

**Untersuchungen zu
Stofftransporten aus Injektionssohlen
bei Trogbaugruben**

T 3349

T 3349

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

2017

ISBN 978-3-7388-0064-7

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



**Öffentlich bestellte und vereidigte
Sachverständige und Prüfsachver-
ständige für Erd- und Grundbau**

Darwinstraße 13 · 10589 Berlin
Tel. +49-30-78 90 89-0 · Fax -89
E-Mail office@gudconsult.de
www.gudconsult.de

Standorte
| Hamburg | Leipzig | Athen
| Köln | Michendorf | New Delhi

DIBt Forschungsvorhaben

„Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen bei Trograugruben“

Abschlussbericht

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)
Kolonnenstr. 30 B
10829 Berlin

**Gutachten
Beratung
Planung
Bauüberwachung**

Forschende Stellen: GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH
Darwinstr. 13, 10589 Berlin

Freie Universität Berlin, Fachbereich Geo-
wissenschaften, AG Geoökologie
Malteser Str. 74-100, 12249 Berlin

Geschäftsleitung
Dr. rer. nat. Götz Hirschberg
Dr.-Ing. Fabian Kirsch¹
Dr.-Ing. Jens Mittag¹
Dipl.-Ing. Univ. Nikolaus Schneider
Dr.-Ing. Silke Appel (ppa.)
Dipl.-Ing. Kerstin Deterding (ppa.)⁵
Dipl.-Ing. Hilmar Leonhardt (ppa.)
Dipl.-Ing. Josef A. Patron (ppa.)

Bearbeiter: Prof. Dr. K.-M. Borchert (GuD)
Prof. Dr. mult. Dr. h. c. K. Terytze (FU Berlin)
Dr. rer. nat. R. Wagner (FU Berlin)
Dipl.-Geol. M. Allinger (GuD)

Senior-Partner
Prof. Dr.-Ing. Kurt-M. Borchert²
Dipl.-Ing. Hans L. Hebener^{1,3}
Prof. Dr.-Ing. Thomas Richter^{1,4}
Univ. Prof. Dr.-Ing. Stavros Savidis

Berlin, den 15.02.2017

Berichtsnummer: G 1/16

Dieser Bericht einschließlich Deckblatt umfasst 88 Seiten.

K:\Weichgel_G1.16\BERICHTE-GUTACHTEN\170214_Forschungsbericht_Injektionssohlen_maal_rowa.docx

¹ Anerkannter Prüfsachverständiger für den Erd- und Grundbau.
² von der IHK Berlin öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Baugruben, Injektionen und Bauwerksabdichtungen im Untergrund.
³ von der Baukammer Berlin öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Spezialtiefbau, Schwingungen im Baugrund und Bauwerk, Gründungsschäden.
⁴ von der IHK Berlin öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Gründungen, Wasserhaltungen, Erschütterungen im Baugrund.
⁵ EBA-Gutachter für Geotechnik bei Baumaßnahmen im Eisenbahnbau.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
ABBILDUNGEN	4
TABELLEN.....	6
0 AUFGABENSTELLUNG.....	8
1 EINLEITUNG	9
2 RECHERCHE	11
3 SÄULENVERSUCHE.....	13
3.1 Versuchsvorbereitung	13
3.1.1 Bauprodukt	13
3.1.2 Säulenversuchsanlage	13
3.1.3 Vorbereitung Versuchssäulen	14
3.1.4 Verwendete Sande und Kohlereibsel	15
3.2 Versuchsdurchführung	17
3.2.1 Allgemeine Angaben	17
3.2.2 Anmischung des Bauproduktes und Injektion	17
3.2.3 Parameterbestimmung	17
3.2.4 Charakterisierung der Probekörper	18
3.2.5 Bestimmung Huminstoffe	19
3.2.5.1 Feststoffproben	19
3.2.5.2 Eluatproben	20
4 BAUTECHNISCHE GRUNDLAGEN ZU INJEKTIONSSOHLN	21
5 GRUNDWASSERMODELLIERUNG.....	24
5.1 Allgemeine Grundlagen.....	24
5.2 Modellgebiet und Parametrisierung.....	25
5.3 Modellbaugruben	27
5.4 Modellvarianten	30
5.5 Grundlagen zur Implementierung der Stofffreisetzung im Modell	32
5.6 Auswertung der Grundwassermodellierungen.....	38
6 ERGEBNISSE.....	43
6.1 Ergebnisse der Säulenversuche	43
6.1.1 Prüfkörper	43
6.1.2 Parameterbestimmung	43
6.1.2.1 Versuchsreihe ST 1	44
6.1.2.2 Versuchsreihe ST 2	47
6.1.3 Freisetzungsberechnung.....	50
6.1.4 Huminstoffbestimmung.....	51
6.1.4.1 Huminstofffraktionierung - Feststoffproben	51
6.1.4.2 Huminstofffraktionierung - Eluatproben	52

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

6.2 Ergebnisse der Transportmodellierungen.....	54
6.2.1 Aluminium	54
6.2.1.1 <i>Räumlich-zeitliche Mittelwerte</i>	54
6.2.1.2 <i>Konzentrationsmaxima und Verteilung</i>	59
6.2.1.3 <i>Frachtberechnungen</i>	63
6.2.2 pH-Wert	68
7 INTERPRETATION UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE.....	71
8 ZUSAMMENFASSUNG	78
9 VERWENDETE NORMEN UND LITERATUR.....	86

ANHANG

Anhang A: Fotodokumentation der Säulenversuche 2016	A-1 bis A-2
Anhang B: Ergebnisse der Säulenversuche 2016	B-1 bis B-6
Anhang C: Ergebnisse der Modellierungen	C-1 bis C-30
Anhang D: Ergebnisse der Säulenversuche 2015, Modell-Input	D-1 bis D-13
Anhang E: Sicherheitsdatenblätter für Ligasil und Stabisil	E-1 bis E-16

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen
ABBILDUNGEN

	Seite
Abbildung 1: Säulenaufbau – Säule mit umgekehrter Fließrichtung	14
Abbildung 2: Versuchsansatz Huminstofffreisetzung mit steigendem Kohlereibselanteil, blau=Weichgel, BG=Baugrundsand, FR=Frechener Feinsand, K=Kohlereibsel. ..	15
Abbildung 3: Verwendete Baugrundsande mit unterschiedlicher Qualität (linkes Bild) und daraus hergestellter homogener Versuchssand (rechtes Bild).	15
Abbildung 4: Kohlereibsel und Mischgefäß zur Herstellung der Kohlereibselnschicht	16
Abbildung 5: Schematischer Bauablauf bei der Herstellung einer Injektionssohle (aus Ohlenbusch, 2001)	23
Abbildung 6: Grundriss und Profilschnitt der Baugruben 1 und 2 (nicht maßstäblich dargestellt) ..	28
Abbildung 7: Herstellreihenfolge der Sohlherstellung im Modell, nach 6, 15 sowie 19 Arbeitstagen (Ansicht im Grundriss)	29
Abbildung 8: Anstieg des pH-Werts in den inversen Säulenversuchen	32
Abbildung 9: Entwicklung der Aluminiumkonzentration (blindwertbereinigt) während der ersten beiden Tage des Säulenversuchs	33
Abbildung 10: Die Durchlässigkeitsverminderung der Sohle (links: geschlossene Sohle in blau, noch nicht hergestellte Bereiche in rot). Die dadurch in das Grundwasser eingetragene Stoffkonzentration an Aluminium (rechts). Beide Darstellungen unmittelbar nach Schließung des 16. Herstellungsabschnittes (Modelltag 33).....	37
Abbildung 11: Die Lage der 5 obersten Messstellen im Modell (Grundriss), Schnittebene 0,05 m unterhalb der Injektionssohle, Grundwasserströmungsrichtung von Nord nach Süd, Messstellen liegen an der abstromig gelegenen Baugrubenwand (dunkel hinterlegt) und unterhalb der Injektionssohle.	38
Abbildung 12: Die Lage und Bezeichnung der 30 Modellmessstellen im Profilschnitt, unterhalb der Injektionssohle, an der abstromig gelegenen Baugrubenwand. Grundwasserströmungsrichtung von links nach rechts. Die Messstellen spannen eine 2,0 x 2,0 m Fläche auf, über die in weiteren Berechnungsschritten räumlich und zeitlich gemittelt wird.	39
Abbildung 13: Beispielhafter, vom Modell berechneter Konzentrationsverlauf, hier für Aluminium [mg/l] an der Modellmessstelle 21 in Variante A; darüber hinaus der integrale (über 180 Tage gebildete) Mittelwert davon (3,48 mg/l).....	40
Abbildung 14: Beispielhafter, vom Modell berechneter Verlauf des pH-Wertes, umgerechnet aus der Hydroxidkonzentration gemäß Gleichung (3), für die Modellmessstelle 21, Variante A.	42

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Abbildung 15: Verlauf von TOC, Trübung, elektr. Leitfähigkeit, pH-Wert, Aluminium, Calcium, Kalium und Natrium in der Versuchsreihe ST 1 in Abhängigkeit zur Elutionsdauer (BG: Bau-grundsand, FR36: Frechener Feinsand, BG+1%K: Baugrundsand mit 1 % Kohlereibsel)	45
Abbildung 16: Verlauf und Qualität von Schaumbildung (SB) (Keine = 0, leichte SB = 1, SB = 2) und von Geruch (geruchlos = 0, leicht sandig = 1, sandig = 2) in der Versuchsreihe ST 1	46
Abbildung 17: Verlauf von TOC, Trübung, elektrischen Leitfähigkeit, pH-Wert, Aluminium, Calcium, Kalium und Natrium in der Versuchsreihe ST 2 in Abhängigkeit zur Zeit (FR 36: Frechener Feinsand, FR 36+1%K, +2,5%K, +5%K: Frechener Feinsand mit 1, 2,5 und 5 % Kohlereibsel; EW: Elutionswasser)	48
Abbildung 18: Verlauf und Qualität von Schaumbildung (SB) (Keine = 0, leichte SB = 1, SB = 2) und von Geruch (geruchlos = 0, leicht organisch = 1) in der Versuchsreihe ST 2.	49
Abbildung 19: Vergleich von TOC und DOC in ausgewählten Proben (Fraktionen) der Versuchsreihen ST 1 und ST 2 (FR 36: Frechener Feinsand, FR 36+1%K, +2,5%K, +5%K: Frechener Feinsand mit 1, 2,5 und 5 % Kohlereibsel; EW: Elutionswasser).....	52
Abbildung 20: Vergleich der berechneten Aluminiumkonzentration [mg/l] im Grundriss, links für Variante A, rechts für Variante C, zu je drei Zeitpunkten (Modelltage 40, 50 und 60), Projektionsebene 1,0 m unterhalb der Injektionssohle.....	62
Abbildung 21: Grundriss und Profilschnitt der Modellbaugruben, mit Darstellung zu den zwei Bewertungsebenen für die Frachtberechnung	63
Abbildung 22: Aluminiumfracht in [g] in den beiden Bewertungsebenen für die fünf Varianten (%-Angaben weisen den in den Abstrom gelangenden Anteil der unterhalb der Sohle freiwerdenden Frachten aus).....	64
Abbildung 23: Zunahme der Aluminiumkonzentration in [mg/l] bzw. [g/m ³] in den beiden Bewertungsebenen für die fünf Varianten (Frachtnormierung).....	66

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen
TABELLEN

	Seite
Tabelle 1: Angaben der geotechnischen Sachverständigen zu Baugrundbereichen 10 - 25 m unter Gelände.....	12
Tabelle 2: Ausgewählte physikalische und chemische Kennwerte der verwendeten Sande und Kohlereibsel.....	16
Tabelle 3: Einzelkomponenten und Anmischungsverhältnis des Weichgels	17
Tabelle 4: Verfahren zur Bestimmung der allgemeinen Parameter und des TOCs sowie Ausgewählter anorganischer Elemente	18
Tabelle 5: Parameter Geruch und Neigung zur Schaumbildung und numerische Zuordnung der Ausprägung	18
Tabelle 6: Parameter des Modells in den verschiedenen Varianten	26
Tabelle 7: Die Varianten A bis E der Transportmodellierung	32
Tabelle 8: Berechneter Modelleintrag für Aluminium- und Hydroxidionen, an der Unter- und Oberseite der Injektionssohle, exemplarisch für den ersten Herstellungsabschnitt an Modelltag 11	36
Tabelle 9: Charakterisierung der entstandenen Prüfkörper	43
Tabelle 10: Ergebnisse des qualitativen Parameters Farbe.....	46
Tabelle 11: Ergebnisse des qualitativen Parameters Farbe.....	50
Tabelle 12: Kumulierten Freisetzungsmengen für Aluminium über 180 Tage Leaching.....	51
Tabelle 13: Kumulierten Freisetzungsmengen für TOC über 180 Tage Leaching.....	51
Tabelle 14: Verteilung der Huminstofffraktion in den Feststoffproben.....	51
Tabelle 15: Verteilung der Huminstofffraktion in ausgewählten Eluaten	53
Tabelle 16: Mittelwerte (2x2 m, sowie innerhalb dreier Messebenen unterhalb der Injektionssohle [m u.IS], für 180 d) und Konzentrationsmaxima (in Messebenen), für Aluminium in den jeweiligen Modellvarianten.....	55
Tabelle 17: Mittelwerte (2x2 m, 180 d) für Aluminium und deren direkter Vergleich zur Basisvariante A.....	56
Tabelle 18: Mittelwerte über 2x2 m und 180 d, verglichen mit dem Mittelwert über 180 Tage an Messpunkt 17.	58
Tabelle 19: Konzentrationsmaxima für Aluminium in den jeweiligen Modellvarianten und deren direkter Vergleich zur Basisvariante A, in Abhängigkeit der Lage unterhalb der Injektionssohle [m u.IS].....	59

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Tabelle 20:	pH-Wert-Maxima in den fünf Modellvarianten, in Abhängigkeit der Lage unterhalb der Injektionssohle [m u.IS].....	68
Tabelle 21:	Dauer der pH-Wert-Beeinflussung in den Modellvarianten in Tagen, in Abhängigkeit der Lage unterhalb der Injektionssohle [m u.IS].....	69
Tabelle 22:	Einteilung der Varianten in <i>best-case</i> und <i>worst-case</i> , in Bezug auf die im Rahmen des Forschungsvorhabens angewandten Bewertungssysteme.....	75
Tabelle 23:	Mittelwerte (2x2 m, 180 d) für Aluminium und deren direkter Vergleich zur Basisvariante A.....	81
Tabelle 24:	pH-Wert-Maxima in den fünf Modellvarianten, in Abhängigkeit der Lage unterhalb der Injektionssohle [m u.IS].....	83

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen**0 AUFGABENSTELLUNG**

Für die Erteilung allgemeiner bauaufsichtlichen Zulassungen für Injektionsstoffe in Boden und Grundwasser (z.B. Injektionssohlen von Trogbaugruben mit Weichgelen) werden Übertragungsfunktionen benötigt, um die Ergebnisse aus Laborversuchen auf die Realität zu übertragen. Im Forschungsvorhaben „Bewertung der Umweltverträglichkeit von Abdichtungs- und Injektionsstoffen“ wurde ein Modellgebiet für eine Unterwasserbetonsohle für eine Transportsimulation von Schadstoffen im Grundwasser vorgeschlagen, welches derzeit der Bewertung von Injektionsstoffen seitens des DIBt zugrunde gelegt wird. Nach ersten Untersuchungen mit Grundwassermodellierungen für Injektionssohlen wurden u.a. folgende Einflussparameter erkannt:

- a) hydraulisches Gefälle
- b) Durchlässigkeit (kf-Wert) des Bodens in der Umgebung der Baugrube
- c) Abmessungen und Form der Baugrube
- d) Herstellungsabfolge im Bezug zur Grundwasserströmungsrichtung

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens soll mittels Literaturrecherchen ermittelt werden, welche Bandbreite an Strömungsgeschwindigkeiten, hydraulischen Durchlässigkeiten und Huminstoffgehalten in Boden und Grundwasserleiter im Bereich von Ballungsgebieten und Großstädten, also im Einsatzbereich der Injektionssohlen, vorliegen. Im Rahmen von Grundwassertransportmodellierungen werden oben genannte Einflussparameter variiert und detailliert untersucht. Hierbei wird durch einfache Variation dieser Parameter zunächst die Robustheit der Transportsimulation an sich, vor allem aber der Einfluss der Variation auf das gesamte Bewertungsergebnis überprüft. Im Anschluss werden Empfehlungen und Vorschläge zur weiteren Bearbeitung und Bewertung von Grundwassermodellen gegeben werden.

Des Weiteren war es Ziel des Forschungsvorhabens zu quantifizieren, welchen Einfluss Weichgelinjektionen mit Natriumaluminat auch auf reale Sandböden ausüben. Insbesondere der Mobilisierungseffekte bei Huminstoffen sollte mittels Säulenversuchen näher betrachtet werden. Da der Berliner Baugrund durch organische Einlagerungen bzw. Ablagerungen (Kohlehaltige Schichten/Bänder) geprägt ist, soll die Untersuchungen an mit Kohlepartikeln angereicherten Sandschichten durchgeführt werden. Als Kohlepartikel wurden die im Berliner Untergrund typischen Kohlereibsel eingesetzt, die eine Vorstufe zur Braunkohle darstellen und reaktive Huminstoffe enthalten.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen**1 EINLEITUNG**

Chemische Injektionen für Abdichtungen auf Wasserglasbasis mit anorganischen Härtern werden in Deutschland bereits seit den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts in größerem Umfang durchgeführt. Hierbei kann die Injektion entweder zur Bodenverfestigung (Hartgele) oder zur Abdichtung (Weichgele) eingesetzt werden. Die Injektionslösungen bestehen dabei aus Wasser, Wasserglas und einem anorganischen Reaktiv. Zur Abdichtung wurde, wenn keine Festigkeit erforderlich war, über viele Jahre und auch teilweise heute noch als Reaktiv Natriumaluminat verwandt. Zu diesem Weichgel liegen umfangreiche Erfahrungen vor. Natriumaluminat führt nach der Gelbildung dazu, dass sich unter anderem Al^{3+} und OH^- aus dem Gel freisetzen. Diese Injektionssohlen reagieren alkalisch, mit einem pH-Wert zwischen 10 und 13. Die Erhöhung des pH-Wertes führt zu einer chemischen Veränderung im Kontaktbereich des Bauproduktes und in den umgebenden Bereichen im Boden, was unter anderem eine erhöhte Löslichkeit von Huminstoffen bewirkt. Damit kann es zu einer durch das Weichgel verursachten Mobilisierung und Erhöhung des DOC (gelöste organische Substanz) und damit zu einer durch Huminstoffe verursachten Schwarzfärbung des Grundwassers sowie ebenfalls zu einer Mobilisierung von Schwermetallen und auch organischen Schadstoffen kommen.

Um quantifizieren zu können, welchen Einfluss Weichgelinjektionen mit Natriumaluminat auf reale Baugrundböden ausüben und welche Mobilisierungseffekte bei Huminstoffen im Raum Berlin ausgelöst werden, wurde ein Weichgel mit Natriumaluminat als Reaktiv im Rahmen dieses Forschungsvorhabens in künstlich hergestellten Baugrund-Böden injiziert und anschließend eluiert. Dabei durchströmten die freigesetzten Inhaltsstoffe des Bauproduktes eine 10 cm mächtige Schicht mit verschiedenen Gehalten an Kohlestückchen bzw. „Kohlereibsel“. Kohlereibsel sind eine Vorstufe der Braunkohle. Im Berliner Untergrund anstehende Fein- und Mittelsande sind vereinzelt mit diesen Kohlereibseln versetzt bzw. mit Kohlereibselbändern durchzogen. Die Kohlereibsel können einen Anstieg der üblichen organischen Gehalte im Baugrund von 1 % auf bis zu 4% verursachen (vgl. Tabelle 1). Da Kohlereibsel aus reaktivierbaren Huminstoffen bestehen, wurden diese organischen Partikel genutzt, um für die Zielstellung des FV Untersuchungssande zu präparieren (vgl. Kapitel 3.1.3).

Für die Erteilung allgemeiner bauaufsichtlichen Zulassungen für Injektionsstoffe in Boden und Grundwasser (z.B. Injektionssohlen von Trogbaugruben mit Weichgelen) werden Übertragungsfunktionen benötigt, um die Ergebnisse aus Laborversuchen auf die Realität zu übertragen. Im Forschungsvorhaben „Bewertung der Umweltverträglichkeit von Abdichtungs- und Injektionsstoffen“ (IBAC, 2009) wurden Parameter und Randbedingungen für eine Transportsimulation von Schadstoffen im Grundwasser für eine Unterwasserbetonsohle erarbeitet. Im Allgemeinen fanden diese Parametervorgaben auch Einzug in die „Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt, 2011). Als Ergänzung zu diesen Grundsätzen ist vom DIBt in Abstimmung mit

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) ein Prüfplan in Bearbeitung (DIBt, 2016), der u.a. die Modellvorgaben und -parameter bzgl. der Modellierungen präzisiert, welche bei der Bewertung von Injektionsstoffen, die im Grundwasserbereich eingepresst werden, zu Grunde gelegt werden sollen.

Nach ersten Untersuchungen mit Grundwassermodellierungen für Injektionssohlen wurden u.a. folgende Einflussparameter erkannt:

- a) hydraulisches Gefälle
- b) Durchlässigkeit (k_f -Wert) des Bodens in der Umgebung der Baugrube
- c) Abmessungen und Form der Baugrube
- d) Herstellungsabfolge im Bezug zur Grundwasserströmungsrichtung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden oben genannte Parameter und deren Einfluss auf das Bewertungsergebnis gem. DIBt (2011) und DIBt (2016) durch Variantenrechnung genauer betrachtet. Hierbei wird durch Variation dieser Parameter auch die Robustheit der Transportsimulation überprüft. Darüber hinaus soll abgeleitet werden, welche der hier berechneten Varianten das *worst-case*-Szenario darstellt.

Mittels einer Recherche wurde des Weiteren ermittelt, welche Bandbreite an Strömungsgeschwindigkeiten, hydraulischen Durchlässigkeiten und Huminstoffgehalten im Boden und Grundwasserleiter im Bereich von Ballungsgebieten und Großstädten, also im Einsatzbereich der Injektionssohlen, vorliegen.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen**2 RECHERCHE**

Silikatgelinjektionen werden in der Regel in Sanden mit wenigen Schluff- und Kiesanteilen ausgeführt, da der Porenraum für Zementinjektionen zu klein ist. Die zu injizierenden Böden müssen auch eine hohe Durchlässigkeit besitzen, damit eine Abdichtung auch erforderlich wird. Aus Erfahrung ist ein Feinkornanteil (Schluff und Ton) von maximal 10 % möglich. Ein höherer Anteil führt dazu, dass die Injektion mit einem Silikatgel keinen homogenen Injektionskörper ergibt und auch die Durchlässigkeit sich nicht wesentlich verringern wird (Tausch 1980).

In ganz Deutschland wurden Silikatgelinjektionen ausgeführt. Die Weichgelinjektionen kamen insbesondere in Städten mit tiefen Baugruben für Gebäude mit Tiefgaragen, für Verkehrsbauten zum Beispiel Straßenunterführungen zur Anwendung. Für die Injektion ist die Durchlässigkeit des Bodens, für Verfrachtungen des Injektionsstoffes selbst und von nicht abgebundenen Stoffen aus der Injektion die Strömungsgeschwindigkeit sowie für die Verfärbung des Grundwassers und weiterer Reaktion der Anteil von Huminstoffen im Boden von Bedeutung.

Die vor genannten Parameter

- Durchlässigkeit des Bodens
- Hydraulisches Gefälle bzw. Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers und
- Organische Anteile

ist in Literaturquellen kaum für die Tiefen zu finden, in denen Injektionssohlen angeordnet werden.

Aus diesem Grunde wurden Geotechnische Sachverständige befragt, die in unterschiedlichen Regionen tätig sind und entsprechende Injektionen bereits begleitet haben. Es wurden folgende Sachverständige gebeten, Angaben für ihre Regionen zu machen und zwar wie folgt:

Leipzig: Dipl.-Ing. A. Große
Büro GuD Geotechnik und Umweltgeologie GmbH

Hamburg: Dr.-Ing. O. Stahlhut
BBI Geo- und Umwelttechnik Ingenieur-Gesellschaft mbH

Karlsruhe: Dr.-Ing. B. Schulze
Smoltzcyk und Partner Stuttgart

Für Berlin kamen die Angaben von den Bearbeitern dieses Forschungsvorhabens.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

In Tabelle 1 sind die Auskünfte der Geotechnischen Sachverständigen zusammengefasst worden. Dabei wurden uns Angaben zu Baugrundbereichen in Sanden zwischen 10 m bis ca. 25 m unter Gelände gemacht, in denen Injektionssohlen in der Regel hergestellt werden.

Tabelle 1: Angaben der geotechnischen Sachverständigen zu Baugrundbereichen 10 - 25 m unter Gelände

	Berlin/Potsdam	Leipzig	Hamburg	Karlsruhe
Durchlässigkeit k_f , horizontal [m/s]	$1 \cdot 10^{-4}$ bis $3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$ bis $2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$ bis $1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$ bis $1 \cdot 10^{-2}$ 3)
k_f , vertikal / k_f , horizontal	~ 0,5	~ 0,5	~ 0,5	0,2 - 0,1
Strömungs- geschwindigkeit $v = k \cdot I / n_e$ [m/d]	~ 0,05 - 1,5	~ 0,05 - 0,5	~ 0,7 ¹⁾	~ 0,2 - 1,0
Gefälle i [-]	~ 1 : 500 bis ~ 1 : 1500	~ 1 : 100 bis ~ 1 : 1500	~ 1 : 400	~ 1 : 200 bis ~ 1 : 20 ⁴⁾
Organische Anteile [Gew. %]	<~ 4 % ²⁾	<~ 3 %	< 2% ²⁾	< 1%

- 1) Sehr unterschiedlich, Angabe für eine Baustelle in der Nähe des Hamburger Rathauses
- 2) Verteilung in den Sandböden meist < 1%, jedoch können auch Bänder mit Kohleteilchen erkundet werden und wird dann der Bezug auf einen m³ Boden vorgenommen, können die Anteile bis 4 % betragen.
- 3) Bei $k = 10^{-2}$ wird keine Silikatinjektion, sondern eine Zementinjektion ausgeführt
- 4) Bei zu großen Gefällen bzw. Strömungsgeschwindigkeiten Silicatgelinjektion nicht möglich.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen**3 SÄULENVERSUCHE**

Huminstoffe sind hochmolekulare Substanzen, die gegen Mineralisierung stabilisiert sind. Huminstoffe kommen in Böden und Torfen vor. Fossile, aber noch reaktivierbare Huminstoffe sind in der Braunkohle vorzufinden (Harms, 2005). Die Umsatzrate von Huminstoffen im Boden ist niedrig, bei hohen Verweilzeiten. Huminstoffe im Grundwasserleiter sind ebenfalls relativ stabil, d.h. sie werden lediglich in langen Zeiträumen weiter mineralisiert. Die organische Hintergrundbelastung natürlicher Grundwässer wird hauptsächlich aus Huminstoffen (Fulvin- und Huminsäuren) gebildet. Durch Veränderungen des Grundwassers (physikalisch, chemisch) können Huminstoffe vermehrt gelöst und mobilisiert werden. Die Mobilisierung von Huminstoffen im Untergrund nach pH-Erhöpfung in Folge von Sanierungsreaktionen konnte mehrfach beobachtet werden (BTU, 2004). Huminstoffe zählen zu den Makromolekülen und gehören aufgrund ihrer Größe im gelösten Zustand zu dem kolloidalen System (Hirner et al., 2000). Dies ist durch die Partikelgröße von 1 nm bis zu < 500 nm gekennzeichnet. Analytisch können die gelösten Huminstoffe durch den Parameter DOC (dissolved organic carbon) erfasst werden. Mit zunehmenden pH-Wert steigt die chemische und biochemische Reaktivität von Humin- und Fulvosäuren durch die Zunahme an freien Radikalen (Hirner et al., 2000).

Um quantifizieren zu können, welchen Einfluss Weichgelinjektionen auf reale Baugrundböden ausüben und welche Mobilisierungseffekte bei Huminstoffen im Raum Berlin ausgelöst werden, wurde ein Weichgel im Rahmen dieses Forschungsvorhabens in künstlich hergestellten Baugrundböden injiziert und anschließend eluiert¹. Dabei durchströmten die freigesetzten Inhaltsstoffe des Bauproduktes eine 10 cm mächtige Schicht mit verschiedenen Gehalten an Kohlestückchen bzw. „Kohlereibsel“.

3.1 Versuchsvorbereitung**3.1.1 Bauprodukt**

Das verwendete Weichgel wurde von Implenia Spezialtiefbau GmbH bereitgestellt. Dabei handelte es sich um „Ligasil 39“ (Komponente A) und „Stabilil 19“ (Komponente B). Bis zur Verwendung wurden die Komponenten im Dunkeln kühl gelagert.

3.1.2 Säulenversuchsanlage

Der Aufbau der Versuchssäule ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

¹ Die beschriebenen Untersuchungen wurden angelehnt an E DIN 19631: Elution von Bauprodukten – Perkolationsverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von Injektionsmitteln durchgeführt.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

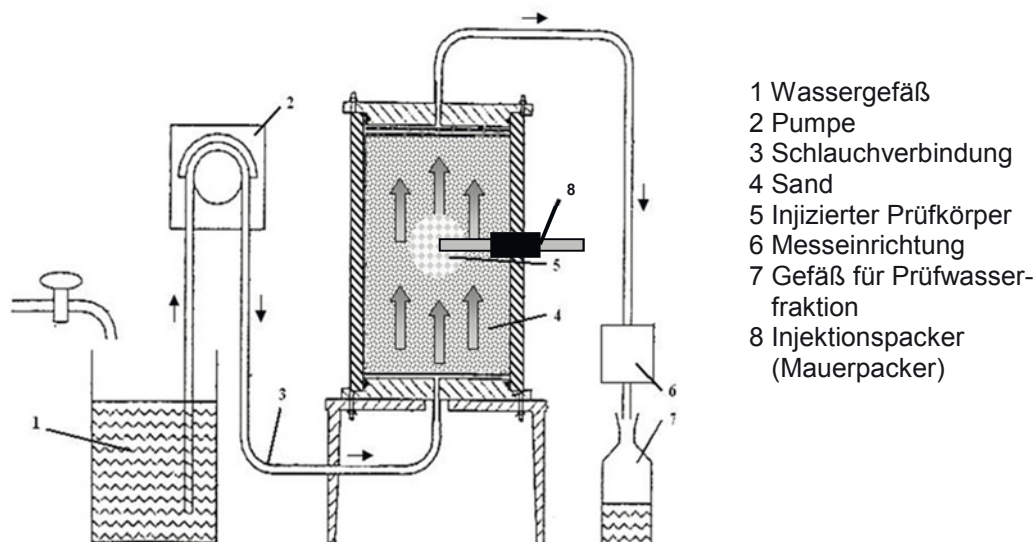


Abbildung 1: Säulenaufbau – Säule mit umgekehrter Fließrichtung

Eine 50 cm hohe und im Durchmesser 30 cm breite Acrylglassäule ist an der Bodenöffnung mit einem Zufuhrschlauch und am Deckel mit einem Abfuhrschlauch versehen. Die Säule ist mit Quarzsand gefüllt. Das Prüfmaterial kann über einen Mauerpacker an einer seitlichen Öffnung in die Säule injiziert werden, oder durch Öffnung des Deckels und Schaffung einer Aushöhlung per Hand in die Säule überführt werden. Aus einem Vorratsgefäß wird das Elutionswasser (Trinkwasser) von unten in die Säule gepumpt. Das am oberen Abfuhrschlauch austretende Eluat wird in Messbechern aufgefangen.

3.1.3 Vorbereitung Versuchssäulen

In einer ersten Versuchsreihe (ST 1) wurden 3 Säulen präpariert. Die erste Säule wurde mit Baugrundsand (BS) ohne Kohlereibsel gefüllt (Kontrollsäule BS). In der zweiten Säule wurde in den Baugrundsand eine 10 cm mächtige Schicht mit 1% Kohlereibseln eingebaut. Diese wurde so eingebracht, dass das injizierte Weichgel keinen direkten Kontakt herstellen konnte. Die Kohlereibselnschicht wurde mit den freigesetzten Inhaltsstoffen aus dem Bauprodukt durchströmt (Abbildung 2). Um die Freisetzung allein aus den Kohlereibseln beurteilen zu können, wurde in Säule 3 der Baugrundsand durch Frechener Feinsand (FS) ersetzt (Kontrollsäule FS).

In einer zweiten Versuchsreihe (ST 2) wurde der Frechener Feinsand (FS) in drei Säulen eingebaut und in einer oberen 10 cm mächtige Schicht jeweils einmal 1 %, 2,5 % und 5 % Kohlereibsel zugemischt (Abbildung 2).

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Die Gehalte an Kohleteilchen wurden abgeleitet von den Anteil an Kohlereibseln in den entsprechenden realen Baugrundsanden (siehe Kapitel 2).

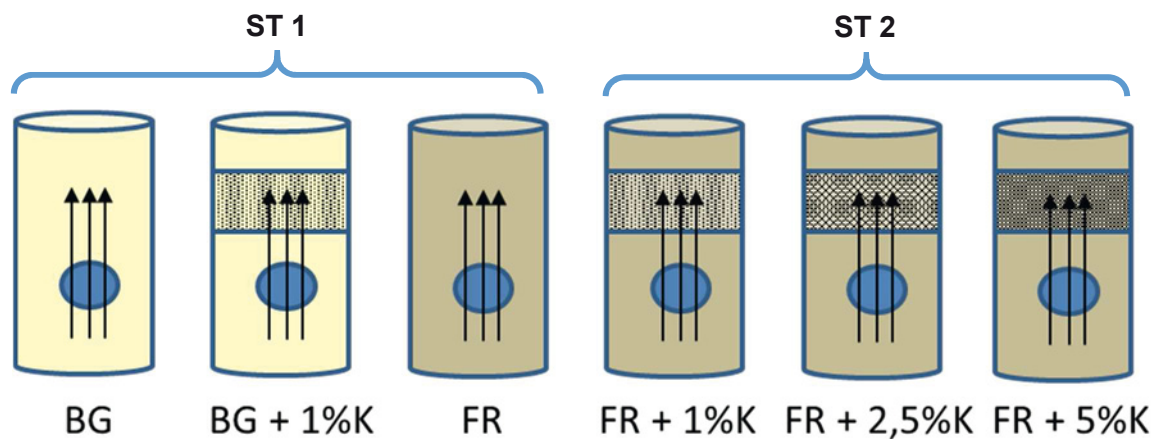


Abbildung 2: Versuchsansatz Huminstofffreisetzung mit steigendem Kohlereibselanteil, blau=Weichgel, BG=Baugrundsand, FR=Frechener Feinsand, K=Kohlereibsel.

3.1.4 Verwendete Sande und Kohlereibsel

Vier der sechs Versuchssäulen wurden mit einem Standardprüfsand (Frechener Feinsand - Quarzsand nach E DIN 19631:2014-09) gefüllt. Der Frechener Feinsand (FS) erfüllt die Anforderungen einer engen Stufung und der SiO_2 -Reinheit $> 99\%$ und wird in Zulassungsprüfungen für Bodeninjektionsmittel verwendet.



Abbildung 3: Verwendete Baugrundsande mit unterschiedlicher Qualität (linkes Bild) und daraus hergestellter homogenisierter Versuchssand (rechtes Bild).

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Der verwendete Baugrundsand (BS) wurde aus verschiedenen Baugrundsanden des Berliner Untergrundes zusammengestellt (Abbildung 3). Der Sand ist durch leichte Verunreinigungen und einem geringen Anteil an Kohlepartikel gekennzeichnet.

Die eingesetzten Kohlereibsel entsprechen einer Rohkohle und wurden durch die Vattenfall GmbH bereitgestellt (Abbildung 4).



Abbildung 4: Kohlereibsel und Mischgefäß zur Herstellung der Kohlereibselsschicht

In Tabelle 2 sind die für die Untersuchung wesentlichen physikalischen und chemischen Kennwerte der verwendeten Sande und Kohlereibsel aufgeführt.

Tabelle 2: Ausgewählte physikalische und chemische Kennwerte der verwendeten Sande und Kohlereibsel

Material	WG	pH-Wert	Leitf.	C _{org}	Al	Ca	Mg	Na	K	Fe
	[%]		[μ S/cm]	[%]	[mg/kg]					
Feinsand (FS)	0,5	6,51	5,5	0,05	877	52	31	39	130	118
Baugrundsand (BS)	3,7	7,03	143,70	0,21	2594	13416	718	112	813	2539
Kohlereibsel (K)	54,6	4,47	95,95	54,82	1645	9254	3258	142	203	9807

Die Mischung von Sanden und Kohlereibsel erfolgte in einem 30 Liter Eimer (Abbildung 4). Die Menge an Kohlereibsel wurde zu den Sanden dazugegeben und gründlich homogenisiert. Der Anteil an Kohlereibsel von 1, 2,5 und 5 % bezieht sich auf Masse-Prozent der Trockensubstanz (TS).

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen**3.2 Versuchsdurchführung**

3.2.1 Allgemeine Angaben

Die Injektion und Elution für die Versuchsreihe ST 1 begann am 04.04.2016. Die Untersuchung endete am 08.04.2016. Versuchsreihe ST 2 begann am 18.05.2016 und endete am 23.05.2016. Je Säule wurden 16 Fraktionen entnommen. Die Elution erfolgte im inversen Säulenversuch nach E DIN 19631:2014-09. Die Säulen wurden mit einer Pumprate von 4 l/h durchströmt.

3.2.2 Anmischung des Bauproduktes und Injektion

Die Anmischung und Injektionsvorbereitungen wurden nach Anweisung des Herstellers vorgenommen. Für die Zubereitung des Injektionsgels wurden 1 kg Trinkwasser und 0,036 kg Stabisil (Natriumaluminat) vermischt und mit 0,322 kg Ligasil (Wasserglas) vermengt (siehe Tabelle 3). Für jede Injektion wurde das Bauprodukt einzeln angemischt.

Tabelle 3: Einzelkomponenten und Anmischungsverhältnis des Weichgels

Komponente	Menge [kg]
Wasser	1,0
A: <i>Ligasil 39</i>	0,322
B: <i>Stabisil 19</i>	0,036

Die Injektion erfolgte mit einer Peristaltikpumpe der Firma Roth, die an den mit dem Packer verbundenen Materialschlauch angeschlossen wurde. Die Injektion dauerte im Durchschnitt 7,5 min.

3.2.3 Parameterbestimmung

Die Prüfwässer (Eluate) wurden direkt nach der Eluatabnahme auf die Parameter Temperatur, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Geruch, Färbung, Trübung und Neigung zur Schaumbildung untersucht. Für die Bestimmung des TOC und der Elemente Al, Na, Ca und K wurden die einzelnen Eluatfraktionen beprobt und bis zur Analyse bei 4 °C gelagert. Weiterhin wurden die Blindwerte und Proben des Elutionswassers nach den genannten Parametern untersucht. Die verwendeten Methoden sind der Tabelle 4 zu entnehmen.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Tabelle 4: Verfahren zur Bestimmung der allgemeinen Parameter und des TOCs sowie Ausgewählter anorganischer Elemente

Parameter	Verfahren
pH-Wert	DIN 38404-5:2009-07
elektrische Leitfähigkeit	DIN EN 27888:1993-11
Geruch	DIN EN 1622:2006-10 (Anhang C – Qualitatives, vereinfachtes Verfahren)
Färbung	DIN EN ISO 7887:2012-04
Trübung	DIN EN ISO 7027:2000-04
Neigung zur Schaumbildung	Arbeitsanweisung FU Berlin (AA SV – NzS: 2013-04)
TOC/DOC	DIN EN 1484:1997-08
Al ³⁺ , Na ⁺ , Ca ²⁺ und K ⁺	DIN EN ISO 11885:2009-09 (ICP-OES)

Die Ergebnisse der qualitativen Parameter Geruch und Neigung zur Schaumbildung wurden, zur besseren Darstellung, numerisch umgewandelt. In Tabelle 5 sind die Merkmale und Ausprägung dargestellt.

Tabelle 5: Parameter Geruch und Neigung zur Schaumbildung und numerische Zuordnung der Ausprägung

Intensitätsstufe	Geruch		Schaumbildung (SB)
	ST 1	ST 2	ST 1 und 2
0	Kein Geruch	Kein Geruch	Keine SB
1	Leich sandig	Leicht organisch	Leichte SB
2	sandig	--	SB

3.2.4 Charakterisierung der Probekörper

Nach erfolgter Elution wurde das Wasser in der Versuchssäule abgelassen, der Deckel geöffnet und der Versuchssand entfernt. Vorsichtig wurde dabei der entstandene Weichgelkörper aus der Säule ausgebaut.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Zur Bestimmung der Masse wurde der ausgebaute Probekörper gewogen. Das Volumen wurde im Wasserbad durch die Verdrängung des Wassers bestimmt. Der gebildete Probekörper wurde vermessen (Umfang, Dreifachbestimmung) und daraus rechnerisch die Oberfläche ermittelt.

3.2.5 Bestimmung Huminstoffe

Huminstoffe sind hochmolekulare Substanzen, die in Böden und Torfen sowie im Grundwasserleiter vorkommen. Die organische Hintergrundbelastung natürlicher Grundwässer wird hauptsächlich aus Huminstoffen (Fulvin- und Huminsäuren) gebildet. Durch Veränderungen des Grundwassers (physikalisch, chemisch) können Huminstoffe vermehrt gelöst und mobilisiert werden. Huminstoffe zählen zu den Makromolekülen und gehören aufgrund ihrer Größe im gelösten Zustand zu dem kolloidalen System (Hirner et al., 2000). Dies ist durch die Partikelgröße von 1 nm bis zu < 500 nm gekennzeichnet. Analytisch können die gelösten Huminstoffe durch den Parameter DOC (dissolved organic carbon) erfasst werden.

Die im Folgenden beschriebene Huminstoffanalyse wurde angelehnt an Enßlin (1999) und Rump (1998) durchgeführt.

3.2.5.1 Feststoffproben

Die Feststoffproben BS, FS und K wurden zuerst luftgetrocknet. Danach wurden 5 g in einem 250 ml Erlenmeyerkolben eingewogen und mit 100 ml Extraktionsflüssigkeit geschüttelt und über Nacht stehen gelassen. Die Extraktionslösung wurde zuvor aus 44,6 g Natriumpyrophosphat und 4 g Natriumhydroxid auf 1 L dest. Wasser hergestellt.

Die Proben wurden am nächsten Tag über einen Membranfilter abfiltriert und geteilt. Ein Teil der Probe wurde nach DIN EN 1484:1997-08 auf die Konzentration an Humin- und Fulvosäure (als DOC) analysiert. Der andere Teil des Filtrats (50 ml) wurde anschließend mit 3 ml 10-%iger Schwefelsäure versehen, geschüttelt und mehrere Minuten stehen gelassen. Die ausgefällten Huminsäuren wurden durch Membranfiltration abgetrennt. Die in Lösung verbleibenden organischen Bestandteile (Fulvosäuren) wurden wiederum nach DIN EN 1484:1997-08 als DOC gemessen.

Aus der Differenz des organischen Kohlenstoffs (Corg) und der Konzentration an Humin- und Fulvosäure in den Proben wurde die Konzentration an Humine bestimmt. Die Konzentration an Huminsäure wurde durch Differenz der Konzentration an Humin-/Fulvosäure und der Konzentration an Fulvosäure bestimmt.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen**3.2.5.2 Eluatproben**

Als Parameter für die Huminstofffreisetzung wurde der DOC herangezogen, da Huminstoffe durch die Partikelgröße von 1 nm bis zu < 500 nm gekennzeichnet sind. Dazu wurden ausgewählte Eluatproben über einen Membranfilter (< 0,45 µm) vakuumfiltriert und der DOC nach DIN EN 1484:1997-08 gemessen.

Einzelne Eluatproben (Maximalphase, Abklingphase) wurden anschließend auf die gelösten Huminstoffe untersucht. Dabei wurden 100ml der membrangefilterten Eluatprobe mit 6 ml 10-%iger Schwefelsäure versehen, geschüttelt und mehrere Minuten stehen gelassen. Die ausgefällten Huminsäuren wurden durch Membranfiltration abgetrennt. Die in Lösung verbleibenden Fulvosäuren wurden wiederum nach DIN EN 1484:1997-08 bestimmt.

Aus der Differenz des DOC und der Konzentration an Fulvosäure in den Proben wurde die Konzentration an Huminsäure ermittelt.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen**4 BAUTECHNISCHE GRUNDLAGEN ZU INJEKTIONSSOHLNEN**

Bei der Herstellung tief bis in das Grundwasser reichender Baugruben kommen zumeist die Trogbaugrube bzw. die „Wand-Sohle-Bauweise“ zur Ausführung (Karstedt, 1996). Hierbei wird mit Hilfe einer vertikalen Baugrubenwand (z.B. Spundwand, Schlitzwand oder überschnittene Bohrpfahlwand) in Kombination mit einer natürlichen oder künstlichen Dichtsohle ein wasserundurchlässiger Trog hergestellt. Durch Rückverankerungen oder eine tiefe Anordnung der Dichtsohle mit entsprechender Auflast kann der Trog auftriebssicher hergestellt werden. Je nach Lage der Sohle spricht man hierbei von hochliegenden Dichtsohlen (mit Rückverankerung) oder tiefliegenden Dichtsohlen (mit Auflast) (Borchert & Karstedt, 1996).

Tiefliegende Dichtsohlen werden in der Praxis unter anderem mittels Poreinjektionsverfahren gemäß der DIN 4093, also mittels Zement- und Feinstzementinjektion und mittels Gelinjektion (u.a. Weichgele) hergestellt (Borchert & Karstedt, 1996). Wesentlichste Anforderung an die dann als Injektionssohle bezeichnete Dichtsohle ist die Abdichtung der Trogbaugrube gegen das Grundwasser. Der Erfolg der hydraulischen Abdichtung wird in der Praxis anhand der der Baugrube zutretenden Restwassermenge bestimmt. Die Restwassermenge ist das Grundwasservolumen, welches nach der Absenkung des Grundwassers in der Baugrube in diese in Folge der Wasserdruckdifferenz zuläuft. Von der Berliner Wasserbehörde wird bei Tiefbauvorhaben seit längerem eine Restwassermenge von 1,5 l/s pro 1.000 m² Wand- und Sohlfläche als zulässig angesehen (Borchert, 1999 sowie Ohlenbusch, 2001).

Bei der Herstellung einer Injektionssohle wird eine Lösung (Injektionslösung, z.B. Wasserglas, Reaktiv und Wasser) unter Verdrängung des Porenwassers in den gesättigten Porenraum eingepresst (Brauns et al., 2001). Bei den Weichgelen ist diese Injektionslösung mit einer geringen Anfangsviskosität von ca. 5 - 10 mPa · s so flüssig, dass sie auch feinkörnige Böden (Feinsande) infiltrieren kann (Karstedt, 1996). An den Stellen, an denen die Injektionslösung nach der Injektion homogen im Porenraum des Baugrundes vorliegt, setzt die Gelbildungsreaktion in Abhängigkeit der zuvor eingestellten Gelier- oder Kippzeit und dadurch zeitlich verzögert ein. Hierdurch erstarrt die zuvor flüssige Injektionslösung zu einem wasserreichen (Hydro-)Gel und verkittet an Ort und Stelle adhäsiv gebunden den Porenraum, wodurch je nach verwendeter Rezeptur die erwünschte hydraulische Durchlässigkeitsverminderung erzielt wird. Makroskopisch zeigt sich das erhärtete Gel dann als gallertartige Masse mit oftmals milchig trüber Färbung (Schnell, 2001).

Die Gelbildungsreaktion wird bei einer Wasserglaslösung zeitverzögert durch den Zusatz des Reaktivs bzw. Härters ausgelöst. Bei der Weichgelinjektion hat sich im Spezialtiefbau das Natriumaluminat als Reaktiv bzw. Härter bewährt (Schnell, 2001). Nach Brauns et al. (2001) werden bei der Gelbildungsreaktion von Wasserglas mit dem Natriumaluminat nach der Injektion in der unmittelbaren Kontaktbereichzone mit dem Grundwasser u.a. folgende Produkte freigesetzt:

- Natronlauge (als dissoziierte Na⁺- und OH⁻-Ionen)

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

- Aluminium (in Form anionischer Komplexe)

Die Zone des Kontaktbereichs zwischen Gelkörper und Grundwasser ist in der Regel nur wenige cm mächtig, jedoch stellen die ein bis zwei Stunden nach Injektion darin ablaufenden Prozesse quantitativ den bei der Weichgelinjektion größten Stoffeintrag ins Grundwasser dar (Brauns et al., 2001). Die freigesetzte Natronlauge führt dabei zu einem signifikanten Anstieg des pH-Werts im Grundwasser des Kontaktbereichs. Durch Verdünnungsprozesse und die mit der Grundwasserströmung einhergehende Verfrachtung wird der Eintrag oben genannter Reaktionsprodukte mitunter auch im Abstrom der jeweiligen Baumaßnahme beobachtbar.

Bei der Herstellung einer großflächigen Dichtungssohle mittels Gelinjektion wird in der Baupraxis eine große Anzahl an Injektionslanzen benötigt. Der dabei zur Anwendung kommende, schematische Bauablauf ist in Abbildung 5 im Profil dargestellt. Die Injektions- oder auch Verpresslanzen werden in der Regel nach Herstellung der vertikalen Baugrubenwände senkrecht in den Baugrund eingebracht bzw. eingespült. Sie haben im Dreiecksraster Abstände von bis zu 2,0 m zueinander. Die exakte Lage der Lanzen wird in der Ausführungsplanung erarbeitet und ist meist an die äußeren Gegebenheiten des Baugrundes, die zur Verwendung kommende Rezeptur des Injektionsmittels und an die spätere Funktion der Dichtsohle angepasst. Nach Herstellung der Lanzen werden diese mit geringem Druck mit Injektionsmittel beschickt. Über den Lanzenfuß bzw. spezielle Verpressventile im Bereich der herzustellenden Dichtsohle wird das Injektionsmittel in den Baugrund injiziert, was diesen nach dem Gelieren der Injektionslösung hydraulisch abdichtet. Nach vollflächiger Abdichtung an allen Injektionslanzen wird die Trogbaugrube mittels Wasserhaltung gelenzt und kann im Anschluss daran trocken ausgehoben werden. In der Praxis ist nach erfolgreichem Einspülen der Injektionslanzen die Herstellung von ca. 100 m² einer 1,0 m mächtigen Dichtsohle pro Arbeitstag üblich.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

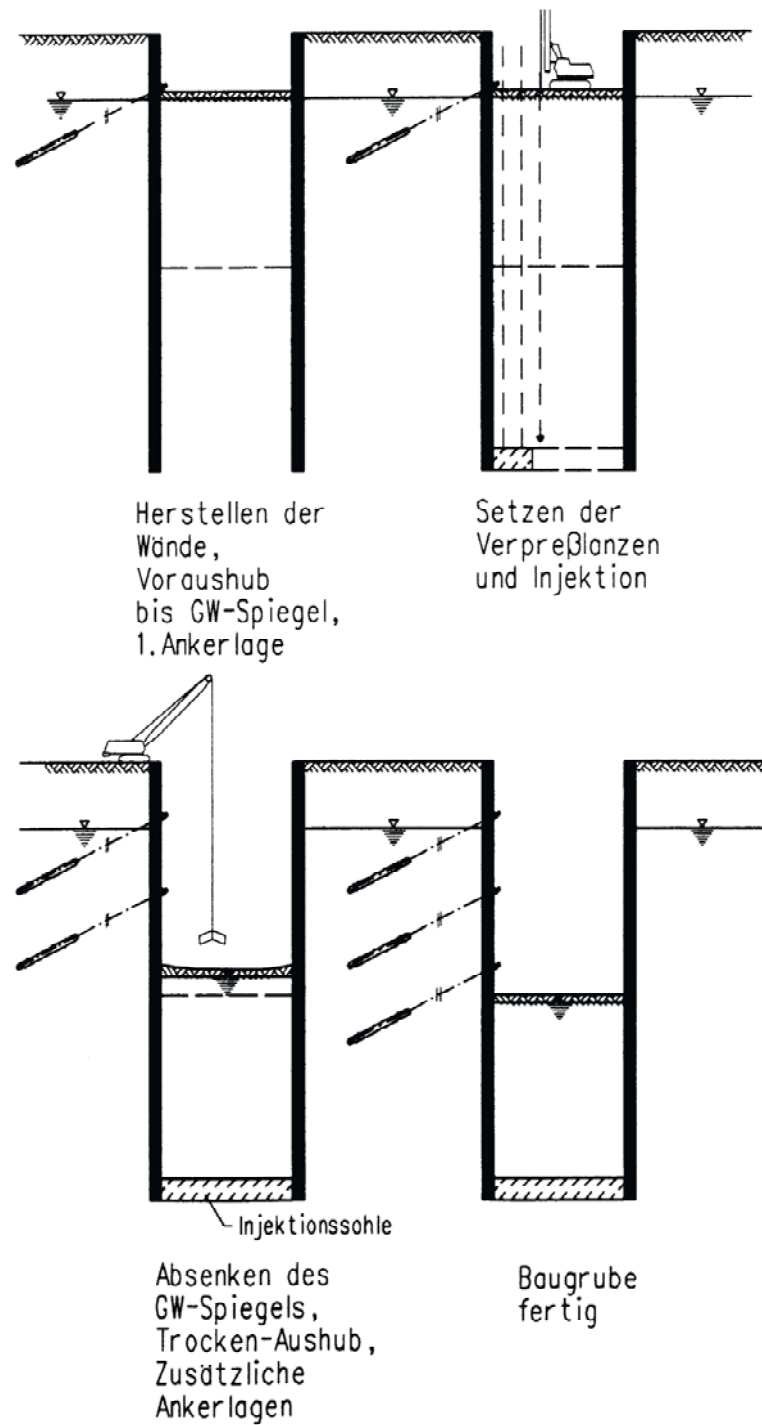


Abbildung 5: Schematischer Bauablauf bei der Herstellung einer Injektionssohle (aus Ohlenbusch, 2001)

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen**5 GRUNDWASSERMODELLIERUNG****5.1 Allgemeine Grundlagen**

Jede Klärung hydrogeologischer Vorgänge verlangt zunächst die Entwicklung von ortsspezifischen, realistischen und in sich stimmigen, hydrogeologischen Modellvorstellungen. Hierbei ist zu beachten, dass komplexe Gegebenheiten des Untergrundes im Sinne der Aufgabenstellung in einem Modell zwar zu vereinfachen und zu schematisieren sind, jedoch darf dies nicht so weit gehen, dass wesentliche und systemsteuernde Größen darin nicht mehr adäquat zum Ansatz kommen.

Die numerische Grundwasserströmungsmodellierung funktioniert derart, dass der Bilanzraum in eine Vielzahl von Einzelementen untergliedert (diskretisiert) wird. Jedes einzelne Element repräsentiert ortsdiskret die Eigenschaften des Untergrunds, die zur Berechnung der Strömungsgleichungen notwendig sind. Eine Strömung wird simuliert, indem jeweils die resultierende Potentialhöhe in einem Element unter Berücksichtigung der Potentialhöhen der Nachbarelemente berechnet wird. Einstrom und Abstrom von Grundwasser in und aus dem Modellraum werden über die Vorgabe von Potentialhöhen in ausgewählten Elementen gesteuert. Diese Potentialhöhen werden entweder fest vorgegeben oder vom Modell selber aus Leakage-Faktoren oder Entnahme-/Infiltrationsraten berechnet. Für die Berechnung der Grundwasserströmung muss zunächst der Bilanzraum festgelegt und horizontal und vertikal diskretisiert werden. Anschließend sind alle Elemente mit den Grundwasserleitereigenschaften zu belegen und die hydraulischen Randbedingungen festzulegen.

Sämtliche hier beschriebene numerische Modellrechnungen werden mit dem Finite-Elemente-Programm FEFLOW®, Version 6.2, der WASY GmbH durchgeführt. Diese Software ermöglicht die Erstellung von zweidimensionalen (2D) und dreidimensionalen (3D) Strömungs- und Stofftransportmodellen, mit denen sowohl das räumliche Abstromverhalten des Grundwassers als auch die räumliche Ausbreitung und Verlagerung von Grundwasserinhaltsstoffen dargestellt werden kann.

Die verwendete Modellierungssoftware bietet die Möglichkeit, Grundwasserleitereigenschaften der Zellen und Knoten während der Berechnung zu verändern. Für die modellhafte Schließung einer Weichgelsohle birgt diese Funktion einen erheblichen Zeitgewinn bei der Erstellung des Strömungsmodells.

Durch die Berechnung und Auswertung mehrerer Modellvarianten ist es möglich, den Einfluss eines variierten Parameters auf das Ergebnis der Modellierung zu bewerten und diesen Einfluss möglicherweise bereits im Vorfeld künftiger Modellierungen abschätzen zu können. Im vorliegenden Fall werden in fünf Varianten die Einflüsse der hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwerte, des hydraulischen Gefälles, der Strömungsrichtung des Grundwassers

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

und der Baugrubenform in Bezug auf eine derzeit vom DIBt (2011 und 2016) verwendete „Basisvariante“ untersucht. In jeder der fünf Modellvarianten werden dazu zwei fiktive, durch die Injektion freigesetzte Stoffe (Aluminium- und Hydroxidionen) in einem instationären Strömungs- und Transportmodell freigesetzt, transportiert und deren Verteilung berechnet. An den Stellen der Injektionssohle, die gerade "geschlossen" bzw. abgedichtet werden (gemäß den Erfahrungen aus der Baupraxis und unter Zugrundelegung einer zeitlichen Herstellreihenfolge), werden im Modell die Freisetzungsvorgänge simuliert, die zuvor in Laborversuchen beobachtet wurden. Über die Zeit betrachtet wird die Quelle der Freisetzung somit entlang der Sohle gemäß der Herstellungsabfolge örtlich verlagert. Die Freisetzung wird dabei auf die Oberfläche des im Baugrund entstehenden Injektionskörpers bezogen, als Datengrundlage werden die Ergebnisse von Durchströmungs- bzw. inversen Säulenversuchen herangezogen.

5.2 Modellgebiet und Parametrisierung

Das gesamte Modellgebiet ist im Grundriss betrachtet quadratisch aufgebaut, die Nord-Süd- und Ost-West-Erstreckung beträgt jeweils 1.500 m, das Modellgebiet ist demnach 2.250.000 m² groß. In der Vertikalen sind die Modelle 43 m mächtig und jeweils in 26 Schichten („layer“) mit 27 Schichtgrenzen („slices“) diskretisiert. In der Horizontalen bestehen die Modelle pro Modellschicht aus 19.340 Elementen (Varianten A-C) bzw. aus 45.138 Elementen (Varianten D und E). Aufgrund der gedrehten Strömungsrichtung bei der länglichen Baugrube in Variante E (und der daraus benötigten, feineren Diskretisierung im Abstrom der Baugrube), enthalten die Varianten mit länglicher Baugrube deutlich mehr Zellen als die Varianten A-C. Alle Modellschichtgrenzen verlaufen exakt geradlinig und horizontal durchgängig in sämtlichen Varianten. Der Hauptaussagebereich, die Baugrube und deren Umfeld, befindet sich jeweils in der Mitte des Modellgebiets mit etwa 700 m Entfernung zu den Modellrändern.

Die Modellgeometrie ist horizontal in Dreiecke diskretisiert, welche aufgrund der Lage des Hauptaussagebereichs (Baugrube) in der Mitte des Modellgebiets zu den Rändern hin sukzessive größer werden. Die größten Dreieckszellen (am Rand des Modellgebiets) besitzen eine Fläche von bis zu 6.000 m², während die kleinsten Zellen (z.B. innerhalb der Baugrubenwand) eine Fläche von ca. 0,03 m² beschreiben. Insgesamt besitzt das Modell in den Varianten A-C ca. eine halbe Millionen, in den Varianten D und E jeweils ca. 1,1 Millionen Modellzellen.

Die Parameter des Modells sind in Tabelle 6 dargestellt, unter Berücksichtigung der verschiedenen Modellvarianten. Die Baugrubensymmetrie, der detaillierte Aufbau der Baugrube und die verschiedenen Modellvarianten werden nachfolgend im Detail erläutert.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Tabelle 6: Parameter des Modells in den verschiedenen Varianten

Parameter	Symbol	Einheit	Variante				
			A	B	C	D	E
Modellgebietsgröße	A_M	[m x m]	1.500 x 1.500				
Länge der Baugrube	l	[m]	50			100	
Breite der Baugrube	b	[m]	40			20	
Fläche der Baugrube	A_{BG}	[m ²]	2.000				
hydraulisches Gefälle	i	[]	1 : 200	1 : 1.000	1 : 200	1 : 200	1 : 200
Grundwasserströmung	-	[]	längs	längs	längs	längs	quer
Mächtigkeit des Modellaquifers	M	[m]	40				
Durchlässigkeitsbeiwert Aquifer	$k_{f,x,y}$	[m/s]	1×10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-3}
Abstandsgeschwindigkeit	v_a	[m/d]	2,16	0,432	0,216	2,16	2,16
Zeitliche Diskretisierung	-	[d]	Automatisch (min: 1×10^{-7} ; max: 20)				
Räumliche Diskretisierung, vertikal	-	[Anzahl Schichten]	26				
Räumliche Diskretisierung, horizontal	-	[Elemente pro Schicht]	19.340			45.138	
Durchlässigkeitsbeiwert Dichtsohle	$k_{f,x,y}$	[m/s]	$1,8 \times 10^{-7}$				
Durchlässigkeitsbeiwert Baugrubenwand	$k_{f,x,y}$	[m/s]	undurchlässig				
Gesamtporosität	n_p		0,3				
effektiver Porenanteil	n_e		0,2				
Anisotropiefaktor Aquifer	-	$k_{f,x,y} : k_{f,z}$	10 (anisotrop)				
Anisotropiefaktor Sohle	-	$k_{f,x,y} : k_{f,z}$	1 (isotrop)				
longitudinale Dispersionslänge	α_L	[m]	3				
transversale Dispersionslänge	α_T	[m]	0,3				
Retardierung, Abbau	-	[]	nicht implementiert				
Hintergrundkonzentration Aluminium	-	[mg/l]	0,05				
Hintergrundkonzentration Hydroxidionen (pH-Wert)	-	[mg/l]	0,005 (7,5)				

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Die zeitliche Diskretisierung wird von FEFLOW für jeden Zeitschritt automatisch angepasst, sodass die Länge der Zeitschritte während Perioden mit starken Schwankungen der Randbedingungen sehr kurz und bei annähernd konstanten Verhältnissen möglichst groß gewählt wird (DHI-WASY 2013). In den Modellvarianten liegt die Dauer der einzelnen Zeitschritte zwischen ca. 1×10^{-7} Tagen (zum Zeitpunkt der ein- bzw. aussetzenden Wasserhaltung) und 20 Tagen (während der Wasserhaltung bzw. am Ende des Modellzeitraums) pro Zeitschritt. Während der Schließung der Sohlbereiche (von Modelltag 11 bis Modelltag 39) liegt die Dauer der einzelnen Zeitschritte zwischen ca. 1×10^{-3} Tagen und 0,6 Tagen pro Zeitschritt. Insgesamt rechnen die Modelle über den Zeitraum von einem Jahr.

Die gewählte Methode zum Lösen der Gleichungssysteme ist das vorkonditionierte - konjugierte - Gradientenverfahren (PCG - Preconditioned Conjugate Gradient Method). Dieses iterative Verfahren ist für Modelle mit großer Anzahl von Knoten geeignet und weist durch die gute Konvergenz eine Rechenzeit proportional zur Knotenanzahl mit Potenz 1,7 auf (Kinzelbach & Stauffer, 2005).

5.3 Modellbaugruben

In den Varianten der Transportmodellierungen werden insgesamt zwei verschiedene Modellbaugruben mit tiefliegender Injektionssohle simuliert, deren Abmessungen der Baupraxis entlehnt sind (Abbildung 6).

Die Modellbaugrube 1 der Varianten A-C hat Abmessungen von 50 m x 40 m und damit ein Seitenverhältnis von 5:4. Diese rechteckige Baugrubenform spiegelt somit allgemeine Baugruben mit mehreren Untergeschossen wieder, wie sie in der Baupraxis oftmals bei der Errichtung von Büro- und Wohngebäuden Verwendung finden.

Die Modellbaugrube 2 der Varianten D und E hat Abmessungen von 100 m x 20 m, das Seitenverhältnis beträgt 5:1 und steht somit modellhaft für längliche (Teil-)Baugruben, wie sie beispielweise bei Tunnel- oder Straßenbauwerken zum Einsatz kommen.

Abbildung 6 gibt die Abmessungen der beiden Modellbaugruben mit tiefliegender Injektionssohle in Grundriss und Profilschnitt wieder. Beiden Modellbaugruben gemeinsam ist die jeweilige Grundfläche der Injektionssohle ($A = 2.000 \text{ m}^2$) sowie der vertikale Aufbau: die Injektionssohle ist 1,0 m mächtig, ihre Unterkante liegt 11,50 m unterhalb des freien Grundwasserspiegels, der in den Modellen im Bereich der Baugrube auf +32,00 mNHN eingerichtet wird. Die spätere Aushubordinate der Baugrubensohle (BGS) liegt bei +27,50 mNHN. Die Baugrubenwände werden in den Modellen mit einer Stärke von 1,00 m angenommen, entsprechend üblicher Schlitzwand- oder Bohrpfahlwandstärken. Im Allgemeinen reichen die Baugrubenwände bei Herstellung einer Weichgelsohle tiefer als diese, um einen lateralen Transport der noch nicht vollständig abreagierten Bestandteile der Sohle zu unterbinden (Brauns et al. 1996). Auch in den Modellen

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

haben die Baugrubenwände in der Vertikalen einen Überstand von 0,50 m über die Unterkante der Injektionssohle (Abbildung 6).

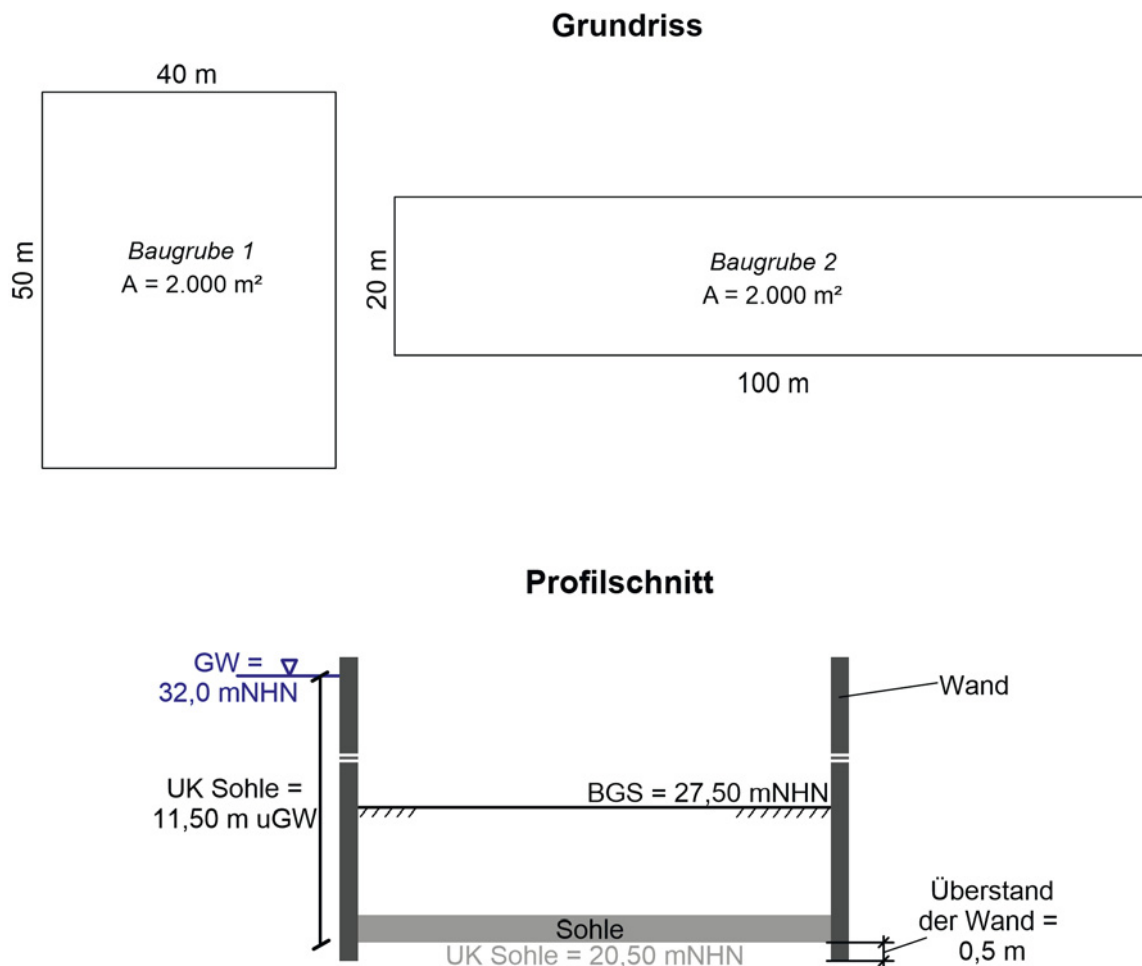


Abbildung 6: Grundriss und Profilschnitt der Baugruben 1 und 2 (nicht maßstäblich dargestellt)

Da Trogbaugruben bzw. deren Sohlkonstruktionen eine mehr oder weniger große hydraulische Durchlässigkeit besitzen (Borchert, 1999), wurde in den Modellen nach Fertigstellung der Sohle eine Restwasserhaltung implementiert (die Sohlherstellung beginnt im Modell ab Tag 11, sie endet mit der Sohlschließung an Tag 39, die Restwasserhaltung beginnt im Anschluss daran, ab Modelltag 40). Diese Restwasserhaltung senkt das Grundwasser im Trog um 5,0 m und somit auf +27,00 mNHN ab (das Absenkeziel liegt im Allgemeinen 0,50 m unterhalb der BGS). Die Restwasserhaltung ist im Modell für 180 Tage simuliert (bis Modelltag 220). Die Modellrechnung selbst endet mit Modelltag 365.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Die hier beschriebenen Berechnungen an den Modellbaugruben beinhalten die Problemstellung, dass die Dichtsohle während der Strömungsberechnung hergestellt wird und sich die Sohlbereiche somit während des Simulationszeitraumes hydraulisch schließen bzw. abdichten. Das Modell muss somit neben der reinen Strömungs- und Transportberechnung auch eine durch den Bearbeiter vorgegebene, zeitabhängige Durchlässigkeitsverminderung im Bereich der Dichtsohle berechnen können, welche ihrerseits den Herstellprozess bzw. die Herstellungsabfolge vor Ort auf einer Baustelle ausreichend abbilden soll. Abbildung 7 zeigt die modellhafte Umsetzung der Herstellungsabfolge der Sohle zu drei Zeitpunkten.

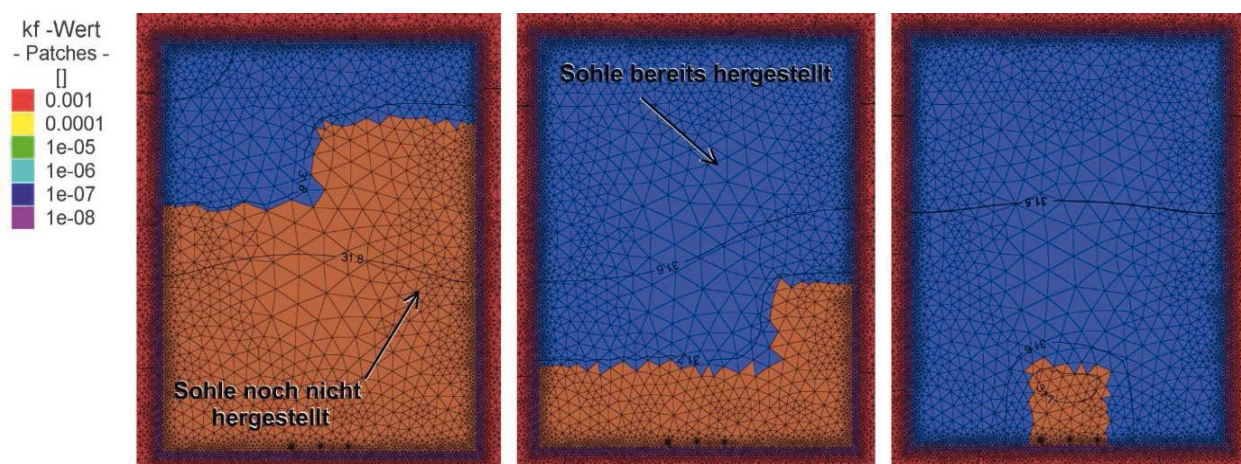


Abbildung 7: Herstellreihenfolge der Sohlherstellung im Modell, nach 6, 15 sowie 19 Arbeitstagen (Ansicht im Grundriss)

Die Herstellungsabfolge entstammt der Baupraxis. Sie wird in den einzelnen Modellvarianten nicht variiert und ist nachfolgend gelistet:

- Herstellung von 100 m² Sohle pro Arbeitstag, bei einer Sohlstärke von 1,0 m.
- 5 Arbeitstage / Woche, gefolgt von zwei Tagen ohne Herstellung (somit werden 2.000 m² Sohle in 4 Wochen hergestellt).
- Pro m³ Sohle werden 300 l Weichgel injiziert (entsprechend der Gesamtporosität $n_p = 0,3$).
- Herstellung erfolgt vom Grundwasseranstrom in Richtung Grundwasserabstrom.
- Nach Schließung der Sohle erfolgt eine Restwasserhaltung für 180 Tage

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Der Durchlässigkeitsbeiwert der Injektionssohle wird in den hier berechneten Modellvarianten stets mit $1,8 \times 10^{-7}$ m/s so gewählt, dass der Zustrom zur Baugrube, die sogenannte Restwasserrate, auf Endabsenkung in etwa $1,4$ l/s/1.000 m² beträgt. Aus Erfahrungen mit vielen Weichgelsohlen wird in Berlin seit 1992 üblicherweise für den Zustrom ein Wert von maximal $1,5$ l/s pro 1.000 m² benetzter Wand- und Sohlfläche angesetzt (Borchert, 1999). Die hier berechneten Modelle erfüllen damit alle diese Vorgabe.

5.4 Modellvarianten

Folgende Parameter werden im Rahmen des Forschungsvorhabens mittel Variantenrechnung verändert, um den Einfluss des jeweiligen Parameters auf das Ergebnis im Bezug zur Basisvariante darzustellen:

a) Grundwassergefälle

Da die Strömungsgeschwindigkeit einen wesentlichen Einfluss auf die Grundwasserbeeinflussung und den Transport von (Schad-)Stoffen hat (Ohlenbusch, 2001), werden in den Varianten des Forschungsvorhabens zwei unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten mittels zwei unterschiedlicher hydraulischer Gefälle i simuliert. Durch Variation des hydraulischen Gefälles und Vergleich der sich aus der Transportmodellierung ergebenden Verteilungen der zu untersuchenden Inhaltsstoffe können Trends abgeleitet werden, die ggf. Anwendungsbereiche abbilden bzw. die Anwendungsgrenzen des Bauprodukts aufzeigen. Mittels instationärer Modelle können die Ergebnisse orts- und zeitdikret beobachtet und abgeschätzt werden. Die beiden Gefällevarianten sind den hydrogeologischen Gegebenheiten im Untergrund des Stadtgebiets Berlins entlehnt, können jedoch auch auf andere Standorte übertragen werden. In den Modellen wird das jeweilige Gefälle anhand von Festpotentialen an den Modellrändern umgesetzt.

Variation des hydraulischen Gefälles:

$$i_1 = 1 : 200$$

$$i_2 = 1 : 1.000$$

b) Hydraulische Durchlässigkeit (k_f -Wert) in der Umgebung der Baugrube

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Auch die hydraulische Durchlässigkeit des Baugrundes hat großen Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeit und somit auf die Grundwasserbeeinflussung und den Transport von (Schad-)Stoffen aus Injektionssohlen. In den Modellvarianten sollen zwei verschiedene hydraulische Durchlässigkeiten des Modellgrundwasserleiters simuliert werden, um daraus weitere Erkenntnisse ableiten zu können.

Variation des k_f -Wertes:

$$k_{f1} = 1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$k_{f2} = 1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

c) Form der Baugrube

Es werden zwei unterschiedliche Baugrubenformen modelliert, um den Einfluss von Form und Größe einer Injektionssohle auf die Rechenergebnisse aus der Transportmodellierung beobachten und ggf. in Form allgemeingültiger Empfehlungen ausarbeiten zu können. Baugrube A entspricht dabei dem klassischen Fall einer rechteckigen Trograugrube, z.B. für ein Büro- bzw. Wohngebäude mit Tiefgarage. Baugrube B entspricht dem Fall einer längsgestreckten Baugrube, z.B. für ein Tunnelbauwerk (Abbildung 6). Für letzteren Fall wird darüber hinaus auch eine quer zur Baugrube verlaufende Strömung simuliert.

Variation Baugrubensymmetrie:

$$\text{Baugrube A} = 2.000 \text{ m}^2, 50 \times 40 \text{ m, rechteckig (L/B = 5:4)}$$

$$\text{Baugrube B} = 2.000 \text{ m}^2, 100 \times 20 \text{ m, rechteckig (L/B = 5:1)}$$

Aus den zuvor beschriebenen Parametervariationen werden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens somit die in Tabelle 7 aufgelisteten fünf Varianten gerechnet und ausgewertet. Die Variante A stellt demnach die Basisvariante dar. Diese ist so parametrisiert, wie in DIBt (2011) und DIBt (2016) vorgegeben und wird derzeit u.a. bei Zulassungsverfahren für Injektionsstoffe angewandt. Die anderen Varianten stellen die Variationsvarianten dar, mit welchen der Einfluss des variierten Parameters in Bezug auf die Basisvariante ermittelt werden soll.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Tabelle 7: Die Varianten A bis E der Transportmodellierung

Variante	Gefälle i	Durchlässigkeitsbeiwert k_f	Baugrubensymmetrie	Strömung	Beschreibung
A	i_1	K_{f1}	A	längs	Basisvariante
B	i_2	K_{f1}	A	längs	geringeres Gefälle
C	i_1	K_{f2}	A	längs	geringerer k_f -Wert
D	i_1	K_{f1}	B	längs	langgestreckte Baugrube
E	i_1	K_{f1}	B	quer	Strömungsrichtung quer

5.5 Grundlagen zur Implementierung der Stofffreisetzung im Modell

Bei allen hier berechneten Transportvarianten werden Aluminium- und Hydroxidionen durch den Grundwasserleiter transportiert, welche neben weiteren Reaktionsprodukten bei der Herstellung einer Injektionssohle freigesetzt werden. Aufgrund der zeitgleichen Bearbeitung der Modellierungen und der in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Säulenversuche, dienen für die Berechnung des Stoffeintrags in den Modellen Laborversuche an einem Weichgel aus dem Jahr 2015. Die Versuchsvorbereitung und -durchführung entsprach den Ausführungen in Kapitel 3. Das Weichgel wurde in den zuvor in die Säulen gefüllten Standardprüfsand (Frechener Feinsand -

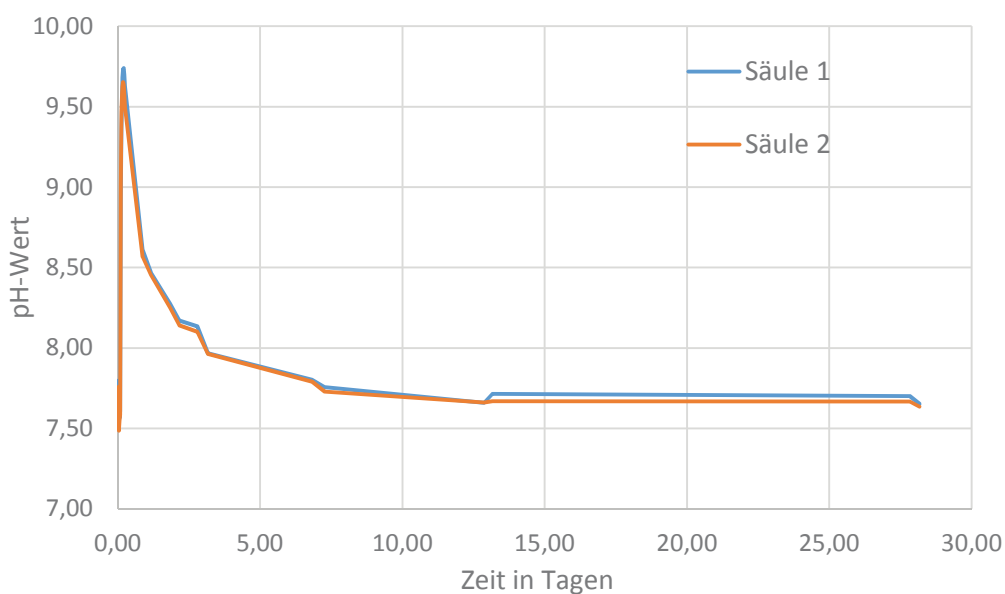


Abbildung 8: Anstieg des pH-Werts in den inversen Säulenversuchen

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Quarzsand nach E DIN 19631:2014-09) verpresst. Die Dokumentation und der daraus berechnete Modelleintrag sind detailliert in Anhang D hinterlegt.

Im Rahmen der inversen Säulenversuche wurden u.a. ein Anstieg des **pH-Wertes** (bedingt durch die Freisetzung von Hydroxidionen) und ein Anstieg der **Aluminiumkonzentration** aufgezeichnet. Beide Stoffe dienen als *input* für die Transportmodelle (Anhang D).

In Abbildung 8 ist der pH-Wert-Anstieg in den beiden Prüfsäulen dargestellt. Darin zeigt sich ein pH-Wert-Maximum von $\text{pH} = 9,75$ nach 5 Stunden. Der pH-Wert fällt im weiteren Versuchsverlauf langsam auf seinen Ausgangswert zurück (geringfügige pH-Wert-Schwankungen im Leitungswasser sind dabei bereits berücksichtigt). Es zeigt sich ein deutliches *tailing* im pH-Verlauf.

Abbildung 9 zeigt den um den Blindwert bereinigten Verlauf der Aluminiumkonzentration während der ersten beiden Tage des Säulenversuchs. Zur Verdeutlichung sind die Probenahmezeitpunkte markiert. Anders als beim pH-Wert ist das Konzentrationsmaximum $c_{\text{max}} \text{Al}^{3+} = 15,4 \text{ mg/l}$ (Mittelwert aus Säule 1 und 2) bereits 4 h nach Durchströmungsbeginn erreicht. Die Konzentration von Aluminium fällt nach 24 Stunden wieder auf das Blindwertniveau zurück und steigt im weiteren Versuchsverlauf nicht wieder an.

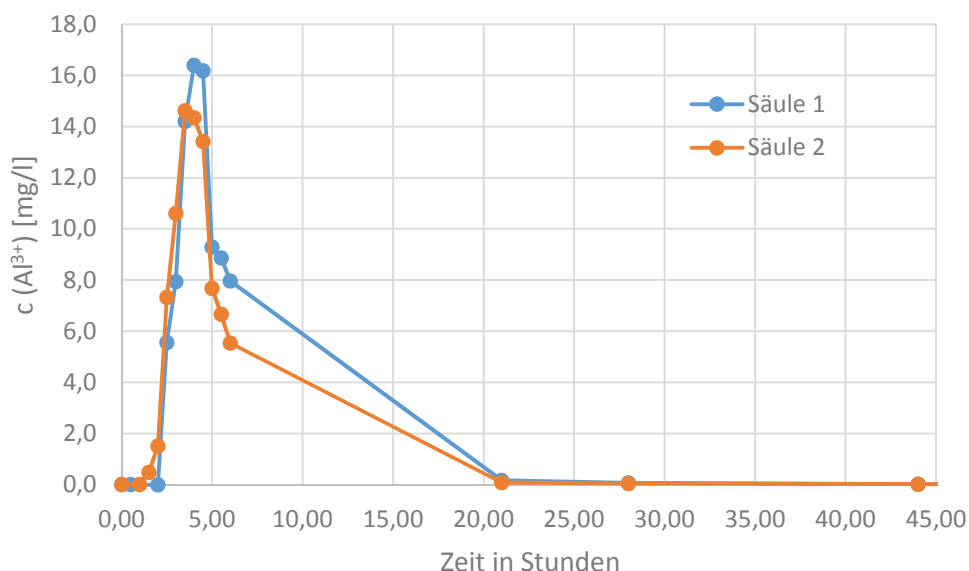


Abbildung 9: Entwicklung der Aluminiumkonzentration (blindwertbereinigt) während der ersten beiden Tage des Säulenversuchs

Beim Aluminium kann daher von einer eher kurzfristigen, während des ersten Tages nach der Injektion stattfindenden Freisetzung ausgegangen werden, während der pH-Wert über einen

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

längeren Zeitraum signifikant erhöht ist und sich nach Erreichen des pH-Wert-Maximums ein deutliches *tailing* anschließt.

Die Eingabe der Stofffreisetzung im Rahmen der Transportmodellierung wird über einen flächenbezogenen Ansatz und mittels „Flux-Randbedingung“ in den Modellvarianten implementiert. Diese entspricht einer zeitabhängigen Auslaugrate J_i in $[g/m^2/d]$. Zur Berechnung dieser Auslaugrate wird in Anlehnung an IBAC (2009) Gleichung (1) verwendet.

$$J_i = \frac{(c_i - c_0) \times V_W \times V_G \times f_0 \times f_t}{\Delta t_i} = \frac{E_i}{\Delta t_i} \quad (1)$$

mit

J_i Auslaugrate im Eluat i in $[g/m^2/d]$

c_i Konzentration im Eluat i in $[g/l]$

c_0 Blindwert im Leitungswasser in $[g/l]$

V_W Volumen des Eluenten (Wasser); hier $V_W = 2,0$ l

V_G Volumen des im Versuch injizierten Gels, hier normiert auf $V_G = 1,0$ l

f_0 Korrekturfaktor, hier $f_0 = 1,8$

f_t Injiziertes Gel im Modellraum, in der für die Auslaugung relevanten Mächtigkeit (0,10 m), hier $f_t = 30$ l/m²

Δt_i Dauer der Elutionsschritte, hier zu Beginn $\Delta t_i = 0,020833$ d = 30 min

E_i Freisetzung im Intervall i in $[g/m^2]$

Hierbei wird die aus den Säulenversuchen ermittelte Freisetzung (Mittelwerte aus Säue 1 und Säule 2) des bekannten Volumens V_{Gel} auf die Oberfläche des sich im Baugrund bildenden Gelkörpers bezogen, unter der Annahme, dass bei einer Gesamtporosität von 0,3 in einen Kubikmeter Baugrund somit 300 l Gel verpresst werden können. Diese Annahme, welche auch im Rahmen der Bewertungsverfahren und im Prüfplan nach DIBt (2011) bzw. DIBt (2016) zur Anwendung kommt, ist eine bisher in der Praxis bewährte Annahme. Für den modellhaften Schadstoffeintrag wird eine jeweils 0,10 m mächtige Schicht an der Ober- und Unterseite der Sohle als Quelle für den Stoffeintrag im Modell angesetzt (nach DIBt, 2016). Hierbei werden die sich aus dem Säulenversuch ergebenden Konzentrationen noch mit einem Geometriefaktor von 1,8 multipliziert, um die sich bei der Gelinjektion bildende, aus mehreren Kugelabschnitten bestehende Oberfläche der Gelsohle entsprechend im Modell abzubilden bzw. berücksichtigen zu können (DIBt, 2016): theoretisch ergibt sich bei einer punktförmigen Injektion einer Weichgelsuspension eine Kugel im Untergrund (eine Manschette wird über einen Packer mit dem Injektionsmittel beaufschlagt). Bei einer höheren horizontalen Durchlässigkeit gegenüber der vertikalen

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Durchlässigkeit, die in der Regel im Baugrund gegeben ist, wird die Ausbreitung eher einem in horizontaler Richtung liegenden Ellipsoid entsprechen. Durch die erforderliche Überschneidung zur Erhaltung der Dichtigkeit der Sohle wird sich bei nachfolgenden Injektionen im Anschluss an bereits hergestellte Injektionskörper eine stärkere Ausbuchtung nach oben und unten ergeben, sodass die sich ergebende Injektionssohle an ihrer Ober- und Unterseite nicht eben, sondern aus einzelnen überschrittenen Ellipsoiden bestehend und somit sehr „hügelig“ ist. Dies führt zu einer größeren Fläche für die Freisetzung von Stoffen aus der Injektion. Bei einer kugelförmigen Ausbreitung mit einem theoretischen Radius von 1,24 m um eine vergleichbare 1,0 m starke Sohle zu erhalten ergibt sich eine ca. 20% größere Fläche an der Oberfläche gegenüber der ebenen Sohle. Nach DIBt (2016) wurde zur Abdeckung von Inhomogenitäten in der Durchlässigkeit und für das Porenvolumen die Fläche an der Ober- und Unterseite um 50% erhöht, sodass sich zur ebenen Fläche insgesamt ein auf der sicheren Seite liegender Erhöhungsfaktor von 1,8 ergibt.

Im Falle einer kurzfristigen Freisetzung, wie am Beispiel des Aluminiums (Al^{3+}) ersichtlich, wird die während des gesamten Zeitraums des Säulenversuchs freigesetzte Menge E_n des Aluminiums in g pro m^3 injiziertem Gel zeitabhängig als Freisetzungskonstante mittels 24 Stunden wirksamer Neumann-Randbedingung (2. Art, mass-flux) in $[g/m^2/d]$ in das Modell implementiert. Zuvor wurde E_i unter Anwendung von Gleichung (1) auf $1 m^2$ der Dichtsohle normiert. Die kumulative Freisetzung während des Durchströmungsversuches E_n wird hernach aus den Freisetzungen im jeweiligen Intervall (E_i) nach Gleichung (2) berechnet.

$$E_n = \sum_{i=1}^n E_i \quad (2)$$

mit

E_n kumulative Freisetzung am Ende von Intervall n in $[g/m^2]$

E_i Freisetzung im Intervall i in $[g/m^2]$

Dazu wurden die erhaltenen Messwerte aus den Säulenversuchen auf den gesamten Betrachtungszeitraum interpoliert. Nichtlineare Interpolationsfunktionen wurden dann aus den Messwerten gebildet und durch Exponential- oder Potenzfunktion auf die Zeit bis 180 Tage (halbstündige Auflösung) die nicht experimentell erhaltenen Werte ermittelt.

Bei längerfristig anhaltender Freisetzung, wie beispielsweise bei OH^- -Ionen, wird die Freisetzung über eine mehrere Tage wirksame Freisetzungskurve entsprechend den Ergebnissen der Säulenversuche zeitabhängig mittels Neumann-Randbedingung (2. Art, mass-flux) in $[g/m^2/d]$ in das Modell gebracht. Die im Säulenversuch beobachteten pH-Werte werden dafür gemäß Gleichung (3) in die entsprechende OH^- -Konzentrationen umgerechnet und diese im Modell entsprechend der fortschreitenden Herstellung der Sohle freigesetzt und transportiert.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

$$c_i(OH^-) = \frac{1 \times 10^{-14}}{10^{-pH}} \quad (3)$$

mit

$c_i(OH^-)$ Konzentration an OH-Ionen im Eluat in [mg/l] bzw. [g/l] im Intervall i

In Tabelle 8 ist der zeitliche Verlauf des Modelleintrags für Hydroxidionen (um den Blindwert bereinigt und nach Gleichung (3) und (1) berechnet) sowie für Aluminiumionen (um den Blindwert bereinigt und nach Gleichungen (1) und (2) berechnet) dargestellt (die Modelleinträge sind detailliert in Anhang D hinterlegt). Die dort angegebenen Werte wurden für den Stoffeintrag im Modellprogramm Feflow mit einem negativen Vorzeichen versehen. Um die Berechnung im Modell zu vereinfachen, sind die Kurven auf die signifikanten Werte reduziert worden, so z.B. auf Maximum und Wendepunkt. Zwischen einzelnen Zeitschritten interpoliert das Modell die Werte linear.

In Abbildung 10 ist beispielhaft der Zeitpunkt der Herstellung des 16. Abschnittes (Modellzeitpunkt zu 33,65 Tagen) dargestellt. In der linken Hälfte sind die Durchlässigkeitsbeiwerte [m/s] dargestellt, die veranschaulichen, welche Bereiche der Injektionssohle zu diesem Modellzeitpunkt bereits hergestellt und hydraulisch abgedichtet wurden. Rechts daneben ist die Aluminiumkonzentration

Tabelle 8: Berechneter Modelleintrag für Aluminium- und Hydroxidionen, an der Unter- und Oberseite der Injektionssohle, exemplarisch für den ersten Herstellungsabschnitt an Modelltag 11

Modellzeit	Al ³⁺ -Eintrag	OH ⁻ -Eintrag
[d]	[g/m ² /d]	[g/m ² /d]
0,00	0,00	0,00
11,00	0,00	0,00
11,65	0,00	0,00
11,70	-12,20	0,00
11,73	-12,20	0,00
11,84	-12,20	-4,27
12,53	-12,20	-0,29
12,65	-12,20	-0,27
12,70	0,00	-0,26
13,82	0,00	-0,07
18,48	0,00	0,00
21,00	0,00	0,00

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

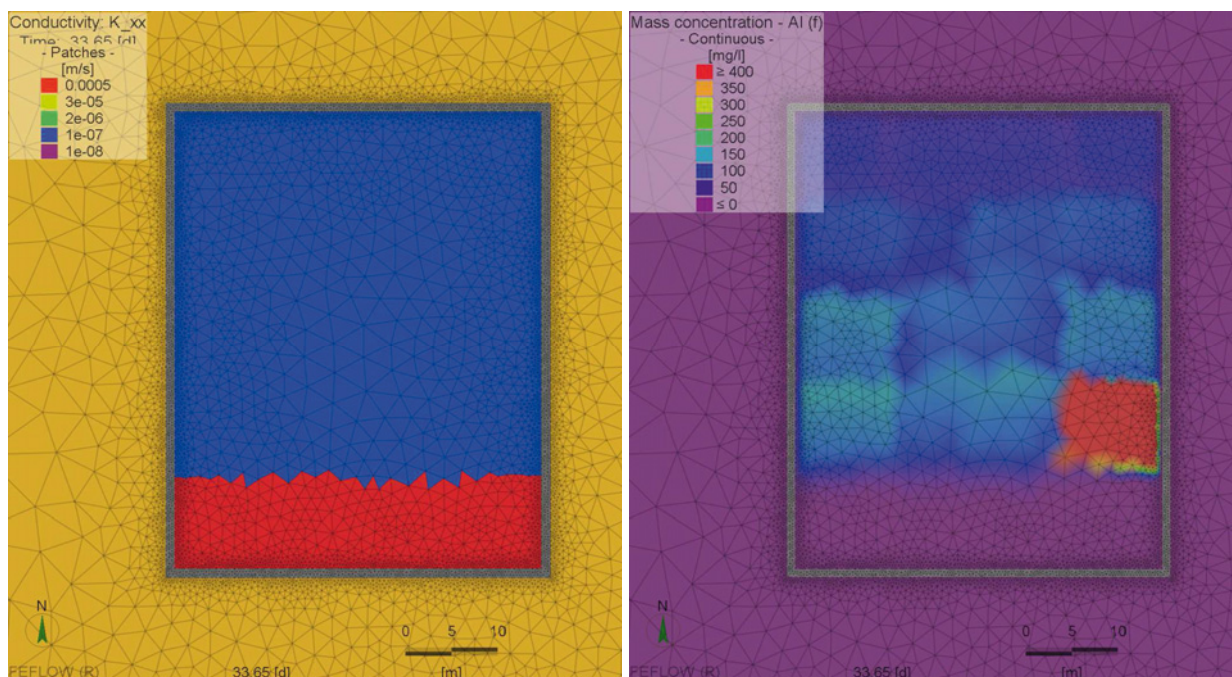


Abbildung 10: Die Durchlässigkeitsverminderung der Sohle (links: geschlossene Sohle in blau, noch nicht hergestellte Bereiche in rot). Die dadurch in das Grundwasser eingetragene Stoffkonzentration an Aluminium (rechts). Beide Darstellungen unmittelbar nach Schließung des 16. Herstellungsabschnittes (Modelltag 33).

[mg/l] unmittelbar unterhalb der Injektionssohle dargestellt, mit deutlichen Maximum im soeben hergestellten Abschnitt 16. In den anderen, zuvor hergestellten Abschnitten ist die Aluminiumkonzentration - bedingt durch Transport- und Verdünnungsprozesse - bereits deutlich verringert, da hier gemäß Tabelle 8 zum dargestellten Zeitpunkt kein Eintrag mehr stattfindet. Die Stofffreisetzung ist in den verschiedenen Modellvarianten identisch und wird nicht variiert.

Im Rahmen der Erarbeitung des Prüfplans für die Untersuchung der Auswirkungen von Silikatgelen als Bodeninjektionsmittel auf Boden und Grundwasser (DIBt, 2016) wurde sich darauf verständigt, dass Abbau-, Adsorptions- und Fällungsprozesse sowie eine Retardierung in den Modellierungen zunächst vernachlässigt werden sollen. Es wird jedoch für den Parameter Aluminium eine zeitliche und räumliche Mittelung der Grundwasserkonzentration implementiert. Für die zeitliche Mittelung werden 180 Tage, also 6 Monate angesetzt, die räumliche Mittelung erfolgt in einer Entfernung von 0 bis 2 m von der Injektionssohle. Im Zuge der hier zur Bewertung kommenden Modelle wird entsprechend verfahren. Gemäß DIBt (2016) soll für die pH-Werte keine Mittelung erfolgen. Von den oben beschriebenen Parametervariationen im Zuge der Variantenrechnung abgesehen, werden auch die restlichen Festlegungen für die Modellierungen an Silikatgelen aus DIBt (2016) hier entsprechend berücksichtigt (vgl. Tabelle 6).

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

5.6 Auswertung der Grundwassermodellierungen

Die in den Modellen berechnete Konzentrationen an Aluminium- und Hydroxidionen werden in den verschiedenen Varianten an jeweils 30 unterhalb der Injektionssohle gelegenen Modellmessstellen zeitabhängig ausgelesen und mittels weiterer Berechnungsschritte dargestellt und bewertet.

Die Lage der Modellmessstellen (als Ort der Beurteilung) wurde in Anlehnung an IBAC (2009) in allen Varianten mittig an der abstromig gelegenen Baugrubenseite (in Bezug auf das jeweilige Strömungsregime) und dadurch an der ungünstigsten Stelle der hier zur Bewertung kommenden Baugruben- und Modellsymmetrien gewählt. In Abbildung 11 ist die Lage der Modellmessstellen im Grundriss exemplarisch für die Varianten A-C dargestellt, Abbildung 12 zeigt die Lage der Modellmessstellen und deren Nummerierung im Profilschnitt. Die 30 Modellmessstellen beschreiben eine vertikale $2,0 \times 2,0 \text{ m}^2$ -Fläche (vgl. Abbildung 12). Horizontal ergeben sich sechs

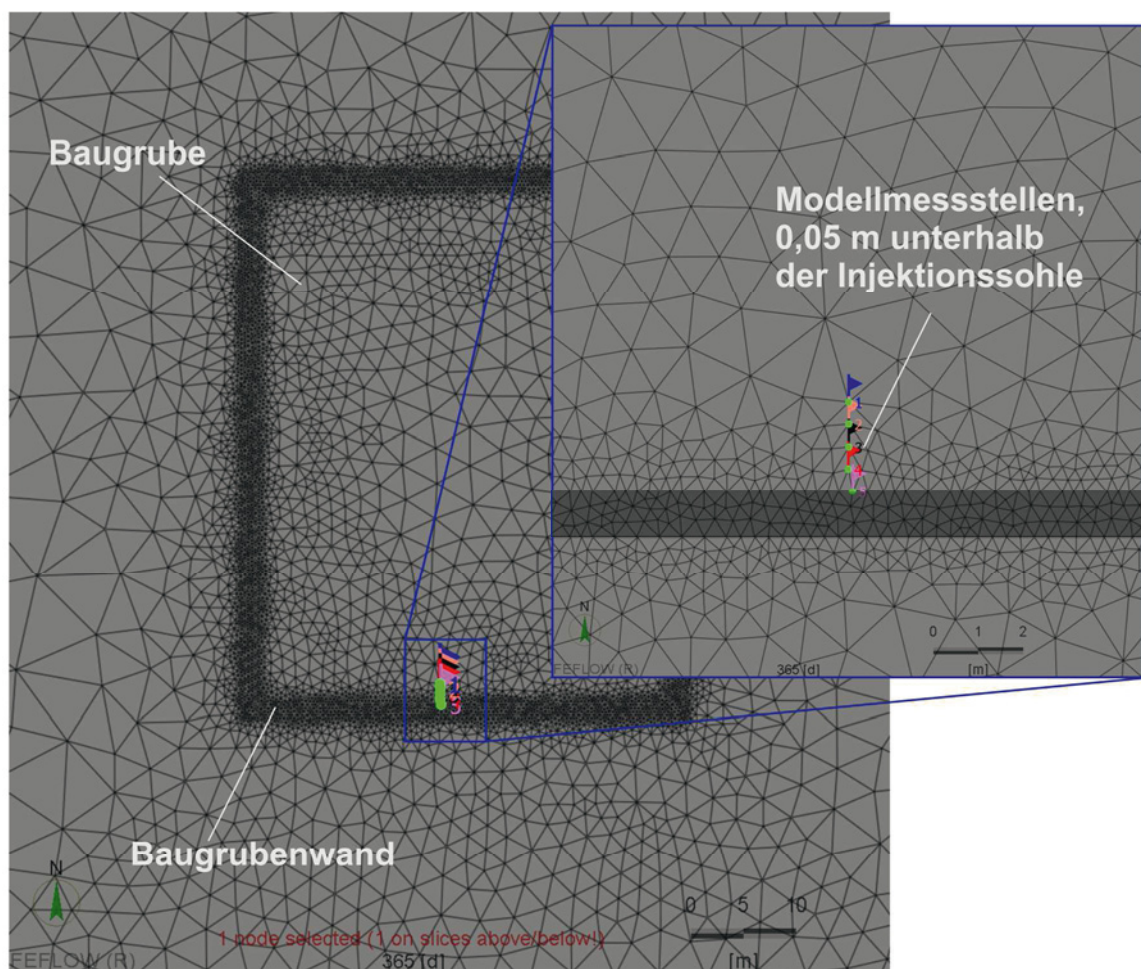


Abbildung 11: Die Lage der 5 obersten Messstellen im Modell (Grundriss), Schnittebene 0,05 m unterhalb der Injektionssohle, Grundwasserströmungsrichtung von Nord nach Süd, Messstellen liegen an der abstromig gelegenen Baugrubenwand (dunkel hinterlegt) und unterhalb der Injektionssohle.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

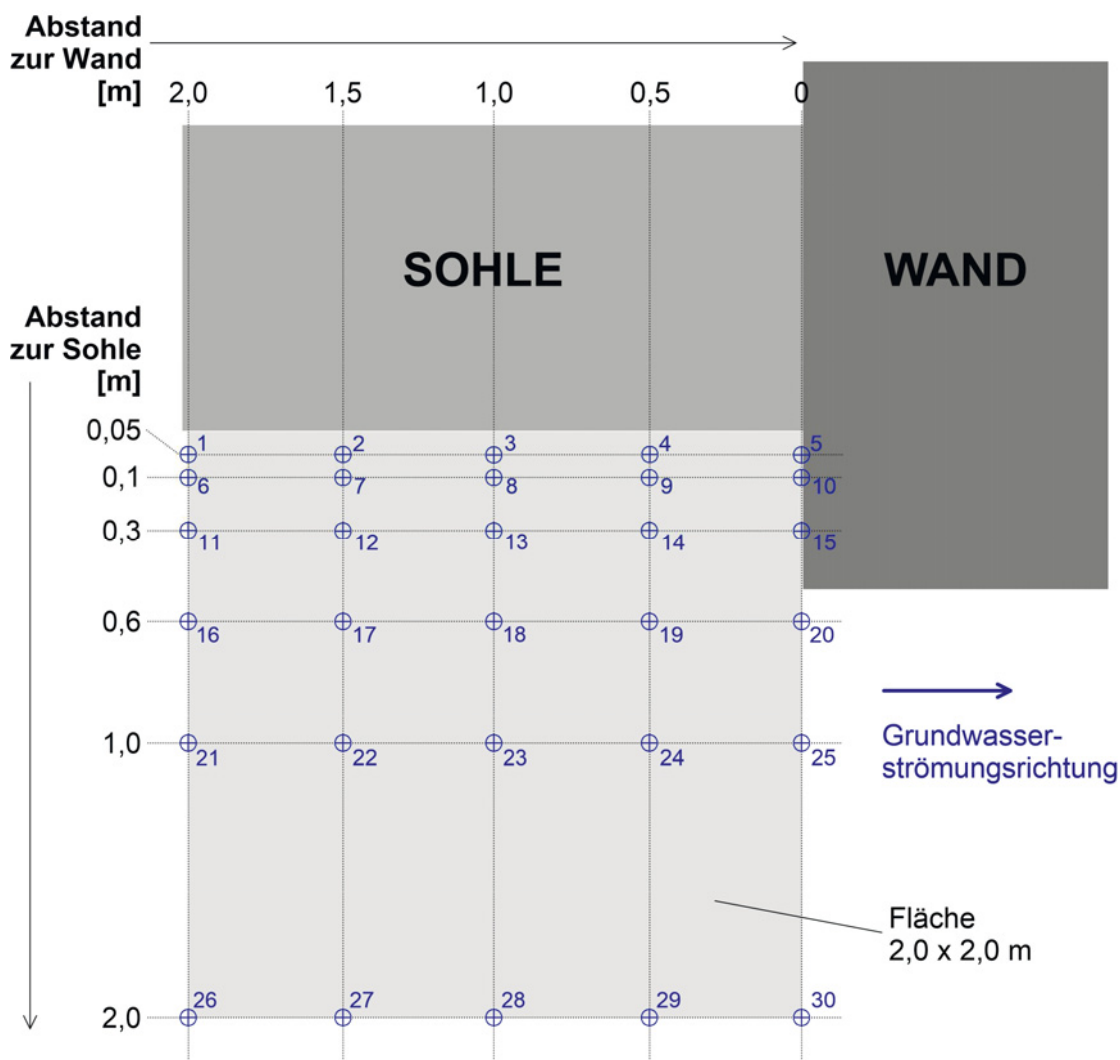


Abbildung 12: Die Lage und Bezeichnung der 30 Modellmessstellen im Profilschnitt, unterhalb der Injektionssohle, an der abstromig gelegenen Baugrubenwand. Grundwasserströmungsrichtung von links nach rechts. Die Messstellen spannen eine 2,0 x 2,0 m Fläche auf, über die in weiteren Berechnungsschritten räumlich und zeitlich gemittelt wird.

Messebenen unterhalb der Injektionssohle, welche mit 0,05 m, 0,10 m, 0,30 m, 0,60 m, 1,0 m sowie 2,0 m Abstand zur Sohle angeordnet sind (vgl. Abbildung 12). In der Vertikalen wurde äquidistante Abstände zur abstromigen Baugrubenwand von 0,00 m, 0,50 m, 1,00 m, 1,50 m sowie 2,0 m gewählt, wodurch sich fünf vertikale Messebenen ergeben.

An jeder dieser 30 Modellmessstellen berechnet das Modell den Konzentrationsverlauf über die Modellzeit. In Abbildung 13 ist beispielhaft der vom Modell ausgegebene Konzentrationsverlauf in [mg/l] für Aluminium an der Modellmessstelle 21 in Variante A dargestellt. Aus dem Kurvenverlauf

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

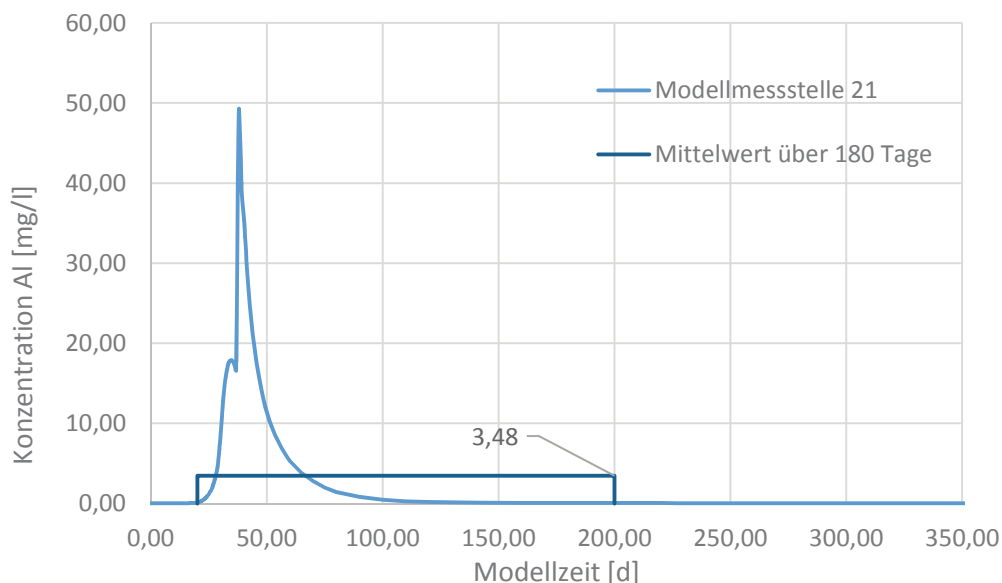


Abbildung 13: Beispielhafter, vom Modell berechneter Konzentrationsverlauf, hier für Aluminium [mg/l] an der Modellmessstelle 21 in Variante A; darüber hinaus der integrative (über 180 Tage gebildete) Mittelwert davon (3,48 mg/l).

kann eine nach Injektion schnell ansteigende Aluminiumkonzentration mit kurzfristigem Maximum von ca. 50 mg/l abgelesen werden, die Kurve flacht im Anschluss an die Injektion entsprechend schnell auf ihr Ausgangsniveau ab.

In einem weiteren Bearbeitungsschritt werden die Konzentrationsverläufe für Aluminium sämtlicher Modellmessstellen in Anlehnung an IBAC (2009), DIBt (2011) und DIBt (2016) numerisch mittels Trapezverfahren über 180 Tage integriert (zur Zulässigkeit der räumlichen und zeitlichen Mittelwertbildung siehe auch DIBt, 2011): anders als bei IBAC (2009) wird zunächst pro Modellmessstelle über die Zeit gemittelt. Da der Stoffeintrag (also die Herstellung der Injektionssohle) im Modell am Modelltag 11 beginnt, wird aufgrund des Abstands der Modellmessstellen (an der abstromigen Baugrubenseite gelegen) zum Ort der beginnenden Injektion (an der anstromigen Baugrubenseite begonnen) der jeweilige Konzentrationsverlauf auf der sicheren Seite liegend zwischen den Modelltagen 20 und 200 integriert. In Abbildung 13 ist das Ergebnis dieser Integration als Mittelwert für die Aluminiumkonzentration am Beispiel der Modellmessstelle 21 in Variante A dargestellt.

Anschließend werden die so pro Modellvariante berechneten 30 Mittelwerte (an jeder der 30 Modellmessstellen berechnet sich nach oben stehender Erläuterung jeweils ein Mittelwert) durch flächige arithmetische Mittelwertbildung erneut gemittelt, so dass sich für jede der fünf

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Modellvarianten **eine mittlere Aluminiumkonzentration in [mg/l]** für den in Abbildung 12 dargestellten **Bereich von 2 x 2 m²** und den **Zeitraum von 180 Tagen** ergibt.

Abschließend werden im Falle des Aluminiums die zeitlich-räumlichen Mittelwerte der verschiedenen Varianten miteinander verglichen, um dadurch ggf. Aussagen über die prognostizierte Verbreitung der freigesetzten Reaktionsprodukte einer Injektionssohle in Abhängigkeit der Baugrubensymmetrie bzw. des Strömungsregimes treffen zu können. Da zum einen der Stoffeintrag und zum anderen der Ort der Beurteilung (in Anlehnung an IBAC, 2009 sowie an DIBt, 2011) in jeder der fünf Modellvarianten identisch implementiert ist, wird der Einfluss der variierten Parameter (k_f -Werte, Gefälle, Baugrubensymmetrie) auf die mittlere Konzentration am Ort der Beurteilung direkt erkenn- und somit bewertbar.

Abseits der zeitlich-räumlichen Mittelwerte am Ort der Beurteilung sollen an den Modellergebnissen zum Aluminium mit einer Frachtberechnung bzw. mit einem Frachtenvergleich weitere Auswertungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. Hierzu wurden im Nachgang zur Modellberechnung zwei Bewertungsebenen in den Modellvarianten implementiert. Es ist zu erwähnen, dass eine nachträglich implementierte Frachtberechnung in bereits berechneten Modellen im Programm Feflow zu anderen Ergebnissen kommen kann, als eine Frachtbetrachtung während der initialen Modellerstellung bzw. -berechnung, da das Modell während der Berechnung automatisch die von ihm zur stabilen Lösung der Gleichungen benötigten Zeitschritte wählt. Für die Frachtberechnung könnten die nach der erfolgten Strömungs- und Transportberechnung als fix in den Modellen vorliegenden Zeitschritte gegebenenfalls zu groß sein (v.a. am Ende des Modellzeitraumes), wodurch sich Unstimmigkeiten bei der nachträglichen Frachtberechnung ergeben können. Es sei darauf hingewiesen, dass die hier gemachten Frachtberechnungen demnach nur eine grobe Orientierung bzw. einen Ausblick auf künftige Berechnungen und Bewertungssysteme darstellen sollen.

Im Falle des pH-Wertes wird die pro Modellmessstelle aus dem Modell ausgegebene Hydroxidkonzentration nach Gleichung (3) in den jeweiligen pH-Wert umgerechnet und dieser über die Modellzeit dargestellt. Abbildung 14 zeigt den so berechneten pH-Wert beispielhaft für die Modellmessstelle 21 der Variante A. Der typische Kurvenverlauf zeigt einen schnellen Anstieg zum kurzzeitigen Maximum (pH = 10,6) und fällt im Laufe der weiteren Modellzeit langsam auf sein Ausgangsniveau zurück. Die pH-Wert-Maxima werden für jede Variante gesondert dargestellt und deren zeitlich-räumliche Verteilung miteinander verglichen.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

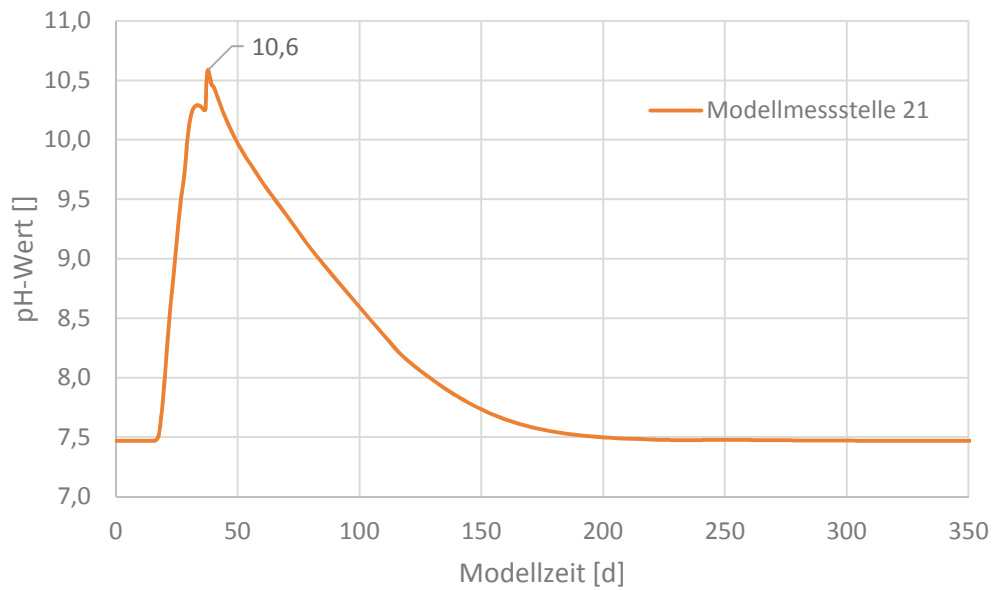


Abbildung 14: Beispielhafter, vom Modell berechneter Verlauf des pH-Wertes, umgerechnet aus der Hydroxidkonzentration gemäß Gleichung (3), für die Modellmessstelle 21, Variante A.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

6 ERGEBNISSE

6.1 Ergebnisse der Säulenversuche

6.1.1 Prüfkörper

In den Versuchen breitete sich das Injektionsmittel nahezu gleichmäßig dreidimensional aus. In den Versuchssäulen entstand eine Kugel. Die größte Kugel mit 3,6 l ist im Säulensand BG entstanden, gefolgt von BG +1%K mit 3,5 l. Die Injektionskörper in den FR36-Sanden werden mit zunehmendem Kohlengehalt voluminöser (von 2,6 auf 2,8 l), zeigen aber generell ein ca. 25% geringeres Volumen. Dies korreliert mit dem Gewicht der Prüfkörper und der Oberfläche. Der leichteste Prüfkörper mit der geringsten Oberfläche ist im FR36 mit ca. 5 kg und 911 cm² entstanden, der schwerste mit der größten Oberfläche mit 8,4 kg und 1236 cm² im BG (Tabelle 9). Hier schneiden die Prüfkörper in den FR36-Sanden im Vergleich zu den BG-Sanden bzgl. des Gewichtes um 34% geringer und bei der Oberfläche um 21% geringer ab. Eine Fotodokumentation ist im Anhang A aufgeführt.

Tabelle 9: Charakterisierung der entstandenen Prüfkörper

	BG	FR 36	BG + 1%K	FR 36 + 1%K	FR 36 + 2,5%K	FR 36 + 5%K
Gewicht [g]	8423,00	4976,00	7417,00	5207,00	5278,00	5335,00
Volumen [ml]	3660,00	2640,00	3520,00	2670,00	2680,00	2780,00
Oberfläche (cm ²)	1236,66	911,00	1171,41	968,64	945,37	956,97

6.1.2 Parameterbestimmung

Der Verlauf der Parameter pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Trübung, Temperatur, Farbe und Geruch sowie Neigung zur Schaumbildung wurden direkt nach der Eluatabnahme bzw. Abnahme des Blindwertes und der Elutionswasserproben bestimmt. Der TOC sowie die Kationen Al³⁺, Na⁺, K⁺ und Ca²⁺ wurden nach kurzer Lagerung im Kühlschrank bei +4 °C analysiert.

Die Elution verlief ohne besondere Vorkommnisse und zeigte einen typischen aber unterschiedlichen Parameterverlauf, da stark von den eingesetzten Sanden und Kohlereibselanteilen abhängig. Die Blindwerte und Elutionswasserproben zeigten typische Werte und entsprechen den allgemeinen Trinkwasserparametern. Die Ergebnisse aller Parameter sind detailliert im Anhang B aufgeführt.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Parameterbestimmung zusammenfassend für Versuchreihe ST 1 und ST 2 dargestellt.

6.1.2.1 Versuchreihe ST 1

Der Baugrundsand (BG) ohne Kohlereibsel, der Baugrundsand mit einer 10 cm mächtige Schicht mit 1% Kohlereibseln (BG + 1%K) und der Frechener Feinsand (FR36) zeigten in allen ermittelten Parameter unterschiedliche Intensitäten (Abbildung 15).

Der Parameter TOC zeigte die maximalste Freisetzung mit 25 mg/l bei BG + 1%K und mit 23 mg/l bei BG. FR36 zeigt keine Freisetzung von organischen Komponenten (Bereich der Nachweisgrenze) an. Die Trübung ist ebenfalls in den Ansätzen BG + 1%K und BG durch ausgetragenen Feinbestandteile relativ hoch. Im Ansatz BG hat die 20 h Spülung des Sandes nicht ausgereicht um die Trübung unter 1 FNU fallen zu lassen. Durch die Injektion kommt es zu einem gesteigerten Austrag an Feinpartikeln. Im Ansatz mit Kohlereibseln wird erst durch die Injektion ein erhöhter Austrag an Feinpartikel verursacht. FR36 zeigt keine Trübung. Die Leitfähigkeit zeigt nach der Injektion den maximalsten Wert mit 904 $\mu\text{S}/\text{cm}$ im Eluat von FR36 an. Durch den BG resultiert eine etwas geringere Leitfähigkeit von ca. 890 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Die Zumischung von 1%K zu BG bewirkt eine relativ geringe Freisetzung an Ionen von max. 820 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Die Kurve des pH-Werts verläuft ähnlich wie die der Leitfähigkeit. FR36 zeigt die höchsten pH-Werte (9,7), vor BG (9,6) und BG + 1%K (9,0).

Aluminium wird ebenso wie Kalium am meisten aus BG und BG +1%K freigesetzt. FR36 bewirkt eine im Vergleich moderate Freisetzung von Aluminium. Natrium zeigt hingegen mit ca. 120 mg/l die höchste Freisetzung bei FR36, eng gefolgt von BG mit ca. 110 mg/l. BG +1%K setzt dazu im Vergleich mit 75 mg/l relativ wenig Natrium frei.

Bei Calcium weist die Freisetzung einen auffälligen Verlauf auf. Anfänglich (Blindwert und erste Fraktionen) liegt die Ca^{2+} -Konzentration wesentlich höher als im weiteren Elutions-verlauf. Besonders im FR36 sinkt die Ca^{2+} -Konzentration in den ersten sechs Stunden stark von 102 mg/l auf 32 mg/l ab. Nach zehn Stunden hat die Ca^{2+} -Konzentration dann ein gleichbleibendes Konzentrationslevel von ca. 80 mg/l für den restlichen Elutionsverlauf erreicht. Die Ca^{2+} -Konzentration bei BG zeigt einen leichten Anstieg von 103 mg/l auf 121 mg/l nach 1,5 h, um danach auf 69 mg/l (20 h) abzusinken und sich im weiteren Verlauf auf 78 mg/l einzupegeln. Die Freisetzung von Ca^{2+} aus BG +1%K geht von ca. 103 mg/l nach 20 Elutionsstunden auf ein stabiles Niveau von 78 mg/l zurück.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

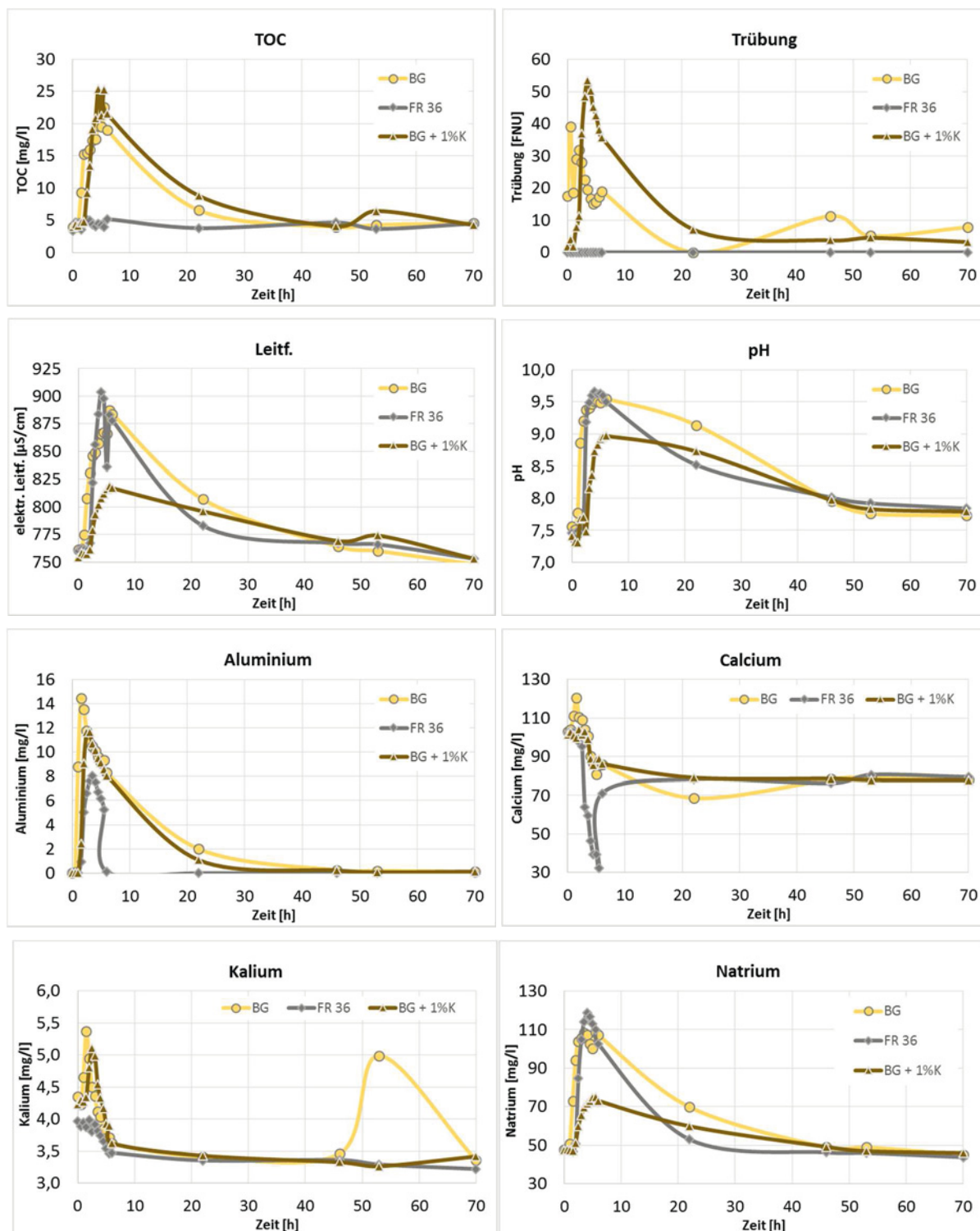


Abbildung 15: Verlauf von TOC, Trübung, elektr. Leitfähigkeit, pH-Wert, Aluminium, Calcium, Kalium und Natrium in der Versuchsreihe ST 1 in Abhängigkeit zur Elutionsdauer (BG: Baugrundsand, FR36: Frechener Feinsand, BG+1%K: Baugrundsand mit 1 % Kohlereibsel)

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Die qualitativen Eluatparameter Geruch und Neigung zur Schaumbildung sind in Abbildung 16 dargestellt. Bei FR36 zeigten die Eluate keine Veränderung zum eingesetzten Elutionsmittel Trinkwasser. Die Neigung zur Schaumbildung ist bei BG auch ca. 50 h nach Elutionsstart noch leicht ausgeprägt. Bei BG +1%K geht die leichte Schaumbildung nach 30 h wieder auf null zurück. Der Geruch ist besonders in den ersten 6 h bei BG ausgeprägt. Ein leichter sandiger Geruch ist bei BG +1%K über die gesamte Elutionsdauer in den Eluaten anzutreffen.

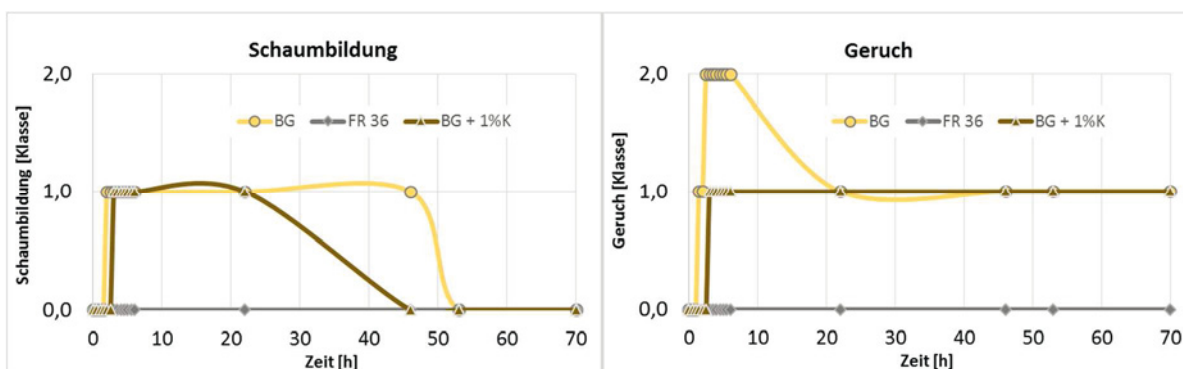


Abbildung 16: Verlauf und Qualität von Schaumbildung (SB) (Keine = 0, leichte SB = 1, SB = 2) und von Geruch (geruchlos = 0, leicht sandig = 1, sandig = 2) in der Versuchsreihe ST 1

Tabelle 10: Ergebnisse des qualitativen Parameters Farbe

Fraktionen	BG	FR 36	BG + 1%K
BW	farblos	farblos	farblos
Fr. 1	leicht gelb	farblos	farblos
Fr. 2	leicht gelb	farblos	farblos
Fr. 3	gelb	farblos	farblos
Fr. 4	dunkel gelb	farblos	farblos
Fr. 5	gelb -braun	farblos	leicht bräunl.
Fr. 6	gelb -braun	farblos	gelbbraun
Fr. 7	gelb -braun	farblos	gelbbraun
Fr. 8	goldbraun	farblos	goldbraun
Fr. 9	goldbraun	farblos	goldbraun
Fr. 10	goldbraun	farblos	goldbraun
Fr. 11	goldbraun	farblos	goldbraun
Fr. 12	goldbraun	farblos	goldbraun
Fr. 13	leicht gelb	farblos	gelbgold
Fr. 14	hellgelb	farblos	hellgelb
Fr. 15	leicht hellgelb	farblos	hellgelb
Fr. 16	fast farblos	farblos	leicht hellgelb

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Die Färbung der Eluate ist in Tabelle 10 dargestellt. Die Eluate der Säulen BG und BG +1%K zeigen mit fortschreitender Dauer eine Zunahme der Farbintensität von leicht gelb bzw. leicht bräunlich bis goldbraun. Die Zugabe an Kohle wirkt auf die Verfärbung verzögernd wie Tabelle 10 im Fraktionsverlauf zeigt.

6.1.2.2 Versuchsreihe ST 2

Der Frechener Feinsand (FR36) und die Steigerung der Kohlegehalte in der eingebauten Schicht zeigten in allen ermittelten Parameter unterschiedliche Intensitäten (Abbildung 17). Der Parameter TOC zeigte eine Zunahme in der Freisetzung in Abhängigkeit zur Steigerung der Kohleanteile. Die höchste Freisetzung erzielte mit 49 mg/l der Ansatz FR36+5%K. Im Vergleich dazu weist der Ansatz FR36 ohne Kohlebeimengung keine Freisetzung von organischen Komponenten (Bereich der Nachweisgrenze) auf. Die Trübung korreliert ebenfalls mit der Zunahme der Kohlebeimengung. Im Ansatz FR36+5%K hat die 20 h Spülung des Sandes ebenfalls nicht ausgereicht (vgl. Ansatz BG) um die Trübung unter 1 FNU fallen zu lassen. Durch die Injektion kommt es zu einem gesteigerten Austrag an Kohlepartikeln. Auch beim Parameter Leitfähigkeit ist auffällig, dass die 20 h Spülung nicht ausreicht um den Blindwert im Ansatz FR36+5%K auf das Niveau des Elutionsmittels Trinkwasser anzuheben. Hier wurden anfängliche Werte von unter 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ gemessen. Erst durch die Wirkung des Injektionsmittels kommt es zum Anstieg der Leitfähigkeit auf Niveau des Elutionsmittels. Auch die weiteren Ansätze mit Kohlereibsel zeigen ein etwas niedrigeres Trinkwasserniveau bei der Leitfähigkeit am Anfang der Elution (Blindwert). Im Unterschied zu FR36+5%K kommt es hier jedoch zu einem kurzzeitigen Anstieg der Leitfähigkeit (max. 850 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bei FR36+2,5%K) über das Niveau des Trinkwassers bzw. Blindwertes von FR36 nach Injektion.

Die Kurve des pH-Werts verläuft ähnlich wie die der Leitfähigkeit. Der Ansatz FR36+5%K zeigt die niedrigsten pH-Werte im BW und in den ersten Fraktionen (5,6; Fr. 1). Nach 10 h hat das Eluat das Niveau vom Trinkwasser erreicht. Die weiteren Ansätze mit Kohlereibsel zeigen einen geringeren pH-Wertanstieg im Vergleich zu FR36 ohne Kohlereibsel (pH 9,7). Im Unterschied zu FR36+5%K kommt es zu einem Anstieg der pH-Werte (max. 9,5 bei FR36+2,5%K) über das Niveau des Trinkwassers. Am Ende des Versuches nach 70 bzw. 93 h befinden sich alle Eluate in einem pH-Bereich von 7,6 bis 8,0.

Aluminium wird am meisten aus FR36+5%K und +2,5%K freigesetzt. FR36 bewirkt eine etwas höhere Freisetzung von Aluminium als FR36+1%K. Natrium zeigt hingegen mit ca. 140 mg/l die höchste Freisetzung aus FR36+2,5%K an. Alle weiteren Ansätzen zeigen eine vergleichbare Freisetzung in den ersten Elutionsstunden von bis zu 120 mg/l Na^+ . Die Natriumkonzentration in den Testansätzen mit Kohlereibsel verbleibt in der Abklingphase im Unterschied zu FR36 ohne Kohlereibsel auf einem höheren Konzentrationsniveau. Die höchsten Kaliumkonzentrationen wurden bereits im BW der Testansätze detektiert und nehmen im Elutionsverlauf leicht ab.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

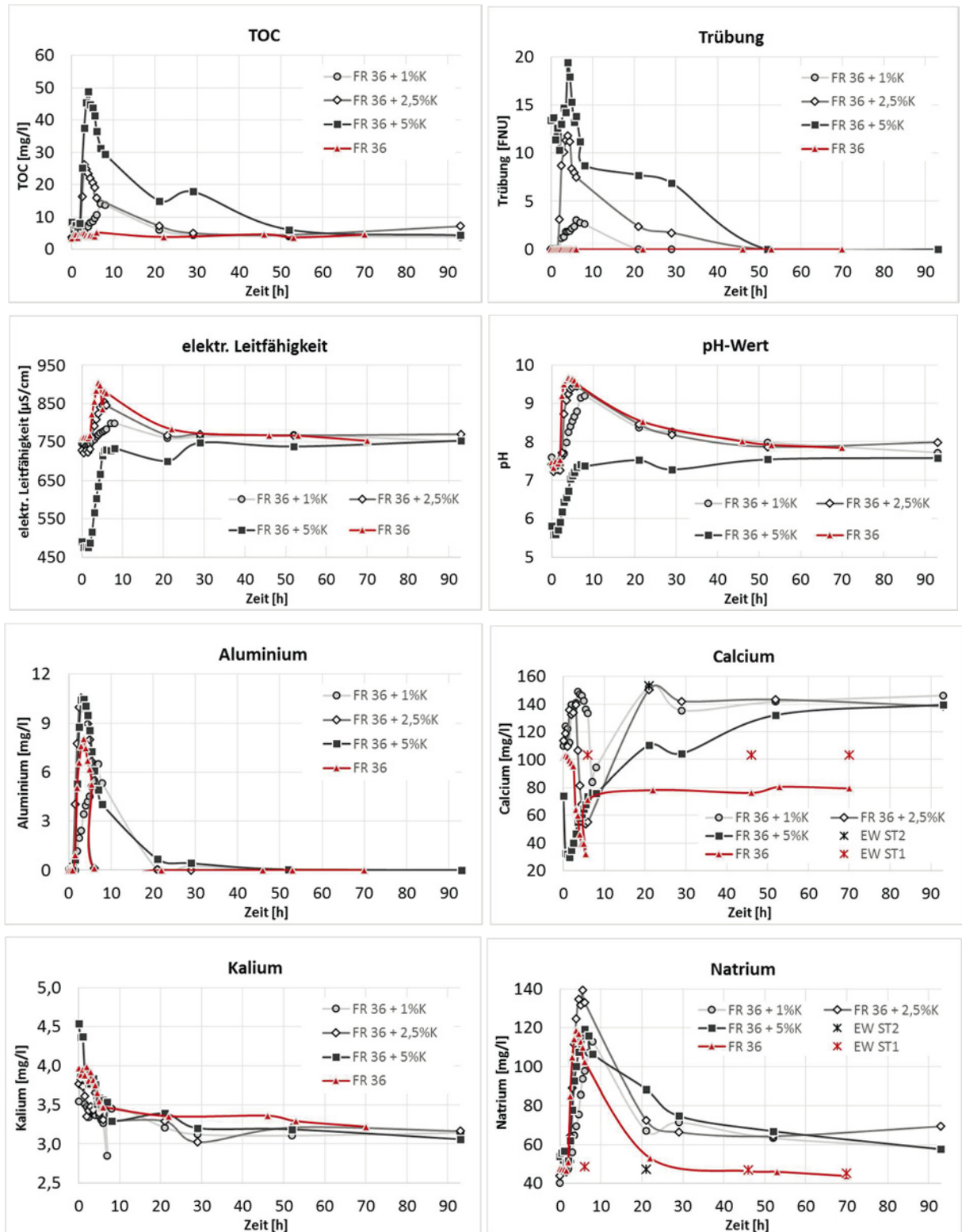


Abbildung 17: Verlauf von TOC, Trübung, elektrischen Leitfähigkeit, pH-Wert, Aluminium, Calcium, Kalium und Natrium in der Versuchsreihe ST 2 in Abhängigkeit zur Zeit (FR 36: Frechener Feinsand, FR 36+1%K, +2,5%K, +5%K: Frechener Feinsand mit 1, 2,5 und 5 % Kohlereibsel; EW: Elutionswasser)

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Bei Calcium weist die Freisetzung wie bereits in ST 1 einen auffälligeren Verlauf auf. Im Ansatz FR36+5%K ist bereits im BW weniger Ca im Vergleich zum Trinkwasser enthalten. Im weiteren Verlauf sinkt Ca bis zu einem Wert von 30 mg/l (Fr. 3). Danach steigt Ca bis zum Elutionsende auf 140 mg/l an. Im Ansatz FR36+1%K steigt Ca bis Fr. 7 an um danach langsam bis zu Fr. 12-2 (7h) auf 84 mg/l abzusinken. Bis Elutionsende steigt Ca ebenfalls auf ca. 140 mg/l an. Einen ähnlichen Verlauf nimmt FR36+2,5%K. Hier wurde nach 5,5 h der niedrigste Ca-Wert mit 54 mg/l ermittelt.

Die qualitativen Eluatparameter Geruch und Neigung zur Schaumbildung sind in Abbildung 18 dargestellt. Die Neigung zur Schaumbildung nimmt mit Zunahme der Kohlereibsel zu. Der Geruch ist besonders in den ersten 6 h leicht organisch, was auf die Kohlereibsel zurückzuführen ist.

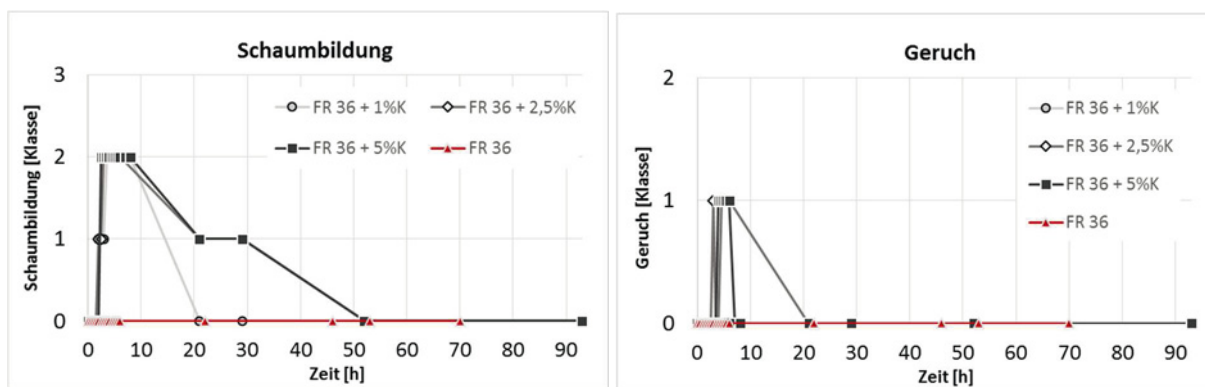


Abbildung 18: Verlauf und Qualität von Schaumbildung (SB) (Keine = 0, leichte SB = 1, SB = 2) und von Geruch (geruchlos = 0, leicht organisch = 1) in der Versuchsreihe ST 2

Die Färbung der Eluate ist in Tabelle 11 dargestellt. Die Eluate zeigen mit fortschreitender Dauer eine Zunahme der Farbintensität von leicht gelblich bis dunkelgold / goldbraun bis braun. Die Zugabe an Kohle erhöht die Intensität. Im Ansatz FR36+5%K sind die Eluate braun (Fr. 9 – 12) gefärbt. In der Abklingphase wird wieder ein farbloser Zustand erreicht.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Tabelle 11: Ergebnisse des qualitativen Parameters Farbe

Fraktionen	FR 36 + 1%K	FR 36 + 2,5%K	FR 36 + 5%K
BW	farblos	farblos	leicht gelblich
Fr. 1	farblos	farblos	leicht gelblich
Fr. 2	farblos	farblos	leicht gelblich
Fr. 3	farblos	farblos	leicht gelblich
Fr. 4	farblos	leicht gelblich	leicht gelblich
Fr. 5	leicht gelblich	goldbraun	leicht gelblich
Fr. 6	gelblich	goldbraun	goldbraun
Fr. 7	gelblich	goldbraun	goldbraun
Fr. 8	golden	goldbraun	goldbraun
Fr. 9	golden	goldbraun	braun
Fr. 10	golden	goldbraun	braun
Fr. 11	golden	goldbraun	braun
Fr. 12	golden	goldbraun	braun
Fr. 12-2	dunkelgold	n.b.	goldbraun
Fr. 12-3	dunkelgold	n.b.	goldbraun
Fr. 13	leicht gelblich	gelblich	golden
Fr. 14	leicht gelblich	gelblich	golden
Fr. 15	fast klar	leicht gelblich	leicht gelblich
Fr. 16	farblos	leicht gelblich	farblos

6.1.3 Freisetzungsberechnung

Die Freisetzungsberechnung wurde für Aluminium und TOC über 180 Tage durchgeführt. Dazu wurden die erhaltenen Messwerte auf den gesamten Betrachtungszeitraum interpoliert. Die Nichtlinearen Interpolationsfunktionen wurden aus den Messwerten gebildet und durch Exponential- oder Potenzfunktion auf die Zeit bis 180 Tage (halbstündige Auflösung) die nicht experimentell erhaltenen Werte ermittelt.

Die höchste kumulierte Menge an Aluminium wird aus den BG Ansätzen ausgetragen. Die Zumischung von Kohlereibsel bewirkt eine Reduzierung des Al^{3+} -Austrages um 1/3. In den FR36 Ansätzen korreliert die steigende Freisetzung an Al^{3+} mit zunehmender Menge an Kohlereibsel. In Tabelle 12 sind die erhaltenen kumulierten Freisetzungsmengen für Aluminium dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde zusätzlich die freigesetzte Menge bezogen auf 1 cm² der Oberfläche des Prüfkörpers ermittelt.

Die höchste kumulierte Menge an TOC wird aus FR36+5%K ausgetragen. Die Zumischung von Kohlereibsel bewirkt einen Anstieg des TOC Austrages. In den FR36 Ansätzen korreliert die steigende TOC-Freisetzung mit zunehmender Menge an Kohlereibsel. In den BG-Ansätzen wird der Austrag durch Zumischung von Kohlereibsel ebenfalls gesteigert. In Tabelle 13 sind die erhaltenen kumulierten Freisetzungsmengen für TOC dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde zusätzlich die freigesetzte Menge bezogen auf 1 cm² des Prüfkörpers ermittelt.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Tabelle 12: Kumulierten Freisetzungsmengen für Aluminium über 180 Tage Leaching

	BG	BG+1%K	FR36	FR36+1%K	FR36+2,5%K	FR36+5%K
Austrag kum. [mg]	641,93	418,82	109,51	167,89	198,02	312,34
Oberfläche [cm ²]	1236,66	1171,41	911,00	968,64	945,37	956,97
Freisetzung [mg/cm ²]	0,519	0,358	0,120	0,173	0,210	0,326

Tabelle 13: Kumulierten Freisetzungsmengen für TOC über 180 Tage Leaching

	BG	BG+1%K	FR36	FR36+1%K	FR36+2,5%K	FR36+5%K
Austrag kum. [mg]	612,74	1374,82	0,00	249,11	473,74	2073,54
Oberfläche [cm ²]	1236,66	1171,41	911,00	968,64	945,37	956,97
Freisetzung [mg/cm ²]	0,495	1,174	0,00	0,257	0,501	2,167

6.1.4 Huminstoffbestimmung

6.1.4.1 Huminstofffraktionierung - Feststoffproben

Die Verteilung der Huminstofffraktionen in den Feststoffproben zeigt einen relativ kleinen Anteil an Huminsäure. Die größte Fraktion ist die der Humine mit 48 (FS) – 95 % (K). Die Kohlereibsel besitzen den geringsten Anteil an Fulvosäure (Tabelle 14).

Tabelle 14: Verteilung der Huminstofffraktion in den Feststoffproben

Material	Corg	Humine	Huminsäure	Fulvosäure
	[%]	Anteile in [%] an Corg		
Feinsand (FS)	0,05	48,49	5,72	45,80
Baugrundsand (BS)	0,21	80,03	2,43	17,53
Kohlereibsel (K)	54,82	95,47	4,11	0,42

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

6.1.4.2 Huminstofffraktionierung - Eluatproben

Zur Bestimmung auf Huminstoffe wurden in einem ersten Schritt ausgewählte Eluate membrangefiltert (<0,45 µm) und das Filtrat auf gelöste organischen Kohlenstoff (DOC) analysiert.

In Abbildung 19 sind die analysierten Proben dargestellt. In den ersten und letzten Eluatfraktionen ist der TOC mit dem DOC nahezu identisch, d. h. dass alle organischen Bestandteile bzw. freigesetzten organischen Inhaltstoffe per Definition (Partikelgröße < 500 nm) gelöst vorliegen. In den mittleren Fraktionen ist jedoch gut zu erkennen, dass der TOC nur noch bis zu 60% aus gelösten organischen Kohlenstoff (DOC) besteht und durch die Injektion von Weichgel ungelöste organische Partikel aus dem umgebenden Boden mobilisiert werden.

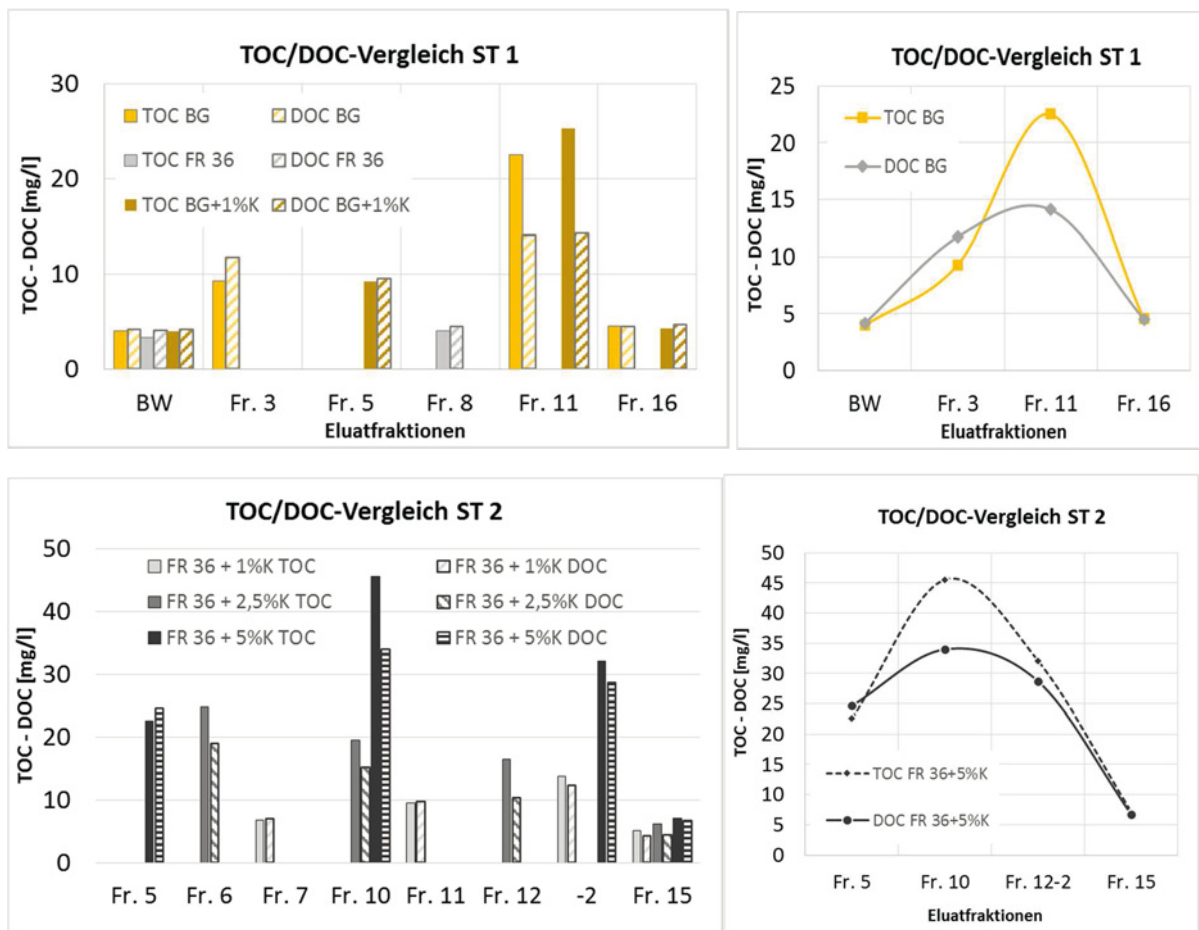


Abbildung 19: Vergleich von TOC und DOC in ausgewählten Proben (Fraktionen) der Versuchsreihen ST 1 und ST 2 (FR 36: Frechener Feinsand, FR 36+1%K, +2,5%K, +5%K: Frechener Feinsand mit 1, 2,5 und 5 % Kohlereibsel; EW: Elutionswasser)

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

In einem zweiten Schritt wurden die einzelnen Huminstoffbestandteile (Humin- und Fulvosäure) bestimmt. Die Fraktionierung ergab die in Tabelle 15 aufgeführte Verteilung. Der Ansatz FR36 ohne Kohleemischung liefert, aufgrund der Werte im Bereich des Trinkwassers, negative Werte in der Fraktion der Huminsäure. Die BG-Ansätze sowie FR36+1%K zeigen einen höheren Fulvosäureanteil. Mit höheren Kohlereibselanteil verschiebt sich der Anteil zugunsten der Huminsäure.

Die Verteilung der Huminstofffraktionen in den Eluaten stimmt gut mit den Ausgangswerten der eingesetzten Sande und Kohlereibsel überein. Besonders in den FR36-Ansätzen ist die Zunahme an Huminsäure im Eluat mit dem Gehalt an Kohlereibsel in den Säulensanden erklärbar.

Tabelle 15: Verteilung der Huminstofffraktion in ausgewählten Eluaten

Probe		Ansatz	DOC	Huminsäure		Fulvosäure	
			mg/l	mg/l	%	mg/l	%
ST 1	A 11	BG	14,12	5,37	38,03	8,74	61,90
	B 8	FR36	4,49	-3,31	n.b.	7,8	n.b.
	C 11	BG+1%K	14,28	4,62	32,35	9,66	67,65
ST 2	A 12-2	FR+1%K	12,27	3,18	25,92	9,09	74,08
	B 6	FR+2,5%K	18,92	10,61	56,08	8,31	43,92
	C 12-2	FR+5%K	28,71	19,59	68,23	9,12	31,77

n.b. = nicht bestimmt

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

6.2 Ergebnisse der Transportmodellierungen

6.2.1 Aluminium

Nachfolgend werden ausgewählte Modellergebnisse für die Freisetzung und den Transport von Aluminium in den verschiedenen Modellvarianten dargestellt und miteinander verglichen. Die Konzentrationskurven des Aluminiums sämtlicher Messstellen der fünf Varianten sind in Anhang C in den Abbildungen C1 - C30 dargestellt. Die Graphen sind gemäß den vertikalen Messebenen geordnet, die Konzentrationskurven werden also in Bezug auf den Abstand zur Sohle dargestellt und beim Aluminium noch jeweils um den räumlichen und zeitlichen Mittelwert der betrachteten Variante ergänzt (s. Erläuterungen zum Mittelwert unter Abschnitt 5.6). Die Bezeichnung der in Anhang C dargestellten Kurven ergibt sich über die jeweilige Variante (A bis E) und die jeweilige Messstelle (1 bis 30). So stellt beispielsweise der Kurvenverlauf „A_1“ aus Anhang C die zeitliche Entwicklung der Konzentration der Messstelle 1 aus Variante A dar. Die Lage der 30 Modellmessstellen ist in Abbildung 12 dargestellt.

Die Konzentrationskurven für Aluminium haben einen schnellen Anstieg auf das jeweilig nur kurzfristig vorherrschende Konzentrationsmaximum gemeinsam (zeitlich unmittelbar nach erfolgter Herstellung im Bereich der Modellmessstellen), gefolgt von einem je nach vorherrschendem Fließregime ausgebildetem *tailing* (Anhang C). Mit Ausnahme der Kurven der Variante B zeigen alle im Anhang C dargestellten Kurvenverläufe mitunter deutliche Sprünge der Aluminiumkonzentrationen und auch der pH-Werte um den Modelltag 40 herum. Diese resultieren aus der zu diesem Modellzeitpunkt einsetzenden Restwasserhaltung, welche v.a. im unmittelbaren Abstrom der Baugrube einen Strömungsrichtungswechsel hervorruft. In Folge dieses Strömungsrichtungswechsels strömen gelöste Inhaltsstoffe, welche zuvor in Richtung Abstrom die 30 Messstellen passiert haben, auf ihrem jetzigen Weg in Richtung Trog zurück (also in Richtung der dortigen Wasserhaltung) und somit erneut an den 30 Messstellen vorbei, wodurch dort eine kurzfristige Erhöhung der Konzentration zu beobachten ist. Die beschriebenen Sprünge in den Kurven um den 40. Modelltag herum resultieren somit nicht aus numerischen Effekten oder Unschärfen.

6.2.1.1 Räumlich-zeitliche Mittelwerte

Tabelle 16 zeigt die berechneten, räumlich-zeitlichen Mittelwerte (2x2 m, 180 d) und die jeweiligen Konzentrationsmaxima der einzelnen Varianten im Vergleich. Über die gemäß DIBt (2011) bzw. DIBt (2016) berechneten Mittelwerte hinaus sind in der Tabelle 16 auch Mittelwerte und Konzentrationsmaxima in Bezug auf den Abstand zur Dichtsohle berechnet (in den Messebenen 0,05 m / 1,00 m / 2,00 m unterhalb der Injektionssohle [m u.IS]). In der Basisvariante A ergibt sich demnach für das Aluminium ein räumlich-zeitlicher Mittelwert von 3,77 mg/l (2x2 m, 180 d). Werden nur Werte innerhalb horizontaler Messebenen über 180 Tage gemittelt, ergibt sich unmittelbar

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Tabelle 16: Mittelwerte (2x2 m, sowie innerhalb dreier Messebenen unterhalb der Injektionssohle [m u.IS], für 180 d) und Konzentrationsmaxima (in Messebenen), für Aluminium in den jeweiligen Modellvarianten

Variante	Mittelwert (2x2 m, 180 d)	Mittelwerte in einer Messebene, 180 d			Konzentrationsmaxima			Beschreibung
		0,05 m u.IS	1,00 m u.IS	2,00 m u.IS	0,05 m u.IS	1,00 m u.IS	2,00 m u.IS	
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	
A	3,77	4,50	3,40	2,65	112,6	49,3	27,3	Basisvariante
B	4,07	5,16	3,38	2,44	203,5	37,8	14,9	geringeres Gefälle
C	3,04	4,31	2,19	1,48	264,2	31,9	11,4	geringerer k_f -Wert
D	4,90	5,84	4,37	3,56	153,4	47,4	31,5	langgestreckte Baugrube
E	1,95	2,63	1,55	1,06	121,6	29,2	14,5	Strömungsrichtung quer

unterhalb der Injektionssohle in Variante A ein etwas höherer Mittelwert von 4,50 mg/l (Abstand zur Injektionssohle = 0,05 m, Tabelle 16). Mit größerem Abstand zur Sohle werden die Mittelwerte erwartungsgemäß geringer (3,40 mg/l in 1 m Abstand sowie 2,65 mg/l in 2 m Abstand zur Sohle, Variante A, Tabelle 16).

Auch die Konzentrationsmaxima sind in horizontalen Messebenen betrachtet nahe der Sohle erwartungsgemäß höher als in größerem Abstand zu dieser. So liegt das absolute Konzentrationsmaximum der Variante A beispielsweise bei 112,6 mg/l und räumlich in nur 0,05 m Abstand unterhalb der Injektionssohle (Tabelle 16 sowie Abbildung C1, Anhang C). Es tritt zeitlich sehr kurzfristig und unmittelbar nach der modellhaften Herstellung der Injektionssohle im Bereich der Modellmessstellen auf. Mit weiterem Abstand zur Sohle werden auch die Maxima geringer (49,3 mg/l in 1 m Abstand sowie 27,3 mg/l in 2 m Abstand zur Sohle, Tabelle 16 sowie Anhang C).

Qualitativ betrachtet konnte in den übrigen Varianten eine vergleichbare räumliche Verteilung von Maxima und Mittelwerten festgestellt werden, mit zunehmendem Abstand zur Sohle nehmen in allen Varianten sowohl Konzentrationsmaxima als auch Mittelwerte ab (Tabelle 16 sowie Anhang C).

Quantitativ ergab sich der höchste Aluminium-Mittelwert für rechteckige, in etwa quadratische Baugruben aus der Variante B (4,07 mg/l, Tabelle 16), der höchste Mittelwert für langgestreckte Baugruben (und auch der höchste Mittelwert der fünf Modellvarianten) aus der Variante D (4,90

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

mg/l). Aufgrund der geringeren Grundwasserfließgeschwindigkeiten und der davon indirekt abhängigen Transport- und Verteilungsmechanismen zeigte die Variante C unter den quasi-quadratischen Baugruben beispielsweise den geringsten Mittelwert aller Varianten (3,04 mg/l), zugleich unmittelbar unter der Sohle jedoch das höchste berechnete Konzentrationsmaximum (264,2 mg/l). Das Strömungsregime der Variante C führt in 2 m Abstand zur Sohle auch dazu, dass der dortige Mittelwert (11,4 mg/l) der Niedrigste in den hier berechneten Varianten ist.

Unter den langgestreckten Baugruben (Varianten D und E) wurde trotz vergleichbarem Stoffeintrag der niedrigste Mittelwert bei einer Sohlherstellung senkrecht zur Grundwasserströmungsrichtung beobachtet (Variante E, Mittelwert 1,95 mg/l). Wird die Injektionssohle einer langgesteckten Baugrube in Grundwasserströmungsrichtung hergestellt, wie in Variante D berechnet, erhöhen sich dadurch die am Ort der Beurteilung gemäß DIBt (2011) bzw. DIBt (2016) beobachteten Mittelwerte auf 4,90 mg/l. Dieser Mittelwert stellt bei den hier betrachteten fünf Varianten den höchsten Wert dar, wodurch die Variante D in Bezug auf die gemäß DIBt (2011) bzw. DIBt (2016) gemittelten Konzentrationen für Aluminium das *worst-case* Szenario aller Varianten darstellt.

Vergleicht man die zeitlich-räumlichen Mittelwerte für Aluminium aus den einzelnen Varianten direkt miteinander, zeigen sich die unterschiedlichen Einflüsse der variierten Parameter auf das jeweilige Bewertungsergebnis. In Tabelle 17 sind die zeitlich-räumlichen Mittelwerte daher im prozentualen Vergleich zur Basisvariante A dargestellt. Demnach ist festzustellen, dass der Mittelwert für Aluminium am Ort der Beurteilung bei Verringerung des hydraulischen Gefälles von $i_1 = 1:200$ (Variante A) auf $i_2 = 1:1000$ (Variante B) im Falle der hier berechneten Transportsimulationen um ca. 8% ansteigt. Bei Verringerung der hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwerte von $k_{f1} = 1 \times 10^{-3}$ m/s (Variante A) auf $k_{f2} = 1 \times 10^{-4}$ m/s (Variante C)

Tabelle 17: Mittelwerte (2x2 m, 180 d) für Aluminium und deren direkter Vergleich zur Basisvariante A.

	Mittelwert (2x2 m, 180 d)	Vergleich zu Variante A	Beschreibung
Variante	[mg/l]	[%]	
A	3,77	100%	Basisvariante
B	4,07	108%	geringeres Gefälle
C	3,04	81%	geringerer k_f -Wert
D	4,90	130%	langgestreckte Baugrube
E	1,95	52% (40% ¹)	Strömungsrichtung quer

¹ = Vergleich zu Variante D. Da die Varianten D und E im geometrischen Aufbau identisch sind, empfiehlt sich ein direkter Vergleich dieser beiden Varianten.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

verringert sich die gemittelte Konzentration für Aluminium am Ort der Beurteilung um 19% (Tabelle 17). Am Beispiel der Variante D wird ersichtlich, dass die dort geänderte Baugrubensymmetrie (trotz eines vergleichbaren Strömungsregimes sowie gleicher Volumen- und Flächeninhalte der in den jeweiligen Varianten modellierten Injektionssohlen) 30% höhere Mittelwerte zur Folge hat, als in der Basisvariante A (Tabelle 17). Variiert man dagegen die Herstellungsrichtung in Bezug zur Grundwasserfließrichtung (Herstellung senkrecht zur Fließrichtung in Variante E), so hat dieser Schritt bei der hier berechneten Variante E um 48% verminderte Mittelwerte für Aluminium im Vergleich zur Basisvariante A zur Folge. Da die Varianten D und E einen direkt vergleichbaren Aufbau haben (gleiche Baugrubensymmetrie, aber geänderte Herstellungsrichtung in Bezug zur Grundwasserfließrichtung), empfiehlt sich ein direkter Vergleich der dort gebildeten Mittelwerte: demnach wurden in Variante E 60% geringere Mittelwerte als bei Variante D aus dem Modell abgeleitet.

Sowohl die Vorgaben in einer Fläche von 2,0 x 2,0 m zu mitteln, als auch die Anordnung der 30 Messpunkte bzw. die Abstände dieser zueinander beeinflussen das Ergebnis der Mittelwertbildung. Die Mittelwertbildung an 30 Messpunkten stellt einen erheblichen Arbeits- und Rechenaufwand in der Berechnung dar, weshalb anhand der Ergebnisse untersucht wurde, ob sich einzelnen Messpunkten das jeweils gebildete Mittelwtergebnis der Bewertungsfläche zuordnen lässt. Aus Tabelle 16 wurde bereits ersichtlich, dass die in einer Ebene gebildeten Mittelwerte unmittelbar unterhalb der Sohle (0,05 m u.IS, Tabelle 16) stets größer sind, als die Mittelwerte der 2,0 x 2,0 m Fläche. Darüber hinaus ist ersichtlich, dass in einem Meter Abstand zur Sohle (1,00 m u.IS, Tabelle 16) stets geringere, in einer Ebene gebildete Mittelwerte resultieren, als über die 2,0 x 2,0 m Fläche. Tabelle 18 zeigt die zeitlich-räumlichen Mittelwerte über 30 Messpunkte (2,0 x 2,0 m Fläche) verglichen mit dem zeitlichen Mittelwert an einem Messpunkt (Punkt 17), welcher 0,6 m unterhalb der Sohle und 1,5 m von der abstromig gelegenen Wand im Modell implementiert wurde (zur Lage von Messpunkt 17 vgl. Abbildung 12).

Im Ergebnis dieser Überprüfung ist demnach festzuhalten, dass in allen fünf Varianten eine gute Übereinstimmung zwischen den räumlich-zeitlichen Mittelwerten der 2,0 x 2,0 m-Fläche (30 Messpunkte) und dem zeitlichen Mittelwert des Messpunktes 17 bestehen (Tabelle 18, Lage des Messpunktes 17 siehe Abbildung 12). Aufgrund der aufwendigen Modellbearbeitung und vergleichbarer Aussagekraft kann unserer Einschätzung nach künftig von der aufwendigen, räumlichen und zeitlichen Mittelwertbildung in einer 2,0 x 2,0 m Fläche abgesehen werden. Um das Ergebnis nicht zu unterschätzen (vgl. Variante E, Tabelle 18), könnte für künftige Bearbeitungen ein zeitlicher Mittelwert über 180 Tage an einem einzelnen, repräsentativen Messpunkt gebildet und der Bewertung zu Grunde gelegt werden. Unserer Auswertung folgend sollte dieser Messpunkt etwa 0,5 m unterhalb der Sohle und mit einem Abstand von 1,5 m zur abstromig gelegenen Wand in den Modellen implementiert werden (eine ausreichend genaue,

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Tabelle 18: Mittelwerte über 2x2 m und 180 d, verglichen mit dem Mittelwert über 180 Tage an Messpunkt 17.

Variante	Mittelwert (2x2 m, 180 d)	Mittelwert an Punkt 17 (180 d)	Differenz	
	[mg/l]	[mg/l]	[%]	abs.
A	3,77	3,79	1%	0,02
B	4,07	4,16	2%	0,09
C	3,04	2,98	-2%	-0,06
D	4,90	4,82	-2%	-0,08
E	1,95	1,82	-7%	-0,13

horizontale und vertikale Diskretisierung des Modellnetzes im An- und Abstrom dieser Modellmessstelle vorausgesetzt!).

Aus den hier berechneten und ausgewerteten fünf Modellvarianten wird ersichtlich, dass sich das gemäß DIBt (2011) bzw. DIBt (2016) zeitlich-räumlich gemittelte Modellergebnis am Beispiel des Aluminiums allein durch Wahl bzw. Vorgabe vereinzelter Modellparameter bzw. Modellrandbedingungen stark verändert: eine Abminderung des hydraulischen Gefälles um den Faktor 5 beispielsweise hatte um 8% höhere Mittelwerte am Ort der Beurteilung zur Folge. Bei einer Verringerung des k_f -Werts um den Faktor 10 ergaben sich 19% geringere Mittelwerte am Ort der Beurteilung. Einen starken Einfluss auf das Modellergebnis und die zeitlich-räumlichen Mittelwerte haben die Baugrubensymmetrie und die Herstellungsabfolge der Injektionssohle: es ergaben sich um 30% höhere Mittelwerte, wenn die Baugrube eine längliche Form mit einem Seitenverhältnis von 5 zu 1 aufweist, im Gegensatz zu einer Baugrube mit einem Seitenverhältnis von 5 zu 4. Den größten Einfluss der hier variierten Parameter und Modellvorgaben kann aus der Richtung der Herstellungsabfolge in Bezug auf die regionale Grundwasserströmungsrichtung abgeleitet werden: im vorliegenden Fall waren die Mittelwerte einer länglichen Baugrube mit senkrecht zur Grundwasserströmungsrichtung erfolgender Herstellung der Weichgelsohle im Modell 60% geringer, als die Mittelwerte der gleichen Baugrube mit in Strömungsrichtung hergestellter Injektionssohle.

Die Variante D stellt den hier beschriebenen Auswertungen bzw. Berechnungen gemäß DIBt (2011) bzw. DIBt (2016) zum zeitlich-räumlichen Mittelwert von Aluminium zufolge den *worst-case* sämtlicher Varianten dar. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass bei Zugrundelegung der Randbedingungen der Variante A, z.B. in Zulassungsverfahren für Injektionsmittel wie derzeit

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

gemäß DIBt (2011) bzw. DIBt (2016) angewendet, die Berechnung und anschließende Bewertung geringere Stoffkonzentrationen prognostizieren kann, als sich diese theoretisch bei ungünstigeren Randbedingungen ergäben. Hierbei sei erwähnt, dass das Ergebnis mitunter stark beeinflussende Transport- und Abbauprozesse bei den hier getätigten Modellierungen außer Acht gelassen wurden.

6.2.1.2 Konzentrationsmaxima und Verteilung

An den kurzzeitig auftretenden Konzentrationsmaxima und deren räumlicher Verteilung lässt sich durch direkten Vergleich der verschiedenen Varianten der Einfluss der Parametervariation auf die Verteilung des freigesetzten Aluminiums im Grundwasserleiter ableiten. Es sei darauf hingewiesen, dass diese Betrachtung bislang für Aluminium - anders als beim pH-Wert- noch keinen Einzug in die Bewertung der Freisetzung von Baustoffen nach DIBt (2011) bzw. DIBt (2016) fand.

In Tabelle 19 wurden die aus den unterhalb der Injektionssohle gelegenen, horizontalen Messebenen ermittelten Konzentrationsmaxima im Vergleich zur Basisvariante A dargestellt. Am Beispiel der Variante C wird deutlich, wie stark die mitunter vom Bearbeiter vorgegebenen Grundwasserleitereigenschaften und Randbedingungen Einfluss auf das Modellergebnis nehmen (in diesem Falle auf Höhe und räumliche Verteilung der Aluminiumkonzentration). So entspricht das direkt unter der Sohle ermittelte Konzentrationsmaximum in der Variante C (264,2 mg/l, Tabelle 19) einer Erhöhung um 135 % gegenüber des dortigen Maximums aus der Variante A (112,6 mg/l). Die in der Variante C vorherrschende Grundwasserströmung hat zur Folge, dass weniger Stoffe in weitere Entfernung zum Bauteil (und somit auch in den Abstrom) transportiert werden, was

Tabelle 19: Konzentrationsmaxima für Aluminium in den jeweiligen Modellvarianten und deren direkter Vergleich zur Basisvariante A, in Abhängigkeit der Lage unterhalb der Injektionssohle [m u.IS].

Variante	Konzentrationsmaxima					
	0,05 m u.IS		1,00 m u.IS		2,00 m u.IS	
	[mg/l]	verglichen mit Variante A	[mg/l]	verglichen mit Variante A	[mg/l]	verglichen mit Variante A
A	112,6	100%	49,3	100%	27,3	100%
B	203,5	181%	37,8	77%	14,9	55%
C	264,2	235%	31,9	65%	11,4	42%
D	153,4	136%	47,4	96%	31,5	115%
E	121,6	108% (79% ¹)	29,2	59% (61% ¹)	14,5	53% (46% ¹)

¹ = Da die Varianten D und E im geometrischen Aufbau identisch sind, empfiehlt sich ein direkter Vergleich dieser beiden Varianten (in Klammern angegeben).

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

nachfolgender Vergleich verdeutlicht: in der Variante C beträgt das 1 m unterhalb der Injektionssohle berechnete Konzentrationsmaximum (31,9 mg/l, Tabelle 19) nur noch 65% des dortigen Maximums der Variante A (49,3 mg/l). In 2 m Abstand zur Sohle sind es in Variante C (11,4 mg/l, Tabelle 19) mit 42% des Maximums der Variante A (27,3 mg/l) noch deutlich weniger. Die Vergleiche zwischen Variante A und den restlichen Varianten sind in Tabelle 19 gezeigt.

In 2,0 m Abstand zum Bauteil zeigt sich, dass in Bezug auf Maximalkonzentrationen erneut die Variante D das *worst-case*-Szenario darstellt, zeigen sich dort doch die höchsten Konzentrationsmaxima in den fünf Varianten (Tabelle 19). Unmittelbar unterhalb der Injektionssohle zeigt die Variante C das höchste Konzentrationsmaximum an (264,2 mg/l, Tabelle 19), was aufgrund der geringen Strömungs- bzw. Abstandsgeschwindigkeit in der Variante C resultiert (zur Abstandsgeschwindigkeit vgl. Tabelle 6). Dieser Unterschied in der Abstandsgeschwindigkeit unterhalb der Injektionssohle führt zu einer unterschiedlichen Verlagerung der aus der Injektionssohle freigesetzten Stoffe. Eine höhere Abstandsgeschwindigkeit, zum Beispiel bei Vorhandensein höherer hydraulischer Durchlässigkeit oder höherem hydraulischen Gradienten, führen zu einer stärkeren Verlagerung und somit zu größeren Schadstofffahnen im Abstrom der Baugrube. Die Konzentrationsmaxima im Inneren der entstehenden Fahne nehmen dann jedoch durch die Transport- und v.a. auch Verdünnungsprozesse ab. Bei geringeren Abstandsgeschwindigkeiten, zum Beispiel bei Vorhandensein geringerer hydraulischer Gradienten (Variante B) oder geringerer hydraulischer Durchlässigkeit (Variante C), werden die Fahnen im Abstrom kleiner, dafür steigt jedoch das nahe der Sohle beobachtete Konzentrationsmaximum. All diese Modellbeobachtungen vernachlässigen jedoch den Einfluss anderer Transport-, Reaktions-, Lösungs-, Fällungs- und Abbauprozesse.

Exemplarisch für unterschiedlich große Schadstofffahnen sind in der Abbildung 20 die Aluminiumkonzentrationen der beiden Varianten A und C vergleichend zu drei verschiedenen Zeitpunkten (zu den Modelltagen 40, 50 und 60) dargestellt. Zu diesen Zeitpunkten ist in den Modellen die Injektionssohle bereits vollständig hergestellt und die Restwasserhaltung aktiv. Die Grundwasserströmung ist in Abbildung 20 von Nord nach Süd ausgerichtet. Variante A hat mit $v_a = 2,16$ m/d die höchste Abstandsgeschwindigkeit, Variante C mit $v_a = 0,216$ m/d die geringste Abstandsgeschwindigkeit der hier betrachteten Modellvarianten. Zum Zeitpunkt des 40. Modelltages ist in Variante A bereits eine hochkonzentrierte Aluminiumfahne außerhalb der Baugrubenumschließung erkennbar (Abbildung 20, oben links). Im Vergleich dazu ist zum gleichen Zeitpunkt bei Modellvariante C nahezu keine Belastung außerhalb des Trogs erkennbar, allerdings sind die im Bereich der Baugrube auftretenden Konzentrationen entsprechend höher (Abbildung 20, oben rechts) als in der Variante A. Die Darstellungen zu den späteren Modelltagen 50 (Abbildung 20, Bildmitte) und 60 (Abbildung 20, unten) verdeutlichen, dass in Variante A von einer vom Bauteil abströmenden Grundwasserbeeinflussung ausgegangen werden muss, welche sich in ihrer Konzentration über Verdünnungs- und Transportprozesse und auch die in den Trog

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

gerichtete Strömung über die Zeit betrachtet verringert. Zu den gleichen Zeitpunkten ist in der Variante C eine stets höhere Aluminiumkonzentration zu beobachten, die räumliche Verteilung ist im Vergleich zur Variante A jedoch auf den Trog beschränkt, ein Abströmen möglicher Kontaminaten ist dort nicht zu besorgen.

Die ausgewerteten Modellvarianten bzw. deren Vergleich zeigen, dass sich Konzentration und deren Verteilung am Beispiel des Aluminiums allein durch Wahl bzw. Vorgabe einzelner Modellparameter bzw. Modellrandbedingungen mitunter stark verändern. Eine Abminderung des hydraulischen Gefälles um den Faktor 5 beispielsweise hatte ein um 81% höheres Konzentrationsmaximum nahe der Injektionssohle am Ort der Beurteilung nach DIBt (2011) bzw. DIBt (2016) zur Folge. In 2 m Entfernung zur Sohle betrug das Konzentrationsmaximum nur noch 55% dessen der Basisvariante A. Bei einer Verringerung des k_f -Werts um den Faktor 10 ergab sich ein um 135% höheres Konzentrationsmaximum nahe der Injektionssohle am Ort der Beurteilung nach DIBt (2011) bzw. DIBt (2016). In 2 m Entfernung zur Sohle betrug das Konzentrationsmaximum dann nur 42% des Maximums der Basisvariante A. Einen starken Einfluss auf Konzentrationen und deren Verteilung haben im Allgemeinen auch Baugrubensymmetrie und Herstellungsabfolge der Injektionssohle: im Gegensatz zu einer Baugrube mit einem Seitenverhältnis von 5 zu 4 ergaben sich unmittelbar unterhalb der Injektionssohle am Ort der Beurteilung um 36% höhere Konzentrationsmaxima, wenn die Baugrube eine längliche Form mit einem Seitenverhältnis von 5 zu 1 beschreibt. Auch eine zur regionalen Grundwasserströmungsrichtung gedrehte Herstellungsrichtung beeinflusst das Ergebnis: im vorliegenden Fall waren die Konzentrationsmaxima am jeweiligen Ort der Beurteilung unmittelbar unterhalb der Sohle einer länglichen Baugrube mit senkrecht zur Grundwasserströmungsrichtung erfolgender Herstellung 21% geringer als die Konzentrationsmaxima der gleichen Baugrube mit in Strömungsrichtung hergestellter Injektionssohle.

In das Bewertungsverfahren nach DIBt (2011) bzw. DIBt (2016) gehen bei den Modellvorgaben zum Aluminium bislang nur die räumlich-zeitlichen Mittelwerte am Ort der Beurteilung in die Bewertung ein. Die gemachten Auswertungen zu den Konzentrationsmaxima dieses Forschungsvorhabens zeigen jedoch deutlich, dass bei Annahme anderer hydraulischer Randbedingungen mitunter große Unterschiede in den Konzentrationen und deren räumlicher Verteilung entstehen können, welche durch eine alleinige Bewertung mittels räumlich und zeitlicher Mittelwertbildung nach DIBt (2011) bzw. DIBt (2016) nicht erfasst werden. Die unterschiedlichen Konzentrationsmaxima und die außerhalb der Baugrube unterschiedlich auftretende Veränderung der Grundwassereigenschaften (also die Schadstofffahne) werden durch den Ansatz nach DIBt (2011) bzw. DIBt (2016) bislang nicht vollständig abgebildet und somit einer Bewertung entzogen.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

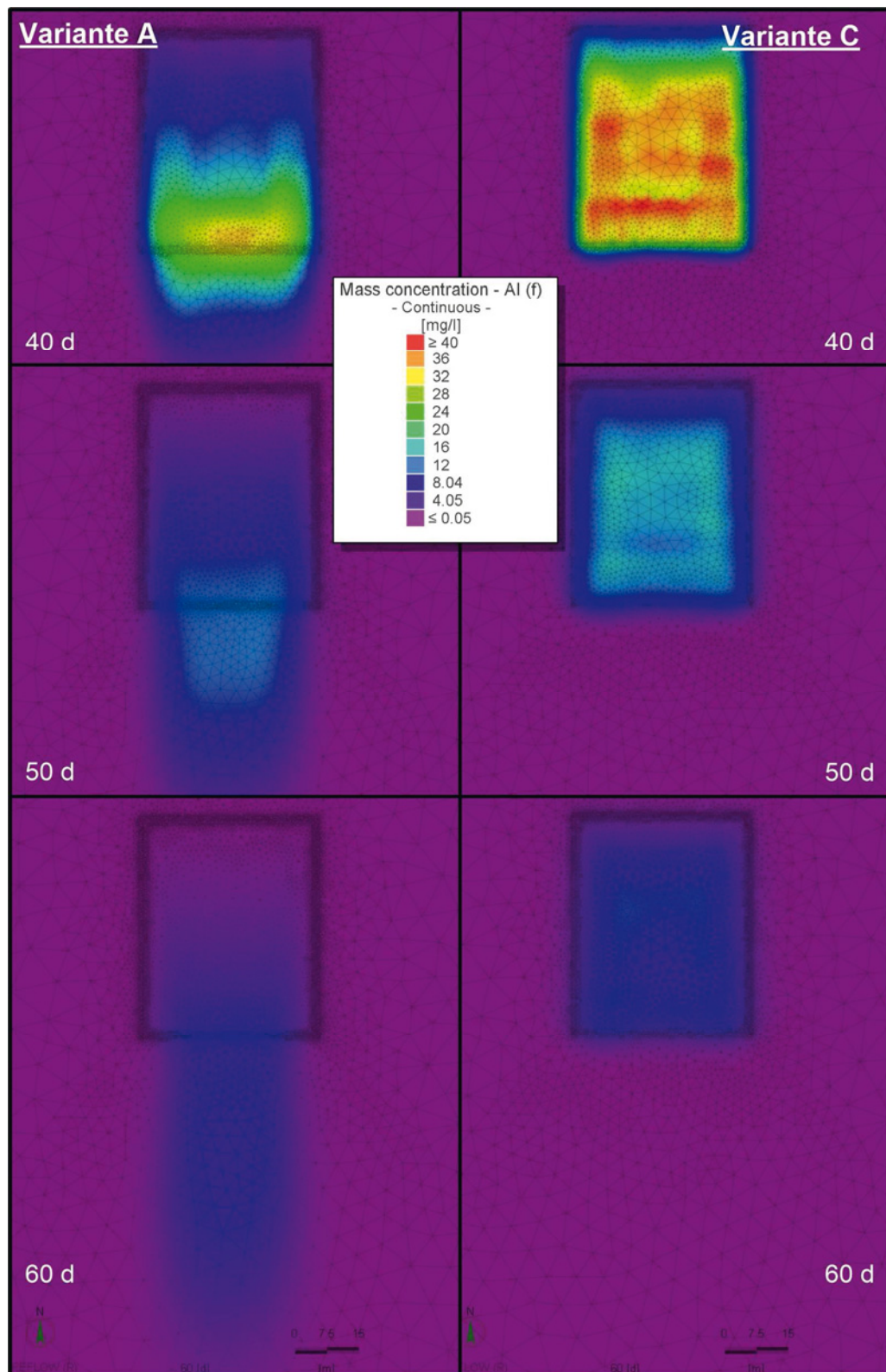


Abbildung 20: Vergleich der berechneten Aluminiumkonzentration [mg/l] im Grundriss, links für Variante A, rechts für Variante C, zu je drei Zeitpunkten (Modelltage 40, 50 und 60), Projektionsebene 1,0 m unterhalb der Injektionssohle.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

6.2.1.3 Frachtberechnungen

Abseits von zeitlich-räumlich gemittelten Konzentrationen am Ort der Beurteilung und der Betrachtung von Maximalkonzentrationen sollen an den Modellergebnissen zum Aluminium mit einer Frachtberechnung bzw. mit einem Frachtenvergleich weitere Auswertungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. Hierzu wurden im Nachgang zur Modellberechnung zwei Bewertungsebenen in den Modellvarianten implementiert. Es ist zu erwähnen, dass eine nachträglich implementierte Frachtberechnung in bereits berechneten Modellen im Programm Felfow zu anderen Ergebnissen kommen kann, als eine Frachtbetrachtung während der initialen Modellerstellung bzw. -berechnung, da das Modell während der Berechnung automatisch die von ihm zur stabilen Lösung der Gleichungen benötigten Zeitschritte wählt. Für die nachträgliche Frachtberechnung könnten die nach der erfolgten Strömungs- und Transportberechnung als fix in den Modellen vorliegenden Zeitschritte gegebenenfalls zu groß sein (v.a. am Ende des Modellzeitraumes), wodurch sich Unstimmigkeiten bei der nachträglichen Frachtberechnung ergeben können. Es sei darauf hingewiesen, dass die hier gemachten Frachtberechnungen demnach nur eine grobe Orientierung bzw. einen Ausblick auf künftige Berechnungen und Bewertungssysteme darstellen sollen.

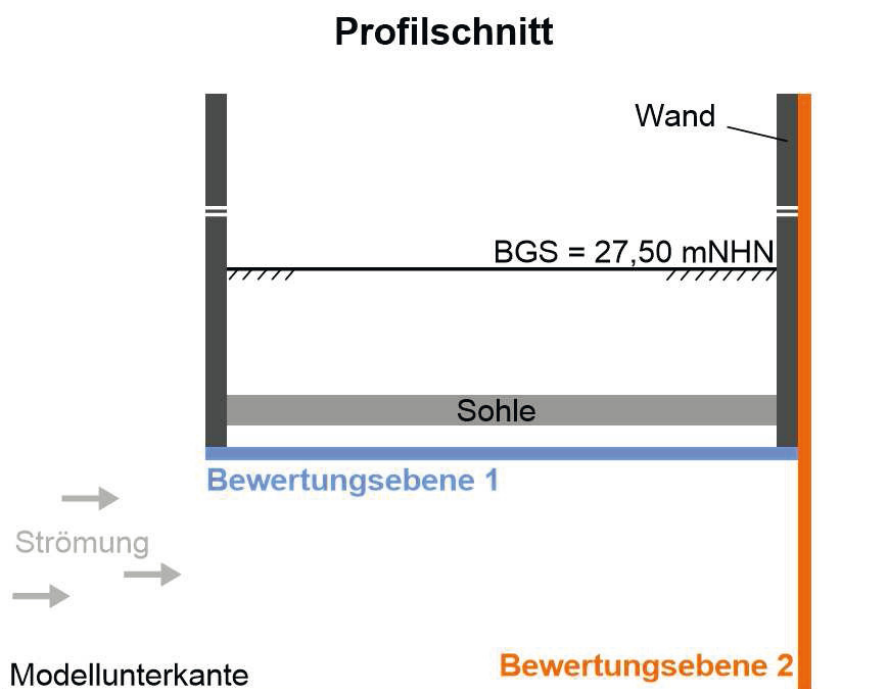


Abbildung 21: Grundriss und Profilschnitt der Modellbaugruben, mit Darstellung zu den zwei Bewertungsebenen für die Frachtberechnung

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Bewertungsebene 1 ist horizontal in den Modellen orientiert und einen Meter unterhalb der Injektionssohle gelegen, also auf Höhe der Unterkante der Baugrubenwände (Profilschnitt in Abbildung 21). In dieser Bewertungsebene ist somit der Anteil der durch die Sohle freigesetzten Stoffe erfasst, welche räumlich nach unten abgegeben und so möglicherweise in Richtung Abstrom verlagert werden (sofern die Strömung bzw. die einsetzende Restwasserhaltung im Trog dies zulässt). Da die Abstandsgeschwindigkeiten in den Modellvarianten variieren (und dadurch auch der in den Abstrom gelangende Anteil der aus der Sohle freigesetzten Stoffe), und die simulierte Restwasserhaltung eine in den Trog gerichtete Strömung erzeugt, wurde eine zweite Bewertungsebene unmittelbar im Abstrom der Baugrube vertikal durch den gesamten Modellbereich gelegt (Bewertungsebene 2, Abbildung 21).

Neben den absoluten, durch die Bewertungsebene strömenden Massen an Aluminium zeigt der Vergleich beider Ebenen an, welcher Anteil tatsächlich das Baugrundstück verlässt und in Richtung Abstrom gelangt. Für die Frachtbetrachtung wurden die durch die Bewertungsebenen strömenden Frachten jeweils um die Hintergrundkonzentrationen bereinigt. In Abbildung 22 sind die bereinigten Aluminiumfrachten in der Bewertungsebene 1 und 2 dargestellt, in den fünf Varianten.

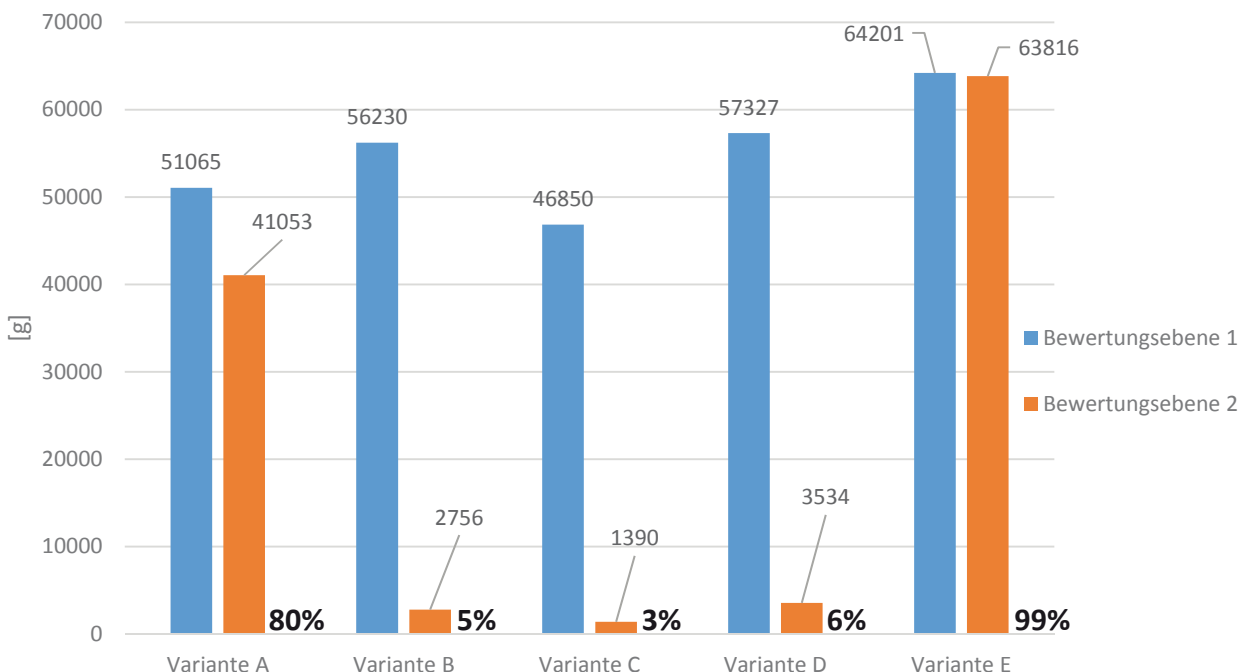


Abbildung 22: Aluminiumfracht in [g] in den beiden Bewertungsebenen für die fünf Varianten (%-Angaben weisen den in den Abstrom gelangenden Anteil der unterhalb der Sohle freiwerdenden Frachten aus).

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Es zeigt sich, dass sich die unterhalb der Injektionssohle in der Bewertungsebene 1 berechneten Frachten in den verschiedenen Varianten bereits unterschiedlich sind. So wurde das Frachtmaximum bei der Variante E berechnet (64.201 g), das Minimum wurde bei Variante C festgestellt (46.850 g). Mit Ausnahme dieser beiden Extrema sind die restlichen Frachten in relativ vergleichbarer Größenordnung (Abbildung 22). Erwähnt werden soll hierbei jedoch die Tatsache, dass bei Strömungsrichtungswechsel Teile der Fracht mitunter zweimal die Bewertungsebene passieren und demnach Frachten überschätzt werden können. Dies ist vor allem bei Bewertungsebene 1 denkbar, da die einsetzende Restwasserhaltung diesen Strömungsrichtungswechsel hervorruft. Mit zunehmender Entfernung der Bewertungsebene zum Trog (und somit mit abnehmendem Einfluss der Wasserhaltung) liegen die Berechnungen jedoch wieder auf der sicheren Seite.

In der Bewertungsebene 2 zeigen sich zwischen den einzelnen Modellvarianten gemäß Abbildung 22 deutlichere Unterschiede als bei der Bewertungsebene 1: auch hier stellt die Variante E das *worst-case*-Szenario dar, da bei dieser Variante die meiste Fracht aus der Injektionssohle in den Abstrom gelangt (63.816 g). Bei der Variante A wandern insgesamt noch 41.053 g durch die Bewertungsebene 2 in den Abstrom, während bei den Varianten B, C und D nur ein vergleichsweise geringer Frachtanteil dem Abstrom zugerechnet werden kann (Variante B: 2.756 g, Variante C: 1.390 g, Variante D: 3.534 g, Abbildung 22). Um dieses Ergebnis weiter zu verdeutlichen, wurde die Abbildung 22 noch um prozentuale Angaben ergänzt: bei der Variante A beispielsweise wandern demnach ca. 80 % der Fracht, die in Bewertungsebene 1 unterhalb der Sohle erfasst wurde, weiter in Richtung Abstrom und passieren dort die Bewertungsebene 2. Demnach strömen in Variante A ca. 20% der unterhalb der Sohle in Bewertungsebene 1 erfassten Fracht wieder zurück in den Trog und der Wasserhaltung zu. Gemäß Abbildung 22 gelangen darüber hinaus bei der Variante E bis zu 99 % der unterhalb der Injektionssohle freigesetzten Stoffe in den Abstrom. Die Varianten B, C und D verdeutlichen dagegen ein anderes Bild, hier wird der größte Anteil an Aluminium scheinbar zurück in den Trog und somit zur Restwasserhaltung gezogen.

Verallgemeinert lässt sich sagen, dass eine negative Beeinflussung des im Abstrom gelegenen Aquifers durch die Freisetzungsprodukte der Injektionssohle bei den Varianten B, C und D weitaus weniger zu besorgen ist, als bei den Varianten A und E. Durch geringere Abstandsgeschwindigkeiten im Grundwasserleiter (Varianten B, C) bzw. eine Sohlherstellung in Richtung der Grundwasserfließrichtung (Variante D) nimmt der positive Einfluss der nach der Herstellung erfolgenden Restwasserhaltung auf das hier dargestellte Ergebnis zu. Die Restwasserhaltung schafft es in den Varianten B, C und D einen deutlich größeren Anteil möglicher Kontaminanten im Bereich des Troges zu halten bzw. zu fassen, als in den Varianten A und E.

In einem weiteren Berechnungsschritt wurden die ermittelten Frachten durch die die jeweilige Bewertungsebenen durchströmende Wassermenge geteilt, um dadurch die mittlere Konzentration

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

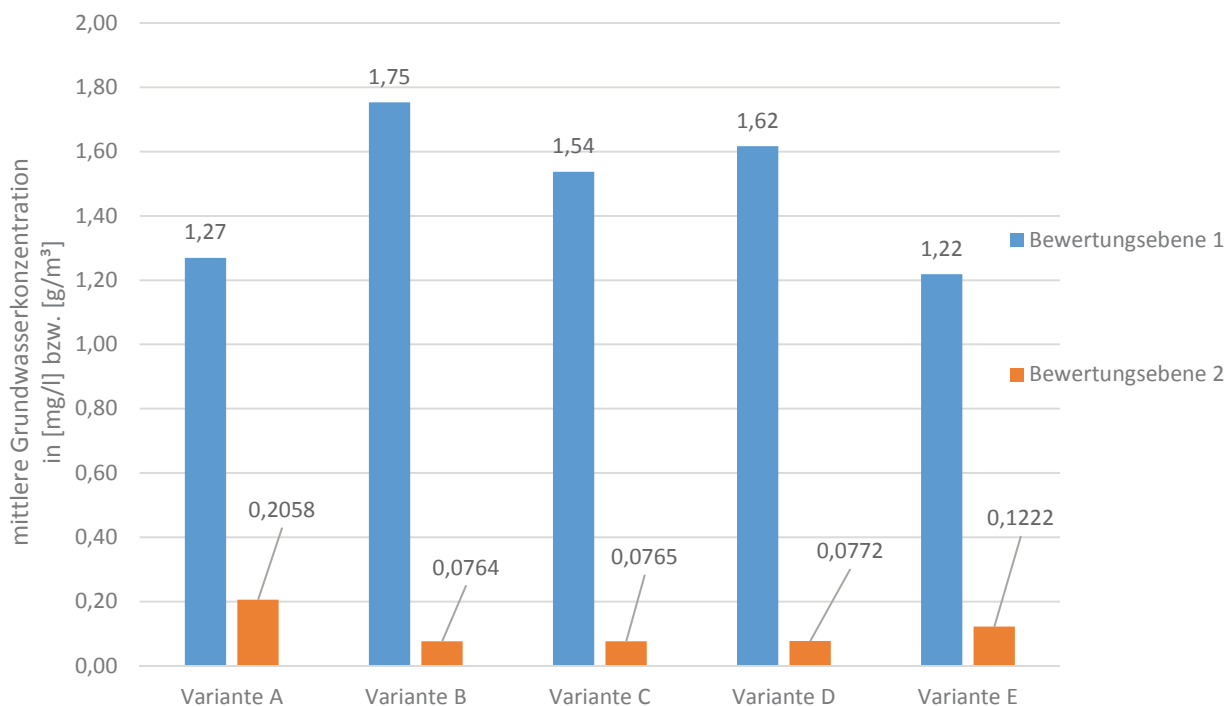


Abbildung 23: Zunahme der Aluminiumkonzentration in [mg/l] bzw. [g/m³] in den beiden Bewertungsebenen für die fünf Varianten (Frachtnormierung).

in der Bewertungsebene berechnen und vergleichen zu können. Die Hintergrundkonzentration wurde hierbei bereits herausgerechnet. Vereinfacht ausgedrückt stellt diese Berechnung somit die durch die Injektionssohle hervorgerufene, mittlere Erhöhung der Konzentration (bzw. die dadurch hervorgerufene Beeinflussung pro Grundwasservolumeneinheit) im Bereich der Bewertungsebene dar. Da die Abstandsgeschwindigkeiten der verschiedenen Varianten variieren, entspricht dieser Berechnungsschritt einer Frachtnormierung.

Die Abbildung 23 zeigt das Ergebnis dieser Berechnung. Demnach ist festzuhalten, dass unterhalb der Injektionssohle im Bereich der Bewertungsebene 1 deutlich höhere Konzentrationszunahmen zu erwarten sind, als hinter der abstromig gelegenen Baugrubenwand im Bereich der Bewertungsebene 2 (da die Wassermenge, die die Bewertungsebene 2 passiert, allein aufgrund der Raumorientierung und Größe dieser Bewertungsebene um ein Vielfaches höher ist als bei der Bewertungsebene 1, sinken dadurch die berechneten Konzentrationen in der Bewertungsebene 2).

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Im Bereich der Bewertungsebene 1 wurde das Maximum in der Variante B berechnet, mit einer durchschnittlichen Erhöhung von 1,75 mg Aluminium pro Liter Grundwasser (Abbildung 23). In der Variante E hingegen wurden nur 1,22 mg/l berechnet. Allen fünf Varianten wurde unmittelbar unterhalb der Sohle im Bereich der Bewertungsebene 1 eine vergleichbare, durch die Injektionssohle hervorgerufene Zunahme in der Aluminiumkonzentration prognostiziert. Wie bereits beschrieben ist jedoch auf Grund der an die Herstellung der Sohle anschließenden Wasserhaltung davon auszugehen, dass ein Anteil dieser in Bewertungsebene 1 festgestellten Beeinflussung zurück in Richtung Trog strömt und dort kontrolliert gefasst werden kann.

Wesentlich interessanter ist daher die Aussage der Frachtnormierung im Bereich der Bewertungsebene 2, da dort von einer den Bereich der Baugrube verlassenden Beeinflussung des Grundwasserleiters ausgegangen werden muss. Hier zeigt sich, dass das Maximum der berechneten Varianten mit einer Zunahme von ca. 0,2 mg Aluminium pro Liter Grundwasser in der Variante A berechnet wurde. Variante A stellt im Bereich der Bewertungsebene 2 somit die *worst-case*-Variante dar. Variante E folgt mit einer durchschnittlichen Zunahme von ca. 0,1 mg/l. Die anderen drei Varianten B, C und D haben im Bereich der Bewertungsebene 2 vergleichbare Erhöhungen von ca. 0,07 mg Aluminium pro Liter Grundwasser berechnet.

Im Ergebnis ist festzuhalten, dass die Variante A unter allen Varianten mit einer Erhöhung von ca. 0,2 mg Aluminium pro Liter Grundwasser den meisten Einfluss auf das der Baugrube abströmende Grundwasser hat und somit in Bezug auf abströmende Verunreinigungen die *worst-case*-Variante darstellt.

Zusammengenommen zeigen die Berechnungen zu den Frachten und deren Vergleiche, dass neben räumlich-zeitlich gemittelten Konzentrationsberechnungen am Ort der Beurteilung oder Berechnungen von Konzentrationsmaxima auch die Auswertung an (mitunter mehreren) Frachtebenen zur Beurteilung eines Bauprodukts herangezogen werden können, da diese auch den möglicherweise beeinflussten Abstrom einer Baumaßnahme besser erfassen. Für die weitere Bearbeitungen wäre es nötig, sowohl das Modellgebiet (u.a. Größe, Ausdehnung, Mächtigkeit), als auch die exakte Lage und Orientierung der Bewertungsebenen (u.a. Abstand zur Baugrube, horizontal/vertikal) im Bezug zur Baugrube vorzugeben, damit die Ergebnisse vergleichbar werden. Gegebenenfalls kann diese Vorgabe Einzug in den Prüfplan des DIBt (2016) halten. Anhand von *in-situ*-Feldversuchen kann darüber hinaus festgestellt werden, ob dieses Bewertungskonzept noch um weitere Angaben, zum Beispiel um weitere Modellrandbedingungen (wie Reaktion und Abbau, etc.) zu ergänzen wäre.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

6.2.2 pH-Wert

Nachfolgend werden ausgewählte Modellergebnisse für die Freisetzung und den Transport von OH⁻-Ionen (umgerechnet in den pH-Wert) in den verschiedenen Modellvarianten dargestellt und miteinander verglichen. Die pH-Wertverläufe sämtlicher Messstellen der fünf Varianten und die berechneten Mittelwerte sind in Anhang C in den Abbildungen C31 - C60 dargestellt. Die Bezeichnung der in Anhang C dargestellten Kurven ergibt sich über die jeweilige Variante (A bis E) und die jeweilige Messstelle (1 bis 30). So stellt beispielsweise der Kurvenverlauf „A_1“ aus Anhang C die zeitliche Entwicklung der Konzentration der Messstelle 1 aus Variante A dar. Die Lage der Messstellen ist in Abbildung 12 dargestellt.

Die pH-Werte steigen in allen Varianten schnell auf ihr Maximum an (zeitlich unmittelbar nach erfolgter Herstellung im Bereich der Modellmessstellen) und fallen im Anschluss unterschiedlich schnell, jedoch deutlich langsamer als die Aluminiumkonzentrationen zurück in Richtung ihres Ausgangsniveau (Anhang C). Bei den Varianten B und C ist am Ende des Modellzeitraumes (365 Tage) noch eine pH-Wert-Erhöhung am Ort der Beurteilung zu beobachten (Variante B: pH = 7,6, Variante C: pH = 8,0, jeweils am Ende des Modellzeitraumes, siehe Anhang C).

Die absoluten pH-Wert-Maxima der verschiedenen Modellvarianten sind in Tabelle 20 dargestellt (in Bezug auf den Abstand zur Injektionssohle). Demnach wurde das niedrigste pH-Wert-Maximum in Variante A (pH = 11,0), das höchste in Variante C (pH = 11,4) festgestellt. Die pH-Maxima der Varianten folgen in ihrer Reihenfolge den absoluten Konzentrationsmaxima des Aluminiums, da in den Transportmodellierungen keine stoffspezifischen Abbau-, Puffer- oder Immobilisierungsprozesse implementiert wurden und sich daher die Transportmechanismen beider Ionen in den Modellen nicht unterscheiden. Durch Logarithmieren der OH⁻-Konzentration rücken die absoluten pH-Werte jedoch näher zusammen als die Maxima der Aluminiumkonzentrationen, weshalb beim pH-Wert auf einen prozentualen Vergleich verzichtet werden soll.

Tabelle 20: pH-Wert-Maxima in den fünf Modellvarianten, in Abhängigkeit der Lage unterhalb der Injektionssohle [m u.IS].

Variante	pH-Wert-Maximum			Beschreibung
	0,05 m u.IS	1,00 m u.IS	2,00 m u.IS	
A	11,0	10,6	10,3	Basisvariante
B	11,3	10,6	10,2	geringeres Gefälle
C	11,4	10,5	10,0	geringerer k_f -Wert
D	11,2	10,6	10,5	langgestreckte Baugrube
E	11,1	10,4	10,1	Strömungsrichtung quer

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Die Maxima unmittelbar unterhalb der Sohle liegen in den Varianten relativ nahe beieinander (Tabelle 20, Anhang C). In der Basisvariante A wurde das kleinste pH-Wert-Maximum mit $\text{pH} = 11,0$ berechnet. Die Variante C ergab das höchste pH-Wert-Maximum mit $\text{pH} = 11,4$. In 2 m Abstand zur Injektionssohle wurden in keiner Variante höhere pH-Werte als $\text{pH} = 10,5$ berechnet (Tabelle 20, Anhang C).

In Tabelle 21 ist der Zeitraum erhöhter pH-Werte in Abhängigkeit vom Abstand zur Injektionssohle dargestellt. Hierbei wird zwischen pH-Werten größer $\text{pH} = 10,5$ und $\text{pH} = 7,5$ (Hintergrund pH-Wert) differenziert.

Eine Erhöhung der pH-Werte über $\text{pH} = 10,5$ ist in allen Modellvarianten nur kurzfristig zu beobachten. Die Dauer der Belastung variiert zwischen 2,5 Tagen (Variante E) und 11,5 Tagen (Variante D). In der Basisvariante A wurde unmittelbar unter der Injektionssohle 4,9 Tage lang ein über $\text{pH} = 10,5$ liegender pH-Wert berechnet. In 2 m Abstand zur Injektionssohle zeigte nur die Variante D eine sehr kurzfristige Erhöhung über $\text{pH} = 10,5$ (1 Tag, Tabelle 21), die anderen Varianten berechnen dort zu keinem Modellzeitpunkt höhere Werte als $\text{pH} = 10,5$.

Eine pH-Wert-Erhöhung oberhalb der Hintergrundkonzentration ($\text{pH} = 7,5$) wurde erwartungsgemäß in allen Varianten über einen längeren Zeitraum festgestellt. In der Basisvariante A wurden unmittelbar unterhalb der Sohle über einen Zeitraum von 182 Tagen erhöhte pH-Werte berechnet. In 2 m Abstand zur Sohle betrug der Zeitraum noch 162 Tage. Bei den beiden Varianten B und C lagen die pH-Werte selbst 2 m unterhalb der Injektionssohle zum Ende des Modellzeitraums (365 Tage, Dauer der Erhöhung daher >330 Tage, Anhang C und Tabelle 21) noch oberhalb der Hintergrundkonzentration.

Tabelle 21: Dauer der pH-Wert-Beeinflussung in den Modellvarianten in Tagen, in Abhängigkeit der Lage unterhalb der Injektionssohle [m u.IS].

Variante	Anzahl Tage $\text{pH} \geq 10,5$			Anzahl Tage $\text{pH} \geq 7,5$			Beschreibung
	0,05 m u.IS	1,00 m u.IS	2,00 m u.IS	0,05 m u.IS	1,00 m u.IS	2,00 m u.IS	
A	4,9	2,4	0,0	182	162	162	Basisvariante
B	5,9	4,2	0,0	> 330	> 330	> 330	geringeres Gefälle
C	5,9	1,0	0,0	> 330	> 330	> 330	geringerer k_f -Wert
D	11,5	9,5	1,0	191	190	190	langgestreckte Baugrube
E	2,5	0,0	0,0	138	118	118	Strömungsrichtung quer

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Auch wenn der Einfluss der Parametervariationen am Beispiel des pH-Werts weniger deutlich ist als beim Aluminium (auch aufgrund des Logarithmierens der OH-Konzentrationen), konnten folgende Trends aus den Berechnungen abgeleitet werden: sowohl ein um den Faktor 5 flacheres hydraulisches Gefälle, wie in der Variante B eingerichtet, als auch eine Verminderung der hydraulischen Durchlässigkeit um den Faktor 10 (Variante C) führten unmittelbar unterhalb der Injektionssohle zu nur geringfügig höheren pH-Wert-Maxima (Tabelle 20). Auch die Erhöhung über $\text{pH} = 10,5$ war bei flacherem hydraulischem Gefälle und geringerer hydraulischer Durchlässigkeit in einem Zeitraum von jeweils 5,9 Tagen nur unwesentlich länger zu beobachten, als bei der Basisvariante (4,9 Tage). Ein über der Hintergrundkonzentration liegender pH-Wert wurde bei beiden Varianten hingegen über einen deutlich längeren Zeitraum von den Modellen ausgegeben, als bei der Basisvariante berechnet (mehr als 330 Tage in Variante B und C, dagegen 182 Tage in Variante A, Tabelle 21).

Bei länglicher Baugrubenform (Variante D) und einer darin senkrecht zur Strömungsrichtung erfolgenden Herstellung der Injektionssohle (Variante E) ergaben sich nur zu geringfügig höhere pH-Wert-Maxima als bei der Basisvariante ($\text{pH} = 11,2$ in Variante D sowie $11,1$ in Variante E). Den größten Einfluss hat die längliche Baugrube der Variante D auf die Dauer der Beeinflussung. So war der pH-Wert hier beispielsweise unmittelbar unterhalb der Injektionssohle über einen Zeitraum von 11,5 Tagen höher als $\text{pH} = 10,5$ und auch ein über der Hintergrundkonzentration liegender pH-Wert wurde länger als in der Basisvariante vom Modell berechnet. Wenn senkrecht zur Fließrichtung hergestellt wird (Variante E), verkürzt sich dagegen die zeitliche Belastung sowohl eines über $\text{pH} = 10,5$ liegendem pH-Werts auf 2,5 Tage, als auch einer oberhalb der Hintergrundkonzentration liegenden Werts (138 Tage).

In das Bewertungsverfahren nach DIBt (2011) bzw. DIBt (2016) gehen bei den Modellvorgaben zum pH-Wert bislang nur die absoluten pH-Werte am Ort der Beurteilung in die Bewertung ein. Die gemachten Auswertungen zu den Konzentrationsmaxima dieses Forschungsvorhabens zeigen jedoch deutlich, dass bei Annahme anderer hydraulischer Randbedingungen mitunter große Unterschiede in den Konzentrationen und deren räumlicher Verteilung entstehen können. Diese werden durch eine alleinige Bewertung mittels eines womöglich nur kurzzeitig und lokal auftretenden Konzentrations- oder pH-Wertmaximums nach DIBt (2011) bzw. DIBt (2016) nicht erfasst. Die unterschiedlichen Zeiträume, in denen die in und außerhalb der Baugrube besorgten Veränderung der Grundwassereigenschaften auftreten, werden durch den Ansatz nach DIBt (2011) bzw. DIBt (2016) bislang ebenfalls nicht abgebildet und somit einer Bewertung entzogen.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen**7 INTERPRETATION UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE**

Die Ergebnisse der Weichgelinjektion in den als Standardprüfsand im inversen Säulenversuch verwendeten Frechener Feinsand (FR36) bestätigen vorhergehende Untersuchungen und sind überwiegend unauffällig. Da FR36 ein Quarzsand mit geringen Verunreinigungen ist, sind die eluierten Stoffe größtenteils dem injizierten Bauprodukt zuzuschreiben. Da es sich bei dem untersuchten Silikatgel um ein stark basisches Bauprodukt handelt, ist z.B. eine deutliche Zunahme der pH-Werte in den Eluaten messbar. Neben einem ansteigenden Leitfähigkeitswert sind vor allem Aluminium und Natrium in den Eluaten über dem Konzentrationsniveau des Elutionsmittels nachweisbar.

Eine besondere Rolle spielt Calcium aus dem Trinkwasser. Bei der Reaktion von Wasserglas mit Natriumaluminat wird u.a. Natronlauge (Na^+ und OH^- in Lösung) freigesetzt. Betrachtet man allein die Konzentration an freigesetzten Natriumionen ist die tatsächlich freigesetzte Menge an OH^- wesentlich größer und würde einem weit höherem pH-Wert von $\text{pH} = 11$ entsprechen. Durch die enthaltenen Calcium-Ionen im Elutionsmittel Trinkwasser werden vermutlich die freigesetzten OH^- -Ionen abgefangen und reagieren mit Ca^{2+} zu schwerlöslichen Calciumhydroxid. Die Reduzierung der Ca^{2+} Konzentration in den Eluaten und der geringe pH-Wert in den Eluaten kann ein Hinweis für die Bildung von Calciumhydroxid sein. Darüber hinaus bilden andere gelösten Elemente wie Aluminium und Kupfer mit OH^- -Ionen Hydroxide, die die Konzentration an OH^- -Ionen in der Lösung/Eluat verringern können.

Durch die Zumischung von Kohlereibsel zu FR36, erhöht sich neben dem organischen Kohlenstoffgehalt auch der Gehalt an Al, Ca, Mg und Fe im Säulensand. Die Injektion vom untersuchten Weichgel in die präparierten FR36-Säulen zeigte sehr deutlich den Einfluss von „Verunreinigungen“. Die Zunahme der organischen Substanz in der oberen Säulenschicht bewirkte ebenfalls einen Anstieg von freigesetzten organischen Kohlenstoff (TOC) und eine Abnahme der pH-Werte und Leitfähigkeiten, besonders ausgeprägt in der höchsten Stufe (FR36-5%K). Die Kohlereibsel, die zu 55% aus organischen Kohlenstoff bestehen und einen pH-Wert von 4,5 aufweisen, besitzen eine hohe Filter- und Pufferkapazität. Im Blindwert ist dies nachweisbar, da hier merklich die Leitfähigkeit und der pH-Wert reduziert vorliegen (im Vergleich zum Elutionsmittel). Je mehr organischer Kohlenstoff im Säulensand vorliegt, umso geringer fällt der Anstieg von pH und Leitfähigkeit im Vergleich zum Niveau des Elutionsmittels Trinkwasser aus, bei gleichzeitiger Zunahme der TOC bzw. DOC Konzentration. Die Injektion führt zu einer chemischen Veränderung im Kontaktbereich des Bauproduktes und in den umgebenden Bereichen im Boden, was unter anderem eine erhöhte Löslichkeit und Freisetzung von Huminstoffen bewirkt. Die gelösten Huminstoffe sorgen auch für die typische Dunkelfärbung der Eluate. Ebenfalls wurde die erhöhte Mobilisierung von Aluminium beobachtet, die aber nicht so hoch ausfällt, wie der Anstieg des Aluminiumgehaltes im Säulensand durch Anstieg des Kohlereibselgehaltes vermuten

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

lässt. Hier wird der positive Einfluss der Huminsäuren zum Tragen kommen. Huminsäuren sind in der Lage unlösliche Verbindungen mit Aluminium einzugehen (unlösliche Humate).

Der eingesetzte Baugrundsand (BG) besitzt im Vergleich zum Standardprüfsand FR36 einen wesentlich höheren Gehalt an Corg, Al, Ca und K. Durch die Injektion des Weichgels kommt es in der Folge einerseits zu erhöhten Austrägen dieser Stoffe. Auf der anderen Seite führt die höhere Sorptionskapazität des BG zu einem etwas geringeren Anstieg des pH-Wertes und der Leitfähigkeit. Diese Wirkung wird durch die Zugabe von Kohlereibseln verstärkt, d. h. Leitfähigkeit und pH-Wert werden durch die Injektion von Weichgel nicht so stark beeinflusst. Auch die Freisetzung an Aluminium aus dem BG wird durch Kohlereibsel verringert, was auf die Bildung von schwerlöslichen Humaten zurückgeführt werden kann.

Bei der Reaktion von Wasserglas mit Natriumaluminat wird Natronlauge (Na^+ und OH^- in Lösung) freigesetzt und mobilisiert. Im Eluat sowie ebenfalls im durch die Weichgelinjektion beeinflussten Grundwasser ist eine deutliche Zunahme der pH-Werte messbar. Die pH-Wert-Zunahme ist dabei Abhängig vom Pufferpotential des Eluates bzw. des Grundwassers. In den Elutionsuntersuchungen spielt Calcium aus dem Elutionsmittel Trinkwasser eine entscheidende Rolle. Betrachtet man allein die Konzentration an freigesetzten Natriumionen ist die tatsächlich freigesetzte Menge an OH^- wesentlich größer und würde einem weit höherem pH-Wert entsprechen, als in den Eluatfraktionen gemessen. Durch die enthaltenen Calcium-Ionen im Elutionsmittel Trinkwasser werden freigesetzte OH^- -Ionen abgefangen und zu schwerlöslichen Calciumhydroxid umgewandelt. Die Höhe des pH-Wertes ist jedoch für weitere chemische Prozesse entscheidend. Um Ergebnisse aus der Modellierung auf das gesamte Bundesgebiet zu übertragen, wäre es notwendig, die durchgeführten Elutionsversuche mit unterschiedlichen Elutionsmitteln zu wiederholen. Dabei könnte das Trinkwasser mit deionisiertem Wasser gemischt werden, um unterschiedlich konzentrierte Elutionsmittel zu erhalten. Die aus den Untersuchungen abgeleiteten Freisetzungsraten ergeben in einem weiteren Schritt eine Funktion für die Modellierung, die es ermöglicht bei Kenntnis der Grundwassergegebenheiten vor Ort (Ca^{2+} -Konzentration, Karbonathärte etc.) die zu erwartende OH^- -Konzentration abzuleiten.

Hinsichtlich einer Gesamtbetrachtung (Life Cycle Assessment) temporärer Abdichtungssohlen, wie es bei einer Weichgelinjektion der Fall ist, ist es erforderlich, eine Aussage zum Gefährdungspotential von Weichgelen nach Erfüllen ihrer Abdichtungsfunktion zu erhalten. Dazu könnten Elutionsuntersuchungen an gealterten Weichgelkörpern, Langzeitelutionsversuche über 360 Tage und Feststoffuntersuchungen wertvolle Informationen über den Verbleib von temporären Abdichtungssohlen liefern.

Zusammengefasst bestätigen die Ergebnisse der Modellberechnungen erneut, dass Parameteränderungen bzw. Änderungen an den hydraulischen Randbedingungen eines Modells mitunter erheblichen Einfluss auf das Ergebnis haben. Die Ergebnisse zeigen, dass allen voran die

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Herstellungsabfolge der Injektionssohle in Bezug zur regionalen Grundwasserströmungsrichtung die Modellergebnisse am Ort der Beurteilung nach DIBt (2011 sowie 2016) deutlich verändern. Auch die allgemeine Form der Baugrube und nicht zuletzt die Strömung im Baugrund beeinflussen erwartungsgemäß das Ergebnis der Modellierungen. Die zeitlich-räumliche Mittelwertbildung beim Aluminium mindert diesen Einfluss zwar geringfügig ab, doch wurden auch hier Unterschiede zwischen den Varianten beobachtet. Die berechneten Mittelwerte in den Varianten variieren den Ergebnissen zufolge jedoch weniger stark als beispielsweise die absoluten Konzentrationsmaxima am Ort der Beurteilung.

Darüber hinaus konnte bezüglich der bislang gem. DIBt (2016) geforderten räumlichen **Mittelwertbildung** (2,0 x 2,0 m-Fläche) gezeigt werden, dass dieser aufwendige Bearbeitungsschritt an mehreren Modellmessstellen künftig entfallen kann. Das Ergebnis einer zeitlichen Mittelung an einer repräsentativen Modellmessstelle zeigte bei deutlich weniger Aufwand ein vergleichbares Ergebnis an. Es wurde ersichtlich, dass in allen fünf Modellvarianten eine gute Übereinstimmung zwischen den räumlich-zeitlichen Mittelwerten der 2,0 x 2,0 m-Fläche (30 Messpunkte) und dem zeitlichen Mittelwert des Messpunktes 17 bestehen. Unserer Auswertung folgend, sollte dieser repräsentative Messpunkt künftig etwa 0,5 m unterhalb der Injektionssohle und mit einem Abstand von 1,5 m zur abstromig gelegenen Wand in den Modellen implementiert werden (eine ausreichend genaue horizontale und vertikale Diskretisierung des Modellnetzes im An- und Abstrom dieser Modellmessstelle vorausgesetzt). Im Anschluss daran kann die berechnete Konzentration dieser Messstelle wie beschrieben über die Zeit integriert und somit über 180 Tage gemittelt werden.

Die nachträglich in den Modellen implementierte **Frachtberechnung** zeigte darüber hinaus ein weiteres Bewertungssystem auf, welches künftig Einzug in den *Prüfplan für die Untersuchung der Auswirkungen von Silikatgelen als Bodeninjektionsmittel auf Boden und Grundwasser* (DIBt, 2011 sowie 2016) halten könnte. Die gezeigten Berechnungen zu den Frachten verdeutlichten unter anderem, dass eine negative Beeinflussung des im Abstrom gelegenen Aquifers durch die Freisetzungserzeugnisse der Injektionssohle bei den Varianten B, C und D weitaus weniger zu besorgen ist, als bei den Varianten A und E. Die Restwasserhaltung schafft es in den Varianten B, C und D einen deutlich größeren Anteil möglicher Kontaminanten im Bereich des Troges zu halten bzw. zu fassen, als in den Varianten A und E. Die Frachtnormierung zeigte darüber hinaus, dass die Variante A unter allen Varianten mit einer Erhöhung von ca. 0,2 mg Aluminium pro Liter Grundwasser den meisten Einfluss auf das der Baugrube abströmende Grundwasser hat und somit in Bezug auf abströmende Verunreinigungen die *worst-case*-Variante der hier betrachteten Varianten darstellt.

Zusammengenommen zeigen die Berechnungen zu den Frachten und deren Vergleiche, dass neben räumlich-zeitlich gemittelten Konzentrationsberechnungen am Ort der Beurteilung oder Berechnungen von Konzentrationsmaxima auch die Auswertung an (mitunter mehreren)

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Frachtebenen zur Beurteilung eines Bauprodukts herangezogen werden sollten, da diese auch den möglicherweise beeinflussten Abstrom einer Baumaßnahme besser erfassen. Für die weitere Bearbeitungen bzw. die Aufnahme in den *Prüfplan für die Untersuchung der Auswirkungen von Silikatgelen als Bodeninjektionsmittel auf Boden und Grundwasser* (DIBt, 2011 sowie 2016) wäre es nötig, sowohl das Modellgebiet an sich (u.a. Größe, Ausdehnung, Mächtigkeit), als auch die exakte Lage und Orientierung dieser Bewertungsebenen (u.a. Abstand zur Baugrube, horizontal/vertikal) im Bezug zur Baugrube vorzugeben, damit die Ergebnisse vergleichbar werden. Anhand von in-situ-Feldversuchen kann darüber hinaus festgestellt werden, ob dieses Bewertungskonzept noch um weitere Angaben, zum Beispiel um weitere Modellrandbedingungen (wie Reaktion und Abbau, etc.) zu ergänzen wäre.

Beim pH-Wert, der in den Modellen aus den transportierten OH⁻-Ionen berechnet wird, verringert das Logarithmieren der OH⁻-Konzentration zwar den eindeutigen Einfluss der hier durch Variation betrachteten Parameteränderungen, da die Ergebnisse durch Logarithmieren näher zusammenrücken. Doch auch hier konnte anhand der Modellergebnisse gezeigt werden, dass vor allem die Konzentrationen, die räumliche Verteilung und das Abstromverhalten der in den Grundwasserleiter eingetragenen Stoffe stark von den angenommenen Randbedingungen und der Modellparametrisierung abhängig sind.

Sowohl die alleinige Betrachtung zeitlich-räumlich gebildeter Mittelwerte (am Beispiel des Aluminiums), als auch die alleinige Betrachtung der vom Modell berechneten Konzentrationsmaxima (am Beispiel des pH-Werts) - wie derzeit gemäß DIBt (2011 und 2016) angewandt - lassen insgesamt betrachtet wenige Aussagen über das Abstromverhalten der aus der Injektionssohle freigesetzten Stoffe zu, wie die Auswertungen an Konzentrationsmaxima und deren räumlicher Verteilung, als auch die Betrachtungen an Frachtberechnungen zeigten. Ob, wie lange und in welcher Konzentration die eingetragenen Stoffe über die abstromig gelegene Baugrubenwand den Ort der Beurteilung verlassen und sich somit der modellhaften Bewertung entziehen, ist bei alleiniger Bewertung von zeitlich-räumlichen Mittelwerten oder Konzentrationsmaxima nicht abschließend zu klären. Hierfür können Vergleiche zwischen verschiedenen Fracht- bzw. Bewertungsebenen herangezogen werden, wie oben stehende Auswertungen verdeutlichen, welche in Kombination mit zu verschiedenen Modellzeitpunkten erstellten Verteilungskarten die Bewertung der Stofftransporte zusätzlich zur gemittelten bzw. maximalen Kontaktgrundwasserkonzentration vervollständigen kann.

Um beim jeweiligen hier beschriebenen Bewertungssystem den Einfluss des Modellgebiets und dessen Parametrisierung auf einen Blick vergleichen zu können, wurden die Modellergebnisse in Bezug auf *best-case- / worst-case*-Varianten in der Tabelle 22 zusammengefasst. Dabei wurde zwischen „rechteckigen“ (quasi-quadratischen) und „längsgestreckten“ Baugruben unterschieden. Die letzten Spalten der Tabelle zeigen die Einstufung des Bewertungssystems und beantworten zugleich die Frage, ob bei langgestreckten Baugruben im Vergleich zu quasi-quadratischen Bau-

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Tabelle 22: Einteilung der Varianten in *best-case* und *worst-case*, in Bezug auf die im Rahmen des Forschungsvorhabens angewandten Bewertungssysteme.

Bewertungs- system		"rechteckig"			"längsgestreckt"		Worst Case		Best Case	
		Var. A	Var. B	Var. C	Var. D	Var. E	recht- eckig	alle	recht- eckig	alle
DIBt (2011) und DIBt (2016):										
1.	zeitlich- räumliche Mittelwerte¹, 2x2 m, 180 d [mg/l]	3,77	4,07	3,04	4,9	1,95	B	D	C	E
2.	Konzentrationsmaxima²									
	0,05 m unter Sohle, [mg/l]	112,6	203,5	264,2	153,4	121,6	C	C	A	A
weitere Bewertungsmöglichkeiten:										
2b.	Konzentrationsmaxima									
	1,00 m unter Sohle, [mg/l]	49,3	37,8	31,9	47,4	29,2	A	A	C	E
	2,00 m unter Sohle, [mg/l]	27,3	14,9	11,4	31,5	14,5	A	D	C	C
3.	Frachtberechnung									
	Bewertungs- ebene 1, [g]	51065	56230	46850	57327	64201	B	E	C	C
	Bewertungs- ebene 2, [g]	41053	2756	1390	3534	63816	A	E	C	C
4.	Frachtnormierung									
	Bewertungs- ebene 1, [mg/l]	1,27	1,75	1,54	1,62	1,22	B	B	A	E
	Bewertungs- ebene 2, [mg/l]	0,21	0,08	0,08	0,08	0,12	A	A	B	B

¹= derzeit angewendet bei der Bewertung von Aluminium und Chlorid

²= derzeit angewendet bei der Bewertung des pH-Werts

Bewertungs-
ebene 1 = horizontal, 1,0 m unterhalb der Injektionssohle

Bewertungs-
ebene 2 = vertikal, unmittelbar hinter der abstromig gelegenen Baugrubenwand

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

gruben in Bezug auf negative Grundwasserveränderungen eher schlechtere oder bessere Ergebnisse zu erwarten sind.

Bei der Bewertung anhand zeitlich-räumlicher Mittelwerte, wie derzeit gemäß DIBt (2011) und DIBt (2016) u.a. bei Aluminium und Chlorid verwendet, stellt die Parametrisierung der Variante B den *worst-case* bei den „rechteckigen“ Baugruben dar. Somit ist ein Anstieg der räumlich-zeitlich gemittelten Konzentration am Ort der Beurteilung zu erwarten, wenn *in-situ* ein geringeres hydraulisches Gefälle vorliegt, als bei der Standardvariante A angenommen (3,77 mg/l bei Variante A, 4,07 mg/l bei Variante B, Tabelle 22). Die Variante C stellt die *best-case*-Variante unter den rechteckigen Baugruben dar (Varianten A - C). Somit ist mit einer verminderten, räumlich-zeitlich gemittelten Konzentration am Ort der Beurteilung zu rechnen, wenn *in-situ* eine geringerer hydraulische Leitfähigkeit vorliegt, als bei der Standardvariante A angenommen (3,77 mg/l bei Variante A, 3,04 mg/l bei Variante C, Tabelle 22). Wird dagegen eine längsgestreckte Baugrube errichtet, so steigt der zeitlich-räumliche Mittelwert auf das hier beobachtete Maximum an (3,77 mg/l bei Variante A, 4,90 mg/l bei Variante D, Tabelle 22). Somit stellt die Variante D unter allen betrachteten Varianten den *worst-case* dar. Wird ein längsgestreckter Trog mit zur Strömungsrichtung gedrehter Arbeitsabfolge hergestellt, so fällt die gemittelte Konzentration auf den geringsten Wert (*best-case*, Variante E mit 1,95 mg/l, Tabelle 22). Auch wenn die Basisvariante nicht den *worst-case* darstellt, so ist das Parameterset der Basisvariante A geeignet, mittlere Verhältnisse in den Modellen zu simulieren.

Bei der Bewertung anhand von Maximalkonzentrationen, wie derzeit gemäß DIBt (2011) und DIBt (2016) u.a. beim pH-Wert verwendet, stellt die Parametrisierung der Variante C bei den „rechteckigen“ Baugruben den *worst-case*, die Basisvariante A den *best-case* dar (112,6 mg/l bei Variante A, 264,2 mg/l bei Variante C, Tabelle 22). Auch bei Herstellung einer längsgestreckten Baugrube werden diese Werte weder unter- noch überschritten. Somit werden (andere Transport-, Abbau- und Reaktionsprozesse außer Acht gelassen) die mittels der Basisvariante A prognostizierten Maximalkonzentrationen sowohl bei Vorhandensein eines geringeren hydraulischen Gefälles, als auch bei Vorhandensein geringerer hydraulischer Durchlässigkeit *in-situ* überschritten und somit bei Verwendung der Basisvariante A unterschätzt. Hier ist bei weiterer Bewertung von Zulassungsanträgen mittels der Basisvariante A zu beachten, dass die *in-situ*-Injektion im Baugrund zu höheren Maximalkonzentrationen führen kann, als vom Modell prognostiziert.

Die Einstufung in *worst-* bzw. *best-case* für die weiteren, im Rahmen dieses Forschungsvorhabens beschriebenen Bewertungsmöglichkeiten sind der Tabelle 22 zu entnehmen. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass bei den hier gemachten Modellberechnungen und Simulationen mitunter wesentliche, die Freisetzung und den Transport beeinflussende (Standort-) Faktoren außer Acht gelassen wurden (unter anderen der Einfluss von Puffersystemen, die Immobilisierung der transportierten Stoffe durch Fällung oder Reaktion, biologischer und chemischer Abbau, sowie

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Sorption und die dadurch bedingte Retardierung). Diese haben einen nicht weniger starken Einfluss auf die Ergebnisse (sowohl auf die zeitlich-räumlichen Mittelwerte, auf Verteilung und Höhe der Konzentrationen, als auch auf die transportierten Frachten), als die hier variierten Parameter und sollten entsprechend reeller Vorgaben in den Bewertungsmodellen implementiert werden.

Auch die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Laborversuche zu den Einflüssen von Huminstoffen auf das Freisetzungs- und Transportverhalten der beiden hier betrachteten Stoffe (Al^{3+} , OH^-) haben bislang noch keinen Einzug in die Modellierungen gefunden.

Auch wenn für eine allgemeine Bewertung vergleichbare (und meist vereinfachte) Modellannahmen getroffen werden müssen, so sollten deren Ergebnisse dringend an der Realität „geieicht“ und regelmäßig anhand tatsächlich im Baugrund durchgeführter (Test-)Injektionen und Probefeldern überprüft werden, da die Mobilisierung von Inhaltsstoffen der Wechselwirkung von Weichgelsohle und dem durch die Weichgelinjektion beeinflussten Boden und Grundwasserbereichs unterliegt. Die Modellierung dieser Einflüsse wird kurzfristig die Aufnahme von weiteren Parametern in die Modellierungssoftware erfordern, um die Modelle besser an die Gegebenheiten vor Ort anzupassen.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen**8 ZUSAMMENFASSUNG**

In den „Grundsätzen zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ (Teil I + Teil III Mai 2009, Teil II September 2011) des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) ist festgeschrieben, dass das umweltrelevante Gefährdungspotential jener Bauprodukte, die im Zuge ihrer Anwendung als erdberührend charakterisiert werden, objektiv zu überprüfen ist. Grundlegend muss in Versuchsverfahren die Mobilisierbarkeit ökologisch relevanter Inhaltsstoffe aus Bauprodukten simuliert werden. Als geeignete Methode existiert der inverse Säulenversuch, dessen Eignung für die Bewertung von Bodeninjektionsmitteln in mehreren Studien nachgewiesen wurde (Wagner, 2011). Für die Erteilung allgemeiner bauaufsichtlichen Zulassungen für Injektionssohlen von Trogbaugruben mit Weichgelen werden jedoch Übertragungsfunktionen benötigt, um die Ergebnisse aus Laborversuchen auf die Realität zu übertragen. In vorhergehenden Forschungsvorhaben wurden Parameter und Randbedingungen für eine Transportsimulation von Schadstoffen im Grundwasser für eine Unterwasserbetonsohle erarbeitet (IBAC, 2009). Diese Parametervorgaben fanden Einzug in die „Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt, 2011). Als Ergänzung zu diesen Grundsätzen ist vom DIBt in Abstimmung mit der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) ein Prüfplan in Bearbeitung (DIBt, 2016), der u.a. die Modellvorgaben und -parameter bzgl. der Modellierungen präzisiert, welche bei der Bewertung von Injektionsstoffen, die im Grundwasserbereich eingepresst werden, zu Grunde gelegt werden. Nach ersten Untersuchungen mit Grundwassermodellierungen für Injektionssohlen wurden u. a. das hydraulische Gefälle, die Durchlässigkeit (k_f -Wert) des Bodens in der Umgebung der Baugrube, die Abmessungen und Form der Baugrube und die Herstellungsabfolge im Bezug zur Grundwasserströmungsrichtung als wesentliche Einflussparameter erkannt.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurden oben genannte Parameter und deren Einfluss auf das Bewertungsergebnis gem. DIBt (2011 sowie 2016) durch Variantenrechnung genauer betrachtet. Mittels einer Recherche wurde des Weiteren ermittelt, welche Bandbreite an Strömungsgeschwindigkeiten, hydraulischen Durchlässigkeiten und Huminstoffgehalten im Boden und Grundwasserleiter im Bereich von Ballungsgebieten und Großstädten, also im Einsatzbereich der Injektionssohlen, vorliegen.

Chemische Injektionen für Abdichtungen auf Wasserglasbasis mit anorganischen Härtern werden in Deutschland bereits seit den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts in größerem Umfang durchgeführt. Hierbei kann die Injektion entweder zur Bodenverfestigung (Hartgele) oder zur Abdichtung (Weichgele) eingesetzt werden. Die Injektionslösungen bestehen dabei aus Wasser, Wasserglas und einem anorganischen Reaktiv. Zur Abdichtung wurde, wenn keine Festigkeit erforderlich war, über viele Jahre und auch teilweise heute noch als Reaktiv Natriumaluminat verwandt. Zu diesem Weichgel liegen umfangreiche Erfahrungen vor. Natriumaluminat führt nach

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

der Gelbildung dazu, dass sich unter anderem Al^{3+} und OH^- aus dem Gel freisetzen. Diese Injektionssohlen reagieren alkalisch, mit einem pH-Wert zwischen 10 und 13. Die Erhöhung des pH-Wertes führt zu einer chemischen Veränderung im Kontaktbereich des Bauproduktes und in den umgebenden Bereichen im Boden, was unter anderem eine erhöhte Löslichkeit von Huminstoffen bewirkt. Damit kann es zu einer durch das Weichgel verursachten Mobilisierung und Erhöhung des DOC (gelöste organische Substanz) und damit zu einer durch Huminstoffe verursachten Schwarzfärbung des Grundwassers sowie ebenfalls zu einer Mobilisierung von Schwermetallen und auch organischen Schadstoffen kommen.

Um quantifizieren zu können, welchen Einfluss Weichgelinjektionen mit Natriumaluminat auf reale Baugrundböden ausüben und welche Mobilisierungseffekte bei Huminstoffen im Raum Berlin ausgelöst werden, wurde ein Weichgel mit Natriumaluminat als Reaktiv im Rahmen dieses Forschungsvorhabens in künstlich hergestellten Baugrund-Böden injiziert und anschließend mittels inversen Säulenversuchs (E DIN 19631:2015-08) eluiert. Dabei durchströmten die freigesetzten Inhaltsstoffe des Bauproduktes eine 10 cm mächtige Schicht mit unterschiedlichen Gehalten an Kohlestückchen bzw. „Kohlereibseln“.

Die Ergebnisse der Weichgelinjektion in den als Standardprüfsand im inversen Säulenversuch verwendeten Frechener Feinsand (FR36) bestätigen vorhergehende Untersuchungen und sind überwiegend unauffällig. Da FR36 ein Quarzsand mit hoher chemischer Reinheit ist, sind die eluierten Stoffe größtenteils dem injizierten Bauprodukt zuzuschreiben. Da es sich bei dem untersuchten Silikatgel um ein stark basisches Bauprodukt handelt, ist z.B. eine deutliche Zunahme der pH-Werte in den Eluaten messbar. Neben einem ansteigenden Leitfähigkeitswert sind vor allem Aluminium und Natrium in den Eluaten über dem Konzentrationsniveau des Elutionsmittels nachweisbar.

Eine besondere Rolle spielt Calcium aus dem Trinkwasser. Bei der Reaktion von Wasserglas mit Natriumaluminat wird u.a. Natronlauge (Na^+ und OH^- in Lösung) freigesetzt. Betrachtet man allein die Konzentration an freigesetzten Natriumionen ist die tatsächlich freigesetzte Menge an OH^- wesentlich größer und würde einem weit höherem pH-Wert von $\text{pH} = 11$ entsprechen. Durch die enthaltenen Calcium-Ionen im Elutionsmittel Trinkwasser reagieren die freigesetzten OH^- -Ionen mit Ca^{2+} zu schwerlöslichen Calciumhydroxid. Darüber hinaus bilden andere gelösten Elemente wie Aluminium und Kupfer mit OH^- -Ionen Hydroxide, die die Konzentration an OH^- -Ionen in der Lösung/Eluat verringern können.

Durch die Zumischung von Kohlereibsel zu FR36, erhöht sich neben dem organischen Kohlenstoffgehalt auch der Gehalt an Al, Ca, Mg und Fe im Säulensand. Die Injektion vom untersuchten Weichgel in die präparierten FR36-Säulen zeigte sehr deutlich den Einfluss von „Verunreinigungen“. Je mehr organischer Kohlenstoff im Säulensand vorliegt, umso geringer fällt der Anstieg von pH und Leitfähigkeit im Vergleich zum Niveau des Elutionsmittels Trinkwasser aus,

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

bei gleichzeitiger Zunahme der TOC- bzw. DOC-Konzentration. Die Injektion führt zu einer chemischen Veränderung im Kontaktbereich des Bauproduktes und in den umgebenden Bereichen im Boden, was unter anderem eine erhöhte Löslichkeit und Freisetzung von Huminstoffen bewirkt. Die gelösten Huminstoffe sorgen für die typische Dunkelfärbung der Eluate. Ebenfalls wurde die erhöhte Mobilisierung von Aluminium beobachtet, die aber nicht so hoch ausfällt, wie der Anstieg des Aluminiumgehaltes im Säulensand durch Anstieg des Kohlereibselgehaltes vermuten lässt. Hier kommt der positive Einfluss der Huminsäuren zum Tragen. Huminsäuren sind in der Lage unlösliche Verbindungen mit Aluminium einzugehen (unlösliche Humate).

Der eingesetzte Baugrundsand (BG) besitzt im Vergleich zum Standardprüfsand FR36 einen wesentlich höheren Gehalt an C_{org} , Al, Ca und K. Durch die Injektion des Weichgels kommt es in der Folge einerseits zu erhöhten Austrägen dieser Stoffe. Auf der anderen Seite führt die höhere Sorptionskapazität des BG zu einem etwas geringeren Anstieg des pH-Wertes und der Leitfähigkeit. Diese Wirkung wird durch die Zugabe von Kohlereibseln verstärkt, d.h. Leitfähigkeit und pH-Wert werden durch die Injektion von Weichgel nicht so stark beeinflusst. Auch die Freisetzung an Aluminium aus dem BG wird durch Kohlereibsel verringert, was auf die Bildung von schwerlöslichen Humaten zurückgeführt werden kann.

Im Rahmen der Grundwassertransportmodellierungen wurden in jeder der fünf Modellvarianten zwei durch die Injektion freigesetzte Stoffe (Aluminium- und Hydroxidionen) in einem instationären Strömungs- und Transportmodell freigesetzt, transportiert und deren Verteilung berechnet. An den Stellen der Injektionssohle, die gerade "geschlossen" bzw. abgedichtet werden (gemäß den Erfahrungen aus der Baupraxis und unter Zugrundelegung einer zeitlichen Herstellreihenfolge), wurden im Modell die Freisetzungsvorgänge simuliert, die zuvor in Laborversuchen beobachtet wurden. Die Freisetzung wird dabei auf die Oberfläche des im Baugrund entstehenden Injektionskörpers bezogen, als Datengrundlage werden die Ergebnisse von Durchströmungs- bzw. inversen Säulenversuchen herangezogen. Die Auswertung an den fünf Modellvarianten wurde gemäß den Vorgaben in DIBt (2011) durchgeführt.

Für den Parameter Aluminium wurde eine zeitliche und räumliche Mittelung der Grundwasserkonzentration implementiert und bewertet. Für die zeitliche Mittelung werden 180 Tage angesetzt, die räumliche Mittelung erfolgt in einer Entfernung von 0 bis 2 m von der Injektionssohle. Die in den Modellen berechneten Konzentrationen werden in den verschiedenen Varianten an jeweils 30 unterhalb der Injektionssohle gelegenen Modellmessstellen (als Ort der Beurteilung) zeitabhängig ausgelesen und durch weitere Berechnungsschritte gemittelt. Die 30 Modellmessstellen beschreiben eine vertikale 2,0 x 2,0 m²-Fläche, ihre Lage wurde in Anlehnung an IBAC (2009) in allen Varianten mittig an der abstromig gelegenen Baugrubenseite (in Bezug auf das jeweilige Strömungsregime) und dadurch an der ungünstigsten Stelle der hier zur Bewertung kommenden Baugruben- und Modellsymmetrien gewählt. Anschließend wurden im Falle des Aluminiums die zeitlich-räumlichen Mittelwerte der verschiedenen Varianten miteinander verglichen, um dadurch

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Aussagen über die prognostizierte Verbreitung der freigesetzten Reaktionsprodukte einer Injektionssohle in Abhängigkeit der Baugrubensymmetrie bzw. des Strömungsregimes treffen zu können. Da zum einen der Stoffeintrag und zum anderen der Ort der Beurteilung in jeder der fünf Modellvarianten identisch implementiert ist, wird der Einfluss der variierten Parameter (k_r -Werte, Gefälle, Baugrubensymmetrie) auf die mittlere Konzentration am Ort der Beurteilung direkt erkenn- und somit bewertbar.

In Tabelle 23 sind die in den verschiedenen Modellvarianten berechneten Mittelwerte dargestellt. Quantitativ ergab sich der höchste Aluminium-Mittelwert für rechteckige, quasi- quadratische Baugruben (Varianten A - C) aus der Variante B (4,07 mg/l). Aufgrund der geringeren Grundwasserfließgeschwindigkeiten und der davon indirekt abhängigen Transport- und Verteilungsmechanismen zeigte die Variante C unter den quasi-quadratischen Baugruben den geringsten Mittelwert aller Varianten (3,04 mg/l).

Unter den langgestreckten Baugruben (Varianten D und E) wurde trotz vergleichbarem Stoffeintrag der niedrigste Mittelwert bei einer Sohlherstellung senkrecht zur Grundwasserströmungsrichtung beobachtet (Variante E, Mittelwert 1,95 mg/l). Wird die Injektionssohle einer langgestreckten Baugrube in Grundwasserströmungsrichtung hergestellt, wie in Variante D berechnet, erhöhen sich dadurch die am Ort der Beurteilung gemäß DIBt (2011) bzw. DIBt (2016) beobachteten Mittelwerte auf 4,90 mg/l. Dieser Mittelwert stellt bei den hier betrachteten fünf Varianten den höchsten Wert dar, wodurch die Variante D in Bezug auf die gemäß DIBt (2011) bzw. DIBt (2016) gemittelten Konzentrationen für Aluminium das *worst-case* Szenario aller hier bewerteten Varianten darstellt.

Tabelle 23: Mittelwerte (2x2 m, 180 d) für Aluminium und deren direkter Vergleich zur Basisvariante A.

	Beschreibung	Mittelwert (2x2 m, 180 d)	Vergleich zu Variante A
Variante		[mg/l]	[%]
A	Basisvariante	3,77	100%
B	geringeres Gefälle	4,07	108%
C	geringerer k_r -Wert	3,04	81%
D	langgestreckte Baugrube	4,90	130%
E	langgestreckte Baugrube, Strömungsrichtung quer	1,95	52% (40% ¹)

¹ = Direkter Vergleich zur Variante D

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass bei Zugrundelegung der Randbedingungen der Basisvariante A, z.B. in Zulassungsverfahren für Injektionsmittel wie derzeit gemäß DIBt (2011) bzw. DIBt (2016) angewendet, die Modellberechnung und anschließende Bewertung geringere Stoffkonzentrationen prognostizieren kann, als sich diese theoretisch bei ungünstigeren Randbedingungen ergeben. Hierbei sei erwähnt, dass das Ergebnis mitunter stark beeinflussende Transport- und Abbauprozesse bei den hier getätigten Modellierungen außer Acht gelassen wurden. Auch wenn die Basisvariante nicht den *worst-case* darstellt, so ist das Parameterset der Basisvariante A geeignet, mittlere Verhältnisse in den Modellen zu simulieren.

Im Ergebnis ist festzustellen, dass in allen fünf Varianten eine gute Übereinstimmung zwischen den räumlich-zeitlichen Mittelwerten der 2,0 x 2,0 m-Fläche (30 Messpunkte) und dem zeitlichen Mittelwert des Messpunktes 17 bestehen (Messpunkt 17 liegt im Modell 0,6 m unterhalb der Sohle und 1,5 m von der abstromig gelegenen Wand). Aufgrund der aufwendigen Modellbearbeitung und vergleichbarer Aussagekraft kann unserer Einschätzung nach künftig von der aufwendigen, räumlichen und zeitlichen Mittelwertbildung in einer 2,0 x 2,0 m Fläche abgesehen werden. Um das Ergebnis nicht zu unterschätzen könnte für künftige Bearbeitungen ein zeitlicher Mittelwert über 180 Tage an einem einzelnen, repräsentativen Messpunkt gebildet und der Bewertung zu Grunde gelegt werden. Unserer Auswertung folgend sollte dieser Messpunkt etwa 0,5 m unterhalb der Sohle und mit einem Abstand von 1,5 m zur abstromig gelegenen Wand in den Modellen implementiert werden (eine ausreichend genaue, horizontale und vertikale Diskretisierung des Modellnetzes im An- und Abstrom dieser Modellmessstelle vorausgesetzt!).

Die Bewertung der pH-Werte erfolgt anhand beobachteter Maximalkonzentrationen der OH⁻-Ionen an den 30 Modellmessstellen. Die absoluten pH-Wert-Maxima der verschiedenen Modellvarianten sind in Tabelle 24 dargestellt (in Bezug auf den Abstand zur Injektionssohle). Demnach wurde das niedrigste pH-Wert-Maximum in Variante A (pH = 11,0), das höchste in Variante C (pH = 11,4) unmittelbar unterhalb der Injektionssohle festgestellt. In 2 m Abstand zur Injektionssohle wurden in keiner Variante höhere pH-Werte als pH = 10,5 berechnet. Die pH-Maxima der Varianten folgen in ihrer Reihenfolge den absoluten Konzentrationsmaxima des Aluminiums, da in den Transportmodellierungen keine stoffspezifischen Abbau-, Puffer- oder Immobilisierungsprozesse implementiert wurden und sich daher die Transportmechanismen beider Ionen in den Modellen

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Tabelle 24: pH-Wert-Maxima in den fünf Modellvarianten, in Abhängigkeit der Lage unterhalb der Injektionssohle [m u.IS].

Variante	Beschreibung	pH-Wert-Maximum		
		0,05 m u.IS	1,00 m u.IS	2,00 m u.IS
A	Basisvariante	11,0	10,6	10,3
B	geringeres Gefälle	11,3	10,6	10,2
C	geringerer k_f -Wert	11,4	10,5	10,0
D	langgestreckte Baugrube	11,2	10,6	10,5
E	langgestreckte Baugrube, Strömungsrichtung quer	11,1	10,4	10,1

nicht unterscheiden. Durch Logarithmieren der OH-Konzentration rücken die absoluten pH-Werte jedoch näher zusammen als die Maxima der Aluminiumkonzentrationen. Die Maxima unmittelbar unterhalb der Sohle liegen in den Varianten relativ nahe beieinander (Tabelle 24).

Auch wenn der Einfluss der Parametervariationen am Beispiel des pH-Werts weniger deutlich ist als beim Aluminium (auch aufgrund des Logarithmierens der OH-Konzentrationen), konnten folgende Trends aus den Berechnungen abgeleitet werden: sowohl ein um den Faktor 5 flacheres hydraulisches Gefälle, wie in der Variante B eingerichtet, als auch eine Verminderung der hydraulischen Durchlässigkeit um den Faktor 10 (Variante C) führten unmittelbar unterhalb der Injektionssohle zu nur geringfügig höheren pH-Wert-Maxima (Tabelle 24). Auch die Erhöhung über $\text{pH} = 10,5$ war bei flacherem hydraulischem Gefälle und geringerer hydraulischer Durchlässigkeit in einem Zeitraum von jeweils 5,9 Tagen nur unwesentlich länger zu beobachten, als bei der Basisvariante (4,9 Tage). Ein über der Hintergrundkonzentration liegender pH-Wert wurde bei beiden Varianten hingegen über einen deutlich längeren Zeitraum von den Modellen ausgegeben, als bei der Basisvariante berechnet (mehr als 330 Tage in Variante B und C, dagegen 182 Tage in Variante A).

Bei länglicher Baugrubenform (Variante D) und einer darin senkrecht zur Strömungsrichtung erfolgenden Herstellung der Injektionssohle (Variante E) ergaben sich nur geringfügig höhere pH-Wert-Maxima als bei der Basisvariante ($\text{pH} = 11,2$ in Variante D, sowie $11,1$ in Variante E). Den größten Einfluss hat die längliche Baugrube der Variante D auf die Dauer der Beeinflussung. So war der pH-Wert hier beispielsweise unmittelbar unterhalb der Injektionssohle über einen Zeitraum von 11,5 Tagen höher als $\text{pH} = 10,5$ und auch wurde ein längerfristig über der Hintergrundkonzentration liegender pH-Wert als in der Basisvariante vom Modell berechnet. Wenn senkrecht

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

zur Fließrichtung hergestellt wird (Variante E), verkürzt sich dagegen die zeitliche Belastung sowohl eines über $\text{pH} = 10,5$ liegenden pH -Werts auf 2,5 Tage, als auch eines oberhalb der Hintergrundkonzentration liegenden Werts (138 Tage).

Eine nachträglich in den Modellen implementierte Frachtberechnung zeigte darüber hinaus ein weiteres Bewertungssystem auf, welches künftig Einzug in den Prüfplan für die Untersuchung der Auswirkungen von Silikatgelen als Bodeninjektionsmittel auf Boden und Grundwasser (DIBt, 2011 sowie 2016) halten könnte. Die gezeigten Berechnungen zu den Frachten verdeutlichten unter anderem, dass eine negative Beeinflussung des im Abstrom gelegenen Aquifers durch die Freisetzungsprodukte der Injektionssohle bei den Varianten B, C und D weitaus weniger zu besorgen ist, als bei den Varianten A und E. Die Restwasserhaltung schafft es in den Varianten B, C und D einen deutlich größeren Anteil möglicher Kontaminanten im Bereich des Troges zu halten bzw. zu fassen, als in den Varianten A und E. Die Frachtnormierung zeigte darüber hinaus, dass die Variante A mit einer Erhöhung von ca. 0,2 mg Aluminium pro Liter Grundwasser den meisten Einfluss auf das der Baugrube abströmende Grundwasser hat und somit in Bezug auf abströmende Verunreinigungen die *worst-case*-Variante der hier betrachteten Varianten darstellt.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass bei den hier gemachten Modellberechnungen und Simulationen mitunter wesentliche, die Freisetzung und den Transport beeinflussende (Standort-) Faktoren in Übereinstimmung mit DIBt (2011) und DIBt (2016) außer Acht gelassen wurden (unter anderem der Einfluss von Puffersystemen, die Immobilisierung der transportierten Stoffe durch Fällung oder Reaktion, biologischer und chemischer Abbau, sowie Sorption und die dadurch bedingte Retardierung). Diese haben einen nicht weniger starken Einfluss auf die Ergebnisse (sowohl auf die zeitlich-räumlichen Mittelwerte, auf Verteilung und Höhe der Konzentrationen, als auch auf die transportierten Frachten), als die hier variierten Parameter und sollten entsprechend reeller Vorgaben in den Bewertungsmodellen implementiert werden.

Zusammengenommen zeigen die Ergebnisse, dass neben räumlich-zeitlich gemittelten Konzentrationsberechnungen am Ort der Beurteilung oder Berechnungen von Konzentrationsmaxima auch die Auswertung an (mitunter mehreren) Frachtebenen zur Beurteilung eines Bauprodukts herangezogen werden sollten, da diese auch den möglicherweise beeinflussten Abstrom einer Baumaßnahme besser erfassen. In Kombination mit zu verschiedenen Modellzeitpunkten erstellten Verteilungskarten können diese Bewertungssysteme die Stofftransportberechnungen zusätzlich zur gemittelten bzw. maximalen Kontaktgrundwasserkonzentration vervollständigen.

Für die weitere Bearbeitungen bzw. die Aufnahme in den angesprochenen Prüfplan (DIBt, 2016) ist es nötig, sowohl das Modellgebiet an sich (u.a. Größe, Ausdehnung, Mächtigkeit), als auch die exakte Lage und Orientierung dieser Bewertungsebenen (u.a. Abstand zur Baugrube, horizontal/vertikal) im Bezug zur Baugrube vorzugeben, damit die Ergebnisse vergleichbar werden. Anhand von *in-situ*-Feldversuchen kann darüber hinaus festgestellt werden, ob dieses

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Bewertungskonzept noch um weitere Angaben, zum Beispiel um weitere Modellrandbedingungen (wie Reaktion und Abbau, etc.) zu ergänzen wäre.

Auch die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Laborversuche zu den Einflüssen von Huminstoffen auf das Freisetzungs- und Transportverhalten der beiden hier betrachteten Stoffe (Al^{3+} , OH^-) haben bislang noch keinen Einzug in die Modellierungen gefunden.

Auch wenn für eine allgemeine Bewertung vergleichbare (und meist vereinfachte) Modellannahmen getroffen werden müssen, so sollten deren Ergebnisse dringend an der Realität „geiecht“ und regelmäßig anhand tatsächlich im Baugrund durchgeführter (Test-)Injektionen und Probefeldern überprüft werden, da die Mobilisierung von Inhaltsstoffen der Wechselwirkung von Weichgelsohle und dem durch die Weichgelinjektion beeinflussten Boden und Grundwasserbereichs unterliegt. Die Modellierung dieser Einflüsse wird kurzfristig die Aufnahme von weiteren Parametern in die Modellierungssoftware erfordern, um die Modelle besser an die Gegebenheiten vor Ort anzupassen.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen**9 VERWENDETE NORMEN UND LITERATUR**

AA SV – NzS: 2013-04: Neigung zur Schaumbildung. Interne Arbeitsanweisung FU Berlin, Stand April 2013

Anonym (2008): Grundwasser in Berlin - Vorkommen · Nutzung · Schutz · Gefährdung
Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz, Abteilung Integrierter
Umweltschutz.

Borchert, K.-M. & Karstedt, J. (1996): Geologische, hydrologische und bauliche Aspekte für das
Bauen im Grundwasser. VDI-Berichte 1246: 143-184, VDI Verlag, Düsseldorf.

Borchert, K.-M. (1996): Einsatz und Grenzen von Unterwasserbetonsohlen und Zementinjektionen
zur Sohlabdichtung. UTECH Seminar 25, Bauen im Grundwasser, Berlin, 35-56.

Borchert, K.-M. (1999): Dichtigkeit von Baugruben bei unterschiedlichen Sohlen-Konstruktionen –
Lehren aus Schadensfällen. – VDI-Berichte 1436: 21-44, VDI Verlag, Düsseldorf.

Brauns, J., Kast, K., Hötzl, H. & Eiswirth, M. (1996): Anwendung von Weichgelen zur horizontalen
Abdichtung von Baugruben durch Injektionssohlen – Fragen zur Beeinflussung der
Grundwasserqualität. Mitteilungen / Abteilung Erddamm- und Deponiebau am Institut für
Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe.

Brauns, J., Eiswirth, M., Hötzl, H., Kast, K., Ohlenbusch, R. und Schnell K. (2001): Nachweis der
Umweltverträglichkeit von Weichgelinjektionssohlen, Bautechnik 78, Juli 2001, Heft 7.

BTU (2004): Mobilisierung von Huminstoffen im Untergrund durch pH-Anhebung in Folge von
Sanierungsreaktionen. BTU Cottbus LS Wassertechnik und Siedlungswasserbau. [http://www-
docs.tu-cottbus.de/wassertechnik/public/Publikationen/Poster/InSitu1.pdf](http://www-docs.tu-cottbus.de/wassertechnik/public/Publikationen/Poster/InSitu1.pdf) Posterbeitrag zur
DECHEMA-Tagung: In-Situ Sanierung - Trends in Forschung und Praxis; 23. - 24. November 2004
in Frankfurt am Main

DHI-WASY (2013): FEFLOW 6.2 - User Manual; Berlin.

DIBt - Deutsches Institut für Bautechnik (2011): Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von
Bauprodukten auf Boden und Grundwasser - Teile 1 bis 3. Herausgegeben vom Deutschen Institut
für Bautechnik - DIBt.

DIBt - Deutsches Institut für Bautechnik (2016): Prüfplan für die Untersuchung der Auswirkungen
von Silikatgelen als Bodeninjektionsmittel auf Boden und Grundwasser - Entwurf: 10. März 2016
(unveröffentlicht).

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

DIN 38404-5:2009-07: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Physikalische und physikalisch-chemische Kenngrößen (Gruppe C) - Teil 5: Bestimmung des pH-Werts (C 5)

DIN EN 1484:1997-08: Wasseranalytik - Anleitungen zur Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) und des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC)

DIN EN 1622:2006-10: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung des Geruchsschwellenwerts (TON) und des Geschmacksschwellenwerts (TFN), (Anhang C – Qualitatives, vereinfachtes Verfahren)

DIN EN 27888:1993-11: Wasserbeschaffenheit; Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit (ISO 7888:1985)

DIN EN ISO 11885:2009-09: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES) (ISO 11885:2007); Deutsche Fassung EN ISO 11885:2009

DIN EN ISO 7027:2000-04: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der Trübung (ISO 7027:1999); Deutsche Fassung EN ISO 7027:1999

DIN EN ISO 7887:2012-04: Wasserbeschaffenheit - Untersuchung und Bestimmung der Färbung (ISO 7887:2011); Deutsche Fassung EN ISO 7887:2011

Harms, W. (2005): Huminstoffkontinuen – eine unbestimmbare Matrix. Dissertation. Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

Hirner, A.V., Rehage, H. und Sulkowski, M. (2000): Umweltgeochemie: Herkunft, Mobilität und Analyse von Schadstoffen in der Pedosphäre. Steinkopf Verlag, S. 836, Darmstadt.

IBAC (Institut für Bauforschung Aachen, 2009): Bewertung der Umweltverträglichkeit von Abdichtungs- und Injektionsstoffen - Abschlussbericht. Forschungsbericht Nr. F 7039 (*unveröffentlicht*).

Karstedt, J. (1996): Nutzungsmöglichkeiten natürlicher Mergelschichten oder Weichgele als Baugrubensohlenabdichtung. UTECH Seminar 25 Bauen im Grundwasser, Berlin, 15-34.

Kinzelbach, W. & Stauffer, F. (2005): Grundwasser I. Zürich.

Ohlenbusch, R. (2001): Numerische Modellrechnungen zur Ausbreitung von Inhaltsstoffen aus Weichgelinjektionssohlen. Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, 2001, Heft 62.

Schnell, K. (2001): Hydrogeochemische Prozesse bei Weichgelinjektionen - Stoffbilanzierung, potenzielle Langzeitfolgen. Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, 2001, Heft 61.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Tausch, N. (1980): Untersuchung zur Eignung von Silicatgelen für Abdichtungsinjektionen, Veröffentlichung des Grundbauinstitutes der TU-Berlin, Heft 9.

Wagner, R. (2011): Inverser Säulenversuch zur Beurteilung der Auswirkungen von Bodeninjektionsmitteln auf Boden und Grundwasser - Laborvergleichsuntersuchung und ökotoxikologische Bewertung am Beispiel von Polyacrylaten / Acrylatgelinjektionen. Dissertation an der Freien Universität Berlin, FB Geowissenschaften.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen



Abbildung A-1: Impressionen Säulenversuch - Säulenversuchsanlage, gefüllte Säule mit 10cm mächtiger Kohlereibschicht, freigelegter Prüfkörper von der Seite und von oben, gefärbte Eluate der Versuche ST 1 und ST 2

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen



Abbildung A-2: Ausgebaute Prüfkörper des Versuchs ST, Prüfkörper A: Baugrundsand, Prüfkörper B: Frechener Feinsand, Prüfkörper C Baugrundsand

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Tabelle B-1: Ergebnisse der Weichgelineinjektion in Baugrundsand (BG) im Versuch ST 1

Parallele A Fraktionen	Temp. [°C]	pH-Wert	elektr. Leitf. [µS/cm]	Trübung [FNU]	TOC [mg/l]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	K [mg/l]	Na [mg/l]	Geruch	Farbe	N. z. Schaumb.	Entnahmekzeit- punkt [h:min]	Entnahme- volumen [ml]	Datum
BW	18,2	7,56	761	17,50	3,99	0,00	103,00	4,35	47,69	geruchlos	farblos	keine	09:45	2000	05.04.2016
Fr. 1	18,5	7,51	762	39,20	3,95	0,07	103,90	4,23	47,61	geruchlos	leicht gelb	keine	11:42	2060	05.04.2016
Fr. 2	18,6	7,77	775	18,50	4,62	8,80	111,10	4,65	50,92	geruchlos	leicht gelb	keine	12:12	2040	05.04.2016
Fr. 3	18,7	8,86	808	29,00	9,32	14,45	120,50	5,37	72,90	leicht sandig	gelb	keine	12:42	2040	05.04.2016
Fr. 4	18,7	9,21	831	31,80	15,24	13,51	110,30	4,95	94,33	leicht sandig	dunkel gelb	leichte Sb	13:12	2020	05.04.2016
Fr. 5	18,8	9,38	846	28,10	15,51	11,75	109,10	4,50	103,80	sandig	gelb-braun	leichte Sb	13:42	1960	05.04.2016
Fr. 6	18,9	9,41	849	22,50	15,96	10,72	103,90	4,36	105,60	sandig	gelb-braun	leichte Sb	14:12	2020	05.04.2016
Fr. 7	18,8	9,47	857	19,60	17,39	10,46	100,60	4,12	108,40	sandig	gelb-braun	leichte Sb	14:42	1920	05.04.2016
Fr. 8	18,9	9,51	866	16,70	17,63	10,11	90,05	4,04	107,20	sandig	goldbraun	leichte Sb	15:12	1940	05.04.2016
Fr. 9	18,9	9,51	867	15,10	19,60	9,62	86,36	3,84	102,60	sandig	goldbraun	leichte Sb	15:42	2020	05.04.2016
Fr. 10	19,0	9,49	866	15,70	19,51	9,12	80,92	3,67	100,30	sandig	goldbraun	leichte Sb	16:12	2020	05.04.2016
Fr. 11	18,9	9,56	887	17,40	22,51	9,32	85,49	3,72	108,70	sandig	goldbraun	leichte Sb	16:42	2000	05.04.2016
Fr. 12	19,0	9,55	884	18,90	19,05	8,31	85,68	3,62	107,20	sandig	goldbraun	leichte Sb	17:12	2040	05.04.2016
Fr. 13	18,5	9,14	807	n.b.	6,58	2,00	68,63	3,41	69,83	leicht sandig	leicht gelb	leichte Sb	09:35	2020	06.04.2016
Fr. 14	18,5	7,95	764	11,30	3,98	0,24	78,29	3,46	48,91	leicht sandig	hellgelb	leichte Sb	09:42	2000	07.04.2016
Fr. 15	18,4	7,76	760	5,10	4,29	0,20	79,27	4,99	48,96	leicht sandig	leicht hellgelb	keine	15:40	2020	07.04.2016
Fr. 16	18,8	7,73	748	7,80	4,56	0,12	77,97	3,36	45,04	leicht sandig	nz leicht hellgelb	keine	09:22	2000	08.04.2016
Parallele A Fraktionen	Temp. [°C]	pH-Wert	elektr. Leitf. [µS/cm]	Trübung [FNU]	TOC [mg/l]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	K [mg/l]	Na [mg/l]	Geruch	Farbe	z. Schaum	Entnahmekzeit- punkt [h:min]	Entnahme- volumen [ml]	Datum
EW 1	15,2	7,67	764	< 1	3,58	0,00	103,10	3,94	48,73	geruchlos	farblos	keine	17:00	500	05.04.2016
EW 2	16,7	7,63	753	< 1	3,77	0,00	103,40	3,90	46,89	geruchlos	farblos	keine	09:05	500	07.04.2016
EW 3	18,4	7,60	743	< 1	4,16	0,00	103,20	4,00	45,20	geruchlos	farblos	keine	09:30	500	08.04.2016

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Tabelle B-2: Ergebnisse der Weichgelinjektion in Frechener Feinsand (FR36) im Versuch ST 1

Parallele B Fraktionen	Temp. [°C]	pH-Wert	elektr. Leitf. [µS/cm]	Trübung [FNU]	TOC [mg/l]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	K [mg/l]	Na [mg/l]	Geruch	Farbe	z. Schaum	Entnahmekzeit- punkt [h:min]	Entnahme- volumen [ml]	Datum
BW	19,2	7,46	760	< 1	3,35	0,00	102,00	3,97	47,41	geruchlos	farblos	keine	09:45	2000	05.04.2016
Fr. 1	19,3	7,33	762	< 1	4,65	0,00	102,90	3,89	47,28	geruchlos	farblos	keine	11:16	2000	05.04.2016
Fr. 2	19,2	7,49	761	< 1	4,57	0,00	102,50	3,95	47,29	geruchlos	farblos	keine	11:46	2020	05.04.2016
Fr. 3	19,3	7,45	760	< 1	3,54	0,00	99,42	3,88	46,68	geruchlos	farblos	keine	12:16	1980	05.04.2016
Fr. 4	19,3	7,53	767	< 1	4,48	0,95	97,67	3,98	50,92	geruchlos	farblos	keine	12:46	2020	05.04.2016
Fr. 5	19,2	9,19	822	< 1	5,04	5,04	95,17	3,81	84,89	geruchlos	farblos	keine	13:16	2000	05.04.2016
Fr. 6	19,4	9,49	856	< 1	4,96	6,60	64,02	3,92	104,80	geruchlos	farblos	keine	13:46	2020	05.04.2016
Fr. 7	19,2	9,60	884	< 1	4,38	7,60	59,69	3,82	114,10	geruchlos	farblos	keine	14:16	1980	05.04.2016
Fr. 8	19,0	9,66	904	< 1	4,05	8,03	46,44	3,75	118,60	geruchlos	farblos	keine	14:46	2020	05.04.2016
Fr. 9	19,0	9,62	898	< 1	4,47	7,49	39,45	3,66	116,80	geruchlos	farblos	keine	15:16	2020	05.04.2016
Fr. 10	19,1	9,63	836	< 1	4,25	6,69	39,46	3,55	112,90	geruchlos	farblos	keine	15:46	2020	05.04.2016
Fr. 11	19,1	9,60	883	< 1	3,99	6,16	32,16	3,46	109,90	geruchlos	farblos	keine	16:16	2000	05.04.2016
Fr. 12	18,4	9,50	878	< 1	5,15	5,25	71,13	3,47	102,50	geruchlos	farblos	keine	16:46	2020	05.04.2016
Fr. 13	18,1	8,52	783	< 1	3,79	0,12	78,29	3,36	52,97	geruchlos	farblos	keine	09:35	2020	06.04.2016
Fr. 14	18,3	8,01	767	< 1	4,65	0,00	76,28	3,36	46,28	geruchlos	farblos	keine	09:42	2020	07.04.2016
Fr. 15	18,5	7,92	766	< 1	3,66	0,01	80,58	3,29	45,92	geruchlos	farblos	keine	15:40	2040	07.04.2016
Fr. 16	18,5	7,84	753	< 1	4,49	0,00	79,48	3,22	43,80	geruchlos	farblos	keine	09:22	2020	08.04.2016
Parallele B Fraktionen	Temp. [°C]	pH-Wert	elektr. Leitf. [µS/cm]	Trübung [FNU]	TOC [mg/l]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	K [mg/l]	Na [mg/l]	Geruch	Farbe	z. Schaum	Entnahmekzeit- punkt [h:min]	Entnahme- volumen [ml]	Datum
EW 1	15,2	7,67	764	< 1	3,58	0,00	103,10	3,94	48,73	geruchlos	farblos	keine	17:00	500	05.04.2016
EW 2	16,7	7,63	753	< 1	3,77	0,00	103,40	3,90	46,89	geruchlos	farblos	keine	09:05	500	07.04.2016
EW 3	18,4	7,60	743	< 1	4,16	0,00	103,20	4,00	45,20	geruchlos	farblos	keine	09:30	500	08.04.2016

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Tabelle B-3: Ergebnisse der Weichgelineinjektion in Baugrundsand + 1% Kohlereibsel (BG+1%K) im Versuch ST 1

Parallele C Fraktionen	Temp. [°C]	pH-Wert	elektr. Leitf. [µS/cm]	Trübung [FNU]	TOC [mg/l]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	K [mg/l]	Na [mg/l]	Geruch	Farbe	z. Schaum	Entnahmezeit- punkt [h:min]	Entnahme- volumen [ml]	Datum
BW	19,4	7,41	754	1,77	4,01	0,00	101,30	4,23	47,49	geruchlos	farblos	keine	09:45	2000	05.04.2016
Fr. 1	19,5	7,32	758	4,00	4,37	0,00	102,70	4,30	47,87	geruchlos	farblos	keine	12:07	1980	05.04.2016
Fr. 2	19,4	7,31	757	1,73	4,12	0,01	100,90	4,27	47,40	geruchlos	farblos	keine	12:37	2020	05.04.2016
Fr. 3	19,5	7,68	757	7,82	4,66	2,43	99,76	4,34	47,00	geruchlos	farblos	keine	13:07	1960	05.04.2016
Fr. 4	19,4	7,70	761	11,20	4,73	9,04	104,10	4,80	51,06	geruchlos	farblos	keine	13:37	2020	05.04.2016
Fr. 5	19,4	7,48	779	36,90	9,24	11,64	101,20	5,11	59,94	geruchlos	leicht bräunl.	keine	14:07	2040	05.04.2016
Fr. 6	19,5	8,16	793	48,40	13,47	11,63	103,10	4,99	65,45	leicht sandig	gelbbraun	leichte Sb	14:37	2020	05.04.2016
Fr. 7	19,5	8,36	802	53,50	19,11	10,70	98,98	4,54	69,52	leicht sandig	gelbbraun	leichte Sb	15:07	1960	05.04.2016
Fr. 8	19,5	8,73	808	50,20	20,84	10,12	89,00	4,33	71,72	leicht sandig	goldbraun	leichte Sb	15:37	2000	05.04.2016
Fr. 9	19,5	8,83	812	45,10	25,34	9,51	85,57	4,17	73,12	leicht sandig	goldbraun	leichte Sb	16:07	2000	05.04.2016
Fr. 10	19,0	8,92	816	42,60	21,24	9,12	88,56	3,93	74,77	leicht sandig	goldbraun	leichte Sb	16:37	1900	05.04.2016
Fr. 11	19,1	8,95	819	38,20	25,31	8,58	88,95	3,90	74,83	leicht sandig	goldbraun	leichte Sb	17:07	1940	05.04.2016
Fr. 12	19,1	8,97	817	35,60	21,56	8,04	86,29	3,63	73,06	leicht sandig	goldbraun	leichte Sb	17:37	2000	05.04.2016
Fr. 13	18,6	8,73	796	7,10	8,82	1,08	79,10	3,43	59,87	leicht sandig	gelbgold	leichte Sb	09:35	2040	06.04.2016
Fr. 14	18,4	7,97	769	3,70	4,07	0,23	78,57	3,33	49,19	leicht sandig	hellgelb	keine	09:42	2060	07.04.2016
Fr. 15	18,3	7,83	774	4,50	6,44	0,08	77,87	3,27	46,97	leicht sandig	hellgelb	keine	15:40	2040	07.04.2016
Fr. 16	18,5	7,79	753	3,20	4,28	0,12	77,79	3,42	45,98	leicht sandig	leicht hellgelb	keine	09:22	2020	08.04.2016

Parallele C Fraktionen	Temp. [°C]	pH-Wert	elektr. Leitf. [µS/cm]	Trübung [FNU]	TOC [mg/l]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	K [mg/l]	Na [mg/l]	Geruch	Farbe	z. Schaum	Entnahmezeit- punkt [h:min]	Entnahme- volumen [ml]	Datum
EW 1	15,2	7,67	764	< 1	3,58	0,00	103,10	3,94	48,73	geruchlos	farblos	keine	17:00	500	05.04.2016
EW 2	16,7	7,63	753	< 1	3,77	0,00	103,40	3,90	46,89	geruchlos	farblos	keine	09:05	500	07.04.2016
EW 3	18,4	7,60	743	< 1	4,16	0,00	103,20	4,00	45,20	geruchlos	farblos	keine	09:30	500	08.04.2016

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Tabelle B-4: Ergebnisse der Weichgelinjektion in Frechener Feinsand + 1% Kohlereibsel (FR36+1%K) im Versuch ST 2

Parallele A Fraktionen	Temp. [°C]	pH-Wert	elektr. Leitf. [µS/cm]	Trübung [FNU]	TOC [mg/l]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	K [mg/l]	Na [mg/l]	Geruch	Farbe	N. z. Schaumb.	Entnahmezeit- punkt [h:min]	Entnahme- volumen [ml]	Datum
BW	19,2	7,60	746	< 1	3,14	0,00	110,00	3,54	40,24	geruchlos	farblos	keine	08:15	2020	19.05.2016
Fr. 1	19,1	7,44	746	< 1	3,89	0,00	124,20	3,87	46,18	geruchlos	farblos	keine	10:37	2020	19.05.2016
Fr. 2	19,0	7,42	740	< 1	3,72	0,00	122,10	3,87	47,39	geruchlos	farblos	keine	11:07	2040	19.05.2016
Fr. 3	19,3	7,48	740	< 1	3,85	0,00	112,20	3,52	46,19	geruchlos	farblos	keine	11:37	2040	19.05.2016
Fr. 4	19,3	7,43	744	< 1	4,14	1,18	139,70	3,48	47,46	geruchlos	farblos	leichte Sb	12:07	2040	19.05.2016
Fr. 5	19,4	7,63	751	1,14	4,85	1,98	135,90	3,34	51,30	geruchlos	leicht gelblich	leichte Sb	12:37	2000	19.05.2016
Fr. 6	19,5	7,69	757	1,30	5,61	2,44	140,90	3,44	56,04	geruchlos	gelblich	leichte Sb	13:07	2020	19.05.2016
Fr. 7	19,6	7,98	763	1,84	7,19	3,45	149,20	3,43	64,72	geruchlos	gelblich	Sb	13:37	2040	19.05.2016
Fr. 8	19,4	8,25	769	1,86	6,91	3,94	147,20	3,37	69,45	geruchlos	golden	Sb	14:07	2020	19.05.2016
Fr. 9	19,5	8,41	773	1,93	8,17	4,18	146,10	3,60	75,60	geruchlos	golden	Sb	14:37	2020	19.05.2016
Fr. 10	19,4	8,53	776	2,18	8,68	4,53	142,50	3,36	85,75	geruchlos	golden	Sb	15:07	2040	19.05.2016
Fr. 11	19,3	8,65	780	2,38	9,72	5,13	136,30	3,31	93,83	geruchlos	golden	Sb	15:37	2040	19.05.2016
Fr. 12	19,2	8,79	784	3,04	10,56	5,50	133,20	3,27	97,76	geruchlos	golden	Sb	16:07	2040	19.05.2016
12-2	19,4	9,14	799	2,78	14,05	6,49	83,94	2,85	107,00	geruchlos	dunkelgold	Sb	17:07	2020	19.05.2016
12-3	19,1	9,20	799	2,61	13,73	5,32	94,47	3,46	112,70	geruchlos	dunkelgold	Sb	18:07	2000	19.05.2016
Fr. 13	18,1	8,37	760	< 1	6,06	0,06	152,30	3,21	67,07	geruchlos	leicht gelblich	keine	08:00	2020	20.05.2016
Fr. 14	19,2	8,26	763	< 1	4,40	0,25	135,50	3,12	71,40	geruchlos	leicht gelblich	keine	15:45	2040	20.05.2016
Fr. 15	19,7	7,99	768	< 1	4,07	0,00	141,70	3,11	63,31	geruchlos	fast klar	keine	17:00	2060	21.05.2016
Fr. 16	20,3	7,72	751	< 1	3,80	0,00	146,20	3,14	58,02	geruchlos	farblos	keine	07:30	2040	23.05.2016
Parallele A - Fraktionen	Temp. [°C]	pH-Wert	elektr. Leitf. [µS/cm]	Trübung [FNU]	TOC [mg/l]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	K [mg/l]	Na [mg/l]	Geruch	Farbe	N. z. Schaumb.	Entnahmezeit- punkt [h:min]	Entnahme- volumen [ml]	Datum
EW 1	17,2	7,46	746	< 1	3,67	0,00	163,00	3,07	47,38	geruchlos	farblos	keine	07:45	500	20.05.2016

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Tabelle B-5: Ergebnisse der Weichgelineinjektion in Frechener Feinsand + 2,5% Kohlereibsel (FR36+2,5%K) im Versuch ST 2

Parallele B Fraktionen	Temp. [°C]	pH-Wert	elektr. Leitf. [µS/cm]	Trübung [FNU]	TOC [mg/l]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	K [mg/l]	Na [mg/l]	Geruch	Farbe	N. z. Schaumb.	Entnahmezeit- punkt [h:min]	Entnahme- volumen [ml]	Datum
BW	19,0	7,41	727	< 1	3,77	0,00	113,80	3,77	43,77	geruchlos	farblos	keine	08:15	2000	19.05.2016
Fr. 1	19,0	7,22	721	< 1	3,75	0,00	118,90	3,83	46,84	geruchlos	farblos	keine	11:07	2020	19.05.2016
Fr. 2	19,0	7,30	727	< 1	4,15	0,00	109,60	3,73	50,93	geruchlos	farblos	keine	11:37	2040	19.05.2016
Fr. 3	19,0	7,28	722	< 1	4,45	0,31	135,80	3,61	45,86	geruchlos	farblos	keine	12:07	2040	19.05.2016
Fr. 4	19,1	7,26	731	3,13	6,25	4,04	132,40	3,35	49,16	geruchlos	leicht gelblich	leichte Sb	12:37	1980	19.05.2016
Fr. 5	19,3	7,72	762	8,68	16,29	7,74	134,10	3,43	64,46	geruchlos	goldbraun	leichte Sb	13:07	2020	19.05.2016
Fr. 6	19,3	8,73	791	10,10	26,09	9,99	139,60	3,48	89,04	leicht organisch	goldbraun	Sb	13:37	2020	19.05.2016
Fr. 7	19,3	9,07	808	11,30	24,71	10,55	106,60	3,44	111,50	geruchlos	goldbraun	Sb	14:07	2000	19.05.2016
Fr. 8	19,2	9,25	823	11,80	23,26	10,32	81,38	3,65	124,70	geruchlos	goldbraun	Sb	14:37	2020	19.05.2016
Fr. 9	19,1	9,36	840	11,20	22,00	9,81	67,85	3,62	134,80	leicht organisch	goldbraun	Sb	15:07	1980	19.05.2016
Fr. 10	19,3	9,41	846	8,35	20,56	8,97	56,16	3,40	131,80	leicht organisch	goldbraun	Sb	15:37	1980	19.05.2016
Fr. 11	19,0	9,46	854	7,94	19,10	8,01	53,60	3,48	139,50	leicht organisch	goldbraun	Sb	16:07	2000	19.05.2016
Fr. 12	19,1	9,44	845	7,51	15,92	6,66	55,07	3,31	133,20	leicht organisch	goldbraun	Sb	16:37	2020	19.05.2016
Fr. 13	18,4	8,46	767	2,40	7,17	0,12	150,50	3,29	72,56	geruchlos	gelblich	leichte Sb	08:00	2000	20.05.2016
Fr. 14	19,0	8,18	770	1,73	5,01	0,03	142,10	3,02	66,33	geruchlos	gelblich	leichte Sb	15:45	1980	20.05.2016
Fr. 15	19,6	7,87	767	< 1	4,47	0,01	143,30	3,21	64,28	geruchlos	leicht gelblich	keine	17:00	1940	21.05.2016
Fr. 16	20,5	7,99	768	< 1	7,11	0,04	138,40	3,17	69,36	geruchlos	leicht gelblich	keine	07:30	1940	23.05.2016
Parallele B - Fraktionen	Temp. [°C]	pH-Wert	elektr. Leitf. [µS/cm]	Trübung [FNU]	TOC [mg/l]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	K [mg/l]	Na [mg/l]	Geruch	Farbe	N. z. Schaumb.	Entnahmezeit- punkt [h:min]	Entnahme- volumen [ml]	Datum
EW 1	17,2	7,46	746	< 1	3,67	0,00	153,00	3,07	47,38	geruchlos	farblos	keine	07:45	500	20.05.2016

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Tabelle B-6: Ergebnisse der Weichgelinjektion in Frechener Feinsand + 5% Kohlereibsel (FR36+5%K) im Versuch ST 2

Parallele C Fraktionen	Temp. [°C]	pH-Wert	elektr. Leitf. [µS/cm]	Trübung [FNU]	TOC [mg/l]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	K [mg/l]	Na [mg/l]	Geruch	Farbe	N. z. Schaumb.	Entnahmezeit- punkt [h:min]	Entnahme- volumen [ml]	Datum
BW	19,3	5,81	491	13,40	8,37	0,00	73,87	4,54	53,94	geruchlos	leicht gelblich	keine	08:15	1960	19.05.2016
Fr. 1	19,3	5,58	475	13,70	6,24	0,08	32,75	4,36	55,60	geruchlos	leicht gelblich	keine	11:46	1960	19.05.2016
Fr. 2	19,6	5,60	477	11,40	7,32	0,00	32,26	4,37	56,57	geruchlos	leicht gelblich	keine	12:16	2000	19.05.2016
Fr. 3	19,7	5,71	475	12,60	5,88	0,66	29,62	3,91	50,68	geruchlos	leicht gelblich	keine	12:46	2020	19.05.2016
Fr. 4	19,8	5,91	487	10,30	8,04	5,29	35,01	3,87	51,60	geruchlos	leicht gelblich	keine	13:16	2040	19.05.2016
Fr. 5	19,7	6,18	516	13,00	25,25	8,76	39,94	3,76	62,14	geruchlos	leicht gelblich	Sb	13:46	2020	19.05.2016
Fr. 6	19,8	6,44	566	14,70	37,45	10,43	46,67	3,77	77,71	geruchlos	goldbraun	Sb	14:16	2040	19.05.2016
Fr. 7	19,9	6,56	604	14,20	45,29	10,46	55,13	3,83	92,55	geruchlos	goldbraun	Sb	14:46	2020	19.05.2016
Fr. 8	19,8	6,72	635	19,40	48,77	10,05	58,05	3,75	100,00	leicht organisch	goldbraun	Sb	15:16	2000	19.05.2016
Fr. 9	19,8	7,04	668	17,90	44,73	9,47	60,88	3,51	107,60	leicht organisch	braun	Sb	15:46	2020	19.05.2016
Fr. 10	19,5	7,13	714	15,30	43,76	8,57	64,73	3,59	113,20	leicht organisch	braun	Sb	16:16	2000	19.05.2016
Fr. 11	19,5	7,21	726	13,20	41,36	7,26	67,74	3,46	115,80	leicht organisch	braun	Sb	16:46	2040	19.05.2016
Fr. 12	19,6	7,34	730	13,80	36,51	6,09	73,57	3,57	119,10	leicht organisch	braun	Sb	17:16	2020	19.05.2016
12-2	19,6	7,41	728	11,20	31,17	4,94	76,44	3,54	115,80	geruchlos	goldbraun	Sb	17:46	2020	19.05.2016
12-3	19,4	7,37	733	8,73	29,34	4,02	75,97	3,30	106,60	geruchlos	goldbraun	Sb	18:16	2040	19.05.2016
Fr. 13	18,7	7,52	700	7,72	14,97	0,69	110,40	3,39	88,37	geruchlos	golden	leichte Sb	08:00	1960	20.05.2016
Fr. 14	20,0	7,28	748	6,89	17,81	0,43	104,40	3,20	74,73	geruchlos	golden	leichte Sb	15:45	1960	20.05.2016
Fr. 15	19,9	7,54	738	< 1	6,07	0,04	132,10	3,19	66,89	geruchlos	leicht gelblich	keine	17:00	1960	21.05.2016
Fr. 16	20,3	7,58	753	< 1	4,32	0,00	139,60	3,06	57,52	geruchlos	farblos	keine	07:30	1980	23.05.2016

Parallele C - I Fraktionen	Temp. [°C]	pH-Wert	elektr. Leitf. [µS/cm]	Trübung [FNU]	TOC [mg/l]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	K [mg/l]	Na [mg/l]	Geruch	Farbe	N. z. Schaumb.	Entnahmezeit- punkt [h:min]	Entnahme- volumen [ml]	Datum
EW 1	17,2	7,46	746	< 1	3,67	0,00	153,00	3,07	47,38	geruchlos	farblos	keine	07:45	500	20.05.2016

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

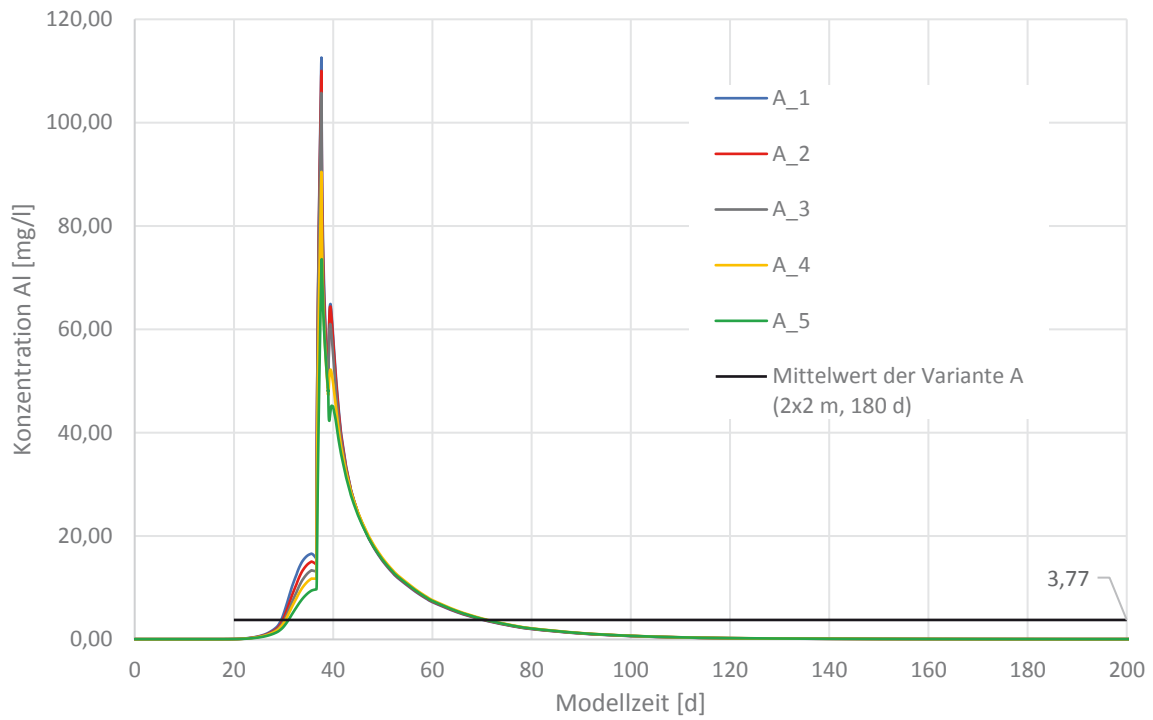


Abbildung C1: Aluminiumkonzentration, 0,05 m unterhalb der Sohle, Variante A.

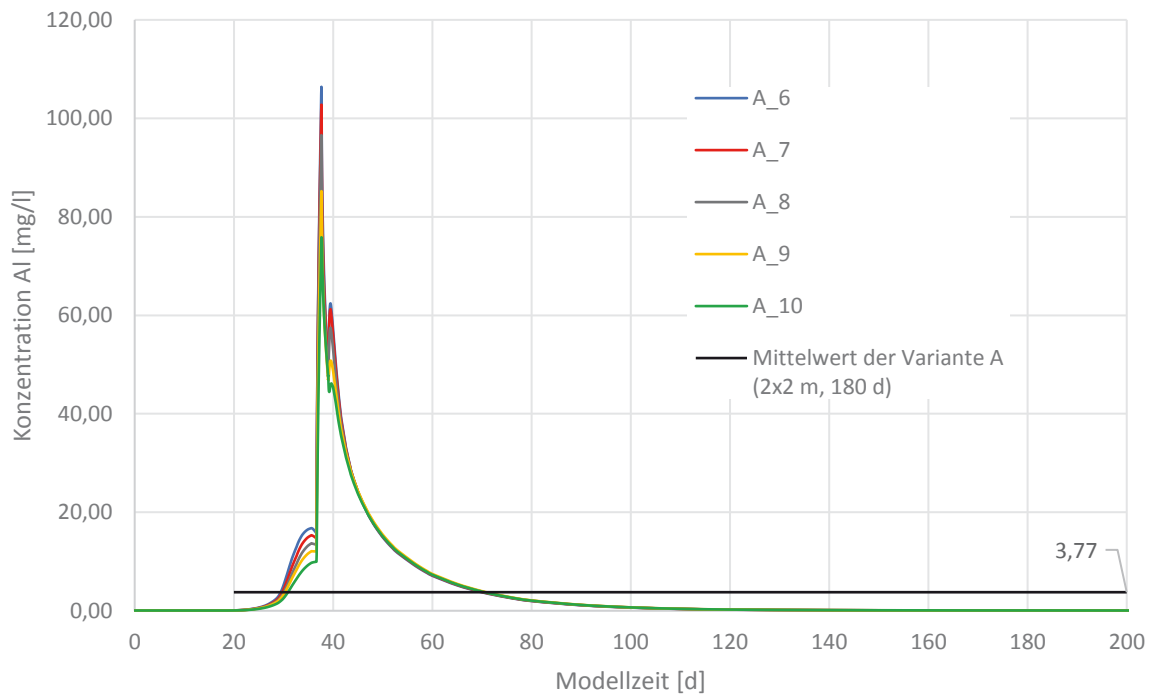


Abbildung C2: Aluminiumkonzentration, 0,10 m unterhalb der Sohle, Variante A.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

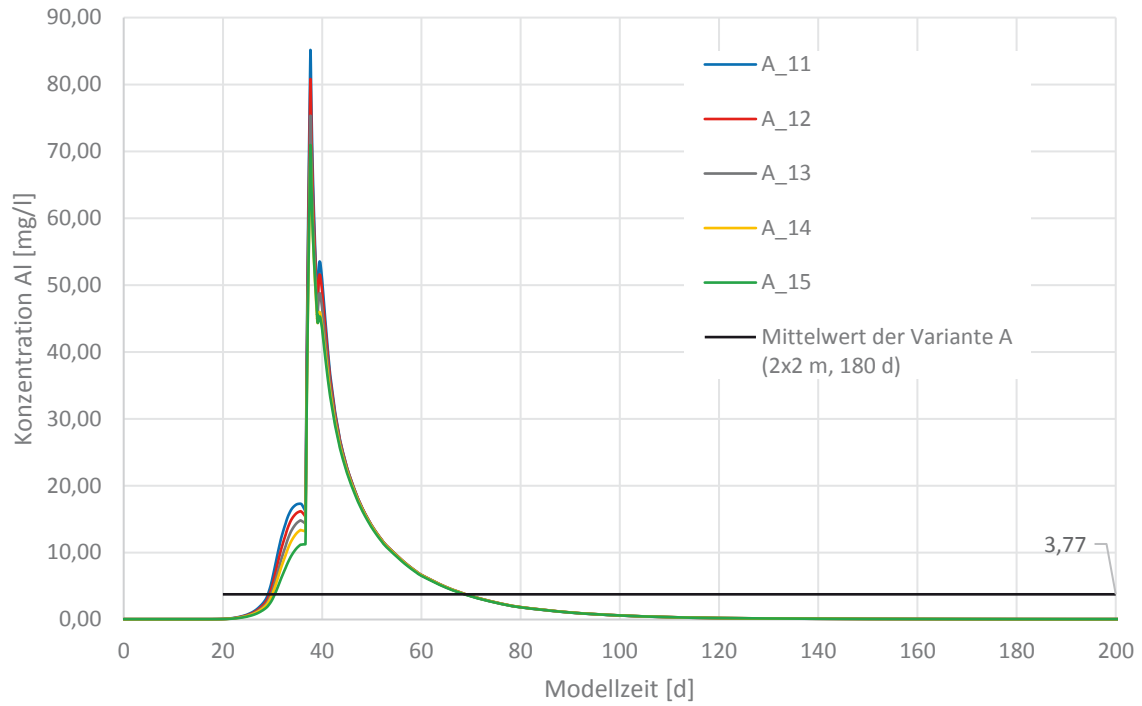


Abbildung C3: Aluminiumkonzentration, 0,30 m unterhalb der Sohle, Variante A.

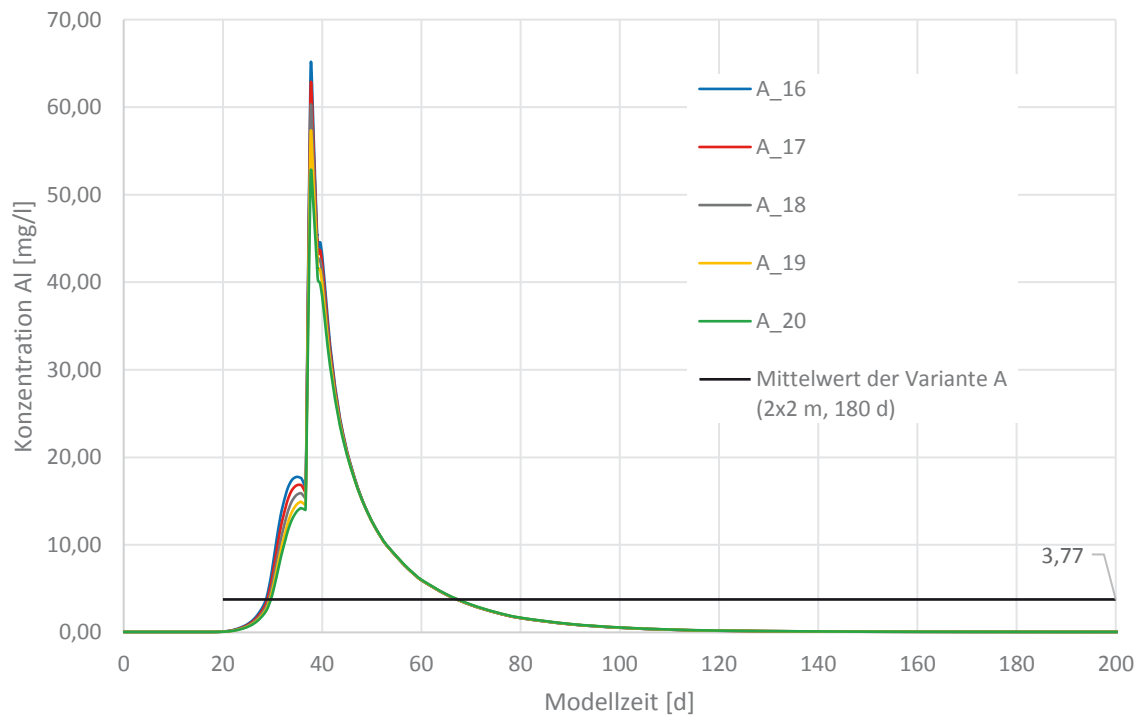


Abbildung C4: Aluminiumkonzentration, 0,60 m unterhalb der Sohle, Variante A.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

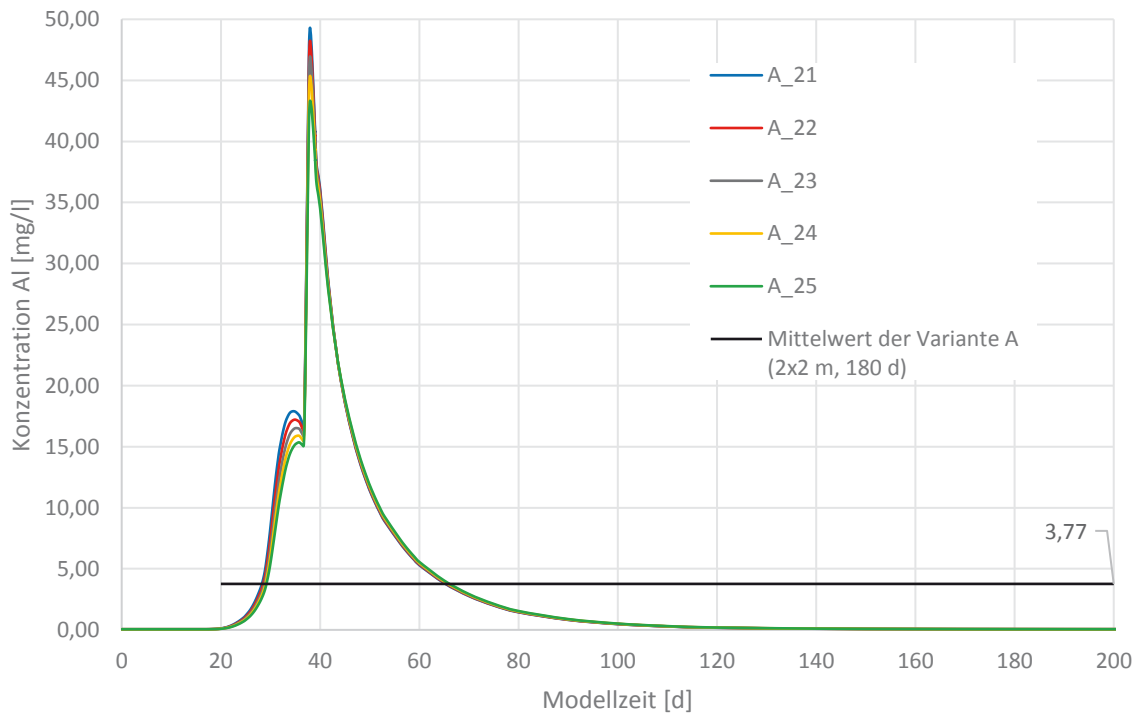


Abbildung C5: Aluminiumkonzentration, 1,00 m unterhalb der Sohle, Variante A.

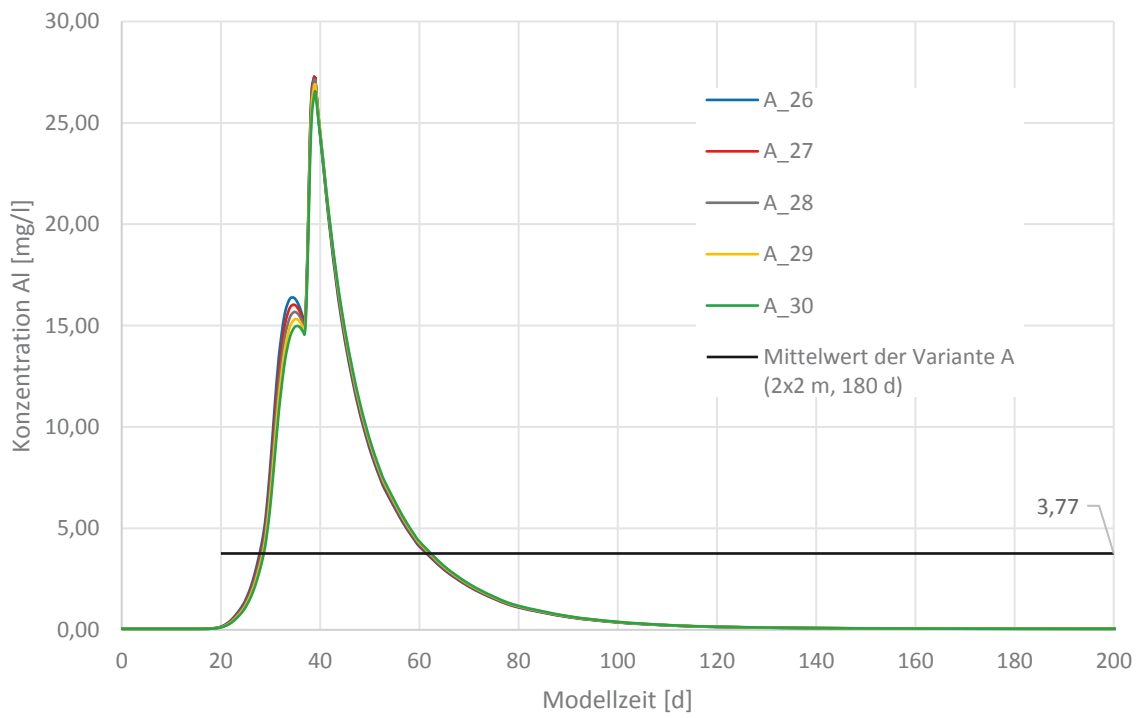


Abbildung C6: Aluminiumkonzentration, 2,00 m unterhalb der Sohle, Variante A.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

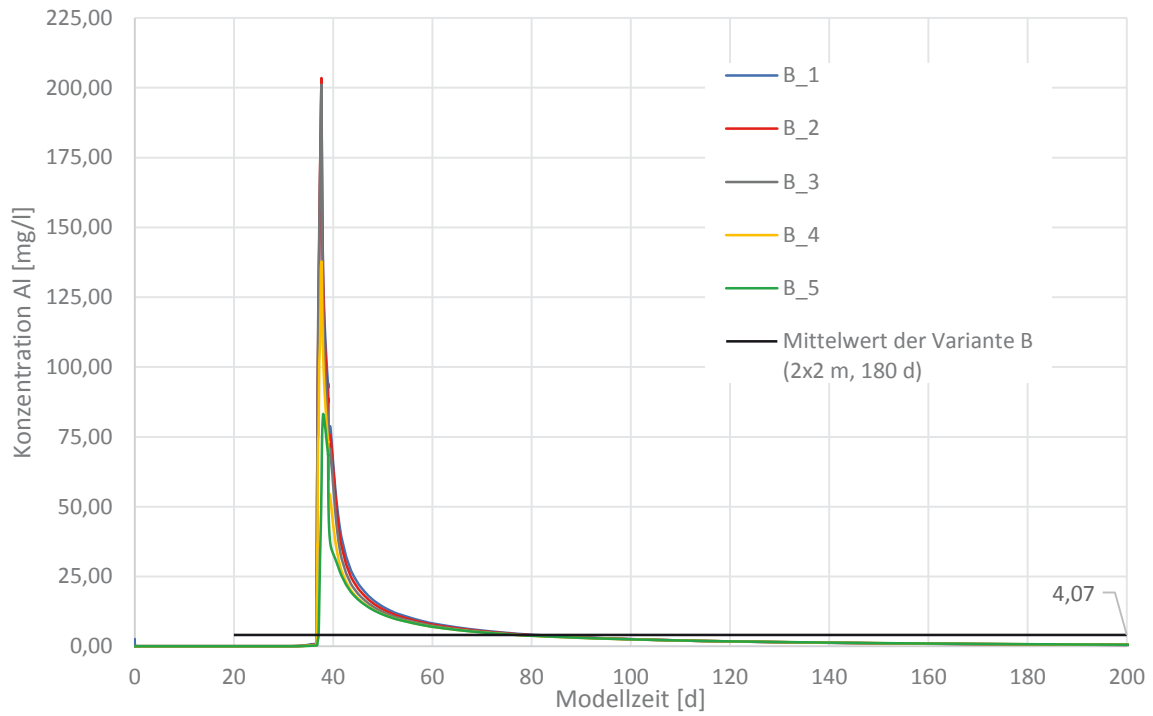


Abbildung C7: Aluminiumkonzentration, 0,05 m unterhalb der Sohle, Variante B.

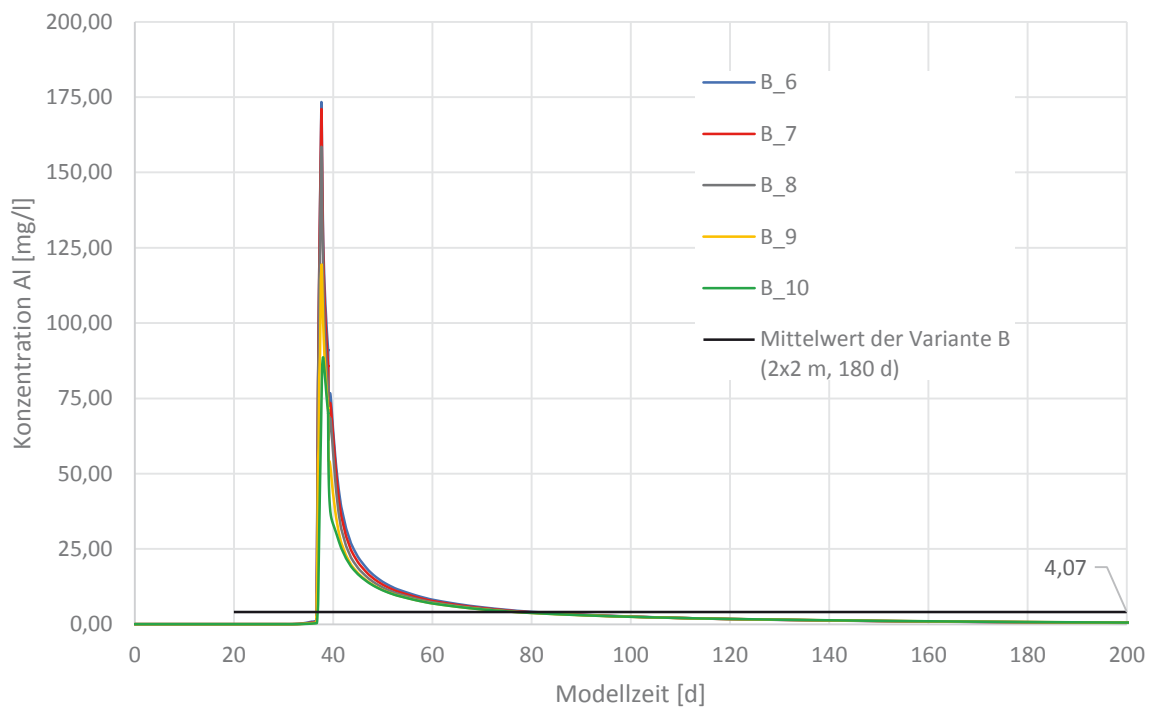


Abbildung C8: Aluminiumkonzentration, 0,10 m unterhalb der Sohle, Variante B.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

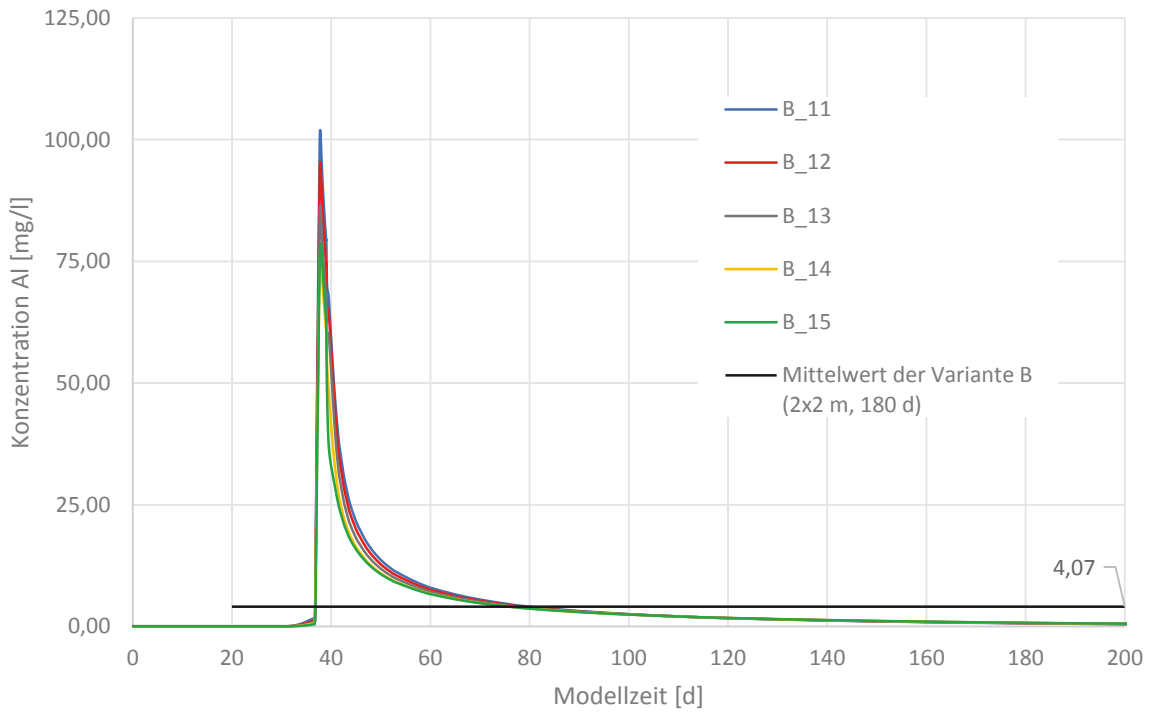


Abbildung C9: Aluminiumkonzentration, 0,30 m unterhalb der Sohle, Variante B.

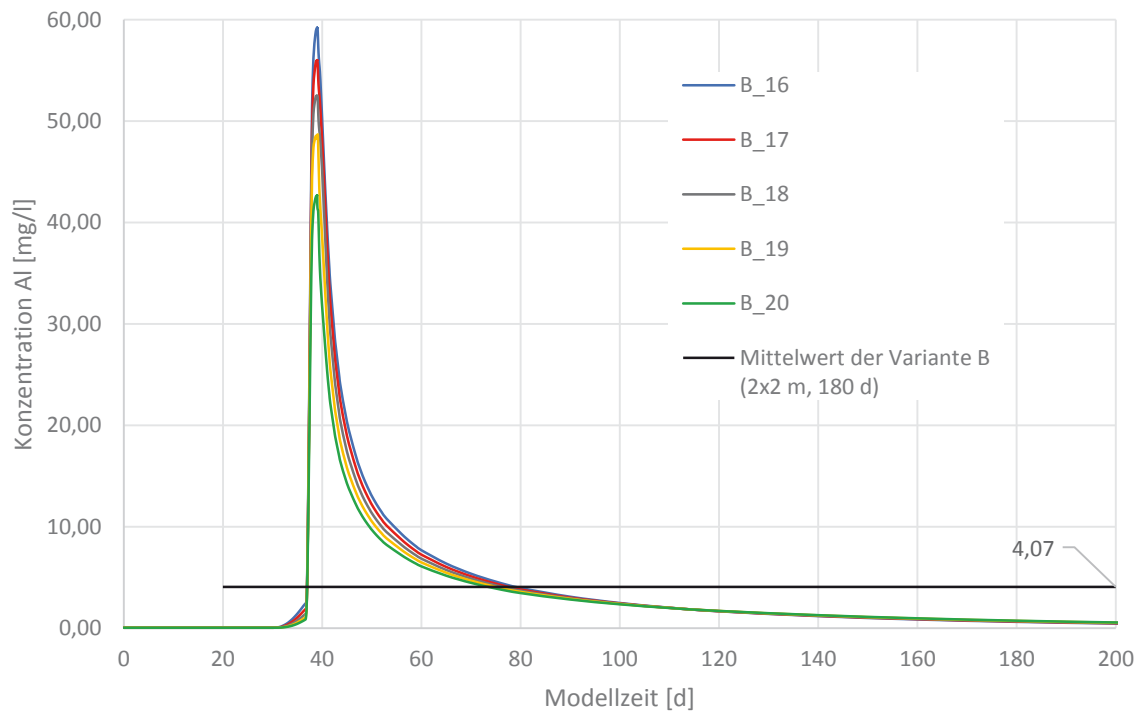


Abbildung C10: Aluminiumkonzentration, 0,60 m unterhalb der Sohle, Variante B.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

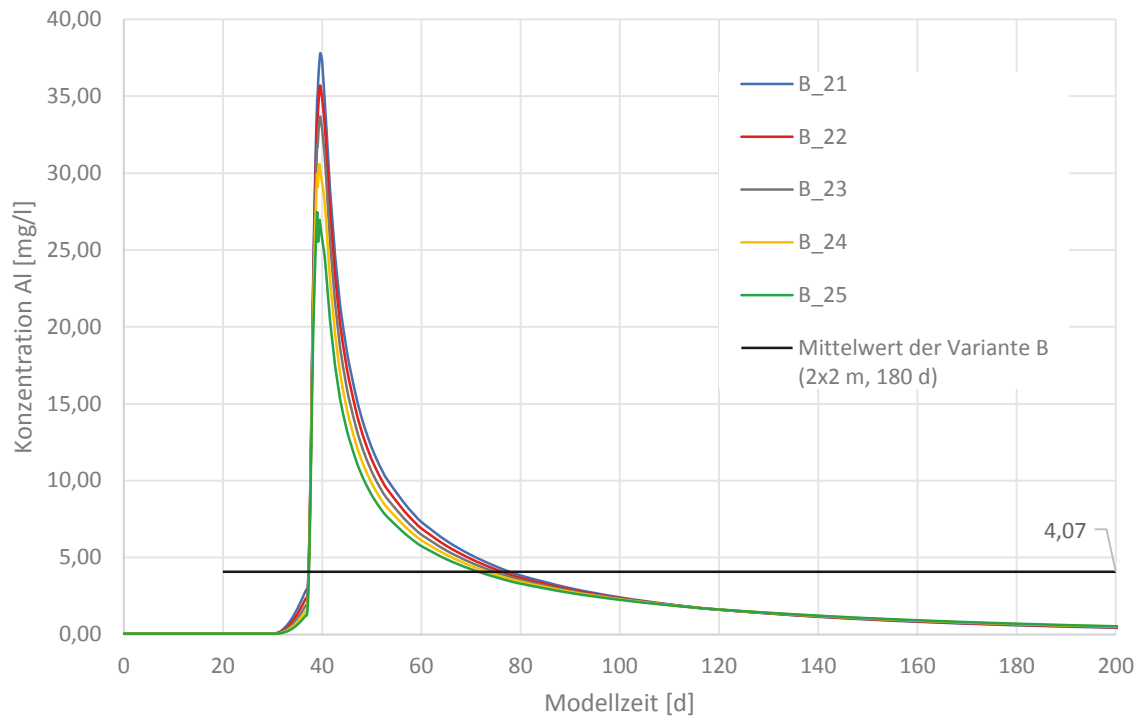


Abbildung C11: Aluminiumkonzentration, 1,00 m unterhalb der Sohle, Variante B.

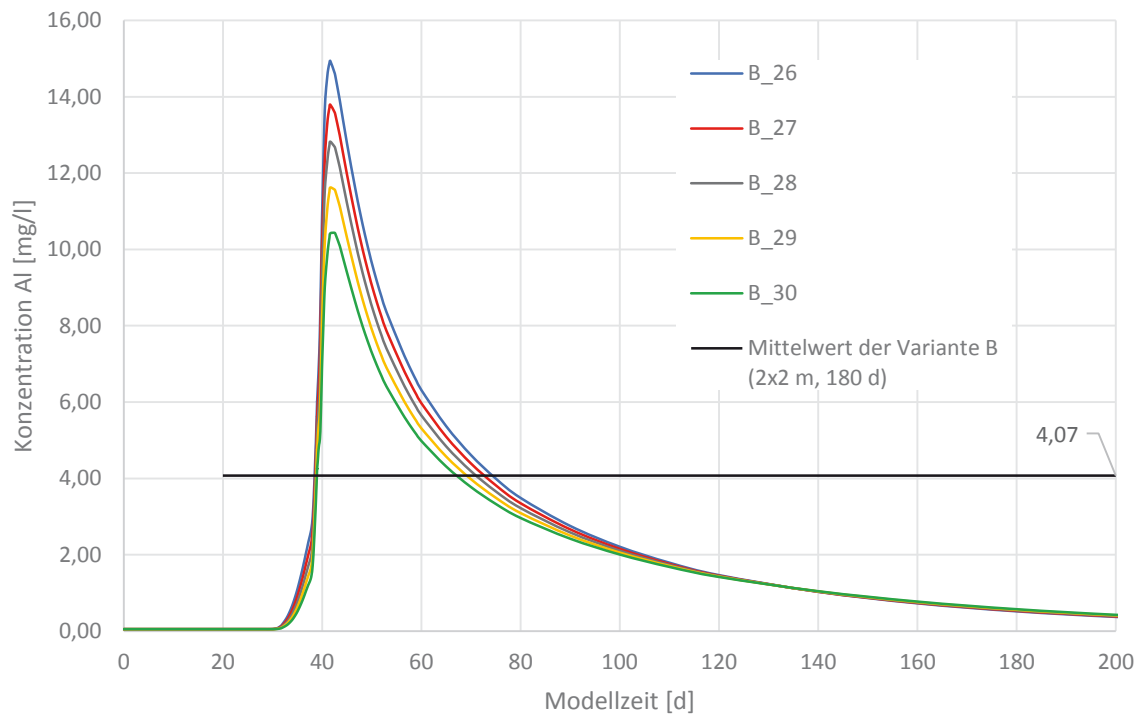


Abbildung C12: Aluminiumkonzentration, 2,00 m unterhalb der Sohle, Variante B.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

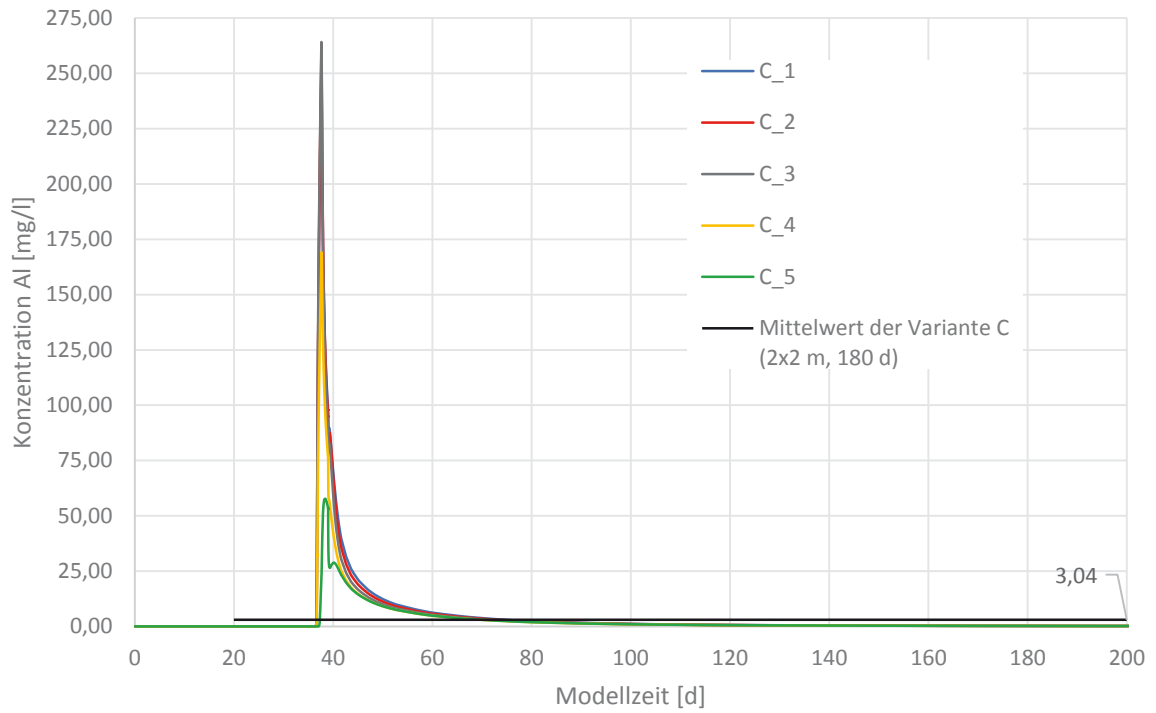


Abbildung C13: Aluminiumkonzentration, 0,05 m unterhalb der Sohle, Variante C.

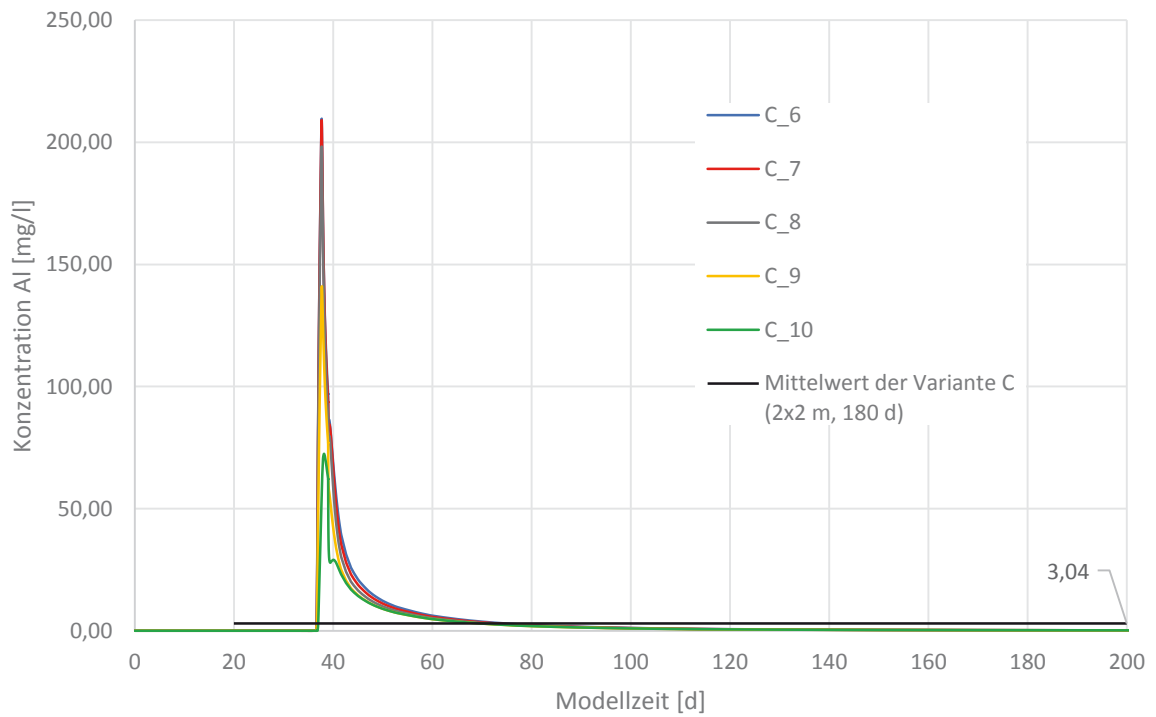


Abbildung C14: Aluminiumkonzentration, 0,10 m unterhalb der Sohle, Variante C.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

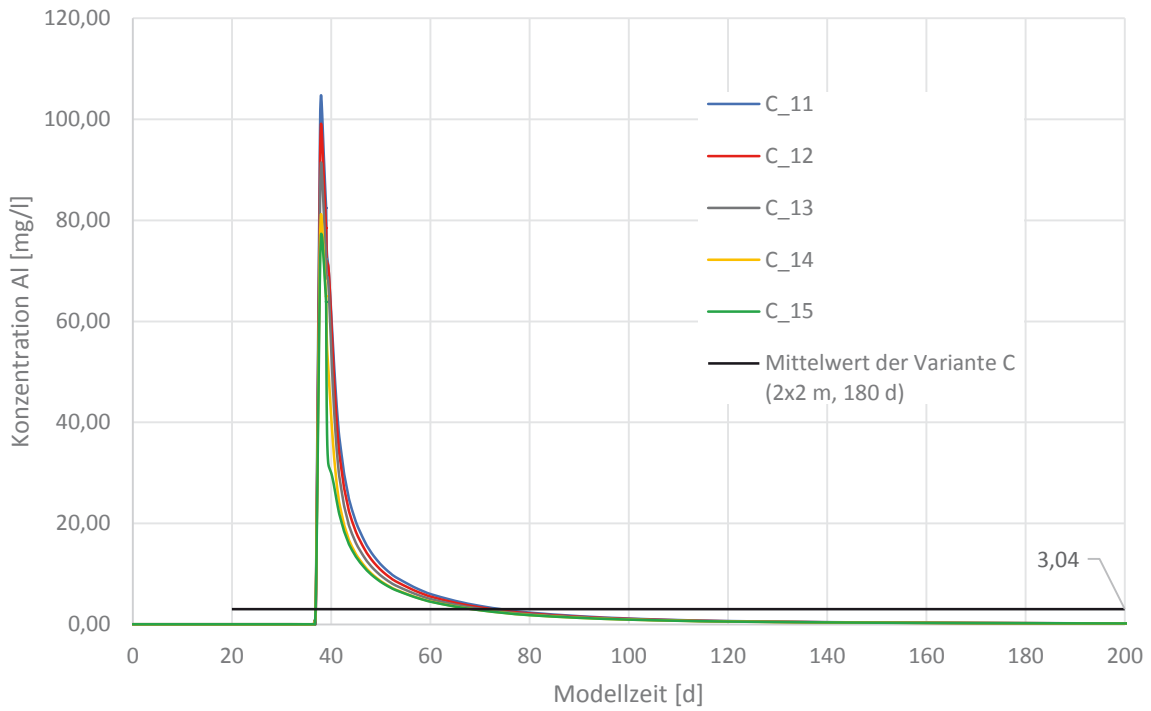


Abbildung C15: Aluminiumkonzentration, 0,30 m unterhalb der Sohle, Variante C.

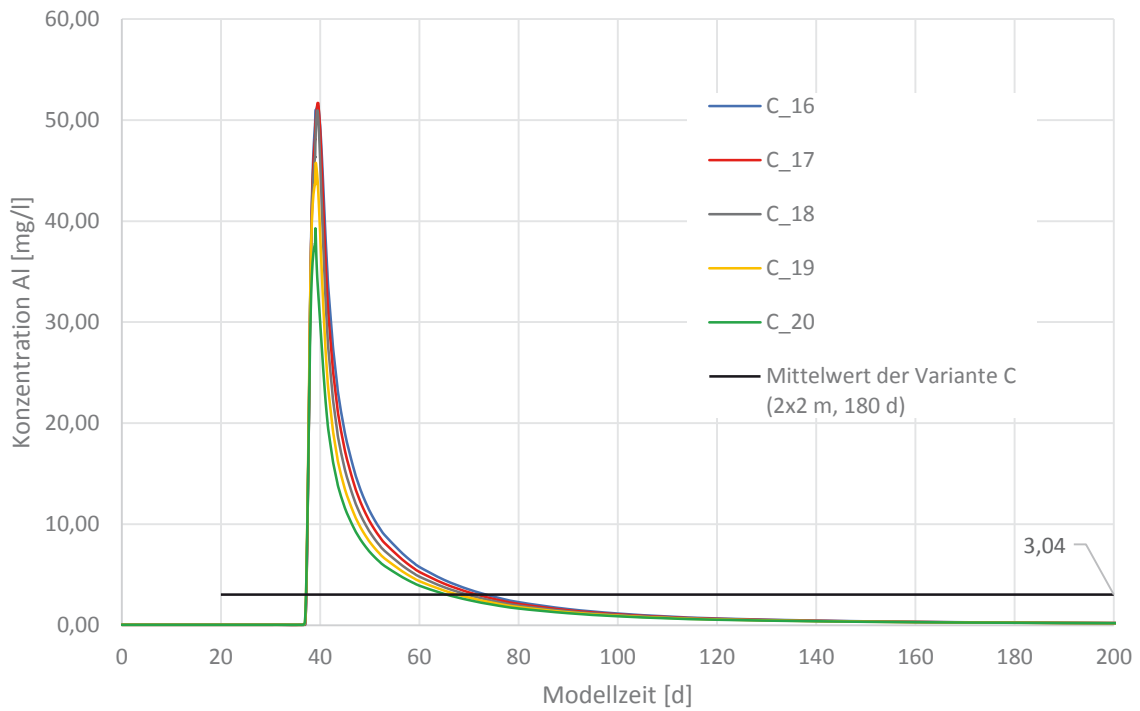


Abbildung C16: Aluminiumkonzentration, 0,60 m unterhalb der Sohle, Variante C.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

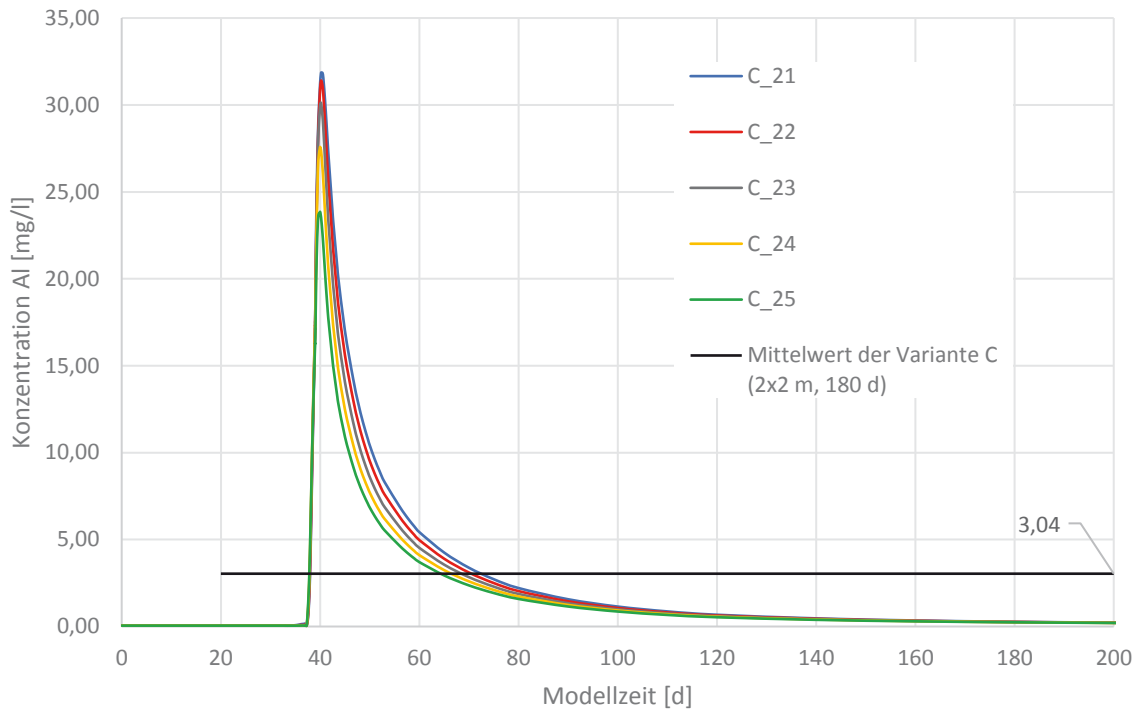


Abbildung C17: Aluminiumkonzentration, 1,00 m unterhalb der Sohle, Variante C.

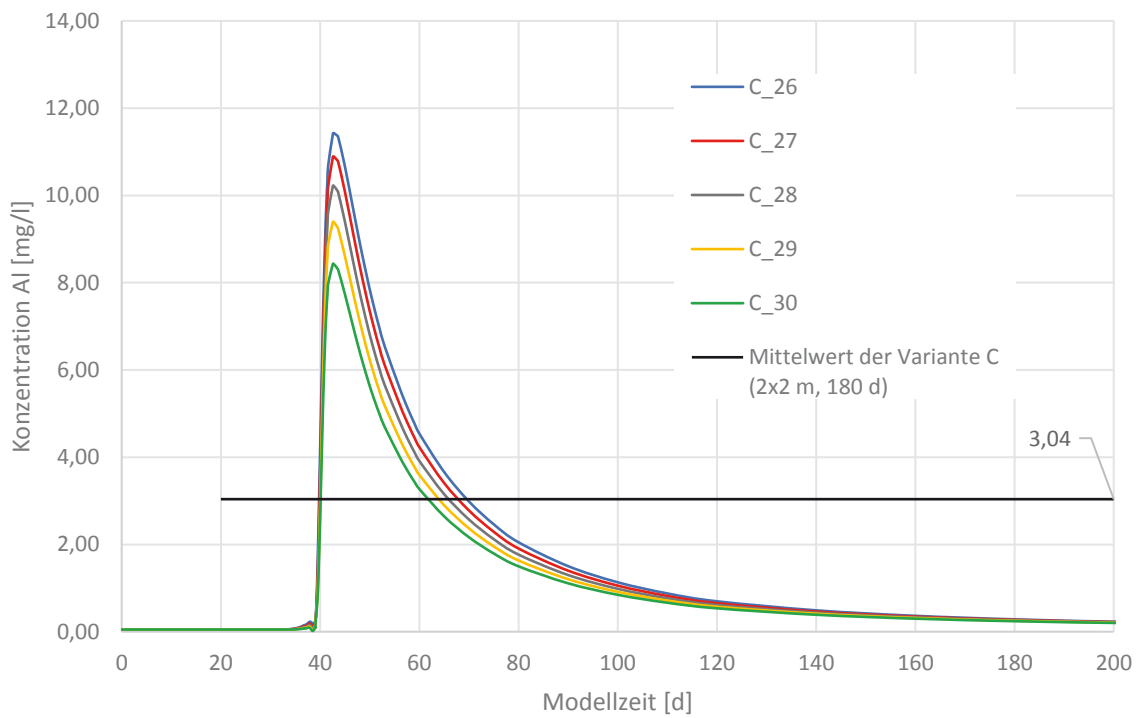


Abbildung C18: Aluminiumkonzentration, 2,00 m unterhalb der Sohle, Variante C.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

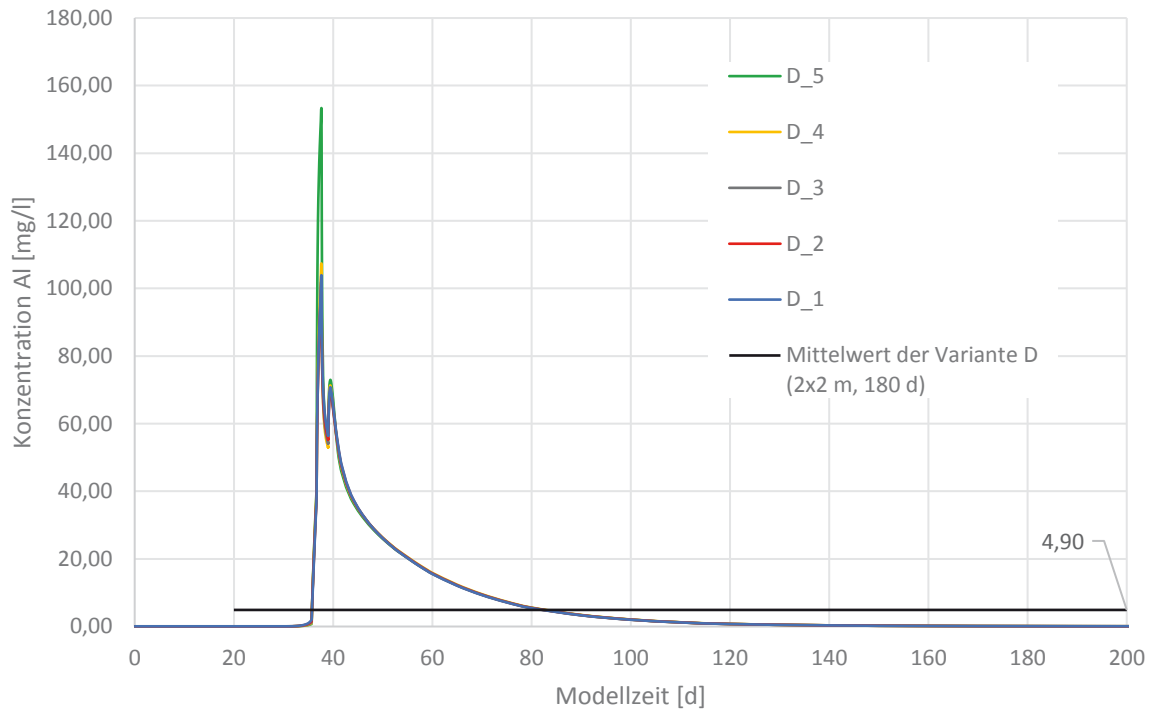


Abbildung C19: Aluminiumkonzentration, 0,05 m unterhalb der Sohle, Variante D.

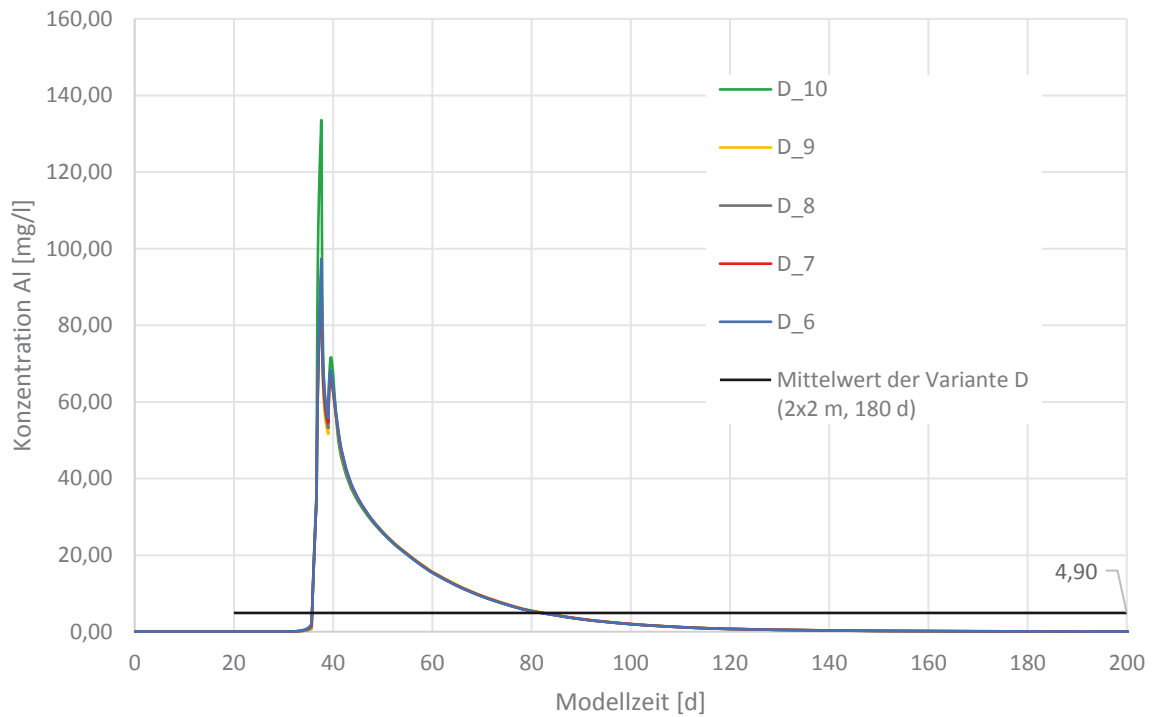


Abbildung C20: Aluminiumkonzentration, 0,10 m unterhalb der Sohle, Variante D.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

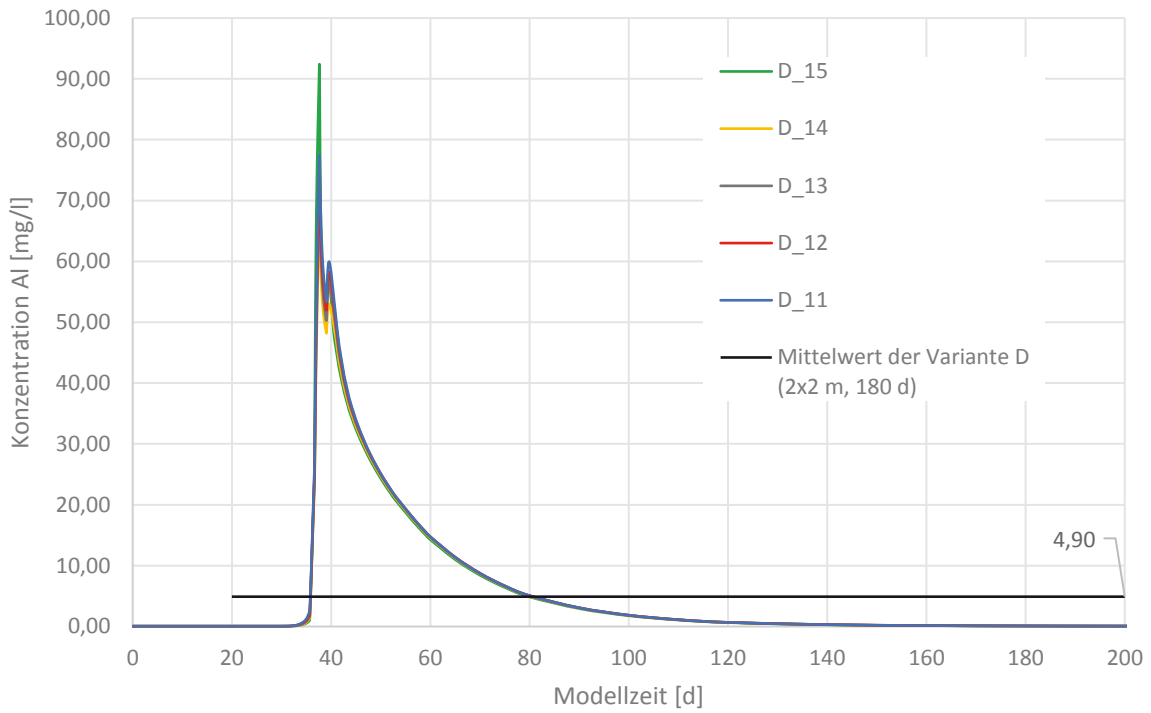


Abbildung C21: Aluminiumkonzentration, 0,30 m unterhalb der Sohle, Variante D.

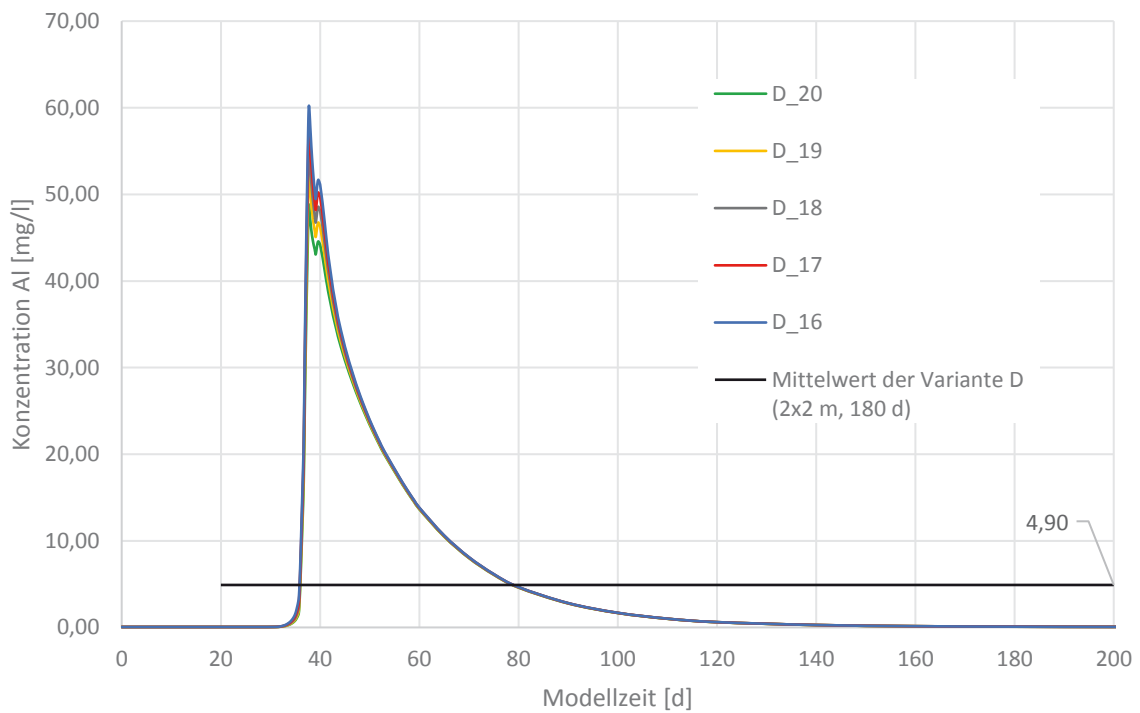


Abbildung C22: Aluminiumkonzentration, 0,60 m unterhalb der Sohle, Variante D.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

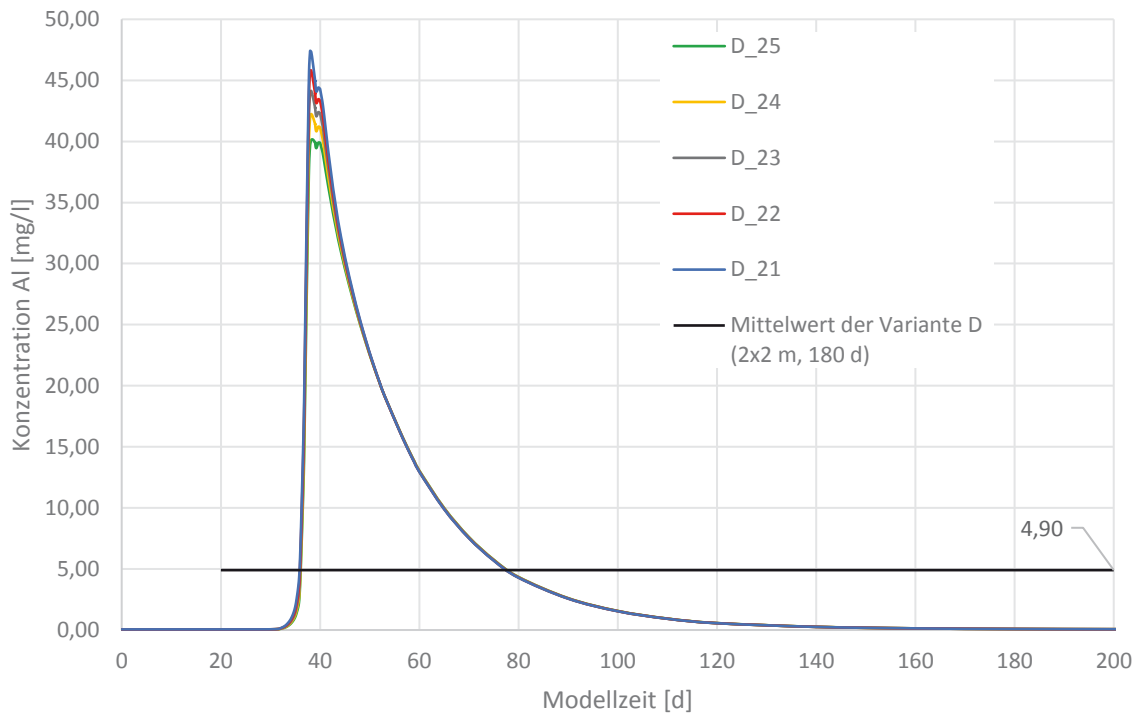


Abbildung C23: Aluminiumkonzentration, 1,00 m unterhalb der Sohle, Variante D.

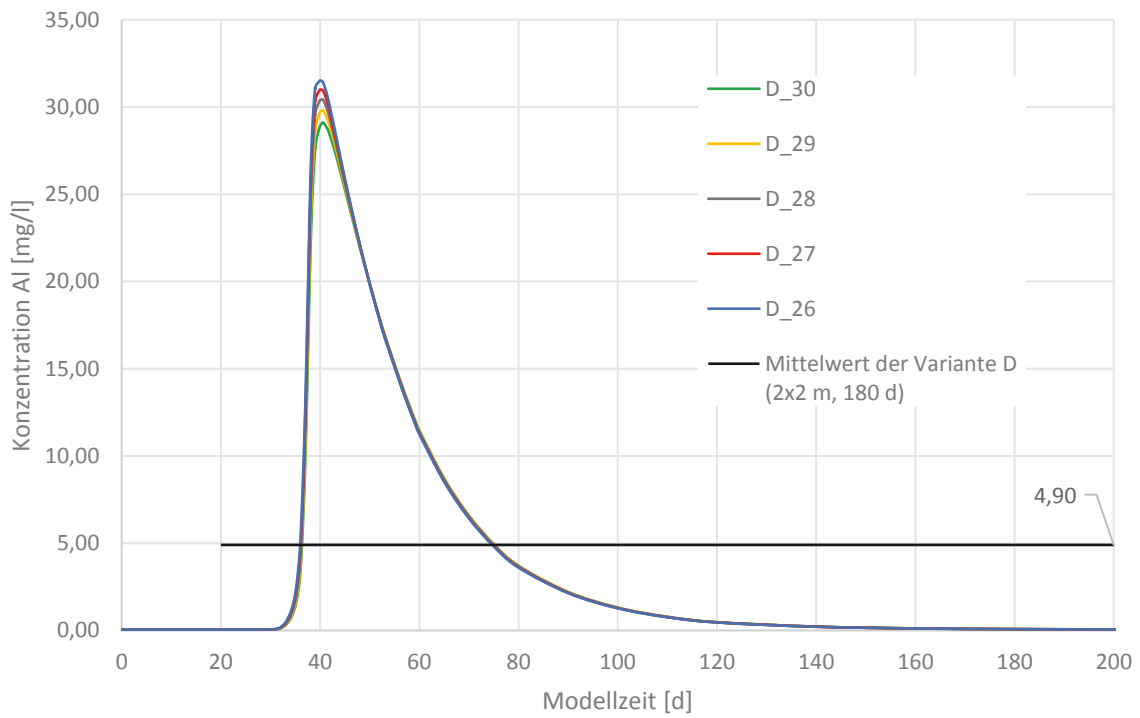


Abbildung C24: Aluminiumkonzentration, 2,00 m unterhalb der Sohle, Variante D.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

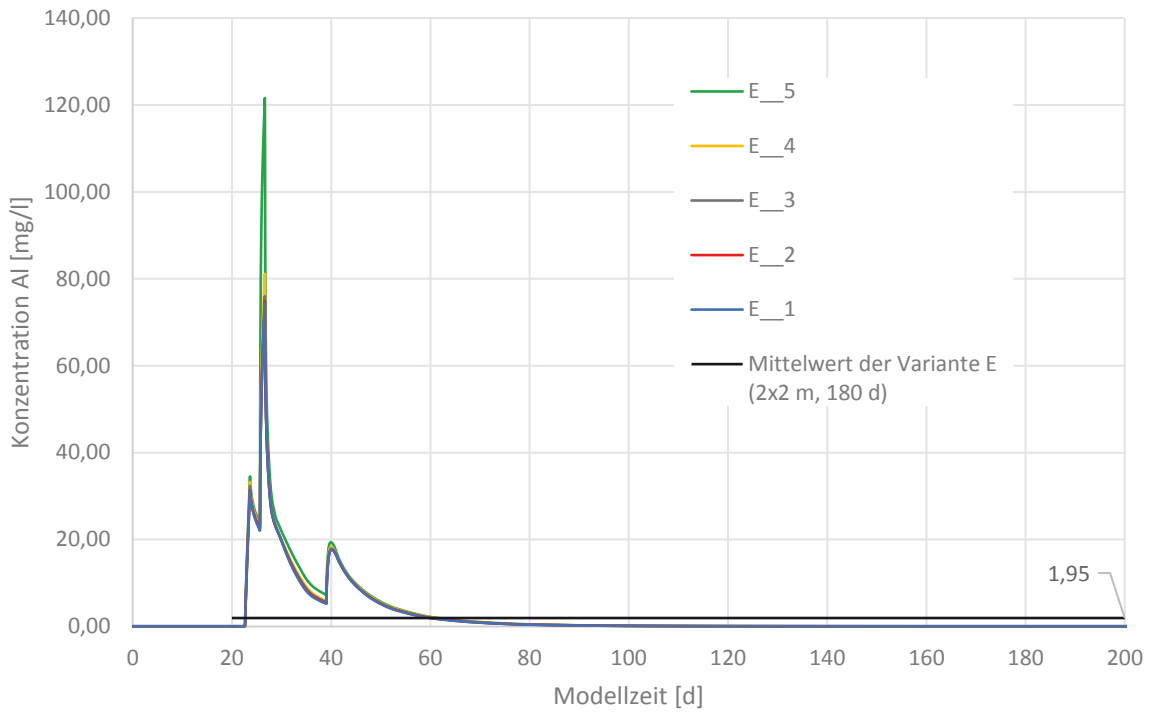


Abbildung C25: Aluminiumkonzentration, 0,05 m unterhalb der Sohle, Variante E.

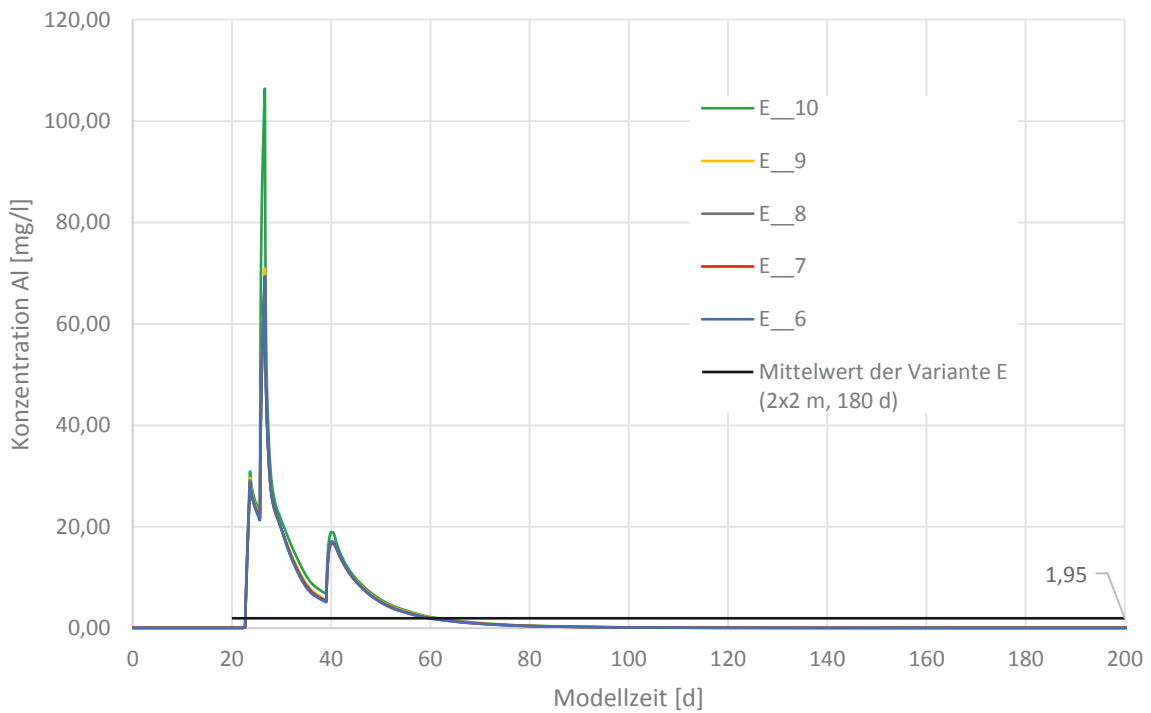


Abbildung C26: Aluminiumkonzentration, 0,10 m unterhalb der Sohle, Variante E.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

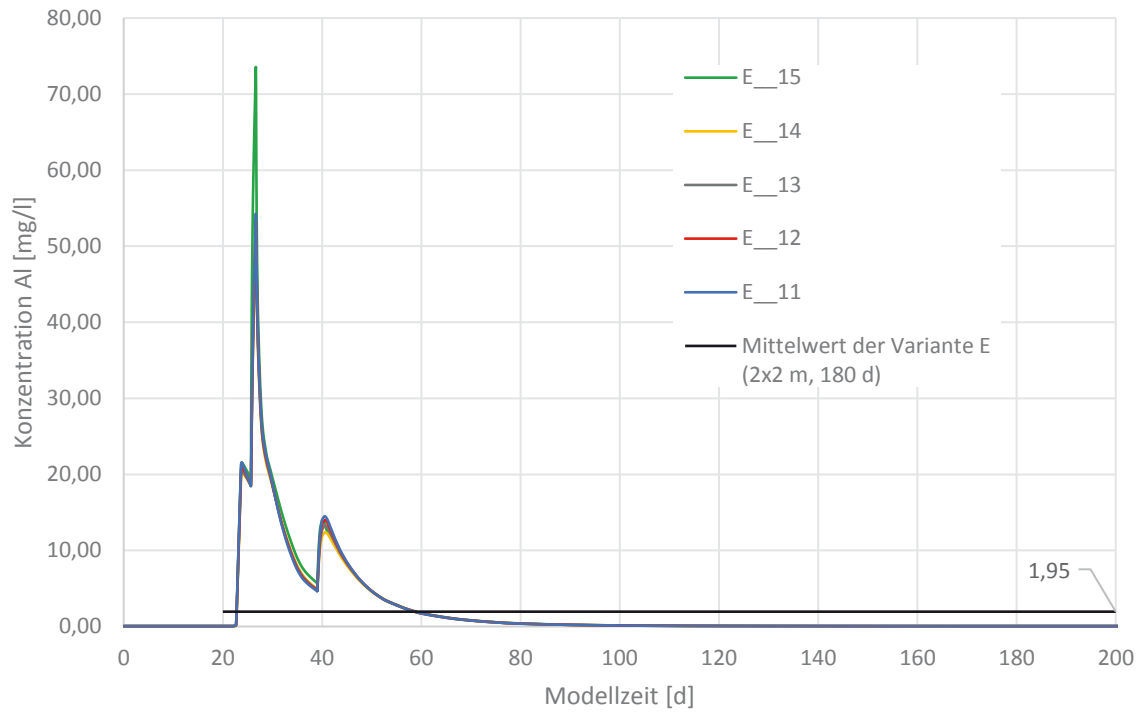


Abbildung C27: Aluminiumkonzentration, 0,30 m unterhalb der Sohle, Variante E.

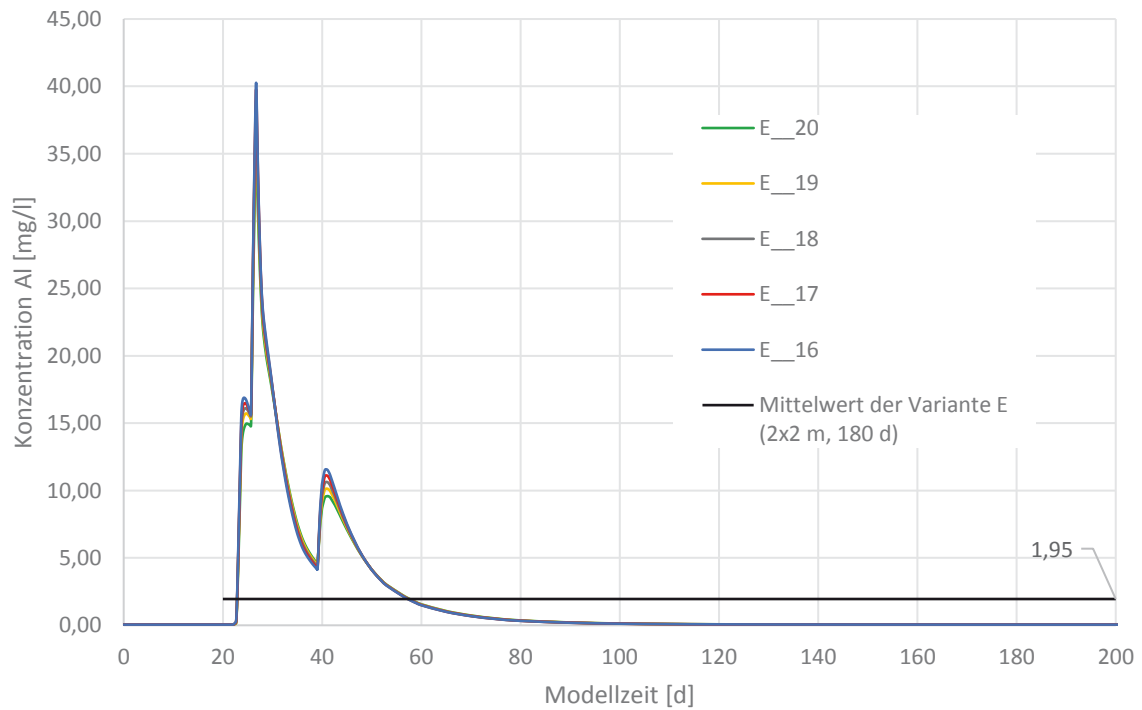


Abbildung C28: Aluminiumkonzentration, 0,60 m unterhalb der Sohle, Variante E.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

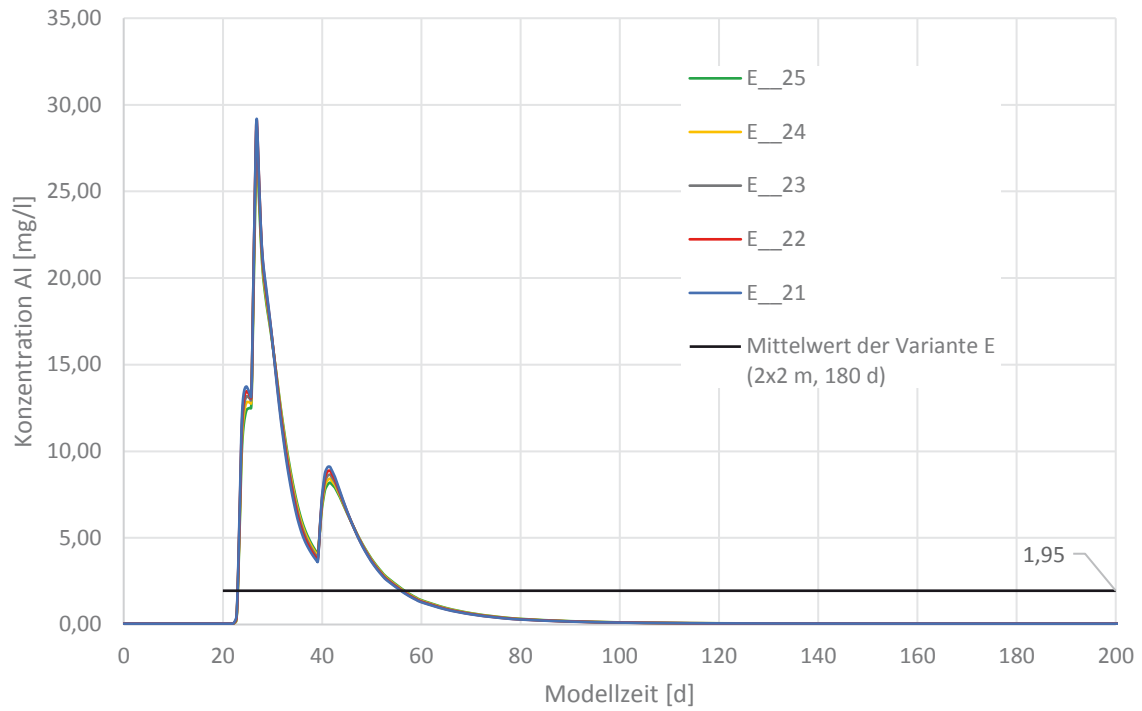


Abbildung C29: Aluminiumkonzentration, 1,00 m unterhalb der Sohle, Variante E.

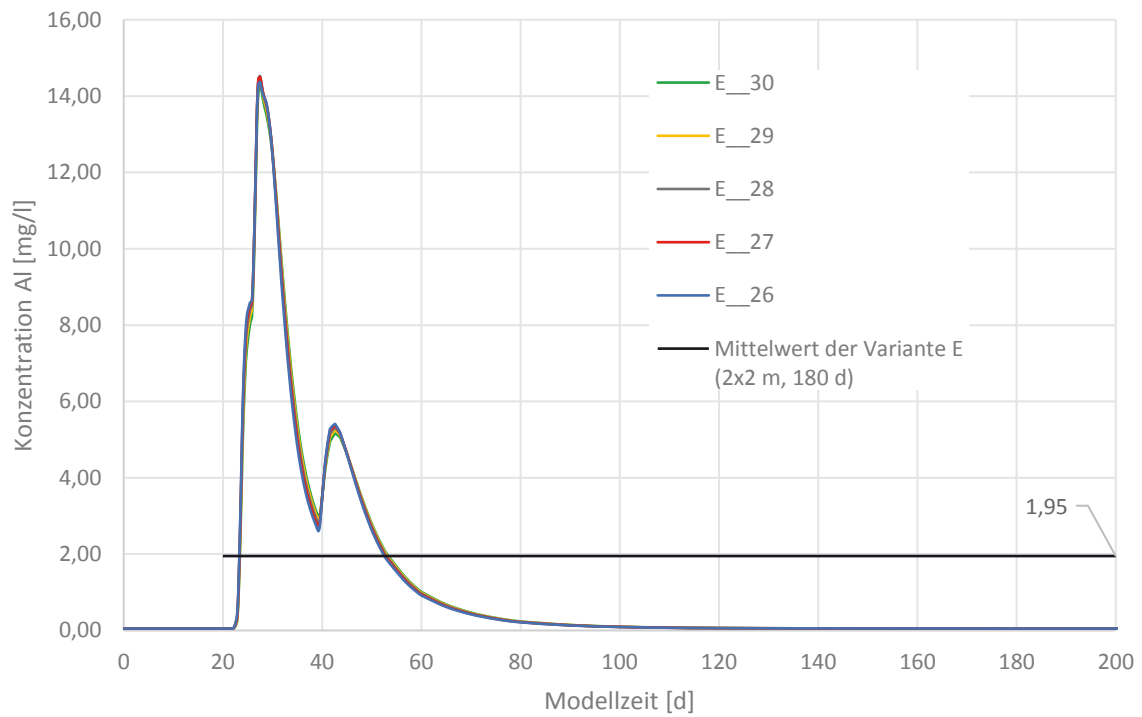


Abbildung C30: Aluminiumkonzentration, 2,00 m unterhalb der Sohle, Variante E.

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

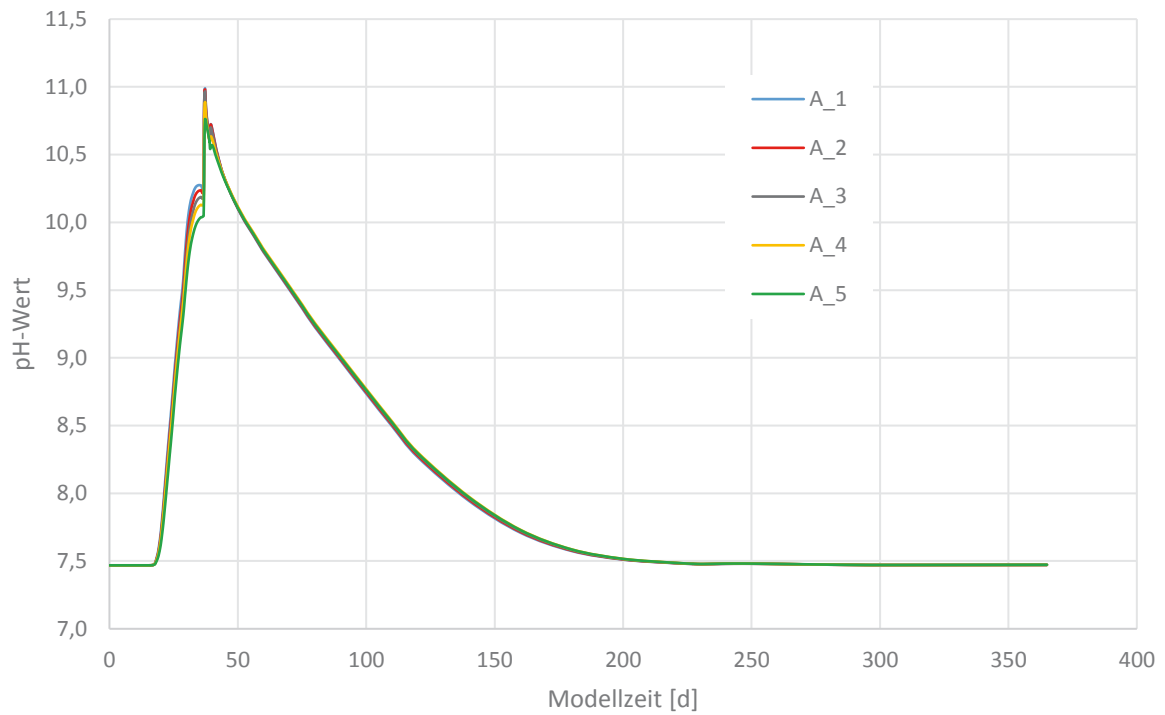


Abbildung C31: pH-Wert, 0,05 m unterhalb der Sohle, Variante A.

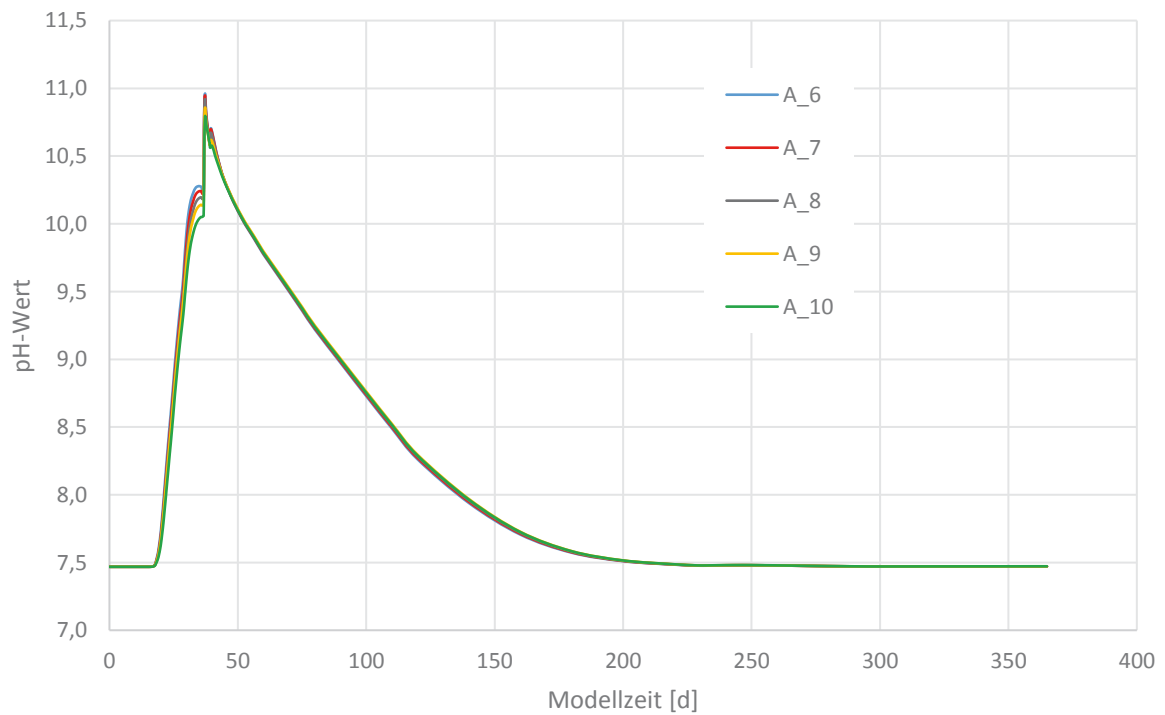


Abbildung C32: pH-Wert, 0,10 m unterhalb der Sohle, Variante A

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

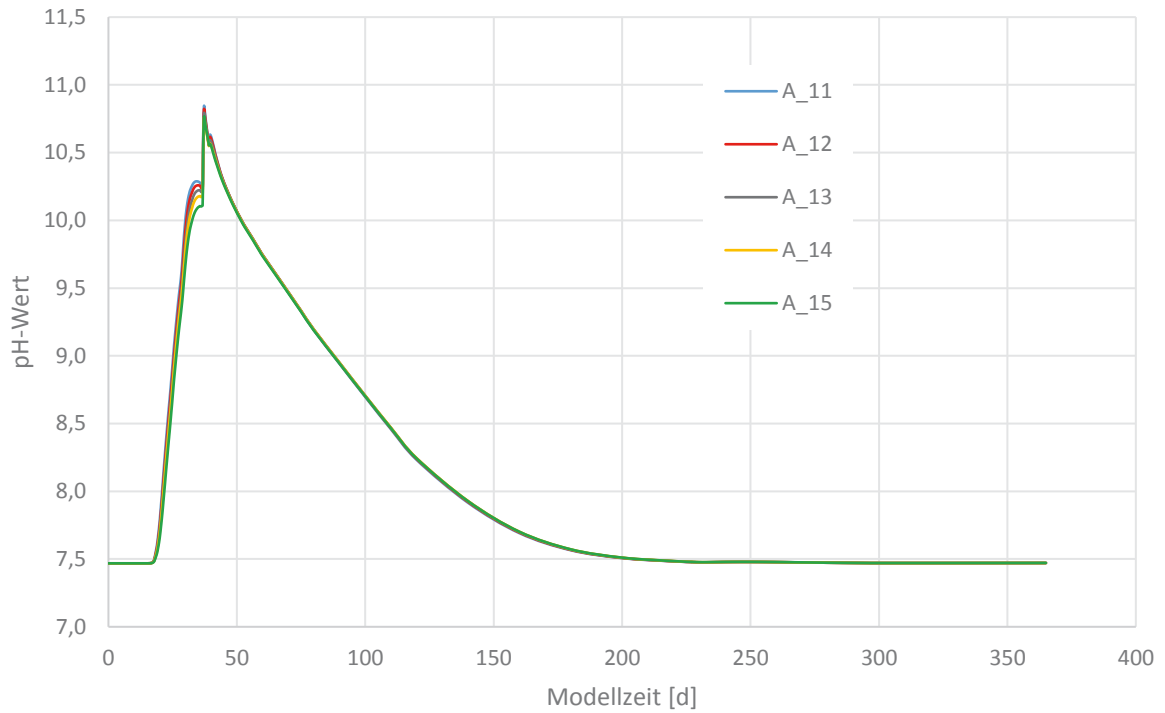


Abbildung C33: pH-Wert, 0,30 m unterhalb der Sohle, Variante A

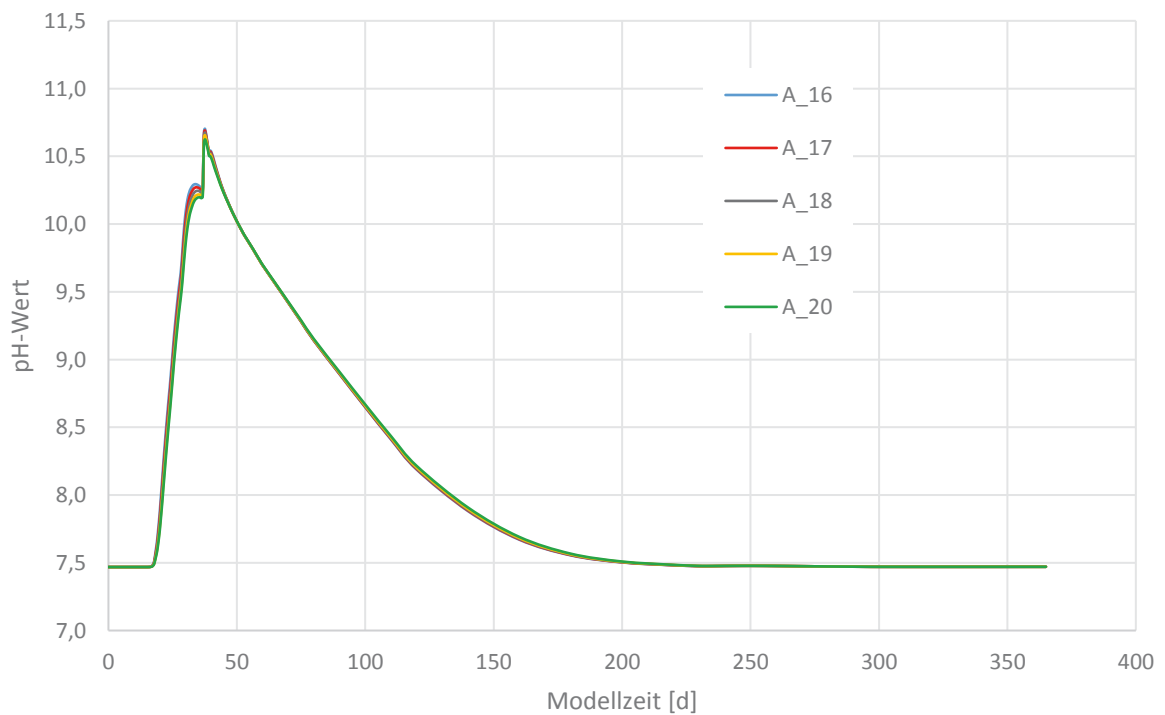


Abbildung C34: pH-Wert, 0,60 m unterhalb der Sohle, Variante A

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

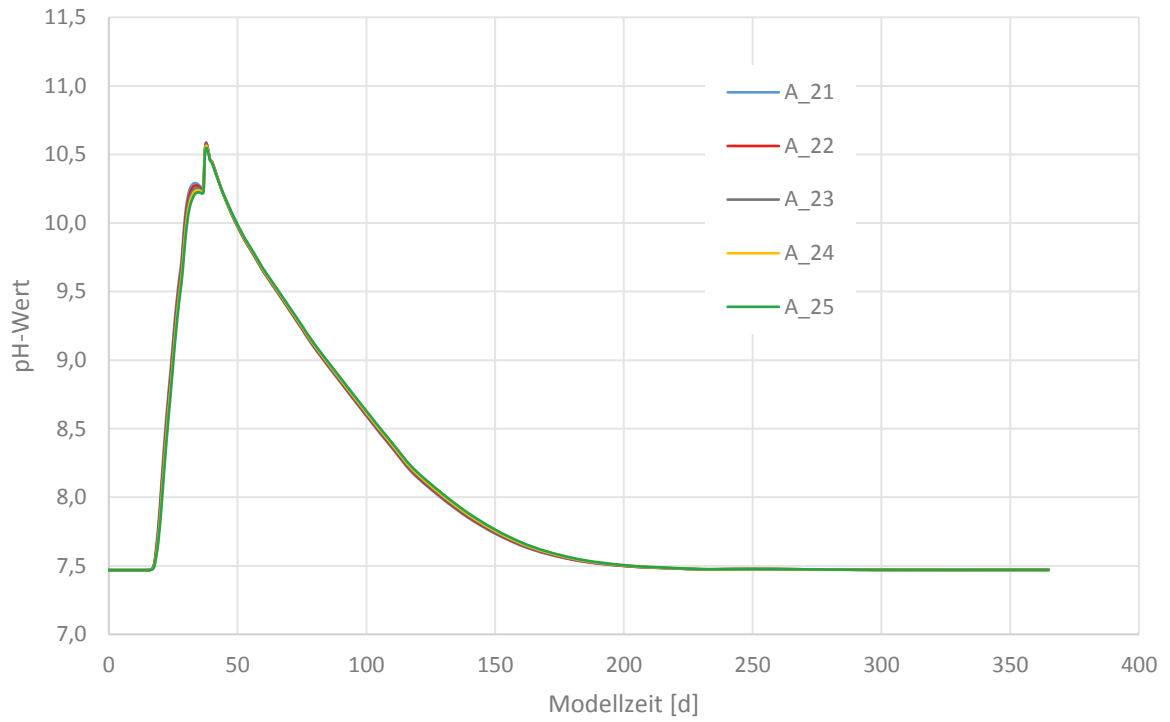


Abbildung C35: pH-Wert, 1,00 m unterhalb der Sohle, Variante A

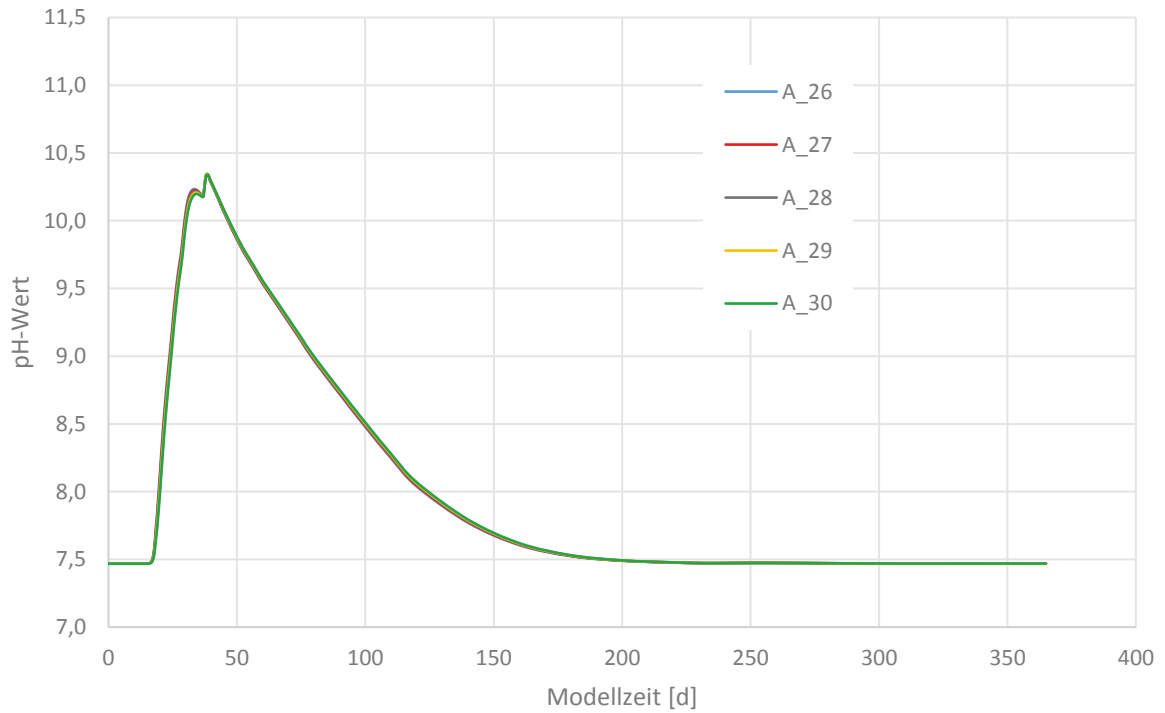


Abbildung C36: pH-Wert, 2,00 m unterhalb der Sohle, Variante A

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

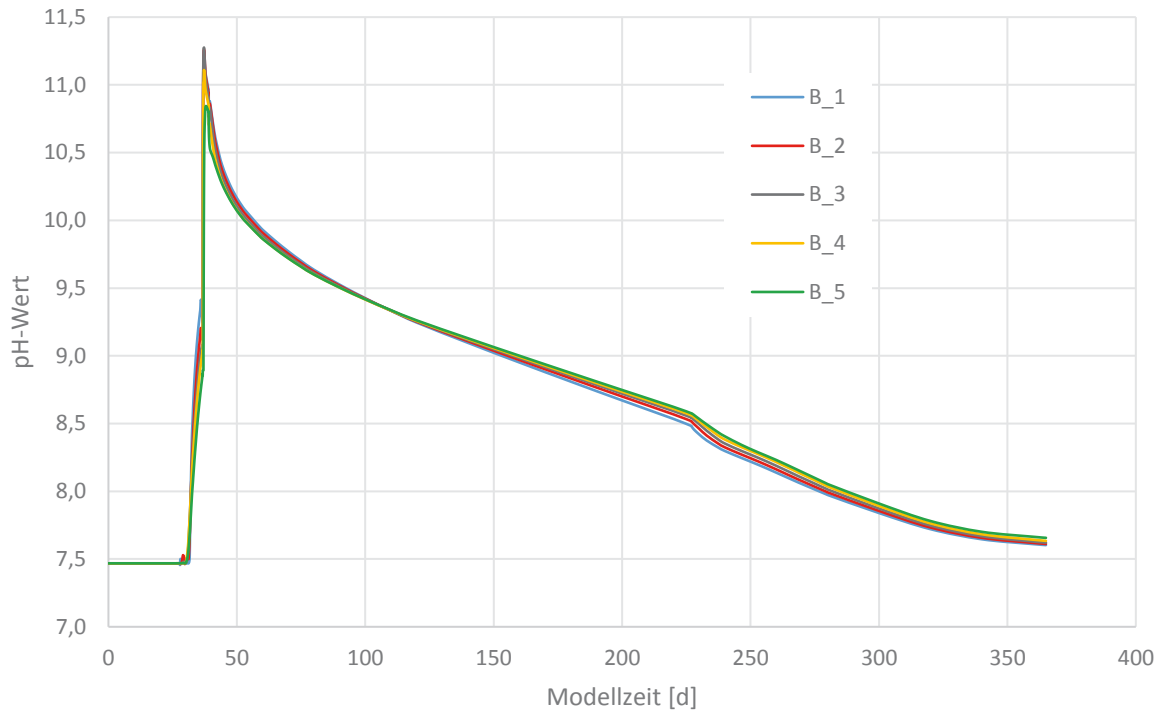


Abbildung C37: pH-Wert, 0,05 m unterhalb der Sohle, Variante B

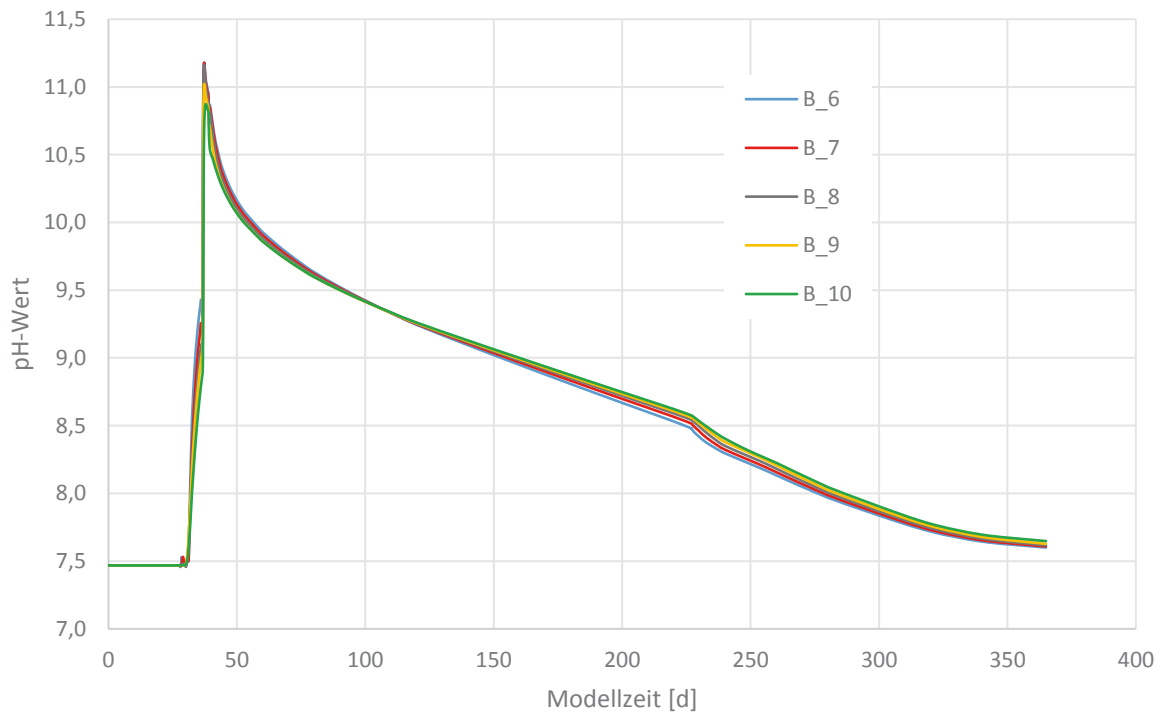


Abbildung C38: pH-Wert, 0,10 m unterhalb der Sohle, Variante B

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

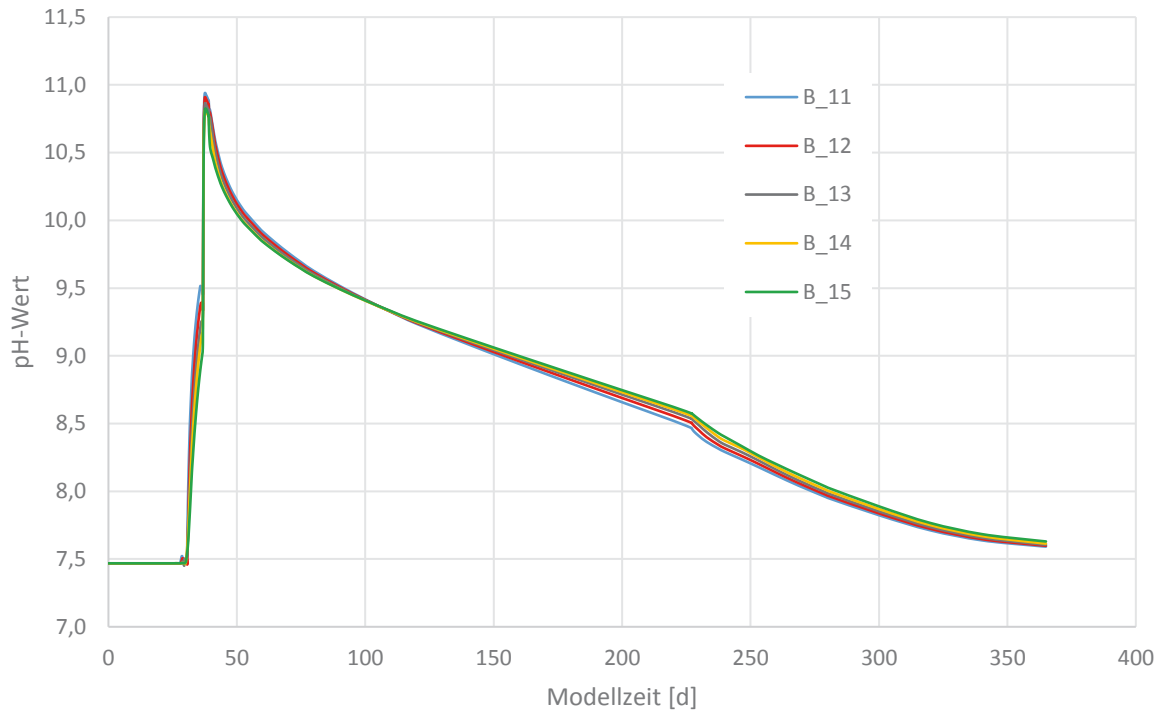


Abbildung C39: pH-Wert, 0,30 m unterhalb der Sohle, Variante B

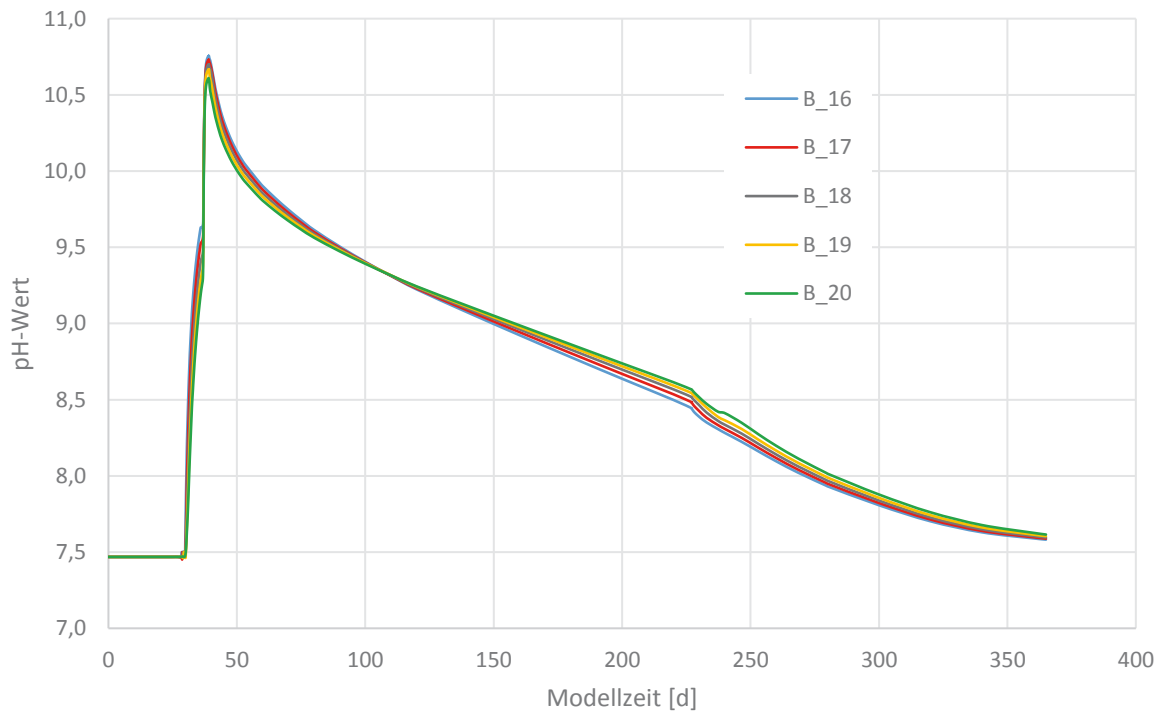


Abbildung C40: pH-Wert, 0,60 m unterhalb der Sohle, Variante B

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

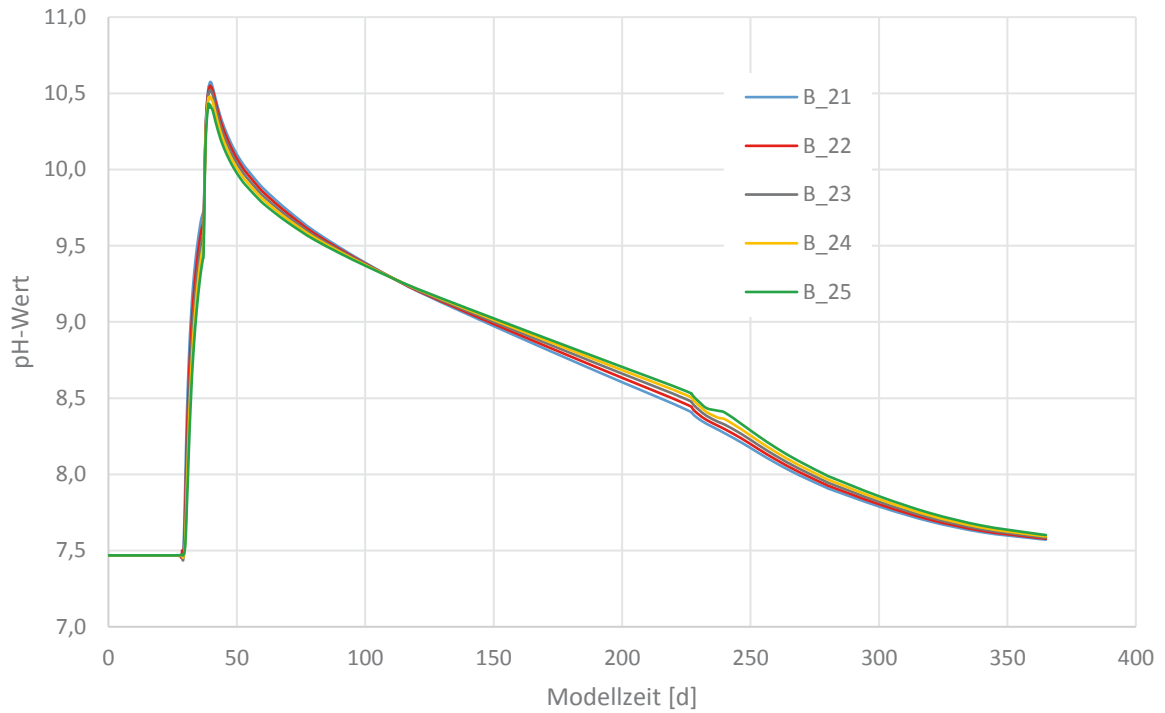


Abbildung C41: pH-Wert, 1,00 m unterhalb der Sohle, Variante B

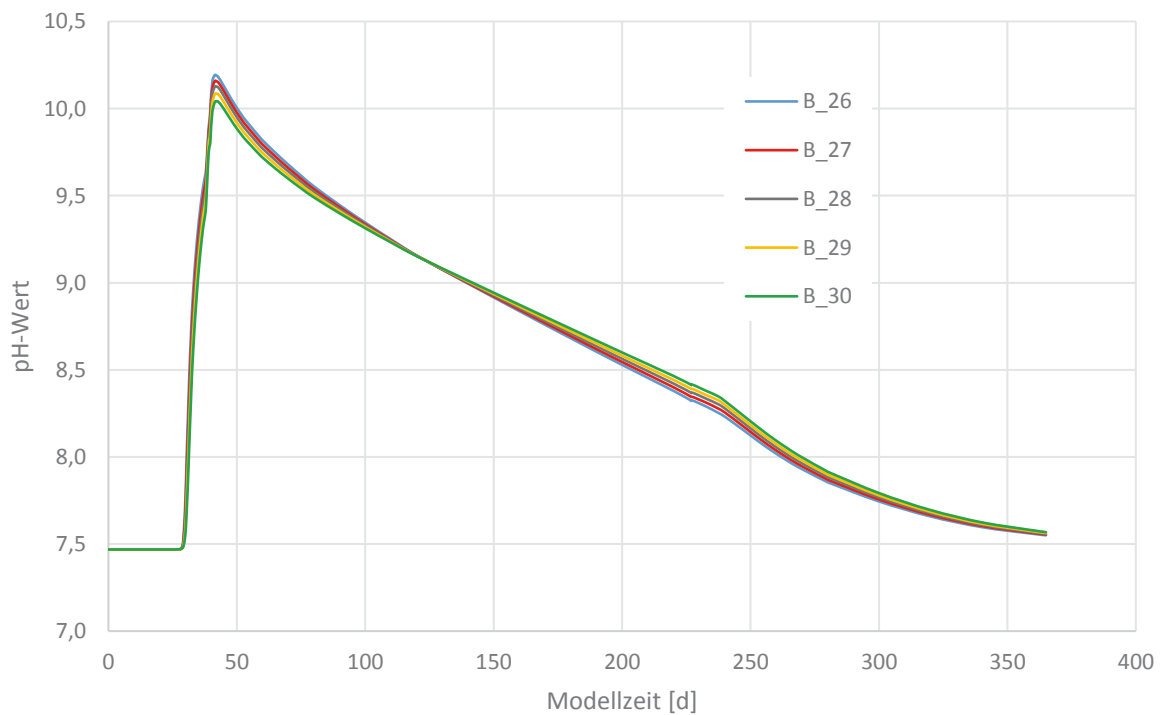


Abbildung C42: pH-Wert, 2,00 m unterhalb der Sohle, Variante B

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

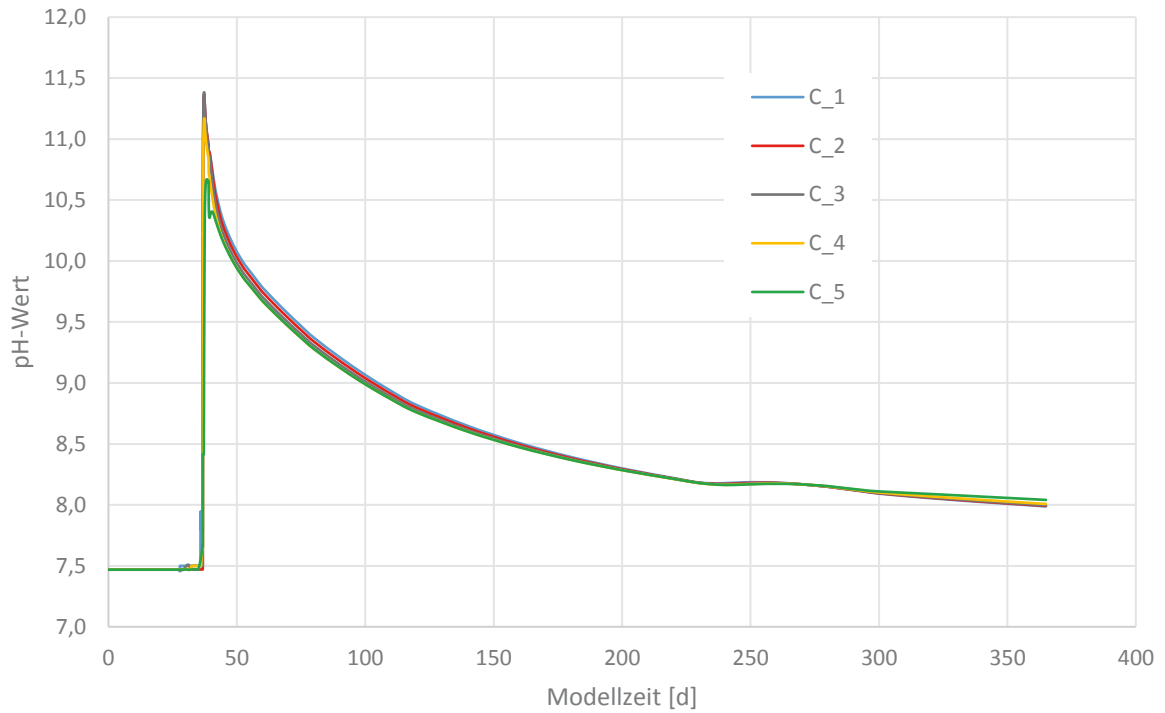


Abbildung C43: pH-Wert, 0,05 m unterhalb der Sohle, Variante C

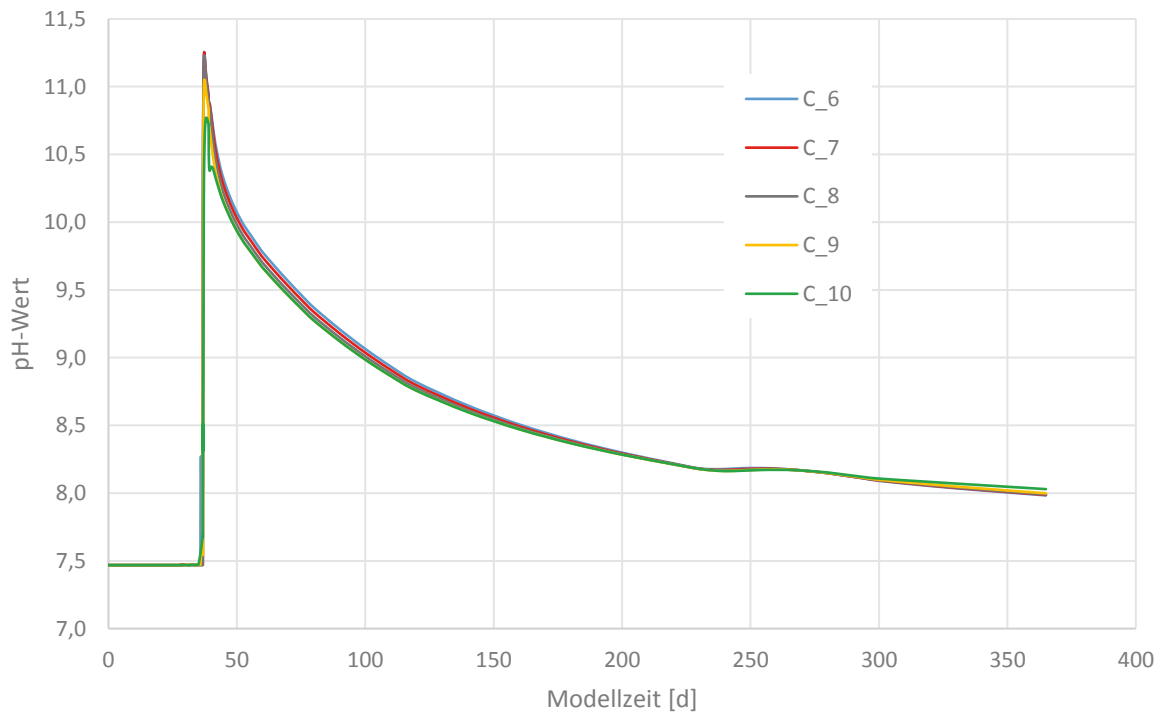


Abbildung C44: pH-Wert, 0,10 m unterhalb der Sohle, Variante C

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

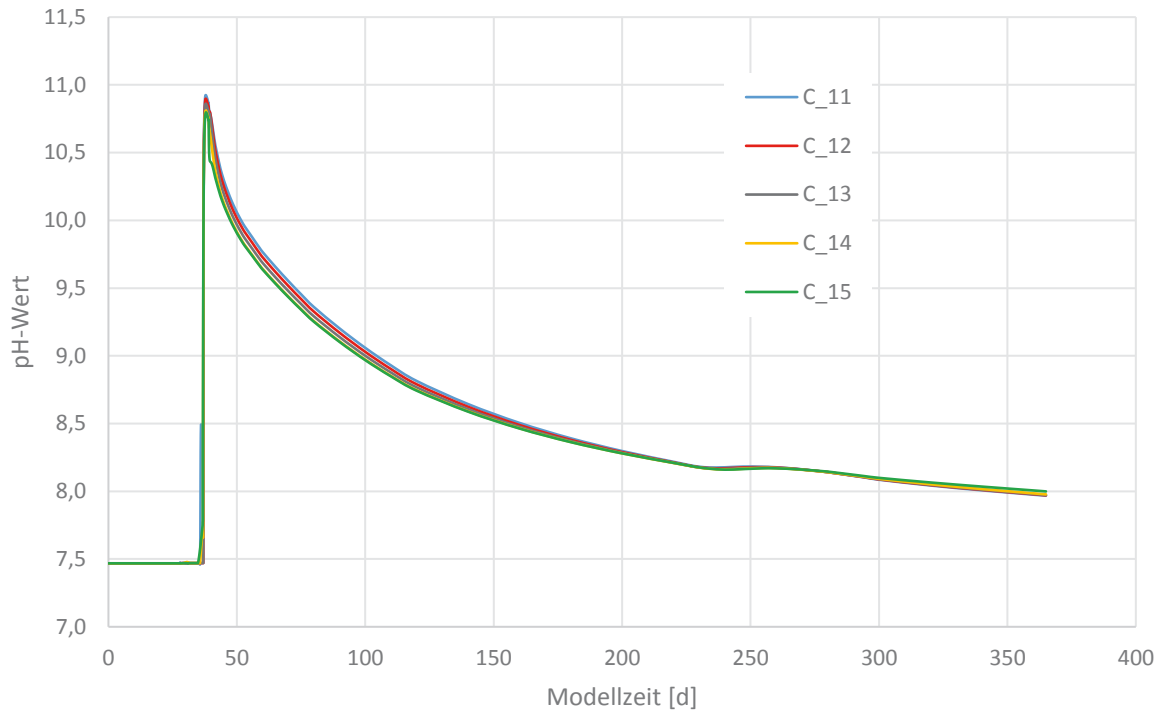


Abbildung C45: pH-Wert, 0,30 m unterhalb der Sohle, Variante C

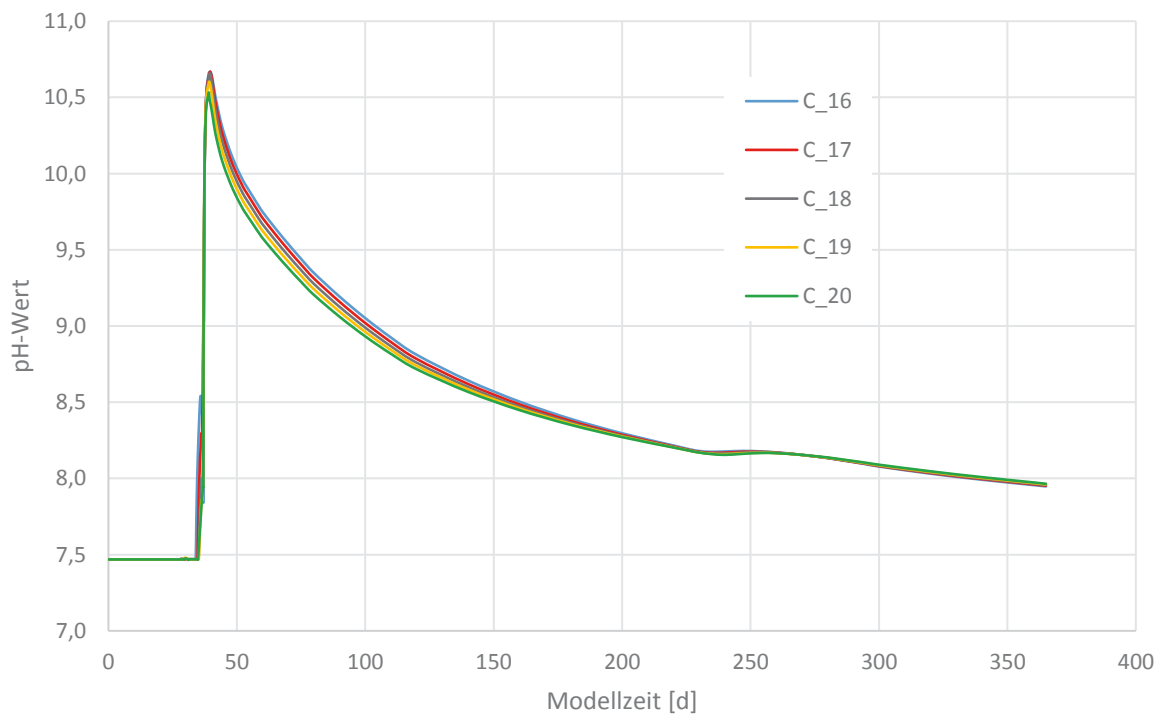


Abbildung C46: pH-Wert, 0,60 m unterhalb der Sohle, Variante C

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

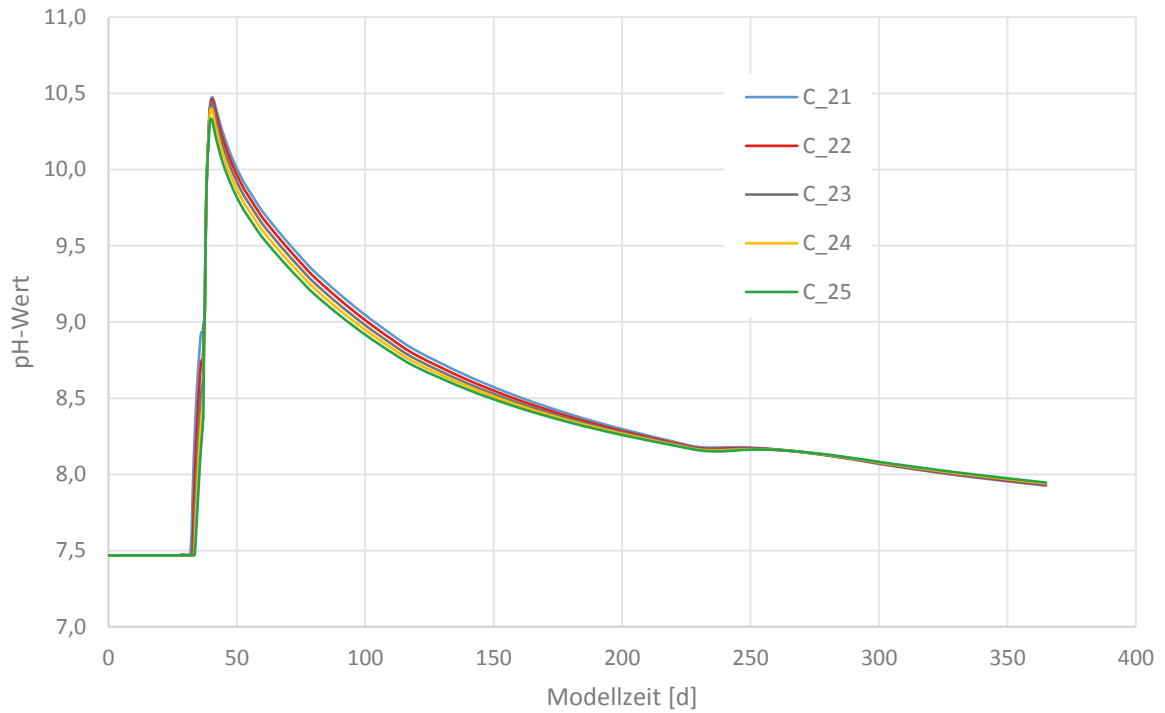


Abbildung C47: pH-Wert, 1,00 m unterhalb der Sohle, Variante C

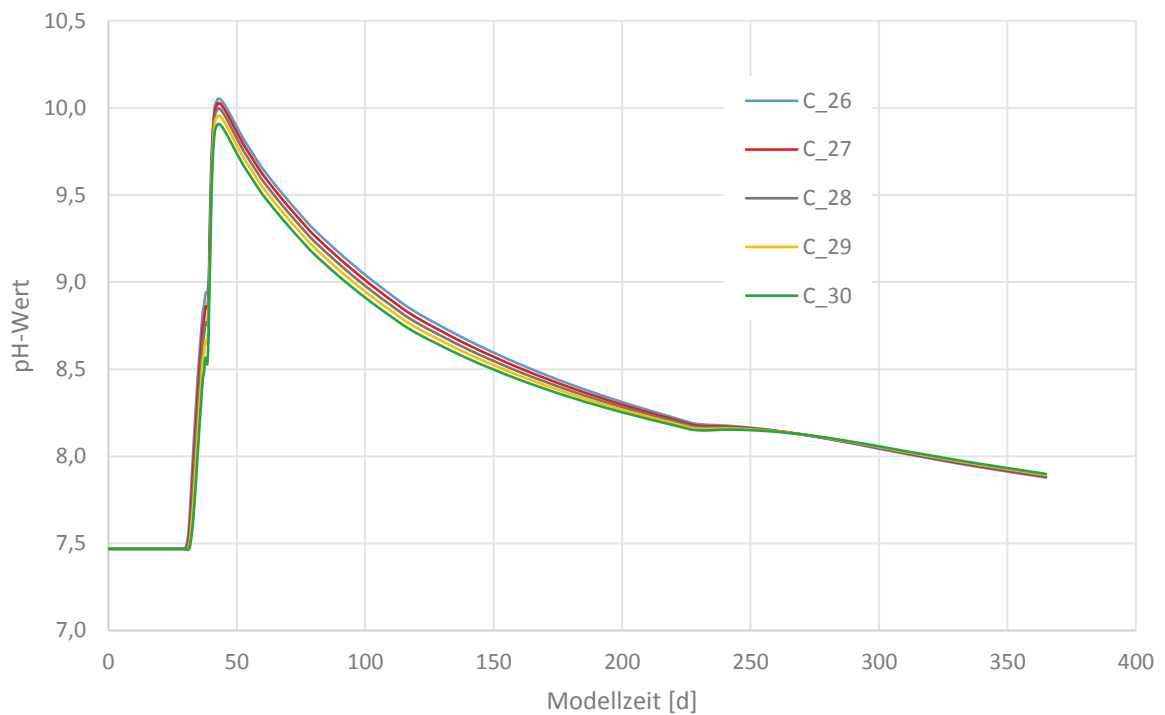


Abbildung C48: pH-Wert, 2,00 m unterhalb der Sohle, Variante C

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

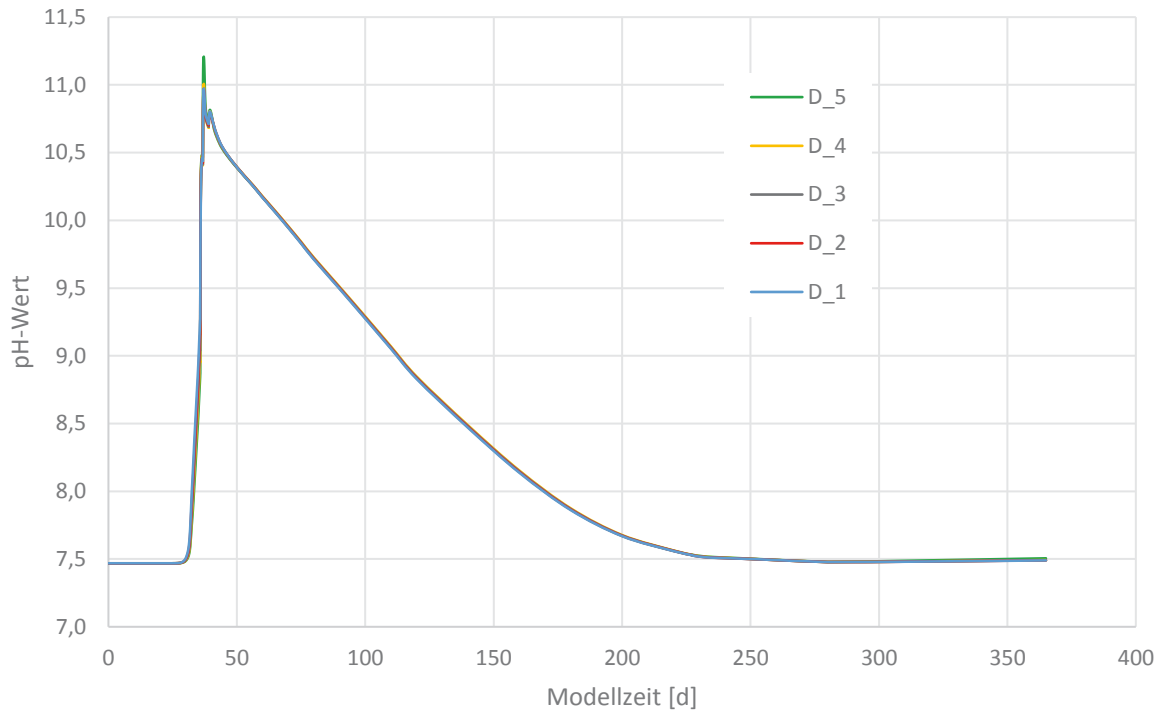


Abbildung C49: pH-Wert, 0,05 m unterhalb der Sohle, Variante D

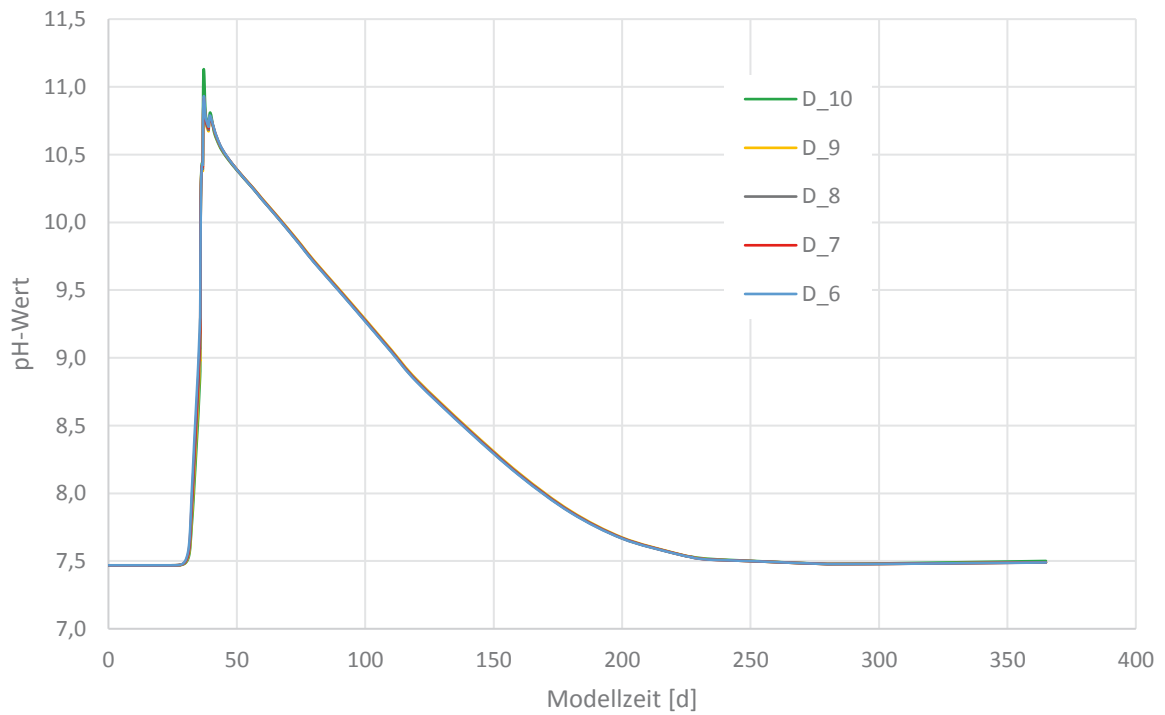


Abbildung C50: pH-Wert, 0,10 m unterhalb der Sohle, Variante D

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

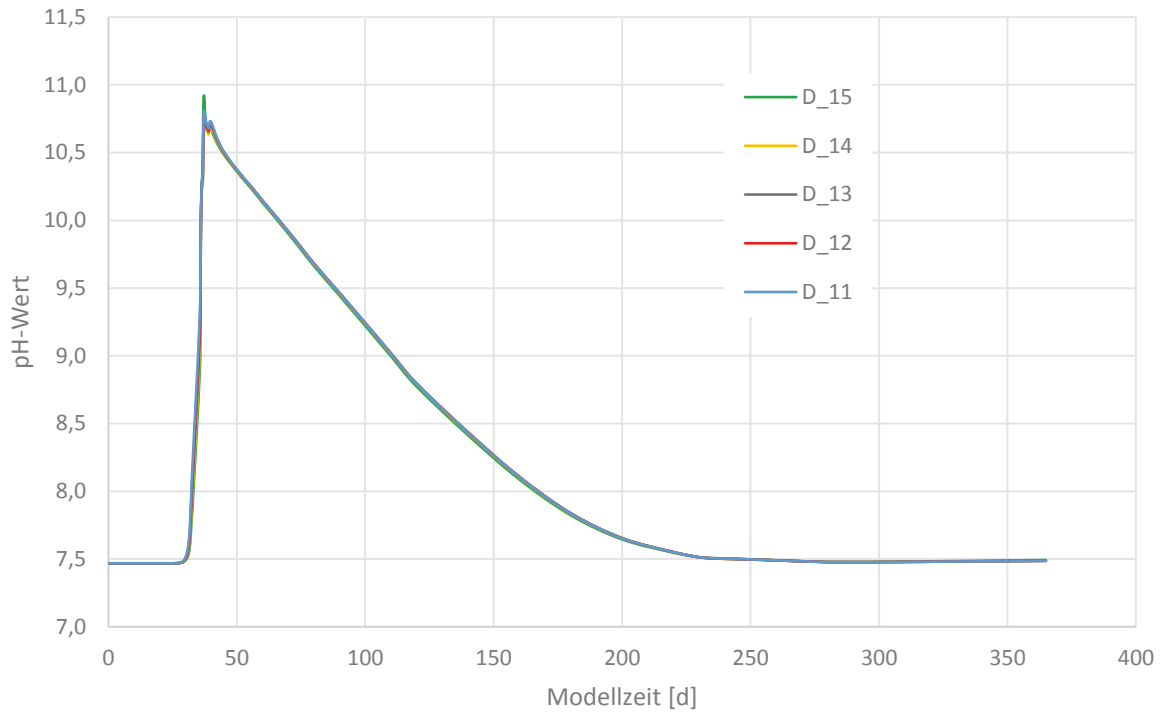


Abbildung C51: pH-Wert, 0,30 m unterhalb der Sohle, Variante D

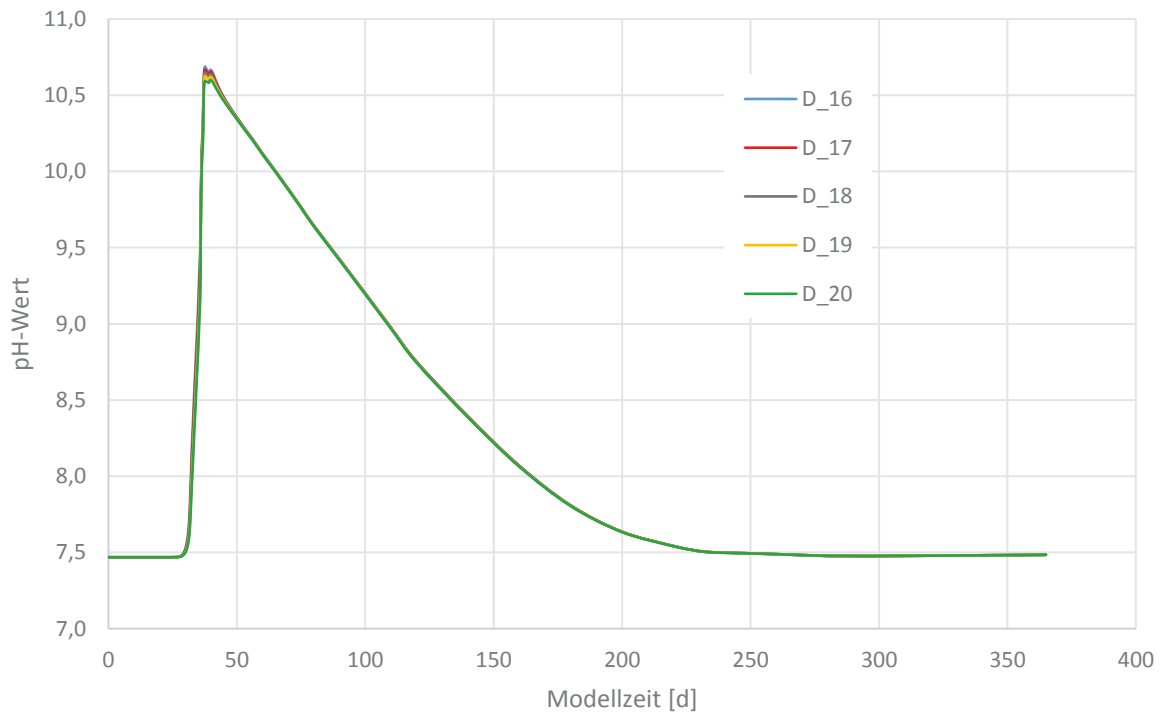


Abbildung C52: pH-Wert, 0,60 m unterhalb der Sohle, Variante D

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

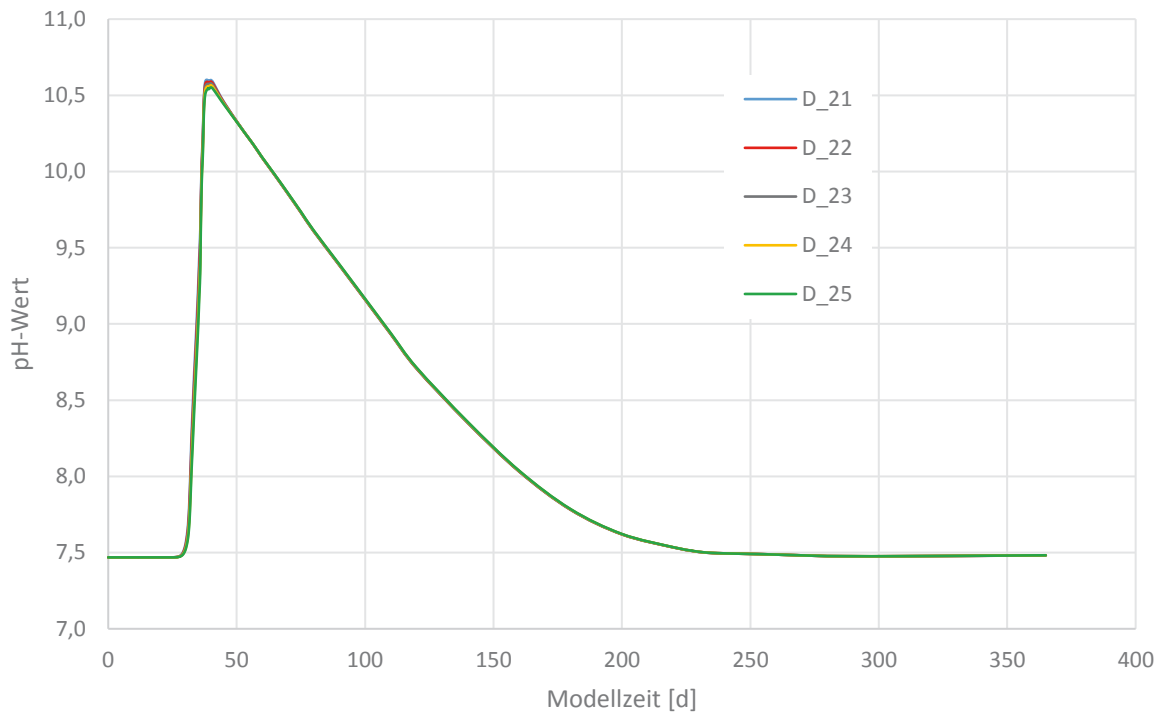


Abbildung C53: pH-Wert, 1,00 m unterhalb der Sohle, Variante D

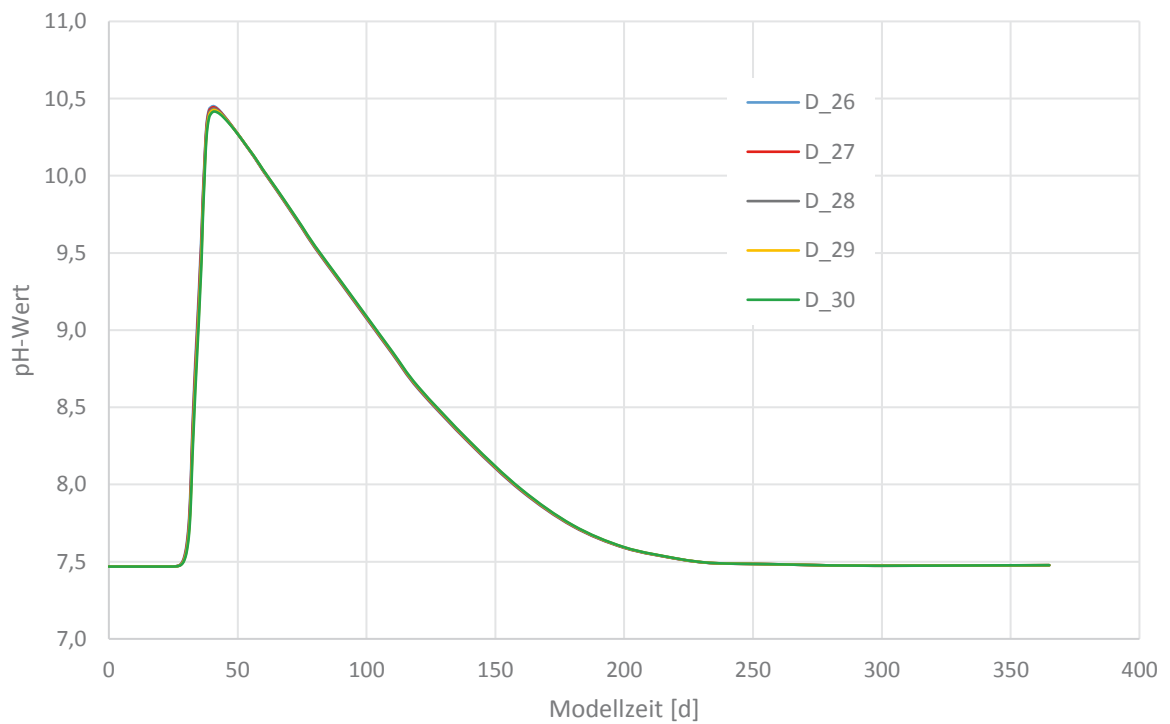


Abbildung C54: pH-Wert, 2,00 m unterhalb der Sohle, Variante D

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

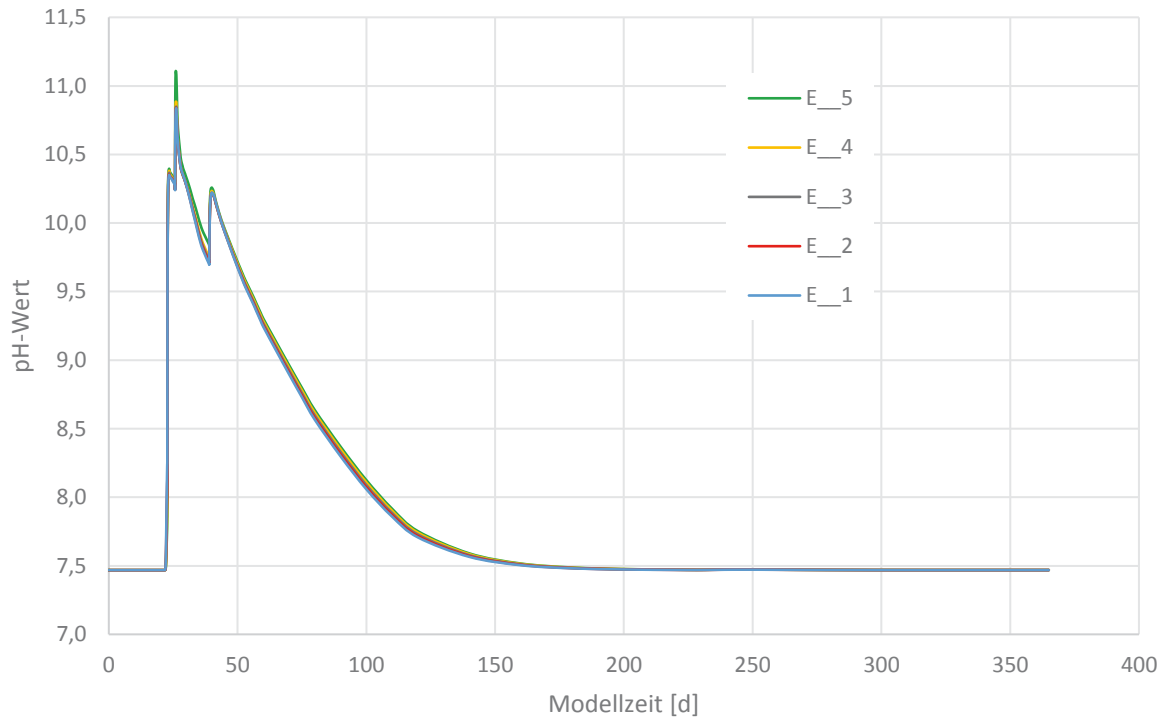


Abbildung C55: pH-Wert, 0,05 m unterhalb der Sohle, Variante E

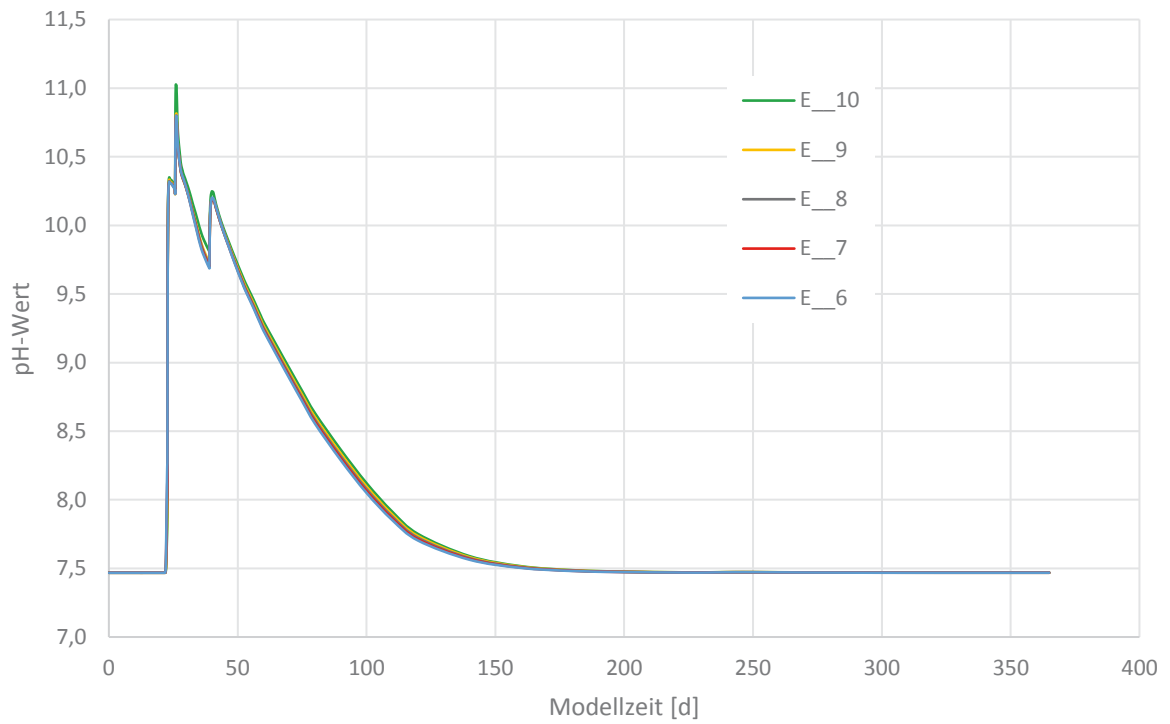


Abbildung C56: pH-Wert, 0,10 m unterhalb der Sohle, Variante E

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

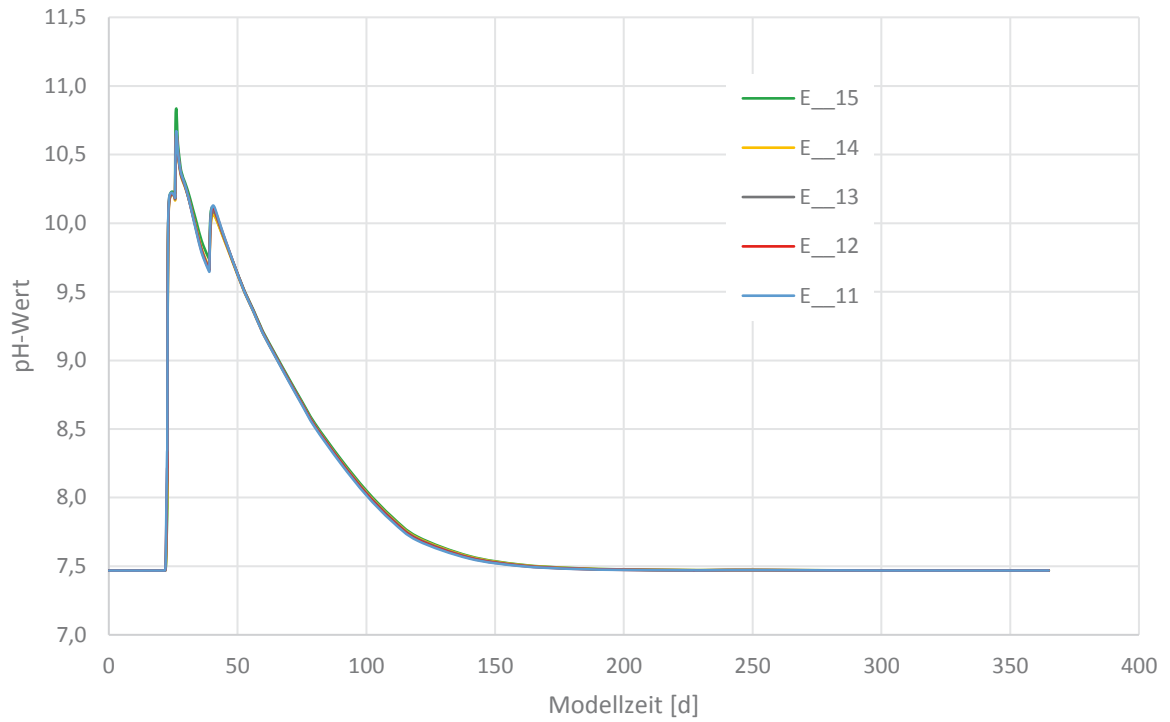


Abbildung C57: pH-Wert, 0,30 m unterhalb der Sohle, Variante E

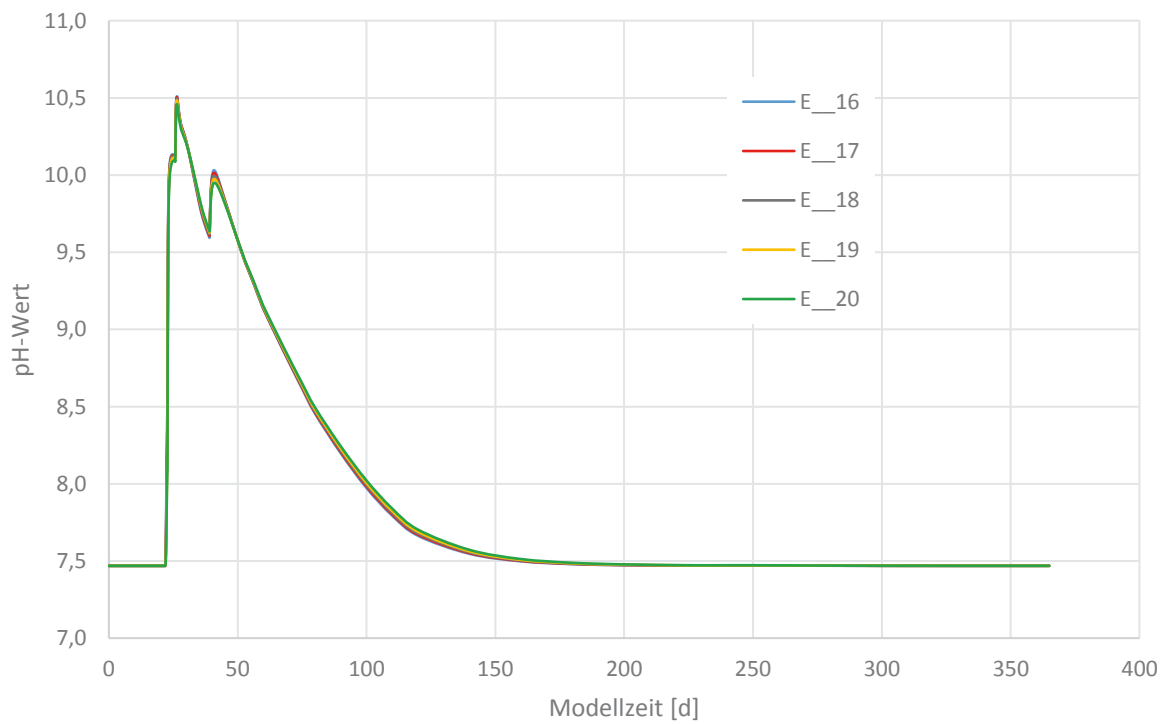


Abbildung C58: pH-Wert, 0,60 m unterhalb der Sohle, Variante E

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

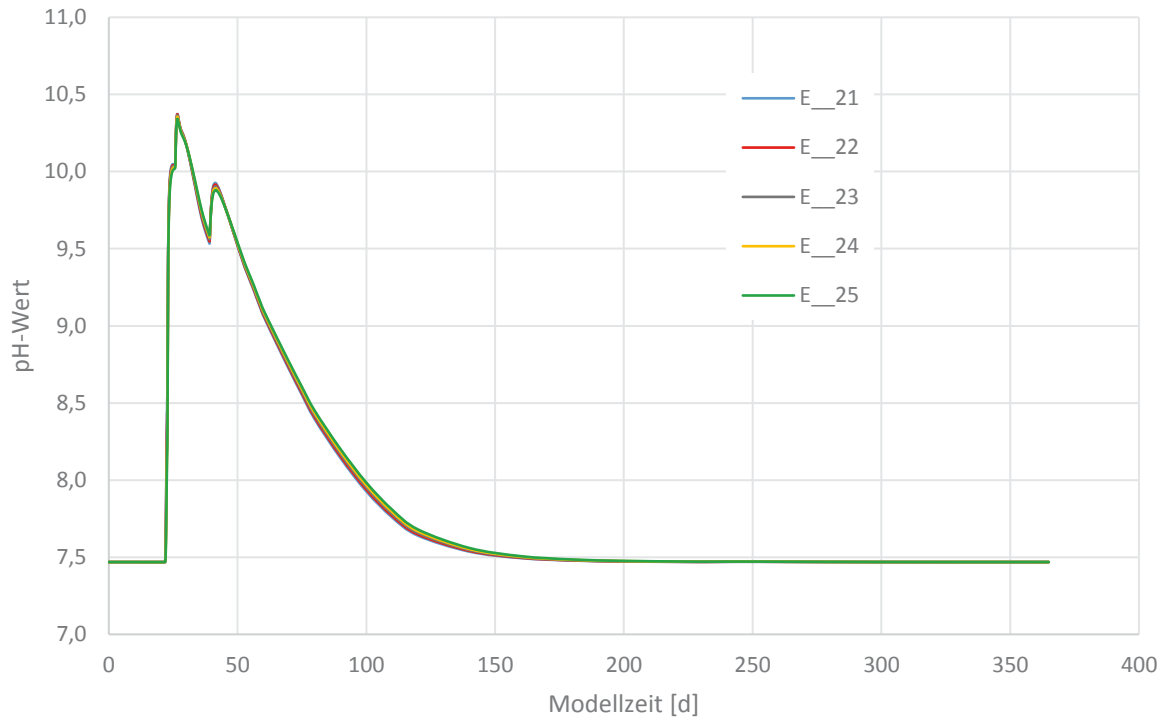


Abbildung C59: pH-Wert, 1,00 m unterhalb der Sohle, Variante E

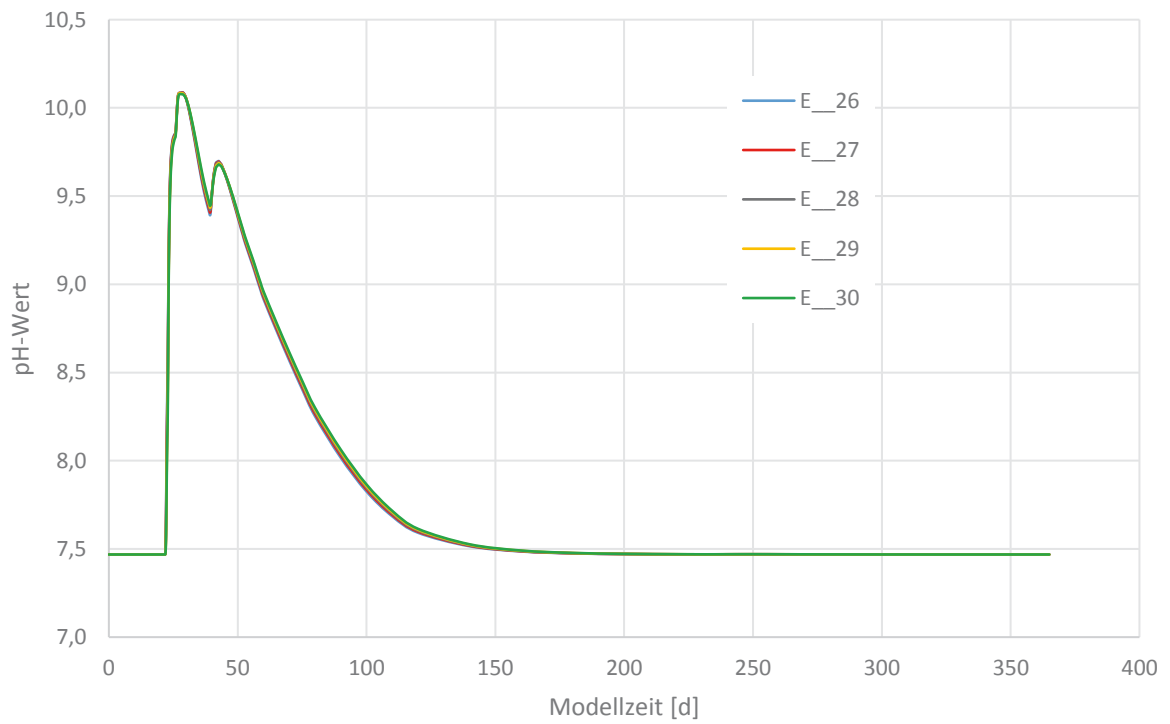


Abbildung C60: pH-Wert, 2,00 m unterhalb der Sohle, Variante E

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Inverse Säulenversuche Februar 2015 - Input für die Transportmodellierung	
Allgemeine Angaben	
Prüflaboratorium Anschrift	Freie Universität Berlin FB Geowissenschaften, Malteserstr. 74-100, 12249 Berlin
Leiter des Prüflaboratoriums	Prof. Terytze
zuständiger Sachbearbeiter	Dr. Wagner
Bemerkungen	2 Säulen mit 4 L/h
Datum Beginn der Prüfung	03.02.2015
Datum Ende der Prüfung	02.03.2015
Volumen/Masse des injizierten Materials	1,1kg
Anzahl Parallelen	2,00
Anzahl Proben je Parallele (incl. BW)	24
Dauer der Elution	4 Wochen
Raumtemperatur	19°C
Aufbereitung der Eluatproben	gemäß Norm
Lagerung / Konservierung der Proben vor Analyse	Lagerung bei 4°C im Dunkeln!
Messverfahren Parameter	
TOC	gemäß Norm
pH-Wert	gemäß Norm
elektr. Leitfähigkeit	gemäß Norm
Trübung	gemäß Norm
Temperatur	gemäß Norm
Farbe	Arbeitsanweisung FUB
Geruch	Arbeitsanweisung FUB
Neigung zur Schaumbildung	Arbeitsanweisung FUB
Angaben zu Abweichungen in den Arbeitsanweisungen (Anmischung, Injektion)	keine
sonstige Bemerkungen	keine

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Durchführung		
Elutionswasser:	Trinkwasser	
Bodenmaterial:	Frechener Feinsand (FR36)	
	Parallelen (Säule)	
	A	B
Dauer Spülung Sandsäule [h]	20	20
Fließrate Q [l/h]	4	4
Datum - Beginn der Prüfung [TT.MM.JJJJ]	03.02.2015	03.02.2015
Abnahme Blindwert [h:min]	08:15	08:15
Start Aushärtezeit (Vermischung A+B) [h:min]	11:28	11:28
Injektionsdauer [min:sek]	02:52	02:25
Beginn des Gelierens nach [min:sek]	03:28	03:28
Masse angemischte Bauprodukt A+B [g]	1173,36	1134
Masse Rückstand Becherglas [g]	39,91	58,55
Masse injiziertes Bauprodukt [g]	1133,45	1075,45
Volumen injiziertes Bauprodukt [ml]	1100	1100
Injektionsstart [h:min]	11:34	11:49
Injektionsende [h:min]	11:44	12:00
aus Säule ausgetretenes Eluat [ml]	1040	1000
Start Elution [h:min]	12:44	12:44
Datum - Ende der Prüfung [TT.MM.JJJJ]	03.03.2015	03.03.2015
Uhrzeit - Ende der Prüfung [h:min]	09:45	09:45
Gesamtdauer der Elution [Tage]	28	28

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Ergebnisse der Säulenversuche - Parallele A					
	Temp.	pH-Wert	elektr. Leitf.	Trübung	TOC
Fraktionen	[°C]		[µS/cm]	[FNU]	[mg/l]
BW	18,0	7,80	738	< 1	2,90
Fr. 1	19,6	7,55	737	< 1	2,75
Fr. 2	19,8	7,64	737	< 1	2,83
Fr. 3	19,6	7,57	737	< 1	2,87
Fr. 4	19,6	7,61	739	< 1	1,89
Fr. 5	19,7	8,94	776	1,40	3,65
Fr. 6	19,5	9,36	827	1,15	3,72
Fr. 7	19,5	9,56	881	2,16	4,61
Fr. 8	19,3	9,68	924	3,84	3,56
Fr. 9	19,3	9,73	949	6,07	3,86
Fr. 10	19,4	9,74	956	5,69	3,63
Fr. 11	19,5	9,70	945	4,75	3,17
Fr. 12	19,5	9,63	920	3,86	4,10
Fr. 13	18,3	8,61	762	< 1	3,16
Fr. 14	18,5	8,47	759	< 1	3,47
Fr. 15	18,1	8,28	754	< 1	3,64
Fr. 16	18,5	8,17	757	< 1	3,34
Fr. 17	18,3	8,13	754	< 1	2,82
Fr. 18	17,2	7,97	755	< 1	3,25
Fr. 19	18,7	7,80	761	< 1	3,24
Fr. 20	18,9	7,76	767	< 1	4,16
Fr. 21	19,0	7,66	742	< 1	3,08
Fr. 22	19,0	7,71	742	< 1	3,13
Fr. 23	18,8	7,70	750	< 1	2,59
Fr. 24	19,1	7,65	749	< 1	4,42
	Al	Ca	K	Na	Geruch
Fraktionen	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	
BW	0,0104	107,1	4,12	45,8	geruchlos
Fr. 1	0,021	104,4	4,11	43,2	geruchlos
Fr. 2	0,0063	101,6	3,9	42,1	geruchlos
Fr. 3	0,0064	90,54	3,6	37,8	geruchlos
Fr. 4	0,0146	70,41	3,07	30,4	geruchlos
Fr. 5	5,577	71,63	3,03	51,8	geruchlos
Fr. 6	7,953	43,44	3,15	70,3	geruchlos
Fr. 7	14,22	35,68	4,57	125	geruchlos
Fr. 8	16,41	21,15	4,74	150	geruchlos
Fr. 9	16,19	21,19	4,55	165	geruchlos
Fr. 10	9,309	20,52	4,14	171	geruchlos
Fr. 11	8,876	21,7	4,32	176	geruchlos
Fr. 12	7,98	21,12	4,38	172	geruchlos
Fr. 13	0,19	97,61	4,23	76	geruchlos
Fr. 14	0,0822	101,9	4,3	71,2	geruchlos
Fr. 15	0,0379	107,8	4,3	65,4	geruchlos
Fr. 16	0,0249	108,5	4,19	65,4	geruchlos
Fr. 17	0,0123	109,1	4,18	63,4	geruchlos
Fr. 18	0,0146	108,5	3,97	60,9	geruchlos
Fr. 19	0,0175	116,3	4,59	58,3	geruchlos
Fr. 20	0,0058	115,7	4,6	57,9	geruchlos

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Ergebnisse der Säulenversuche - Parallele A					
	Al	Ca	K	Na	Geruch
Fraktionen	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	
Fr. 21	0,0032	116,2	4,27	52,4	geruchlos
Fr. 22	0,0039	116,2	4,31	52,4	geruchlos
Fr. 23	0,0004	103,9	3,6	47,6	geruchlos
Fr. 24	0,0033	90,81	3,52	47,4	geruchlos
Fraktionen	Farbe	N. z. Schaumb.	Entnahmezeitpunkt	Entnahmevolumen [ml]	Datum
BW	farblos	keine	08:15	1960	03.02.2015
Fr. 1	farblos	keine	13:14	1980	03.02.2015
Fr. 2	farblos	keine	13:44	1900	03.02.2015
Fr. 3	farblos	keine	14:14	1910	03.02.2015
Fr. 4	farblos	keine	14:44	1960	03.02.2015
Fr. 5	farblos	keine	15:14	1980	03.02.2015
Fr. 6	farblos	keine	15:44	1980	03.02.2015
Fr. 7	farblos	keine	16:14	2000	03.02.2015
Fr. 8	farblos	keine	16:44	2000	03.02.2015
Fr. 9	farblos	keine	17:14	2000	03.02.2015
Fr. 10	farblos	keine	17:44	1960	03.02.2015
Fr. 11	farblos	keine	18:14	1880	03.02.2015
Fr. 12	farblos	keine	18:44	2000	03.02.2015
Fr. 13	farblos	keine	09:48	2060	04.02.2015
Fr. 14	farblos	keine	16:33	1960	04.02.2015
Fr. 15	farblos	keine	08:43	2080	05.02.2015
Fr. 16	farblos	keine	16:44	1950	05.02.2015
Fr. 17	farblos	keine	07:42	2000	06.02.2015
Fr. 18	farblos	keine	16:46	2000	06.02.2015
Fr. 19	farblos	keine	08:45	2040	10.02.2015
Fr. 20	farblos	keine	19:10	2040	10.02.2015
Fr. 21	farblos	keine	09:06	2000	16.02.2015
Fr. 22	farblos	keine	16:46	2020	16.02.2015
Fr. 23	farblos	keine	08:32	1980	03.03.2015
Fr. 24	farblos	keine	16:32	2040	03.03.2015

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Parallele A - Elutionswasser-Kontrolle					
	Temp.	pH-Wert	elektr. Leitf.	Trübung	TOC
Fraktionen	[°C]		[μ S/cm]	[FNU]	[mg/l]
EW 1	18,4	7,74	742	< 1	2,87
EW 2	18,1	7,75	751	< 1	3,01
EW 3	17,7	7,61	745	< 1	3,08
EW 4	18,5	7,64	759	< 1	2,59
EW 5	18,6	7,60	742	< 1	2,62
EW 6	17,2	7,59	750	< 1	3,51
	Al	Ca	K	Na	Geruch
Fraktionen	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	
EW 1	0,0143	116,4	4,38	47,6	geruchlos
EW 2	0,0071	105,4	3,94	46,4	geruchlos
EW 3	0,0086	100,3	3,89	43	geruchlos
EW 4	0,0107	90,23	3,81	37,2	geruchlos
EW 5	0,0103	108,9	4,15	41,8	geruchlos
EW 6	0	91,85	3,52	45,8	geruchlos
	Farbe	N. z. Schaumb.	Entnahmezeit- punkt [h:min]	Entnahme- volumen [ml]	Datum
Fraktionen					
EW 1	farblos	keine	10:38	640	03.02.2015
EW 2	farblos	keine	18:40	600	03.02.2015
EW 3	farblos	keine	16:40	500	05.02.2015
EW 4	farblos	keine	08:30	600	10.02.2015
EW 5	farblos	keine	08:45	550	16.02.2015
EW 6	farblos	keine	08:35	1000	03.03.2015

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Ergebnisse der Säulenversuche - Parallele B					
	Temp.	pH-Wert	elektr. Leitf.	Trübung	TOC
Fraktionen	[°C]		[µS/cm]	[FNU]	[mg/l]
BW	17,1	7,76	739	< 1	2,78
Fr. 1	19,5	7,64	738	< 1	2,83
Fr. 2	19,5	7,49	738	< 1	3,92
Fr. 3	19,5	7,55	741	< 1	3,59
Fr. 4	19,5	7,59	745	< 1	2,80
Fr. 5	19,5	9,01	785	1,81	4,67
Fr. 6	19,3	9,47	856	2,04	3,95
Fr. 7	19,3	9,59	896	2,97	3,88
Fr. 8	19,1	9,63	906	5,41	3,77
Fr. 9	19,2	9,65	914	4,49	4,06
Fr. 10	19,2	9,64	919	4,21	2,83
Fr. 11	19,3	9,58	896	3,32	3,26
Fr. 12	19,4	9,50	864	2,76	5,92
Fr. 13	18,5	8,57	764	< 1	3,38
Fr. 14	18,2	8,45	758	< 1	2,67
Fr. 15	18,1	8,25	756	< 1	2,99
Fr. 16	18,4	8,14	757	< 1	3,82
Fr. 17	18,1	8,10	754	< 1	3,27
Fr. 18	17,2	7,96	755	< 1	3,22
Fr. 19	18,7	7,79	760	< 1	3,02
Fr. 20	18,7	7,73	769	< 1	2,98
Fr. 21	18,9	7,66	742	< 1	2,75
Fr. 22	18,9	7,67	742	< 1	2,77
Fr. 23	18,9	7,67	750	< 1	3,64
Fr. 24	19,1	7,64	749	< 1	3,11
	Al	Ca	K	Na	Geruch
Fraktionen	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	
BW	0,012	113,4	4,31	47,7	geruchlos
Fr. 1	0,0064	99,44	3,85	41,5	geruchlos
Fr. 2	0,0218	103,4	3,98	43	geruchlos
Fr. 3	0,4999	82,91	3,51	36,5	geruchlos
Fr. 4	1,531	97,9	3,85	44,9	geruchlos
Fr. 5	7,34	53,71	3,3	58,3	geruchlos
Fr. 6	10,62	35,25	3,29	79,6	geruchlos
Fr. 7	14,63	33,27	4,54	134	geruchlos
Fr. 8	14,36	24,64	4,63	143	geruchlos
Fr. 9	13,43	22,83	4,67	150	geruchlos
Fr. 10	7,694	23,29	4,12	158	geruchlos
Fr. 11	6,684	24,64	4,24	152	geruchlos
Fr. 12	5,555	36,3	4,26	146	geruchlos
Fr. 13	0,1032	101	4,24	72,6	geruchlos
Fr. 14	0,0646	107,1	4,21	69	geruchlos
Fr. 15	0,0346	110	4,17	64,9	geruchlos
Fr. 16	0,027	108,6	4,2	64,8	geruchlos
Fr. 17	0,0158	108,7	4,2	62,5	geruchlos
Fr. 18	0,0273	109,5	4,17	60,5	geruchlos
Fr. 19	0,0134	113,3	4,48	57,4	geruchlos
Fr. 20	0,0052	116,4	4,55	58	geruchlos

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Ergebnisse der Säulenversuche - Parallele B					
	Al	Ca	K	Na	Geruch
Fraktionen	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	
Fr. 21	0,0039	116,2	4,18	52,1	geruchlos
Fr. 22	0,0049	116,8	4,23	52,1	geruchlos
Fr. 23	0,0000	91,06	3,73	47,5	geruchlos
Fr. 24	0,0033	91,05	3,51	47,9	geruchlos
	Farbe	N. z. Schaumb.	Entnahmezeitpunkt	Entnahmevolumen [ml]	Datum
Fraktionen					
BW	farblos	keine	08:15	2000	03.02.2015
Fr. 1	farblos	keine	13:14	2040	03.02.2015
Fr. 2	farblos	keine	13:44	2000	03.02.2015
Fr. 3	farblos	keine	14:14	2000	03.02.2015
Fr. 4	farblos	keine	14:44	2020	03.02.2015
Fr. 5	farblos	keine	15:14	2000	03.02.2015
Fr. 6	farblos	keine	15:44	2000	03.02.2015
Fr. 7	farblos	keine	16:14	2000	03.02.2015
Fr. 8	farblos	keine	16:44	2000	03.02.2015
Fr. 9	farblos	keine	17:14	2060	03.02.2015
Fr. 10	farblos	keine	17:44	1960	03.02.2015
Fr. 11	farblos	keine	18:14	1880	03.02.2015
Fr. 12	farblos	keine	18:44	2080	03.02.2015
Fr. 13	farblos	keine	09:48	2100	04.02.2015
Fr. 14	farblos	keine	16:33	2000	04.02.2015
Fr. 15	farblos	keine	08:43	2080	05.02.2015
Fr. 16	farblos	keine	16:44	2010	05.02.2015
Fr. 17	farblos	keine	07:42	2020	06.02.2015
Fr. 18	farblos	keine	16:46	2020	06.02.2015
Fr. 19	farblos	keine	08:45	2040	10.02.2015
Fr. 20	farblos	keine	19:10	2020	10.02.2015
Fr. 21	farblos	keine	09:06	2000	16.02.2015
Fr. 22	farblos	keine	16:46	2060	16.02.2015
Fr. 23	farblos	keine	08:32	2000	03.03.2015
Fr. 24	farblos	keine	16:32	2010	03.03.2015

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Parallele B - Elutionswasser-Kontrolle					
	Temp.	pH-Wert	elektr. Leitf.	Trübung	TOC
Fraktionen	[°C]		[µS/cm]	[FNU]	[mg/l]
EW 1	18,2	7,80	744	< 1	2,81
EW 2	17,2	7,69	749	< 1	2,48
EW 3	17,1	7,58	744	< 1	2,48
EW 4	18,4	7,66	758	< 1	2,27
EW 5	18,3	7,62	743	< 1	3,38
EW 6	17,7	7,65	750	< 1	2,87
	Al	Ca	K	Na	Geruch
Fraktionen	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	
EW 1	0,0094	113,9	4,27	47,8	geruchlos
EW 2	0,0079	102,3	4	44,8	geruchlos
EW 3	0,0087	101	3,99	43,3	geruchlos
EW 4	0,0096	105,1	4,28	43	geruchlos
EW 5	0,0102	100,1	3,77	38,8	geruchlos
EW 6	0	92,49	3,55	46,5	geruchlos
	Farbe	N. z. Schaumb.	Entnahmezeitpunkt	Entnahmevolumen [ml]	Datum
Fraktionen					
EW 1	farblos	keine	10:45	620	03.02.2015
EW 2	farblos	keine	18:40	650	03.02.2015
EW 3	farblos	keine	16:40	500	05.02.2015
EW 4	farblos	keine	08:30	550	10.02.2015
EW 5	farblos	keine	08:50	600	16.02.2015
EW 6	farblos	keine	08:35	1000	03.03.2015

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Input für die Modellierungen - Aluminium							
aus den Säulenversuchen:							
Säule			1	2	MIN	MAX	Mittelwert
Datum			03.02.2015	03.02.2015			
eingepresstes Volumen [ml]			1062,49	1043,21	1043,2	1062,5	1052,85
gebildeter Prüfkörper	Gewicht [g]		5411,00	5358,00	5358,0	5411,0	5384,50
	Volumen [ml]		2760,00	2790,00	2760,0	2790,0	2775,00
	Umfang [cm]		56,33	55,83	55,8	56,3	56,08
	Oberfläche (cm ²)		1010,04	992,19	992,2	1010,0	1001,12
Säule		[h]	1	2	MIN	MAX	Mittelwert
Aluminium	<i>BW</i>	0,00	0,0104	0,0120	0,0104	0,0120	0,0112
BW- bereinigt	Fr. 1	0,50	0,0106	-0,0056	-0,0056	0,0106	0,0025
[mg/l]	Fr. 2	1,00	-0,0041	0,0098	-0,0041	0,0098	0,0029
	Fr. 3	1,50	-0,0040	0,4879	-0,0040	0,4879	0,2420
	Fr. 4	2,00	0,0042	1,5190	0,0042	1,5190	0,7616
	Fr. 5	2,50	5,5666	7,3280	5,5666	7,3280	6,4473
	Fr. 6	3,00	7,9426	10,6080	7,9426	10,6080	9,2753
	Fr. 7	3,50	14,2096	14,6180	14,2096	14,6180	14,4138
	Fr. 8	4,00	16,3996	14,3480	14,3480	16,3996	15,3738
	Fr. 9	4,50	16,1796	13,4180	13,4180	16,1796	14,7988
	Fr. 10	5,00	9,2986	7,6820	7,6820	9,2986	8,4903
	Fr. 11	5,50	8,8656	6,6720	6,6720	8,8656	7,7688
	Fr. 12	6,00	7,9696	5,5430	5,5430	7,9696	6,7563
	Fr. 13	21,00	0,1796	0,0912	0,0912	0,1796	0,1354
	Fr. 14	28,00	0,0718	0,0526	0,0526	0,0718	0,0622
	Fr. 15	44,00	0,0275	0,0226	0,0226	0,0275	0,0251
	Fr. 16	52,00	0,0145	0,0150	0,0145	0,0150	0,0148
	Fr. 17	67,00	0,0019	0,0038	0,0019	0,0038	0,0029
	Fr. 18	76,00	0,0042	0,0153	0,0042	0,0153	0,0098
	Fr. 19	164,00	0,0071	0,0014	0,0014	0,0071	0,0043
	Fr. 20	174,50	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	Fr. 21	309,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	Fr. 22	316,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	Fr. 23	668,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	Fr. 24	676,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Gesamtfreisetzung Aluminium							
kumuliert	24 h		244,38	220,99	220,9948	244,3750	232,6849
auf	676 h		249,37	226,64	226,6393	249,3655	238,0024
Zur Kumulation wurden die erhaltenen Messwerte aus den Säulenversuchen auf den gesamten Betrachtungszeitraum interpoliert. Nichtlineare Interpolationsfunktionen wurden dann aus den Messwerten gebildet und die nicht experimentell erhaltenen Werte (halbstündige Auflösung) durch Exponential- oder Potenzfunktion auf die Zeit bis 180 Tage ermittelt.							
			238 mg Al	freigesetzt aus	1052,85 ml Gel		
normiert auf 1,0 l Gel			226 mg Al	freigesetzt aus	1000 ml Gel		

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Modellannahme Aluminium:						
	300,00 Liter	Weichgel werden pro m ³ Sohle verpresst				
		davon nur die oberen und unteren 0,1 m an der Freisetzung beteiligt:				
	300 x 0,1 =	30 Liter Weichgel pro m ² Sohlfläche (jeweils				
		Ober- und Unterseite)				
		pro Liter Weichgel werden durchschnittlich 226 mg Aluminium freigesetzt:				
	30 l/m ² x 226 mg/l =	6780 mg/m ²				
	Annahme:	- unebene Ober- und Unterseite, daher Sicherheitsfaktor von 1,8				
		- Freisetzung des Aluminiums geschieht binnen 24 h im Modell				
	6780 mg/m ² x 1,8 x 1/d =	12204 mg/m ² /d				
		Umrechnung in [g/m²/d] für Feflow-Input:				
	12204 / 1000 =	12,20 g/m ² /d	jeweils für die Oberseite und die			
			Unterseite der Sohle			

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Input für die Modellierungen - pH-Wert							
aus den Säulenversuchen:							
Säule		Stunden	1	2	MIN	MAX	Mittelwert
pH-Wert	<i>BW</i>	0,00	7,80	7,76	7,76	7,80	7,78
	Fr. 1	0,50	7,55	7,64	7,55	7,64	7,59
	Fr. 2	1,00	7,64	7,49	7,49	7,64	7,56
	Fr. 3	1,50	7,57	7,55	7,55	7,57	7,56
	Fr. 4	2,00	7,61	7,59	7,59	7,61	7,60
	Fr. 5	2,50	8,94	9,01	8,94	9,01	8,98
	Fr. 6	3,00	9,36	9,47	9,36	9,47	9,42
	Fr. 7	3,50	9,56	9,59	9,56	9,59	9,58
	Fr. 8	4,00	9,68	9,63	9,63	9,68	9,65
	Fr. 9	4,50	9,73	9,65	9,65	9,73	9,69
	Fr. 10	5,00	9,74	9,64	9,64	9,74	9,69
	Fr. 11	5,50	9,70	9,58	9,58	9,70	9,64
	Fr. 12	6,00	9,63	9,50	9,50	9,63	9,56
	Fr. 13	21,00	8,61	8,57	8,57	8,61	8,59
	Fr. 14	28,00	8,47	8,45	8,45	8,47	8,46
	Fr. 15	44,00	8,28	8,25	8,25	8,28	8,26
	Fr. 16	52,00	8,17	8,14	8,14	8,17	8,16
	Fr. 17	67,00	8,13	8,10	8,10	8,13	8,12
	Fr. 18	76,00	7,97	7,96	7,96	7,97	7,97
	Fr. 19	164,00	7,80	7,79	7,79	7,80	7,80
	Fr. 20	174,50	7,76	7,73	7,73	7,76	7,74
	Fr. 21	309,00	7,66	7,66	7,66	7,66	7,66
	Fr. 22	316,00	7,71	7,67	7,67	7,71	7,69
	Fr. 23	668,00	7,70	7,67	7,67	7,70	7,68
	Fr. 24	676,00	7,65	7,64	7,64	7,65	7,64
Umrechnung von pH-Wert in c(OH ⁻)							
Säule		Stunden	1	2	MIN	MAX	Mittelwert
OH⁻	<i>BW</i>	0,00	0,011	0,010	0,010	0,011	0,010
[mg/l]	Fr. 1	0,50	0,006	0,007	0,006	0,007	0,007
	Fr. 2	1,00	0,007	0,00521	0,005	0,007	0,006
	Fr. 3	1,50	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
	Fr. 4	2,00	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
	Fr. 5	2,50	0,147	0,176	0,147	0,176	0,161
	Fr. 6	3,00	0,391	0,503	0,391	0,503	0,447
	Fr. 7	3,50	0,616	0,663	0,616	0,663	0,639
	Fr. 8	4,00	0,817	0,719	0,719	0,817	0,768
	Fr. 9	4,50	0,921	0,763	0,763	0,921	0,842
	Fr. 10	5,00	0,936	0,735	0,735	0,936	0,836
	Fr. 11	5,50	0,848	0,639	0,639	0,848	0,744
	Fr. 12	6,00	0,724	0,534	0,534	0,724	0,629
	Fr. 13	21,00	0,069	0,063	0,063	0,069	0,066
	Fr. 14	28,00	0,050	0,048	0,048	0,050	0,049
	Fr. 15	44,00	0,032	0,030	0,030	0,032	0,031
	Fr. 16	52,00	0,025	0,024	0,024	0,025	0,024
	Fr. 17	67,00	0,023	0,021	0,021	0,023	0,022
	Fr. 18	76,00	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Säule		Stunden	1	2	MIN	MAX	Mittelwert
OH⁻	Fr. 19	164,00	0,011	0,010	0,010	0,011	0,011
[mg/l]	Fr. 20	174,50	0,010	0,009	0,009	0,010	0,009
	Fr. 21	309,00	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
	Fr. 22	316,00	0,009	0,008	0,008	0,009	0,008
	Fr. 23	668,00	0,009	0,008	0,008	0,009	0,008
	Fr. 24	676,00	0,008	0,007	0,007	0,008	0,007

Blindwert-Bereinigung

Säule		Stunden	1	2	MIN	MAX	Mittelwert
OH⁻		0,00					
BW- bereinigt	Fr. 1	0,50	-0,005	-0,002	-0,005	-0,002	-0,004
[mg/l]	Fr. 2	1,00	-0,003	-0,004	-0,004	-0,003	-0,004
	Fr. 3	1,50	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004
	Fr. 4	2,00	-0,004	-0,003	-0,004	-0,003	-0,003
	Fr. 5	2,50	0,136	0,166	0,136	0,166	0,151
	Fr. 6	3,00	0,381	0,493	0,381	0,493	0,437
	Fr. 7	3,50	0,605	0,653	0,605	0,653	0,629
	Fr. 8	4,00	0,807	0,709	0,709	0,807	0,758
	Fr. 9	4,50	0,911	0,753	0,753	0,911	0,832
	Fr. 10	5,00	0,926	0,726	0,726	0,926	0,826
	Fr. 11	5,50	0,837	0,629	0,629	0,837	0,733
	Fr. 12	6,00	0,713	0,524	0,524	0,713	0,619
	Fr. 13	21,00	0,059	0,053	0,053	0,059	0,056
	Fr. 14	28,00	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039
	Fr. 15	44,00	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
	Fr. 16	52,00	0,015	0,014	0,014	0,015	0,014
	Fr. 17	67,00	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
	Fr. 18	76,00	0,005	0,006	0,005	0,006	0,006
	Fr. 19	164,00	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000
	Fr. 20	174,50	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001
	Fr. 21	309,00	-0,003	-0,002	-0,003	-0,002	-0,002
	Fr. 22	316,00	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002
	Fr. 23	668,00	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002
	Fr. 24	676,00	-0,003	-0,002	-0,003	-0,002	-0,003

Um die Berechnung im Modell zu vereinfachen, werden die Kurven auf die signifikanten Werte reduziert, so z.B. auf Maximum und Wendepunkt. (Zwischen einzelnen Zeitschritten interpoliert das Modell die Werte dann linear)

	Stunden	Mittelwert	
		[mg/l]	
Fr. 9	4,50	0,832	Maximum
Fr. 13	21,00	0,056	Wendepunkt
Fr. 16	52,00	0,014	Hilfspunkt
Fr. 19	164,00	0,000	Ausgangsniveau

Forschungsvorhaben Untersuchungen zu Stofftransporten aus Injektionssohlen

Modellannahme pH-Wert:

zunächst Normierung auf 1,0 l Gel und in Einheit [g/l]:

$$(0,832 \text{ mg/l} * 1000 \text{ ml} / 1052,85 \text{ ml}) / 1000 \text{ mg/g} = 0,00079$$

	Stunden	Mittelwert	
		[g/l _w l _g]	
Fr. 9	4,50	0,0007902	Maximum
Fr. 13	21,00	5,319E-05	Wendepunkt
Fr. 16	52,00	1,33E-05	Hilfspunkt
Fr. 19	164,00	0	Ausgangsniveau

Umrechnung dann nach folgender Gleichung:

$$J_i = \frac{(c_i - c_0) \times V_W \times V_G \times f_0 \times f_t}{\Delta t_i}$$

mit

J_i	Auslaugrate im Eluat i in [g/m ² /d]
c_i	Konzentration im Eluat i in [g/l]
c_0	Blindwert im Leitungswasser in [g/l]
V_W	Volumen des Eluenten (Wasser); hier $V_W = 2,0$ l
V_G	Volumen des im Versuch injizierten Gels, hier normiert auf $V_G = 1,0$ l
f_0	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der unebenen Unterseite der Sohle, hier $f_0 = 1,8$
f_t	Injiziertes Gel im Modellraum, in der für die Auslaugung relevanten Mächtigkeit (0,10 m), hier $f_t = 30$ l/m ²
Δt_i	Dauer der Elutionsschritte, hier zu Beginn $\Delta t_i = 0,02$ d

	Stunden	J_i [g/m ² *d]	J_i [g/m ² *d] x (-1)	
			(Feflow Input)	
Fr. 9	4,50	4,27	-4,27	Maximum
Fr. 13	21,00	0,29	-0,29	Wendepunkt
Fr. 16	52,00	0,07	-0,07	Hilfspunkt
Fr. 19	164,00	0	0	Ausgangsniveau

Seite: 1/10

Sicherheitsdatenblatt
gemäß 1907/2006/EG, Artikel 31

Druckdatum: 23.10.2015

Versionsnummer 2

überarbeitet am: 23.10.2015

ABSCHNITT 1: Bezeichnung des Stoffs bzw. des Gemischs und des Unternehmens

1.1 Produktidentifikator

Handelsname: Ligasil 39

CAS-Nummer:

1344-09-8

EG-Nummer:

215-687-4

Registrierungsnummer 01-2119448725-31-0004

1.2 Relevante identifizierte Verwendungen des Stoffs oder Gemischs und

Verwendungen, von denen abgeraten wird

Das Produkt ist ausschließlich für industrielle und gewerbliche Anwendungen bestimmt.

Verwendung des Stoffes / des Gemisches

Rohstoff / Hilfsmittel für chemische Veredelung und technische Anwendungen in der Industrie.

1.3 Einzelheiten zum Lieferanten, der das Sicherheitsdatenblatt bereitstellt

Hersteller/Lieferant:

Wöllner GmbH

Wöllnerstr. 26

D-67065 Ludwigshafen

Telefon +49 (0)621 5402 0

Telefax +49 (0)621 5402 411

Auskunftgebender Bereich: kirsten.kissel@woellner.de - Tel.: +49 (0)621 5402 261

1.4 Notrufnummer: Emergency CONTACT (24-Hour-Number): GBK GmbH +49 (0) 6132-84463

ABSCHNITT 2: Mögliche Gefahren

2.1 Einstufung des Stoffs oder Gemischs

Einstufung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008

Der Stoff ist gemäß CLP-Verordnung nicht eingestuft.

2.2 Kennzeichnungselemente

Kennzeichnung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 entfällt

Gefahrenpiktogramme entfällt

Signalwort entfällt

Gefahrenhinweise entfällt

2.3 Sonstige Gefahren

Ergebnisse der PBT- und vPvB-Beurteilung

PBT: Nicht anwendbar.

vPvB: Nicht anwendbar.

ABSCHNITT 3: Zusammensetzung/Angaben zu Bestandteilen

3.1 Stoffe

CAS-Nr. Bezeichnung

1344-09-8 Kieselsäure, Natriumsalz MVZ > 3,2

EG-Nummer: 215-687-4

Beschreibung:

Gemisch aus nachfolgend angeführten Stoffen, Differenz zu 100%: Bestandteile, die nicht als gefährlich einzustufen sind.

Gefährliche Inhaltsstoffe: entfällt

ABSCHNITT 4: Erste-Hilfe-Maßnahmen

4.1 Beschreibung der Erste-Hilfe-Maßnahmen

Allgemeine Hinweise: Keine besonderen Maßnahmen erforderlich.

nach Hautkontakt: Sofort mit Wasser abwaschen.

nach Augenkontakt:

Augen bei geöffnetem Lidspalt 15 Minuten mit fließendem Wasser spülen.

nach Verschlucken:

Mund ausspülen und reichlich Wasser nachtrinken.

Sofort Arzt hinzuziehen.

4.2 Wichtigste akute und verzögert auftretende Symptome und Wirkungen

Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

(Fortsetzung auf Seite 2)

Seite: 2/10

Sicherheitsdatenblatt
gemäß 1907/2006/EG, Artikel 31

Druckdatum: 23.10.2015

Versionsnummer 2

überarbeitet am: 23.10.2015

Handelsname: Ligasil 39

(Fortsetzung von Seite 1)

4.3 Hinweise auf ärztliche Soforthilfe oder Spezialbehandlung
Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

ABSCHNITT 5: Maßnahmen zur Brandbekämpfung

5.1 Löschmittel

Geeignete Löschmittel:

Produkt selbst brennt nicht; Löschmaßnahmen auf Umgebungsbrand abstimmen.

5.2 Besondere vom Stoff oder Gemisch ausgehende Gefahren

Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

5.3 Hinweise für die Brandbekämpfung

Besondere Schutzausrüstung: Keine besonderen Maßnahmen erforderlich.

ABSCHNITT 6: Maßnahmen bei unbeabsichtigter Freisetzung

6.1 Personenbezogene Vorsichtsmaßnahmen, Schutzausrüstungen und in Notfällen anzuwendende Verfahren

Besondere Rutschgefahr durch ausgelaufenes/verschüttetes Produkt.

6.2 Umweltschutzmaßnahmen:

Nicht in die Kanalisation/Oberflächenwasser/Grundwasser gelangen lassen.

6.3 Methoden und Material für Rückhaltung und Reinigung:

Mit flüssigkeitsbindendem Material (Sand, Kieselgur, Säurebinder, Universalbinder) aufnehmen.

6.4 Verweis auf andere Abschnitte

Informationen zur sicheren Handhabung siehe Abschnitt 7.

Informationen zur persönlichen Schutzausrüstung siehe Abschnitt 8.

Informationen zur Entsorgung siehe Abschnitt 13.

ABSCHNITT 7: Handhabung und Lagerung

Handhabung:

Schutzmaßnahmen zur sicheren Handhabung

Die beim Umgang mit Chemikalien üblichen Vorsichtsmaßnahmen sind zu beachten. Berührung mit Haut, Augen und Kleidung vermeiden.

7.1 Hinweise zum Brand- und Explosionsschutz:

Keine besonderen Maßnahmen erforderlich.

7.2 Bedingungen zur sicheren Lagerung unter Berücksichtigung von Unverträglichkeiten

Lagerung:

Anforderung an Lagerräume und Behälter:

Keine Leichtmetallgefäße verwenden.

Nicht geeignetes Behältermaterial: Aluminium

Nicht geeignetes Behältermaterial: Glas oder Keramik.

Nicht geeignetes Behältermaterial: Zink.

Geeignetes Material für Behälter und Rohrleitungen: Stahl oder Edelstahl.

Zusammenlagerungshinweise: Nicht zusammen mit Säuren lagern.

Weitere Angaben zu den Lagerbedingungen:

Vor Frost schützen.

Lagerstabilität: 12 Monate

Lagerklasse: 12 (TRGS 510)

7.3 Spezifische Endanwendungen Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

ABSCHNITT 8: Begrenzung und Überwachung der Exposition/Persönliche Schutzausrüstungen

Zusätzliche Hinweise zur Gestaltung technischer Anlagen:

Keine weiteren Angaben, siehe Abschnitt 7.

8.1 Zu überwachende Parameter

Bestandteile mit arbeitsplatzbezogenen, zu überwachenden Grenzwerten: Entfällt
DNEL-Werte

Silicic acid, sodium salt:

DNEL dermal - workers, long-term = 1,59 mg/kg bw/d

DNEL inhalation - workers, long-term = 5,61 mg/m³ bw/d

DNEL dermal - general population, long-term = 0,80 mg/kg bw/d

DNEL inhalation - general population, long-term = 1,38 mg/m³ bw/d

DNEL oral - general population, long-term = 0,80 mg/kg bw/d

(Fortsetzung auf Seite 3)

Seite: 3/10

Sicherheitsdatenblatt
gemäß 1907/2006/EG, Artikel 31

Druckdatum: 23.10.2015

Versionsnummer 2

überarbeitet am: 23.10.2015

Handelsname: Ligasil 39

(Fortsetzung von Seite 2)

PNEC-Werte

Silicic acid, sodium salt:
PNEC aqua - freshwater = 7,5 mg/l

Zusätzliche Hinweise: Exposure scenario: siehe Annex

8.2 Begrenzung und Überwachung der Exposition

Persönliche Schutzausrüstung:

Allgemeine Schutz- und Hygienemaßnahmen:

Die üblichen Vorsichtsmaßnahmen beim Umgang mit Chemikalien sind zu beachten.

Atemschutz: nicht erforderlich.

Handschutz: Handschuhe - laugenbeständig.

Handschuhmaterial

Naturlatex mit geringem Polychloropren-Latex-Anteil (Lapren, Fa. KCL)

Durchdringungszeit des Handschuhmaterials

Wert für die Permeation: Level \leq 6

Angaben basieren auf Informationen des Handschuhherstellers, auf Literaturangaben oder sind durch Analogieschluß von ähnlichen Stoffen abgeleitet worden.

Augenschutz: Schutzbrille.

ABSCHNITT 9: Physikalische und chemische Eigenschaften

9.1 Angaben zu den grundlegenden physikalischen und chemischen Eigenschaften

Allgemeine Angaben

Aussehen:

Form:	flüssig
Farbe:	farblos
Geruch:	geruchlos

pH-Wert (100 g/l) bei 20 °C: ca. 11,3

Zustandsänderung
Siedepunkt/Siedebereich: > 100 °C

Flammpunkt: Nicht anwendbar

Selbstentzündlichkeit: Produkt ist nicht selbstentzündlich.

Explosionsgefahr: Produkt nicht explosionsgefährlich

Dichte bei 20 °C: ca. 1,37 g/cm³

Löslichkeit in / Mischbarkeit mit
Wasser: vollständig mischbar

Viskosität:
dynamisch bei 20 °C: ca. 100 mPas
Organische Lösemittel: 0,0 %

9.2 Sonstige Angaben Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

ABSCHNITT 10: Stabilität und Reaktivität

10.1 Reaktivität Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

10.2 Chemische Stabilität

Thermische Zersetzung / zu vermeidende Bedingungen:

Keine Zersetzung bei bestimmungsgemäßer Verwendung.

10.3 Möglichkeit gefährlicher Reaktionen

Stark exotherme Reaktion mit Säuren.

Reaktionen mit Leichtmetallen unter Bildung von Wasserstoff.

10.4 Zu vermeidende Bedingungen Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

10.5 Unverträgliche Materialien: Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

10.6 Gefährliche Zersetzungsprodukte:

keine gefährlichen Zersetzungsprodukte bekannt.

(Fortsetzung auf Seite 4)

Handelsname: Ligasil 39

(Fortsetzung von Seite 3)

ABSCHNITT 11: Toxikologische Angaben

11.1 Angaben zu toxikologischen Wirkungen
Akute Toxizität

Einstufungsrelevante LD/LC50-Werte:

1344-09-8 Kieselsäure, Natriumsalz MVZ > 3,2

Oral	LD 50	> 2000 mg/kg (Ratte)
------	-------	----------------------

Primäre Reizwirkung:

Ätz-/Reizwirkung auf die Haut schwache Reizwirkung

Schwere Augenschädigung/-reizung schwache Reizwirkung

Sensibilisierung der Atemwege/Haut

Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.

CMR-Wirkungen (krebserzeugende, erbgutverändernde und fortpflanzungsgefährdende Wirkung)

Keimzell-Mutagenität

Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.

Karzinogenität

Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.

Reproduktionstoxizität

Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.

Spezifische Zielorgan-Toxizität bei einmaliger Exposition

Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.

Spezifische Zielorgan-Toxizität bei wiederholter Exposition

Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.

Aspirationsgefahr

Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.

ABSCHNITT 12: Umweltbezogene Angaben

12.1 Toxizität

Aquatische Toxizität:

1344-09-8 Kieselsäure, Natriumsalz MVZ > 3,2

EC 50 / 48h	> 1000 mg/l (Daphnie)
-------------	-----------------------

LC50 / 96 h	> 1000 mg/l (Zebrabärbling)
-------------	-----------------------------

12.2 Persistenz und Abbaubarkeit Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

Sonstige Hinweise:

Physikochemische Eliminierbarkeit: aus dem Wasser gut eliminierbar

Anorganische Substanz, biologische Abbaubarkeit nicht betroffen

12.3 Bioakkumulationspotenzial Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

12.4 Mobilität im Boden Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

Ökotoxische Wirkungen:

Bemerkung: Nach Neutralisation ist keine Toxizität mehr zu beobachten.

Verhalten in Kläranlagen:

Das Produkt ist eine Lauge. Vor Einleitung in Kläranlagen ist in der Regel eine Neutralisation erforderlich.

Weitere ökologische Hinweise:

Allgemeine Hinweise:

Nicht unverdünnt bzw. in größeren Mengen in das Grundwasser, in Gewässer oder in die Kanalisation gelangen lassen.

12.5 Ergebnisse der PBT- und vPvB-Beurteilung

PBT: Nicht anwendbar.

vPvB: Nicht anwendbar.

12.6 Andere schädliche Wirkungen Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

ABSCHNITT 13: Hinweise zur Entsorgung

13.1 Verfahren der Abfallbehandlung

Empfehlung:

Kann unter Beachtung der Vorschriften und nach Rücksprache mit dem Entsorger und der zuständigen Behörde nach Neutralisation und Verfestigung zusammen mit Bauschutt abgelagert werden.

Europäischer Abfallkatalog

Die Zuordnung zu den Abfallschlüsselnummern ist entsprechend der AVV-Verordnung branchen- und prozeßspezifisch durchzuführen.

(Fortsetzung auf Seite 5)

Seite: 5/10

Sicherheitsdatenblatt
gemäß 1907/2006/EG, Artikel 31

Druckdatum: 23.10.2015

Versionsnummer 2

überarbeitet am: 23.10.2015

Handelsname: Ligasil 39	
(Fortsetzung von Seite 4)	
<p>Ungereinigte Verpackungen: Empfehlung: Entsorgung gemäß den behördlichen Vorschriften. Empfohlenes Reinigungsmittel: Wasser, gegebenenfalls mit Zusatz von Reinigungsmitteln.</p>	
ABSCHNITT 14: Angaben zum Transport	
14.1 UN-Nummer ADR, ADN, IMDG, IATA	entfällt
14.2 Ordnungsgemäße UN-Versandbezeichnung ADR, ADN, IMDG, IATA	entfällt
14.3 Transportgefahrenklassen ADR, ADN, IMDG, IATA Klasse	entfällt
14.4 Verpackungsgruppe ADR, IMDG, IATA	entfällt
14.5 Umweltgefahren: Marine pollutant:	Nein
14.6 Besondere Vorsichtsmaßnahmen für den Verwender	Nicht anwendbar.
14.7 Massengutbeförderung gemäß Anhang II des MARPOL-Übereinkommens und gemäß IBC-Code	Nicht anwendbar.
UN "Model Regulation":	entfällt
ABSCHNITT 15: Rechtsvorschriften	
<p>15.1 Vorschriften zu Sicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz/spezifische Rechtsvorschriften für den Stoff oder das Gemisch</p> <p>Nationale Vorschriften:</p> <p>Wassergefährdungsklasse: WGK 1: schwach wassergefährdend (gemäß der allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen vom 27. Juli 2005)</p> <p>Sonstige Vorschriften, Beschränkungen und Verbotsvorschriften Stofflistungen: Europa (EINECS): ja Australien (AICS): ja Kanada (DSL): ja USA (TSCA): ja Japan (ENCS): ja Korea (KECI): ja China (IECSC): ja Taiwan (NECI): ja Philippinen (PICCS): ja Neu Seeland (HSNO): ja</p> <p>15.2 Stoffsicherheitsbeurteilung: Eine Stoffsicherheitsbeurteilung wurde durchgeführt.</p>	
ABSCHNITT 16: Sonstige Angaben	
<p>Das Produkt ist ausschließlich für gewerbliche/industrielle Anwendungen (siehe Produktinformation) bestimmt. Vorstehende Angaben entsprechen dem aktuellen Stand unserer technischen Erkenntnisse und Erfahrungen, sind aber keine rechtlich verbindliche Zusicherung bestimmter Eigenschaften oder der Eignung für einen bestimmten Anwendungszweck. Der Anwender ist nicht von eigenen Prüfungen befreit.</p> <p>Datenblatt ausstellender Bereich: Fachlabor Ansprechpartner: Frau Dr. Kissel Abkürzungen und Akronyme: RID: Règlement international concernant le transport des marchandises dangereuses par chemin de fer (Regulations Concerning the International Transport of Dangerous Goods by Rail)</p>	
(Fortsetzung auf Seite 6)	

Seite: 6/10

Sicherheitsdatenblatt
gemäß 1907/2006/EG, Artikel 31

Druckdatum: 23.10.2015

Versionsnummer 2

überarbeitet am: 23.10.2015

Handelsname: Ligasil 39

(Fortsetzung von Seite 5)

ICAO: International Civil Aviation Organisation
ADR: Accord européen sur le transport des marchandises dangereuses par Route (European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road)
IMDG: International Maritime Code for Dangerous Goods
IATA: International Air Transport Association
GHS: Globally Harmonised System of Classification and Labelling of Chemicals
EINECS: European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances
ELINCS: European List of Notified Chemical Substances
CAS: Chemical Abstracts Service (division of the American Chemical Society)
DNEL: Derived No-Effect Level (REACH)
PNEC: Predicted No-Effect Concentration (REACH)
LC50: Lethal concentration, 50 percent
LD50: Lethal dose, 50 percent
PBT: Persistent, Bioaccumulative and Toxic
vPvB: very Persistent and very Bioaccumulative

*** Daten gegenüber der Vorversion geändert**

(Fortsetzung auf Seite 7)

D

Handelsname: Ligasil 39

(Fortsetzung von Seite 6)

Anhang: Expositionsszenarium 1

Kurzbezeichnung des Expositionsszenariums

Exposition am Arbeitsplatz gegenüber Kieselsäure, Natriumsalz (EK 215-687-4)
Lösungen

Verwendungssektor

Verwendungssektoren [SU]: 3, 22 (einschließlich der zusätzlichen SU: 2a, 2b, 4, 5, 6b, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20)

Prozesskategorie

Verfahrenskategorie [PROC]: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8a, 8b, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26

Umweltfreisetzungskategorie

Umweltfreisetzungskategorien [ERC]: 1, 2, 3, 4, 5, 6a, 6b, 6d, 7, 8a, 8b, 8c, 8d, 8e, 8f, 9a, 9b

Beschreibung der im Expositionsszenarium berücksichtigten Tätigkeiten/Verfahren

Herstellung und Formulierung der Substanz sowie industrielle und gewerbliche Verwendungen.

Verwendungsbedingungen

Dauer und Häufigkeit

Behandelt eine Verwendungshäufigkeit bis zu: täglicher, wöchentlicher, monatlicher, jährlicher Verwendung.

Physikalische Parameter

Physikalischer Zustand Flüssig, Lösung, Dampfdruck 0.31 Pa (1165 °C)

Konzentration des Stoffes im Gemisch

Behandelt einen Prozentwert von bis zu 100 % Anteil des Stoffes am Produkt, sofern nicht anders angegeben.

Verwendete Menge pro Zeit oder Tätigkeit Ohne Begrenzung.

Sonstige Verwendungsbedingungen

Sonstige Verwendungsbedingungen mit Einfluss auf die Umweltexposition

Keine besonderen Maßnahmen erforderlich.

Sonstige Verwendungsbedingungen mit Einfluss auf die Verbrauchereexposition

nicht erforderlich

Sonstige Verwendungsbedingungen mit Einfluss auf die Verbrauchereexposition während der Nutzungsdauer des Erzeugnisses

Nicht anwendbar

Risikomanagementmaßnahmen

Es sollte möglichst ein lokales Abluftsystem verwendet werden.

Darüber hinaus ist bei der Verwendung von Kieselsäure, Natriumsalz als Substanz als solche oder in einer Zubereitung außerhalb geschlossener Systeme das Tragen geeigneter persönlicher Schutzausrüstung (Handschuhe, Schutzbrille, Staub- oder Atemschutzmaske) die einzige und zu bevorzugende Kontrollmaßnahme.

Arbeitnehmerschutz

Setzt voraus, dass ein guter Grundstandard von Arbeitshygiene angewandt wird. Die Arbeit findet sowohl drinnen als auch im Freien statt.

Organisatorische Schutzmaßnahmen

PROC 1, 2, 3 Anwendung in geschlossenen Systemen. Es sind keine anderen besonderen Maßnahmen festgelegt.

Technische Schutzmaßnahmen

PROC 7, 11 Verbesserte allgemeine Belüftung durch mechanische Mittel bereitstellen. Wenn beim Umgang Staub entstehen kann, ist eine geeignete Atemschutzausrüstung zu tragen. Tragen Sie: Halbmaske (DIN EN 140)/Viertelmaske (DIN EN 140); Filtertyp: A/P2 oder besser. Schutzhandschuhe/Schutzkleidung/Augenschutz/Gesichtsschutz tragen. Handschutz: Undurchlässige Handschuhe tragen (EN 374).

Persönliche Schutzmaßnahmen

PROC 4, 5, 6, 8a, 8b, 9, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26 Schutzhandschuhe/Schutzkleidung/Augenschutz/Gesichtsschutz tragen. Handschutz: Undurchlässige Handschuhe tragen (EN 374).

Maßnahmen zum Verbraucherschutz Keine besonderen Maßnahmen erforderlich.

Umweltschutzmaßnahmen

Nicht erforderlich, da lösliche Silikate wie Kieselsäure, Natriumsalz die Kriterien für die Einstufung als umweltgefährdend gemäß 67/548/EWG (siehe Artikel 14.4 der REACH-Verordnung) nicht erfüllen.

Darüber hinaus werden lösliche Silikate umfangreichen Untersuchungen über ihr Expositionspotential gegenüber der Umwelt und die möglichen Risiken ihrer Freisetzung unterzogen, da es sich um Stoffe handelt, die in großen Mengen produziert werden (Van Dokkum et al. 2002, OECD SIDS 2004, HERA 2005 und CEES 2008). Es wurde der Schluss gezogen, dass lösliche Silikate aufgrund ihres geringen Gefahrenpotentials derzeit nur eine niedrige Priorität bei der weiteren Arbeit haben.

(Fortsetzung auf Seite 8)

Seite: 8/10

Sicherheitsdatenblatt
gemäß 1907/2006/EG, Artikel 31

Druckdatum: 23.10.2015

Versionsnummer 2

überarbeitet am: 23.10.2015

Handelsname: Ligasil 39

(Fortsetzung von Seite 7)

Luft Keine besonderen Maßnahmen erforderlich.

Wasser Keine besonderen Maßnahmen erforderlich.

Entsorgungsmaßnahmen Sicherstellen, dass Abfall gesammelt und zurückgehalten wird.

Entsorgungsverfahren

Sonderabfallsammler übergeben oder zu Problemstoffsammelstelle bringen.

Art des Abfalls Teilentleerte und ungereinigte Gebinde

Expositionsprognose

Wenn die empfohlenen Risikomanagement-Maßnahmen (RMM) und Betriebsbedingungen wie persönliche Schutzausrüstung beachtet werden, ist die Exposition gegenüber wässrigen Kieselsäure, Natriumsalz-Lösungen vernachlässigbar. RMM basieren auf einer qualitativen Risikocharakterisierung.

Verbraucher Für dieses Expositionsszenarium nicht relevant.

Leitlinien für nachgeschaltete Anwender

Die implementierten RMM und Betriebsbedingungen stellen sicher, dass die Exposition des Arbeiters derart verringert wird, dass Gesundheitsgefahren vermieden werden und das Risiko als hinreichend kontrolliert betrachtet wird.

(Fortsetzung auf Seite 9)

D

Handelsname: Ligasil 39

(Fortsetzung von Seite 8)

Anhang: Expositionsszenarium 2

Kurzbezeichnung des Expositionsszenariums Verwendung in Endverbraucherprodukten
Verwendungssektor

Verwendungssektoren [SU]: 21 (einschließlich der zusätzlichen SU: 2a, 6b, 10, 13, 18, 19)

Produktkategorie Produktkategorie [PC]: 1, 3, 8, 9a, 9b, 14, 15, 26, 31, 35, 37, 39

Prozesskategorie

Verfahrenskategorie [PROC]: 1, 3, 8, 9a, 9b, 14, 15, 26, 31, 35, 37, 39

Umweltfreisetzungskategorie

Umweltfreisetzungskategorien [ERC]: 8a, 8b, 8c, 8d, 8e, 8f, 9a, 9b

Beschreibung der im Expositionsszenarium berücksichtigten Tätigkeiten/Verfahren

Eine allgemeine Exposition von Verbrauchern findet beim Gebrauch von verkauften Haushaltsprodukten statt.

Verwendungsbedingungen

Dauer und Häufigkeit

Behandelt eine Verwendungshäufigkeit bis zu: täglicher, wöchentlicher, monatlicher, jährlicher Verwendung.

Physikalische Parameter

Physikalischer Zustand Pulver/ Flüssig, Dampfdruck 0.31 Pa (1165 °C)

Konzentration des Stoffes im Gemisch

Behandelt einen Prozentwert von bis zu 100 % Anteil des Stoffes am Produkt, sofern nicht anders angegeben.

Verwendete Menge pro Zeit oder Tätigkeit Ohne Begrenzung.

Sonstige Verwendungsbedingungen

Sonstige Verwendungsbedingungen mit Einfluss auf die Umweltexposition

Keine besonderen Maßnahmen erforderlich.

Sonstige Verwendungsbedingungen mit Einfluss auf die Verbraucherexposition

nicht erforderlich

Sonstige Verwendungsbedingungen mit Einfluss auf die Verbraucherexposition während der Nutzungsdauer des Erzeugnisses

Nicht anwendbar

Risikomanagementmaßnahmen

Sofern nicht anders angegeben, wird eine Verwendung bei Raumtemperatur, in einem Raum mit 20 m³ (ECHA-Leitfaden R.15., 2008) und mit üblichem Belüftungssystem vorausgesetzt.

Arbeitnehmerschutz

Technische Schutzmaßnahmen

Behandelt wird eine Verwendung von bis zu 365 Tagen/Jahr; behandelt die Verwendung bei typischer Haushaltsbelüftung.

Persönliche Schutzmaßnahmen Keine besonderen Maßnahmen erforderlich.

Maßnahmen zum Verbraucherschutz

In Endverbraucherprodukten wird der Gefahr von Reizungen durch lösliche Silikate ggf. Rechnung getragen, indem eine geeignete Beschriftung sowie die Empfehlung, Handschuhe zu tragen, auf dem Endverbraucherprodukt angebracht wird. Im Allgemeinen ist die dermale, inhalative und orale Verbraucherexposition gegenüber im Handel erhältlichen Produkten aufgrund der Formulierung (begrenzte Konzentration von löslichen Silikaten, Verteilung der Partikelgröße, Agglomeration und Staubpotential, Tabletten und Gels), Verpackung und dem schlechtem Geschmack der im Handel erhältlichen Produkte auf ein kleinstmögliches Maß beschränkt.

Entsorgungsmaßnahmen Sicherstellen, dass Abfall gesammelt und zurückgehalten wird.

Entsorgungsverfahren Produktreste werden mit dem Hausmüll entsorgt.

Art des Abfalls Teilentleerte und ungereinigte Gebinde

Expositionsprognose

Einige Produktverwendungen können zu lokalen Reizungen (Haut und Augen) führen, wenn stark konzentrierte Produkte verwendet werden, was normalerweise nicht der Fall ist. Dieser Gefahr wird ggf. durch geeignete Kennzeichnung und dem Rat an Verbraucher, Haushaltsgummihandschuhe zu verwenden, Rechnung getragen. Im Allgemeinen ist die dermale, inhalative und orale Verbraucherexposition gegenüber im Handel erhältlichen Produkten aufgrund der Formulierungsmaßnahmen (Verwendung begrenzter Konzentrationen, Verringerung des Staubpotentials durch Agglomeration oder die Verwendung von Tabletten und Gels), dem schlechten Geschmack der Produkte, Verpackungsvorrichtungen (Versiegelung von Tabletten, kindersichere Verschlüsse) oder Denaturierung auf ein kleinstmögliches Maß gehalten.

Verbraucher

Neben den produktintegrierten RMM sollten Verbraucheranweisungen und Hinweise zu einem sicheren Gebrauch umgesetzt werden. Dazu gehören technische Gebrauchsanweisungen, Anweisungen zur Verwendung von Schutzkleidung und Beachtung von Verhaltensregeln sowie Hinweise zur Lagerung und Entsorgung. Die implementierten Maßnahmen zur Risikoverminderung stellen sicher, dass die

(Fortsetzung auf Seite 10)

Seite: 10/10

Sicherheitsdatenblatt
gemäß 1907/2006/EG, Artikel 31

Druckdatum: 23.10.2015

Versionsnummer 2

überarbeitet am: 23.10.2015

Handelsname: Ligasil 39

(Fortsetzung von Seite 9)
Exposition des Verbrauchers derart verringert wird, dass Gesundheitsgefahren
vermieden werden und das Risiko als hinreichend kontrolliert betrachtet wird.
Leitlinien für nachgeschaltete Anwender
Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

D

ABSCHNITT 1: Bezeichnung des Stoffs bzw. des Gemischs und des Unternehmens

1.1 Produktidentifikator

Handelsname: Stabilil 19

1.2 Relevante identifizierte Verwendungen des Stoffs oder Gemischs und Verwendungen, von denen abgeraten wird

Das Produkt ist ausschließlich für industrielle und gewerbliche Anwendungen bestimmt.

Verwendung des Stoffes / des Gemisches Beton/Mörtel - Zusatzmittel

1.3 Einzelheiten zum Lieferanten, der das Sicherheitsdatenblatt bereitstellt

Hersteller/Lieferant:

Wöllner GmbH
Wöllnerstr. 26
D-67065 Ludwigshafen

Telefon +49 (0) 621 5402 0
Telefax +49 (0) 621 5402 411

Auskunftgebender Bereich: kirsten.kissel@woellner.de - Tel.: +49 (0) 621 5402 261

1.4 Notrufnummer: Emergency CONTACT (24-Hour-Number): GBK GmbH +49 (0) 6132-84463

ABSCHNITT 2: Mögliche Gefahren

2.1 Einstufung des Stoffs oder Gemischs

Einstufung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008



GHS05 Ätzwirkung

Met. Corr.1 H290 Kann gegenüber Metallen korrosiv sein.

Skin Corr. 1A H314 Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.

Eye Dam. 1 H318 Verursacht schwere Augenschäden.

2.2 Kennzeichnungselemente

Kennzeichnung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008

Das Produkt ist gemäß CLP-Verordnung eingestuft und gekennzeichnet.

Gefahrenpiktogramme



GHS05

Signalwort Gefahr

Gefahrbestimmende Komponenten zur Etikettierung:

Natriumaluminat

Gefahrenhinweise

H290 Kann gegenüber Metallen korrosiv sein.

H314 Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.

Sicherheitshinweise

P280 Schutzhandschuhe/Schutzkleidung/Augenschutz/Gesichtsschutz tragen.

P302+P352 BEI BERÜHRUNG MIT DER HAUT: Mit viel Wasser und Seife waschen.

P305+P351+P338 BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Eventuell vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen.

P310 Sofort GIFTINFORMATIONSZENTRUM/Arzt anrufen.

P405 Unter Verschluss aufbewahren.

P501 Entsorgung des Inhalts / des Behälters gemäß den örtlichen / regionalen / nationalen / internationalen Vorschriften.

2.3 Sonstige Gefahren

Ergebnisse der PBT- und vPvB-Beurteilung

PBT: Nicht anwendbar.

vPvB: Nicht anwendbar.

ABSCHNITT 3: Zusammensetzung/Angaben zu Bestandteilen

3.2 Gemische

Beschreibung: Natriumaluminat in wässriger Lösung

(Fortsetzung auf Seite 2)

Handelsname: Stabisil 19

(Fortsetzung von Seite 1)

Gefährliche Inhaltsstoffe:

CAS: 1302-42-7	Natriumaluminat	50-100%
EINECS: 215-100-1	Met. Corr.1, H290; Skin Corr. 1A, H314; Eye	
Reg.nr.: 01-2119519249-35	Dam. 1, H318	

zusätzl. Hinweise:

Der Wortlaut der angeführten Gefahrenhinweise ist dem Abschnitt 16 zu entnehmen.

ABSCHNITT 4: Erste-Hilfe-Maßnahmen

4.1 Beschreibung der Erste-Hilfe-Maßnahmen

Allgemeine Hinweise:

Mit Produkt verunreinigte Kleidungsstücke unverzüglich entfernen.

nach Einatmen: Frischluftzufuhr, bei Beschwerden Arzt aufsuchen.

nach Hautkontakt:

Sofort mit Wasser und Seife abwaschen und gut nachspülen.

Sofort Arzt hinzuziehen.

nach Augenkontakt:

Augen bei geöffnetem Lidspalt mehrere Minuten unter fließendem Wasser abspülen und sofort Arzt konsultieren.

nach Verschlucken:

Reichlich Wasser nachtrinken und Frischluftzufuhr. Unverzüglich Arzt hinzuziehen.

4.2 Wichtigste akute und verzögert auftretende Symptome und Wirkungen

Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

Gefahren Gefahr von Magenperforation.

4.3 Hinweise auf ärztliche Soforthilfe oder Spezialbehandlung

Bei Verschlucken Magenspülung.

ABSCHNITT 5: Maßnahmen zur Brandbekämpfung

5.1 Löschmittel

Geeignete Löschmittel:

Produkt selbst brennt nicht; Löschmaßnahmen auf Umgebungsbrand abstimmen. CO₂, Löschpulver oder Wassersprühstrahl. Größeren Brand mit Wassersprühstrahl bekämpfen.

Aus Sicherheitsgründen ungeeignete Löschmittel: Wasser im Vollstrahl.

5.2 Besondere vom Stoff oder Gemisch ausgehende Gefahren

Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

5.3 Hinweise für die Brandbekämpfung

Besondere Schutzausrüstung: Laugenbeständige Schutzkleidung tragen

Weitere Angaben

Kontaminiertes Löschwasser getrennt sammeln, darf nicht in die Kanalisation gelangen.

ABSCHNITT 6: Maßnahmen bei unbeabsichtigter Freisetzung

6.1 Personenbezogene Vorsichtsmaßnahmen, Schutzausrüstungen und in Notfällen anzuwendende Verfahren

Schutzausrüstung tragen. Ungeschützte Personen fernhalten.

6.2 Umweltschutzmaßnahmen:

Nicht in die Kanalisation/Oberflächenwasser/Grundwasser gelangen lassen.

Mit viel Wasser verdünnen.

6.3 Methoden und Material für Rückhaltung und Reinigung:

Neutralisationsmittel anwenden.

Mit flüssigkeitsbindendem Material (Sand, Kieselgur, Säurebinder, Universalbinder) aufnehmen.

6.4 Verweis auf andere Abschnitte

Informationen zur sicheren Handhabung siehe Abschnitt 7.

Informationen zur persönlichen Schutzausrüstung siehe Abschnitt 8.

Informationen zur Entsorgung siehe Abschnitt 13.

ABSCHNITT 7: Handhabung und Lagerung

Handhabung:

Schutzmaßnahmen zur sicheren Handhabung Behälter dicht geschlossen halten.

7.1 Hinweise zum Brand- und Explosionsschutz:

Keine besonderen Maßnahmen erforderlich.

(Fortsetzung auf Seite 3)

Handelsname: Stabisil 19

(Fortsetzung von Seite 2)

Das Produkt ist nicht brennbar.

7.2 Bedingungen zur sicheren Lagerung unter Berücksichtigung von Unverträglichkeiten

Lagerung:

Anforderung an Lagerräume und Behälter:

Laugenbeständigen Fußboden vorsehen.
Keine Leichtmetallgefäße verwenden.
Nur im ungeöffneten Originalgebinde aufbewahren.
Lagerstabilität: 3 Monate

Zusammenlagerungshinweise: Nicht zusammen mit Säuren lagern.

Weitere Angaben zu den Lagerbedingungen:

In gut verschlossenen Gebinden kühl und trocken lagern.

Lagerklasse: 8 B (TRGS 510)

Klassifizierung nach Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV): -

7.3 Spezifische Endanwendungen Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

ABSCHNITT 8: Begrenzung und Überwachung der Exposition/Persönliche Schutzausrüstungen

Zusätzliche Hinweise zur Gestaltung technischer Anlagen:

Keine weiteren Angaben, siehe Abschnitt 7.

8.1 Zu überwachende Parameter

Bestandteile mit arbeitsplatzbezogenen, zu überwachenden Grenzwerten:

Das Produkt enthält keine relevanten Mengen von Stoffen mit arbeitsplatzbezogenen, zu überwachenden Grenzwerten.

Zusätzliche Hinweise: Als Grundlage dienen die bei der Erstellung gültigen Listen.

8.2 Begrenzung und Überwachung der Exposition

Persönliche Schutzausrüstung:

Allgemeine Schutz- und Hygienemaßnahmen:

Von Nahrungsmitteln, Getränken und Futtermitteln fernhalten.
Die üblichen Vorsichtsmaßnahmen beim Umgang mit Chemikalien sind zu beachten.
Besmutzte, getränkte Kleidung sofort ausziehen.
Vor den Pausen und bei Arbeitsende Hände waschen.
Berührung mit den Augen und der Haut vermeiden.

Atemschutz:

Atemschutz bei Aerosol- oder Nebelbildung.
Filter A/P2.

Handschutz: Handschuhe - laugenbeständig.

Handschuhmaterial

Naturalatex mit geringem Polychloropren-Latex-Anteil (Lapren, Fa. KCL)
Die Angaben basieren auf eigenen Prüfungen, Literaturangaben und Informationen von Schuhherstellern oder sind durch Analogieschluß von ähnlichen Stoffen abgeleitet.

Durchdringungszeit des Schuhmaterials Wert für die Permeation: Level ≤ 6

Nicht geeignet sind Handschuhe aus folgenden Materialien: Handschuhe aus Leder.

Augenschutz:



Dichtschließende Schutzbrille.

Körperschutz: laugenbeständige Schutzkleidung.

ABSCHNITT 9: Physikalische und chemische Eigenschaften

9.1 Angaben zu den grundlegenden physikalischen und chemischen Eigenschaften

Allgemeine Angaben

Aussehen:

Form:	flüssig
Farbe:	gelblich
Geruch:	geruchlos

pH-Wert bei 20 °C:	ca. 14
---------------------------	--------

Zustandsänderung

Schmelzpunkt/Schmelzbereich:	Nicht bestimmt
Siedepunkt/Siedebereich:	> 100 °C

(Fortsetzung auf Seite 4)

Handelsname: Stabisil 19	
(Fortsetzung von Seite 3)	
Flammpunkt:	Nicht anwendbar
Entzündlichkeit (fest, gasförmig):	Der Stoff ist nicht entzündlich.
Explosionsgefahr:	Produkt nicht explosionsgefährlich
Dichte bei 20 °C:	ca. 1,48 g/cm ³
Löslichkeit in / Mischbarkeit mit Wasser:	vollständig mischbar
Viskosität: dynamisch bei 20 °C:	ca. 120 mPas
Lösemittelgehalt:	0,0 %
Organische Lösemittel:	Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.
9.2 Sonstige Angaben	

ABSCHNITT 10: Stabilität und Reaktivität
<p>10.1 Reaktivität Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.</p> <p>10.2 Chemische Stabilität</p> <p>Thermische Zersetzung / zu vermeidende Bedingungen: Keine Zersetzung bei bestimmungsgemäßer Verwendung.</p> <p>10.3 Möglichkeit gefährlicher Reaktionen Stark exotherme Reaktion mit Säuren.</p> <p>10.4 Zu vermeidende Bedingungen Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.</p> <p>10.5 Unverträgliche Materialien: Setzt aus Ammoniumsalzen Ammoniak frei. Reagiert mit Aluminium unter Wasserstoffbildung</p> <p>10.6 Gefährliche Zersetzungsprodukte: keine gefährlichen Zersetzungsprodukte bekannt.</p>

ABSCHNITT 11: Toxikologische Angaben															
<p>11.1 Angaben zu toxikologischen Wirkungen</p> <p>Akute Toxizität</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="3" style="padding: 5px;">Einstufungsrelevante LD/LC50-Werte:</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="padding: 5px;">1302-42-7 Natriumaluminat</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Oral</td> <td style="padding: 5px;">LD 50</td> <td style="padding: 5px;">> 2000 mg/kg (Ratte)</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="padding: 5px;">NOAEL</td> <td style="padding: 5px;">> 300 mg/kg/Tag (Ratte)</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Inhalativ</td> <td style="padding: 5px;">LC 50 / 4h</td> <td style="padding: 5px;">> 1000 mg/l (Ratte)</td> </tr> </table> <p>Primäre Reizwirkung: Ätz-/Reizwirkung auf die Haut Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden. Schwere Augenschädigung/-reizung Verursacht schwere Augenschäden. Sensibilisierung der Atemwege/Haut Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.</p> <p>CMR-Wirkungen (krebserzeugende, erbgutverändernde und fortpflanzungsgefährdende Wirkung)</p> <p>Keimzell-Mutagenität Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.</p> <p>Karzinogenität Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.</p> <p>Reproduktionstoxizität Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.</p> <p>Spezifische Zielorgan-Toxizität bei einmaliger Exposition Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.</p> <p>Spezifische Zielorgan-Toxizität bei wiederholter Exposition Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.</p> <p>Aspirationsgefahr Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.</p>	Einstufungsrelevante LD/LC50-Werte:			1302-42-7 Natriumaluminat			Oral	LD 50	> 2000 mg/kg (Ratte)		NOAEL	> 300 mg/kg/Tag (Ratte)	Inhalativ	LC 50 / 4h	> 1000 mg/l (Ratte)
Einstufungsrelevante LD/LC50-Werte:															
1302-42-7 Natriumaluminat															
Oral	LD 50	> 2000 mg/kg (Ratte)													
	NOAEL	> 300 mg/kg/Tag (Ratte)													
Inhalativ	LC 50 / 4h	> 1000 mg/l (Ratte)													

ABSCHNITT 12: Umweltbezogene Angaben
<p>12.1 Toxizität</p> <p>Aquatische Toxizität: Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.</p>

Handelsname: Stabisil 19

(Fortsetzung von Seite 4)

12.2 Persistenz und Abbaubarkeit Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

Sonstige Hinweise:

Anorganische Substanz, biologische Abbaubarkeit nicht betroffen
Elimination aus dem Wasser durch Ausfällung oder Ausflockung möglich.

12.3 Bioakkumulationspotenzial

Aufgrund des Verteilungskoeffizienten n-Octanol/Wasser ist eine Anreicherung in Organismen nicht zu erwarten.

12.4 Mobilität im Boden Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

Weitere ökologische Hinweise:

Enthält rezepturgemäß folgende Schwermetalle und Verbindungen der EG-Richtlinie 2006/11/EG:

Keine

Allgemeine Hinweise:

Nicht unverdünnt bzw. in größeren Mengen in das Grundwasser, in Gewässer oder in die Kanalisation gelangen lassen.

12.5 Ergebnisse der PBT- und vPvB-Beurteilung

PBT: Nicht anwendbar.

vPvB: Nicht anwendbar.

12.6 Andere schädliche Wirkungen Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

ABSCHNITT 13: Hinweise zur Entsorgung

13.1 Verfahren der Abfallbehandlung

Empfehlung:

Darf nicht zusammen mit Hausmüll entsorgt werden. Nicht in Kanalisation gelangen lassen.

Muß unter Beachtung der behördlichen Vorschriften einer Sonderbehandlung zugeführt werden.

Europäischer Abfallkatalog

Die Zuordnung zu den Abfallschlüsselnummern ist entsprechend der AVV-Verordnung branchen- und prozeßspezifisch durchzuführen.

Ungereinigte Verpackungen:

Empfehlung:

Kontaminierte Verpackungen sind optimal zu entleeren, sie können dann nach entsprechender Reinigung einer Wiederverwertung zugeführt werden.

Die Verpackung ist nach Maßgabe der Verpackungsverordnung zu entsorgen.

Empfohlenes Reinigungsmittel:

Wasser, gegebenenfalls mit Zusatz von Reinigungsmitteln.

ABSCHNITT 14: Angaben zum Transport

14.1 UN-Nummer

ADR, IMDG, IATA UN1819

14.2 Ordnungsgemäße UN-Versandbezeichnung

ADR 1819 NATRIUMALUMINATLÖSUNG
IMDG, IATA SODIUM ALUMINATE SOLUTION

14.3 Transportgefahrenklassen

ADR, IMDG, IATA



Klasse 8 Ätzende Stoffe
Gefahrzettel 8

14.4 Verpackungsgruppe

ADR, IMDG, IATA II

14.5 Umweltgefahren:

Marine pollutant: Nein

14.6 Besondere Vorsichtsmaßnahmen für den Verwender

Kemler-Zahl: Achtung: Ätzende Stoffe

EMS-Nummer: 80

EMS-Nummer: F-A, S-B

(Fortsetzung auf Seite 6)

Seite: 6/6

Sicherheitsdatenblatt
gemäß 1907/2006/EG, Artikel 31

Druckdatum: 27.10.2015

Versionsnummer 2

überarbeitet am: 27.10.2015

Handelsname: Stabisil 19

(Fortsetzung von Seite 5)

Segregation groups	Alkalis
14.7 Massengutbeförderung gemäß Anhang II des MARPOL-Übereinkommens und gemäß IBC-Code	Nicht anwendbar.
Transport/weitere Angaben:	
ADR	
Begrenzte Menge (LQ)	1L
Beförderungskategorie	2
Tunnelbeschränkungscode	E
UN "Model Regulation":	UN1819, NATRIUMALUMINATLÖSUNG, 8, II

ABSCHNITT 15: Rechtsvorschriften

15.1 Vorschriften zu Sicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz/spezifische Rechtsvorschriften für den Stoff oder das Gemisch

Nationale Vorschriften:

Wassergefährdungsklasse:

WGK 1: schwach wassergefährdend (gemäß der allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen vom 27. Juli 2005)

15.2 Stoffsicherheitsbeurteilung:

Das Produkt ist ein Gemisch.
Eine Stoffsicherheitsbeurteilung wurde nicht durchgeführt.

ABSCHNITT 16: Sonstige Angaben

Das Produkt ist ausschließlich für gewerbliche/industrielle Anwendungen (siehe Produktinformation) bestimmt. Vorstehende Angaben entsprechen dem aktuellen Stand unserer technischen Erkenntnisse und Erfahrungen, sind aber keine rechtlich verbindliche Zusicherung bestimmter Eigenschaften oder der Eignung für einen bestimmten Anwendungszweck. Der Anwender ist nicht von eigenen Prüfungen befreit.

Relevante Sätze

H290 Kann gegenüber Metallen korrosiv sein.
H314 Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.
H318 Verursacht schwere Augenschäden.

Datenblatt ausstellender Bereich: Fachlabor

Ansprechpartner: Frau Dr. Kissel

Abkürzungen und Akronyme:

ICAO: International Civil Aviation Organisation
RID: Règlement international concernant le transport des marchandises dangereuses par chemin de fer (Regulations Concerning the International Transport of Dangerous Goods by Rail)
ADR: Accord européen sur le transport des marchandises dangereuses par Route (European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road)
IMDG: International Maritime Code for Dangerous Goods
IATA: International Air Transport Association
GHS: Globally Harmonised System of Classification and Labelling of Chemicals
EINECS: European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances
ELINCS: European List of Notified Chemical Substances
CAS: Chemical Abstracts Service (division of the American Chemical Society)
LC50: Lethal concentration, 50 percent
LD50: Lethal dose, 50 percent
PBT: Persistent, Bioaccumulative and Toxic
vPvB: very Persistent and very Bioaccumulative
Met. Corr.1: Corrosive to metals, Hazard Category 1
Skin Corr. 1A: Skin corrosion/irritation, Hazard Category 1A
Eye Dam. 1: Serious eye damage/eye irritation, Hazard Category 1

*** Daten gegenüber der Vorversion geändert**