	133	142	223	199	314	264	
Redoxpotential	A	mV	191	162	175	178	157	193	185	201	
	B		150	124	171	164	164	183	194	211	
Natrium, Na	A	mg/l	3,0	2,0	1,8	1,6	2,8	2,4	3,9	3,2	
	B		3,0	2,1	1,8	1,7	3,0	2,5	4,2	3,5	
Kalium, K	A		4,9	3,5	3,1	2,9	5,2	4,7	7,8	6,9	
	B		5,0	3,6	3,2	3,0	5,4	4,9	8,3	7,4	
Calcium, Ca	A		5,3	9,8	11,0	10,7	16,8	17,1	23,5	21,4	
	B		5,2	9,8	11,0	11,2	17,1	17,4	23,5	21,0	
Sulfat, SO ₄ ²⁻	A		1,23	2,34	10,6	3,74	5,30	2,83	3,90	3,09	
	B		0,97	1,96	4,17	2,77	3,13	2,55	3,17	2,64	
Chlorid, Cl ⁻	A		0,21	0,14	0,26	0,15	0,23	0,17	0,33	0,26	
	B		0,22	0,17	0,14	0,14	0,19	0,22	0,37	0,26	
TOC	A			< 1							
	B										

Tabelle A30: Fortsetzung

Parameter	Probe	Einheit	Messwerte im Alter von							
			0,25 d	1 d	2,25 d	4 d	9 d	16 d	36 d	64 d
Antimon (Sb)	A	µg/l	0,14	0,29	0,32	0,30	0,38	0,45	0,53	0,71
	B		0,14	0,27	0,33	0,33	0,39	0,40	0,55	0,74
Arsen (As)	A		< 1	1,27	1,58	2,71	2,73	3,64	4,55	
	B			1,25	1,69	2,85	2,88	3,80	4,45	
Barium (Ba)	A		9,66	15,21	13,49	12,37	19,90	21,26	28,05	30,01
	B		14,82	13,36	13,51	13,55	20,24	21,35	28,61	29,36
Blei (Pb)	A		0,84	0,70	0,20	2,03	0,18	0,72	0,60	0,95
	B		0,84	1,57	< 0,1	0,26	0,21	0,64	0,77	0,75
Bor (B)	A		13,56	30,98	33,56	33,90	43,41	39,45	55,54	40,74
	B		13,32	29,20	34,47	38,72	45,66	41,70	68,29	49,28
Cadmium (Cd)	A		< 0,1							
	B									
Chrom (Cr)	A		0,34	0,58	0,62	0,60	0,67	0,62	0,94	1,18
	B		0,38	0,56	0,66	0,65	0,74	0,66	0,97	1,15
Kobalt (Co)	A		< 0,1							
	B									
Kupfer (Cu)	A		0,37	0,23	0,40	0,11	0,26	0,27	0,24	0,52
	B		0,23	< 0,1	0,26	< 0,1	0,19	0,23	0,30	0,49
Molybdän (Mo)	A		10,15	5,77	4,55	3,80	5,92	4,59	8,73	8,91
	B		9,83	5,87	4,59	3,95	6,24	4,91	8,97	8,30
Nickel (Ni)	A		< 0,1							
	B									
Quecksilber (Hg)	A		< 0,01							
	B									
Selen (Se)	A		< 1							
	B									
Thallium (Tl)	A		< 0,1							
	B									
Vanadium (V)	A	2,83	4,80	5,65	6,04	9,61	9,32	16,56	22,27	
	B	2,97	4,58	5,74	6,30	10,22	9,71	17,28	21,71	
Zink (Zn)	A	10,91	44,9	21,2	1,72	11,8	18,7	15,3	1,59	
	B	40,9	9,53	5,87	1,65	3,19	3,45	1,66	2,25	

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A31: Kumulative Freisetzung der Mischungen mit RR1.3 in den unterschiedlichen Standtests

Parameter	FBST + DSLT			DSL T			
	Frischbeton			48 h Vorlagerung		56 d Vorlagerung	
	Mörtel			Beton	Mörtel	Beton	Mörtel
	E _{65d}	E _{1d}	E _{1-65d}	E _{64d}		E _{64d}	
	mg/m ²			mg/m ²		mg/m ²	
Antimon (Sb) ¹⁾	< 0,104	< 0,048	< 0,056	< 0,064	< 0,064	< 0,064	< 0,064
Arsen (As) ¹⁾	< 1,04	< 0,48	< 0,56	< 0,64	< 0,64	< 0,64	< 0,64
Barium (Ba)	51,2	5,7	45,5	24,9	37,8	24,9	26,4
Blei (Pb)	< 0,191 ²⁾	< 0,113 ²⁾	< 0,078 ²⁾	< 0,158 ²⁾	< 0,117 ²⁾	< 0,362 ²⁾	0,481
Bor (B)	14,65	1,09	13,56	8,31	9,34	6,76	8,44
Cadmium (Cd) ¹⁾	< 0,104	< 0,048	< 0,056	< 0,064	< 0,064	< 0,064	< 0,064
Chrom (Cr)	0,692	0,440	0,252	0,374	0,206	0,136	0,146
Kobalt (Co)	< 0,126 ²⁾	< 0,065 ²⁾	< 0,061 ²⁾	< 0,073 ²⁾	< 0,064 ¹⁾	< 0,064 ¹⁾	< 0,064 ¹⁾
Kupfer (Cu)	0,492	0,288	< 0,204 ²⁾	< 0,174 ²⁾	< 0,196 ²⁾	< 0,111 ²⁾	< 0,108 ²⁾
Molybdän (Mo)	< 0,121 ²⁾	< 0,053 ²⁾	0,068	< 0,092 ²⁾	0,093	< 0,064 ¹⁾	< 0,064 ¹⁾
Nickel (Ni)	1,533	1,191	< 0,342 ²⁾	< 0,172 ²⁾	< 0,373 ²⁾	< 0,131 ²⁾	< 0,102 ²⁾
Quecksilber (Hg)	0,096	< 0,007 ²⁾	0,089	0,048	0,065	0,022	0,021
Selen (Se) ¹⁾	< 1,04	< 0,48	< 0,56	< 0,64	< 0,64	< 0,64	< 0,64
Thallium (Tl) ¹⁾	< 0,104	< 0,048	< 0,056	< 0,064	< 0,064	< 0,064	< 0,064
Vanadium (V)	6,25	0,72	5,53	6,53	6,07	4,58	4,65
Zink (Zn)	6,83	3,41	3,42	3,28	2,74	9,44	9,20
TOC	2518	1666	< 851 ²⁾	< 1182 ²⁾	< 984 ²⁾	< 640 ¹⁾	< 640 ¹⁾

1) alle Eluatkonzentrationen lagen unter der Bestimmungsgrenze

2) mehr als 20 % der Eluatkonzentrationen lagen unter der Bestimmungsgrenze

Tabelle A32: Kumulative Freisetzung der Mischungen mit RR4.4 in den unterschiedlichen Standtests in mg/m²

Parameter	FBST + DSLT			DSLIT			
	Frischbeton			48 h Vorlagerung		56 d Vorlagerung	
	Mörtel			Beton	Mörtel	Beton	Mörtel
	E _{65d}	E _{1d}	E _{1-65d}	E _{64d}			
Antimon (Sb)	< 0,290 ²⁾	< 0,059 ²⁾	0,231	0,294	0,292	0,251	0,256
Arsen (As)	< 2,40 ²⁾	< 0,59 ²⁾	1,80	1,66	1,59	< 1,50 ²⁾	< 1,46 ²⁾
Barium (Ba)	48,1	10,8	37,2	36,2	44,7	12,2	13,2
Blei (Pb)	0,200	< 0,097 ²⁾	0,102	0,674	0,522	0,454	0,353
Bor (B)	49,9	9,4	40,6	40,8	40,8	24,5	28,5
Cadmium (Cd)	< 0,104 ¹⁾	< 0,048 ¹⁾	< 0,056 ¹⁾	< 0,069 ²⁾	< 0,064 ¹⁾	< 0,064 ¹⁾	< 0,064 ¹⁾
Chrom (Cr)	2,534	1,524	1,010	1,022	0,988	0,453	0,530
Kobalt (Co)	< 0,105 ¹⁾	< 0,048 ¹⁾	< 0,057 ¹⁾	< 0,069 ²⁾	< 0,069 ²⁾	< 0,064 ¹⁾	< 0,065 ²⁾
Kupfer (Cu)	< 0,269 ²⁾	< 0,148 ²⁾	< 0,121 ²⁾	< 0,128 ²⁾	< 0,128 ²⁾	0,172	0,167
Molybdän (Mo)	23,48	14,89	8,60	11,10	15,33	4,20	5,41
Nickel (Ni)	< 1,669 ²⁾	1,304	< 0,365 ²⁾	< 0,184 ²⁾	< 0,256 ²⁾	< 0,064 ¹⁾	< 0,07 ²⁾
Quecksilber (Hg)	< 0,012 ²⁾	< 0,005 ¹⁾	< 0,007 ²⁾	< 0,008 ²⁾	< 0,008 ²⁾	< 0,011 ²⁾	< 0,014 ²⁾
Selen (Se)	< 1,046 ²⁾	< 0,486 ²⁾	< 0,560 ¹⁾	< 0,640 ¹⁾	< 0,640 ¹⁾	< 0,644 ²⁾	< 0,642 ²⁾
Thallium (Tl) ¹⁾	< 0,104	< 0,048	< 0,056	< 0,064	< 0,064	< 0,064	< 0,064
Vanadium (V)	10,16	1,02	9,15	10,97	11,12	6,22	6,53
Zink (Zn)	12,35	7,41	4,94	5,63	4,62	7,78	7,05
TOC	< 2314 ²⁾	< 1468 ²⁾	< 847 ²⁾	< 1412 ²⁾	< 1154 ²⁾	< 640 ¹⁾	< 640 ¹⁾

1) alle Eluatkonzentrationen lagen unter der Bestimmungsgrenze

2) mehr als 20 % der Eluatkonzentrationen lagen unter der Bestimmungsgrenze

Tabelle A33: Analyseergebnisse der Blindproben aus dem Säulenversuch nach Schössner am „Mörtel“ mit RR2.6. Blindprobe 0: Unmittelbar vor Versuchsbeginn aus dem Abfluss der Säule; Blindproben von 1 bis 7: Leitungswasser

Parameter	Einheit	Proben-Nr.								
		0a	0b	1	2	3	4	5	6	7
pH	-	8,1	8,1	8,1	8,3	8,4	8,5	8,5	8,3	8,1
Leitfähigkeit	µS/cm	264	261	264	287	261	237	274	541	260
Redoxpotential	mV	399	424	416	461	432	432	398	437	417
Natrium, Na	mg/l	12,8	12,9	12,9	13,2	12,9	12,2	11,8	20,1	12,8
Kalium, K		1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	3,1	1,4
Calcium, Ca		30,2	30,7	31,4	31,9	32	28	27,6	32	32,6
Sulfat, SO ₄ ²⁻		28,2	28,6	28,6	28,7	28,7	28,5	29,1	31,6	33,8
Chlorid, Cl ⁻		14,5	14,4	14,5	14,6	14,6	14,5	14,5	15,7	16,9
TOC		< 1	< 2	< 2	< 2	< 2	< 1	< 1	< 2	1,03
Antimon (Sb)		0,137	0,124	< 0,1	< 0,1	0,1	0,103	0,104	0,107	0,119
Arsen (As)		< 1								
Barium (Ba)		12,6	11,8	13,3	13,1	13	11,9	13,1	14,2	14,7
Blei (Pb)	1,67	0,864	0,979	0,622	0,497	0,18	0,115	0,165	0,474	
Bor (B)	7,56	7,19	8,05	7,28	8,21	8,63	8,17	8,28	9,19	
Cadmium (Cd)	0,191	< 0,1	0,116	< 0,1				0,107	0,137	
Chrom (Cr)	< 0,1							0,162	< 0,1	
Kobalt (Co)	< 0,1									
Kupfer (Cu)	1,42	1,09	4,63	1,89	2,31	5,27	4,66	3,62	1,33	
Molybdän (Mo)	0,428	0,257	0,21	0,201	0,19	0,166	0,175	0,168	0,187	
Nickel (Ni)	0,131	0,133	0,787	0,752	0,757	< 0,1	< 0,1	1,06	0,947	
Quecksilber (Hg)	< 0,01									
Selen (Se)	< 1									
Thallium (Tl) 1)	< 0,1									
Vanadium (V)	0,391	0,421	0,101	< 0,1				0,196	< 0,1	
Zink (Zn)	17,2	5,21	52,9	48,8	49,8	43,8	44,8	94,7	95,4	

Tabelle A34: Analyseergebnisse der Eluate aus dem Säulenversuchs nach Schössner am „Mörtel“ mit RR2.6, Probe a

Zeit	Parameter								
	pH	Redoxpotential	Leitfähigkeit	Natrium	Kalium	Calcium	Chlorid	Sulfat	TOC
d	-	mV	µS/cm	mg/l					
0,02	8,0	413	262	12,9	1,3	31,1	14,4	28,6	< 2
0,04	8,0	429	259	12,9	1,3	31,1	14,7	29,3	
0,06	8,5	341	316	14,1	17,0	29,9	20,9	48,0	
0,08	10,3	263	425	15,0	62,6	11,4	25,1	61,0	
0,10	10,6	286	393	14,5	47,6	11,6	21,7	49,2	
0,13	10,6	268	399	14,3	40,2	14,1	20,9	46,5	
0,15	10,6	284	411	14,2	36,8	13,3	20,5	44,6	
0,17	10,6	277	383	14,3	34,7	16,1	19,9	43,2	1,00
0,19	10,6	294	368	14,2	32,3	14,7	19,8	44,8	< 2
0,21	10,6	289	360	14,1	29,8	16,8	19,3	41,0	1,00
0,23	10,5	305	373	14,2	27,9	15,8	18,8	40,6	< 2
0,25	10,5	302	347	14,2	26,1	16,8	18,5	38,8	
0,27	10,4	317	349	14,0	24,2	15,8	18,2	37,4	
0,29	10,4	320	339	14,0	22,2	18,9	17,4	35,9	< 1
0,31	10,4	334	337	14,0	20,4	19,9	17,4	34,2	
0,33	10,4	330	325	13,8	18,9	18,1	16,8	33,2	
1,00	9,7	354	287	13,8	6,3	21,8	14,5	28,4	
1,33	9,6	351	392	13,4	4,8	21,8	14,5	28,4	
2,00	9,5	367	275	13,4	3,6	25,1	14,5	28,5	
2,33	9,3	361	255	13,2	3,2	27,0	14,3	28,4	
5,00	9,1	371	242	12,5	2,4	29,0	14,4	28,3	
7,00	8,8	373	249	12,1	2,0	27,8	14,4	29,1	
14	8,1	428	455	17,7	12,2	31,2	16,4	33,2	< 2
28	8,2	430	285	12,8	1,6	32,0	17,0	33,6	1,77

Tabelle A34: Fortsetzung

Zeit	Parameter							
	Antimon (Sb)	Arsen (As)	Barium (Ba)	Blei (Pb)	Bor (B)	Cadmium (Cd)	Chrom (Cr)	Kobalt (Co)
d	µg/l							
0,02	0,247	< 1	12,2	0,341	8,38	< 0,1	0,257	< 0,1
0,04	0,129		13	0,263	8,17		< 0,1	
0,06	0,178		15,2	0,254	8,36		0,572	
0,08	0,145		17,1	0,357	7,84		0,703	
0,10	0,127		18,4	0,382	7,31		0,712	
0,13	0,136		17,6	0,413	7,39		0,768	
0,15	0,154		19,1	0,449	7,14		0,99	
0,17	0,15		16,5	0,393	7,75		2,46	
0,19	0,152		17,8	0,394	7,71		1,18	
0,21	0,155		16	0,375	6,91		1,33	
0,23	0,137		16,6	0,324	7,03		1,42	
0,25	0,13		16,4	0,285	6,86		1,53	
0,27	0,125		16,8	0,276	7,34		1,46	
0,29	0,129		15,7	0,233	7,05		1,43	
0,31	0,121		16,4	0,217	6,72		1,38	
0,33	0,129		15,8	0,194	6,91		1,27	
1,00	0,123		40	0,215	7,16		0,114	
1,33	0,116		37,6	0,203	6,97		0,101	
2,00	0,115		29,5	0,17	7,97		0,118	
2,33	0,114		27,5	0,112	8,5		< 0,1	
5,00	0,108	20,2	< 0,1	8,96	< 0,1			
7,00	0,116	17,3	0,106	8,7	< 0,1			
14	0,12	17	0,114	9,13	0,168			
28	0,133	19,9	0,507	8,92	0,108	< 0,1		

Tabelle A34: Fortsetzung

Zeit	Parameter								
	Kupfer (Cu)	Molybdän (Mo)	Nickel (Ni)	Quecksilber (Hg)	Selen (Se)	Thallium (Tl)	Vanadium (V)	Zink (Zn)	
d	µg/l								
0,02	0,582	0,244	0,259	< 0,01	< 1	< 0,1	0,761	2,22	
0,04	0,755	0,249	0,176		< 1		0,891	53,3	
0,06	0,837	4,56	0,2		1,04		1,40	4,81	
0,08	1,97	8,38	0,221		1,62		3,22	7,96	
0,10	1,10	5,47	0,148	0,0101	1,23		2,57	5,57	
0,13	1,07	4,84	0,135	< 0,01	1,16		1,96	1,30	
0,15	1,28	4,35	0,174	0,0306	< 0,1		1,47	3,30	
0,17	1,08	3,96	1,13	< 0,01			< 1	1,18	9,18
0,19	0,96	3,54	0,142				0,953	55,3	
0,21	0,922	3,00	0,13				0,874	36,9	
0,23	0,891	2,49	0,188				0,793	19,0	
0,25	0,910	2,18	0,155				0,795	9,64	
0,27	0,822	1,72	0,149				0,695	39,2	
0,29	0,782	1,40	0,146				0,7	8,66	
0,31	0,748	1,10	0,151				0,646	2,41	
0,33	0,748	0,891	0,144				0,63	15,7	
1,00	0,905	0,175	0,105				0,397	1,07	
1,33	0,8	0,179	0,129			0,372	1,88		
2,00	0,805	0,178	0,132			0,322	11,1		
2,33	0,746	0,195	< 0,1		0,276	2,03			
5,00	0,847	0,18	< 0,1	0,24	8,48				
7,00	1,24	0,163	< 0,1	0,208	26,5				
14	1,38	0,176	0,242	0,297	2,48				
28	0,554	0,183	0,508	0,0111	0,124	13,3			

Tabelle A35: Analyseergebnisse der Eluate aus dem Säulenversuch nach Schössner am „Mörtel“ mit RR2.6, Probe b

Zeit	Parameter								
	pH	Redoxpotential	Leitfähigkeit	Natrium	Kalium	Calcium	Chlorid	Sulfat	TOC
d	-	mV	µS/cm	mg/l					
0,02	8,1	428	259	12,8	1,2	31,0	14,6	28,6	< 1
0,04	8,0	390	259	12,9	1,3	30,9	14,5	28,7	< 1
0,06	8,3	373	310	13,8	14,4	30,9	19,6	43,0	1,1
0,08	10,3	295	407	14,7	51,6	13,2	23,3	55,7	1,9
0,10	10,7	264	420	14,4	47,4	12,8	21,7	50,5	1,4
0,13	10,8	271	420	14,3	41,8	14,0	21,3	47,6	1,2
0,15	10,7	256	437	14,3	38,3	13,9	20,6	45,6	1,2
0,17	10,7	269	398	14,3	34,9	14,9	20,1	44,1	1,1
0,19	10,7	259	392	14,3	32,3	15,2	19,8	45,3	< 1
0,21	10,6	285	387	14,1	29,5	15,4	19,0	41,5	< 1
0,23	10,5	268	383	14,2	27,1	15,2	18,6	39,4	< 1
0,25	10,6	294	374	14,0	26,1	16,8	18,5	38,8	1,1
0,27	10,5	284	365	13,9	23,0	15,4	17,7	37,3	< 1
0,29	10,3	310	357	14,0	21,4	15,0	17,3	36,1	
0,31	10,5	298	335	14,0	19,9	16,5	17,2	34,1	
0,33	10,5	324	340	13,8	18,6	17,3	16,9	33,0	
1,00	9,8	346	284	13,8	6,7	21,2	14,7	28,4	
1,33	9,7	332	257	13,4	5,2	21,1	14,6	28,3	
2,00	9,5	356	269	13,4	4,0	25,4	14,6	29,2	
2,33	9,3	340	255	13,3	3,5	25,4	14,6	28,4	
5,00	9,2	341	243	12,5	2,5	26,5	14,3	28,3	
7,00	9,0	353	266	12,2	2,1	27,7	14,3	29,4	
14	8,1	410	310	18,4	9,4	31,0	16,4	34,7	< 2
28	8,1	412	271	12,7	1,7	31,8	17,0	33,5	1,0

Tabelle A35: Fortsetzung

Zeit	Parameter								
	Antimon (Sb)	Arsen (As)	Barium (Ba)	Blei (Pb)	Bor (B)	Cadmium (Cd)	Chrom (Cr)	Kobalt (Co)	
d	µg/l								
0,02	0,276	< 1	12,6	0,266	7,67	< 0,1	< 0,1	< 0,1	
0,04	0,183		12,2	0,121	7,31		0,142		
0,06	0,171		14,1	0,159	7,4		0,324		
0,08	0,162		15,8	0,172	8,61		0,781		
0,10	0,167		132	38,2	19,4	5,94	10,9	0,268	
0,13	0,138		20,3	0,3	7	< 0,1	0,974	< 0,1	
0,15	0,174		20,6	0,296	6,94		1,23		
0,17	0,208		19	0,298	7,31		1,21		
0,19	0,179		17,9	0,262	7,51		1,44		
0,21	0,148		17,4	0,26	6,79		1,56		
0,23	0,14		17	0,228	7,13		1,64		
0,25	0,142		17,2	0,213	7,61		1,66		
0,27	0,133		16,9	0,198	6,88		1,69		
0,29	0,127		17,1	0,182	7,46		1,57		0,1
0,31	0,122		17,3	0,159	6,88		1,48		< 0,1
0,33	0,127		17,5	0,156	7,7	1,42			
1,00	0,113		45,4	< 0,1	6,78	0,208			
1,33	0,115		40,7	< 0,1	6,88	0,157			
2,00	0,113		32,8	< 0,1	7,43	0,152			
2,33	0,117		31,5	< 0,1	9,21	< 0,1			
5,00	0,102	22,3	< 0,1	9	< 0,1				
7,00	0,127	20	< 0,1	8,72	< 0,1				
14	0,119	17,9	< 0,1	8,82	0,185				
28	0,121	20,6	0,433	9,36	0,107	< 0,1			

Tabelle A35: Fortsetzung

Zeit	Parameter							
	Kupfer (Cu)	Molybdän (Mo)	Nickel (Ni)	Quecksilber (Hg)	Selen (Se)	Thallium (Tl)	Vanadium (V)	Zink (Zn)
d	µg/l							
0,02	0,578	0,225	0,178	< 0,01	< 1	< 0,1	0,833	10,7
0,04	0,555	0,227	0,172				1,03	5,95
0,06	0,715	3,28	0,15				1,7	18,2
0,08	1,3	6,48	0,198	0,0112	1,33		2,54	22,5
0,10	1,21	5,5	0,208	< 0,01	1,05		2,49	648
0,13	0,974	5,15	0,161		1,04		2,13	13,5
0,15	1,07	4,75	0,226		1,09		1,6	72,3
0,17	0,939	4,02	0,163		1,21		12,9	
0,19	0,991	3,55	0,262		1,07		24,3	
0,21	0,928	3,01	0,191		0,952		12,4	
0,23	0,878	2,44	0,16		0,84		2	
0,25	0,793	2,01	0,187		0,792		2,83	
0,27	0,833	1,6	0,16		0,75		4,75	
0,29	0,803	1,33	0,175		0,706		3,27	
0,31	0,752	1,06	0,17	0,69	3,19			
0,33	0,733	0,867	0,183	< 1	0,624	3,68		
1,00	1,07	0,188	0,144		0,442	4,21		
1,33	0,892	0,191	0,143		0,415	4,92		
2,00	0,837	0,171	0,159		0,373	2,95		
2,33	0,725	0,187	< 0,1		0,275	31,4		
5,00	0,831	0,218			0,231	5,02		
7,00	0,882	0,178			0,212	17,8		
14	1,26	0,174	0,238		0,303	24,6		
28	0,456	0,192	0,485		0,0112	0,126	12,2	

Tabelle A36: Analyseergebnisse der Blindproben aus dem Säulenversuch nach Schössner am „Mörtel“ mit RR4.4. Blindprobe 0: Unmittelbar vor Versuchsbeginn aus dem Abfluss der Säule; Blindproben von 1 bis 7: Leitungswasser

Parameter	Einheit	Proben-Nr.							
		0	1	2	3	4	5	6	7
pH	-	8,4	8,2	8,4	8,3	8,3	8,6	8,2	8,4
Leitfähigkeit	μS/cm	239	229	256	468	253	250	264	275
Redoxpotential	mV	385	409	416	406	397	416	424	444
Natrium, Na	mg/l	12,9	12,8	12,6	12,3	12,2	12,2	12,1	14,2
Kalium, K		1,6	1,6	1,7	1,6	1,6	1,6	1,7	1,6
Calcium, Ca		29,3	31,7	32,7	33,1	28,6	27,7	32,2	33,5
Sulfat, SO ₄ ²⁻		15,9	16,2	16,3	16,6	16,1	16	15,8	14,6
Chlorid, Cl ⁻		26,5	25,8	26,3	26,7	26,5	26,7	28,1	25,5
TOC		1,23	1,19	1,49	1,23	2,22	2,03	2,00	1,32
Antimon (Sb)		0,164	0,116	0,146	0,118	0,114	0,124	0,114	0,125
Arsen (As)		< 1							
Barium (Ba)	10,7	15,1	14,4	14,5	12,5	13,4	14,5	14,3	
Blei (Pb)	< 0,1	< 0,1	1,88	0,822	0,52	0,439	0,187	0,302	
Bor (B)	24	17	10,7	9,87	12,7	11,2	12,2	10,7	
Cadmium (Cd)	< 0,1	0,126	0,137	0,159	0,123	< 0,1	0,152	0,137	
Chrom (Cr)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,154	0,152	0,157	0,187	0,157	
Kobalt (Co)	< 0,1								
Kupfer (Cu)	0,903	2,44	3,34	6,04	8,16	3,67	2,84	13,8	
Molybdän (Mo)	0,241	0,214	0,2	0,2	0,211	0,203	0,202	0,206	
Nickel (Ni)	0,115	0,941	1,03	1,26	1,1	0,952	1,29	1,26	
Quecksilber (Hg)	< 0,01								
Selen (Se)	2,51	1,96	1,5	< 1					
Thallium (Tl)	< 0,1								
Vanadium (V)	0,332	< 0,1	< 0,1	0,102	0,136	0,14	0,148	< 0,1	
Zink (Zn)	13,9	108	95,5	108	69,4	58,2	91,6	70	

Tabelle A37: Analyseergebnisse der Eluate aus dem Säulenversuch nach Schössner am „Mörtel“ mit RR4.4, Probe a

Zeit	Parameter								
	pH	Redoxpotential	Leitfähigkeit	Natrium	Kalium	Calcium	Chlorid	Sulfat	TOC
d	-	mV	µS/cm	mg/l					
0,02	8,2	395	251	13,1	1,7	29,6	16,3	26,5	1,21
0,04	8,6	378	280	18,5	3,4	33,8	17,5	47,4	1,68
0,06	11,4	189	1523	114,4	103,2	95,3	47,4	390,2	2,89
0,08	11,8	166	2294	115,8	125,8	224,1	35,4	369,7	2,81
0,10	11,8	165	1916	59,9	67,7	255,3	32,3	206,0	1,52
0,13	11,8	168	1702	37,6	40,2	206,8	21,1	143,9	1,46
0,15	11,7	172	1487	26,2	25,1	193,8	18,7	105,1	1,01
0,17	11,8	175	1397	18,6	14,9	158,3	17,0	85,6	< 1
0,19	11,7	177	1301	15,6	9,6	126,8	16,2	73,0	1,13
0,21	11,7	177	1226	14,7	7,2	117,7	16,0	67,7	< 1
0,23	11,7	173	1160	14,0	5,8	108,5	16,2	62,6	< 1
0,25	11,7	173	1113	13,6	5,1	107,7	16,1	57,7	< 1
0,27	11,7	170	1069	13,5	4,6	103,5	15,9	55,8	< 1
0,29	11,6	171	1023	13,3	4,2	98,8	16,1	54,4	< 1
0,31	11,6	168	982	13,3	4,0	93,2	16,5	51,7	< 1
0,33	11,6	156	945	13,3	3,8	86,2	17,4	54,9	1,01
1,00	10,7	180	329	13,1	2,5	18,5	16,3	32,7	1,4
1,33	10,2	187	272	13,0	2,3	14,8	16,3	31,9	1,18
2,00	9,8	208	293	12,8	2,0	19,1	16,9	33,1	1,27
2,33	9,7	219	252	12,6	2,0	21,0	16,8	31,3	1,97
5,00	9,4	248	254	12,3	1,8	27,9	16,5	30,1	2,22
7,00	9,5	389	254	12,4	1,7	29,6	16,5	28,8	2,76
14	8,9	374	268	12,2	1,7	33,2	16,7	28,6	2,33
28	8,5	433	274	14,1	1,6	33,9	16,6	28,0	1,35

Tabelle A37: Fortsetzung

Zeit	Parameter							
	Antimon (Sb)	Arsen (As)	Barium (Ba)	Blei (Pb)	Bor (B)	Cadmium (Cd)	Chrom (Cr)	Kobalt (Co)
d	µg/l							
0,02	0,33	< 1	10,6	< 0,1	11,2	< 0,1	0,712	0,141
0,04	0,23	< 1	13,7	< 0,1	29,4	< 0,1	3,82	< 0,1
0,06	0,42	< 1	102	0,11	83,4	0,22	36,1	0,117
0,08	0,37	1,01	111	0,32	86,1	0,21	39,5	0,140
0,10	0,36	1,10	83,6	0,47	102	0,12	30,0	0,108
0,13	0,40	< 1	93,4	0,36	124	< 0,1	28,3	0,129
0,15	0,43	< 1	102	0,30	149	< 0,1	27,5	0,155
0,17	0,47	< 1	113	0,30	169	< 0,1	27,3	< 0,1
0,19	0,48	< 1	117	0,26	207	< 0,1	27,9	< 0,1
0,21	0,52	< 1	121	0,25	215	< 0,1	28,1	< 0,1
0,23	0,54	< 1	126	0,22	219	< 0,1	27,7	< 0,1
0,25	0,57	< 1	119	0,20	232	< 0,1	28,3	< 0,1
0,27	0,58	< 1	117	0,20	230	< 0,1	27,6	< 0,1
0,29	0,62	< 1	115	0,93	232	< 0,1	27,0	< 0,1
0,31	0,62	< 1	115	0,19	226	< 0,1	27,2	< 0,1
0,33	0,63	< 1	112	0,18	225	< 0,1	25,8	< 0,1
1,00	0,76	2,79	52,5	0,38	121	< 0,1	7,80	< 0,1
1,33	0,81	4,25	35,1	0,30	129	< 0,1	6,19	< 0,1
2,00	0,79	4,80	26,8	< 0,1	123	< 0,1	4,14	< 0,1
2,33	0,78	4,78	24,8	< 0,1	118	< 0,1	3,97	< 0,1
5,00	0,72	4,04	21,6	< 0,1	97,6	< 0,1	1,99	< 0,1
7,00	0,58	3,30	18,8	< 0,1	72,4	< 0,1	1,52	< 0,1
14	0,38	2,40	19,3	< 0,1	43,1	< 0,1	0,596	< 0,1
28	0,21	1,26	17,3	< 0,1	19,1	< 0,1	0,327	< 0,1

Tabelle A37: Fortsetzung

Zeit	Parameter							
	Kupfer (Cu)	Molybdän (Mo)	Nickel (Ni)	Quecksilber (Hg)	Selen (Se)	Thallium (Tl)	Vanadium (V)	Zink (Zn)
d	µg/l							
0,02	13,2	0,312	112	< 0,01	1,52	< 0,1	0,547	101
0,04	1,04	40,0	< 0,1	< 0,01	2,02	< 0,1	0,701	17,2
0,06	1,74	680	< 0,1	0,0271	7,95	< 0,1	2,02	14,6
0,08	1,24	728	< 0,1	0,0299	7,05	< 0,1	5,70	11,3
0,10	0,880	352	< 0,1	0,0142	3,91	< 0,1	7,51	2,44
0,13	0,843	228	< 0,1	< 0,01	2,47	< 0,1	7,28	6,65
0,15	0,638	153	< 0,1	< 0,01	2,49	< 0,1	7,01	14,2
0,17	0,725	113	< 0,1	< 0,01	2,47	< 0,1	7,08	5,39
0,19	0,676	95,0	< 0,1	< 0,01	2,20	< 0,1	7,37	1,78
0,21	0,731	82,9	< 0,1	< 0,01	2,19	< 0,1	7,77	1,02
0,23	0,726	74,6	< 0,1	< 0,01	2,22	< 0,1	8,09	2,22
0,25	0,658	70,1	< 0,1	< 0,01	2,11	< 0,1	8,85	1,17
0,27	0,628	64,9	< 0,1	< 0,01	1,96	< 0,1	9,24	0,860
0,29	0,735	60,3	< 0,1	< 0,01	1,90	< 0,1	10,2	1,32
0,31	0,768	57,1	< 0,1	< 0,01	1,75	< 0,1	10,9	6,43
0,33	0,685	54,1	< 0,1	< 0,01	1,64	< 0,1	11,1	1,28
1,00	0,817	15,6	< 0,1	< 0,01	< 1	< 0,1	18,0	20,6
1,33	0,847	11,0	0,176	< 0,01	< 1	< 0,1	20,8	4,67
2,00	0,817	6,51	0,163	< 0,01	< 1	< 0,1	17,1	1,11
2,33	1,28	5,33	0,259	< 0,01	< 1	< 0,1	17,5	2,91
5,00	0,906	2,84	0,267	< 0,01	< 1	< 0,1	11,2	3,18
7,00	1,27	1,83	0,260	< 0,01	< 1	< 0,1	8,80	4,38
14	1,38	0,886	0,393	< 0,01	< 1	< 0,1	4,38	20,5
28	2,45	0,472	0,470	< 0,01	< 1	< 0,1	2,37	16,1

Tabelle A38: Analyseergebnisse der Eluate aus dem Säulenversuch nach Schössner am „Mörtel“ mit RR4.4, Probe b

Zeit	Parameter								
	pH	Redoxpotential	Leitfähigkeit	Natrium	Kalium	Calcium	Chlorid	Sulfat	TOC
d	-	mV	$\mu\text{S/cm}$	mg/l					
0,02	8,2	395	251	13,1	1,7	29,6	16,3	26,5	1,69
0,04	8,6	378	280	18,5	3,4	33,8	17,5	47,4	2,21
0,06	11,4	189	1523	114,4	103,2	95,3	47,4	390,2	4,4
0,08	11,8	166	2294	115,8	125,8	224,1	35,4	369,7	2,6
0,10	11,8	165	1916	59,9	67,7	255,3	32,3	206,0	1,84
0,13	11,8	168	1702	37,6	40,2	206,8	21,1	143,9	1,4
0,15	11,7	172	1487	26,2	25,1	193,8	18,7	105,1	1,27
0,17	11,8	175	1397	18,6	14,9	158,3	17,0	85,6	1,27
0,19	11,7	177	1301	15,6	9,6	126,8	16,2	73,0	1,15
0,21	11,7	177	1226	14,7	7,2	117,7	16,0	67,7	1,17
0,23	11,7	173	1160	14,0	5,8	108,5	16,2	62,6	1,26
0,25	11,7	173	1113	13,6	5,1	107,7	16,1	57,7	< 1
0,27	11,7	170	1069	13,5	4,6	103,5	15,9	55,8	1,18
0,29	11,6	171	1023	13,3	4,2	98,8	16,1	54,4	1,26
0,31	11,6	168	982	13,3	4,0	93,2	16,5	51,7	1,12
0,33	11,6	156	945	13,3	3,8	86,2	17,4	54,9	1,59
1,00	10,7	180	329	13,1	2,5	18,5	16,3	32,7	2,15
1,33	10,2	187	272	13,0	2,3	14,8	16,3	31,9	1,16
2,00	9,8	208	293	12,8	2,0	19,1	16,9	33,1	1,23
2,33	9,7	219	252	12,6	2,0	21,0	16,8	31,3	2,29
5,00	9,4	248	254	12,3	1,8	27,9	16,5	30,1	2,44
7,00	9,5	389	254	12,4	1,7	29,6	16,5	28,8	2,71
14	8,87	396	270	12,3	1,8	33,6	16,4	28,1	2,36
28	8,5	428	273	14,1	1,6	34	16,8	28,2	< 1

Tabelle A38: Fortsetzung

Zeit	Parameter							
	Antimon (Sb)	Arsen (As)	Barium (Ba)	Blei (Pb)	Bor (B)	Cadmium (Cd)	Chrom (Cr)	Kobalt (Co)
d	µg/l							
0,02	0,32	< 1	11,3	<0,1	15,1	< 0,1	<0,1	<0,1
0,04	0,18	< 1	16,7	<0,1	22,7	< 0,1	5,6	<0,1
0,06	0,36	< 1	130	0,17	88,0	0,36	54,0	0,12
0,08	0,45	< 1	111	0,43	108	0,20	38,7	0,15
0,10	0,44	< 1	108	0,44	116	< 0,1	28,2	0,13
0,13	0,43	1,02	136	0,39	137	< 0,1	27,1	0,12
0,15	0,45	< 1	144	0,33	163	< 0,1	29,3	0,13
0,17	0,47	< 1	153	0,28	197	< 0,1	30,4	0,13
0,19	0,50	< 1	146	0,26	223	< 0,1	30,8	0,11
0,21	0,55	< 1	154	0,24	233	< 0,1	31,3	< 0,1
0,23	0,52	< 1	145	0,22	244	< 0,1	29,7	0,11
0,25	0,53	< 1	144	0,25	250	< 0,1	30,0	<0,1
0,27	0,55	< 1	143	0,19	247	< 0,1	29,0	< 0,1
0,29	0,56	< 1	135	0,20	247	< 0,1	29,2	< 0,1
0,31	0,59	< 1	137	0,18	242	< 0,1	30,4	< 0,1
0,33	0,58	1,01	129	0,18	232	< 0,1	29,1	< 0,1
1,00	0,82	2,83	44,0	0,28	137	< 0,1	9,67	< 0,1
1,33	0,88	4,58	31,3	0,10	159	< 0,1	7,08	< 0,1
2,00	0,94	5,06	26,1	< 0,1	157	< 0,1	5,47	< 0,1
2,33	0,94	5,23	25,4	< 0,1	148	< 0,1	4,77	< 0,1
5,00	0,88	5,50	22,9	< 0,1	120	< 0,1	2,69	< 0,1
7,00	0,67	3,46	19,6	< 0,1	83	< 0,1	1,38	< 0,1
14	0,32	2,77	18,5	< 0,1	34	< 0,1	0,495	< 0,1
28	0,21	1,12	17,9	< 0,1	18	< 0,1	0,273	< 0,1

Tabelle A38: Fortsetzung

Zeit	Parameter							
	Kupfer (Cu)	Molybdän (Mo)	Nickel (Ni)	Quecksilber (Hg)	Selen (Se)	Thallium (Tl)	Vanadium (V)	Zink (Zn)
d	µg/l							
0,02	1,09	0,30	< 0,1	< 0,01	< 1	< 0,1	1,02	9,48
0,04	1,21	71,1	< 0,1	< 0,01	1,20	< 0,1	0,75	8,07
0,06	1,81	1100	< 0,1	0,032	9,61	< 0,1	3,25	2,48
0,08	1,10	649	< 0,1	0,020	5,17	< 0,1	6,29	6,04
0,10	0,92	220	< 0,1	< 0,01	1,70	< 0,1	8,15	3,07
0,13	0,72	137	< 0,1	< 0,01	1,79	< 0,1	7,49	2,81
0,15	0,78	104	< 0,1	< 0,01	1,56	< 0,1	7,85	28,5
0,17	1,00	92,1	< 0,1	< 0,01	1,60	< 0,1	7,49	11,9
0,19	0,73	82,1	< 0,1	< 0,01	1,52	< 0,1	7,82	3,63
0,21	0,71	75,3	< 0,1	< 0,01	1,70	< 0,1	7,84	1,10
0,23	0,69	69,1	< 0,1	< 0,01	1,49	< 0,1	8,06	15,5
0,25	0,71	63,8	< 0,1	< 0,01	1,67	< 0,1	8,52	1,76
0,27	0,63	59,9	< 0,1	< 0,01	1,60	< 0,1	8,80	1,70
0,29	0,73	56,6	0,183	< 0,01	1,47	< 0,1	9,49	1,56
0,31	0,86	53,1	0,215	< 0,01	1,41	< 0,1	10,8	3,26
0,33	11,9	50,2	2,03	< 0,01	1,39	< 0,1	11,3	2,93
1,00	1,14	14,3	< 0,1	< 0,01	< 1	< 0,1	23,2	2,46
1,33	0,83	10,9	0,245	< 0,01	< 1	< 0,1	25,6	1,45
2,00	1,04	6,91	0,138	< 0,01	< 1	< 0,1	22,7	1,46
2,33	1,28	5,33	0,259	< 0,01	< 1	< 0,1	17,5	2,91
5,00	0,906	2,84	0,267	< 0,01	< 1	< 0,1	11,2	3,18
7,00	1,27	1,83	0,260	< 0,01	< 1	< 0,1	8,80	4,38
14	1,38	0,886	0,393	< 0,01	< 1	< 0,1	4,38	20,5
28	2,45	0,472	0,470	< 0,01	< 1	< 0,1	2,37	16,1

Anhang B – Bilder

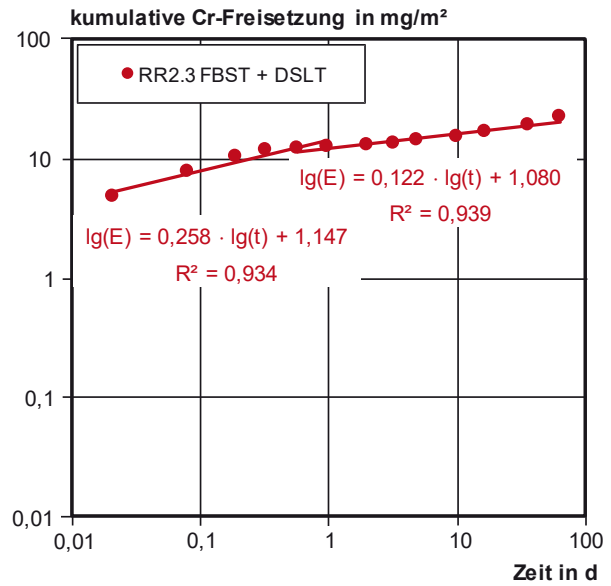
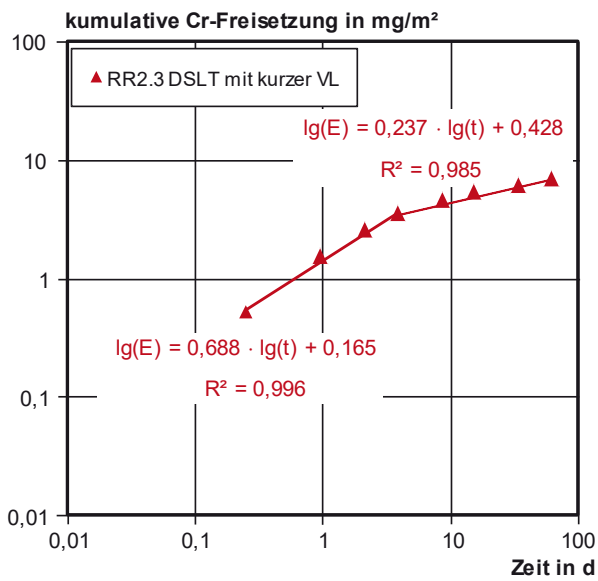
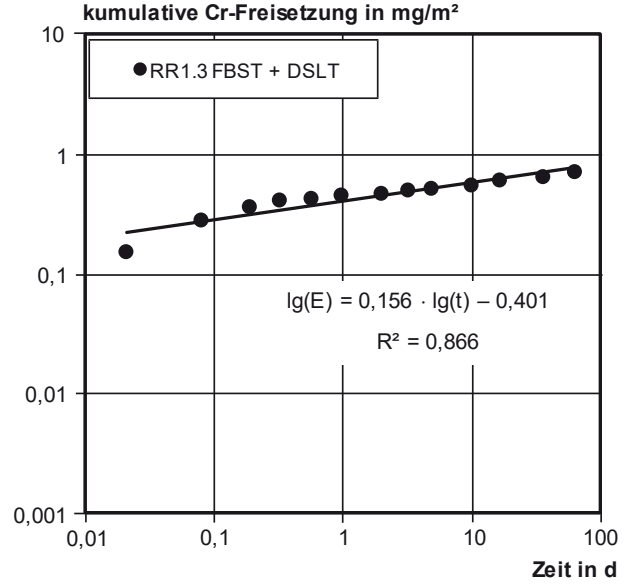
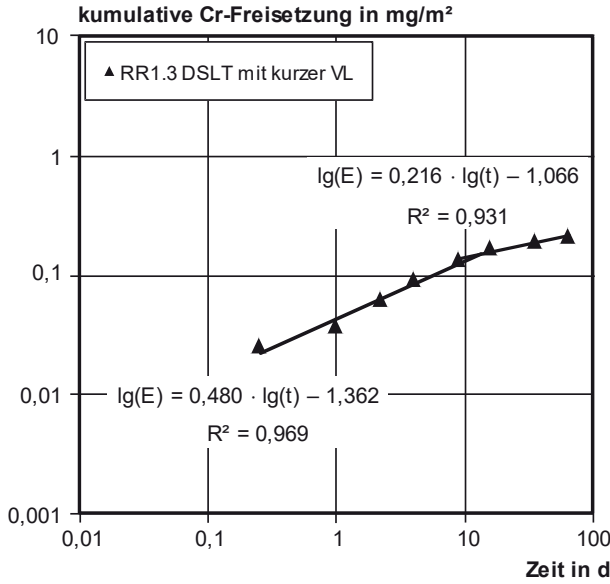


Bild B1: Approximation der Chromfreisetzung der Rahmenrezepturen RR1.3 und RR2.3 im DSLT mit verkürzter Vorlagerung (links) bzw. im Frischbetonstandtest mit anschließendem DSLT (rechts)

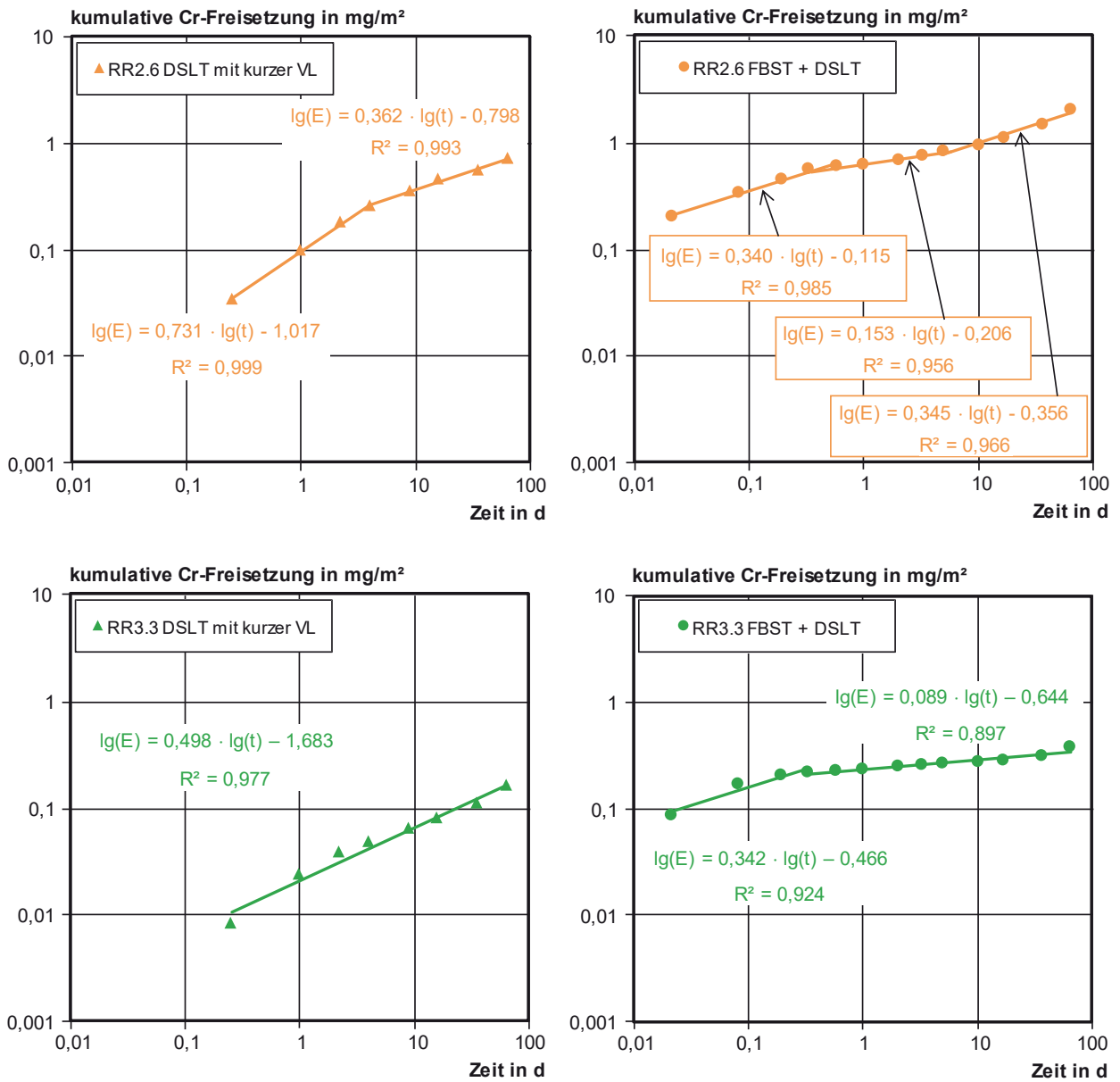


Bild B2: Approximation der Chromfreisetzung der Rahmenrezepturen RR2.6 und RR3.3 im DSLT mit verkürzter Vorlagerung (links) bzw. im Frischbetonstandtest mit anschließendem DSLT (rechts)

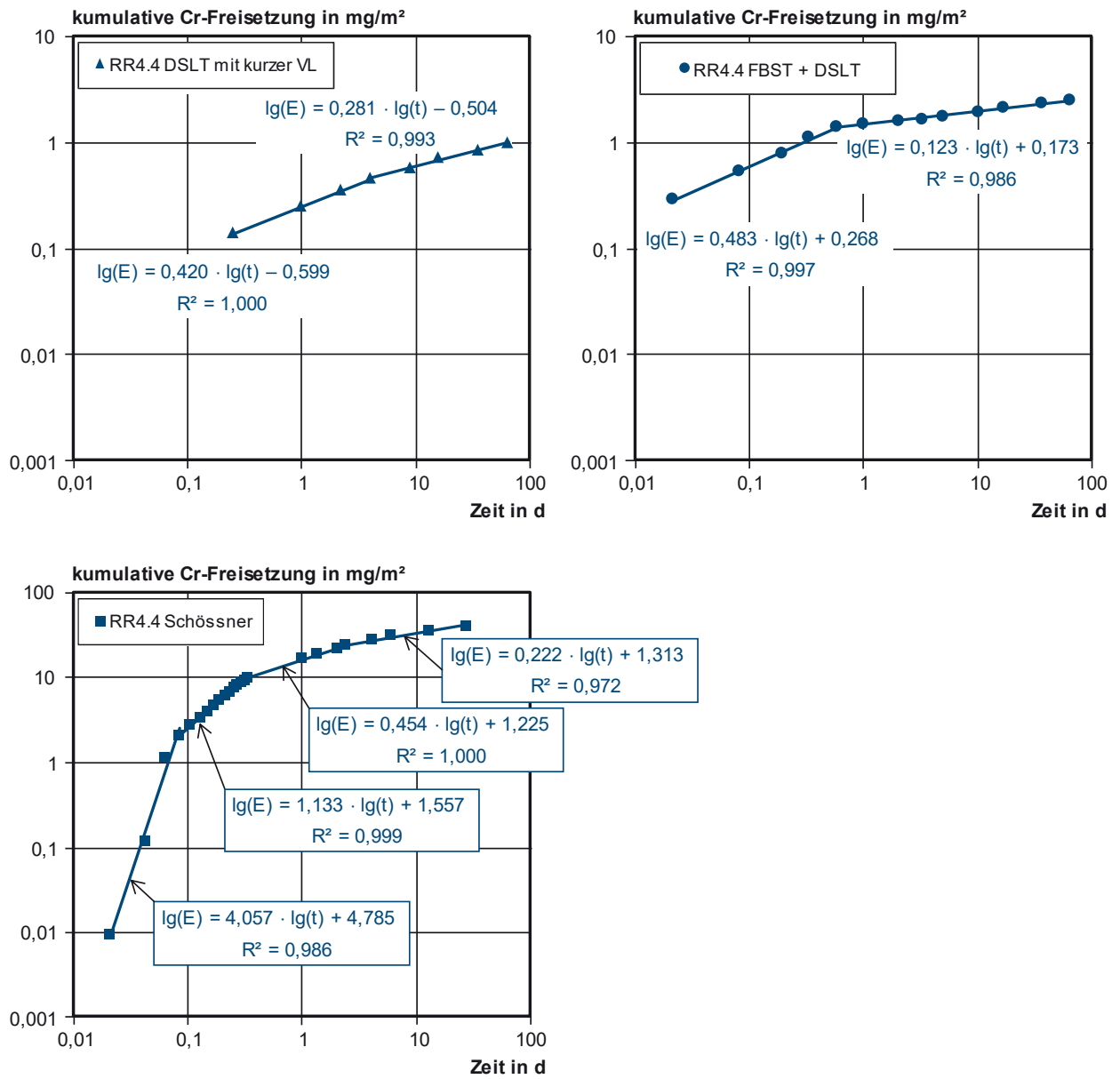


Bild B3: Approximation der Chromfreisetzung der Rahmenrezeptur RR4.4 im DSLT mit verkürzter Vorlagerung (oben links), im Frischbetonstandtest mit anschließendem DSLT (oben rechts) und im Säulenversuch nach Schössner (unten)

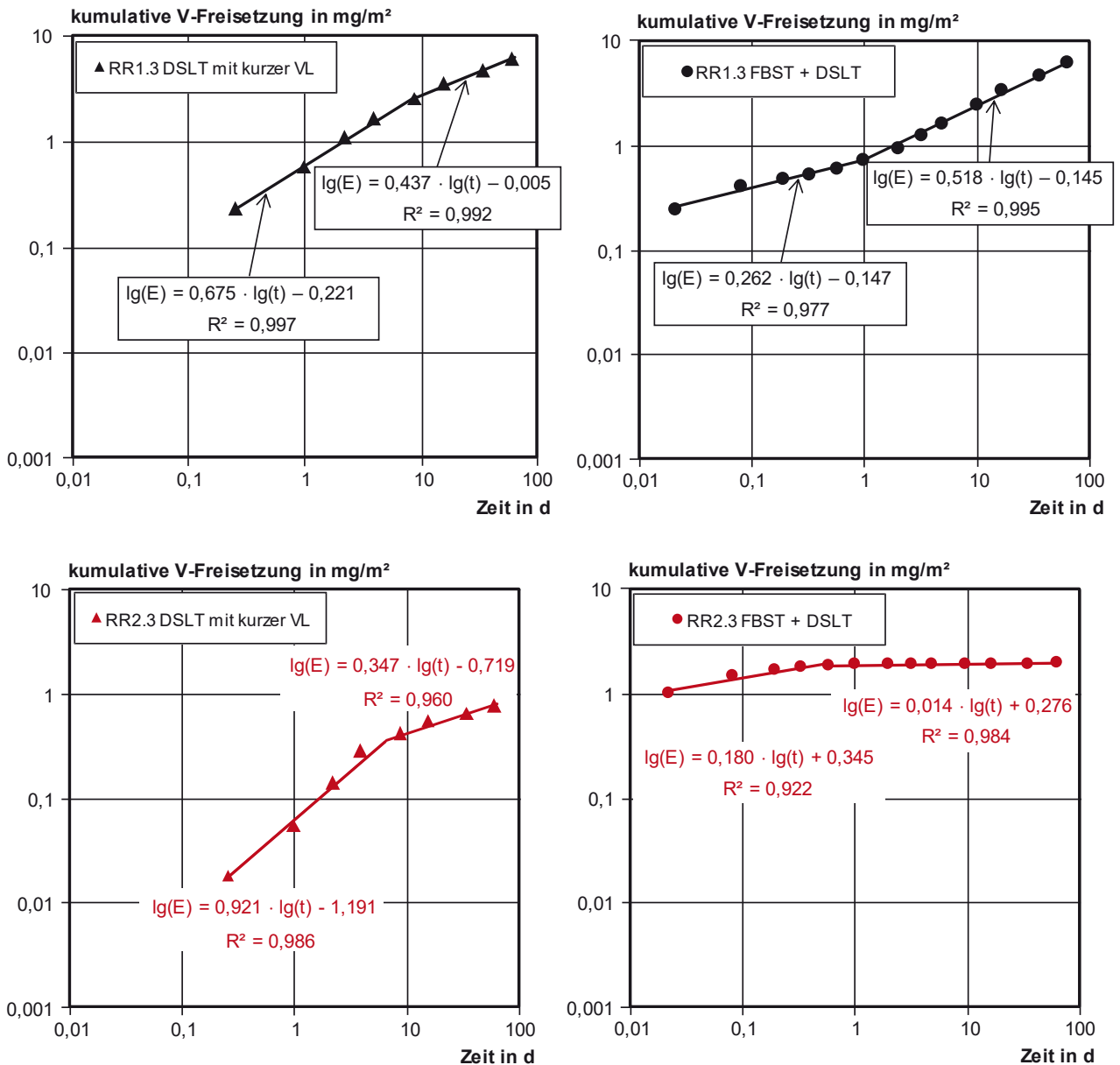


Bild B4: Approximation der Vanadiumfreisetzung der Rahmenrezepturen RR1.3 und RR2.3 im DSLT mit verkürzter Vorlagerung (links) bzw. im Frischbetonstandtest mit anschließendem DSLT (rechts)

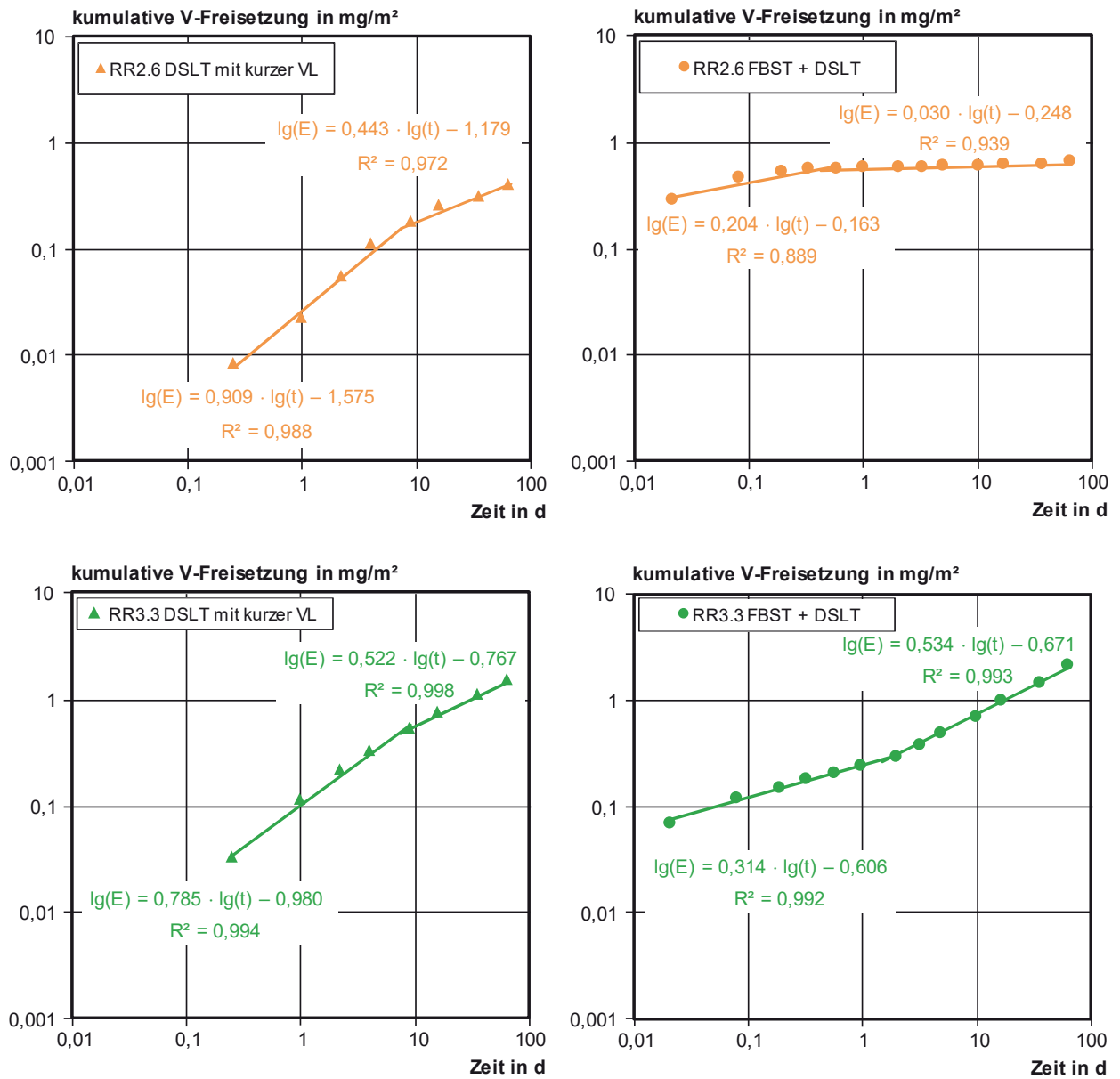


Bild B5: Approximation der Vanadiumfreisetzung der Rahmenrezepturen RR2.6 und RR3.3 im DSLT mit verkürzter Vorlagerung (links) bzw. im Frischbetonstandtest mit anschließendem DSLT (rechts)

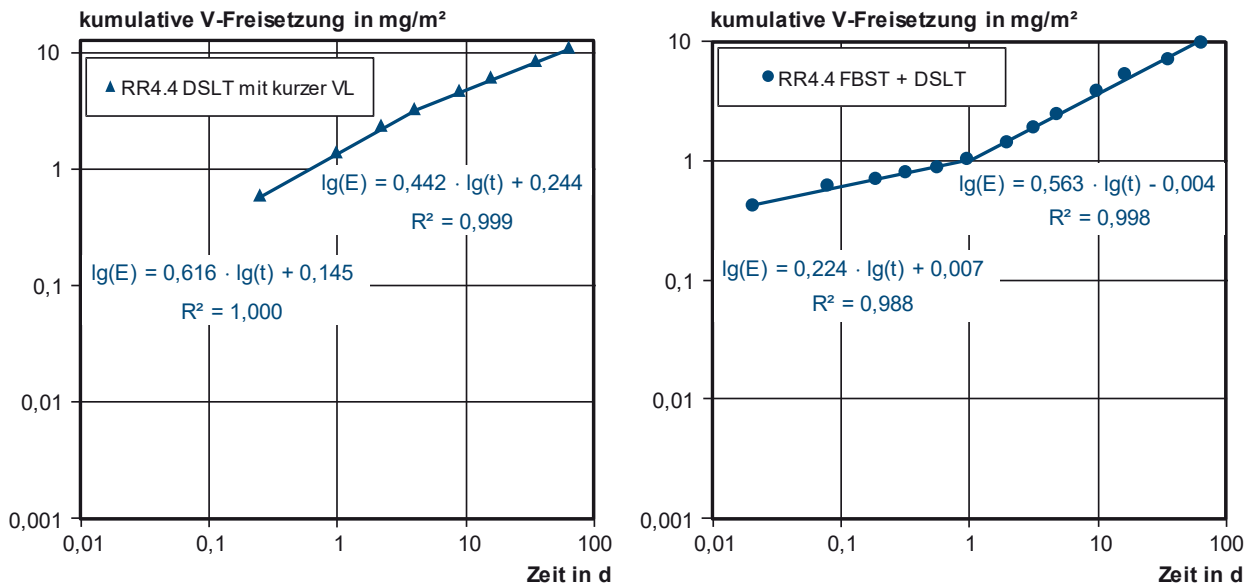


Bild B6: Approximation der Vanadiumfreisetzung der Rahmenrezeptur RR4.4 im DSLT mit verkürzter Vorlagerung (links) bzw. im Frischbetonstandtest mit anschließendem DSLT (rechts)

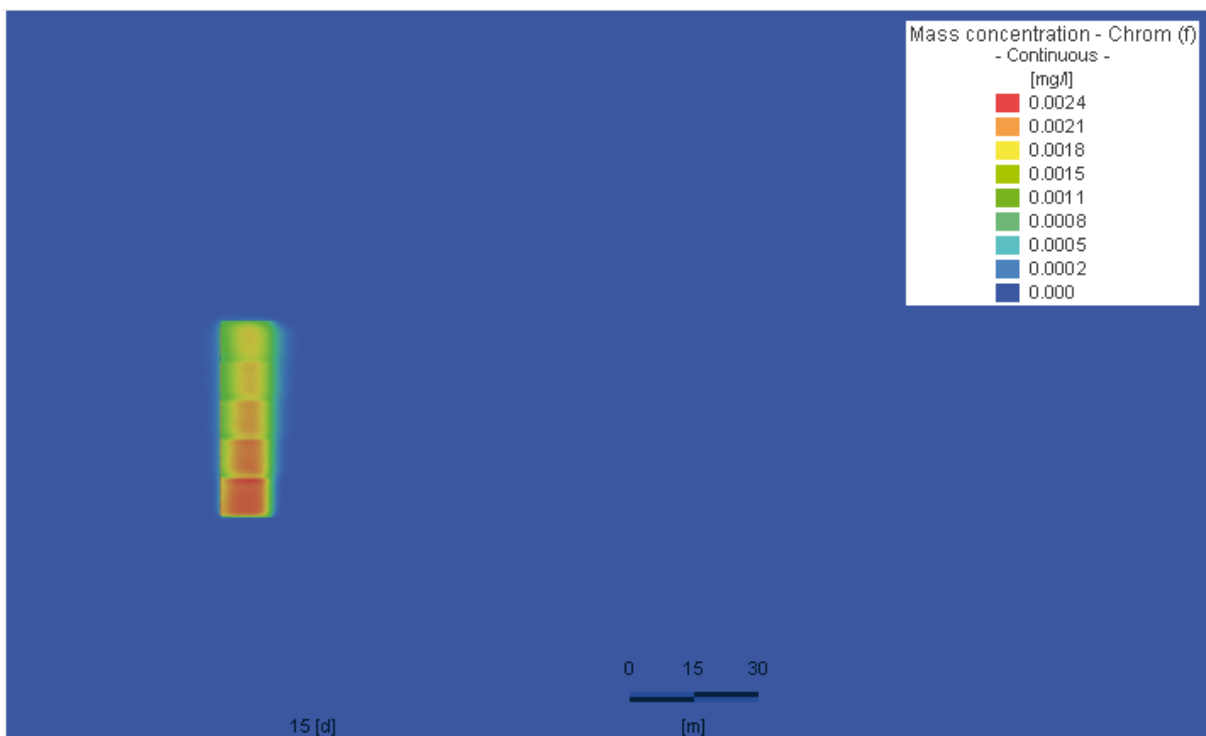


Bild B7: Chromkonzentration im Grundwasser 5 cm unter der Sohle, 5 Tage nach Beginn des Eintrags - ermittelt mit den Versuchsergebnissen aus dem Frischbetonstandtest mit anschließendem DSLT an der Zementsuspension RR3.3

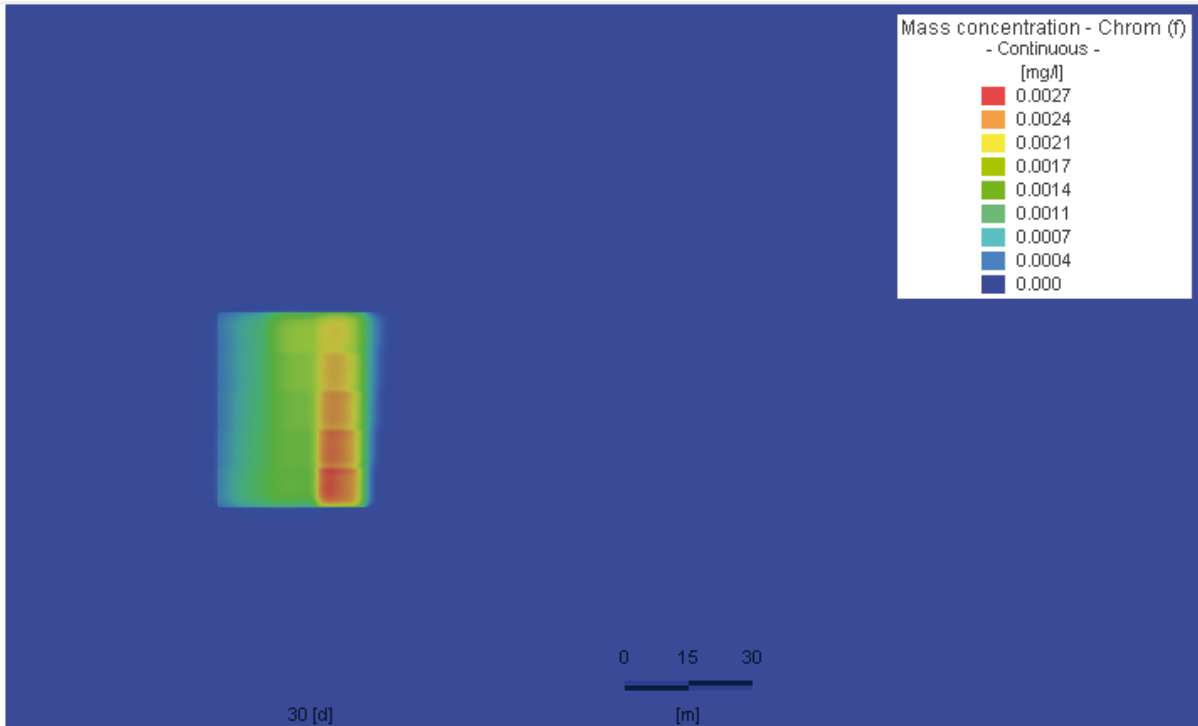


Bild B8: Chromkonzentration im Grundwasser 5 cm unter der Sohle, 20 Tage nach Beginn des Eintrags - ermittelt mit den Versuchsergebnissen aus dem Frischbetonstandtest mit anschließendem DSLT an der Zementsuspension RR3.3

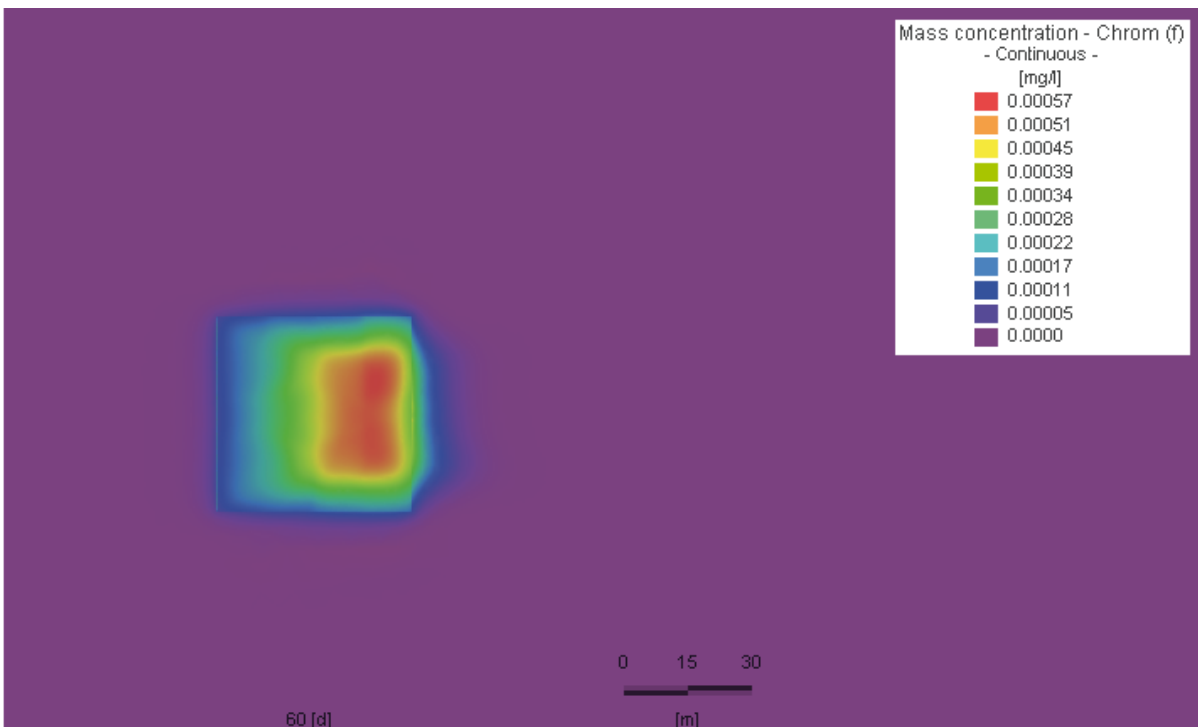


Bild B9: Chromkonzentration im Grundwasser 5 cm unter der Sohle, 50 Tage nach Beginn des Eintrags - ermittelt mit den Versuchsergebnissen aus dem Frischbetonstandtest mit anschließendem DSLT an der Zementsuspension RR3.3