

Lösungsprozesse und Transport leichtlöslicher Salze in Monodeponien für Rückstände aus der Müllverbrennung

Dissertation

der Fakultät für Geowissenschaften

der Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von
Daniela Sager

am 10. September 2007

- 1. Berichterstatter: Univ. Prof. Dr. S. Heuss-Aßbichler**
- 2. Berichterstatter: Univ. Prof. Dr. G. Amthauer**

Tag der mündlichen Prüfung: 20.12.2007

Das Beste steht nicht immer in den Büchern, sondern in der Natur.

Adalbert Stifter (1805 – 1868)

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit wurde in der Zeit von Jänner 2004 bis Juni 2007 am Department für Geo- und Umweltwissenschaften, Sektion Mineralogie, der Ludwig-Maximilians-Universität München angefertigt.

- ❖ An erster Stelle möchte ich Univ. Prof. Dr. Soraya Heuss-Aßbichler dafür danken, dass sie mir vertrauensvoll das Thema dieser Arbeit zur Bearbeitung überlassen hat. Während meiner Forschung hat sie mich begleitend mit vielen Diskussionen gefördert. Die gemeinsamen Aufenthalte bei Tagungen sind von unermesslicher wissenschaftlicher Bedeutung für mich.
- ❖ Am Department für Geo- und Umweltwissenschaften, Sektion Mineralogie, gilt mein herzlichster Dank allen Mitarbeitern und Kollegen. Besonders hervorheben möchte ich Dipl.-Mineralogin Alexandra Huber und Univ. Prof. Dr. Cristina de Campos für die hilfreichen fachlichen und privaten Gespräche und für das große Interesse am Fortschreiten meiner Arbeit. Ein besonderer Dank gebührt Antonia Wimmer. Sie hat mich unermüdlich bei der langwierigen Durchführung der Säulenversuche im Labor, der Feststoffanalysen sowie der Vorbereitung und Aufnahme von Infrarotspektren unterstützt. Dipl.-Chemiker Thomas Dorfner hat nicht nur mein chemisches Wissen erweitert, sondern mit mir auch wertvolle literarische und kulturelle Weisheiten ausgetauscht. Sandra Bauer und Margot Lieske haben sämtliche Verwaltungsangelegenheiten schnell und sorgfältig erledigt. Die Mitarbeiter der Werkstatt, Wolfgang Poppe und Martin Kiening, waren maßgeblich an der Planung und Herstellung der Plexiglassäulen beteiligt.
- ❖ Besonders danke ich Dr. Adi Heindl vom Forschungs- und Entwicklungszentrum für Sondertechnologien (FES) in Schwabach. Er war mein bevorzugter Ansprechpartner in chemischen und analytischen Anliegen. Während unzähliger Telefonate und E-Mails ist mir sehr oft ein Licht aufgegangen. Mit zahlreichen Hilfestellungen war er enorm am Fortschritt dieser Arbeit beteiligt.
- ❖ Mein herzlicher Dank gilt auch der gesamten Belegschaft vom FES: Dr. Hermann Westermann und Dipl.-Ing. (FH) Norbert Lenz haben die Wasser- und Eluatuntersuchungen geleitet. Herr Lenz hat mich zusätzlich in die Arbeiten am Rasterelektronenmikroskop eingeführt. Peggy Muntau, Jutta Hermann und Marion Amende-Acar haben die Laborarbeiten durchgeführt. Klaus Maurer und Erwin Gastner waren am Aufbau der Großlysimeter Raindorf beteiligt und haben mich bei den Bohrungen tatkräftig unterstützt und die künstliche Bewässerung der Großlysimeter Raindorf erledigt. Der Diplomand Andreas Bergdolt die Frachtenberechnungen fertiggestellt, sowie an Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop und Wasser- sowie Eluatanalytik gearbeitet.
- ❖ Dank aussprechen möchte ich auch dem Bereichsleiter, Franz Gerthner, und den Mitarbeitern der Stadtwerke Rosenheim: Johannes Haunolder, Jürgen Schrank und Bennie Christof für die Genehmigung, Bereitstellung sämtlicher Ausgangs- sowie Baumaterialien, Aufbau und Probenahme der Großlysimeter Waldering. Hinsichtlich der besonders freundlichen Mithilfe habe ich viele nette Stunden auf der Monodeponie Waldering verbracht.
- ❖ Zu großem Dank bin ich auch den Verantwortlichen der MVA-Ingolstadt und der Deponie Eberstetten verpflichtet. Dipl.-Ing. Franz Wörle und Dipl.-Ing. (FH) Sonja Süß haben den Aufbau und die Bereitstellung sämtlicher Ausgangs- sowie Baumaterialien organisiert. Rudi Ostermeier und seine Mitarbeiter auf der Deponie Eberstetten haben maßgeblich am

Aufbau der Testfelder in Eberstetten, an der künstlichen Bewässerung und an der Probennahme mitgewirkt.

- ❖ Univ. Prof. Dr. Michael Schneider und Univ. Prof. Dr. Christian Wolkersdorfer, Sektion Geologie, AG Hydrogeologie, haben mir für meine Labor- und Feldarbeiten sehr wichtige Arbeitshinweise gegeben. Sie haben mir dankenderweise Gerätschaften (Rammkernbohrgerät, Fluo-Sonde für Markierungsversuche) zur Verfügung gestellt. Die angenehme und hilfreiche Zusammenarbeit zwischen den Sektionen war sehr wichtig für meine Arbeit und dafür möchte ich mich sehr herzlich bedanken. Simone Werner danke ich, dass sie mir Daten ihrer Diplomarbeit zur Verfügung gestellt hat.
- ❖ Dr. Bettina Schenk, Sektion Paläontologie der LMU, möchte ich sehr gerne für ihre tatkräftige Unterstützung bei der Probennahme, Probenaufbereitung sowie bei grafischen Arbeiten und der Datenaufbereitung danken. Auch die Hilfswissenschaftler Tomasz Gorka und Johannes Kähn haben mir viel Arbeit bei der Probenaufbereitung abgenommen – vielen Dank. Besonders herzlich möchte ich mich auch bei Zed Diyana Zulkafli bedanken, dass sie sich dazu entschieden hat, über den DAAD ein Praktikum im Rahmen meiner Forschungstätigkeit zu absolvieren. Sie hat mich sehr bei der Durchführung der Versuche, Sickerwasseranalytik und Datenaufbereitung geholfen. Ihr Aufenthalt in München war eine große Bereicherung für mich.
- ❖ Dr. Rupert Hochleitner vom Museum „Reich der Kristalle“ der Mineralogischen Staatssammlung München danke ich besonders dafür, dass er mir verschiedenste Mineralphasen zur Verfügung gestellt hat, um sie mineralogisch zu untersuchen. Anhand dieser reinen Phasen wurde mir die Auswertung der Salzphasen aus den Schlacken wesentlich erleichtert.
- ❖ Dem Fachbereich Materialforschung und Physik, Abteilung Mineralogie, an der Universität Salzburg möchte ich für die großartige Unterstützung bei der Analytik der Feststoffproben (RFA, XRD) und für die Möglichkeit eines Arbeitsplatzes von Herzen danken: hier Univ. Prof. Dr. Georg Amthauer, Univ. Prof. Fritz Finger, Mag. Gerold Tippelt und Mag. Gudrun Riegler. Weiter dem Fachbereich Geographie und Geologie an der Universität Salzburg, Abteilung Allgemeine Geologie und Evolutionsforschung: hier Univ. Prof. Dr. Franz Neubauer für die Ermöglichung der Rasterelektronenmikroskopaufnahmen und insbesondere Dr. Gertrude Friedl für die Hilfestellung und Auswertung der Bilder. Sie stand mir durch ihre langjährige wissenschaftliche Erfahrung für verschiedenste Fragestellungen mit Rat und Tat zur Seite.
- ❖ Schließlich möchte ich mich beim Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz im Rahmen der EU-Strukturförderung für regionale Entwicklung für die Finanzierung des Projekts bedanken. Besonderer Dank gilt auch Walter Kindsmüller vom Landesamt für Umwelt in Augsburg.

Besondere Worte gebühren auch meiner Familie und meinem Freund Andreas. Sie haben immer an mich geglaubt und mich stets positiv bestätigt. Sie haben viel Verständnis für mein zeitintensives Engagement an dieser Arbeit gezeigt. In Schaffenspausen wussten sie mich erfolgreich abzulenken, damit ich immer genügend Energie und Inspiration tanken konnte.

An dieser Stelle möchte ich diese Arbeit meinen beiden Neffen Gianluca und Gianluigi widmen: „Dem Trübsinn ein Ende, wir werden in Grund und Boden gelacht - Kinder an die Macht!“

KURZFASSUNG

Im Allgemeinen wird für Deponiekörper ein homogener Aufbau angenommen. Während der Betriebsphase einer Deponie können jedoch in verschiedenen Bereichen Inhomogenitäten entstehen. Um die Wirkungsweise einer Inhomogenität beobachten und veranschaulichen zu können, wurden Langzeitversuche mit einer Laufzeit von maximal 25 Monaten im Labor (Säulenversuche) und Feldmaßstab (4 Testfelder und 4 Großlysimeter) ausgeführt. Als Ausgangsmaterialien wurden Reststoffe aus der Müllverbrennung verwendet (u.a. Schlacken). Für die grundlegenden Versuchsanordnungen, auch als Referenzversuche bezeichnet, wurde als Bewässerungsmedium Leitungswasser oder natürlicher Niederschlag gewählt. Auf der Deponie ist jedoch durch die fortwährenden Ablagerungen frischer Reststoffe aus der Müllverbrennung das perkolierende Sickerwasser stets sehr salzreich. Aus diesem Grund wurde für die erweiterten Versuchsanordnungen eine Bewässerung mit salzreichen Lösungen bestimmt, z.T. ausschließlich oder zusätzlich zum natürlichen Niederschlag. Neben Modellsickerwässern aus dem Labor wurden für einige Versuche auch Deponiesickerwasser oder Konzentrat aus der Umkehrsmose verwendet. Als zweite Möglichkeit, um eine kontinuierliche Zufuhr salzreicher Lösungen zu gewährleisten, wurden für ausgewählte Versuche Rauchgasreinigungsrückstände als Deck- oder Zwischenschicht eingebaut.

Im Allgemeinen werden Säulenversuche unter wassergesättigten Bedingungen durchgeführt. Für die hier vorliegenden Versuche wurden wasserungesättigte Verhältnisse gewählt, um die realen Bedingungen auf einer Deponie nachvollziehen zu können.

Sämtliche Versuche wurden als Parallelversuche aufgebaut. Dabei wurde jeweils eine Versuchsreihe als Blindversuch mit einem homogenen Aufbau betrieben. Für den parallelen Versuch wurde durch den Einbau einer Sperrsicht, bestehend aus Schlacke-Feinkorn, eine Inhomogenität im vertikalen Profil erzielt. Der Wechsel der Korngröße sollte in diesem Bereich die Durchlässigkeit verringern. Zusätzlich wurde die Lage aus Schlacke-Feinkorn z.T. verdichtet. Die Ergebnisse der Feststoff- und Sickerwasseruntersuchungen zu den Langzeitversuchen im Labor sowie zu den Feldversuchen haben deutlich gezeigt, dass vor allem physikalische Prozesse, bedingt durch den Einbau einer Sperrsicht, innerhalb der 25 Monate beobachtbar waren. Für die Blindversuche nahmen die Wassergehalte der Feststoffproben überwiegend vom Top der Versuche zur Basis hin zu. Im Gegensatz dazu wurde für die Versuche mit Sperrsicht folgendes beobachtet:

- Stauwirkung oberhalb der Sperrsicht als Folge des Korngrößenwechsels,
- Verlangsamung der Durchlaufzeit des Sickerwassers,
- höheres Wasserrückhaltevermögen (kumulierter Wasserrückhalt).

Vor allem innerhalb der Sperrsicht wurden im Allgemeinen die höchsten Wassergehalte gemessen. Auffällig war, dass besonders unterhalb der Sperrmeist deutlich geringere Wassergehalte festgestellt wurden. Die Zugabe von salzreichen Lösungen für die erweiterten Versuche hat das Wasserrückhaltevermögen zusätzlich verstärkt. Darüber hinaus haben Modellversuche mit Kunststoffkugeln gezeigt, dass bei kleinen Bewässerungsmengen die Wirksamkeit der Sperrmeiste erhöht wird.

Die Untersuchungen zum Stofftransport entlang des vertikalen Profils ergaben, dass für die Blindversuche eine gleichmäßige bis graduelle Salzanreicherung in den Feststoffproben beobachtet werden konnten. Der Einbau einer Sperrschicht hingegen führte dazu, dass Salzakkumulationen vor allem innerhalb und unterhalb der Sperrschicht festgestellt wurden - sowohl für eine Bewässerung mit Leitungswasser als auch mit Modellsickerwasser.

Die Untersuchungen veranschaulichen, dass der Einbau einer Sperrschicht in Form eines Korngrößenwechsels eine Verringerung der Durchlässigkeit bewirkt. Dadurch werden die perkolierenden Sickerwässer aufgestaut. Die Aufkonzentration der leichtlöslichen Salze im Sickerwasser zusammen mit dem Wechsel des Wassergehalts in den Schichten führen letztlich zu einer Ausfällung aus der Porenlösung. Die Ausbildung von Salzanreicherungen hängt sehr stark vom Faktor Zeit ab. Ein Großteil der chemischen und mineralogischen Entwicklungsgänge kam erst nach einer gewissen Laufzeit zum Tragen:

- mehrere Trendwechsel der Sickerwasserentwicklung verschiedener Spezies (z.B. leichtlösliche Salze oder Schermetalle) sowie
- pH-Wert abhängige Prozesse (z.B. Anstieg der Ca- oder Mg-Konzentration mit abnehmenden pH-Werten),
- dies belegt die die große Bedeutung von Langzeitversuchen.

Zusammenfassend zeigen die vorliegenden Ergebnisse, dass ungesättigte Wasserbedingungen zusammen mit physikalischen und chemischen Prozessen die Voraussetzung für eine Salzanreicherung im Bereich der Sperrschicht schaffen. Die Auswirkungen von Inhomogenitäten entlang des Deponieprofils bedingt durch Verdichtung und/oder Korngrößenwechsel, wie sie in dieser Forschungsarbeit untersucht wurden, bieten daher eine Erklärung für die Beobachtungen auf der Monodeponie Waldering. In einem Bauabschnitt der Monodeponie Waldering wurde ein mehrere Meter mächtiger Salzhorizont erbohrt. Diese salzreiche Schicht weist überwiegend die Mineralphasen Halit und Sylvit auf. Somit besteht auch in humiden Klimagebieten die Möglichkeit, Salzanreicherungen bis hin zu mehrere Meter mächtige Salzhorizonte zu erzielen. Insbesondere die Reststoffe aus der Müllverbrennung wie Schlacken und Rauchgasreinigungsrückstände bieten aufgrund ihrer sehr hohen Salzgehalte prinzipiell die Voraussetzung für die Bildung eines Salzhorizonts. Schlussfolgernd können durch den Einbau einer Sperrschicht folgende Vorteile für einen Deponiebetrieb abgeleitet werden:

- Salzakkumulationen führen aufgrund ihrer hohen Speicherkapazität zu geringeren Austragsmengen an Sickerwasser,
- das erhöhte Wasserrückhaltevermögen zusammen mit der verstärkenden Wirkung von Salzanreicherungen bietet bei Starkregenereignissen ein stärkeres Puffervermögen.

ABSTRACT

A homogeneous design for landfill bodies is generally agreed. However the manner in which waste is deposited may result in a sequence of layers that causes inhomogeneity. The goal of this research was to investigate the influences of such inhomogeneities on long-term leaching of highly soluble salts and ecotoxic species.

This long-term leaching was observed for 25 months. Laboratory column tests and field experiments (test bodies and lysimeters) were performed with municipal solid waste incineration residues. Laboratory columns were irrigated with tap water. Control field experiments were exposed to natural precipitation. Due to the fact that municipal solid waste incineration residues are continually landfilled on monofills, the percolating landfill-leachates are highly saline. Therefore extended experiments were carried out and these were treated with saline solutions: either solely or in addition to natural precipitation. Highly saline irrigation-media artificial leachates produced in the lab, actual landfill leachate or a concentrate from reverse osmosis was used, depending on the experiment. Besides irrigation, the application of residues, as the top or intermediate layers, provided continuous supply of highly saline solutions.

Commonly, column experiments are conducted under water-saturated conditions. For this research however, unsaturated conditions were chosen to understand real landfill conditions.

All experiments were performed as parallel experiments. One test had a uniform-grain setup and acted as a control. The application of a fine-grained bottom ash layer within a column filled mainly with coarse-grained bottom ash provided the inhomogeneous setup. Grain size changeover as a barrier layer within a column should change the permeability along the profile of the column. In some cases the barrier layer was compacted. The results of long-term the solid sample and leachate investigations pointed out that the application of a barrier layer by means of grain size changeover had mainly physical effects. With the control experiment, water contents of solid samples increased in general from the top of the experiments to the basis. In contrast, the following was observed for the application of a barrier layer:

- impounding of leachate,
- slowdown of leachate percolation time,
- increased water retention capacity.

Mainly the zone within the barrier layer showed the highest water content. A general observation was that the setting beneath the barrier layer was much drier. Another observation was that irrigation with saline water enhances water retention within the column. Additionally model experiments with plastic shots pointed out that the irrigation with small amount of water intensifies the physical effect of the barrier layer. Unsaturated water conditions which are common in landfills together with reduced permeability provide the basis for salt accumulations around the zone of the fine grained ash layer. An investigation on the distribution of the elements along the profile showed that impounding of the leachate at the barrier layer is linked to higher eluate soluble species concentrations: the tendency of accumulation was observable especially for the zone within and beneath the barrier layer and in the near-bottom samples for the control as well as extended experiments.

Concerning a uniform setup the salt distribution along the profile was homogeneous up to gradual. In general the observations indicated that the application of a barrier layer by means of grain size changeover impounds the leachate. Thus, increased concentrations of different species of saline solutions in combination with changing water contents within the layers caused precipitation of the highly soluble salts out of the pore solution. The formation of salt accumulations is time-dependent. Most of the chemical and mineralogical progressions occurred only after a longer period:

- tendencies for the leachate progression changed several times during the long term,
- different processes depend on the pH-value (e.g. if the pH-value decreases Ca-concentrations will increase) and
- this supports the vital importance of long term leaching.

A main conclusion is that unsaturated conditions in combination with physical and chemical processes provide conditions conducive for salt accumulations around the zone of the barrier layer. The effects of inhomogeneities because of compaction and/or grain size changeover, as investigated in this research, furnish an explanation for actual observations at the Waldering monofill. In a particular filler part a salt horizon of several meters was encountered. This highly saline layer consists mainly of Halite and Sylvite. Hence there is the possibility that salt accumulations up to salt horizon are generated even in a humid climate. In principle the MSWI-residues afford high contents of saline species.

Due to the application of a barrier layer the following advantages can be derived for landfill operations:

- due to their high water retention capacity, salt accumulations cause little amounts of leachate,
- high water retention capacity combined with the intensifying effect of salty crusts within the zone of the fine grained ash layer provides strong buffering concerning rainstorms.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Allgemein

IC	Ionenchromatographie, Analysenmethode für Anionen
ICP-OES	Induktiv gekoppeltes Plasma/ Optische Emissionsspektrometrie, Analysenmethode für Kationen (inductive coupled plasma)
FT-IR	Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie
RFA	Röntgenfluoreszenzanalytik
XRD	Röntgendiffraktometrie (x-ray diffraction)
REM	Rasterelektronenmikroskopie
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie (Energy-dispersive X-ray spectroscopy)
MHKW	Müllheizkraftwerk
MVA	Müllverwertungsanlage
MV	Müllverbrennung
AbfAblV	Abfallablagerungsverordnung
pH	negativer dekadischer Logarithmus der Oxonium-Konzentration (pondus hydrogenii)
Lf	elektrische Leitfähigkeit mS/cm (Millisiemens pro Zentimeter)
L/S	Flüssigkeits-/ Feststoffverhältnis (Liquid-/Solid-Ratio)
TOC	gesamter organischer Kohlenstoff (total organic carbon)
DOC	gelöster organisch gebundener Kohlenstoff (dissolved organic carbon)
µg	Mikrogramm, 10^{-6} g

Sickerwasser- und Feststoffproben

Parameter		Parameter	
Cl	Chlorid (Sickerwasser)	O	Sauerstoff
SO ₄	Sulfat (Sickerwasser)	P	Phosphor
Cl	Chlor (Feststoff)	Pb	Blei
SO ₃	Sulfit (Feststoff)	Si	Silizium
NH ₄	Ammonium	Sn	Zinn
Al	Aluminium	Sr	Strontium
Ca	Calcium	V	Vanadium
Ba	Barium	W	Wolfram
Br	Brom	Zn	Zink
Co	Kobalt	NaOH	Natronlauge
Cr	Chrom	Wg	Wassergehalt bei 105° C
Cu	Kupfer	Gv	Glühverlust bei 1050° C
Fe	Eisen	LOI	Glühverlust (Loss on ignition)
Hg	Quecksilber	Gew.-%	Gewichtsprozent
K	Kalium	CO ₂	Kohlendioxid
Mg	Magnesium	H ₂ O	Wasser
Na	Natrium	k.A.	keine Angabe
Ni	Nickel	n.b.	nicht bestimmt
Mo	Molybdän	KBr	Kaliumbromid
Ti	Titan	BG	Bestimmungsgrenze

Versuchsanordnungen

BK	Bohrkampagne
BKI	Bohrkampagne 1 , Frühjahr 2005
BKII	Bohrkampagne 2 , Herbst 2005
BKIII	Bohrkampagne 3 , Herbst 2006
BV	Blindversuch , alle Versuche ohne Sperre
SFK	Schlacke-Feinkorn , Fraktion 0-4 mm
BA	Bottom Ash (MV-Schlacke)
FGA	Finegrained Ash (Schlacke-Feinkorn)
RGR	Rauchgasreinigungsrückstände
LW	Leitungswasser
MSW	Modellsickerwasser
NS	Niederschlag
SW	Deponiesickerwasser
UO	Umkehrosmosekonzentrat
SV	Säulenversuche
VA-A	Versuchsanordnung A , Schlacke MVA Ingolstadt, SFK
IBV	Schlacke Ingolstadt, Blindversuch ohne Sperre
IBV0	Referenzversuch 0 , Bewässerung mit Leitungswasser
IBV1	Zeitversuch 1 „kurz“, Bewässerung mit Modellsickerwasser
IBV2	Zeitversuch 2 „mittel“, Bewässerung mit Modellsickerwasser
IBV3	Zeitversuch 3 „lang“, Bewässerung mit Modellsickerwasser
ISFK	Schlacke Ingolstadt, Versuch mit Sperre aus Schlacke-Feinkorn
ISFK0	Referenzversuch 0 , Bewässerung mit Leitungswasser
ISFK1	Zeitversuch 1 „kurz“, Bewässerung mit Modellsickerwasser
ISFK2	Zeitversuch 2 „mittel“, Bewässerung mit Modellsickerwasser
ISFK3	Zeitversuch 3 „lang“, Bewässerung mit Modellsickerwasser
VA-B	Versuchsanordnung B , Schlacke MHKW-Rosenheim
BV1	Blindversuch , ohne Sperre, Versuch 1 , Bewässerung mit LW und MSW
SFK3	mit Sperre aus SFK , Versuch 3 , Bewässerung mit LW und MSW
RSFK2	mit Sperre aus SFK und RGR , Versuch 2 , Bewässerung mit LW
RSFK3	mit Sperre aus SFK und RGR , Versuch 3 , Bewässerung mit LW und MSW
VA-C	Versuchsanordnung C , Schlacke MVA Ingolstadt, SFK, RGR
RBV	Blindversuch , ohne Sperre, Bewässerung mit MSW und LW
RSFK	mit Sperre aus RGR und SFK , Bewässerung mit MSW und LW
MoV	Modellversuch mit Kunststoffkugeln
FV	Feldversuche
EB	Eberstetten , Schlacke Ingolstadt
EB1	Testfeld 1, Feldversuche Eberstetten , ohne Sperre, NS
EB2	Testfeld 2, Feldversuche Eberstetten , mit Sperre, NS
EB3	Testfeld 3, Feldversuche Eberstetten , mit Sperre, NS mit SW
EB4	Testfeld 4, Feldversuche Eberstetten , mit Sperre, NS mit UO
RA	Raindorf , Schlacke Ingolstadt
RA1	Großlysimeter Raindorf , ohne Sperre
RA2	Großlysimeter Raindorf , mit Sperre
WA	Waldering , Schlacke Rosenheim
WA1	Großlysimeter Waldering , ohne Sperre
WA2	Großlysimeter Waldering , mit Sperre

Begriffserklärung

- Durchlässigkeitsbeiwert(k_f -Wert)¹: rechnerischer Wert, der die Wasserdurchlässigkeit von Materialien, meist Böden oder Gesteine, beschreibt. Er hängt von Korngröße, Kornzusammensetzung sowie Porenvolumen des Materials ab und besitzt die Einheit Meter je Sekunde, also die Einheit einer Geschwindigkeit, wobei dadurch zum Ausdruck gebracht wird, mit welcher Geschwindigkeit Wasser in Abhängigkeit vom Druck durch den Stoff strömt.
- Leitfähigkeit, elektrische²: Fähigkeit einer Flüssigkeit, in der Ionen gelöst sind, messbar Gleichstrom zu leiten; die el. L. ist temperaturabhängig und wird heute für eine Temperatur von 25° C angegeben; moderne Messgeräte haben eine autom. Kompensation; Einheit: [$\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$] oder [$\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$]
- Lysimeter²: technische Anlage, die im Gelände/Boden eingelassen wird, um mit unterschiedlichen Substratfüllung die Verdunstung (reale, effektive) und vertikale Versickerungseigenschaften von Niederschlagswässern in Böden zu bestimmen (Wasserhaushaltsbestimmung); die Probeaufnahmehälter können Eisen- oder Betonkästen mit quadratischem Grundriss oder Stahlzylinder sein; die vertikale Höhe – und damit Sickerstrecke – beträgt 2-4 m; die Messung der Sickerwässer erfolgt entweder in Auffanggefäß unterhalb des Monoliths oder durch dauerndes Wiegen (wägbarer L.), da sich bei Wasseraufnahme/-abgabe das Gewicht des Monoliths ändert; außer den meist stationären L. gibt es auch transportable
- Procordichte ρ ¹: ist ein Begriff aus der Geotechnik, Bauwesen und Geologie. Die P. ist die größte Dichte eines Bodens, die nach genormtem Versuch (Proctorversuch nach DIN 18127) bei optimalem Wassergehalt erreicht werden kann.
- Quenching: (engl. = ablöschen, abschrecken, härteten); dabei werden MV-Reststoffe nach der Verbrennung im Wasserbad mittels Eindüslen von Wasser schockartig auf Sättigungstemp. abgekühlt. Die Schadstoffe gehen dabei teilweise ins Wasser über.
- Schwermetall²: Metalle höhere Dichten zwischen 3,5 und 5 g/cm³, deren Kationen in natürlichen wie anthropogen beeinflussten (Grund-)Wässern enthalten sein können, besonders in Wässern niedrigen Redox-Potentials („reduzierende Wässer“) oder niedrigen pH-Werts. Ab bestimmten Konzentrationen wirken S. im Allgemeinen giftig, weshalb Grenzwerte für die Nutzung eines belasteten Wassers als Trinkwasser in der Trinkwasserverordnung festgeschrieben sind; es handelt sich dabei um die S.: Pb, Cd, Cr, Ni, Hg, Cu und Zn, die in natürlichen Wässern praktisch nicht vorkommen., aber durch Abwässer oder Korrosion von Verbaumaterialien (z.B. Leitungen, Dachdeckungen, Dachrinnen) gelöst werden können.
- Sperre: semipermeable Schicht aus feinkörniger Schlacke (Korngröße 0-4 mm), verdichtet oder unverdichtet, stellt einen Korngrößenwechsel im Deponiekörper dar; kann wie eine innere Barriere wirken und zur Ausfällung der gelösten Salze beitragen. Für einen Großteil der Versuche im Labor- und Feldmaßstab wurde jedoch ein verstärkter Austrag leicht löslicher Spezies beobachtet.
- Umkehrosmose³: techn. genutztes Trennverfahren, bei dem durch Anlegen eines äußeren Drucks, der größer als der osmotische Druck des Systems ist, Lösungsmittel aus einer höher konzentrierten Lösung durch eine niederkonzentrierte Lösung (auch reines Lösungsmittel) gepresst wird (zwangsweise Umkehrung der Osmose, Reversosmose). Mit der U. kann eine aufzubereitende Lösung in ein Konzentrat und ein weitgehend von Inhaltsstoffen befreites Permeat getrennt werden. Ein wesentliches Gebiet ist die Reinigung von Deponiesickerwässern (Sickerwasserbehandlung).

¹<http://de.wikipedia.org>

²Adam Ch., Gläßer W & Höltig B. (2000): Hydrogeologisches Wörterbuch. Enke im Thieme Verlag, Stuttgart [u.a.], 311 S.

³Dreyhaupt F.J. (Hrsg): VDI-Lexikon Umwelttechnik. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1349 S.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1:	Unbehandelter Siedlungsmüll (20 kg) und die einzelnen volumen- und massereduzierten Bestandteile (Eisenschrott, Schlacke, Flugstaub und RGR) nach der thermischen Behandlung	5
Abb.2:	Stoffgruppenanalyse von aufbereiteter Frischschlacke	6
Abb.3:	Makroskopisches Erscheinungsbild von Schlacke aus der Müllverbrennung,.....	7
Abb.4:	Rechnerischer Ablauf zu Erstellung der Frachtenberechnungen je Spezies	25
Abb.5:	Wassergehalt und Glühverlust (Gew.-%) entlang des Versuchsprofils, VA-A, Versuche ohne und mit Sperre.....	35
Abb.6:	pH-Wert im Eluat entlang des Versuchsprofils; VA-A, Versuche ohne und mit Sperre.....	35
Abb.7:	Leitfähigkeit im Eluat (mS/cm) entlang des Versuchsprofils, VA-A, Versuche ohne und mit Sperre	35
Abb.8:	Cl- und Na-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A, Versuche ohne und mit Sperre.....	35
Abb.9:	SO ₄ - und Ca-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A, Versuche ohne und mit Sperre.....	35
Abb.10:	Cu-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A, Versuche ohne und mit Sperre.35	
Abb.11:	Mo-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A, Versuche ohne und mit Sperre 36	
Abb.12:	Pb- und Zn-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A, Versuche ohne und mit Sperre.....	36
Abb.13:	Austrag an Sickerwasser (mL), VA-A, Versuche ohne und mit Sperre	38
Abb.14:	pH-Wert im Sickerwasser, VA-A, Versuche ohne und mit Sperre	38
Abb.15:	Leitfähigkeit im Sickerwasser (mS/cm), VA-A, Versuche ohne und mit Sperre	38
Abb.16:	Cl- und Na-Konzentration im Sickerwasser (g/L), VA-A, Versuche ohne und mit Sperre	38
Abb.17:	SO ₄ - und Ca-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-A, Versuche ohne und mit Sperre	39
Abb.18:	Cu-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-A, Versuche ohne und mit Sperre.....	39
Abb.19:	Mo-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-A, Versuche ohne und mit Sperre	39
Abb.20:	Pb- und Zn-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-A, Versuche ohne und mit Sperre	39
Tab. 15:	Zusammenfassung der Frachtenberechnung, Abreicherung in % bezogen auf die Ausgangsmenge, Blindversuch und Versuch mit Sperre im Vergleich, Bewässerung mit Leitungswasser.....	39
Abb.21:	Wassergehalt und Glühverlust (Gew.-%) entlang des Versuchsprofils, FV-EB, Versuche ohne und mit Sperre.....	42
Abb.22:	pH-Wert im Eluat entlang des Versuchsprofils, FV-EB, Versuche ohne und mit Sperre im Vergleich....	42
Abb.23:	Leitfähigkeit im Eluat (mS/cm) entlang des Versuchsprofils, FV-EB, Versuche ohne und mit Sperre	42
Abb.24:	Cl- und Na-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, FV-EB, Versuche ohne und mit Sperre.....	42
Abb.25:	SO ₄ - und Ca -Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, FV-EB, Versuche ohne und mit Sperre.....	42
Abb.26:	Cu- und Mo-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, FV-EB, Versuche ohne und mit Sperre.....	42
Abb.27:	Pb-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, FV-EB, Versuche ohne und mit Sperre	43
Abb.28:	Zn-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, FV-EB, Versuche ohne und mit Sperre	43
Abb.29:	pH-Wert im Sickerwasser, FV-EB, Versuche ohne und mit Sperre	45
Abb.30:	Leitfähigkeit im Sickerwasser (mS/cm), FV-EB, Versuche ohne und mit Sperre	45
Abb.31:	Cl- und Na-Konzentration im Sickerwasser (g/L), FV-EB, Versuche ohne und mit Sperre	45
Abb.32:	Ca- und SO ₄ -Konzentration im Sickerwasser (mg/L), FV-EB, Versuche ohne und mit Sperre	45
Abb.33:	Cu- und Mo-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), FV-EB, Versuche ohne und mit Sperre	45
Abb.34:	Pb- und Zn-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), FV-EB, Versuche ohne und mit Sperre	45
Abb.35:	Austrag an Sickerwasser (mL), MoV mit Kunststoffkugeln	50
Abb.36:	Durchlaufzeit (s) des Sickerwassers, MoV mit Kunststoffkugeln	50
Abb.37:	Austrag an Sickerwasser (mL) versus Durchlaufzeit (s) des Sickerwassers, MoV mit Kunststoffkugeln	50
Abb.38:	Wassergehalt (Gew.-%) entlang des Versuchsprofils, VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3.....	55
Abb.39:	Glühverlust (Gew.-%) entlang des Versuchsprofils, VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3	55
Abb.40:	pH-Wert im Eluat entlang des Versuchsprofils, VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3	56
Abb.41:	Leitfähigkeit im Eluat (mS/cm) entlang des Versuchsprofils, VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3	56
Abb.42:	Cl-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3	56
Abb.43:	Na-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3	56
Abb.44:	Ca-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3	56
Abb.45:	SO ₄ -Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3	56
Abb.46:	Cu-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3	57
Abb.47:	Mo-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3	57

Abb.48:	Pb-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3	57
Abb.49:	Zn-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3	57
Abb.50:	Austrag an Sickerwasser (mL), VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3.....	60
Abb.51:	pH-Wert im Sickerwasser, VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3	60
Abb.52:	Leitfähigkeit im Sickerwasser (mS/cm), VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3.....	60
Abb.53:	Cl-Konzentration im Sickerwasser (g/L), VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3	60
Abb.54:	Na-Konzentration im Sickerwasser (g/L), VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3	60
Abb.55:	Ca-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3.....	60
Abb.56:	SO ₄ -Konzentration im Sickerwasser (g/L), VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3.....	61
Abb.57:	Cu-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3	61
Abb.58:	Mo-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3.....	61
Abb.59:	Pb-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3	61
Abb.60:	Zn-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3	61
Abb.61:	Wassergehalt (Gew.-%) entlang der Versuchsprofile der Testfelder Eberstetten.....	65
Abb.62:	Glühverluste (Gew.-%) entlang der Versuchsprofile der Testfelder Eberstetten	65
Abb.63:	pH-Wert im Eluat entlang der Versuchsprofile der Testfelder Eberstetten	65
Abb.64:	Leitfähigkeit im Eluat (mS/cm) entlang der Versuchsprofile der Testfelder Eberstetten	65
Abb.65:	Cl- und Na-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang der Versuchsprofile der Testfelder Eberstetten	65
Abb.66:	SO ₄ - und Ca-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang der Versuchsprofile der Testfelder Eberstetten	65
Abb.67:	Cu- und Mo-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang der Versuchsprofile der Testfelder Eberstetten.....	66
Abb.68:	Pb- und Zn-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang der Versuchsprofile der Testfelder Eberstetten.....	66
Abb.69:	Austrag an Sickerwasser (L) aus den Testfeldern Eberstetten.....	69
Abb.70:	pH-Wert im Sickerwasser aus den Testfeldern Eberstetten	69
Abb.71:	Leitfähigkeit im Sickerwasser (mS/cm) aus den Testfeldern Eberstetten	69
Abb.72:	Cl-Konzentration im Sickerwasser (g/L) aus den Testfeldern Eberstetten.....	69
Abb.73:	Na-Konzentration im Sickerwasser (g/L) aus den Testfeldern Eberstetten	69
Abb.74:	Ca-Konzentration im Sickerwasser (mg/L) aus den Testfeldern Eberstetten	69
Abb.75:	SO ₄ -Konzentration im Sickerwasser (mg/L) aus den Testfeldern Eberstetten.....	70
Abb.76:	Cu-Konzentration im Sickerwasser (mg/L) aus den Testfeldern Eberstetten	70
Abb.77:	Mo-Konzentration im Sickerwasser (mg/L) aus den Testfeldern Eberstetten	70
Abb.78:	Pb-Konzentration im Sickerwasser (mg/L) aus den Testfeldern Eberstetten.....	70
Abb.79:	Zn-Konzentration im Sickerwasser (mg/L) aus den Testfeldern Eberstetten.....	70
Abb.80:	Wassergehalt (Gew.-%) entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Raindorf.....	75
Abb.81:	Glühverlust (Gew.-%) entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Raindorf	75
Abb.82:	pH-Wert im Eluat entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Raindorf	76
Abb.83:	Leitfähigkeit im Eluat (mS/cm) entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Raindorf	76
Abb.84:	Cl-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Raindorf	76
Abb.85:	Na-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Raindorf.....	76
Abb.86:	Ca-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Raindorf.....	76
Abb.87:	SO ₄ -Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Raindorf	76
Abb.88:	Cu-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Raindorf.....	77
Abb.89:	Mo-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Raindorf	77
Abb.90:	Pb-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Raindorf	77
Abb.91:	Zn-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Raindorf	77
Abb.92:	Austrag an Sickerwasser (L) aus den Großlysimetern Raindorf	81
Abb.93:	pH-Wert im Sickerwasser aus den Großlysimetern Raindorf.....	81
Abb.94:	Leitfähigkeit im Sickerwasser (mS/cm) aus den Großlysimetern Raindorf	81
Abb.95:	Cl-Konzentration im Sickerwasser (g/L) aus den Großlysimetern Raindorf	81
Abb.96:	Na-Konzentration im Sickerwasser (g/L) aus den Großlysimetern Raindorf	81
Abb.97:	Ca-Konzentration im Sickerwasser (mg/L) aus den Großlysimetern Raindorf	81
Abb.98:	SO ₄ -Konzentration im Sickerwasser (g/L) aus den Großlysimetern Raindorf	82
Abb.99:	Cu-Konzentration im Sickerwasser (mg/L) aus den Großlysimetern Raindorf	82
Abb.100:	Mo-Konzentration im Sickerwasser (mg/L) aus den Großlysimetern Raindorf	82
Abb.101:	Pb-Konzentration im Sickerwasser (mg/L) aus den Großlysimetern Raindorf	82
Abb.102:	Zn-Konzentration im Sickerwasser (mg/L) aus den Großlysimetern Raindorf	82
Abb.103:	Austrag an Sickerwasser (mL) aus den Säulen der VA-C	88
Abb.104:	pH-Wert im Sickerwasser aus den Säulen der VA-C.....	88
Abb.105:	Leitfähigkeit im Sickerwasser (mS/cm) aus den Säulen der VA-C	89
Abb.106:	Cl- und Na-Konzentration im Sickerwasser (g/L) aus den Säulen der VA-C	89
Abb.107:	Ca-Konzentration im Sickerwasser (mg/L) aus den Säulen der VA-C.....	89
Abb.108:	SO ₄ -Konzentration im Sickerwasser (g/L) aus den Säulen der VA-C	89
Abb.109:	Cu- und Mo-Konzentration im Sickerwasser (mg/L) aus den Säulen der VA-C	89
Abb.110:	Pb- und Zn-Konzentration im Sickerwasser (mg/L) aus den Säulen der VA-C.....	89
Abb.111:	Wassergehalt (Gew.-%) entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Waldering	93
Abb.112:	Glühverlust (Gew.-%) entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Waldering	93
Abb.113:	pH-Wert im Eluat entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Waldering	93
Abb.114:	Leitfähigkeit im Eluat (mS/cm) entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Waldering.....	93
Abb.115:	Cl-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Waldering	93

Abb.116: Na-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Waldering	93
Abb.117: Ca-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Waldering	94
Abb.118: SO ₄ -Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Waldering	94
Abb.119: Cu-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Waldering	94
Abb.120: Mo-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Waldering	94
Abb.121: Pb-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Waldering	94
Abb.122: Zn-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, Großlysimeter Waldering	94
Abb.123: pH-Wert im Sickerwasser aus den Großlysimetern Waldering	97
Abb.124: Leitfähigkeit im Sickerwasser (mS/cm) aus den Großlysimetern Waldering	97
Abb.125: Cl- und Na-Konzentration im Sickerwasser (g/L) aus den Großlysimetern Waldering	97
Abb.126: SO ₄ - und Ca-Konzentration im Sickerwasser (mg/L) aus den Großlysimetern Waldering	97
Abb.127: Cu- und Mo-Konzentration im Sickerwasser (mg/L) aus den Großlysimetern Waldering	97
Abb.128: Pb- und Zn-Konzentration im Sickerwasser (mg/L) aus den Großlysimetern Waldering	97
Abb.129a: Wassergehalt (Gew.-%) entlang des Versuchsprofils, VA-B, Säulen BV1 und SFK3.....	103
Abb.129b: Wassergehalt (Gew.-%) entlang des Versuchsprofils, VA-B, Säulen BV1 und RSFK2/RSFK3	103
Abb.130a: Glühverlust (Gew.-%) entlang des Versuchsprofils, VA-B, Säulen BV1 und SFK3	103
Abb.130b: Glühverlust (Gew.-%) entlang des Versuchsprofils, VA-B, Säulen BV1 und RSFK2/RSFK3	103
Abb.131: pH-Wert im Eluat entlang des Versuchsprofils, VA-B, Säulen BV1 und SFK3 sowie RSFK2/RSFK3	103
Abb.132: Leitfähigkeit im Eluat (mS/cm) entlang des Versuchsprofils, VA-B, Säulen BV1 und SFK3 sowie RSFK2/RSFK3	103
Abb.133: Cl-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-B, Säulen BV1 und SFK3 sowie RSFK2/RSFK3	104
Abb.134: Na-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-B, Säulen BV1 und SFK3 sowie RSFK2/RSFK3	104
Abb.135: Ca-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-B, Säulen BV1 und SFK3 sowie RSFK2/RSFK3	104
Abb.136: SO ₄ -Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-B, Säulen BV1 und SFK3 sowie RSFK2/RSFK3	104
Abb.137: Cu-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-B, Säulen BV1 und SFK3 sowie RSFK2/RSFK3	104
Abb.138: Mo-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-B, Säulen BV1 und SFK3 sowie RSFK2/RSFK3	104
Abb.139: Pb-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-B, Säulen BV1 und SFK3 sowie RSFK2/RSFK3	105
Abb.140: Zn-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-B, Säulen BV1 und SFK3 sowie RSFK2/RSFK3	105
Abb.141a: Austrag an Sickerwasser (mL), VA-B, Säulen BV1 und SFK3.....	109
Abb.141b: Austrag an Sickerwasser (mL), VA-B, Säulen BV1 und RSFK2/RSFK3	109
Abb.142a: pH-Wert im Sickerwasser, VA-B, Säulen BV1 und SFK3	109
Abb.142b: pH-Wert im Sickerwasser, VA-B, Säulen BV1 und RSFK2/RSFK3	109
Abb.143a: Leitfähigkeit im Sickerwasser (mS/cm), VA-B, Säulen BV1 und SFK3	109
Abb.143b: Leitfähigkeit im Sickerwasser (mS/cm), VA-B, Säulen BV1 und RSFK2/RSFK3	109
Abb.144a: Cl-Konzentration im Sickerwasser (g/L), VA-B, Säulen BV1 und SFK3	110
Abb.144b: Cl-Konzentration im Sickerwasser (g/L), VA-B, Säulen BV1 und RSFK2/RSFK3	110
Abb.145a: Na-Konzentration im Sickerwasser (g/L), VA-B, Säulen BV1 und SFK3	110
Abb.145b: Na-Konzentration im Sickerwasser (g/L), VA-B, Säulen BV1 und RSFK2/RSFK3	110
Abb.146a: SO ₄ -Konzentration im Sickerwasser (g/L), VA-B, Säulen BV1 und SFK3	110
Abb.146b: SO ₄ -Konzentration im Sickerwasser (g/L), VA-B, Säulen BV1 und RSFK2/RSFK3	110
Abb.147a: Ca-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-B, Säulen BV1 und SFK3	111
Abb.147b: Ca-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-B, Säulen BV1 und RSFK2/RSFK3	111
Abb.148a: Cu-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-B, Säulen BV1 und SFK3	111
Abb.148b: Cu-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-B, Säulen BV1 und RSFK2/RSFK3	111
Abb.149a: Mo-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-B, Säulen BV1 und SFK3	111
Abb.149b: Mo-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-B, Säulen BV1 und RSFK2/RSFK3	111
Abb.150a: Pb-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-B, Säulen BV1 und SFK3	112
Abb.150b: Pb-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-B, Säulen BV1 und RSFK2/RSFK3	112
Abb.151a: Zn-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-B, Säulen BV1 und SFK3	112
Abb.151b: Zn-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-B, Säulen BV1 und RSFK2/RSFK3	112
Abb.152: Wassergehalt (Gew.-%) entlang des Versuchsprofils, VA-A Zeitversuche, Blindversuche und Versuche mit Sperre	117
Abb.153: Glühverlust (Gew.-%) entlang des Versuchsprofils, VA-A Zeitversuche, Blindversuche und Versuche mit Sperre	117
Abb.154: pH-Wert im Eluat entlang des Versuchsprofils, VA-A Zeitversuche, Blindversuche und Versuche mit Sperre	117
Abb.155: Leitfähigkeit im Eluat (mS/cm) entlang des Versuchsprofils, VA-A Zeitversuche, Blindversuche und Versuche mit Sperre	117
Abb.156: Cl-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A Zeitversuche, Blindversuche und Versuche mit Sperre	117
Abb.157: Na-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A Zeitversuche, Blindversuche und Versuche mit Sperre	117

Abb.158: SO ₄ -Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A Zeitversuche, Blindversuche und Versuche mit Sperre	118
Abb.159: Ca-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A Zeitversuche, Blindversuche und Versuche mit Sperre	118
Abb.160: Cu-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A Zeitversuche, Blindversuche und Versuche mit Sperre	118
Abb.161: Mo-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A Zeitversuche, Blindversuche und Versuche mit Sperre	118
Abb.162: Pb-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A Zeitversuche, Blindversuche und Versuche mit Sperre	118
Abb.163: Zn-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A Zeitversuche, Blindversuche und Versuche mit Sperre	118
Abb.164a: Austrag an Sickerwasser (mL), VA-A Zeitversuche, Blindversuche	121
Abb.164b: Austrag an Sickerwasser (mL), VA-A Zeitversuche, Versuche mit Sperre	121
Abb.165a: pH-Wert im Sickerwasser, VA-A Zeitversuche, Blindversuche	121
Abb.165b: pH-Wert im Sickerwasser, VA-A Zeitversuche, Versuche mit Sperre	121
Abb.166a: Leitfähigkeit im Sickerwasser (mS/cm), VA-A Zeitversuche, Blindversuche	122
Abb.166b: Leitfähigkeit im Sickerwasser (mS/cm), VA-A Zeitversuche, Versuche mit Sperre	122
Abb.167a: Cl- und Na-Konzentration im Sickerwasser (g/L), VA-A Zeitversuche, Blindversuche	122
Abb.167b: Cl- und Na-Konzentration im Sickerwasser (g/L), VA-A Zeitversuche, Versuche mit Sperre	122
Abb.168a: Ca- und SO ₄ -Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-A Zeitversuche, Blindversuche	122
Abb.168b: Ca- und SO ₄ -Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-A Zeitversuche, Versuche mit Sperre	122
Abb.169a: Cu- und Mo-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-A Zeitversuche, Blindversuche	123
Abb.169b: Cu- und Mo-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-A Zeitversuche, Versuche mit Sperre	123
Abb.170a: Pb- und Zn-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-A Zeitversuche, Blindversuche	123
Abb.170b: Pb- und Zn-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-A Zeitversuche, Versuche mit Sperre	123
Abb. 171: Bandenverteilung im mittleren Infrarottbereich für die weiße Salzphase aus der Bohrprobe BA 1-13 ..	142
Abb.172: Cl-Konzentration in mg/kg (kumuliert) im Sickerwasser versus L/S-Verhältnis	156
Abb.173: Na-Konzentration in mg/kg (kumuliert) im Sickerwasser versus L/S-Verhältnis	156
Abb.174: SO ₄ -Konzentration in mg/kg (kumuliert) im Sickerwasser versus L/S-Verhältnis	156
Abb.175: Ca-Konzentration in mg/kg (kumuliert) im Sickerwasser versus L/S-Verhältnis	156
Abb.176: Mo-Konzentration in mg/kg (kumuliert) im Sickerwasser versus L/S-Verhältnis	156
Abb.177: Cu-Konzentration in mg/kg (kumuliert) im Sickerwasser versus L/S-Verhältnis	156
Abb.178: Ca-Konzentration versus SO ₄ -Konzentration (mol/L), Vergleich der Sickerwässer aus den Säulenversuchen	158
Abb.179: Ca-Konzentration versus SO ₄ -Konzentration (mol/L), Vergleich der Sickerwässer aus den Feldversuchen	158
Abb.180: pH-Wert im Sickerwasser versus Ca-Konzentration (mol/L) im Sickerwasser, Säulenversuche im Labor	158
Abb.181: pH-Wert im Sickerwasser versus Ca-Konzentration (mol/L) im Sickerwasser, Feldversuche	158
Abb.182: pH-Wert im Sickerwasser versus Cl-Konzentration (mol/L) im Sickerwasser, Säulenversuche im Labor	159
Abb.183: Na-Konzentration versus Cl-Konzentration (mol/L), Vergleich der Sickerwässer aus den Säulenversuchen	159
Abb.184: pH-Wert im Sickerwasser versus Cl-Konzentration (mol/L) im Sickerwasser, Feldversuche	159
Abb.185: Na-Konzentration versus Cl-Konzentration (mol/L), Vergleich der Sickerwässer aus den Feldversuchen	159
Abb.186: DOC-Konzentration versus Cu-Konzentration (mol/L) im Sickerwasser, VA-A	160
Abb.187: Cu-Konzentration versus Cl-Konzentration (mol/L) im Sickerwasser, VA-A	160

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1:	Übersicht über die verschiedenen europäischen Elutionsverfahren	12
Tab. 2:	Gegenüberstellung der verschiedenen Schlacken	15
Tab. 3:	Zusammenfassung der Untersuchungsmethoden	16
Tab. 4:	Übersicht über die Versuchsanordnungen A (VA-A)	19
Tab. 5:	Übersicht über die Versuchsanordnung B (VA-B)	20
Tab. 6:	Übersicht über die Versuchsanordnungen C	20
Tab. 7:	Übersicht über die Feldversuche (FV)	22
Tab. 8:	Feststoffgehalte der Schlacke frisch und gealtert, sowie SFK und RGR 27	
Tab. 9:	Eluatparameter der Schlacke frisch und gealtert, sowie SFK und RGR 28	
Tab. 10:	Wassergehalts- und Glühverlustbestimmung von Schlacke frisch und gealtert, sowie SFK und RGR... 29	
Tab. 11:	Feststoffgehalte untersuchter Schlacken im Vergleich mit Literaturdaten (RFA Analysen)	31
Tab. 12:	Eluatparameter untersuchter Schlacken im Vergleich mit Literaturdaten	32
Tab. 13:	Verteilung des Wassergehalts und Glühverlusts entlang des Säulenprofils, Säule ohne Sperre (IBV0) und mit Sperre (ISFK0), Bewässerung mit Leitungswasser	33
Tab. 14:	Bewässerungs- und Austragsmengen für die Versuche aus VA-A ohne (IBV0) und mit Sperre (ISFK0) im Vergleich, Bewässerung mit Leitungswasser.....	36
Tab. 16:	Verteilung der Parameter Wassergehalt und Glühverlust entlang des Versuchsprofils der dritten Bohrkampagne, Blindversuch (EB1) und Testfeld mit Sperre (EB2) nach 102 Wochen Versuchsdauer; Niederschlagszutritt	40
Tab. 17:	Bewässerungs- und Austragsmengen für die Testfelder Eberstetten: ohne Sperre und mit Sperre im Vergleich, Bewässerung über Niederschlagszutritt	43
Tab. 18:	Zusammenfassung der Frachtenberechnung, Abreicherung in % bezogen auf die Ausgangsmenge, Blindversuch (EB1) und Versuch mit Sperre (EB2) im Vergleich.....	46
Tab. 19:	Übersicht über die Zeitdauer der Zyklen mit der jeweiligen Bewässerungsmenge und Austragsmenge an Sickerwasser für die Modellversuche mit und ohne Sperre	48
Tab. 20:	k _r -Werte der Bohrproben Walderring	51
Tab. 21:	Verteilung der Parameter Wassergehalt und Glühverlust entlang des Säulenprofils, Säule ohne Sperre (IBV3) und mit Sperre (ISFK3) im Vergleich, Bewässerung mit Modellsickerwasser	54
Tab. 22:	Bewässerungs- und Austragsmengen für die Versuche aus VA-A ohne (IBV3) und mit Sperre (ISFK3) im Vergleich, Bewässerung mit Leitungswasser.....	57
Tab. 23:	Zusammenfassung der Frachtenberechnung, Abreicherung bzw. Anreicherung in % bezogen auf die Ausgangsmenge, Blindversuch der LW- und MSW-Versuche und LW- und MSW-Versuche mit Sperre im Vergleich	62
Tab. 24:	Verteilung der Parameter Wassergehalt und Glühverlust entlang des Versuchsprofils aus der BK III, Testfelder Eberstetten mit Sperre und zusätzlichem Beitrag von Salzen: EB3 – Deponiesickerwasser und EB4 – Konzentrat aus der Umkehrosmose	63
Tab. 25:	Bewässerungs- und Austragsmengen für die Testfelder Eberstetten mit Sperre und zusätzlichem Beitrag von Salzen: EB3 – Deponiesickerwasser und EB4 – Konzentrat aus der Umkehrosmose	66
Tab. 26:	Zusammenfassung der Frachtenberechnung, Abreicherung bzw. Anreicherung in % bezogen auf die Ausgangsmenge, für die Testfelder Eberstetten mit Sperre und zusätzlichem Beitrag von Salzen: EB3 – Deponiesickerwasser und EB4 – Konzentrat aus der Umkehrosmose.....	71
Tab. 27:	Verteilung der Parameter Wassergehalt und Glühverlust entlang des Versuchsprofils der Bohrkampagne III, Großlysimeter Raindorf: Lysimeter ohne Sperre (RA 1) und mit Sperre (RA 2) im Vergleich	72
Tab. 28:	Bewässerungs- und Austragsmengen für die Großlysimeter Raindorf ohne (RA1, Blindversuch) und mit Sperre (RA2) im Vergleich.....	77
Tab. 29:	Zusammenfassung der Frachtenberechnung, Abreicherung bzw. Anreicherung in % bezogen auf die Ausgangsmenge, Blindversuch (RA1) und Versuch mit Sperre (RA2)	83
Tab. 30:	Bewässerungs- und Austragsmengen für die VA-C ohne (RBV) und mit Sperre (RSFK) im Vergleich.. 86	
Tab. 31:	Zusammenfassung der Frachtenberechnung, Abreicherung bzw. Anreicherung in % in Bezug auf die Ausgangsmenge, Blindversuch (RBV), und Versuch mit Sperre (RSFK)	90
Tab. 32:	Verteilung der Parameter Wassergehalt und Glühverlust entlang des Versuchsprofils der 3. Bohrkampagne, Testfeld ohne Sperre (WA 1) und Testfeld mit Sperre (WA 2) nach 102 Wochen Versuchsdauer; Niederschlagszutritt	91
Tab. 33:	Bewässerungs- und Austragsmengen für die Großlysimeter Walderring ohne (WA1) und mit Sperre (WA2) im Vergleich.....	95
Tab. 34:	Verteilung der Parameter Wassergehalt und Glühverlust entlang des Säulenprofils, Säule ohne Sperre (BV1) und mit Sperre (SFK3, RSFK2 und RSFK3) im Vergleich.....	100
Tab. 35:	Mittelwerte zu Austragsmengen und proz. Austrag für die Säulenversuche der VA-B für unterschiedliche Bewässerungsmengen	105
Tab. 36:	Zusammenfassung der Frachtenberechnung, Abreicherung bzw. Anreicherung von Spezies in % in Bezug auf die Ausgangsmenge, Blindversuch (BV1), Versuch mit Sperre (SFK3) und Versuch mit Sperre und RGR (RSFK2, RSFK3)	113
Tab. 37:	Verteilung der Parameter Wassergehalt und Glühverlust entlang des Säulenprofils, Säule ohne Sperre (IBV3) und mit Sperre (ISFK3) im Vergleich, Bewässerung mit Modellsickerwasser	115

Tab. 38:	Bewässerungs- und Austragsmengen für die Zeitversuche aus VA-A ohne (IBV1, IBV2, IBV3) und mit Sperre (ISFK1, ISFK2, ISFK3).....	119
Tab. 39:	Zusammenfassung der Frachtenberechnung, Abreicherung bzw. Anreicherung in % bezogen auf die Ausgangsmenge, Blindversuche und Versuche mit Sperre im Vergleich	124
Tab. 40:	Zusammenfassung chemischer Parameter der Feststoffanalysen in Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung für die Schläcken A und B	127
Tab. 41:	Zusammenfassung der Korngrößenverteilung der Feststoffproben aus der Säule ohne Sperre der VA-A	131
Tab. 42:	Zusammenfassung der Korngrößenverteilung der Feststoffproben aus der Säule mit Sperre der VA-A	131
Tab. 43:	Zusammenfassung der Korngrößenverteilung der Feststoffproben aus dem Lysimeter ohne Sperre der Großlysimeter Raindorf	132
Tab. 44:	Zusammenfassung der Korngrößenverteilung der Feststoffproben aus dem Lysimeter mit Sperre der Großlysimeter Raindorf	132
Tab. 45:	Zusammenfassung der Korngrößenverteilung der Bohrprobe 1-15 aus dem Salzhorizont in BA 1 der Monodeponie Waldering.....	133
Tab. 46:	Symbole zur Abschätzung der relativen Anteil einer Mineralphase	135
Tab. 47:	Relative Anteile von Mineralphasen in den Ausgangsmaterialien	136
Tab. 48:	Relative Anteile von Mineralphasen in den Feststoffproben aus den Säulen IBV3 (ohne Sperre „lang“) und ISFK3 (mit Sperre „lang“).....	137
Tab. 49:	Relative Anteile von Mineralphasen in den Feststoffproben aus den Lysimetern RA1 (ohne Sperre) und RA2 (mit Sperre) der dritten Bohrkampagne	138
Tab. 50:	Relative Anteile von Mineralphasen im Salzhorizont der Monodeponie Waldering (BA1-15).....	139
Tab. 51:	Elementverteilung in den Mineralphasen in den Ausgangsmaterialien (Schlacke A und B), ermittelt mittels EDX-Analyse	140
Tab. 52:	Elementverteilung in den Mineralphasen aus den Bohrproben im Bauabschnitt 1 der Monodeponie Waldering, ermittelt mittels EDX-Analyse	141
Tab. 53:	Relative Anteile von Mineralphasen in den weißen Salzphasen aus den Bohrproben im Bauabschnitt 1 der Monodeponie Waldering.....	142
Tab. 54:	Elementverteilung in den Mineralphasen aus den Bohrproben im Bauabschnitt 1 der Monodeponie Waldering, ermittelt mittels EDX-Analyse	143
Tab. 55:	Relative Anteile von Mineralphasen in den farbigen Salzphasen aus den Bohrproben im Bauabschnitt 1 der Monodeponie Waldering.....	144
Tab. 56:	L/S-Verhältnisse in L/kg Schlacke bei den unterschiedlichen Versuchsanordnungen.....	145
Tab. 57:	Verhältnis von Bewässerungsmenge zu eingebauter Schlackemenge	147
Tab. 58:	Chloridgehalte in g/kg Schlacke bei den unterschiedlichen Versuchsanordnungen zu Versuchsbeginn und Versuchsende, sowie der Austrag an Cl in mg/kg und %	150
Tab. 59:	Verlauf der Kurven für kumulierte Freisetzung der Spezies versus L/S-Verhältnis.....	152

DANKSAGUNG	I
KURZFASSUNG	III
ABSTRACT	V
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	VII
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	X
TABELLENVERZEICHNIS	XIV
INHALTSVERZEICHNIS	XVI
1. EINLEITUNG	1
1.1 AUSGANGSSITUATION	1
1.2 AUFGABENSTELLUNG UND ZIELSETZUNG	2
1.3 ARBEITSPROGRAMM	3
2. KENNTNISSTAND	5
2.1 THERMISCHE ABFALLBEHANDLUNG	5
2.1.1 Rückstände aus der Müllverbrennung	6
2.1.1.1 Mineralogische Charakterisierung von MV-Schlacken	6
2.1.1.2 Physikalische Kenngrößen von MV-Schlacken	7
2.1.1.3 Charakterisierung von Rauchgasreinigungsrückständen	8
2.1.2 Handhabung von MV-Schlacke	8
2.1.2.1 Auswaschverhalten („Leaching“) von MV-Schlacke	9
2.1.2.2 Untersuchungsmethoden im Labor- und Feldmaßstab	11
2.1.2.3 Ansätze zur Immobilisierung	13
2.1.3 Barrièresysteme	14
2.1.4 Salzakkumulationen in natürlichen Systemen	14
3. MATERIAL UND METHODIK	15
3.1 AUSGANGSMATERIALIEN	15
3.2 UNTERSUCHUNGSMETHODEN	16
3.3 VERSUCHSANORDNUNGEN	17
3.3.1 Säulenversuche im Labor	17
3.3.2 Feldversuche (FV)	21

3.4 PROBENNAHME.....	23
3.4.1 Feststoffproben	23
3.4.2 Sickerwasserproben	24
3.5 FRACHTENBERECHNUNG	25
4. ERGEBNISSE	27
4.1 AUSGANGSMATERIAL	27
4.1.1 Schlacke, frisch und gealtert.....	27
4.1.2 Rauchgasreinigungsrückstände (RGR)	29
4.1.3 Vergleich mit nationalen/internationalen MV-Schlackeproben	30
4.2 WIRKUNG EINER SPERRSCHICHT	33
4.2.1 Blindversuch im Vergleich zu Versuch mit Sperre	33
4.2.1.1 Referenzversuche der Versuchsanordnung A	33
4.2.1.2 Referenztestfelder Eberstetten (ausschließlich Niederschlagszutritt).....	40
4.2.1.3 Fazit zur Wirkung einer Sperrsicht	46
4.2.2 Physikalische Parameter	48
4.2.2.1 Modellversuch mit Kunststoffkugeln.....	48
4.2.2.2 Durchlässigkeitsbeiwert (k_f -Wert).....	51
4.2.2.3 Fazit zu den physikalischen Parametern	52
4.3 WIRKUNG VON SALZREICHEN LÖSUNGEN	53
4.3.1 Wirkung von Modellsickerwasser – erweiterte Säulenversuche der VA-A	53
4.3.2 Wirkung von salzreichen Lösungen – erweiterte Testfelder Eberstetten.....	62
4.3.3 Wirkung von künstlicher Bewässerung – Lysimeter Raindorf.....	71
4.3.4 Fazit zur Wirkung von salzreichen Lösungen	83
4.4 WIRKUNG VON RAUCHGASREINIGUNGSRÜCKSTÄNDEN.....	86
4.4.1 Versuchsanordnung C	86
4.4.2 Großlysimeter Waldering	90
4.4.3 Fazit zur Wirkung von Rauchgasreinigungsrückständen.....	98
4.5 WIRKUNG DER BEWÄSSERUNGSMENGE	100
4.5.1 Säulenversuche der Versuchsanordnung B	100

4.5.2 Fazit zur Wirkung der Bewässerungsmenge	113
4.6 WIRKUNG DER VERSUCHSZEIT.....	115
4.6.1 Zeitversuche der Versuchsanordnung A	115
4.6.2 Fazit zur Wirkung der Versuchszeit	124
5. MINERALOGISCHE ERGEBNISSE.....	126
5.1 KORNGRÖßENVERTEILUNG.....	126
5.1.1 Ausgangsmaterialien	126
5.1.2 Säulenversuche (VA-A)	127
5.1.3 Feldversuche (Großlysimeter Raindorf).....	129
5.1.4 Salzhorizont der Monodeponie Waldering	133
5.1.5 Fazit zur Korngrößenverteilung	134
5.2 RELATIVE ANTEILE VON MINERALPHASEN	135
5.2.1 Ausgangsmaterialien	136
5.2.2 Säulenversuche (VA-A)	137
5.2.3 Feldversuche (Großlysimeter Raindorf).....	138
5.2.4 Salzhorizont der Monodeponie Waldering	138
5.2.5 Fazit zu den relativen Anteilen von Mineralphasen Fehler! Textmarke nicht definiert.	
5.3 DIVERSE MINERALPHASEN IN MV-SCHLACKEPROBEN.....	140
6. DISKUSSION	145
7. ZUSAMMENFASSUNG.....	161
8. LITERATURVERZEICHNIS	165
TABELLARISCHER ANHANG	TA1 – TA10
EXPERIMENTELLER ANHANG	EA1 – EA26
GRAPHISCHER ANHANG.....	GA1 – GA9
MINERALOGISCHER ANHANG.....	MA1 – MA10

1. EINLEITUNG

1.1 AUSGANGSSITUATION

Auf der Monodeponie Waldering (Deponiekasse III) der Stadtwerke Rosenheim wurden im Rahmen eines Versuchsvorhabens bis zum Dezember 2004 Rauchgasreinigungsrückstände (RGR) und Müllverbrennungsschlacken (im Weiteren auch vereinfacht als Schlacken bezeichnet) in Sandwichbauweise eingebaut. Trotz der hohen Salz- und Schwermetallgehalte dieser Reststoffe haben Stoffbilanzen für einen Bauabschnitt (BA1) der Deponie gezeigt, dass mit dem Sickerwasser erheblich geringere Salz- und Schwermetallkonzentrationen, als erwartet, ausgetragen wurden. Die Stadtwerke Rosenheim haben daraufhin eine Voruntersuchung gestartet und im Jahr 1995 in diesem Bauabschnitt (BA 1) eine Bohrung durchgeführt:

- In den Bohrproben wurde zum Teil ein hoher Anteil des Minerals Ettringit $[Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}\cdot26H_2O]$ beobachtet (Picolab, 1995).
- Daraufhin wurde angenommen, dass Ettringit als Speichermineral neben Cl zusätzlich Schwermetalle wie Pb immobilisieren kann und dadurch die geringe Sickerwasserbelastung bewirkt.

Im Jahr 2000 wurde eine zweite Bohrung unmittelbar neben der ersten Bohrung abgeteuft (Magel et al., 2003).

- Die chemische und mineralogische Auswertung zeigte, dass sich die Ettringitkonzentration von 25 % auf 3 % verringert hat (Heuss-Aßbichler et al., 2002).
- Trotz dieser Gegebenheit wurde im Sickerwasseraustrag keine Konzentrationszunahme ökotoxischer Spezies festgestellt.

Die Bohrprofile aus dem Bauabschnitt BA1 (aus den Jahren 1995 und 2000) und ein Bohrprofil aus dem Bauabschnitt BA2 (aus dem Jahr 2000) der Monodeponie Waldering wurden miteinander verglichen:

- Im Bauabschnitt BA2 wurden in den Feststoffproben Cl-Gehalte zwischen 3,8 – 5,4 Gew.-% festgestellt.
- Innerhalb des BA1 hingegen wurde in den letzten Jahren eine bemerkenswerte Salzanreicherung beobachtet.

Die Cl-Gehalte in der topnächsten Feststoffprobe des BA1 ist mit 0,6 Gew.-% sehr niedrig. Bis zu einer Bohrtiefe von sieben Metern erhöht sich der Chloranteil kontinuierlich in den RGR-

Proben auf 15,7 Gew.-% und liegt dort vglw. höher als in frischen RGR. Mit zunehmender Tiefe ist der Chlorgehalt mit 3,7 Gew.-% wieder gering. Die Abbildungen A-1 bis A-8 im graphischen Anhang dokumentieren An- bzw. Abreicherung an verschiedenen Spezies in den Bohrproben entlang des Bohrprofils für BA1 und BA2. Bezuglich der Schwermetalle hat sich in den Feststoffproben tendenziell keine Anreicherung gezeigt.

- Der Salzhorizont besteht im Wesentlichen aus den Mineralphasen Halit (NaCl) und Sylvin (KCl). Die großen Anteile dieser Phasen sind Beleg für Ausfällungsprozesse während der Deponierungsphase (Heuss-Aßbichler, 2004).

Die Cl-Konzentrationen im Eluat ändern sich ebenfalls entlang des vertikalen Deponieprofils übereinstimmend mit den Feststoffgehalten. Ein deutliches Maximum von 12,8 g/L zeigt sich im Salzhorizont (in 7m Tiefe). Die Abbildungen B-1 bis B-8 im graphischen Anhang zeigen diese Entwicklung. Auch für SO₄ ist dieses Verhalten erkennbar. Bemerkenswert ist, dass mit Zunahme der Cl-Konzentration auch der Anteil der Schwermetalle im Eluat steigt. Dieser Trend wurde für Pb und Zn und auch für Ni und sogar As beobachtet.

Aus den Deponiejahrbüchern der Deponie Waldering konnte entnommen werden, dass etwa in der Höhe der jetzt vorliegenden Salzsicht während einer längeren Zeitperiode keine MV-Reststoffe deponiert wurden und dieser Deponiebereich als Straße für schwere Baufahrzeuge genutzt wurde. Es ist anzunehmen, dass diese Auflast lokal eine Änderung der Durchlässigkeit bewirkte:

- Es ist auffallend, dass die Bohrprobe oberhalb der salzreichen Schicht eine niedrige Porosität von etwa 47 % (i. Allg. > 52 %) aufzeigt (Abb. B-9, graphischer Anhang).
- Zudem haben die Untersuchungen gezeigt, dass unterhalb dieser Schicht trockene Bedingungen mit niedrigem Wassergehalt von etwa 15 Gew.-% vorherrschen (bis zu 45 Gew.-% für RGR-Proben und bis zu 22,5 Gew.-% für Schlacke-Proben) (Abb. B-10, graphischer Anhang).

1.2 AUFGABENSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Massive Salzanreicherungen sind für gemäßigte Klimazonen ungewöhnlich. Die Beobachtungen auf der Monodeponie Waldering waren Anlass einen vollständig neuen Ansatz im Sinne einer „Inneren Barriere“ zu erarbeiten: inwieweit bewirkt ein Salzhorizont, dass leichtlösliche Salze und Schwermetalle im Abfallkörper zurückgehalten werden.

Während der Betriebsphase können in verschiedenen Bereichen einer Deponie Inhomogenitäten entstehen und die Durchlässigkeit für das Sickerwasser verringern. Für die Nachhaltigkeit einer Deponie ist es daher von großer Bedeutung, die Folgen von

Inhomogenitäten hinsichtlich Salzakkumulationen im Feststoff und für die Sickerwasserentwicklung abzuschätzen.

Folgende Aufgabenstellungen wurden im vorliegenden Forschungsvorhaben bearbeitet:

- Was bewirkt ein Korngrößenwechsel im vertikalen Aufbau innerhalb eines Deponiekörpers?
- Was bewirkt die Verdichtung einer Schicht innerhalb eines Deponiekörpers?
- Welche Auswirkungen hat eine Sperre auf die Sickerwasserentwicklung?
- Welche Auswirkungen hat eine gezielte Salzzugabe?
- Welche Prognosen können für die Langzeitüberwachung - Dauer der Nachsorge - erstellt werden?

Folgende Ziele wurden für diese Forschungsarbeit gesetzt:

- Die Wirkung einer Sperrsicht im Sinne eines Korngrößenwechsels zu untersuchen.
- Die Wirkung einer Sperrsicht auf Lösungsprozesse und Transport leichtlöslicher Spezies sowie Schwermetalle zu klären.
- Die Wirkung einer Sperrsicht hinsichtlich einer Verringerung der Durchlässigkeit und eines Aufstauens leichtlöslicher Phasen im Sickerwasser zu prüfen.
- Die Wirkung einer Sperrsicht auf eine Begünstigung der Ausfällung aus der Porenlösung zu untersuchen.

1.3 ARBEITSPROGRAMM

Für alle Versuchsansätze gilt, dass jeweils ein homogen aufgebauter Versuch (ohne Sperre) als Bezugsgröße dient (Blindversuch, BV). In einem parallelen Versuch wurde Schlacke-Feinkorn (Korngröße 0-4 mm, SFK) als Sperrsicht verdichtet eingebaut, um die Wirkung einer Inhomogenität infolge eines Korngrößenwechsels erarbeiten zu können. Schlacke aus der Müllverbrennung hat üblicherweise ein Korngrößenspektrum von 0-32 mm. Die feinkörnige Sperrsicht ist beschränkt auf die Fraktion 0-4 mm.

Säulenversuche im Labor

Im Labor wurden 24 Säulen mit verschiedenen Ansätzen (Versuchsanordnung A mit Schlacke A, Versuchsanordnung B mit Schlacke B und Versuchsanordnung C mit Schlacke A und RGR) als Parallelversuche angesetzt. Die Versuche wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten abgebrochen, um die zeitliche Entwicklung verfolgen zu können. Einzelne Versuche wurden

über eine maximale Versuchsdauer von etwa zwei Jahren betrieben und stellen somit Langzeitversuche dar.

Feldversuche

Die acht verschiedenen Feldversuche wurden als Langzeitversuche ausgeführt. Sie umfassen die Testfelder Eberstetten (vier Testfelder), sowie die Lysimeter Raindorf und Waldering (jeweils zwei Lysimeter).

Analytik

Die Feststoffgehalte (Masseebildner und umweltrelevante Spezies) der Ausgangsmaterialien sowie der gealterten Feststoffproben aus den Säulen- und Feldversuchen wurden bestimmt. Mit Eluatuntersuchungen gemäß DIN EN 12457-4 wurde der Anteil der leichtlöslichen Spezies ermittelt. Die erfassten Sickerwässer aus den verschiedenen Versuchsansätzen (Labor und Testfelder) wurden auf Anionen- und Kationenkonzentrationen untersucht. Für jeden einzelnen Versuch wurden die Konzentrationsverläufe im Sickerwasser erarbeitet und Frachtenberechnungen zum Stoffaustausch erstellt.

Modellversuch mit Kunststoffkugeln

Die Durchführung eines Modellversuchs mit Kunststoffkugeln bietet die Möglichkeit, die Arbeitshypothese zu prüfen, inwiefern eine Änderung der Durchlässigkeit durch Korngrößenwechsel ausreicht, um eine Aufkonzentration salzreicher Lösungen innerhalb der Deponie zu bewirken. Der große Vorteil ist, dass die Ausgangszusammensetzung des eingebauten Materials nicht berücksichtigt werden muss.

2. KENNTNISSTAND

2.1 THERMISCHE ABFALLBEHANDLUNG

Nach der deutschen Gesetzeslage darf seit 1. Juni 2005 Siedlungsmüll nicht mehr unbehandelt deponiert werden (Abfallablagerungsverordnung, 2001). Eine Möglichkeit der Vorbehandlung ist die thermische Behandlung von Siedlungsmüll. Nach Auskunft des Umweltbundesamtes waren im Jahr 2006 in der Bundesrepublik Deutschland 67 thermische Anlagen in Betrieb. Der jährliche Abfalldurchsatz beträgt pro Jahr etwa 18 Mio. Tonnen Siedlungsmüll. Eine Übersicht zur Abfallwirtschaft in Deutschland bietet Vehlow (1996).

Die Vorteile der Müllverbrennung liegen in der Möglichkeit die Abfallmasse um ca. 70 % und das Abfallvolumen um ca. 90 % zu reduzieren (Stegemann et al., 1995; Chandler et al., 1997). Die Mineralisierung bzw. möglichst vollständige Umsetzung der organischen Abfallbestandteile zu CO₂ und H₂O (Reimann, 1995), sowie die Umwandlung von chemischer Energie, die im Abfall steckt, in Elektrizität und Prozessdampf (Kirby & Rimstidt, 1993) sind weitere Vorzüge.

Bei der thermischen Abfallbehandlung entstehen aus einer Tonne Hausmüll nach Thomé-Kozmiensky (1994) je nach Verfahren:

- 250 – 350 kg Müllverbrennungsschlacke (MV-Schlacke),
- 20 – 40 kg Flugstaub (Filterstaub und Kesselasche),
- 8 – 45 kg Rauchgasreinigungsrückstände (RGR).

Die Abbildung 1 zeigt eine Gegenüberstellung von unbehandeltem Siedlungsmüll, sowie die daraus entstandenen Verbrennungsprodukte: MV-Schlacke, Flugstaub, Rauchgasreinigungsrückstände und Eisenschrott. Sehr deutlich zu erkennen ist die Reduktion an Masse und Volumen.

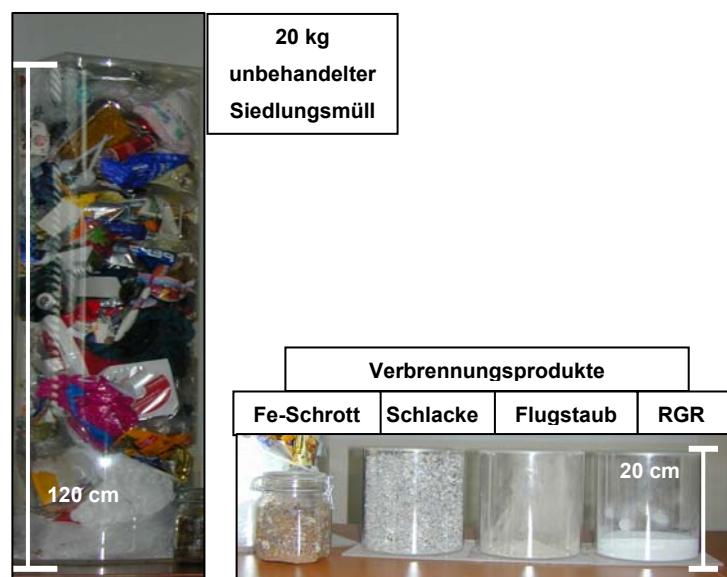


Abb. 1: Unbehandelter Siedlungsmüll (20 kg) und die einzelnen volumen- und masse-reduzierten Bestandteile (Eisenschrott, Schlacke, Flugstaub und RGR) nach der thermischen Behandlung, Höhe der großen Säule 120 cm und der kleinen Säulen 20 cm, Fotoquelle: Heuss-Aßbichler

2.1.1 Rückstände aus der Müllverbrennung

Ein sehr umfangreiches Standardwerk zu Rückständen aus der Müllverbrennung wurde von der International Ash Working Group (IAWG) (Chandler et al., 1997) verfasst. Arbeiten zur Charakterisierung und Beschreibung von Müllverbrennungsschlacke (MV-Schlacke) basieren u.a. auf den Forschungen von Kirby & Rimstidt (1993), Eighmy et al. (1994) oder Chimenos et al. (1999). Sehr ausführliche Ergebnisse zu Mineralbestand und Gefüge von MV-Schlacken bietet die Arbeit von Eusden et al. (1999).

Der Mineralbestand wurde unter anderem von Pfrang-Stotz & Schneider (1995), Baccini et al. (1993), Kirby & Rimstidt (1993), Lichtensteiger (1996) oder Speiser et al. (2000, 2001) erfasst. Rauchgasreinigungsrückstände wurden speziell von Fruchter et al. (1990), Kida et al. (1996), Ferreira et al. (2003) und Astrup et al. (2006) untersucht.

2.1.1.1 Mineralogische Charakterisierung von MV-Schlacken

Makroskopisch betrachtet handelt es sich bei MV-Schlacke um graues bis schwarzes körniges Material, bestehend aus Schmelzprodukten, Feinanteil (Aschen), Bruchglas, Keramik, Metallen, Gestein, Salz, Wasser und auch einem unverbrannten Anteil (Abb. 2). Die Abbildung 3 gibt einen Eindruck über das makroskopische Erscheinungsbild von Schlacke aus der Müllverbrennung.

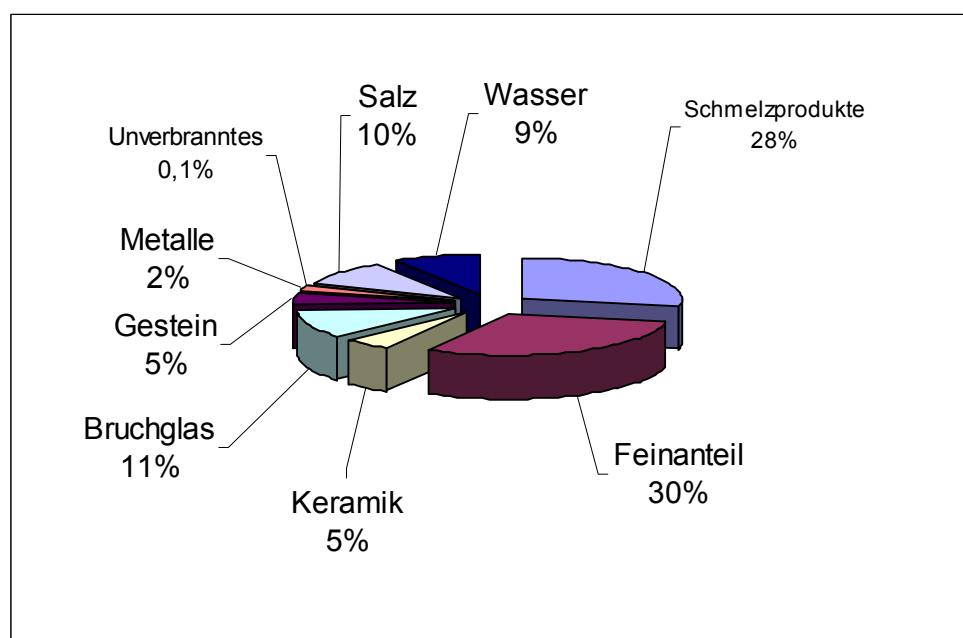


Abb.2: Stoffgruppenanalyse von aufbereiteter Frischschlacke, verändert nach Burg (1999), Angaben in Gew.-%

Verschiedene chemische und mineralogische Untersuchungen charakterisieren MV-Schlacke als ein mit Eisen durchsetztes Calcium-Aluminium-Silikat, das zudem auch aus Oxiden und Carbonaten besteht (Pfrang-Stotz & Schneider, 1995). Ein vergleichbares geogenes Material stellen basische Vulkanite (z.B. Basalte) dar. Allerdings sind die leichtlöslichen Salze

(Chloride, Sulfate), die Schwermetalle (insbesondere Cr, Cu, Pb, Zn) und der organische Kohlenstoff (TOC in modernen Anlagen mit gutem Ausbrand max. 1,5 Gew.-%) in der MV-Schlacke stark angereichert (Hirschmann, 2003, Kirby & Rimstidt, 1993).

Als Durchläuferphasen, die im Ofen keine wesentliche Veränderung erfahren haben, sind Quarz und Feldspat zu nennen. Primär im Ofen gebildet werden vor allem Glas sowie Pyroxen, Olivin, Melilith, Eisenoxid (Hochtemperaturkorrosionsbildungen wie Magnetit und Hämatit), Korund, Calciumoxid, Anhydrit und Metalle/-Legierungen sowie vereinzelt Sulfide (Hirschmann, 2003). Zahlreiche Schwermetalle werden in diesen primären Phasen chemisch gebunden, z.B. Cu, Pb und Zn in der Glashpase oder Cr und Zn in Pyroxenen und Spinellen (ev. Magnetit).



Abb.3: Makroskopisches Erscheinungsbild von Schlacke aus der Müllverbrennung,
Durchmesser des Behälters 40 cm

2.1.1.2 Physikalische Kenngrößen von MV-Schlacken

MV-Schlacke ist ein schlecht sortiertes und sehr ungleichförmig zusammengesetztes Material. Die Korngrößen reichen vom Feinsand- zum Grobkiesbereich: 0,063 mm – 200 mm (Klein, 2002; Burg, 1999). Mit längerer Lagerzeit der Schlacke auf der Deponie verschiebt sich das Spektrum zu feineren Korngrößen hin. Der Feinstkornanteil (Durchmesser < 60 µm) beträgt bis zu 3,5 % (Hirschmann & Förstner, 2000). Am Bayerischen Landesamt für Umwelt (Marb et al., 2002) wurden während eines Versuchsvorhabens MV-Schlacken untersucht. Es hat sich herausgestellt, dass das Gefüge der Schlacken stark porös ist (Porosität bis zu 38 Vol.-%). Die am Josef-Vogl-Technikum in Augsburg bestimmten Roh- und Reindichten (Korndichten) dieser Schlacken ergeben im Mittel Werte um 2,3 g/cm³ für die Rohdichte und 2,9 g/cm³ für die Reindichte (Knorr et al., 1999). Bezuglich der spezifischen Oberfläche dieser Schlacken ergab sich, dass im Zuge der Alterung durch Ablauf von Mineralneu- und umbildungen sich die Werte von 2,7 auf etwa 17 m²/g erhöhen.

U. a. haben Reimann (1994) und Klein (2002) Angaben zu Rohdichte und Schüttdichte gemacht: Rohdichte mit $2,2 - 2,7 \text{ t/m}^3$ und Schüttdichte ca. $1,2 \text{ t/m}^3$. Die Proctordichte beläuft sich bei einem optimalen Wassergehalt von $11,5 - 14,8 \%$ auf $1,45 - 1,85 \text{ t/m}^3$ (Kluge, 1982). Da der Schlackeaustausch aus dem Verbrennungsraum im Allgemeinen über den Naßentschlacker erfolgt, liegen die Wassergehalte der frischen Rohschlacken um 20 Gew.-% (Simon et al., 1995).

2.1.1.3 Charakterisierung von Rauchgasreinigungsrückständen

Die Rauchgasreinigungsrückstände weisen je nach Reinigungsverfahren (z.B. nass, trocken oder quasitrocken), Abfallinput, Anlagenkonzeption und Betriebsbedingungen eine große Variabilität hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung auf (Knorr et al., 1999). Im Vergleich zur Häufigkeit in der Erdkruste sind Schwermetalle um das 100- bis 1000-fache angereichert (Hundsrügge, 1990; Reimann, 1995). Je nach Reinigungsverfahren und abhängig von den eingesetzten Chemikalien bestehen RGR überwiegend aus leichtlöslichen Salzen (CaCl_2 , NaCl , KCl), Quarz, Calciumsulfate, -carbonate, -chloride und -hydroxide und verschiedene Schwermetallphasen (Chandler et al., 1997; Eighmy et al., 1995). Durch die hygrokopischen Eigenschaften der RGR können Calciumhydroxide bzw. -oxide zu sekundären Hydratphasen reagieren (Hundsrügge, 1991). Die typische Korngrößenverteilung reicht von $0,002 - 1 \text{ mm}$ (Chandler et al., 1997). Generell werden deutschlandweit die RGR als Versatzbaustoff im Untertagebergbau eingesetzt oder unter- sowie obertägig deponiert (Knorr et al., 1999).

2.1.2 Handhabung von MV-Schlacke

Die konventionelle Aufbereitung der Rohschlacke (Schlacke nach dem Wasserbad) umfasst eine Eisenmetallabtrennung, eine Abtrennung der Nichteisenmetalle (z.B. Aluminium), des Überkorns (Durchmesser $> 32 \text{ mm}$) und teilweise das Brechen des Überkorns (Hirschmann, 2003). MV-Schlacke ist ein sehr reaktives Material. Mineralphasen, welche im Verbrennungsofen, unter den dort vorherrschenden Sauerstoff- und Temperaturbedingungen gebildet wurden, sind unter Atmosphärenbedingungen weitgehend metastabil (Johnson, 1994). Aus diesem Grund wird nach der konventionellen Aufbereitung der Rohschlacke empfohlen, falls eine technische Verwertung der Schlacke (z.B. im Straßenbau) geplant ist, dass MV-Schlacke mindestens drei Monate gelagert wird (Reimann, 1992). Ziel dieser Lagerung ist es, die nach dem Kontakt mit Wasser und Luft startenden chemischen Reaktionen soweit wie möglich ablaufen zu lassen und damit die Raumbeständigkeit der Schlacken herzustellen (Hirschmann, 2003). Generell sollen mögliche Risiken, bedingt durch das kurz- und langzeitliches Emissionsverhalten von MV-Reststoffen, für die menschliche Gesundheit und für die Umwelt möglichst verhindert werden (Sabbas et al., 2003). Die Arbeiten von Simon et al. (1995) und Lahl (1994) haben gezeigt, dass bezüglich der Alterung

der Schlacken infolge von Karbonatisierung und hydraulischen Reaktionen, das Lagern von Schlacken auf Deponien im Freien effektiver ist als das Lagern in einer Halle. Zudem laufen diese Reaktionen bei Lagerung in dünner Schicht viel schneller ab.

Als mengenmäßig wichtigste Alterations-Prozesse in MV-Schlacken gelten (Johnson, 1994):

- Karbonatisierung,
- Calciumsulfathydratisierung,
- Calciumhydratisierung,
- Silikathydratbildung,
- Aluminiumhydratisierung,
- Eisenhydratisierung,
- Sulfidoxidation und
- Abbau organischer Substanz.

Der Faktor Zeit nimmt einen wesentlichen Einfluss auf die Auslaugbarkeit. Einige chemische Reaktionen gehen sehr rasch von statt. Auflösung einer Salzphase kann innerhalb von Sekunden bis Stunden ablaufen. Andere Reaktionen, wie z.B. die Auflösung von Silizium aus glasigen Komponenten benötigen Jahre bis Jahrzehnte, wobei ein chemisches Gleichgewicht unter natürlichen Umständen nur sehr langsam erreicht werden kann. Zu den sehr langsamen Alterungsprozessen von MV-Schlacke gehört die Verwitterung (Johnson, 1994). Die Karbonatisierung hängt ab von der Verfügbarkeit des CO₂-Anteils.

Infolge von Alterungsprozessen kommt es zur Wasserstoffgasbildung durch Hydratation von Aluminium (Magel, 2002), Volumenvergrößerung, starken Wärmeentwicklung (Klein, 2002) und Verfestigung (u.a. Ettringit- und Karbonatbildung).

Speiser et al. (2000) haben gealterte MV-Schlacken morphologisch und chemisch untersucht. Demnach haben sich infolge der Alterations-Prozesse in erster Linie folgende Phasen gebildet:

- Anhydrit, Portlandit, Calcit, Eisen-Oxide, Eisen-Hydroxide oder Gibbsit.
- Diese Phasen werden stets von verschiedenen Calcium-Hydrat Phasen begleitet.

2.1.2.1 Auswaschverhalten („Leaching“) von MV-Schlacke

Verschiedene Arbeitsgruppen beschäftigen sich mit der Abschätzung zum Langzeitverhalten von MV-Schlacken hinsichtlich Deponierung und Verwertung (van der Sloot, 1990; Belevi & Baccini, 1991; Johnson, 1994; Kersten et al., 1995; van der Sloot et al., 1996 & 2001; Hjelmar,

1996; Chandler et al., 1997; Förstner & Hirschmann, 1997; Meima & Comans, 1999; Forteza et al., 2004; Polettini et al., 2004; Åberg et al., 2006 oder Mostbauer et al., 2007).

Der Kontakt zwischen MV-Schlacke und dem perkolierenden Sickerwasser bewirkt ein Auswaschen („Leaching“) der Materialien. Verschiedene feste Phasen werden im Lauf der Deponierung über das Sickerwasser transportiert. Die folgenden Parameter sind eine wesentliche Grundlage für die Abschätzungen zum Auswaschverhalten:

Chemische Faktoren

Die Verfügbarkeit umweltrelevanter Spezies (Salze und Schwermetalle) aus der Schlacke hängt von der chemischen Zusammensetzung und der Mineralogie der Schlacke ab. Der Transport und die Mobilisierbarkeit werden u.a. von Temperatur, pH-Wert, Redoxpotential und org. Komplexbildner als Folge von Hydrolyse, Hydratation, Lösungs- und Fällungsreaktionen, Karbonatisierung, Komplexierung an Liganden oder an der Oberfläche, Sorption und Oxidation/Reduktion gesteuert (Sabbas et al., 2003).

Ein sehr wichtiger Parameter für die Zusammensetzung des Sickerwassers ist der pH-Wert. Die Verfügbarkeit verschiedener Spezies zeigt z.T. eine deutliche pH-Abhängigkeit. Ein Großteil der Spezies (z.B. Cd) ist im sauren pH-Bereich ab < 4,5 vorhanden. Amphotere Metalle wie z.B. Al, Pb, Zn zeigen eine hohe Mobilisierbarkeit sowohl im sauren als auch im alkalischen Milieu. Elemente, die auch als Oxyanionen vorkommen können (z.B. As, Cr, Mo, Sb, V), sind hingegen nur im alkalischen Milieu verfügbar.

Die Entwicklung des pH-Werts im Sickerwasser wird von der Pufferkapazität der Schlacke geregelt. Diese wirkt dem Säureeintrag entgegen. Als Folge einer anhaltenden Auslaugung von Schlacke sinken die Pufferkapazität und damit die Alkalinität. Dieser Faktor ist neben der Säureneutralisationskapazität ein wichtiger Indikator für die Qualität von Schlacke. Diese Kapazität gibt Auskunft darüber, inwiefern Schlacke von externen und internen Säureeinflüssen (z.B. durch Sauren Regen, Mineralisation und Abbau org. Substanz) bzgl. ihrer Alterung und Auslaugung beeinflussbar ist.

Klimatische Faktoren

Die Sickerwasserproduktion ist abhängig von diversen vorherrschenden klimatischen Faktoren (Niederschlagsmenge, Niederschlagsdauer, Sonneneinstrahlung, Temperatur, Evaporation, Evapotranspiration und Wind) sowie von möglicher Vegetation. Die Menge an ausgetragenem Sickerwasser hängt ab von der Größe und Form der Poren, von der Porenverteilung, von der Homogenität des Aufbaus einer Deponie, von der Durchlässigkeit, von der Feldkapazität und von der Wasserwegsamkeit und Ausbildung bevorzugter Sickerwege. Die Freisetzung umweltrelevanter Spezies ist das Ergebnis der Perkolation von Sickerwasser durch den Abfallkörper (Chandler et al., 1997).

Physikalische Faktoren

Zu den physikalischen Faktoren werden die spezifische Oberfläche der Schlacke, die Korngröße, das Flüssig-/Feststoffverhältnis (L/S-ratio), die Porosität, der hydraulische Gradient und die hydraulische Leitfähigkeit gezählt. Eine Veränderungen der Porosität, der Korngrößenverteilung oder ein Korngrößenwechsel wirken sich nachhaltig auf die Auslaugbarkeit der MV-Schlacke aus.

Das L/S-ratio drückt aus, wie viel Volumen an Sickerwasser auf den Feststoff appliziert wurde (L/kg). Das L/S-ratio ist das Resultat von klimatischen Verhältnissen und diversen zuvor genannten hydraulischen und physikalischen Parametern (u.a. Durchlässigkeit, Porosität). Die Anwendung des L/S-ratio wird für die Übertragbarkeit von Ergebnissen aus den verschiedenen Versuchsanordnungen mit unterschiedlichem Maßstab angewendet (Hjelmar, 1990).

Besonders intensiv beschäftigen sich die Arbeitsgruppen um van der Sloot, H.A., Kosson, D.S. und Hjelmar, O. mit dieser Problematik. Das von ihnen erarbeitete Konzept „leachXS“ (<http://www.leachxs.com/> und <http://www.leaching.net/>) zielt darauf ab, mit der geeigneten Software eine Datengrundlage für eine breites Spektrum an Reststoffen hinsichtlich des Auslaugverhaltens unter Einfluss der oben genannten Faktoren zu schaffen. Als Datengrundlage werden Ergebnisse aus Laborversuchen (Batch-Versuche), Säulenversuchen und Feldversuchen herangezogen. Prognosen zum Langzeitverhalten der Reststoffe basieren auf geochemischen Modellierungen (Meima & Comans, 1997; Dijkstra et al., 2002).

2.1.2.2 Untersuchungsmethoden im Labor- und Feldmaßstab

Es gibt verschiedene wissenschaftliche Arbeiten auf der Basis von Säulen- und Lysimeterversuchen im Labor- und Feldmaßstab hinsichtlich der Verfügbarkeit und Mobilisierung umweltrelevanter Spezies in Schlacken und Deponien (Hjelmar, 1990; Belevi et al., 1992; Kirby & Rimstidt, 1994; Stegemann et al., 1995; Förstner & Hirschmann, 1997; Bruder-Hubscher et al., 2001). Die üblichen Versuchsanordnungen sind upflow-Tests, d.h. die Flüssigkeit durchströmt die Säulen von unten nach oben ohne Unterbrechung, um der Bildung bevorzugter Sickerwege vorbeugen zu können (Hjelmar, 1990; Chandler et al., 1997). Dabei stellen sich wassergesättigte Bedingungen ein. Für die Fragestellungen zur Wirkung klimatischer Wechselphasen, d.h. einer Unterbrechung der Bewässerungsphasen durch Trocknungsperioden, auf die Akkumulationen von Salzen entlang von Korngrenzen, stehen aber wasserungesättigte Bedingungen im Vordergrund. Wir führen die Versuche daher im downflow-Verfahren durch. Das Sickerwasser durchströmt die Säule von oben nach unten. Bei dieser Art der Versuchsdurchführung besteht zwar die Gefahr der Randgängigkeit, d.h. der Ausbildung einer bevorzugten Strömungsfront zwischen Säulenwand und eingefülltem Material. Laut Fichtl & Oeltzschnner (1979) verliert dieser Aspekt aber mit zunehmendem Rohrdurchmesser immer mehr an Bedeutung.

Zur Abschätzung des Langzeitverhaltens abhängig von spezifischen Aspekten der Auslaugung werden zahlreiche standardisierte Auslaugverfahren eingesetzt.

Die dabei gewonnenen Eluate beinhalten wichtige Informationen über die Verfügbarkeit von Salzen und Schwermetallverbindungen. Neben den Konzentrationen umweltrelevanter Spezies sind auch die Parameter pH-Wert oder Leitfähigkeit von großer Aussagekraft. Der in der Realität wirkende Zeitfaktor soll in Labortests mit Zeitraffereffekten wie z.B. erhöhtes Flüssigkeit/Feststoff-Verhältnis oder Materialzerkleinerung nachgestellt werden. Die Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die europäischen Elutionsverfahren (nach Knorr et al., 1999).

Tab. 1: Übersicht über die verschiedenen europäischen Elutionsverfahren (nach Knorr et al., 1999)

	DIN EN 12457-4 - Teil 4 (DEV S4) (entsprechend LAGA)	pH-stat	Schweizer Eluattest	AFNOR	Verfügbarkeitstest (NEN 7341)
Land	Deutschland	Deutschland	Schweiz	Frankreich	Niederlande
Probenvorbereitung	Originalsubstanz	Originalsubstanz	Originalsubstanz	auf < 4 mm zerkleinert	fein gemahlen (<125 µm), getrocknet
Probenmenge	mind. 100 g (Abh. von der Korngröße)	100 g	100 - 200 g	100 ± 5 g	16 g
Elutionsflüssigkeit	destilliertes Wasser	destilliertes Wasser; während des Versuchs wird HNO ₃ bzw. NaOH zugegeben	destilliertes Wasser (Bestimmung von Anionen, organ. Schadstoffen); destilliertes Wasser mit CO ₂ gesättigt, während des Versuchs wird auch CO ₂ eingeblasen (Bestimmung von Schwermetallen)	destilliertes Wasser	destilliertes Wasser; während des Versuchs wird Säure zugegeben (siehe pH-Wert)
Feststoff/Flüssig-Verhältnis	1 : 10	1 : 10	1 : 10	1 : 10	Schritt 1 - 1 : 50 Schritt 2 - 1 : 50
pH-Wert	unkontrolliert	konstant pH 4 oder pH 11	ca. pH 4	unkontrolliert	Schritt 1 - pH 7 Schritt 2 - pH 4
Dauer	24 h	24h	zweimal 24h	Einfachelution: 24 ± 1 h Mehrfachelutionen: jeweils 16 ± 1h	Schritt 1 - 3h Schritt 2 - 3h

In Deutschland ist es vorgeschrieben, dass zu deponierende Abfallproben nach dem Elutionsverfahren nach DIN EN 12457-4 (vormals DEV-S4) untersucht werden, um die Verfügbarkeit leichtlöslicher Spezies untersuchen zu können (AbfAbIV, 2001). Mit diesem Testverfahren werden hauptsächlich leichtlösliche Bestandteile erfasst. Der sich einstellende alkalische pH-Wert um 10 bewirkt, dass nur geringfügig Cu, Pb, oder Zn in Lösung gehen. Um den max. verfügbaren Schwermetallanteil (worst case scenario) untersuchen zu können, wird der pH_{stat}-Test angewendet, wobei die langsam ablaufenden chemischen und mineralogischen Prozesse unberücksichtigt bleiben. Während der Elution werden definierte pH-Werte eingestellt und oftmals das Material zerkleinert. Im Verhältnis zu den Gesamtgehalten werden nach 24 Stunden bei pH 4 maximal 41% Cd, 37% Zn, 24% Ni, 10% Co, 8% Pb, 3% Cu und 0,1% Cr aus den MV-Schlacken freigesetzt (Hirschmann, 2003). Die Löslichkeit von sehr leicht löslichen Phasen wie Na, K, Cl und Br ist vom pH-Wert weitgehend unabhängig (Chandler et al., 1997).

2.1.2.3 Ansätze zur Immobilisierung

Die Vorbehandlungsmethoden vor und während der Verbrennung unterteilt man in mechanische (Müllsortierung/ Mülltrennung) und chemische Abtrennung (Verfestigung/Stabilisierung) und thermische Behandlung. Für die aktive Deponierungszeit spielen die Konstruktion der Deponie und die Handhabung eine große Rolle.

Mechanische Behandlungsmethoden

Zu den mechanischen Behandlungsmethoden zählt man neben der Metallseparation (z.B. Fe für Wiederverwendungszwecke) die Siebung in unterschiedliche Kornfraktionen. Vorwiegend ist die feinere Fraktion angereichert an umweltrelevanten Spezies. Für geotechnische Anwendungen wird von der Schlacke die Feinfaktion abgetrennt, um die Belastung für die Umwelt möglichst zu verhindern. Schlackenwäsche zur Entfernung von leicht löslicher Spezies wird oft postuliert. Derie (1996) und Nzihou & Sharrock (2002) haben gezeigt, dass ein L/S-Verhältnis von 10 ausreicht, um etwa 90% der leichtlöslichen Spezies zu extrahieren. Für die Entfernung von Schwermetallen hingegen hat die Wäsche keinen Einfluss, da durch die Wäsche der pH-Wert kurzfristig nicht gesenkt wird (Chandler et al., 1997, Schneider et al., 1994). Die Schlackenwäsche kann der Einfachheit halber mit dem Quenching der Schlacke nach der Verbrennung verbunden werden. Um diese Methode zu optimieren, wird vorgeschlagen, die Wäsche mit chemischer Mobilisierung oder künstlicher Alterung zu verknüpfen. Speziell für RGR wird eine Wäsche empfohlen, da diese Reststoffe zu fast 20 Gew.-% aus Salzen bestehen. Der hohe Salzgehalt ist verantwortlich für die negativen Eigenschaften dieser Reststoffe, wie z.B. hohe Auslaugung, großes Wasseraufnahmevermögen und Korrosion (Sabbas et al., 2003).

Chemische Behandlungsmethoden

Die Stabilisierung bewirkt auch eine Reduzierung des Leachings. Vorwiegend wird diese Maßnahme auf RGR angewendet. Dabei kommen hydraulische Bindemittel (z.B. Zement, Kalk, puzzolanische Materialien) zum Einsatz. Auf leichtlösliche Salze hat diese Maßnahme jedoch wenig Einfluss.

Die künstliche Alterung von MV-Schlacke umfasst Hydratation, Karbonatisierung und Oxidation/Reduktion. Es konnte eine verringerte Verfügbarkeit von Schwermetallen (u.a. Cu, Mo, Pb, Zn) und eine Reduzierung der Auslaugbarkeit gezeigt werden (Meima & Comans, 1999; Zevenberger & Comans, 1994). Als Folge der künstlichen Alterung wird der pH-Wert gesenkt und Schwermetalle an neu gebildeten stabileren Phasen sorbiert (Meima & Comans, 1997; Meima & Comans, 1999; Meima et al., 2002). Die künstliche Alterung kann zu einer Mobilisierung von Sulfat führen (Bodénan et al., 2000). Eine mögliche Ursache ist der Zerfall der Mineralphase Ettringit.

2.1.3 Barrièresysteme

Als Immobilisierung im Sinne einer „Inneren Barriere“ gilt die Fixierung von umweltrelevanten Schadstoffen in möglichst schwerlöslichen Verbindungen, um damit das Auslaugverhalten zu verringern. Nach Förstner & Grathwohl (2003) bieten in der Abfallwirtschaft verschiedene mineralogische Barrièresysteme die Möglichkeit zur Rückhaltung umweltrelevanter Spezies. Die Wirkungsweise der äußeren Barriere-Systeme ist, den Wasseraustausch mit der Umgebung zu minimieren oder zu verhindern. Das Innere Barrièresystem zielt auf eine sichere Einbindung von Schadstoffen. Es beruht zum Beispiel auf einer mineralogischen Immobilisierung von Schadstoffen innerhalb des gesamten Abfallkörpers. Dabei ist ein Ziel, die Mineralneubildung zu fördern. „Reservoir-Minerale“ sollen Schadstoffionen kristallchemisch fixieren und immobilisieren. Nach Pöllmann (1994) werden die Speicherminerale in zwei Verfahrensschritten gebildet: einmal als wasserfreier Minerale infolge thermische Reaktion oder als wasserhaltige Minerale durch Hydratationsreaktionen. Darüber hinaus soll durch eine entsprechende Verfestigung oder Verdichtung in den Mikrostrukturen die Porosität und Durchlässigkeit wesentlich verringert und damit die Ausbreitungsmöglichkeiten für die Schadstoffe eingeschränkt werden. Zum Teil sind diese Immobilisierungsmaßnahmen aber mit einem großen technischen und finanziellen Aufwand verbunden.

2.1.4 Salzakkumulationen in natürlichen Systemen

In natürlichen Systemen sind Versalzungen signifikant für aride und semiaride Gebiete. Die Versalzungen werden dokumentiert für die ungesättigte Bodenzone und in Spaltensystemen. Der Transport der leichtlöslichen Salzphasen in der ungesättigten Bodenzone hängt vor allem von Bodenfeuchte bzw. Wasserbewegung. Geregelt wird die Bodenfeuchte vom Wasserhaushalt: Niederschlag, Evapotranspiration und oberflächennaher Abfluss (Vengosh, 2003). Die Versalzungsprozesse in natürlichen Systemen entstehen durch komplexe physikalische und chemische Prozesse u.a. Fällungsreaktionen oder Ionenaustausch. Salzbildungen treten an der Oberfläche auf durch Evaporation, ein Abwechseln von nassen und trockenen Phasen und Kapillareffekte. Diese grundlegenden Beobachtungen können auch auf Monodeponien für MV-Reststoffe angewendet werden. Durch die generell sehr hohen Salzgehalte in Schlacken sind somit Ausgangsbedingungen für die Bildung von Salzanreicherungen geschaffen. Die Beobachtungen auf der Monodeponie in Waldering haben gezeigt, dass auch in humiden Klimagebieten massive Salzanreicherungen in einer definierten Schicht möglich sind.

3. MATERIAL UND METHODIK

3.1 AUSGANGSMATERIALIEN

MV-Schlacken

Für die Versuchsdurchführungen wurden MV-Schlacken von zwei verschiedenen Anlagen entnommen: MVA Ingolstadt und MHKW Rosenheim (Tabelle 2). Die MV-Schlacke der MVA-Ingolstadt (im Weiteren bezeichnet als Schlacke A) wird nach der Aufbereitung direkt ohne Zwischenlagerung auf der Deponie abgelagert und stellt ein Beispiel für das Reaktionsverhalten frischer Schlacke dar. Die MV-Schlacke des MHKW-Rosenheim (im Weiteren bezeichnet als Schlacke B) wird auf der Deponie als Haufwerk mehrfach umgelagert. Dadurch ist diese MV-Schlacke ein Beispiel für ein durchgehend gealtertes Material. Durch die Umlagerung wird der Ablauf der verschiedenen chemischen und physikalischen Reaktionsprozesse forciert (Förstner & Hirschmann, 1997). Bei der Aufbereitung wird die Schlacke B entschrottet und in zwei Fraktionen getrennt. Die Fraktion 0 - 4 mm, hier als Schlacke-Feinkorn (SFK) bezeichnet, wurde bei den Versuchsanordnungen als Sperrsicht (Sperre) eingebaut. Der Korngrößenwechsel sollte zu einer Verringerung der Durchlässigkeit führen.

Tab. 2: Gegenüberstellung der verschiedenen Schlacken

Schlacke A = MVA Ingolstadt		Schlacke B = MHKW Rosenheim	
Körnung	0 - 32 mm	Körnung	4 - 32 mm
Lagerung	keine	Lagerung	> 3 Monate
Versuchsaufbau	Probenbezeichnung	Versuchsaufbau	Probenbezeichnung
Säulenversuche VA-A und VA-C	Schlacke IN	Säulenversuche VA-B	Schlacke LOS 11/12
Testfelder Eberstetten	Schlacke EB	Großlysimeter Waldering	Schlacke LOS 6
Großlysimeter Raindorf	Schlacke RA	Schlacke-Feinkorn (SFK)	SFK 0 - 4 mm

IN: Ingolstadt; EB: Eberstetten; RA: Raindorf

Rauchgasreinigungsrückstände (RGR)

Im MHKW Rosenheim wird eine quasitrockene Rauchgasreinigung in zwei Stufen vollzogen. Hierdurch fallen keine Abwässer an. Durch Zuführen von Kalkmilch (Ca(OH)_2) werden die sauren umweltrelevanten Schadgase und die leichtflüchtigen Schwermetalle aus dem Rauchgas entfernt (nach 17. BlmSchV, 1990). Die RGR-Produkte aus dem Gewebefilter wurden zusammen mit Kesselaschen bis zum Jahr 2005 auf der Monodeponie Waldering deponiert. Hier wurden sie schichtweise eingebracht und jeweils mit Schlacke-Feinkorn abgedeckt, um eine Staubverfrachtung durch Wind zu vermeiden. Die RGR fallen in einer Korngröße von ca. 0 - 4 mm an. Das Volumenverhältnis von Schlacke zu RGR auf der Monodeponie Waldering betrug etwa 1:3 (Magel, 2003).

3.2 UNTERSUCHUNGSMETHODEN

Die Feststoff- und Sickerwasserproben wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit verschiedenen Methoden analysiert (Tab. 3). Eine detaillierte Beschreibung zu den Untersuchungsmethoden mit den jeweiligen Meßparametern findet sich im experimentellen Anhang unter Punkt D bis F.

Tab. 3: Zusammenfassung der Untersuchungsmethoden

	Bohrproben BA I [#]	Ausgangs- materialien	Laborversuche	Feldversuche
Physikalische Parameter				
Wassergehalt	x ^{#1}	x	x	x
Glühverlust	x ^{#1}	x	x	x
Korngrößenverteilung	x ^{#1}	x	x	x
Gesamtchemische Untersuchungen (Feststoff)				
RFA	x	x	x	x
Untersuchungen der Eluate				
ICP-OES	x ^{#1}	x	x	x
IC	x ^{#1}	x	x	x
Phasenanalyse				
XRD	x ⁰	x	x ⁰	x ⁰
REM*	x ⁰	x ⁰	x ⁰	x ⁰
IR*	x ⁰	x ⁰	x ⁰	x ⁰
Sickerwasseranalytik				
ICP-OES	-	-	x ⁰	x
IC	-	-	x ⁰	x
Schnelltest	-	-	x ⁰	x ⁰

* Untersuchungen an Salzausblühungen, x für alle Proben, x⁰ nur für ausgewählte Proben

Bohrproben im BA I der Deponie Waldering im Jahr 2000 vor Beginn dieses Projekts

#1 Datensätze wurden aus den Arbeiten von Heuss-Aßbichler, 2002 und 2004 bzw. Magel, 2001 übernommen

Feststoffanalytik

Die Feststoffe aus den Säulen- und Feldversuchen wurden mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) bestimmt. Zusätzlich wurden von sämtlichen Feststoffproben der Wassergehalt (WG) bei 30°C und 105°C sowie der Glühverlust (GV) bei 550°C und 1050°C aus der Originalsubstanz ermittelt (nach DIN EN 12880-S2a und DIN EN 12879-S3a). Elutionstests gemäß DIN EN 12457-4 wurden zur Beurteilung der Auslaugbarkeit der Schlacke-Proben durchgeführt. Bei der Präsentation der Ergebnisse ab Kapitel 4.2 werden für die Eluatuntersuchungen nur ausgewählte Eluatparameter (pH-Wert, Leitfähigkeit, Cl, SO₄, Ca, Na, Cu, Mo, Pb und Zn) dargestellt.

Zur Bestimmung der Korngrößenverteilung wurden Proben in Anlehnung an die DIN 18123 (1983) trocken gesiebt. Für die Untersuchungen wurden die Maschenweiten 0,125 mm und 1 mm verwendet.

Sickerwasseranalytik

Die anfallenden Säulensickerwässer wurden mengenmäßig erfasst und auf folgende Eigenschaften untersucht: Geruch, Farbe, Leitfähigkeit (mS/cm) und pH-Wert. Die Chlorid- und Kupferkonzentrationen wurden mittels Schnelltest ermittelt, um die ungefähren Konzentrationsbereiche für die ICP-OES und IC-Analytik zu bestimmen und markante Trendabweichungen zu erkennen. Beim Schnelltest (Merck Microquant, 3 - 300 mg/L Cl bzw. 0,3 – 10 mg/L Cu) handelt es sich um einen Farbkomparator. Mittels direktem Farbvergleich kann der Konzentrationsbereich abgelesen werden. Sämtliche Sickerwasser- und Eluatproben wurden mittels ICP-OES auf Kationen bzw. Schwermetalle (Al, Ba, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Si, Sr, V, W, Zn) und mittels Ionenchromatographie auf die Anionen Chlorid und Sulfat untersucht. Die Präsentation der Ergebnisse für die Sickerwasserentwicklung ab Kapitel 4.2 beschränkt sich auf die aussagekräftigsten Parameter (Cl, SO₄, Ca, Na, Cu, Mo, Pb und Zn).

3.3 VERSUCHSANORDNUNGEN

3.3.1 Säulenversuche im Labor

Die Säulenversuche im Labor bestanden aus Plexiglassäulen mit 1m Länge und 15 cm im Durchmesser. Eine ausführliche Beschreibung und Bilddokumentation zum Aufbau und zur Befüllung der Säulen findet sich im experimentellen Anhang. Die Tabellen T-3 bis T-5 im tabellarischen Anhang zeigen eine vollständige Übersicht über die drei unterschiedlichen Versuchsanordnungen der Säulenversuche im Labor.

Bewässerungsmodus

Die sogenannten Referenzversuche wurden nur mit Leitungswasser (LW) bewässert, um die natürlichen Verhältnisse auf einer Deponie mit Niederschlagszutritt zu simulieren. Auf der Deponie ist jedoch durch die fortwährenden Ablagerungen frischer MV-Reststoffe das perkolierende Sickerwasser stets sehr salreich. Aus diesem Grund wurden erweiterte Versuche mit salzreichen Lösungen bewässert. Die erhöhte Salzzufuhr wurde umgesetzt durch die Zugabe einer mit leichtlöslichen Salzen und Schwermetallen angereicherten Lösung, im Folgenden kurz Modellsickerwasser (MSW). Die chemische Zusammensetzung findet sich in Tabelle T-1 im tabellarischen Anhang. Der pH-Wert des MSW wurde mittels NaOH auf 11 eingestellt.

Als Bezugsgröße für die Bewässerungsmenge wurde die durchschnittliche Niederschlagsmenge auf der Monodeponie Waldering verwendet. Pro Jahr fallen dort etwa 1200 L/m^2 Niederschlag. Dieser Wert entspricht einer wöchentlichen Menge von $23,6 \text{ L/m}^2$. Umgerechnet auf den Querschnitt der Säulen sind dies ca. 0,3 Liter pro Woche. Zur Vereinfachung wurden ein Mal pro Woche jeweils vormittags und nachmittags 150 mL eines Bewässerungsmediums (Leitungswasser oder Modellsickerwasser) bewässert.

Abweichend von diesem Modus wurden bezüglich der Säulen aus der Versuchsanordnung B Verhältnisse angewendet, die vergleichbar mit Starkregenereignissen sind und den Zustand der maximalen Auswaschung darstellen. Hier wurde zu Beginn der Experimente zweimal pro Woche jeweils morgens und abends mit 500 mL eines Bewässerungsmediums (zwei Liter pro Woche) bewässert. Umgerechnet auf die Deponie gleicht der Anteil von zwei Litern pro Woche einem Betrag von 113 L/m^2 pro Woche oder ca. 5.750 L/m^2 pro Jahr. Zu Beginn wurden die Säulen aus VA-B nur mit Leitungswasser bewässert. Nach etwa 50 Versuchstagen wurde für ausgewählte Säulen auf Modellsickerwasser umgestellt, um mit der Zufuhr von salzreichen Lösungen neue Impulse für die Akkumulation von Salzen entlang des Säulenprofils zu setzen. Ab einem Versuchszeitraum von etwa 180 Tagen wurde die Bewässerungsmenge auf 0,3 Liter pro Woche reduziert, um die Verhältnisse auf einer Deponie nach einer möglichen Oberflächenabdeckung zu simulieren.

Versuchsanordnung A (Schlacke A; unverdichtet)

Die Tabelle 4 zeigt eine Aufstellung der Versuchsanordnung A, mit Laufzeiten zwischen $4\frac{1}{2}$ und 25 Monaten. Bei dieser Versuchsanordnung wurde die Schlacke A, im Anhang gekennzeichnet mit IN, unverdichtet eingebaut, um eine möglichst homogene Verteilung zu erreichen. Die Referenzversuche IBV0 und ISFK0 sind grundlegende Versuche und wurden daher lediglich mit Leitungswasser bewässert. Ihre Laufzeit betrug 103 Wochen. Die erweiterten Versuche der Versuchsanordnung A wurden ausschließlich mit Modellsickerwasser bewässert. Zudem wurden diese Versuche als Zeitversuche durchgeführt. Jeweils drei Säulen mit identischem Aufbau und derselben Versuchsdurchführung wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten geöffnet. Die kürzeste Versuchszeit betrug 18 Wochen (Versuche „kurz“, Kennzeichnung 1), die mittlere Versuchszeit 42 Wichen (Versuche „mittel“ Kennzeichnung 2) und die längste Versuchsdurchführung 103 Wochen (Versuche „lang“, Kennzeichnung 3). Der Referenzversuch (IBV0) sowie die drei Säulen der Versuchsreihe I (IBV1, IBV2 und IBV3) sind Blindversuchen. Für den zweiten Referenzversuch (ISFK0) und für drei weitere Säulen der Versuchsreihe II (ISFK1, ISFK2 und ISFK3) wurde zusätzlich zur Schlacke etwa 40 cm oberhalb der Basis Schlacke-Feinkorn (SFK) verdichtet (2-3 cm mächtig) eingebracht.

Tab. 4: Übersicht über die Versuchsanordnungen A (VA-A)

VA-A	Säule	Sperre	Bewässerung	Dauer in Wochen	Eingebaute Masse in kg	Zugegebene Wassermenge in L	L/S [#] in L/kg
R°	IBV0	Keine = Blind versuch	LW	103	18,0	30,6	2,3
I	IBV1		MSW*	18	15,5	5,4	0,6
	IBV2			42	16,5	12,6	1,2
	IBV3			103	16,0	30,9	2,6
R°	ISFK0	SFK = Sperr schicht	LW	103	13,8	30,6	2,9
II	ISFK1		MSW*	18	14,5	5,4	0,7
	ISFK2			42	15,6	12,6	1,2
	ISFK3			103	15,5	30,9	2,7

*: Modellsickerwasser für Säulenversuche, Zusammensetzung vgl. Tab. T-1, tabellarischer Anhang

#: L/S; Verhältnis Gesamtflüssigkeitsmenge (Wassergehalt zu Beginn plus zugegebenes Wasser, L) zu Feststoffgehalt (S) bei Versuchsende

R°: Referenzversuch, Bewässerung mit Leitungswasser

Versuchsanordnung B (Schlacke B, gelagert, leicht verdichtet)

Für die VA-B wurden MV-Schlacken aus unterschiedlichen Losen entnommen, LOS 11 wurde bis zum Einbau etwa sechs Monate und LOS 12 etwa vier Monate gelagert. Die Kennzahl ist Hinweis auf den Ablagerungsmonat (11: November, 12: Dezember). Bei dieser Versuchsanordnung wurde das Material jeweils in 10 cm mächtigen Lagen in die Plexiglassäulen eingebracht und mit einem Stampfer leicht verdichtet, um die Ausbildung größerer Porenräume zu verhindern.

Die Tabelle 5 zeigt eine Zusammenfassung der Versuchsanordnung B mit den entsprechenden Laufzeiten. Bei der Versuchsreihe I aus der Versuchsanordnung B wurden zwei Säulen als Blindversuche (BV1 und BV2) nur mit Schlacke gefüllt. Bei der Versuchsreihe II (SFK1, SFK2, SFK3) der VA-B wurde Schlacke-Feinkorn (SFK) als Sperrsicht verwendet. Bei der Versuchsreihe III wurde ein Geotextil (GT) als Sperrsicht verwendet. Durch die große Durchlässigkeit des Geotextils ist der Versuch GT1 mit den Blindversuchen zu vergleichen. Bei den Versuchen GT2 und GT3 wurde zusätzlich oberhalb des Geotextils Schlacke-Feinkorn eingebracht.

Um sehr salzreiche Bedingungen zu simulieren, wurde für die Versuchsreihen IV und V RGR als Abdeckschicht eingesetzt (RSFK1, RSFK2, RSFK3 und RGT1, RGT2, RGT3). Abgesehen von der Abdeckschicht entspricht der Aufbau dieser Säulen dem der Versuchsreihen II und III.

Für das Kapitel 4 werden aufgrund der großen Datenmengen die Ergebnisse zu den Versuchen BV1 (ohne Sperre), SFK3 (mit Sperre) und RSFK2 sowie RSFK3 (beide mit Sperre und RGR) exemplarisch dargestellt. Die Laufzeiten betrugen 15½ bis ca. 17 Monate.

Tab. 5: Übersicht über die Versuchsanordnung B (VA-B)

VA-B	Säule	Sperre	Einbau Salzschicht	Bewässerung	Dauer in Wochen	Eingebaute Masse in kg	Zugegebene Wassermenge in L	L/S# in L/kg
I	BV 1	keine	keine	MSW*	67	12,4	58,9	6,2
	BV 2	keine	keine	MSW*	11	12,4	20,0	2,3
II	SFK 1	SFK	keine	LW	9	17,5	17	1,5
	SFK 2	SFK	keine	MSW*	38	17,5	44,1	3,4
	SFK 3	SFK	keine	MSW*	64	17,5	51,9	4,0
III	GT 1	GT	keine	MSW*	9	17,6	17	1,5
	GT 2	GT & SFK	keine	MSW*	37	19,8	43,1	3,0
	GT 3	GT & SFK	keine	LW	8	17,6	15	1,3
IV	RSFK 1	SFK	RGR	MSW*	9	17,5	17	1,5
	RSFK 2	SFK	RGR	LW	62	17,9	49,6	3,7
	RSFK 3	SFK	RGR	MSW*	62	13,4	49,6	4,9
V	RGT 1	GT	RGR	LW	9	17,6	17	1,4
	RGT 2	GT & SFK	RGR	LW	29	17,9	39,7	3,0
	RGT 3	GT & SFK	RGR	MSW*	29	17,9	39,7	3,0

*: Modellsickerwasser für Säulenversuche, Zusammensetzung vgl. Tab. T-1, tabellarischer Anhang , bei einigen Säulenversuchen wurde nur zeitweise mit Modellsickerwasser bewässert

#: L/S; Verhältnis Gesamtflüssigkeitsmenge (Wassergehalt zu Beginn plus zugegebenes Wasser, L) zu Feststoffgehalt (S) bei Versuchsende

Versuchsanordnung C (Schlacke A, RGR als Sperrsicht)

Die Versuchsanordnung C besteht aus zwei Versuchssäulen (Tab. 6). Der Blindversuch (RBV) verfügt über einen homogenen Aufbau und wurde lediglich mit Schlacke A (Bezeichnung IN) gefüllt. Für die Säule mit Sperre (RSFK) wurde als Sperre Schlacke-Feinkorn (2 cm mächtig) verdichtet eingebaut und unmittelbar darüber eine Lage aus RGR (1 cm mächtig) eingebracht. Mit dieser Kombination soll eine sehr salzreiche Ausgangssituation geschaffen werden, d.h. bereits zu Versuchsbeginn sind die Voraussetzungen für die Sättigungsbedingungen für leichtlösliche Salzphasen innerhalb der Sperrsicht erreicht. Die beiden Versuchssäulen sind noch nicht rückgebaut. In Kapitel 4 werden daher nur die Ergebnisse zur Sickerwasserentwicklung präsentiert. Die aktuelle Laufzeit beträgt 19 Monate.

Tab. 6: Übersicht über die Versuchsanordnungen C

VA-C	Säule	Sperre	Einbau Salzschicht	Bewässerung	Dauer in Wochen	Eingebaute Masse in kg	Zugegebene Wassermenge in L	L/S# in L/kg
I	RBV	keine	keine	MSW*	77	17,5	23,1	1,8
II	RSFK	SFK+RGR	RGR	MSW*	77	16,5	23,1	1,9

*: Modellsickerwasser für Säulenversuche, Zusammensetzung vgl. Tab. C-7, Anhang C

#: L/S; Verhältnis Gesamtflüssigkeitsmenge (Wassergehalt zu Beginn plus zugegebenes Wasser, L) zu Feststoffgehalt (S) bei Versuchsende

Versuchsanordnung Modellversuch (MoV, mit Kunststoffkugeln)

Schlacke ist ein inhomogenes Phasengemisch. Die im Material stattfindenden Prozesse werden durch verschiedene physikalisch-chemische Parameter und Ablauf unterschiedlicher chemischer Reaktionen (u.a. Lösung, Ausfällung, Sorption) beeinflusst. Die Durchführung eines Modellversuchs mit Kunststoffkugeln soll dazu dienen, die Arbeitshypothese zu prüfen, inwiefern eine Änderung der Durchlässigkeit allein durch Korngrößenwechsel ausreicht, um eine Aufkonzentration salzreicher Lösungen innerhalb des Deponiekörpers zu bewirken. Durch die Anwendung von Kunststoffkugeln können die komplexen Reaktionsprozesse auf eine rein physikalische Wirkungsweise der Sperre reduziert werden. Die Säule MoV1 simuliert den Blindversuch und die Säule MoV2 den Modellversuch mit Sperre. Die Abbildungen A-10 und A-11 im experimentellen Anhang zeigen den Aufbau der beiden Versuchssäulen.

Bewässert wurden die Säulen mit einer 3-molaren NaCl-Lösung (176 g/L NaCl). Im Allgemeinen hält sich eine wassergesättigte Atmosphäre innerhalb der Säulen. Nach etwa 80 Versuchstagen wurden beide Säulen nach jeder Bewässerung mittels Pressluft getrocknet, um gemäß der Fragestellung zu klimatischen Wechselfolgen wasserungsgesättigte Bedingungen schaffen zu können. Um die Wirkung der Bewässerung auf Auswaschung bzw. Ausfällung der Salze besser erarbeiten zu können, wurde die Bewässerungsmenge während der Versuchsdurchführung gezielt verändert (reduziert bzw. erhöht). Die Gesamtversuchszeit der Modellversuche mit Kunststoffkugeln betrug 22 Monate.

3.3.2 Feldversuche (FV)

Die unterschiedlichen Feldversuche, insgesamt vier Testfelder und vier Großlysimeter, sollen, basierend auf den unterschiedlichen Säulenversuchen, verschiedene Versuchsbedingungen wiedergeben (vgl. Tab. 7). Die Tabelle T-6 im tabellarischen Anhang zeigt eine erweiterte Übersicht über den Aufbau der Feldversuche. Detaillierte Beschreibungen zum Aufbau der Feldversuche sind im experimentellen Anhang aufgeführt. Analog den Säulenversuchen wurden jeweils ein Feldversuch mit homogenem Aufbau als Blindversuch (ohne Sperre) und mindestens ein Feldversuch mit Sperre durchgeführt. Um die zeitlichen Veränderungen erfassen zu können, wurden während der gesamten Versuchszeit zu drei verschiedenen Zeitpunkten Feststoffproben genommen.

Tab. 7: Übersicht über die Feldversuche (FV)

Lysi-meter	Versuch	Sperre	Einbau Salzschicht	Bewässerung	Dauer in Wochen	Eingegebene Masse in kg	Zugegebene Wassermenge in L/m ²	L/S [#] in L/kg
I	WA1	keine	RGR	Niederschlag	103	8.800	2.273	0,6
	WA2	SFK	RGR			8.800	2.273	0,6
II	RA1	keine	keine	Modellsicker-wasser*	130	14.200	294	0,3
	RA2	SFK	keine			14.200	294	0,3
Feldver such	Versuch	Sperre	Einbau Salzschicht	Bewässerung	Dauer in Wochen	Eingegebene Masse in kg	Zugegebene Wassermenge in L	L/S [#] in L/kg
III	EB1	keine	keine	Niederschlag	102	35.200	1.350	0,6
	EB2	SFK	keine			37.300	1.350	0,6
	EB3		keine	Sickerwasser [◊]		46.500	1.610	0,6
	EB4		keine	UO-Konzentrat [◊]		40.500	1.610	0,7

*: Modellsickerwasser für Lysimeter Raindorf; Zusammensetzung vgl. Tab. T-1, tabellarischer Anhang ;

◊: Sickerwasser und Umkehrsmose(UO)-Konzentrat der Deponie Eberstetten; Zusammensetzung vgl. Tab. T-2, tabellarischer Anhang ; WA: Waldering, RA: Raindorf, EB: Eberstetten, SFK: Schlacke-Feinkorn

: L/S; Verhältnis Gesamtflüssigkeitsmenge (Wassergehalt zu Beginn plus zugegebenes Wasser, L) zu Feststoffgehalt (S) bei Versuchsende

Testfelder Eberstetten (Schlacke A)

Auf der Deponie Eberstetten wurden vier Testfelder mit Schlacke A (im Anhang als Schlacke EB bezeichnet) errichtet. Das freistehende Testfeld EB1 diente als Blindversuch ohne Sperrsicht. Um eine möglichst große Deckfläche für die einzelnen Testfelder erzielen zu können, wurden drei dieser Testfelder miteinander verbunden. Die Testfelder EB2 bis EB4 verfügten über eine Sperrsicht, bestehend aus verdichtetem Schlacke-Feinkorn (SFK).

Die Felder waren der natürlichen Witterung (Niederschlagswasser) ausgesetzt. Zusätzlich wurde nach 170 Versuchstagen das Testfeld EB3 mit Deponiesickerwasser und das Testfeld EB4 mit konzentrierter Lösung aus der Umkehrsmose bewässert. Die Menge betrug jeweils 50 Liter pro Woche.

Ab Anfang Juni 2005 wurde das anfallende Sickerwasser der jeweiligen Testfelder in einem PE-Gefäß (50 Liter Fassungsvolumen) gesammelt und wöchentlich abgemessen. Diese Werte dienen als Grundlage für die Abschätzung des Wasserhaushalts und somit sind die Ergebnisse aus der Frachtenberechnung als Richtwerte zu sehen. Der Untersuchungszeitraum betrug 25½ Monate.

Großlysimeter Raindorf (Schlacke A)

Auf der Sonderabfalldeponie Raindorf wurden zwei Großlysimeter (RA1 und RA2) mit Schlacke A (im Anhang als Schlacke RA bezeichnet) errichtet. Für die Großlysimeter wurden Kunststoffringe verwendet. Mittels Kunststoffdeckel konnten die Großlysimeter verschlossen und damit der Zutritt von Regenwasser unterbunden werden.

Während der Versuchsdurchführung wurden die Bewässerungsmengen verändert. Zu Beginn der Versuche wurde mit 50 Litern pro Woche Leitungswasser bewässert, um eine gemeinsame Ausgangsbasis zu schaffen. Nach 160 Versuchstagen wurden die Großlysimeter ausschließlich mit Modellsickerwasser bewässert. Die Bewässerungsmenge wurde auf 10 Liter pro Woche reduziert, um das Material gleichmäßig zu durchfeuchten. Nach 290 Versuchstagen wurde der Bewässerungsmodus erneut umgestellt. Im doppelten Zeitraum wurden nun die doppelten Salzbeträge aufgegeben (20 Liter/2 Wochen), um je Zugabe mehr Wassermenge zur Verfügung zu haben. Die Gesamlaufzeit bis zur dritten Bohrkampagne betrug 719 Tage. Danach wurde das Sickerwasser weiterhin alle 14 Tage beprobt. Nach 830 Tagen wurde die Bewässerungsart von Modellsickerwasser auf Leitungswasser umgestellt. Hiermit sollte untersucht werden, inwiefern sich das Fehlen von Salzen auf die weitere Feststoff- und Sickerwasserentwicklung auswirkt. Der Untersuchungszeitraum betrug 32½ Monate.

Großlysimeter Waldering (Schlacke B)

Die Monodeponie Waldering steht klimatisch für sehr regenreiche Verhältnisse (teils über 100 mm Niederschlag pro Monat). Hier wurden die Großlysimeter nur über natürlichen Niederschlag bewässert. Diese Versuchsanordnung repräsentierte den Fall verstärkter Auswaschung. Insgesamt wurden die Lysimeter Waldering ca. 26 Monate beprobt.

Die Großlysimeter bestanden aus Betonringen, die innen mit Styroporplatten ausgekleidet wurden. Die MV-Schlacke wurde in beide Lysimeter unverdichtet eingebaut und mittels Leitungswasser gleichmäßig durchfeuchtet. Parallel zum Blindversuch wurde in ein Lysimeter Schlacke-Feinkorn verdichtet als Sperrsicht eingebaut. Am Top der Großlysimeter wurden 20 cm Rauchgasreinigungsrückstände (RGR) aufgebracht, um konstante salzreiche Bedingungen zu schaffen. Um einen Richtwert für die durchschnittlichen Sickerwassermengen zu erhalten, wurden zu bestimmten Zeiten etwa dreimal pro Versuchsjahr die Sickerwasserraten in mL/h ermittelt.

3.4 PROBENNAHME

3.4.1 Feststoffproben

Säulenversuche

Nach Beendigung der Versuche wurden die Säulen waagrecht gelegt und die beiden Hälften mit Hilfe einer Metallplatte getrennt. Die Blindversuche wurde in acht gleich große Proben je 10 cm aufgeteilt (Abb. C-2, experimenteller Anhang). Das Material der Säulen mit Sperre wurde in zehn Proben aufgeteilt. Der Bereich ober- und unterhalb der Sperrsicht wurde jeweils in geringeren Abständen entnommen. Jeweils die Hälfte der mit x gekennzeichneten Abschnitte des Probenmaterials wurde im Trockenschrank bei 40°C getrocknet und mit einer WIDIA Schwingscheibenmühle gemahlen. Diese Proben wurden detaillierter analysiert: die

Feststoffgehalte mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzanalyse und die Eluate mit ICP-OES und Ionenchromatographie. Zudem wurden für die Eluate auch der pH-Wert und die Leitfähigkeit gemessen.

Feldversuche

Insgesamt wurden drei Bohrungen im Zeitraum von April 2005 bis November 2006 durchgeführt. Die Tabellen T-7 und T-8 im tabellarischen Anhang zeigen den Zeitpunkt der Probennahme und zudem das gewählte Bohrverfahren für die Feldversuche. Je Testfeld bzw. Lysimeter wurden vier bis fünf Proben gezogen und analysiert. Eine Übersicht über die gewonnenen Bohrkernproben mit der jeweiligen Tiefenangabe zeigt die Tabelle T-9 im tabellarischen Anhang.

Die erste Bohrkampagne (BKI), nach etwa fünf Monaten im April und Mai 2005, diente als Referenz, um den chemischen Aufbau der Versuchsfelder in einem frühen Zustand nach dem Aufbau ermitteln zu können. Die Probennahme erfolgte mittels Handbohrer (Abb. C-3 bis C-5, graphischer Anhang) mit einem Durchmesser von 10 cm (max. Tiefe 1,7 m). Je Großlysimeter in Raindorf und Waldering wurde eine Bohrung abgeteuft. In Eberstetten waren alle vier Testfelder zum Zeitpunkt der ersten Bohrungen noch denselben Bewässerungsbedingungen (natürlicher Niederschlag) ausgesetzt. Aus diesem Grund wurden nur das Testfeld EB1 (ohne Sperre) und als ein Beispiel für Testfelder mit Sperre das Testfeld EB 2 beprobt. Erst nach sechs Monaten (Juni 2005) wurde mit der Zugabe von salzreichen Lösungen für die Testfelder EB3 und EB4 begonnen.

Die zweite Bohrkampagne (BKII) erfolgte nach etwa 11 Monaten (September, Oktober bzw. November 2005). Bei der ersten Bohrkampagne zeigte sich für die Testfelder Eberstetten, dass eine Probennahme mittels Handbohrer nicht möglich ist. Die Probennahme während der zweiten Bohrkampagne erfolgte daher mit Hilfe eines motorbetriebenen Rammkernbohrgerätes mit einem Bohrdurchmesser von 10 cm und einer Kernlänge von ca. 80 cm (Abb. C-6 und C-7, graphischer Anhang). Die genaue Angabe der Bohrprobentiefe (max. 1,65 m) ist jedoch nicht möglich, da durch die Auflast des Bohrgerätes die Schlackeproben stark verdichtet wurden (Abb. C-7, graphischer Anhang).

Während der dritten Bohrkampagne (BKIII) nach etwa 23 Monaten (Oktober, November 2006) wurden die Großlysimeter Waldering und Raindorf mittels Handbohrer beprobt. Im Rahmen der Rückbaumaßnahmen der vier Testfelder Eberstetten wurden die Testfelder mittels Schurf beprobt. Das dabei entstandene Profil konnte exakt ausgemessen und die Probennahmetiefen genau bestimmt werden (Abb. C-10 und C-11, graphischer Anhang).

3.4.2 Sickerwasserproben

In den ersten 100 Tagen wurde von den Feldversuchen und den Laborversuchen der Versuchsreihe A und C jede Woche eine Sickerwasserprobe genommen. Nach 100 Tagen

wurde bei den Feldversuchen nur noch alle 14 Tage eine Probennahme durchgeführt. Bei den Säulenversuchen wurde in der Folgezeit etwa jede fünfte bis siebte Sickerwasserprobe analysiert. Diese Vorgehensweise galt für die Versuchsanordnung B schon zu Versuchsbeginn.

3.5 FRACHTENBERECHNUNG

Die Abbildung 4 zeigt den rechnerischen Ablauf für die durchgeföhrten Frachtenberechnungen.

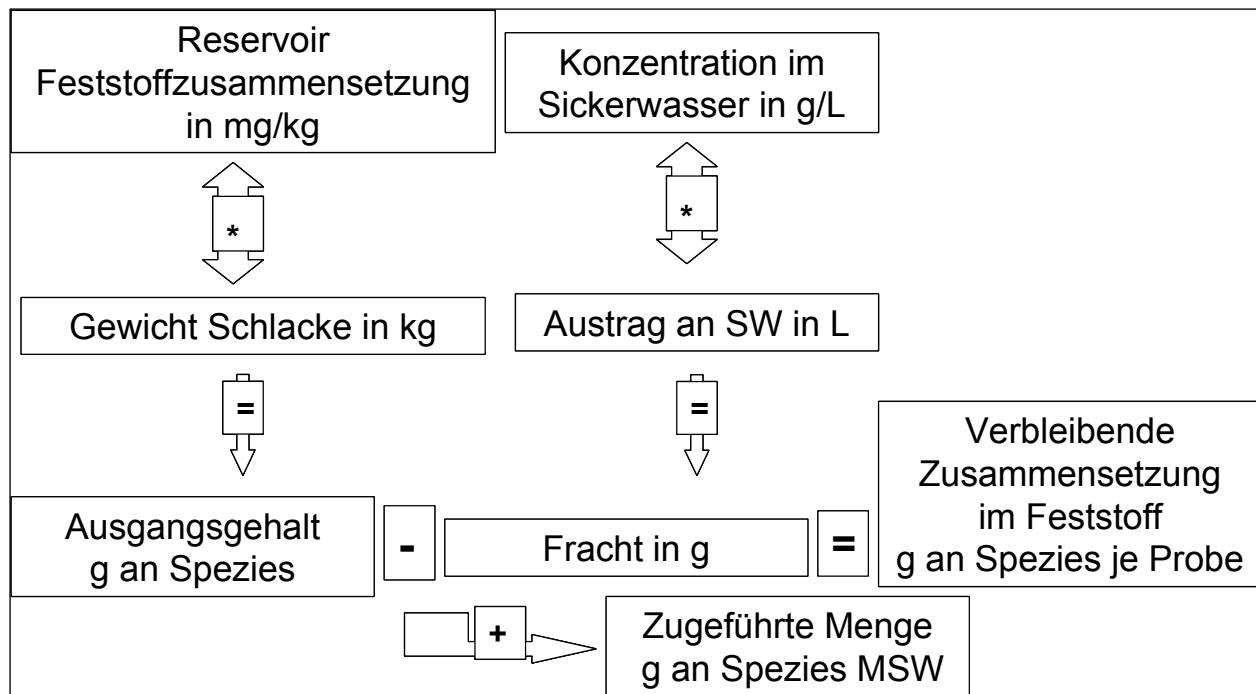


Abb.4: Rechnerischer Ablauf zu Erstellung der Frachtenberechnungen je Spezies

Basis ist zum einen die chemische Analyse der Ausgangsmaterialien mittels RFA (Schlacke, SFK, RGR). Die jeweilige Spezies im Feststoff (Reservoir der Feststoffzusammensetzung in mg/kg) wird mit dem Gewicht an eingebautem Material (in kg) multipliziert. Das Resultat ist der Ausgangsgehalt der jeweiligen Spezies, umgerechnet in g je Säule.

Zum anderen wird die Konzentration je Spezies im auslaufenden Sickerwasser in g/L benötigt. Die Konzentration je Spezies wird mit der Sickerwassermenge, gemessen in Liter, multipliziert. Das Ergebnis ist die ausgetragene Fracht in g.

Die Differenz zwischen den Ausgangsgehalten der jeweiligen Spezies (bzw. im weiteren Rechenablauf des errechneten Differenzwertes) und der ausgetragenen Fracht in g ergibt die verbleibende Zusammensetzung im Feststoff der jeweiligen Spezies in g je Probe.

Bei den Versuchen mit Zugabe von Modellsickerwasser wurde jeweils die Menge an zugeführten Spezies in g zur Gesamtmenge der jeweiligen Spezies in der Säule addiert.

Um die einzelnen Versuche miteinander vergleichbar zu machen, wurde der prozentuale Austrag an Spezies je Probe über den gesamten Versuchszeitraum errechnet. Bezogen auf den gesamten Versuchszeitraum errechnet sich der prozentuale Austrag je Spezies als Summe der Fracht in g geteilt durch den Ausgangsgehalt in g multipliziert mit 100. Bei den Versuchen, die mit Modellsickerwasser bewässert wurden, wurde auch der Anteil an Spezies berücksichtigt, der über das MSW zugeführt wurde. Die Summe der Fracht in g wurde von der Summe der über das MSW zugeführten Spezies abgezogen. Der Differenzbetrag wurde dann durch den Ausgangsgehalt an Spezies geteilt. Ein negatives Vorzeichen besagt, dass prozentual insgesamt mehr Spezies aus der Säule ausgetragen wurde als innerhalb der Säule zurückgehalten wurde (Abreicherung). Ein positives Vorzeichen jedoch weist darauf hin, dass prozentuale innerhalb der Säule mehr an bestimmten Spezies zurückgehalten (Anreicherung) als ausgetragen wurden.

4. ERGEBNISSE

4.1 AUSGANGSMATERIAL

4.1.1 Schlacke, frisch und gealtert

Die unterschiedliche Behandlung von Schlacke A (MVA Ingolstadt) und Schlacke B (MHKW Rosenheim) spiegelt sich in den chemischen Analysen wider (vgl. Kapitel 3.1.). Es wurde jeweils eine repräsentative Probe des Ausgangsmaterials der einzelnen Versuche als Bezugsgröße analysiert. Die Ergebnisse der Feststoffanalytik mittels RFA und Eluatanalytik für MV-Schlacken, SFK und RGR sind in den Tabellen T-10 und T-11 im tabellarischen Anhang dargestellt.

Feststoff

Folgende nennenswerte Unterschiede liegen vor (Tab. 8): Schlacke A weist höhere Gehalte an K₂O, Na₂O und Cl auf als Schlacke B, was auf den höheren Anteil leichtlöslicher Salze in der „frischen“ Schlacke A zurückzuführen ist. Erhöhte K₂O-Gehalte in Schlacke A können auch auf Holzascheanteile zurückzuführen sein. Die Gehalte an MgO, Fe₂O₃, SO₃, Ni und Zn sind in der Schlacke A niedriger als in der Schlacke B, der Gehalt an SiO₂ hingegen ist höher. Die Gehalte der übrigen Spezies weichen nicht signifikant voneinander ab.

Tab. 8: Feststoffgehalte der Schlacke frisch und gealtert, sowie SFK und RGR (Angabe der Mittelwerte und Standardabweichungen)

	Schlacke A frisch deponiert	Schlacke B im Winter gelagert	Schlacke B im Sommer gelagert	SFK aus Schlacke B im Sommer gelagert	RGR
SiO ₂ (%)	29,2 ± 2,2	26,7 ± 2,9	27,9	24,3 ± 1,4	4,8 ± 1,0
Al ₂ O ₃ (%)	8,5 ± 0,8	8,7 ± 0,6	8,4	9,1 ± 0,8	2,8 ± 0,5
MgO (%)	2,6 ± 0,2	3,0 ± 0,1	3,1	3,3 ± 0,3	0,7 ± 0,2
CaO (%)	19,1 ± 1,2	21,1 ± 1,8	19,9	22,9 ± 1,4	44,5 ± 7,6
Na ₂ O (%)	1,8 ± 0,2	1,5 ± 0,3	1,7	1,2 ± 0,1	1,9 ± 0,3
K ₂ O (%)	1,3 ± 0,0	0,9 ± 0,0	0,8	0,8 ± 0,0	2,2 ± 1,8
Fe ₂ O ₃ (%)	12,0 ± 0,9	15,4 ± 1,6	16,3	14,6 ± 0,2	1,0 ± 0,4
SO ₃ (%)	1,8 ± 0,0	2,3 ± 0,3	2,1	2,7 ± 0,3	2,9 ± 0,0
Ba (ppm)	3.691 ± 25	3.280 ± 424	3.615	4.054 ± 40	484 ± 63
Cl (ppm)	9.769 ± 535	6.425 ± 773	5.623	6.163 ± 1.069	109.238 ± 7.148
Cr (ppm)	1.067 ± 176	1.148 ± 114	1.046	1.267 ± 43	489 ± 182
Cu (ppm)	5.178 ± 242	6.250 ± 1.175	4.214	5.989 ± 907	806 ± 128
Ni (ppm)	230 ± 3	338 ± 55	288	328 ± 7	57 ± 5
Pb (ppm)	1.702 ± 246	2.740 ± 1.144	1.622	2.044 ± 266	2.468 ± 190
Sn (ppm)	208 ± 25	286 ± 105	370	209 ± 7	398 ± 4
Sr (ppm)	584 ± 0	706 ± 44	508	538 ± 0	320 ± 0
W (ppm)	126 ± 14	126 ± 19	109	146 ± 21	64 ± 29
Zn ((ppm))	6.331 ± 378	10.131 ± 994	8.038	10.340 ± 663	8.294 ± 806

Für die Säulenversuche der VA-B und für die Lysimeter Waldering wurde gealterte Schlacke B eingebaut, einmal im Winter (VA-B) und einmal im Sommer (LY-WA) zwischengelagert. Bei

den Feststoffanalysen lassen sich sowohl bezüglich der unterschiedlichen Lagerung als auch der verschiedenen Kornfraktionen der Schlacke B (Schlacke und SFK) keine markanten Unterschiede erkennen.

Eluat

Die alkalischen pH-Werte im Eluat der Schlacke A reichen bis max. 12,4 und für Schlacke B bis max. 11,2 (Tab. 9). Die Leitfähigkeit zeigt, dass im Eluat der Schlacke A deutlich mehr leichtlösliche Salze gelöst werden (max. 4,2 mS/cm). Die Eluat-Konzentrationen der Schlacke A liegen für Cl bei 366 mg/L, für Na bei 224 mg/L und für K bei 122 mg/L. Höhere Konzentrationen im Eluat für Schlacke A wurden auch für den Parameter Al festgestellt. Das Eluat der Schlacke B ist im Vergleich salzärmer mit Konzentrationen für Cl von max. 279 mg/L, für Na von max. 163 mg/L und für K von max. 67 mg/L. Die Faktoren SO₄, Mg und Si waren im Eluat der Schlacke A hingegen in geringeren Konzentrationen enthalten. Weiterhin unterscheiden sich die Materialien z.T. auch markant in den Schwermetallkonzentrationen, z.B. in den Cu-, Mo-, Pb- und Zn-Konzentrationen, die jeweils im Eluat der Schlacke A erhöht sind.

Tab. 9: Eluatparameter der Schlacke frisch und gealtert, sowie SFK und RGR (Angabe der Mittelwerte und Standardabweichungen)

Parameter	Einheit	Schlacke A frisch deponiert	Schlacke B im Winter gelagert*	Schlacke B im Sommer gelagert	SFK aus Schlacke B im Sommer gelagert	RGR
pH-Wert	-	11,6 ± 0,8	10,6	11,0 ± 0,2	9,7 ± 2,3	12,2
Lf	mS/cm	3,27 ± 0,86	1,79	1,50 ± 0,22	2,08 ± 0,36	29,6
Cl	mg/L	366 ± 123	279	203 ± 43	318 ± 42	8.000
SO ₄	mg/L	104 ± 138	535	322 ± 58	425 ± 123	967
Al	mg/L	17,8 ± 16,4	1,4	3,3 ± 2,3	0,5 ± 0,4	< 0,007
Ca	mg/L	207 ± 43	218	162 ± 23	168 ± 49	4.380
K	mg/L	122 ± 19	67	46 ± 9	73 ± 19	1.140
Mg	mg/L	0,01 ± 0,01	0,28	0,09 ± 0,06	0,55 ± 0,78	0,01
Na	mg/L	224 ± 61	163	126 ± 29	224 ± 20	1330
Cr	mg/L	0,03 ± 0,03	0,03	0,02 ± 0,01	0,11 ± 0,01	0,033
Cu	mg/L	0,463 ± 0,182	0,020	0,019 ± 0,004	0,038 ± 0,012	0,004
Mo	mg/L	0,14 ± 0,05	0,09	0,05 ± 0,01	0,12 ± 0,01	0,09
Ni	mg/L	0,004 ± 0,001	0,005	0,003 ± 0,001	< 0,001	< 0,001
Pb	mg/L	0,139 ± 0,087	< 0,008	0,011 ± 0,001	0,011 ± 0,010	7,26
Si	mg/L	1,14 ± 0,86	4,62	3,55 ± 1,19	6,50 ± 1,33	0,01
V	mg/L	0,004 ± 0,002	0,007	0,005 ± 0,001	0,008 ± 0,004	0,001
Zn	mg/L	0,165 ± 0,096	0,073	0,008 ± 0,005	0,032 ± 0,035	0,85

*: Für die Schlacke B (im Winter gelagert) wurde nur eine Eluatmessung durchgeführt, daher erfolgt keine Angabe der Schwankungsbreite

Bezüglich der Schlacke B lassen sich etwas höhere Konzentrationen der leichtlöslichen Salze (Na, K und Cl) sowie von SO₄, Ca und Mg im Eluat der im Winter zwischengelagerten Schlacke feststellen. Das SFK (Fraktion 0-4 mm) weist im Vergleich zur Fraktion

4-32 mm (Schlacke B) höhere Eluatkonzentrationen an leichtlöslichen Salzen auf. Die Eluatkonzentrationen für Cr, Cu, Mo und Si liegen ebenfalls höher im Eluat der SFK.

Wassergehalt und Glühverlust

Die Wassergehalte (ermittelt bei 30°C bzw. 105°C) und Glühverluste (ermittelt bei 550°C bzw. 1050°C) der Ausgangsmaterialien sind in der Tab. 10 bzw. detailliert in Tabelle T-12 im tabellarischen Anhang dargestellt. Die Wassergehalte liegen für die Schlacke A zwischen 13,8 und 16,5 Gew.-%, wobei zwischen 30°C und 105°C in erster Linie Feinporenwasser und Kristallwasser, z.B. aus Gips, abgegeben wird und der Unterschied beider Messungen bei lediglich knapp 3 Gew.-% liegt. Die Glühverluste zwischen 550°C und 1050°C unterscheiden sich um knapp 2 Gew.-%. TOC-Gehalte in der Schlacke A um 1 Gew.-% lassen jedoch nicht auf höhere Anteile organischer Stoffe schließen. Für Schlacke B weisen die Winterproben erhöhte Wassergehalte und Glühverluste auf, aber im Sommer sind diese witterungsbedingt deutlich geringer. Für das SFK liegen die Werte für die Wassergehalte und Glühverluste etwas höher als für die Gesamtfraktion (Sommerwerte). RGR weist von allen untersuchten Materialien die höchsten Wassergehalte und Glühverluste auf, was den hohen Anteil an Hydroxidphasen widerspiegelt.

Tab. 10: Wassergehalts- und Glühverlustbestimmung von Schlacke frisch und gealtert, sowie SFK und RGR (Angabe der Mittelwerte und Standardabweichungen)

	Einheit	Schlacke A frisch deponiert	Schlacke B im Winter gelagert	Schlacke B im Sommer gelagert	SFK aus Schlacke B im Sommer gelagert	RGR
bei 30 °C	Gew.-%	13,81 ± 2,21	13,33	7,00 ± 0,78	8,50 ± 0,81	11,00 ± 7,90
bei 105 °C	Gew.-%	16,54 ± 1,82	20,23	10,06 ± 0,79	13,35 ± 1,36	26,50 ± 4,35
bei 550 °C	Gew.-%	19,14 ± 2,21	n.b.	12,87 ± 0,74	16,62 ± 2,50	47,54
bei 1050 °C*	Gew.-%	20,76 ± 2,69	23,31	14,94 ± 1,97	20,55 ± 4,63	53,16 ± 8,59

*: der Glühverlust wurde bei 1050° C ermittelt und bezieht sich auf die Originalsubstanz, d.h. Gv – Wg entspricht der Definition des Parameters Glühverlust in der AbfAbIV

4.1.2 Rauchgasreinigungsrückstände (RGR)

Die RGR zeigen im Feststoff deutlich höhere Gehalte an CaO ($44,5 \pm 7,6$ %) und Cl (109.238 ± 7.148 ppm), sowie erhöhte Gehalte an K₂O ($2,2 \pm 1,8$ %), SO₃ ($2,9 \pm 0,0$ %) und Sn (398 ± 4 ppm). Die Gehalte an SiO₂, Al₂O₃ und MgO sind niedriger im Vergleich zu den Schlacken A und B (Tab. 8). Die Schwermetalle Cr und Cu weisen im Vergleich zu den Schlacken A und B deutlich niedrigere Gehalte auf und Pb sowie Zn vergleichbare Werte. Der pH-Wert im Eluat der RGR ist mit 12,2 stark alkalisch. Die hohe Leitfähigkeit von 29,6 mS/cm spiegelt erhöhte Konzentrationen leichtlöslicher Salzphasen (Cl, K, Na) wider. Auch die Konzentrationen an Ca und SO₄ sind höher als im Eluat der beiden MV-Schlacken. Bezuglich der Schwermetalle fallen hohe Werte für Pb (7,3 mg/L) und Zn (0,9 mg/L) im Eluat auf. Die RGR bieten aufgrund ihrer hohen Salz- sowie Blei- und Zinkkonzentrationen die Möglichkeit, eine kontinuierliche Zugabe salzreicher Lösungen zu gewährleisten.

4.1.3 Vergleich mit nationalen/internationalen MV-Schlackeproben

Feststoffanalytik

Die Tabelle 11 zeigt eine Aufstellung von Feststoffzusammensetzungen verschiedener MV-Schlacken. Die Angaben für Schlacke B entsprechen dem Mittelwert aus den im Winter und im Sommer abgelagerten Schlacken. Die Schlacken A und B weisen im internationalen Vergleich z.T. deutlich geringere Gehalte an SiO₂ und höhere Gehalte an Cl auf. Speiser (2001) hat ebenfalls Schlacke der MVA-Ingolstadt untersucht und SiO₂-Gehalte von 42,3 Gew.-% bestimmt. Im Vergleich dazu fallen die niedrigen SiO₂-Gehalte der untersuchten Schlacken A und B mit max. 29,2 Gew.-% auf. In der Gegenüberstellung mit Geomaterialien (Lithosphäre und Boden) sind die Oxidgehalte überwiegend vergleichbar. Bezogen auf die Schwermetalle (v.a. Cr, Cu, Pb und Zn) weisen die Schlacken A und B oftmals erhöhte Gehalte im Vergleich zu den in Tabelle 11 angegebenen Literaturdaten auf. Die in den Spalten 1 bis 11 aufgeführten Feststoffgehalte beziehen sich auf folgende Quellen:

- 1 Speiser, C. (2001), frische Schlacke, MVA-Ingolstadt, gequencht
- 2 Magel, G. (2003), frische Schlackeproben, MHKW Rosenheim
- 2a Magel, G. (2003), alterierte Deponieproben, Monodeponie Waldering, Bohrung BA I (2000)
- 3 Förstner, U. & Hirschmann, G. (1997), MV-Schlacken deutschlandweit
- 4 Belevi, H. et al. (1992), MV-Schlacken aus Schweizer Müllverbrennungsanlagen
- 5, 6 Meima, J. A. & Comans, R. N. J. (1999), MV-Schlacke einer niederländischen MVA (5: 1,5 Jahre alt und 6: 12 Jahre alt, deponiert)
- 7, 8 Shim, J. S. et al. (2005): MV-Schlacken aus Korea (7) und Japan (8)
- 9 Chandler, J. et al. (1997), MV-Schlacken weltweit
- 10 Lindsay, W.L. (1979) Mittelwerte von Bodenproben
- 11 Lindsay, W.L. (1979) Lithosphärenzusammensetzung

Eluatanalytik

Tabelle 12 zeigt für die Schlacken A und B eine Übersicht der Eluatparameter im Vergleich mit Literaturdaten. Die Angaben für Schlacke B entsprechen wiederum dem Mittelwert aus den im Winter und im Sommer abgelagerten Schlacken. Leitfähigkeit und pH-Wert der untersuchten Schlacken A und B bewegen sich im Vergleich mit den Literaturdaten in einem mittleren Bereich. Die Cl- und SO₄-Konzentrationen im Eluat sind z.T. höher als internationale Schlacke-Proben. Dies gilt auch für die Parameter Ca und Na. Die Schwermetallkonzentrationen im Eluat bewegen sich im Vergleich mit den Literaturdaten ebenfalls in einem mittleren Bereich.

Tab. 11: Feststoffgehalte untersuchter Schlacken im Vergleich mit Literaturdaten (RFA Analysen)

Parameter	Einheit	Schlacke A	Schlacke B	1	2	2a	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Al₂O₃	Gew.-%	8,5 ± 0,8	8,8 ± 0,3	11,4	10,8	6,2 - 11,7	3,9 - 6,6	9,4 - 12,3	7,2	7,6	5,7 - 7,6	8,9 - 10,4	4,1 - 13,8	13,4	15,3
CaO	Gew.-%	19,1 ± 1,2	21,7 ± 1,6	18,7	19,2	13,7 - 21,1	6,6 - 12,2	14,0 - 15,4	10,1	14,7	25,2 - 29,4	22,4 - 35,0	0,1 - 17,2	1,9	5,0
Fe₂O₃	Gew.-%	12,0 ± 0,9	15,2 ± 1,0	14,8	15,2	11,0 - 18,5	4,8 - 7,3	7,9 - 15,7	12,4	5,5	2,1 - 4,3	1,7 - 3,9	0,6 - 21,4	5,4	7,3
K₂O	Gew.-%	1,3 ± 0,0	0,8 ± 0,0	0,9	0,8	0,5 - 2,2	0,3 - 0,8	1,6 - 1,8	1,1	1,5	1,8 - 2,3	1,4 - 2,5	0,1 - 1,9	1,0	3,1
MgO	Gew.-%	2,6 ± 0,2	3,1 ± 0,1	2,5	3,2	2,0 - 3,5	1,2 - 1,8	2,3 - 2,7	1,9	1,5	k.A.	k.A.	0,1 - 4,3	0,8	3,5
MnO	Gew.-%	0,2 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,2	0,2	0,1 - 0,2	0,1	k.A.	0,1	0,1	0,1	k.A.	0,3	0,1	0,1
Na₂O	Gew.-%	1,8 ± 0,2	1,4 ± 0,3	2,9	3,4	1,7 - 5,3	0,8 - 1,8	3,1 - 5,7	1,8	1,5	3,1 - 3,6	2,2 - 5,1	0,4 - 5,7	0,8	3,8
P₂O₅	Gew.-%	1,4 ± 0,2	0,9 ± 0,3	1,5	1,9	0,6 - 1,0	0,7	k.A.	0,8	k.A.	k.A.	k.A.	0,3 - 1,5	0,1	0,3
SiO₂	Gew.-%	29,2 ± 2,2	25,4 ± 2,1	42,3	34,6	28,9 - 44,6	43,5	47,1 - 55,6	49,7	65,1	k.A.	k.A.	19,5 - 65,9	68,5	59,0
SO₃	Gew.-%	1,8 ± 0,0	2,5 ± 0,3	2,9	2,0	0,5 - 2,4	1,2	k.A.	0,9	k.A.	k.A.	k.A.	0,2 - 1,2	0,2	0,1
TiO₂	Gew.-%	1,6 ± 0,0	1,7 ± 0,2	1,2	1,8	0,4 - 0,8	k.A.	0,7 - 1,0	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0,4 - 1,6	0,7	1,0
LOI	Gew.-%	2,6	2,8	k.A.	3,38	7,9 - 18,3	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Summe	Gew.-%	79,5	81,7	k.A.	94,4	89,8 - 99,5	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Ba	ppm	3691 ± 25	3697 ± 324	3970	5000	1200 - 2200	1494 - 2586	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	400 - 3000	430	430
Br	ppm	48 ± 8	37 ± 11	k.A.	15	56 - 440	5 - 24	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	1 - 150	5	3
Cl	ppm	9769 ± 535	6410 ± 935	1425	5600	10000 - 56400	2535 - 4197	1000 - 4000	1560	k.A.	k.A.	k.A.	800 - 4190	100	500
Cr	ppm	1067 ± 176	1160 ± 110	n.b.	1000	330 - 670	176 - 229	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	23 - 3170	100	200
Cu	ppm	5178 ± 242	5528 ± 1155	391	9800	1900 - 10100	2608 - 3678	1000 - 3000	2190	1700	2500 - 5300	890 - 3300	190 - 8240	30	70
Mo	ppm	18 ± 2	17 ± 3	k.A.	49	7 - 14	5 - 10	k.A.	24	120	k.A.	k.A.	3 - 276	2	2
Ni	ppm	230 ± 3	324 ± 34	139	330	65 - 290	172 - 202	k.A.	k.A.	k.A.	130 - 170	32 - 120	7 - 4280	40	100
Pb	ppm	1702 ± 246	2080 ± 477	988	2700	850 - 2000	924 - 2007	900 - 1400	1950	1400	750 - 1000	140 - 2700	98 - 13700	10	16
Sn	ppm	208 ± 25	297 ± 82	k.A.	k.A.	k.A.	264 - 384	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	2 - 380	10	40
Sr	ppm	584 ± 0	604 ± 136	k.A.	550	220 - 260	212 - 221	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	85 - 1000	200	150
V	ppm	79 ± 9	69 ± 4	k.A.	43	22 - 29	35 - 60	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	20 - 122	100	150
W	ppm	126 ± 14	129 ± 18	k.A.	70	32 - 630	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Zn	ppm	6331 ± 378	9978 ± 1786	3016	7000	1800 - 59800	3001 - 4232	1000 - 4000	3550	3700	3100 - 3800	1500 - 5000	613 - 7770	50	80

Tab. 12: Eluatparameter untersuchter Schlacken im Vergleich mit Literaturdaten

	Einheit	Schlacke A	Schlacke B	1	2	2a	3	4	5	6	7
pH-Wert	-	11,5 ± 0,8	10,4 ± 0,7	12,5	11,0 - 11,8	12,5	10,3 - 13,1	9,9 - 13,0	12,2	8,6 - 12,3	12,1
Lf	mS/cm	3,27 ± 0,86	1,79 ± 0,29	4,62	2,40 - 15,4	7,61	1,14 - 8,91	0,19 - 8,9	k.A.	k.A.	4,25
NH ₄ ⁺	mg/L	0,53 ± 0,19	0,16 ± 0,00	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Cl	mg/L	366 ± 123	267 ± 58	485	297 - 4993	208	57 - 175	60 - 463	206	34 - 250	310
SO ₄	mg/L	104 ± 138	427 ± 107	304	10 - 12,2	120	110 - 570	5 - 975	35	12 - 650	20
Al	mg/L	17,81 ± 16,36	1,76 ± 1,40	k.A.	k.A.	k.A.	0,06 - 40,00	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Ca	mg/L	207 ± 43	183 ± 31	565		k.A.	137 - 1100	58 - 4235	k.A.	k.A.	k.A.
K	mg/L	122 ± 19	62,0 ± 14,2	65,2		k.A.	8,6 - 48,1	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Mg	mg/L	0,01 ± 0,01	0,31 ± 0,23	k.A.		k.A.	0,02 - 0,09	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Na	mg/L	224 ± 61	171 ± 49	k.A.		k.A.	39 - 119	0,6 - 277	k.A.	k.A.	k.A.
Cr	mg/L	0,031 ± 0,025	0,052 ± 0,052	k.A.	0,003 - 0,006	0,023	0,020 - 0,110	0,001 - 0,10	k.A.	k.A.	0,200
Cu	mg/L	0,46 ± 0,18	0,03 ± 0,01	1,06	0,01 - 0,13	0,89	0,01 - 0,46	0,01 - 2,4	0,70	0,03 - 0,30	0,12
Mo	mg/L	0,142 ± 0,050	0,089 ± 0,035	k.A.		k.A.		k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Ni	mg/L	0,004 ± 0,001	0,004 ± 0,002	k.A.	0,006 - 0,014	0,016	0,010 - 0,030	k.A.	0,047	k.A.	k.A.
Pb	mg/L	0,14 ± 0,09	< 0,008 ± 0,01	0,72	0,003 - 0,095	18,3	0,01 - 2,70	0,04 - 69	4,00	0,02 - 0,20	0,07
Si	mg/L	1,14 ± 0,86	4,89 ± 1,49	k.A.	0,6 - 1,3	0,52	0,18	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
V	mg/L	0,004 ± 0,002	0,007 ± 0,001	k.A.		k.A.		k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Zn	mg/L	0,17 ± 0,10	0,04 ± 0,03	0,73	0,007 - 0,051	1,7	0,02 - 0,49	0,02 - 1,00	0,33	0,07 - 0,20	0,07
TIC	mg/L	4,60 ± 2,34	7,56	k.A.		k.A.		k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
DOC	mg/L	33,70 ± 8,19	11,58	k.A.		k.A.	5,8 - 19,0	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

1 Speiser, C. (2001), frische Schlacke, MVA-Ingolstadt, gequencht

2 Magel, G. (2003), frische Schlackeproben, MHKW Rosenheim

2a Magel, G. (2003), alterierte Deponieproben, Monodeponie Waldering, Bohrung BA I (2000)

3 Förstner, U. & Hirschmann, G. (1997), MV-Schlacken deutschlandweit

4 Knorr, W. et al. (1999)

5 Stegemann, J. A. et al. (1995)

6 Schneider, J. et al. (1992)

7 Burg, H. (1997), MV-Schlacke der Abfallverwertungsanlage Augsburg

4.2 WIRKUNG EINER SPERRSCHICHT

4.2.1 Blindversuch im Vergleich zu Versuch mit Sperre

4.2.1.1 Referenzversuche der Versuchsanordnung A

Die Langzeitversuche IBV0 (ohne Sperrsicht) und ISFK0 (mit Sperrsicht) der VA-A wurden während der gesamten Versuchsdauer von 103 Wochen ausschließlich mit Leitungswasser der Stadt München (LW) bewässert. Sie dienen für die nachfolgenden Ergebnisse als grundlegende „Referenzversuche“ für die Simulation von Niederschlagszutritt (salzarme Lösung). Im Vordergrund steht die Erarbeitung der physikalischen Wirkungsweise einer Sperrsicht auf die Feststoff- und Sickerwasserentwicklung. Im Folgenden sind Wassergehalt, Glühverlust und ausgewählte Eluatparameter zu Versuchsbeginn (Ausgangsmaterial) und zu Versuchsende, die Konzentrationsverläufe im Sickerwasser und der summarische Frachtnaustausch bis zum Versuchsende kurz dargestellt.

Wassergehalt und Glühverlust

Im Vergleich zum Ausgangsmaterial (18,0 bzw. 22,8 Gew.-%) weisen die einzelnen Feststoffproben entlang des Profils höhere Wassergehalte bzw. Glühverluste auf. Tabelle 13 und die Abbildung 5 veranschaulichen, dass im oberen Bereich ähnliche Werte für Wassergehalt (um 19,6 Gew.-%) und Glühverlust (um 25,4 Gew.-%) festgestellt wurden. Im unteren Bereich der Säule differenziert sich das Verteilungsmuster für den Blindversuch und den Versuch mit Sperre. Für den Blindversuch liegen die Werte für den Wassergehalt mit $21,0 \pm 0,1$ Gew.-% etwas höher als für den Versuch mit Sperre ($19,7 \pm 1,1$ Gew.-%), ebenso für den Glühverlust mit $26,8 \pm 0,6$ Gew.-% im Vergleich zu $24,9 \pm 1,3$ Gew.-%. Es ist gut zu erkennen, dass die Sperrsicht, 6f im Säulenprofil, eine aufstauende Wirkung besitzt, da hier der höchste Wert für Wassergehalt bzw. Glühverlust gemessen wurde (23,5 bzw. 29,3 Gew.-%). Unmittelbar unterhalb der Sperrsicht (Probe 7f) liegt ein vglw. trockenes Milieu vor (min. 18,0 bzw. 22,9 Gew.-%).

Tab. 13: Verteilung des Wassergehalts und Glühverlusts entlang des Säulenprofils, Säule ohne Sperre (IBV0) und mit Sperre (ISFK0), Bewässerung mit Leitungswasser, für die Proben ober- bzw. unterhalb der Sperrsicht wurde jeweils ein Mittelwert gebildet

Versuchsbezeichnung	IBV0	ISFK0	IBV0	ISFK0
Aufbau	ohne Sperre	mit Sperre	ohne Sperre	mit Sperre
Parameter	<i>Wassergehalt</i> Gew.-%		<i>Glühverlust*</i> Gew.-%	
Ausgangsmaterial	18,0		22,8	
oberhalb der Sperre	$19,5 \pm 1,0$	$19,6 \pm 0,4$	$25,2 \pm 1,4$	$25,4 \pm 1,0$
innerhalb der Sperre	-	23,5	-	29,3
unterhalb der Sperre	$21,0 \pm 0,1$	$19,7 \pm 1,1$	$26,8 \pm 0,6$	$24,9 \pm 1,3$

* der Glühverlust wurde bei 1050°C ermittelt und bezieht sich auf die Originalsubstanz, d.h. Gv – Wg entspricht der Definition des Parameters Glühverlust in der AbfAbIV (2001)

Eluate

pH-Wert

Gegenüber dem Eluat des Ausgangsmaterials nimmt der pH-Wert der durchströmten Schlackeproben geringfügig ab. Für beide Säulenversuche zeigen sich im Eluat der Feststoffproben ähnliche pH-Werte um 11,4 (Abb. 6).

Leitfähigkeit und leichtlösliche Spezies (Cl, Na)

Die Leitfähigkeit im Eluat (Abb. 7) ist zu Versuchsende mit ca. 1,0 mS/cm deutlich geringer als für das Ausgangsmaterial (~4,2 mS/cm). Für die Parameter Cl und Na (beide Abb. 8) ist ebenfalls eine Konzentrationsabnahme im Vergleich zum Eluat aus dem Ausgangsmaterial zu sehen.

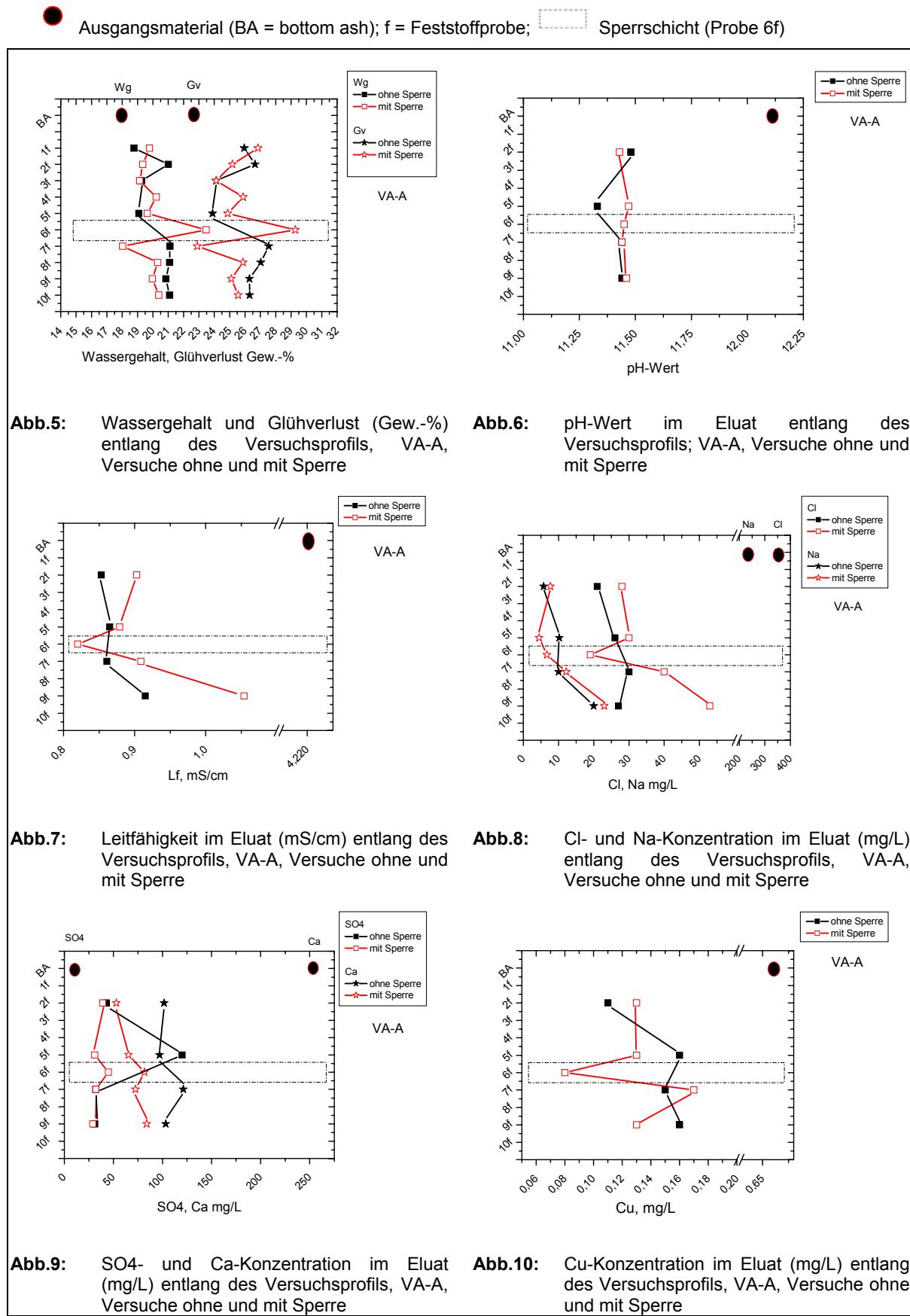
Die Leitfähigkeiten im Eluat der Proben der Versuchsanordnung mit Sperre, mit Ausnahme der Probe aus der Sperrsicht (0,82 mS/cm), sind geringfügig höher (0,88 – 1,05 mS/cm) im Vergleich zum Versuch ohne Sperre (0,85 – 0,91 mS/cm). Auffällig ist für den Versuch mit Sperre, dass zur Basis hin die Leitfähigkeit stärker zunimmt. Dieselbe Entwicklung kann für die Parameter Cl und Na beschrieben werden. Eine Konzentrationserhöhung um etwa 20 mg/L an Na oder an Cl bewirkt eine Erhöhung in der Leitfähigkeit um 0,05 mS/cm. Für den Parameter Cl wurden in den Eluatproben der Säule mit Sperre höhere Konzentrationen (max. 53 mg/L) im Vergleich zum Blindversuch (max. 30 mg/L) festgestellt. Für den Parameter Na ist es bemerkenswert, dass unmittelbar oberhalb und innerhalb der Sperrsicht insgesamt die niedrigsten Konzentrationen (min. 4,5 mg/L) gemessen wurden.

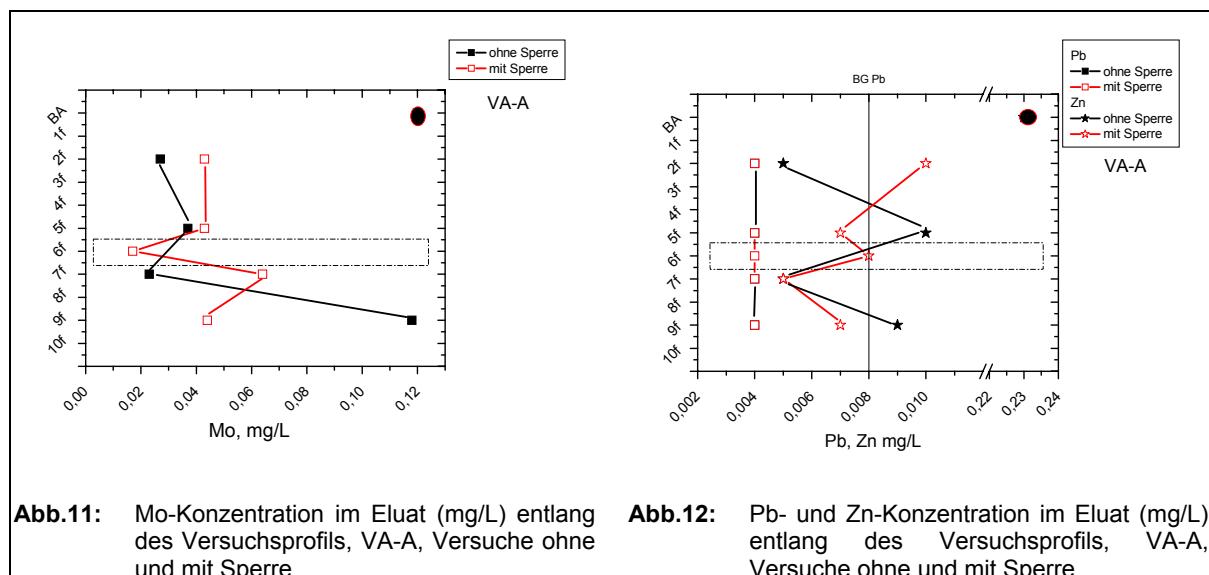
Weitere Parameter

Für Ca zeigt sich eine Konzentrationsabnahme im Vergleich zum Ausgangsmaterial (253 mg/L) und für den Parameter SO₄ konnten generell höhere Konzentrationen (überwiegend 35 mg/L) im Vergleich zum Ausgangsmaterial (10 mg/L) festgestellt werden (beide Abb. 9). Ca zeigt für den Versuch mit Sperre generell niedrigere Konzentrationen (53 – 84 mg/L). Bezuglich SO₄ sind zwischen den beiden Säulen bis auf einen Ausreißer (Probe 2f Blindversuch, 120 mg/L) keine Unterschiede festzustellen. Für beide Faktoren wurde entlang des Säulenprofils innerhalb der Sperrsicht ein geringfügig höherer Wert (für Ca 82 mg/L, für SO₄ 45 mg/L) gemessen.

Schwermetalle sind im Vergleich zum Ausgangsmaterial mit deutlich geringeren Eluatkonzentrationen nachweisbar. Die Konzentrationen liegen für Cu (Abb. 10) unter 0,2 mg/L, für Mo (Abb. 11) überwiegend unter 0,07 mg/L, sowie für Zn (Abb. 12) unter 0,01 mg/L. Entlang des Säulenprofils wurden für die Parameter Cu und Mo innerhalb der Sperrsicht die geringsten (für Cu 0,08 und für Mo 0,02 mg/L) und unmittelbar unterhalb der Sperrsicht die höchsten Konzentrationen (für Cu 0,17 und für Mo 0,06 mg/L) gemessen. Die Pb-

Eluatkonzentrationen (Abb. 12) liegen für alle Feststoffproben unterhalb der Bestimmungsgrenze ($< 0,008 \text{ mg/L}$).





Sickerwasserentwicklung

Die Tabelle 14 zeigt eine Zusammenfassung der Wasserbilanz der Versuche. Für die gesamte Versuchsdauer (103 Wochen) betrug die kumulierte Bewässerungsmenge 30,6 Liter. Für den Säulenversuch ohne Sperre wurden davon 47,6 % und für den Versuch mit Sperre 50,2 % an Sickerwasser ausgetragen. Inklusive des in den Schlacken enthaltenen Wassers lag für den Blindversuch (IBV0) zu Versuchsende ein Verhältnis Bewässerungsmenge zu eingebauter Schlackemenge (L/S-Verhältnis) von 1,8 und für den Versuch mit Sperre (ISFK0) ein Verhältnis L/S von 2,9 vor. Damit waren die Materialien über die gesamte Versuchsdauer mit weniger Wasser in Kontakt getreten als bei den Elutionsversuchen (24 h), bei denen ein L/S von 10 vorliegt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass für IBV0 (Blindversuch) eine größere Menge an Schlacke eingebaut wurde (18 kg) als für den Versuch mit Sperre (14 kg). Berechnet man das kumulierte Wasserrückhaltevermögen, normiert auf ein kg Schlacke, dann kristallisiert sich heraus, dass der Wasserrückhalt für die Säule mit Sperre (ISFK0) höher ist (1,6 L/kg) im Vergleich zum Blindversuch (1,3 L/kg).

Tab. 14: Bewässerungs- und Austragsmengen für die Versuche aus VA-A ohne (IBV0) und mit Sperre (ISFK0) im Vergleich, Bewässerung mit Leitungswasser

Versuchsbezeichnung	IBV0 ohne Sperre	ISFK0 mit Sperre
Versuchsanordnung	VA-A	
Befüllung	Schlacke A	
Bewässerung	Leitungswasser	
Dauer in Wochen	103	
Eingebaute Schlackemenge in kg	18,0	13,8
Bewässerungsmenge in L pro Monat	1,2	1,2
Bewässerungsmenge insgesamt in L	30,6	30,6
Austrag Sickerwasser in L	14,7	15,5
kumulierter Austrag in %	47,6	50,2
kumulierter Rückhalt in L pro kg Schlacke	1,30	1,55

Austrag an Sickerwasser

Der Sickerwasseraustrag verläuft nicht konstant (Abb. 13). In den ersten 50 Tagen ist der Austrag gering, da Wasser vermehrt von der Schlacke aufgenommen wird. Danach pendelt die Menge um 150 mL/Woche. Bemerkenswert ist, dass Trendwechsel bezogen auf die Sickerwassermenge bei beiden Versuchen gleich verlaufen. Unter anderem werden für beide Versuche nach 300 Versuchstagen Austragsspitzenwerte (max. 210 mL) erreicht. In der Folgezeit bis etwa 475 Versuchstage liegen die Austragsmengen um 140 mL. Ab diesem Zeitpunkt sind jedoch die Austragsmengen beim Säulenversuch mit Sperre etwas höher (durchschnittlich 155 mL) als ohne Sperre (durchschnittlich 135 mL).

pH-Wert

Die Entwicklung des pH-Werts im Sickerwasser zeigt anfänglich für beide Säulen bis etwa 50 Tage eine Zunahme von ca. pH 10 auf 12 (Abb. 14). In der Folgezeit nimmt der pH-Wert kontinuierlich von ca. pH 12 auf 8 ab. In einer ersten Phase bis 400 Versuchstage ist der Verlauf der pH-Werte annähernd gleich. Danach trennen sich die Entwicklungen für den pH-Wert im Sickerwasser aus den beiden Säulen: im Sickerwasser aus IBV0 (ohne Sperre) nehmen die pH-Werte stärker ab als für ISK0 (mit Sperre).

Leitfähigkeit und leichtlösliche Spezies (Cl, Na)

Die Leitfähigkeit im Sickerwasser aus beiden Säulenversuchen nimmt, mit Ausnahme einiger Ausreißer, kontinuierlich von max. 70 auf ca. 2 mS/cm ab (Abb. 15). Ab einer Versuchsdauer von etwa 300 Tagen ist die Leitfähigkeit im Sickerwasser aus dem Versuch mit Sperre geringfügig höher im Vergleich zum Blindversuch.

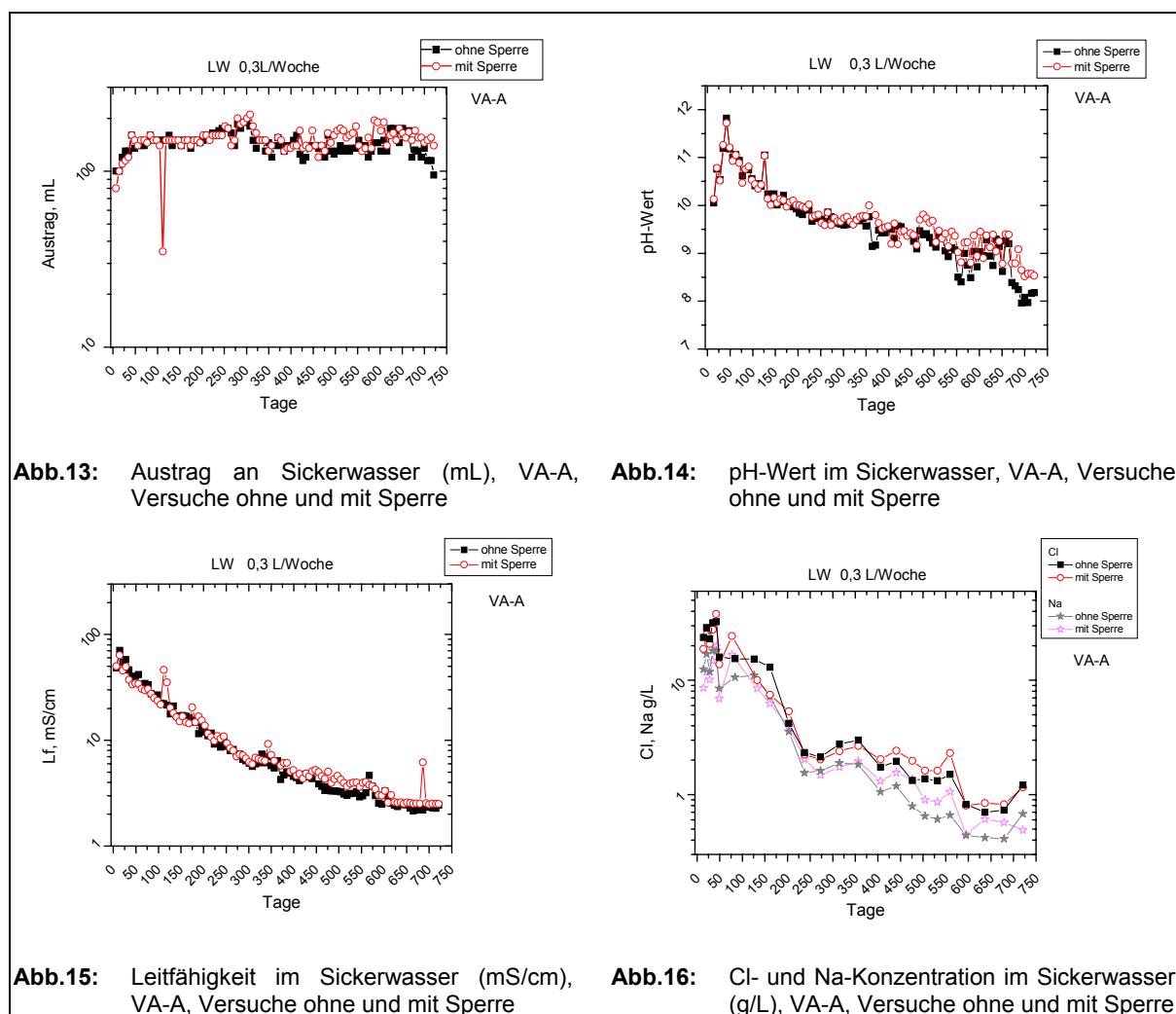
Die Parameter Cl und Na (beide Abb. 16) zeigen bezogen auf die Auswaschung ein vergleichbares Verhalten zur Leitfähigkeit. Trotz geringerer Analysendaten zeigt sich ebenfalls zunächst (bis etwa 225 Tage) eine starke Auswaschung leichtlöslicher Spezies. Nach 225 Tagen wird nur noch ein geringer Anteil mobilisiert. Für den Parameter Cl sind nach 400 Tagen die Konzentrationen für den Säulenversuch mit Sperre geringfügig höher (durchschnittlich 1,6 g/L) im Vergleich zum Blindversuch (durchschnittlich 1,3 g/L). Dies gilt auch für den Parameter Na (durchschnittlich 0,9 bzw. 0,7 g/L).

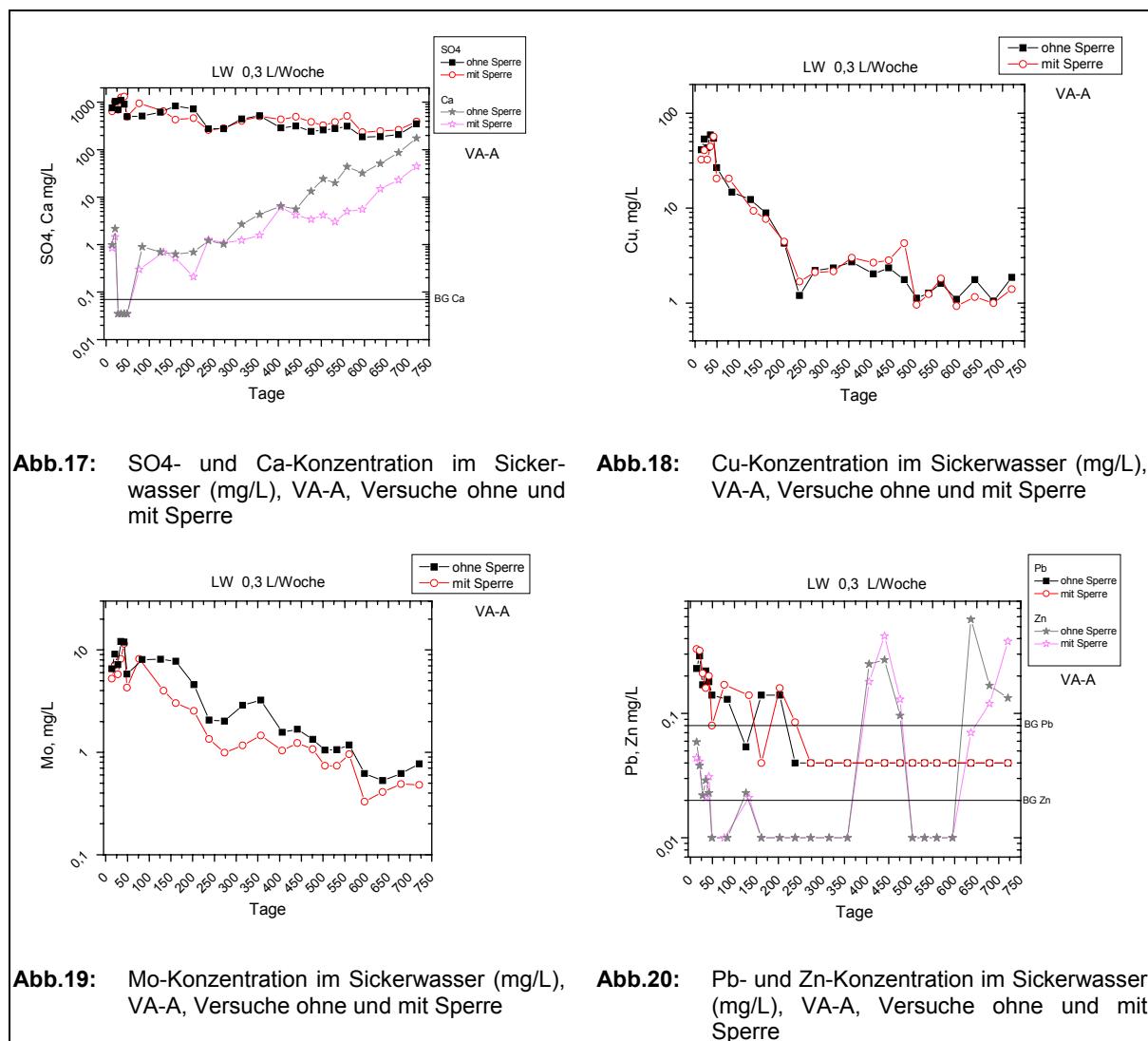
Weitere Parameter

Die Ca-Konzentrationen steigen in den Sickerwässern beider Säulen mit zunehmender Versuchsdauer an (Abb. 17). Zu Versuchsbeginn liegen die Ca-Konzentrationen z.T. unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,07 mg/L und zu Versuchsende nach 103 Wochen bei max. 175 mg/L. Für den Versuch mit Sperre wurden ab einer Versuchsdauer von 400 Tagen deutlich geringere Ca-Konzentrationen (max. 45 mg/L) analysiert. Die SO₄-Konzentrationen im Sickerwasser sind bereits zu Versuchsbeginn für beide Säulen mit > 1 g/L sehr hoch. Im

Versuchsverlauf nehmen die Konzentrationen für beide Versuche von max. 1,3 auf 0,2 g/L ab (Abb. 17). Nach etwa 350 Versuchstagen liegen die SO₄-Konzentrationen für den Versuch mit Sperre bei ca. 0,4 mg/L und für den Blindversuch niedriger mit 0,3 mg/L.

Die Schwermetallkonzentrationen sind zu Beginn insbesondere für Cu (~50 mg/L) und Mo (~10 mg/L) auffällig hoch (Abb. 18 und 19). Bis zu Versuchsende nehmen diese kontinuierlich auf ca. 1 mg/L bzw. 0,6 mg/L ab. Für den Parameter Cu sind die Unterschiede zwischen den beiden Säulen nur geringfügig. Für den Parameter Mo waren ab 75 Versuchstagen die Konzentrationen im Sickerwasser aus dem Versuch mit Sperre stets geringer (min. 0,3 mg/L) im Vergleich zum Blindversuch (min. 0,5 mg/L). Die Pb-Konzentrationen nehmen nach 250 Tagen auf Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze (< 0,08 mg/L) ab (Abb. 20). Die Zn-Konzentrationen liegen bis 350 Tage unterhalb der Bestimmungsgrenze (< 0,02 mg/L) und steigen danach mit Unterbrechungen auf Werte bis max. 0,6 mg/L an.





Frachtenberechnung

Die Frachtenberechnung zeigt den summarischen Austrag an Einzelstoffen zu Versuchsende in Bezug auf die Ausgangskonzentrationen. Die Elemente Cl, Na und zu gewissen Anteilen das Schwermetall Mo sind mit Austrägen von 10 bis 40 % am mobilsten (Tab. 15).

Tab. 15: Zusammenfassung der Frachtenberechnung, Abreicherung in % bezogen auf die Ausgangsmenge, Blindversuch und Versuch mit Sperre im Vergleich, Bewässerung mit Leitungswasser

Versuchsbezeichnung	IBV0 ohne Sperre	ISFK0 mit Sperre
Versuchsanordnung	VA-A	
Dauer in Wochen	103	
Bewässerung	Leitungswasser	
Parameter	proz. Abreicherung	
Cl	-33,2	-42,2
SO ₄	-1,55	-2,23
Ca	-0,011	-0,005
Na	-23,5	-31,9
Mo	-13,5	-11,4
Cu	-0,136	-0,153
Zn	-0,001	-0,001
Pb	-0,003	-0,004

Es ist auffällig, dass die Parameter Na und Cl für den Säulenversuch mit Sperre stärker ausgewaschen wurden. Die Parameter Ca und SO₄ werden kaum ausgetragen, ebenso die restlichen Schwermetalle. Auch die Schwermetalle wurden aus dem Säulenversuch mit Sperre stärker ausgewaschen. Als Ausnahme sind Mo und Zn zu nennen.

4.2.1.2 Referenztestfelder Eberstetten (ausschließlich Niederschlagszutritt)

Die Testfelder EB1 (ohne Sperrsicht) und EB2 (mit Sperrsicht) auf der Deponie Eberstetten waren ausschließlich dem natürlichen Niederschlag ausgesetzt. Daher gelten auch diese Referenzversuche - analog den Säulenversuchen - als grundlegend für die Erarbeitung der physikalischen Wirkung einer Sperrsicht auf die Feststoff- und Sickerwasserentwicklung. Im Folgenden sind Wassergehalt, Glühverlust und ausgewählte Eluatparameter zu Versuchsbeginn (Ausgangsmaterial) und zu Versuchsende (Ergebnisse der 3. Bohrkampagne), die Konzentrationsverläufe im Sickerwasser und der summarische Frachtaustrag bis zum Versuchsende kurz dargestellt.

Wassergehalt und Glühverlust

Tabelle 16 zeigt eine Verteilung der Wassergehalte und Glühverluste der beiden Testfelder im Vergleich zum Ausgangsmaterial (15 bzw. 19 Gew.-%). In den Bohrproben wurden merklich höhere Wassergehalte bzw. Glühverluste festgestellt (max. 27 bzw. 32 Gew.-%). Die Wassergehalte bzw. Glühverluste der Feststoffproben aus der dritten Bohrkampagne steigen für den Blindversuch (EB1) von der Oberkante bis zur Basis hin von ca. 19 auf 20 Gew.-% bzw. von 24 auf 27 Gew.-% an (Abb. 21). Für den Versuch mit Sperre (EB 2) liegt im oberen Bereich eine Diskontinuität vor, die sich durch sehr hohe Wassergehalte bzw. Glühverluste am Top widerspiegelt (25 bzw. 31 Gew.-%). Für Probe 2f wurden vglw. niedrige Werte bestimmt (19,8 bzw. 23,3 Gew.-%). Oberhalb der Sperre (Probe 3f) sind die Wassergehalte und Glühverluste wieder deutlich höher (ca. 23 bzw. 30 Gew.-%). Zur Basis nehmen die Wassergehalte bzw. Glühverluste für EB2 ab und erreichen Werte vergleichbar mit EB1.

Tab. 16: Verteilung der Parameter Wassergehalt und Glühverlust entlang des Versuchsprofils der dritten Bohrkampagne, Blindversuch (EB1) und Testfeld mit Sperre (EB2) nach 102 Wochen Versuchsdauer; Niederschlagszutritt, für die Proben ober- bzw. unterhalb der Sperrsicht wurde jeweils ein Mittelwert gebildet

Versuchsbezeichnung	EB1	EB2	EB1	EB2
Aufbau	ohne Sperre	mit Sperre	ohne Sperre	mit Sperre
Parameter		Wassergehalt Gew.-%		Glühverlust* Gew.-%
Ausgangsmaterial	15,1		18,8	
oberhalb der Sperre	19,0 ± 0,2	22,6 ± 2,5	24,1 ± 0,2	28,1 ± 4,0
innerhalb der Sperre	-	21,7	-	27,4
unterhalb der Sperre	20,1	20,6 ± 0,9	26,7	26,3 ± 0,8

* der Glühverlust wurde bei 1050° C ermittelt und bezieht sich auf die Originalsubstanz, d.h. Gv – Wg entspricht der Definition des Parameters Glühverlust in der AbfAblV (2001)

Eluate

pH-Wert

Die Eluate der Bohrkernproben beider Testfelder zeigen ähnliche pH-Werte um 11,6 (Abb. 22). Einzig im Eluat der Proben aus der Oberkante und an der Basis von EB2 (mit Sperre) wurden niedrige pH-Werte mit 9,8 gemessen. Es ist bemerkenswert, dass die pH-Werte in den Eluaten der Bohrproben z.T. sogar höher sind als im Ausgangsmaterial. Im Vergleich zu anderen MV-Schlackeproben der MVA Ingolstadt ist hier der pH-Wert mit 10,7 jedoch auffällig niedrig. Für die Säulenversuche der VA-A und für Lysimeter Raindorf waren die pH-Werten im Eluat mit 12,0 alkalischer.

Leitfähigkeit und leichtlösliche Spezies (Cl, Na)

Die Leitfähigkeiten in den Eluaten der Bohrkernproben aus den Testfeldern sind mit Werten zwischen 1,1 und 2,4 mS/cm geringer als im Ausgangsmaterial (2,5 mS/cm). Die generelle Abnahme ist jedoch weniger deutlich ausgeprägt als bei den Säulenversuchen. Die Leitfähigkeiten in den Eluaten aus beiden Testfeldern sind in der Tendenz vergleichbar (Abb. 23). Sie haben im oberen Bereich die niedrigsten Werte und nehmen zur Basis zu. Für den Blindversuch bewegen sich die Leitfähigkeiten im Eluat der basisnächsten Bohrproben etwa in der Größenordnung des Ausgangsmaterials. Für das Testfeld mit Sperre zeigt sich im Vergleich zum Blindversuch, dass innerhalb und unterhalb der Sperre die Anteile leichtlöslicher Spezies im Eluat geringer sind (max. 1,9 mS/cm).

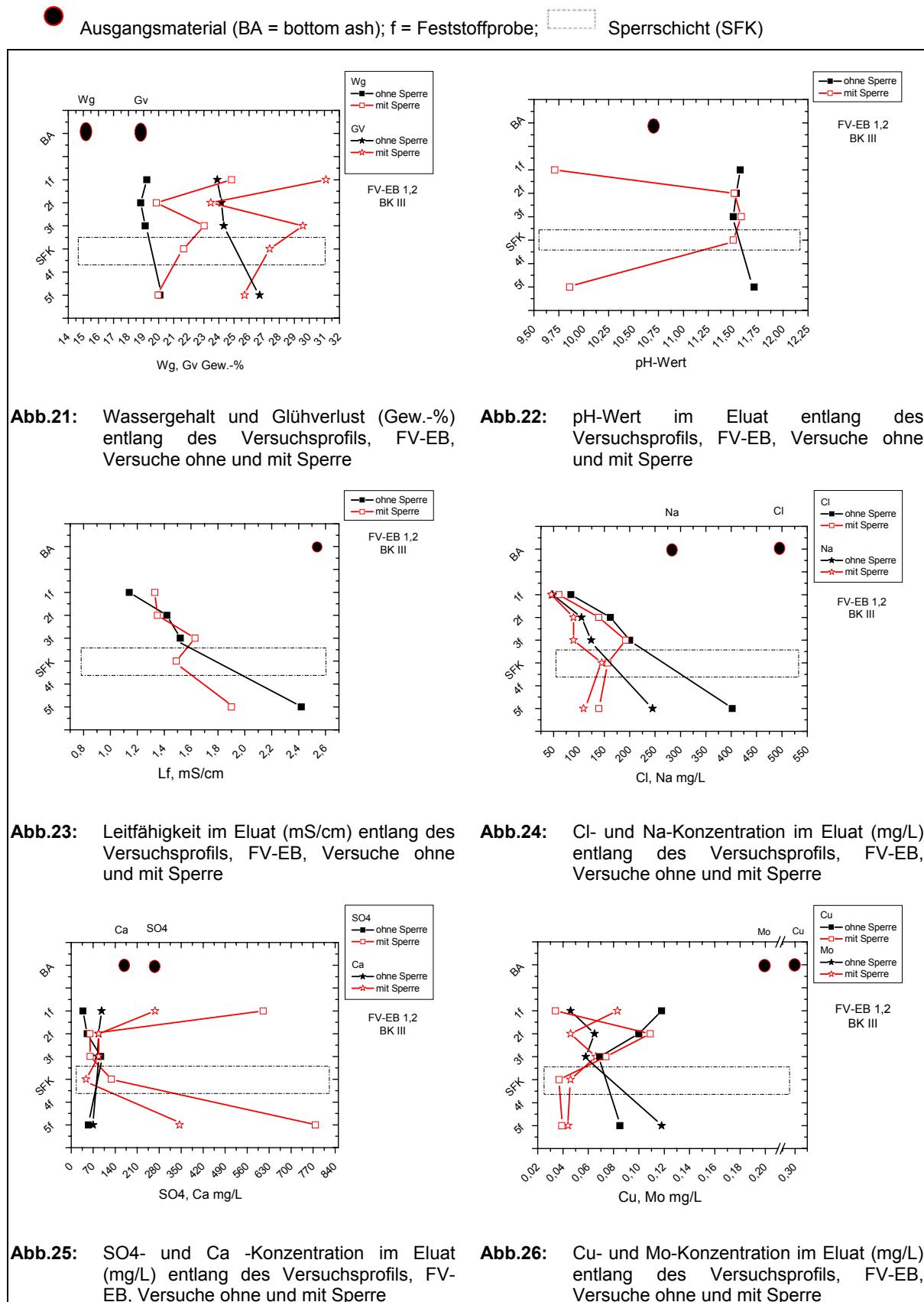
Für die Eluatparameter Cl und Na (beide Abb. 24) in den Bohrproben aus dem Blindversuch (EB1) ist die Entwicklung vergleichbar zur Leitfähigkeit, mit max. Konzentrationen für Cl und Na von 400 und 250 mg/L. Hingegen fällt für das Testfeld mit Sperre auf, dass die Cl- und Na-Konzentrationen im Eluat der Proben inner- und unterhalb der Sperre im Vergleich zum Blindversuch deutlich abnehmen (max. Cl- und Na-Konzentrationen von 140 und 110 mg/L).

Weitere Parameter

Die Abbildung 25 zeigt, dass die Ca- und SO₄-Konzentrationen in den Eluaten der Bohrproben beider Testfelder tendenziell niedriger sind im Vergleich zum Ausgangsmaterial (170 bzw. 260 mg/L). Die Bohrproben liegen für Ca überwiegend in einem Bereich zwischen 70 – 100 mg/L und für SO₄ zwischen 37 – 130 mg/L. Ausreißer sind wiederum die Bohrproben 1f und 5f aus dem Testfeld mit Sperre. Die z.T. sehr hohen Konzentrationen (für Ca max. 350 mg/L und für SO₄ max. 780 mg/L) sind korrelierbar mit den niedrigen pH-Werten in diesen Proben.

Schwermetalle sind nur in geringen Konzentrationen vertreten: für Cu und Mo (beide Abb. 26) in der Regel deutlich unter 0,12 mg/L, für Pb (Abb. 27) meist unterhalb der Bestimmungsgrenze (0,008 mg/L) sowie für Zn (Abb. 28) zumeist deutlich unter 0,04 mg/L. Für die Parameter Cu und Mo zeigen sich für den Versuch mit Sperre insbesondere innerhalb-

und unterhalb der Sperre geringere Eluatkonzentrationen (max. 0,04 mg/L und 0,05 mg/L) im Vergleich zum Blindversuch (max. 0,09 und 0,1 mg/L).



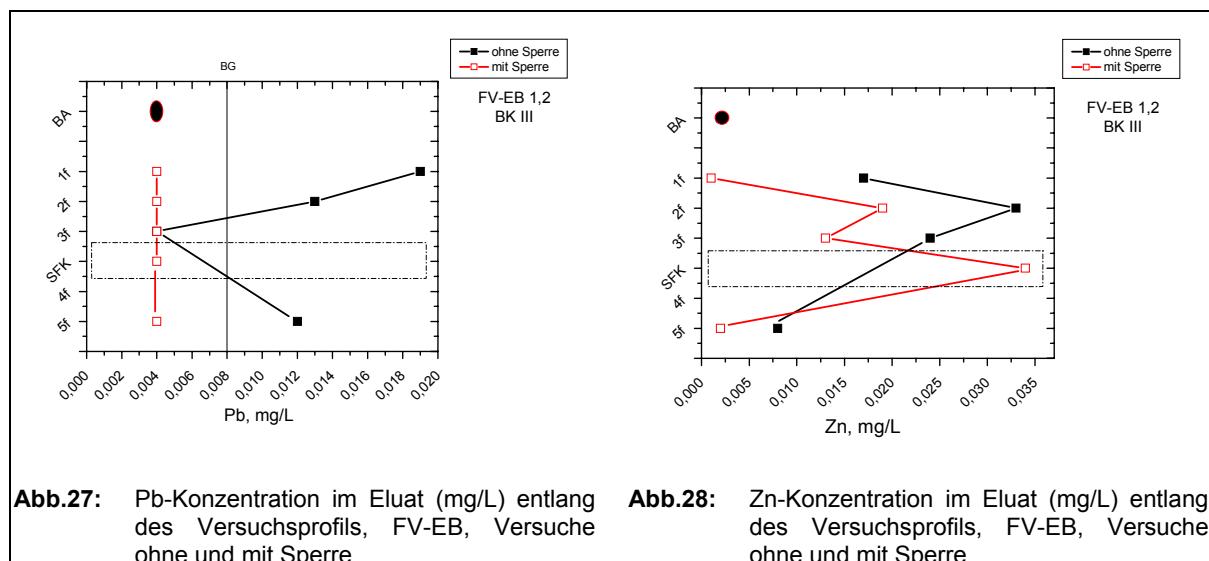


Abb.27: Pb-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, FV-EB, Versuche ohne und mit Sperre

Abb.28: Zn-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, FV-EB, Versuche ohne und mit Sperre

Sickerwasserentwicklung

Die Tabelle 17 zeigt eine Zusammenfassung der Wasserbilanz der zwei Feldversuche. Die kumulierte Bewässerungsmenge (Niederschlag) lag zu Versuchsende bei 13.500 Liter pro 10m². Der Querschnitt der Testfelder betrug 10 m². Der prozentuale Austrag an Sickerwasser machte für den Blindversuch 10,0 % und für das Testfeld mit Sperre 13,3 % aus. Inklusive des in den Schlacken enthaltenen Wassers lag zu Versuchsende für den Blindversuch ein Verhältnis L/S von 0,65 und für das Testfeld mit Sperre ein Verhältnis L/S von 0,62 vor. Damit waren die Materialien über die gesamte Versuchsdauer mit deutlich weniger Wasser in Kontakt getreten als bei den Säulenversuchen (max. L/S Verhältnis von 2,9) und bei den Elutionsversuchen (24 h), bei denen ein L/S von 10/1 vorliegt. Aufgrund einer lediglich abgeschätzten Austragsmenge an Sickerwasser über die ersten sechs Monate Laufzeit ist der kumulierte Rückhalt in L pro kg Schlacke in beiden Versuchen mit ca. 0,6 L/kg in etwa gleich hoch zu sehen. Die Näherungswerte der Sickerwassermengen wurden jedoch für die Erstellung der Wasserbilanz und für die Frachtenberechnung herangezogen.

Tab. 17: Bewässerungs- und Austragsmengen für die Testfelder Eberstetten: ohne Sperre und mit Sperre im Vergleich, Bewässerung über Niederschlagszutritt

Versuchsbezeichnung	EB1 ohne Sperre	EB2 mit Sperre
Versuchsanordnung	Testfelder Eberstetten	
Befüllung	Schlacke A	
Bewässerung	Niederschlag	
Dauer in Wochen	102	
Eingegebene Schlackemenge in kg	35.200	37.300
durchschnittliche Bewässerungsmenge in L pro Monat	570	570
Bewässerungsmenge insgesamt in L pro 10m ²	13.500	13.500
Austrag Sickerwasser in L	1.342	1.785
kumulierter Austrag in %	10,0	13,3
kumulierter Rückhalt in L pro kg Schlacke	0,59	0,55

Austrag an Sickerwasser

Über die ersten sechs Monate wurden die Sickerwassermengen nicht erfasst. In der Folgezeit wurden die Mengen abgeschätzt, wobei die maximale Erfassungsmenge pro Woche lediglich 40 Liter betrug. Die Ergebnisse zur Entwicklung der Sickerwassermenge sind daher für dieses Kapitel von untergeordneter Bedeutung.

pH-Wert

Bei den Säulenversuchen der Versuchsanordnung A war mit fortschreitender Versuchsdauer eine kontinuierliche Abnahme der pH-Werte von ca. pH 11 auf 8 festzustellen. Bei den Testfeldern hingegen bewegen sich die pH-Werte der Sickerwässer seit Beginn der Versuche zwischen pH 6,5 und pH 9,0 (Abb. 29). Als Ursache ist eine längere Verweilzeit des austretenden Sickerwassers im Sickerrohr und im Auffangbehälter zu sehen. Durch den Kontakt mit Luft kann das Sickerwasser mit Kohlendioxid aus der Luft teilweise neutralisiert bzw. karbonatisiert werden. Die Eluate der Bohrkernproben wiesen im Vergleich deutlich höhere pH-Werte auf, was den noch vorhandenen basischen Charakter der Schlacken bestätigt.

Leitfähigkeit und leichtlösliche Spezies (Cl, Na)

Die Leitfähigkeiten der beiden Sickerwässer schwanken im Bereich um 10 mS/cm (Abb. 30). Sie sind damit deutlich höher im Vergleich zu den Säulenversuchen (ca. 2 mS/cm) und den Eluaten der Bohrproben (ca. 1 mS/cm), was durch die geringen L/S-Verhältnisse um 0,6 bei den Testfeldern bedingt ist. Insgesamt sind die Leitfähigkeiten im Sickerwasser aus Testfeld EB2 (mit Sperre) etwas höher als die aus dem Blindversuch (EB1).

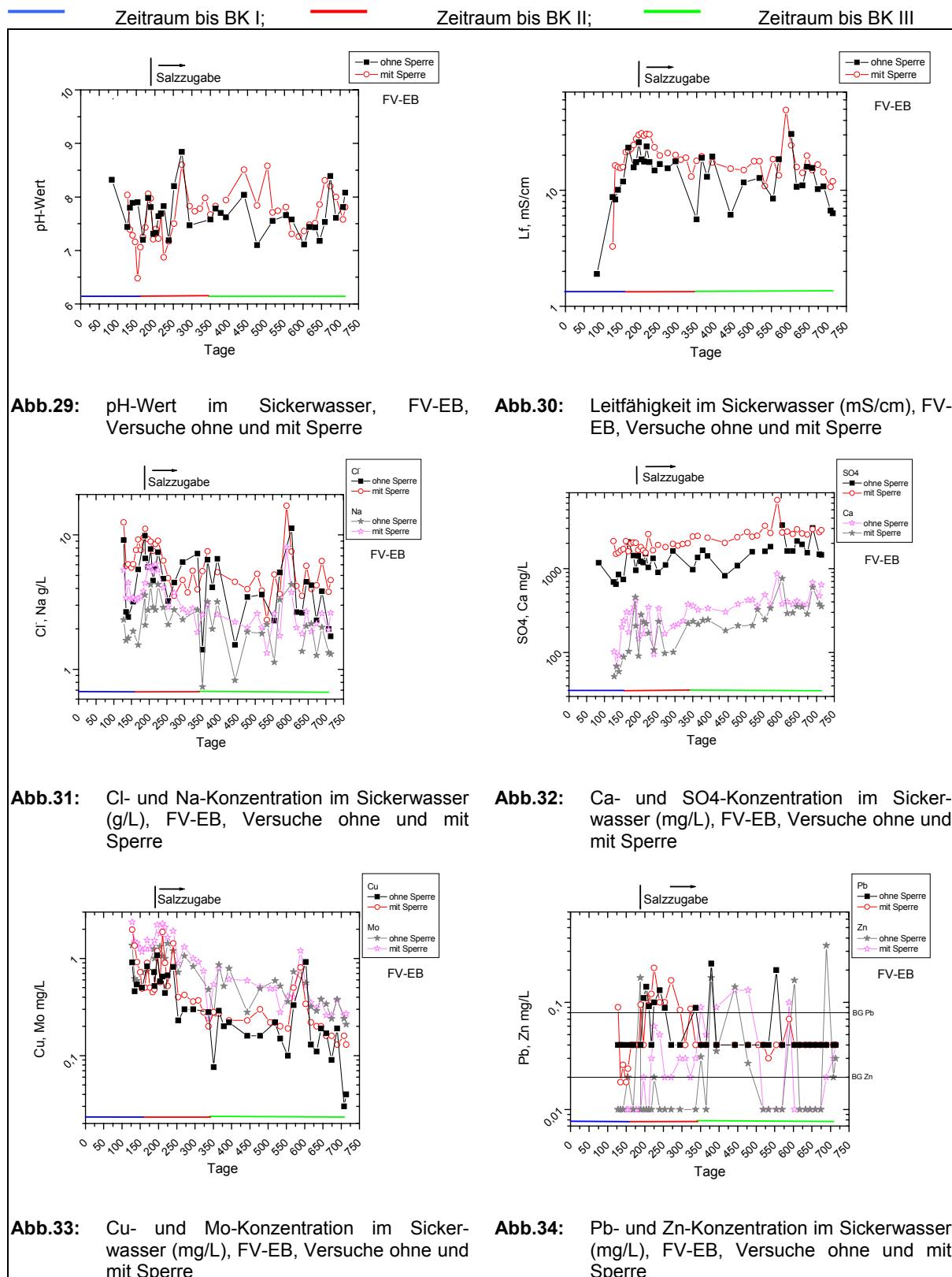
Die Cl- und Na-Konzentrationen im Sickerwasser aus beiden Testfeldern nehmen im Versuchsverlauf von etwa 12,4 auf 3,8 g/L sowie 5,5 auf 1,3 mg/L ab (beide Abb. 31). Tendenziell zeigt sich, dass die Sickerwässer aus dem Versuch mit Sperre etwas salzreicher sind.

Weitere Parameter

Die Ca- und SO₄-Konzentration nehmen mit zunehmender Versuchsdauer zu (beide Abb. 32): für den Parameter Ca durchschnittlich von 50 auf 600 mg/L und für SO₄ von 0,7 auf 2,9 g/L. Generell wurden im Sickerwasser aus dem Testfeld mit Sperre höhere Konzentrationen analysiert.

Die anfangs hohen Mo- und Cu-Konzentrationen (max. 3 mg/L) nehmen bis zum Versuchsende deutlich ab (< 0,3 mg/L; beide Abb. 33). Im Sickerwasser aus dem Testfeld mit Sperre werden insbesondere für Cu überwiegend höhere Konzentrationen festgestellt. Die Pb- und Zn-Konzentrationen im Sickerwasser liegen meist unterhalb der jeweiligen

Bestimmungsgrenzen (beide Abb. 34). Vereinzelt werden im Sickerwasser aus beiden Testfeldern Werte > 0,1 mg/L gemessen.



Frachtenberechnung

Über die ersten acht Monate Laufzeit wurden die Sickerwassermengen nicht erfasst. In der Folgezeit handelt es sich bei den Austragsmengen um ungefähre Werte. Daher ist der berechnete Frachtaustrag nur als Näherungswert zu betrachten (Tab. 18). Über die gesamte Versuchsdauer betrachtet, wurden lediglich 1 bis 2 Prozent der leichtlöslichen Salze ausgetragen. Der Frachtaustrag liegt für das Testfeld mit Sperre in einer ähnlichen Größenordnung im Vergleich zum Blindversuch. Der Austrag leichtlöslicher Spezies liegt für beide Testfelder deutlich unter den berechneten Werten der beiden Säulenversuche IBV0 und ISFK0, wo ca. 30 bis 40 % des Natriums bzw. Chlorids ausgetragen wurden.

Tab. 18: Zusammenfassung der Frachtenberechnung, Abreicherung in % bezogen auf die Ausgangsmenge, Blindversuch (EB1) und Versuch mit Sperre (EB2) im Vergleich

Versuchsbezeichnung	EB1 ohne Sperre	EB2 mit Sperre
Versuchsanordnung	Testfelder Eberstetten	
Dauer in Wochen	102	
Bewässerung	Niederschlag	
Parameter	proz. Abreicherung	
Cl	-1,89	-2,85
SO4	-0,24	-0,50
Na	-0,59	-1,00
Ca	-0,006	-0,011
Cu	-0,0003	-0,0004
Mo	-0,16	-0,25
Pb	-0,0001	-0,0002
Zn	-0,00001	-0,00002

4.2.1.3 Fazit zur Wirkung einer Sperrsicht

Die Ergebnisse der Feststoffuntersuchungen zu Wassergehalt bzw. Glühverlust, der Eluatuntersuchungen und der Sickerwasserentwicklung bezogen auf die Wirksamkeit der Sperre haben Folgendes gezeigt:

Feststoffentwicklung:

- L/S-Verhältnis: Feststoffproben der Testfelder mit L/S-Verhältnisse von ca. 0,6 sind deutlich weniger mit Wasser in Kontakt getreten im Vergleich zu Säulenversuchen mit L/S zwischen 1,3 – 1,6 und Eluat mit L/S 10
- Wassergehalt bzw. Glühverlust: generell erhöhen sich für die Blindversuche die Werte tendenziell vom Top bis zur Basis; für den Säulenversuche mit Sperre herrschen v.a. innerhalb der Sperrsicht generell die höchsten Wassergehalte bzw. Glühverluste vor und direkt unterhalb der Sperre liegen vergleichsweise trockene Bedingungen vor; für das Testfeld mit Sperre wurde ein Maximum an Wassergehalt bzw. Glühverlust am Top und unmittelbar oberhalb der Sperre beobachtet. Zudem liegt hier auch ein auffälliges

Minimum in der Probe unterhalb der Testfeldoberfläche vor, da sich vermutlich eine Diskontinuität an der Oberfläche gebildet hat. Als Ursache hierfür kann der Kontakt der MV-Schlacke mit Luft und Niederschlag angesehen werden.

- Berechnungen zum kumulierten Wasserrückhalt: generell höhere Werte für Versuche mit Sperrsicht - Sperre erhöht Rückhalt (L/kg Schlacke)
- Salzanreicherungen entlang des Profils: Einbau einer Sperre erhöht v.a. oberhalb und unterhalb der Sperrsicht die Eluatkonzentrationen für leichtlösliche Spezies (Leitfähigkeit, Cl, Na) und innerhalb der Sperre ist mit niedrigen Eluat-Konzentrationen auch für die Schwermetalle Cu und Mo zu rechnen; die Parameter Ca und SO₄ liefern wenige Rückschlüsse auf die Wirksamkeit der Sperre

Sickerwasserentwicklung:

- chemische und mineralogische Zusammensetzung der Schlacke: diese Faktoren dominieren für die Säulenversuche im ersten Versuchsjahr die Sickerwasserentwicklung. Dementsprechend liegen im ersten Versuchsjahr vergleichbare Tendenzen für den Blindversuch und den Versuch mit Sperre vor. Im zweiten Versuchsjahr hingegen verstärkt sich der Beitrag durch den Korngrößenwechsel und deutliche Abweichungen in der Sickerwasserentwicklung wurden beobachtet – z.B. Entwicklung der Leitfähigkeit (ab 350 Tagen Sickerwasser aus dem Versuch mit Sperre salzreicher). Im Gegensatz dazu wurden für die Testfelder bereits zu Versuchsbeginn signifikante Unterschiede zwischen Blindversuch und Testfeld mit Sperre festgestellt.
- Frachtenberechnungen: erstaunlicherweise werden sowohl für die Säule mit Sperre als auch für das Testfeld mit Sperre überwiegend mehr an leichtlöslicher Spezies aber auch an Schwermetallen ausgewaschen.

4.2.2 Physikalische Parameter

4.2.2.1 Modellversuch mit Kunststoffkugeln

Um die rein physikalischen Auswirkungen infolge des Korngrößenwechsels von Diskontinuitäten auf den Wasserhaushalt zu untersuchen, wurden zwei Säulen mit Kunststoffkugeln gefüllt: eine Säule ohne Sperrsicht als Blindversuch (MoV1) und die andere Säule mit einer Sperrsicht aus kleineren Kugeln (MoV2). Tabelle 19 gibt eine Übersicht über die Wasserbilanz der beiden Säulen. Die Säulen wurden mit einer 3-molaren NaCl-Lösung bewässert. Die gesamte Versuchsdauer betrug 625 Tage. Dabei wurde die Bewässerungsmenge während der vier Zyklen mehrmals verändert: entweder 300 mL oder 150 mL. Die Abbildungen 35 und 36 zeigen die Entwicklung für den Sickerwasseraustrag in mL bzw. die Durchlaufzeit in Sekunden.

Tab. 19: Übersicht über die Zeitdauer der Zyklen mit der jeweiligen Bewässerungsmenge und Austragsmenge an Sickerwasser für die Modellversuche mit und ohne Sperre

Versuchsbezeichnung	MoV 1 (Säule 1) - ohne Sperre					
	1. Zyklus	2. Zyklus	3. Zyklus	4. Zyklus	5. Zyklus	6. Zyklus
Zeitdauer der Zyklen in Tagen	0 bis 154	ab 154 bis 268	ab 268 bis 373	ab 373 bis 541	ab 541 bis 611	ab 611 bis 625
Bewässerungsmenge in mL	300	150	300	150	300	150
Austrag (Mittelwert) in mL	156	31	102	41	166	53
Sickerwasseraustrag in %	52,0	20,5	34,1	27,3	55,3	35,3
Versuchsbezeichnung						
MoV2 (Säule 2) - mit Sperre						
Zyklus	1. Zyklus	2. Zyklus	3. Zyklus	4. Zyklus	5. Zyklus	6. Zyklus
Zeitdauer der Zyklen in Tagen	0 bis 154	ab 154 bis 268	ab 268 bis 373	ab 373 bis 541	ab 541 bis 611	ab 611 bis 625
Bewässerungsmenge in mL	300	150	300	150	300	150
Austrag (Mittelwert) in mL	168	21	83	18	137	5
Sickerwasseraustrag in %	56,0	13,7	27,7	12,0	45,7	3,3

1. Zyklus

Zu Beginn des Versuchs bis 154 Tage wurden ein Mal pro Woche vormittags und nachmittags 150 mL Lösung aufgegeben. Es hat sich gezeigt, dass sich eine wassergesättigte Atmosphäre innerhalb der Säule hält. Nach etwa 80 Versuchstagen wurden beide Säulen nach jeder Bewässerung mit Pressluft getrocknet. Dadurch nahm der Sickerwasseraustrag für beide Säulen von etwa 220 auf 80 mL ab.

2. Zyklus

Nach 154 bis 268 Versuchstagen wurde nur vormittags mit 150 mL bewässert. Mit der Verringerung der Bewässerungsmenge nahm der Austrag kontinuierlich ab und lag nach 260 Versuchstagen für den Blindversuch im Mittel bei 31 mL und für den Versuch mit Sperre lediglich bei 21 mL.

3. Zyklus

Nach 268 Versuchstagen wurde die Bewässerungsmenge auf 300 mL pro Woche erhöht. Die Bewässerung erfolgte einmalig jeweils vormittags. Dies führte unmittelbar bei beiden Versuchen zu einem sprunghaften Anstieg in der Austragsmenge. In der Folgezeit lag für den Blindversuch der Austrag im Mittel bei 102 mL und für den Versuch mit Sperre bei etwa 83 mL. Insgesamt war die Schwankungsbreite für den Blindversuch geringer.

4. Zyklus

Nach 373 Versuchstagen wurde die Bewässerungsmenge wieder auf 150 mL pro Woche reduziert. Die mittleren Austragsmengen waren mit 41 mL für den Versuch ohne Sperre etwas höher als beim ersten Zyklus, jedoch für den Versuch mit Sperre mit 18 mL geringer. Während dieser Zeit kristallisierten sich deutliche makroskopische Unterschiede in den Salzverkrustungen an der Oberfläche der Kugeln heraus. Beim Blindversuch ergab sich ein uniformes Verteilungsbild der Salzablagerungen (Abb. A-10, experimenteller Anhang). Die Kugeloberflächen wurden gleichmäßig mit der salzreichen Lösung benetzt. Dadurch wurden die Oberflächen der einzelnen Kunststoffkugeln gleichförmig mit einer Salzschicht überzogen. Die Kugelzwischenräume blieben dabei frei.

Für den Versuch mit Sperre hingegen zeigte sich, dass die Kugelzwischenräume verstärkt mit Salzen verkrustet wurden. Dafür waren bei vielen Kugeln die Oberflächen nur in geringem Ausmaß ummantelt. Zusätzlich zeigte sich, dass unterhalb der Sperre die Verkrustungen der Kugelzwischenräume viel ausgeprägter waren (A-11, experimenteller Anhang).

Augenscheinlich verändern die unterschiedlich ausgeprägten Salzverkrustungen innerhalb der beiden Säulen das Wasserrückhaltevermögen. Dieses ist für den Versuch mit Sperre größer.

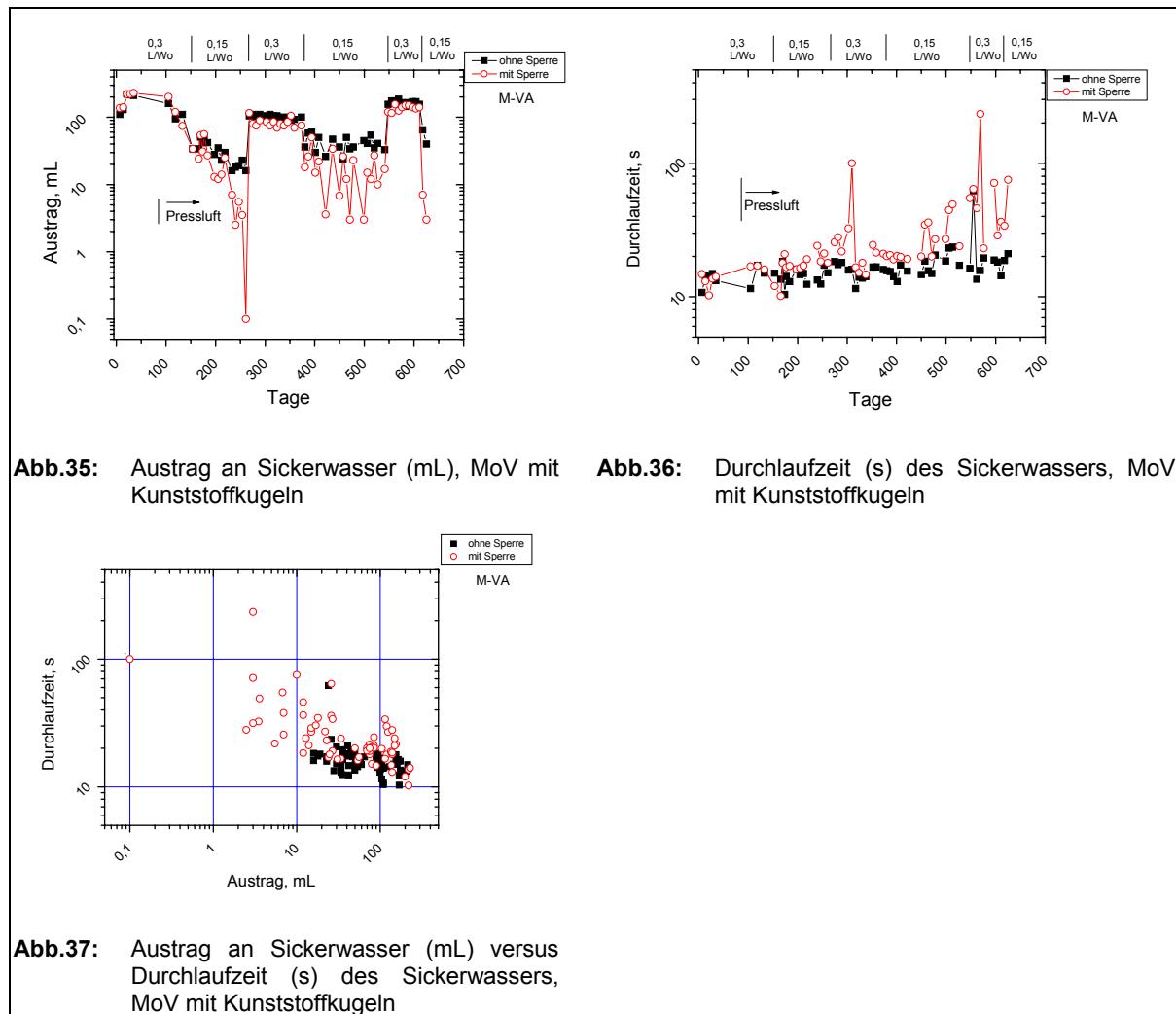
5. Zyklus

Die erneute Erhöhung der Bewässerungsmenge auf 300 mL pro Woche nach 541 Tagen führte unmittelbar zu hohen Austragsmengen. Für den Blindversuch betrug der prozentuale Austrag an Sickerwasser 55% und für den Versuch mit Sperre 46%. Somit war in beiden Fällen die Austragsmenge höher im Vergleich zum dritten Zyklus.

6. Zyklus

Nach 611 Tagen wurde die Bewässerungsmenge ein letztes Mal auf 150 mL pro Woche reduziert. Während dieses Zyklus wurden je Säule noch zwei Sickerwasserproben genommen. Die Ergebnisse zur Austragsmenge zeigen sehr eindrücklich, dass bei geringen Bewässerungsmengen der prozentuale Austrag deutlich geringer wird. Für den Blindversuch liegt er nun bei 35 %. Im Vergleich zu den Zyklen 2 und 4 hat sich hier mit fortwährender Versuchsdauer der prozentuale Sickerwasseraustrag stetig erhöht. Für den Versuch mit Sperre hingegen ist sehr bemerkenswert, dass der prozentuale Austrag nun noch lediglich bei

3% liegt. Im Vergleich zu Zyklus 2 und 4 hat sich der prozentuale Sickerwasseraustrag deutlich verringert.



Die Sickerwasserentwicklung über den gesamten Versuchszeitraum zeigt deutlich, dass eine Änderung des Bewässerungsmodus unmittelbare Folgen hat. Es kristallisiert sich auch heraus, dass der Austrag an Sickerwasser über den gesamten Versuchszeitraum für den Versuch ohne Sperre höher ist (4,6 Liter) als für den Versuch mit Sperre (3,7 Liter). Die Abbildung 36 zeigt die Änderung der Durchlaufzeit in Sekunden in Abhängigkeit von der Versuchsdauer. Pro Messung wurde die Zeitdauer zwischen der Aufgabe der NaCl-Lösung auf die Säule bis zum Ankommen der ersten Wassertropfen im Auffanggefäß ermittelt. Der Unterschied zwischen den beiden Versuchsaufbauten nahm mit fortschreitender Versuchsdauer zu. Für den Blindversuch liegen die Durchlaufzeiten überwiegend im Bereich um 15 Sekunden. Für den Versuch mit Sperre zeigt sich jedoch deutlich, dass durch den Einbau einer Sperre die Durchlaufzeit kontinuierlich zunimmt. Zu Versuchsbeginn liegt sie überwiegend zwischen 10 und 30 Sekunden. Nach einer Versuchsdauer von 450 Tagen erhöhen sich die Durchlaufzeiten deutlich. Es wurden überwiegend Werte zwischen 20 und 100 Sekunden beobachtet.

Die Abbildung 37 veranschaulicht die Kopplung der Durchlaufzeit von der Austragsmenge. Für den Versuch ohne Sperre zeigt sich kaum ein Unterschied für große und kleine Bewässerungsmengen. Ausschließlich bei sehr geringen Austragsmengen ist die Durchlaufzeit geringfügig erhöht. Für den Versuch mit Sperre zeigt sich viel deutlicher, dass sehr hohe Durchlaufzeiten mit kleinen Austragsmengen gekoppelt sind.

Darüber hinaus wurde experimentiert, inwieweit die Bewässerungsrate einen Einfluss auf den Wasserrückhalt hat. Es hat sich herausgestellt, dass deutlich mehr Wasser gespeichert werden kann, wenn eine Bewässerungsmenge nicht einmalig appliziert wird, sondern auf mehrere Raten aufgeteilt wird.

4.2.2.2 Durchlässigkeitsbeiwert (k_f -Wert)

Im Rahmen einer Diplomarbeit am Institut für Geologie an der LMU wurden an den Bohrproben der Bohrkampagne (BK III) aus den Lysimetern Waldering die Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f -Wert in m/s, Tabelle 20) ermittelt (mündliche Mitteilung).

Tab. 20: k_f -Werte der Bohrproben Waldering

	Lysimeter Waldering	
	ohne Sperre	mit Sperre
Bohrtiefe	k_f -Werte in m/s	
50 cm	$1,15 \cdot 10^{-4}$	$1,71 \cdot 10^{-4}$
80 cm	$1,23 \cdot 10^{-4}$	$8,60 \cdot 10^{-4}$
SFK	-	$2,02 \cdot 10^{-9}$
115 cm	$9,40 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$
140 cm	$2,50 \cdot 10^{-5}$	$1,05 \cdot 10^{-5}$

Die Wasserdurchlässigkeit wird laut DIN 18130 folgendermaßen definiert:

- Werte $> 10^{-2}$ m/s beziehen sich auf eine sehr starke,
- Werte von 10^{-2} bis 10^{-4} m/s auf eine starke,
- Werte von 10^{-4} bis 10^{-6} m/s auf eine mittelmäßige,
- Werte von 10^{-6} bis 10^{-8} m/s auf eine schwache und
- Werte $< 10^{-8}$ m/s auf eine sehr schwache Durchlässigkeit.

Bezogen auf Lockergesteine sind Werte zwischen 10^{-6} bis 10^{-9} m/s für tonigen Schluff und Werte $< 10^{-9}$ m/s für Ton charakteristisch. Im Allgemeinen kann für MV-Schlacke mit Korngröße 0-32 mm ein Durchlässigkeitswert (k_f -Wert) von 4×10^{-3} m/s angesetzt werden (Burg, 1999). Nach 26 Monaten Laufzeit zeigen sich für den Blindversuch im oberen Bereich des Lysimeters etwa bis zu einer Bohrtiefe von 100 cm k_f -Werte von 10^{-4} m/s und im unteren Bereich des Lysimeters von 10^{-5} m/s. Diese Werte stehen für eine mittelmäßige

Durchlässigkeit der MV-Schlacke und entsprechen dem Verhalten von feinkörnigem Sand. Für das Lysimeter mit Sperrze zeigt sich eine Diskontinuität. Für das Lysimeter mit Sperrze wurden oberhalb der Sperrze und unterhalb der Sperrze im Vergleich zum Blindversuch erhöhte k_f -Werte beobachtet. Jedoch wurde innerhalb der Sperrsicht ein sehr geringer Wert von $2,02 \cdot 10^{-9}$ m/s gemessen. Nach DIN 18130 entspricht dies einer sehr schwachen Wasserdurchlässigkeit, charakteristisch für tonigen Schluff.

4.2.2.3 Fazit zu den physikalischen Parametern

Für den Modellversuch mit Kunststoffkugeln beschränken sich die Ergebnisse auf rein physikalische Wirkungsweisen:

Sickerwasserentwicklung

- Blindversuch: große Bewässerungsmengen von 300 mL/Woche führen zu hohen Sickerwasserbeträgen (35 – 55%) ohne Abhängigkeit von der Versuchsdauer
- Blindversuch: kleine Bewässerungsmengen von 150 mL/Woche führen zu deutlich geringeren Sickerwasserbeträgen (20 – 35%), jedoch nehmen die Mengen mit fortwährender Versuchsdauer zu
- Einbau einer Sperrsicht: große Bewässerungsmengen von 300 mL/Woche bewirken eine dem Blindversuch vergleichbare Entwicklung, Sperrwirkung wird aufgehoben
- Einbau einer Sperrsicht: kleine Bewässerungsmengen von 150 mL/Woche führen zu sehr geringen Sickerwasserbeträgen (3 – 14%) und zudem zeigt sich mit fortwährender Versuchsdauer eine kontinuierliche Abnahme

Ausbildung von Salzverkrustungen

- Blindversuch: Oberflächen der Kunststoffkugeln gleichmäßig ummantelt
- Einbau einer Sperrsicht: Oberflächen nur in geringem Ausmaß ummantelt, dafür v.a. unterhalb der Sperrsicht intensive Verkrustung der Kugelzwischenräume.
- Einbau einer Sperrsicht: Aufkonzentration der leichtlöslichen Salzphasen im perkolierenden Sickerwasser und Hinweis auf vglw. trockene Umgebung unterhalb der Sperrsicht, somit Begünstigung für die Ausfällung von Salzphasen aus der Porenlösung
- Salzverkrustungen: Salze vermögen, zusätzliches Kristallwasser aufzunehmen

Durchlässigkeitsbeiwert

- Blindversuch: gleichmäßige Durchlässigkeit entlang des Profils
- Lysimeter mit Sperrsicht: Einbau des Schlacke-Feinkorns reduziert Durchlässigkeit stark, Bestätigung der Wirksamkeit des Korngrößenwechsels für Salzanreicherung

4.3 WIRKUNG VON SALZREICHEN LÖSUNGEN

4.3.1 Wirkung von Modellsickerwasser – erweiterte Säulenversuche der VA-A

Auf der Deponie ist jedoch durch die fortwährenden Ablagerungen frischer MV-Reststoffe das perkolierende Sickerwasser stets sehr salzreich. Aus diesem Grund wurde für erweiterte Versuchsanordnungen eine Bewässerung mit salzreichen Lösungen gewählt. Das Modellsickerwasser (MSW), mit dem die erweiterten Säulenversuche der VA-A bewässert wurden, ist aus folgenden Ionen zusammengesetzt: Cl, SO₄, Ca, Na, K, Cu, Zn und Pb (vgl. Tab T-1, tabellarischer Anhang). Der Vergleich der beiden Langzeitversuche IBV3 und ISFK3, nachstehend kurz MSW-Säulen, steht in diesem Kapitel im Vordergrund. Um die Wirkung von Modellsickerwasser auf die Feststoff- und Sickerwasserentwicklung erarbeiten zu können, werden diese Säulen den Referenzsäulen IBV0 und ISFK0 (LW-Säulen) gegenübergestellt. Die Referenzversuche IBV0 und ISFK0 wurden bereits vorgestellt (vgl. Kapitel 4.2.1.1). Im Folgenden werden Wassergehalt, Glühverlust und ausgewählte Eluatparameter zu Versuchsbeginn (Ausgangsmaterialien) und zu Versuchsende nach dem Rückbau der Säulen erörtert. Im Anschluss finden sich eine Beschreibung zu den Konzentrationsverläufen im Sickerwasser und der summarische Frachtaustrag.

Wassergehalt und Glühverlust

Im Vergleich zum Ausgangsmaterial (18,0 bzw. 22,8 Gew.-%) werden für beide MSW-Säulen mit wenigen Ausnahmen höhere Wassergehalte bzw. Glühverluste festgestellt (Tab. 21). Die Wassergehalte bzw. Glühverluste der Feststoffproben aus dem Blindversuch sind vergleichbar mit den Referenzversuchen und liegen überwiegend im Bereich zwischen 18 und 22 bzw. 24 und 28 Gew.-%. Für den Säulenversuch mit Sperr (ISFK3) zeigt sich ebenfalls die aufstauende Wirkung der Sperrsicht (Abb. 38 und 39). Speziell unterhalb der Sperrsicht ist das Milieu trockener, wenn auch nicht so ausgeprägt wie für die Referenzsäule mit Sperr (ISFK0), die mit Leitungswasser bewässert wurde. Im Vergleich der beiden Säulen mit Sperrsicht zeigte sich, dass durch die zusätzliche Salzzugabe in Form von MSW höhere Wassergehalte bzw. Glühverluste gemessen wurden (meist > 20 bzw. 26 Gew.-%). Innerhalb der Sperrsicht jedoch wurden für beide Versuche mit Sperr ähnliche Werte für Wassergehalt (23,2 Gew.-%) bzw. Glühverlust (29,4 Gew.-%) festgestellt.

Tab. 21: Verteilung der Parameter Wassergehalt und Glühverlust entlang des Säulenprofils, Säule ohne Sperrre (IBV3) und mit Sperrre (ISFK3) im Vergleich, Bewässerung mit Modellsickerwasser, für die Proben ober- bzw. unterhalb der Sperrsicht wurde jeweils ein Mittelwert gebildet

Versuchsbezeichnung	IBV0	ISFK0	IBV3	ISFK3	IBV0	ISFK0	IBV3	ISFK3					
Aufbau	ohne Sperre	mit Sperre	ohne Sperre	mit Sperre	ohne Sperre	mit Sperre	ohne Sperre	mit Sperre					
Bewässerung	LW		MSW		LW		MSW						
Parameter	Wassergehalt Gew.-%					Glühverlust* Gew.-%							
Ausgangsmaterial	18,0					22,8							
oberhalb der Sperre	19,5 ± 1,0	19,6 ± 0,4	18,1 ± 2,1	19,7 ± 2,1	25,2 ± 1,4	25,4 ± 1,0	24,1 ± 1,3	25,6 ± 1,7					
innerhalb der Sperre	-	23,5	-	23,2	-	29,3	-	29,4					
unterhalb der Sperre	21,0 ± 0,1	19,7 ± 1,1	19,8 ± 1,3	21,7 ± 0,7	26,8 ± 0,6	24,9 ± 1,3	25,2 ± 1,6	27,1 ± 0,6					

* der Glühverlust wurde bei 1050° C ermittelt und bezieht sich auf die Originalsubstanz, d.h. Gv – Wg entspricht der Definition des Parameters Glühverlust in der AbfAbIV (2001)

Eluate

pH-Wert

Die pH-Werte im Eluat liegen im alkalischen Bereich mit Werten um 11,6 (Abb. 40). Im Profil zeigt sich eine gleichmäßige Verteilung. Gegenüber dem Ausgangsmaterial hat eine geringfügige Abnahme stattgefunden. Die Salzzugabe (MSW) führte zu etwas geringeren pH-Werten im Eluat im Vergleich zu den Referenzversuchen mit Leitungswasser.

Leitfähigkeit und leichtlösliche Spezies (Cl, Na)

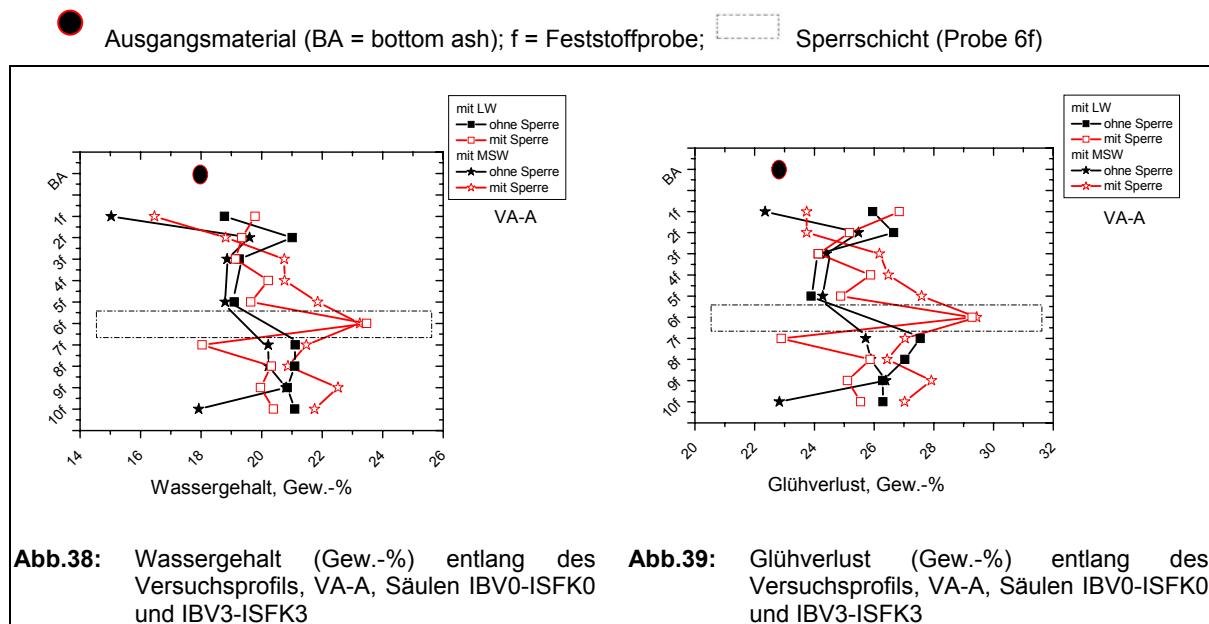
Im Vergleich zum Ausgangsmaterial zeigt sich auch für MSW-Versuche eine deutliche Abnahme der Eluatkonzentrationen (von 4,2 auf 0,8 mS/cm). Trotz der Zugabe von Salzen durch das MSW liegen die Werte für die Säulen mit MSW niedriger bzw. nur geringfügig höher im Vergleich zu den LW-Referenzsäulen (Abb. 41). Der Blindversuch weist im Eluat Leitfähigkeiten zwischen 0,8 – 0,9 mS/cm auf, wobei sich die kleineren Werte auf den mittleren Bereich beziehen. Für die Säule mit Sperrsicht nimmt die Leitfähigkeit im Eluat von der Oberfläche zur Basis hin zu (von ca. 0,8 bis 1 mS/cm). Jedoch zeigen sich im Vergleich zum Blindversuch v.a. unterhalb der Sperrsicht höhere Anteile leichtlöslicher Spezies.

Diese Entwicklung der Leitfähigkeit ist nicht auf die leichtlöslichen Spezies Cl und Na zurückzuführen (Abb. 42 und 43). Für beide Parameter, Cl und Na, wurden bzgl. der beiden MSW-Säulen höhere Konzentrationen analysiert als bei den LW-Referenzsäulen: für Cl ca. 50 – 85 mg/L und für Na ca. 15 – 45 mg/L. Der Versuch mit Sperrre zeigt zudem großteils höhere Cl- und Na-Konzentrationen, v.a. unterhalb der Sperrsicht. Dies gilt insbesondere für Na. Innerhalb der Sperrsicht lässt sich für Cl eine geringfügige Abreicherung, jedoch für Na eine Anreicherung beobachten.

Weitere Parameter

Die Ca-Konzentrationen im Eluat der MSW-Säulenproben liegen um 100 mg/L und sind damit vergleichbar mit dem LW-Blindversuch (Abb. 44). Generell sind die Werte niedriger als im Ausgangsmaterial (253 mg/L). Die beiden MSW-Versuche sind in ihrem Verteilungsmuster entlang des Säulenprofils vergleichbar. Unterschiede bestehen darin, dass für den Versuch mit Sperre eine geringfügige Anreicherung oberhalb und eine geringfügige Abreicherung innerhalb der Sperre vorliegen. Unterhalb der Sperre hingegen sind geringere Konzentrationen im Vergleich zum MSW-Blindversuch beobachtbar. Die SO₄-Eluatkonzentrationen (Abb. 45) der MSW-Säulen sind großteils höher im Vergleich zu den LW-Referenzsäulen (überwiegend zwischen 40 – 65 mg/L). Im Ausgangsmaterial wurde lediglich ein Wert von 10 mg/L ermittelt. Für den Versuch mit Sperre wurden insbesondere im Bereich der Sperrsicht höhere Konzentrationen im Vergleich zum Blindversuch festgestellt. Unterhalb der Sperre sind die Anteile jedoch ebenfalls geringer.

Die Bewässerung mit MSW wirkt sich kaum auf die Schwermetalle aus. Im Vergleich zu den Blindversuchen (mit LW und MSW) zeigt sich für beide Säulen mit Sperre (LW und MSW) eine Abreicherung an Cu und Mo innerhalb der Sperre (Abb. 46 und Abb. 47). Die Pb-Eluatkonzentrationen (Abb. 48) liegen überwiegend unterhalb der Bestimmungsgrenze (< 0,008 mg/L). Für den Parameter Zn (Abb. 49) ist für den MSW-Versuch mit Sperre bemerkenswert, dass innerhalb der Sperrsicht im Gegensatz zu den übrigen Säulenproben (max. 0,017 mg/L) eine vglw. hohe Zn-Konzentration (0,036 mg/L) gemessen wurde. Im Vergleich zum Ausgangsmaterial (0,23 mg/L) fand dennoch eine Abreicherung statt.



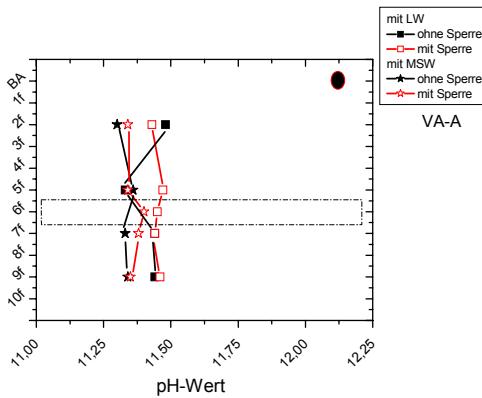


Abb.40: pH-Wert im Eluat entlang des Versuchsprofils, VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3

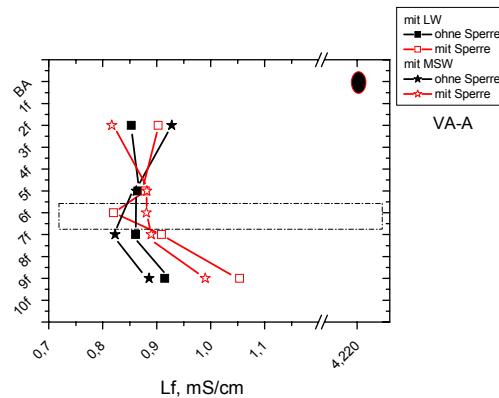


Abb.41: Leitfähigkeit im Eluat (mS/cm) entlang des Versuchsprofils, VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3

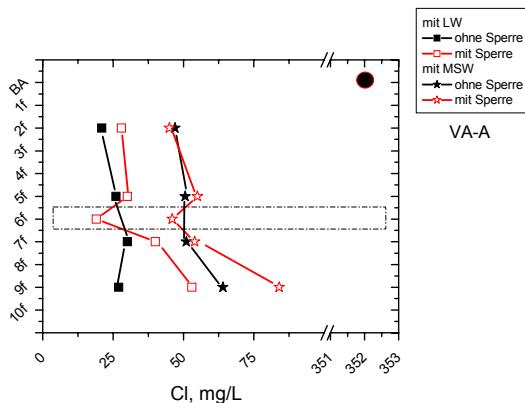


Abb.42: Cl-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3

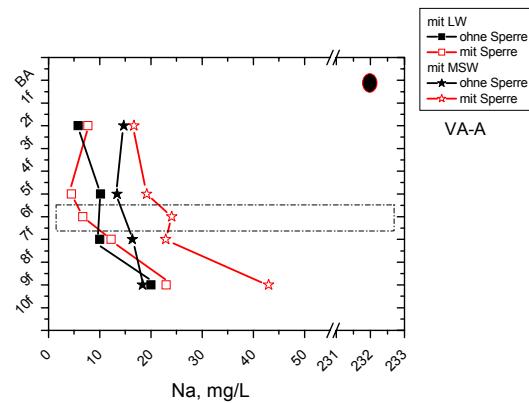


Abb.43: Na-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3

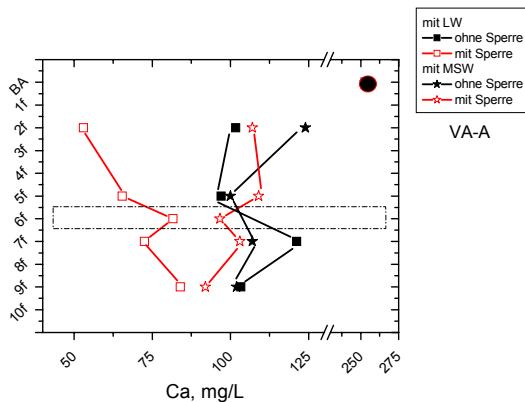


Abb.44: Ca-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3

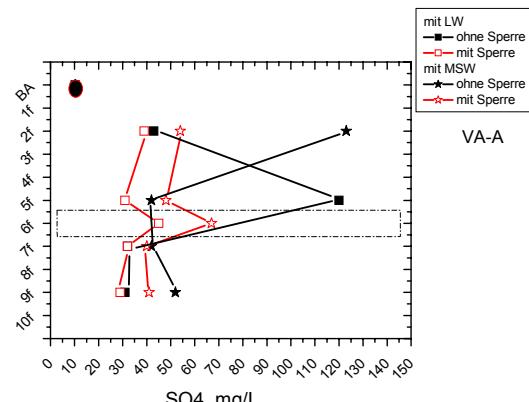
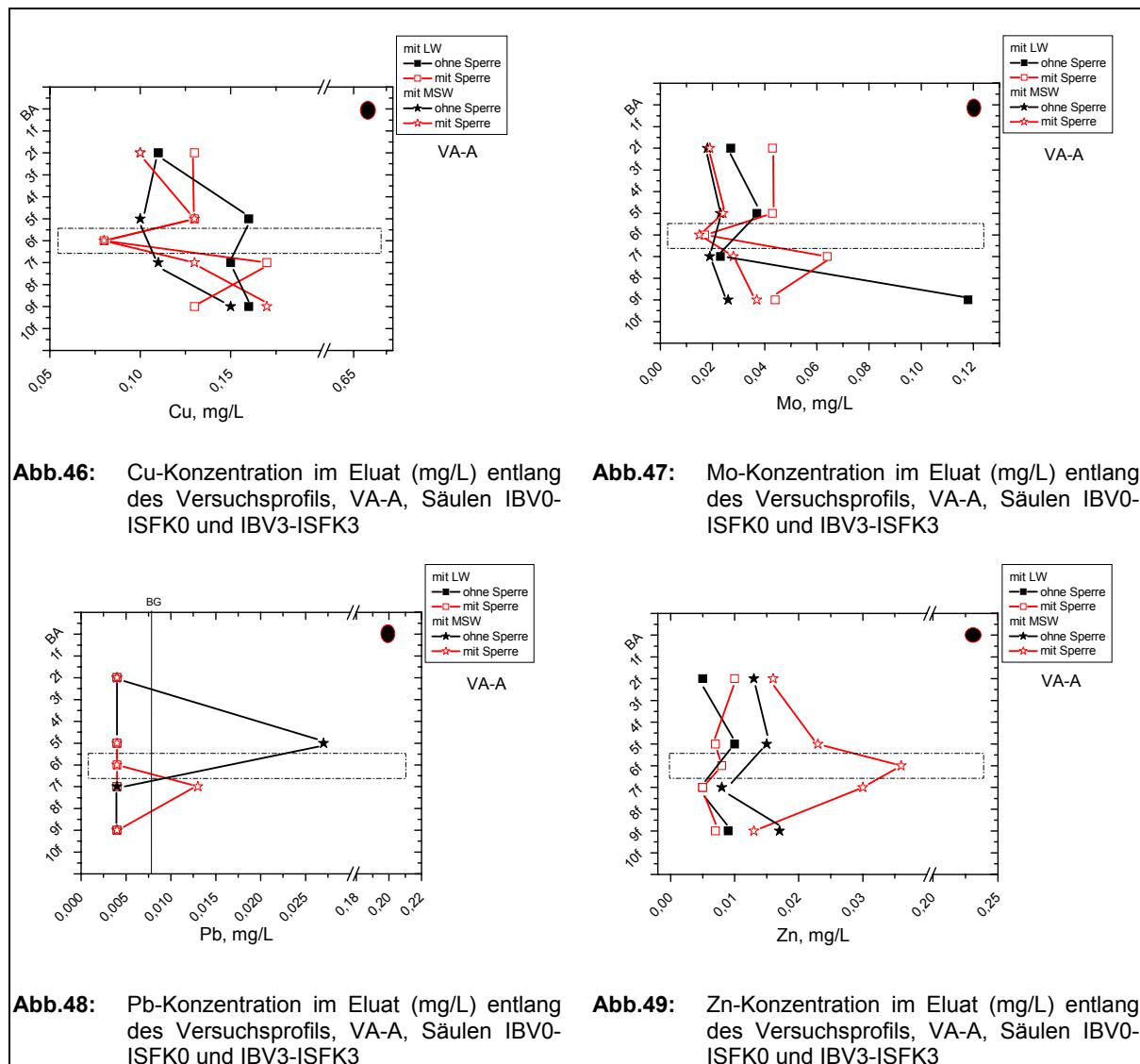


Abb.45: SO4-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A, Säulen IBV0-ISFK0 und IBV3-ISFK3



Sickerwasserentwicklung

Die Tabelle 22 gibt einen Überblick über die Wasserbilanz der MSW-Versuche.

Tab. 22: Bewässerungs- und Austragsmengen für die Versuche aus VA-A ohne (IBV3) und mit Sperre (ISFK3) im Vergleich, Bewässerung mit Leitungswasser

Versuchsbezeichnung	IBV0 ohne Sperre	ISFK0 mit Sperre	IBV3 ohne Sperre	ISFK3 mit Sperre
Versuchsanordnung	VA-A		VA-A	
Befüllung	Schlacke A		Schlacke A	
Bewässerung	Leitungswasser		Modellsickerwasser	
Dauer in Wochen	103		103	
Eingebaute Schlackemenge in kg	18,0	13,8	16,0	15,5
Bewässerungsmenge in L pro Monat	1,2	1,2	1,2	1,2
Bewässerungsmenge insgesamt in L	30,6	30,6	30,9	30,9
Austrag Sickerwasser in L	14,7	15,5	14,0	13,4
kumulierter Austrag in %	47,6	50,2	45,3	44,0
kumulierter Rückhalt in L pro kg Schlacke	1,30	1,55	1,51	1,60

Im Vergleich zu den LW-Referenzversuchen war bei einer kumulierten Bewässerungsmenge von 30,9 Liter der proz. Austrag an Sickerwasser geringer: für den Blindversuch 14,0 und für die Säule mit Sperre 13,4 L. Das L/S-Verhältnis ist mit 2,6 bis 2,9 z.T. deutlich höher im Vergleich zu den LW-Referenzversuchen. Die Berechnungen zum kumulierten Wasserrückhalt ergaben für die MSW-Versuche höhere Werte (bis 1,60 L/kg Schlacke). Auch hier ist das Wasserrückhaltevermögen für die Säule mit Sperrsicht größer.

Austrag an Sickerwasser

Es ist bemerkenswert, dass die Sickerwasserentwicklung der MSW-Versuche stärkeren Schwankungen unterworfen ist. Die Dokumentation des Sickerwasseraustrags zeigt, dass sich eine Salzzugabe in Form von Modellsickerwasser auf die Austragsmenge auswirkt. Es wurde in allen Fällen mit 300 mL pro Woche bewässert. Auffällig ist, dass für die MSW-Versuche tendenziell mit durchschnittlich 133 mL weniger Sickerwasser ausgetragen wurde als für die LW-Versuche mit durchschnittlich 152 mL (Abb. 50). Bezogen auf die MSW-Versuche wurde erst in einer Schlussphase, ab etwa 600 Versuchstagen, für den Blindversuch weniger Sickerwasser ausgetragen.

pH-Wert

Generell zeigen beide MSW-Versuche eine Abnahme des pH-Wertes von 11 auf 8,5 (Abb. 51). Für die Entwicklung des pH-Wertes können jedoch drei Phasen unterschieden werden. In einer ersten Phase - bis ca. 280 Tage - entsprechen die Werte im Sickerwasser aller vier Säulenversuche (MSW und LW) einander. In einer zweiten Phase - bis 550 Tage - liegen die pH-Werte für die LW-Versuche zwischen 9,2 und 10,0. Für die MSW-Versuche sind sie hingegen niedriger und liegen zwischen 8,6 und 9,6. Ausschließlich für die MSW-Versuche zeigt sich, dass innerhalb dieser Phase ab einer Versuchsdauer von 400 Tagen beim MSW-Versuch mit Sperre die pH-Werte im Sickerwasser deutlich höher sind als beim MSW-Blindversuch. In einer anschließenden letzten Phase bis Versuchsende entsprechen die Werte im Sickerwasser aller vier Säulenversuche wieder einander (um pH 8,5): die pH-Werte im Sickerwasser aus den MSW-Versuchen steigen leicht an, während sie im Sickerwasser aus den LW-Versuchen deutlich abfallen.

Leitfähigkeit und leichtlösliche Spezies (Cl, Na)

In der ersten Phase bis ca. 170 Versuchstage, wo die Auswaschung an leichtlöslichen Spezies dominiert, ist kein Unterschied zwischen den vier Säulenversuchen festzustellen (Abb. 52). In der Folgezeit zeigt sich, dass die Zugabe von Salzen mit dem MSW tendenziell höhere Leitfähigkeiten im Sickerwasser hervorruft. Nach 170 Tagen nimmt die Leitfähigkeit im Sickerwasser aus den MSW-Versuchen nur mehr geringfügig ab und weist höhere Werte zwischen 5 bis 10 mS/cm auf. Ähnlich wie beim Referenzversuch mit LW wurden für den

MSW-Versuch mit Sperre überwiegend salzreichere Sickerwässer erfasst. Jedoch fällt auf, dass die Zugabe von MSW bereits sehr viel früher (ab 150 Tagen) zu einer Differenzierung zwischen Blindversuch und Säule mit Sperre führt. Für die LW-Referenzversuche konnte dieser Trend nämlich erst nach 300 Tagen beobachtet werden.

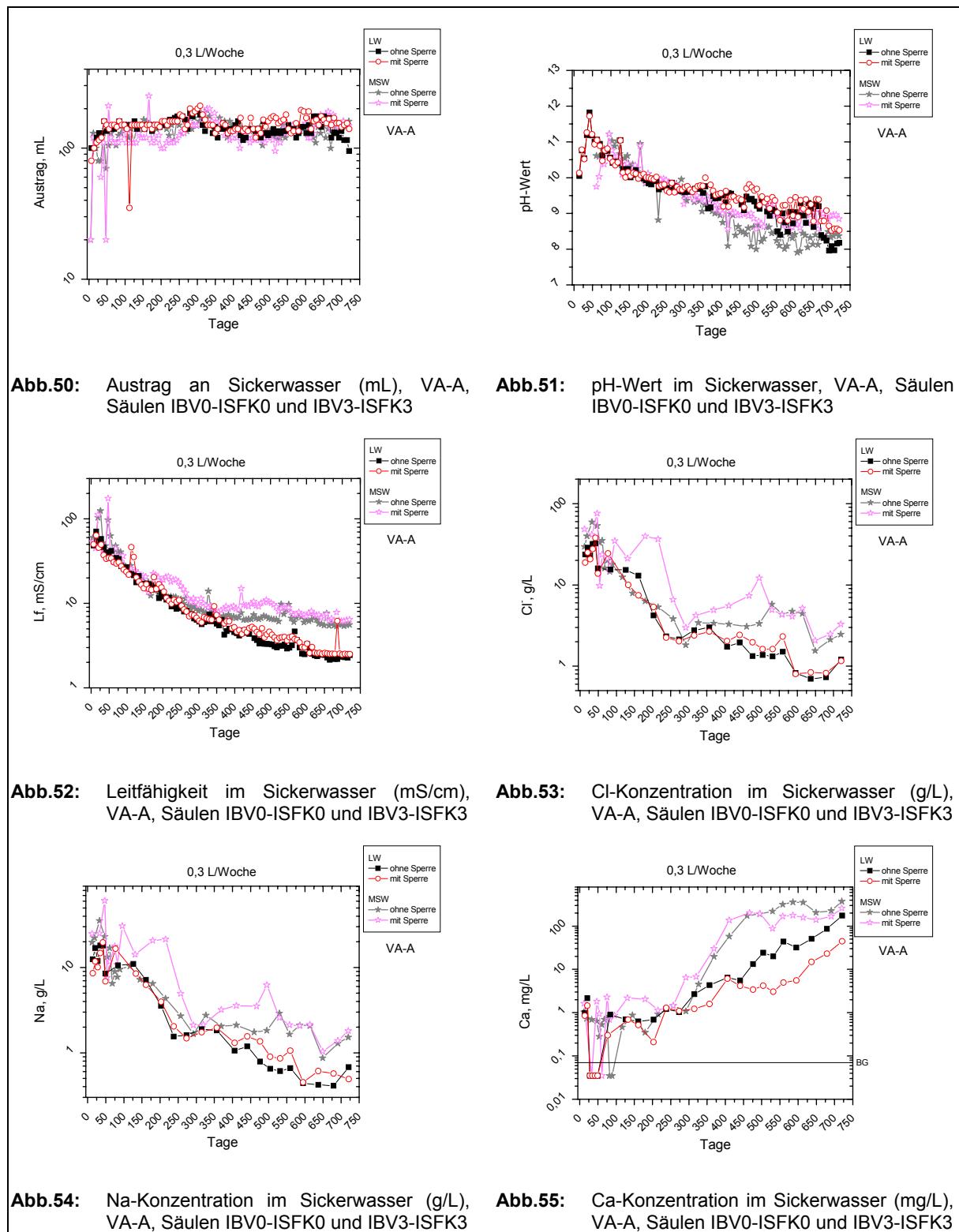
Der Konzentrationsverlauf der leichtlöslichen Spezies (Cl, Na) entspricht in etwa dem der Leitfähigkeit (Abb. 53 und 54). Auffällig sind wiederholte Spitzenwerte im Sickerwasser (10 – 100 mg/L), insbesondere für den Versuch mit Sperre. Der Einbau einer Sperrsicht macht sich für den MSW-Versuch mit einer starken Konzentrationserhöhung nach 75 Tagen für beide Parameter (Cl, Na) bemerkbar. Für die Leitungswasser-Referenzversuche wurden erst nach 400 Versuchstagen für die Säule mit Sperre konzentriertere Sickerwässer festgestellt.

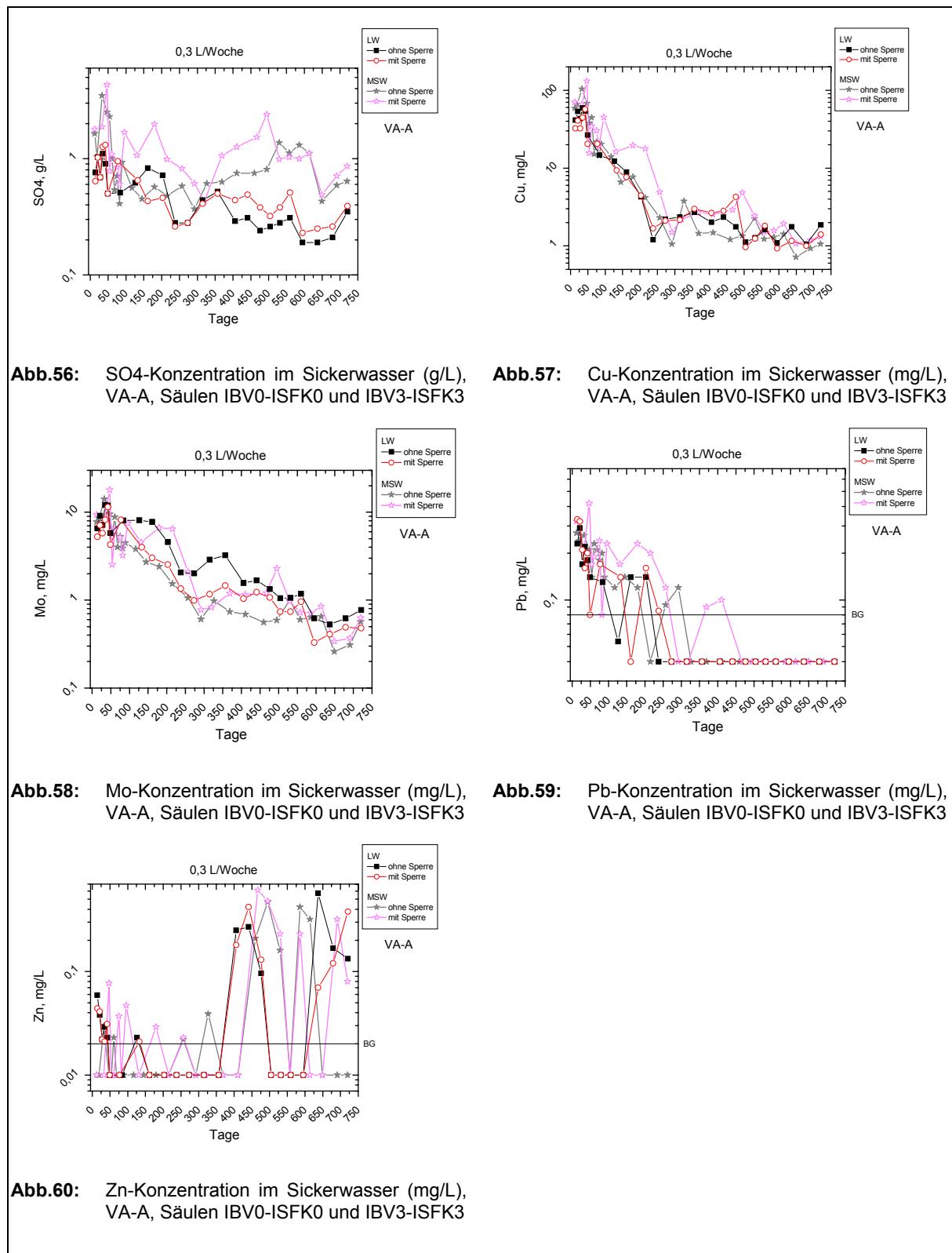
Weitere Parameter

Für Ca zeigt sich eine Zunahme der Konzentration mit fortschreitender Versuchsdauer (Abb. 55). Diese Entwicklung wurde auch für die LW-Referenzversuche beobachtet. Insgesamt ist der Anstieg für die MSW-Versuche ausgeprägter und der Kurvenverlauf ist z.T. viel steiler. Maximal werden Ca-Konzentrationen von 300 mg/L erreicht. Im Gegensatz zu den LW-Versuchen ist der Unterschied zwischen Blindversuch und Versuch mit Sperre weniger deutlich. Die Ca-Konzentrationen sind jedoch im Sickerwasser aus dem Versuch mit Sperre – analog den LW-Versuchen – geringer.

Durch die Zugabe von MSW ändert sich auch die SO₄-Konzentration im Sickerwasser (Abb. 56). Die Salzzugabe bewirkt, dass Konzentrationsunterschiede zwischen Blindversuch und Säule mit Sperrsicht z.T. viel deutlicher ausfallen. Im Vergleich zu den LW-Referenzversuchen werden hier höhere SO₄-Konzentrationen analysiert, wobei die Werte für den Versuch mit Sperre überwiegend höher sind. Es werden Maximalwerte bis 5 mg/L erreicht.

Die Zugabe von MSW macht sich jedoch für die Cu-Konzentration im Sickerwasser kaum bemerkbar (Abb. 57). Die Sickerwasserentwicklung ist mit den LW-Versuchen vergleichbar. Für Mo ist für beide Versuchsreihen (LW und MSW) eine Konzentrationsabnahme gegeben (Abb. 58). Aber im Gegensatz zu den Referenzversuchen mit Leitungswasser sind für die Versuche mit Modellsickerwasser die Mo-Konzentrationen im Sickerwasser aus dem Versuch mit Sperre (ISFK3) überwiegend höher als für den Versuch ohne Sperre (IBV3). Für den Parameter Pb (Abb. 59) wurden zu Versuchsbeginn bis etwa 470 Tage insbesondere für die MSW-Säule mit Sperre Werte bis 0,4 mg/L gemessen. In der Folgezeit lagen die Pb-Konzentrationen unterhalb der Bestimmungsgrenze (< 0,08 mg/L). Die Zn-Konzentrationen im Sickerwasser aus den Säulen beider Versuchsreihen bewegen sich in einem vergleichbaren Konzentrationsbereich (Abb. 60). Zu Versuchsende nach etwa 400 Tagen werden auch für MSW-Säulen zunehmend erhöhte Konzentrationen analysiert (> 0,1 mg/L).





Frachtenberechnung

Die Frachtenberechnung zeigt den summarischen Austrag an Einzelstoffen zu Versuchsende in Bezug zur Ausgangskonzentration. Die Elemente Cl, Na und zu gewissen Anteilen das Schwermetall Mo sind mit Austrägen von 10 bis 34 % am mobilsten (Tab. 23). Es ist bemerkenswert, dass trotz der Salzzugabe in Form von MSW insgesamt prozentual weniger austragen wurde. Für den Blindversuch wurden im Vergleich zum Säulenversuch mit Sperre -

analog den LW-Versuchen - Cl und Na stärker zurückgehalten. Für die Parameter Ca und SO₄ sowie Zn und Pb konnte durch die Salzzugabe in Form von MSW sogar eine Anreicherung innerhalb der Säule festgestellt werden. Das positive Vorzeichen besagt, dass innerhalb der Säule ein größerer Anteil an der jeweiligen Spezies zurückgehalten, als über das Sickerwasser ausgetragen wird. Die Zugabe von MSW wirkt sich jedoch nicht auf eine Anreicherung des Parameters Cu innerhalb der Säule aus.

Tab. 23: Zusammenfassung der Frachtenberechnung, Abreicherung bzw. Anreicherung in % bezogen auf die Ausgangsmenge, Blindversuch der LW- und MSW-Versuche und LW- und MSW-Versuche mit Sperre im Vergleich

Versuchsbezeichnung	IBV0 ohne Sperre	ISFK0 mit Sperre	IBV3 ohne Sperre	ISFK3 mit Sperre
Versuchsanordnung	VA-A		VA-A	
Bewässerung	Leitungswasser		Modellsickerwasser	
Dauer in Wochen	103		103	
Parameter	proz. Abreicherung		proz. Ab-/Anreicherung	
Cl	-33,2	-42,2	-31,6	-34,0
SO ₄	-1,6	-2,2	+3,9	+2,8
Na	-23,5	-31,9	-26,0	-46,1
Ca	-0,011	-0,005	+0,5	+0,5
Cu	-0,14	-0,15	-0,06	-0,08
Mo	-13,5	-11,4	-7,6	-10,4
Pb	-0,003	-0,004	+0,8	+0,8
Zn	-0,001	-0,001	+0,1	+0,1

4.3.2 Wirkung von salzreichen Lösungen – erweiterte Testfelder Eberstetten

Im Vordergrund stehen die erweiterten Testfelder EB3 und EB4, beide mit Sperrsicht. Erarbeitet wurde dabei, inwieweit sich die Zugabe salzreicher Lösungen in Form von Deponiesickerwasser (SW) und Konzentrat aus der Umkehrosmose (UO) auf die Feststoff- und Sickerwasserentwicklung auswirkt. Beide Testfelder waren dem natürlichen Niederschlag ausgesetzt. Das Testfeld EB3 wurde nach sechs Monaten Versuchszeit zusätzlich mit Sickerwasser aus der Deponie bewässert und das Testfeld EB4 mit Konzentrat aus der Umkehrosmose (Zusammensetzung vgl. Tab. T-2, tabellarischer Anhang). Die Bewässerungsmenge betrug 50 Liter pro Woche.

Im Folgenden sind Wassergehalt, Glühverlust und ausgewählte Eluatparameter zu Versuchsbeginn (Ausgangsmaterial) und zu Versuchsende (Ergebnisse der Bohrkampagne III), die Konzentrationsverläufe im Sickerwasser und der summarische Frachtenaustrag bis zu Versuchsende kurz dargestellt.

Wassergehalt und Glühverlust

Die Tabelle 24 zeigt die Werte für Wassergehalt und Glühverlust (1050°C) der Feststoffproben aus der dritten Bohrkampagne (BK III) für die Testfelder Eberstetten. Im Vergleich zum Ausgangsmaterial (15,1 bzw. 18,8 Gew.-%) weisen die Feststoffproben aus den

Bohrkernproben der Testfelder EB3 und EB4 mit fortschreitender Versuchsdauer z.T. viel höhere Wassergehalte bzw. Glühverluste mit max. 23,7 bzw. 29,9 Gew.-% auf (Abb. 61 und 62). Das Verteilungsmuster im Bereich der Sperrsicht ist vergleichbar mit dem von Testfeld EB2 (Testfeld mit Sperre, ausschließlich Niederschlag). Insbesondere die Zugabe von Deponiesickerwasser erhöht das Wasserrückhaltevermögen im Bereich der Sperrsicht, d.h. für das Testfeld EB3 werden unmittelbar oberhalb der Sperrsicht die höchsten Wassergehalte bzw. Glühverluste festgestellt (23,7 bzw. 29,9 Gew.-%). Es ist auffällig, dass sich im Bereich unterhalb der Sperre für die Testfelder EB3 (Sperre, SW) und EB4 (Sperre, UO) besonders trockene Verhältnisse (min. 17,5 bzw. 22,8 Gew.-%) zeigen.

Tab. 24: Verteilung der Parameter Wassergehalt und Glühverlust entlang des Versuchsprofils aus der BK III, Testfelder Eberstetten mit Sperre und zusätzlichem Beitrag von Salzen: EB3 – Deponiesickerwasser und EB4 – Konzentrat aus der Umkehrosmose, für die Proben ober- bzw. unterhalb der Sperrsicht wurde jeweils ein Mittelwert gebildet

Versuchsbezeichnung	EB1	EB2	EB3	EB4	EB1	EB2	EB3	EB4
Aufbau	ohne Sperre	mit Sperre	mit Sperre	mit Sperre	ohne Sperre	mit Sperre	mit Sperre	mit Sperre
Bewässerung	NS [#]	NS [#]	NS [#] , SW	NS [#] , UO	NS [#]	NS [#]	NS [#] , SW	NS [#] , UO
Parameter	Wassergehalt Gew.-%				Glühverlust* Gew.-%			
Ausgangsmaterial	15,1				18,8			
oberhalb der Sperre	19,0 ± 0,2	22,6 ± 2,5	20,2 ± 3,5	20,5 ± 2,0	24,1 ± 0,2	28,1 ± 4,0	25,6 ± 4,2	26,4 ± 2,8
innerhalb der Sperre	-	21,7	22,1	20,3	-	27,4	28,2	26,5
unterhalb der Sperre	20,1	20,6 ± 0,9	18,9 ± 1,3	18,6 ± 1,6	26,7	26,3 ± 0,8	24,1 ± 1,9	25,7 ± 1,8

* der Glühverlust wurde bei 1050° C ermittelt und bezieht sich auf die Originalsubstanz, d.h. Gv – Wg entspricht der Definition des Parameters Glühverlust in der AbfAbIV (2001)

[#] Niederschlag

Eluate

pH-Wert

Die pH-Werte im Eluat der Feststoffproben der Testfelder EB3 (Sperre, SW) und EB4 (Sperre, UO) liegen zwischen 11,0 und 11,7 (Abb. 63). Im Vergleich zum Ausgangsmaterial (pH 10,7) sind die Feststoffproben stärker alkalisch. Die Bewässerung mit Umkehrosmose für das Testfeld EB4 mit Sperre bewirkt im Vergleich zum Blindversuch, dass hier insbesondere an der Basis im Eluat der Feststoffproben geringere pH-Werte (min. pH 11,1) gemessen werden. Im Gegensatz zu Testfeld EB2 (Sperre, keine Salzzugabe) bleibt an der Testfeldoberfläche der Felder EB3 und EB4 der pH-Wert hoch. Die pH-Werte im Eluat der top- und basisnächsten Proben fallen hier nicht aus dem Rahmen.

Leitfähigkeit und leichtlösliche Spezies (Cl, Na)

Im Vergleich zum Ausgangsmaterial (2,5 mS/cm) zeigt sich, trotz Zugabe von salzreichen Lösungen für EB3 und EB4, eine Verringerung der Leitfähigkeiten in den Eluatproben (Abb. 64). Für beide Testfelder wurde eine tendenzielle Anreicherung von der Oberkante zur Basis hin beobachtet (von max. 1,4 bis 2,4 mS/cm). Die niedrigsten Konzentrationen wurden

allerdings innerhalb der Sperrsicht analysiert (min. 1,2 mS/cm). Es ist bemerkenswert, dass für das Testfeld EB4 (Sperre, UO) insgesamt die höchsten Werte für die Leitfähigkeit im Eluat gemessen wurden und für das Testfeld EB3 (Sperre, SW) die geringsten.

Für den Parameter Cl lässt sich für beide Testfelder EB3 und EB4 mit Sperrsicht ein vergleichbarer Trend beobachten (Abb. 65). Die Cl-Konzentrationen nehmen von der Oberkante zur Basis zu. Für das Testfeld EB4 wird hier sogar annähernd die Cl-Konzentration im Eluat des Ausgangsmaterials erreicht (495 mg/L). Der Trend wird von geringeren Cl-Konzentrationen innerhalb der Sperrsicht unterbrochen. Generell wurden für das Testfeld EB4 für die Parameter Cl und Na die höchsten (max. 490 und 210 mg/L) und für das Testfeld EB3 die geringsten (max. 200 und 110 mg/L) Eluatkonzentrationen im Vergleich zu den übrigen Testfeldern analysiert. Für den Parameter Na zeigen sich jedoch für das Testfeld EB4 unterhalb der Sperre niedrigere Konzentrationen (ca. 210 mg/L) im Vergleich zum Blindversuch (Abb. 65). Für das Testfeld EB3 wurden speziell unterhalb der Sperrsicht sehr geringe Na-Konzentrationen (max. 110 mg/L) analysiert.

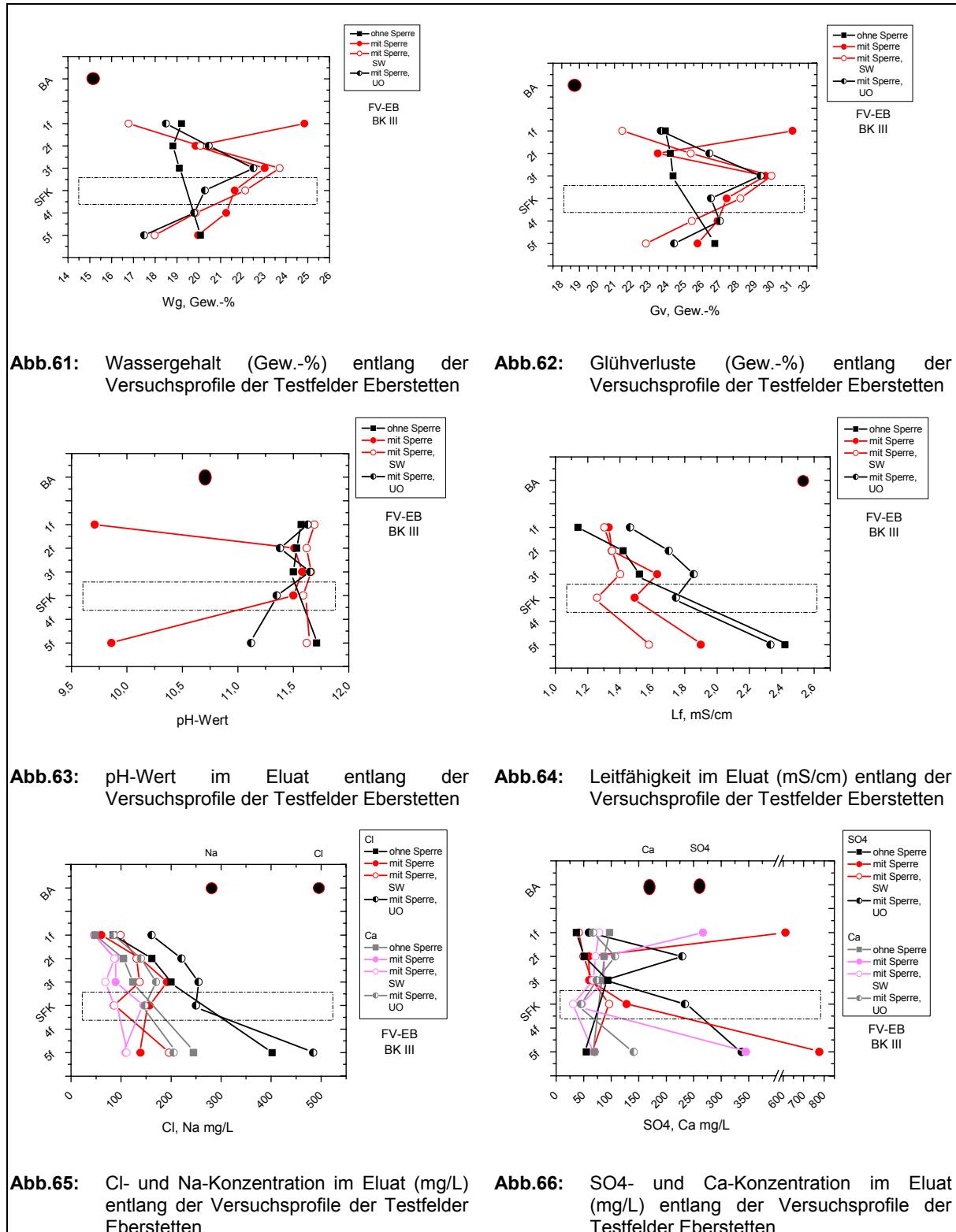
Weitere Parameter

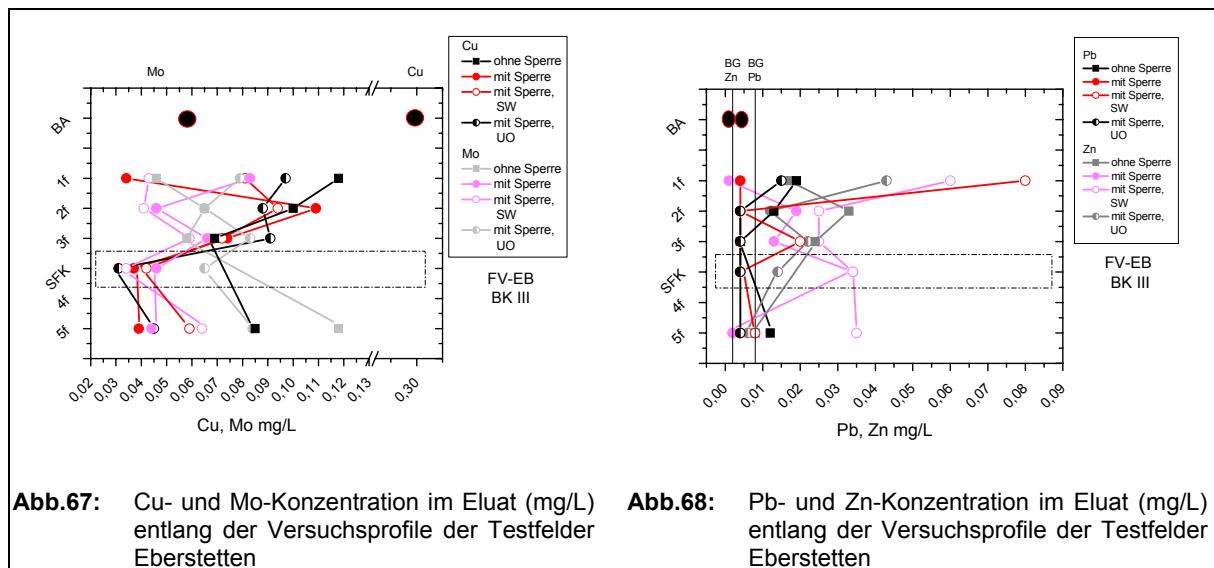
Die Testfelder EB3 und EB4 zeigen für den Faktor Ca nur eine Konzentrationsbreite zwischen 30 und 150 mg/L (Abb. 66). Speziell innerhalb der Sperrsicht werden die niedrigsten Konzentrationen festgestellt. Für das Testfeld EB4 (Sperre, UO) werden entlang des Versuchsprofils nur geringfügig erhöhte Werte analysiert.

Für den Parameter SO₄ (Abb. 66) zeigen sich jedoch durch die Zugabe von Konzentrat aus der Umkehrosmose (4,6 g/L) für das Testfeld EB4 vergleichsweise erhöhte Werte (max. 340 mg/L). Bezogen auf die Schwermetalle Cu und Mo (beide Abb. 67) sowie Pb und Zn (Abb. 68) lässt sich keine Wirkung durch die Bewässerung mit salzreichen Lösungen erkennen. Für Cu zeigt sich für die Testfelder mit Sperre deutlich, dass im Verlauf des Profils innerhalb der Sperrsicht die niedrigsten Konzentrationen vorliegen (min. 0,03 mg/L). Im Vergleich zum Blindversuch sind die Cu-Konzentrationen unterhalb der Sperre niedriger. Für den Parameter Pb wurden lediglich für den Blindversuch in Bohrproben der dritten Bohrkampagne Eluatkonzentrationen bis 0,02 mg/L gemessen. Ansonsten liegen die Pb-Konzentrationen unterhalb der Bestimmungsgrenze (< 0,008 mg/L). Für den Parameter Zn ist auffällig, dass für alle Feldversuche mit zunehmender Versuchszeit die Eluatkonzentrationen zunehmen. Nach der dritten Bohrkampagne wurden höhere Zn-Konzentrationen als im Ausgangsmaterial (0,001 mg/L) analysiert. Insbesondere das Testfeld EB3 (Sperre, SW) zeigt die höchste Zn-Konzentration im Eluat der Bohrproben (max. 0,06 mg/L).



Ausgangsmaterial (BA = bottom ash); f = Feststoffprobe; Sperrsicht (SFK)





Sickerwasserentwicklung

Die Tabelle 25 zeigt eine Zusammenfassung der Wasserbilanz der Testfelder Eberstetten. Die kumulierte Bewässerungsmenge lag zu Versuchsende bei 13.500 L/10m² und für die Testfelder EB3 und EB4, mit zusätzlicher künstlicher Bewässerung, bei 16.800 L/10. Der prozentuale Austrag für das Testfeld EB3 mit Sperre und Deponiesickerwasser betrug 11,0 % und für das Testfeld EB4 mit Sperre und Umkehrosmosekonzentrat 14,2 %. Damit liegen sie höher im Vergleich zum Blindversuch (10,0 %). Das L/S-Verhältnis liegt für EB3 bei 0,58 L/kg und für EB4 bei 0,62 L/kg und damit in einem vergleichbaren Bereich zum Blindversuch (0,65 L/kg). Die eingebauten Schlackemengen sind unterschiedlich. Bezogen auf 1 kg Schlacke ist der geschätzte Wasserrückhalt mit ca. 0,33 Liter für alle Testfelder ungefähr gleich hoch anzusetzen, zumal die Sickerwassermengen nicht kontinuierlich erfasst werden konnten (vgl. Kap. 3.2.2). Der Rückhalt ist für die Testfelder in erster Linie als qualitativer Vergleich untereinander zu sehen.

Tab. 25: Bewässerungs- und Austragsmengen für die Testfelder Eberstetten mit Sperre und zusätzlichem Beitrag von Salzen: EB3 – Deponiesickerwasser und EB4 – Konzentrat aus der Umkehrosmose

Versuchsbezeichnung	EB1 ohne Sperre	EB2 mit Sperre	EB3 mit Sperre	EB4 mit Sperre
Versuchsanordnung	Testfelder Eberstetten			
Befüllung	Schlacke A			
Dauer in Wochen	102			
Bewässerung	NS	NS	NS, SW	NS, UO
Eingebaute Schlackemenge in kg	35.200	37.300	46.500	40.500
Bewässerungsmenge in L pro Monat	120 – 1.120	120 – 1.120	320 – 1.320	800 – 1.320
Bewässerungsmenge insgesamt in L pro 10m ²	13.500	13.500	16.800	16.800
Austrag Sickerwasser in L	1.342	1.785	1.778	2.300
kumulierter Austrag in %	10,0	13,3	11,0	14,2
kumulierter Rückhalt in L pro kg Schlacke	0,59	0,55	0,56	0,60

Austrag an Sickerwasser

Über die ersten sechs Monate wurden die Sickerwassermengen nicht erfasst. In der Folgezeit wurden die Mengen abgeschätzt, da die maximale Erfassungsmenge pro Woche etwa 40 Liter betrug (Abb. 69). Die Ergebnisse zur Entwicklung der Sickerwassermenge sind daher für dieses Kapitel von untergeordneter Bedeutung. Die Näherungswerte wurden für die Erstellung der Wasserbilanz und für die Frachtenberechnung herangezogen.

pH-Wert

Die zusätzliche Zugabe von SW oder UO-Konzentrat wirkt sich nicht merklich auf die Entwicklung des pH-Werts im Sickerwasser aus (Abb. 70). Der pH-Wert im Deponiesickerwasser und im UO-Konzentrat liegt um 8, so dass hierdurch der pH-Wert in den Sickerwässern aus den Testfeldern nicht signifikant verändert wird.

Leitfähigkeit und lösliche Spezies (Cl, Na)

Die Zugabe von salzreichen Lösungen wirkt sich aber auf die leichtlöslichen Salze im Sickerwasser aus (Abb. 71). Der Eintrag der Leitfähigkeitsanteile nach 180 Tagen über das Deponiesickerwasser (Leitfähigkeit ~ 15 mS/cm) für das Testfeld EB3 wirkt sich unmittelbar aus. Bis zu einer Versuchsdauer von 320 Tagen sind die Leitfähigkeiten im Sickerwasser aus dem Testfeld EB3 am höchsten (30 – 60 mS/cm). Die Salzzugabe mittels UO-Konzentrat (Leitfähigkeit ~ 30 mS/cm) für das Testfeld EB4 mit Sperre ist insbesondere ab einer Versuchsdauer von 250 Tagen zu erkennen. Im Vergleich zum Blindversuch und zum Testfeld EB2 (Sperre, keine Salzzugabe) ist die Leitfähigkeit ab diesem Zeitpunkt im Sickerwasser aus EB4 im Mittel (25 mS/cm) deutlich erhöht, aber auch im Sickerwasser aus EB3 (Sperre, SW) leicht erhöht (im Mittel um 20 mS/cm).

Die Leitfähigkeit setzt sich aus vielen Einzelbeiträgen zusammen. Die Konzentrationsbeiträge von Cl und Na liegen im Bereich von 1 bis 20 g/L (Abb. 72 und 73). Die Sickerwasserentwicklung der Parameter Cl und Na für die Testfelder EB3 und EB4 ist vergleichbar mit der Entwicklung der Leitfähigkeit. Es ist bemerkenswert, dass für das Testfeld EB4 bereits zu Beginn der Sickerwassererfassung (ab 50 Tagen) die Cl- und Na-Konzentrationen vglw. hoch sind (ca. 13 und 7 mg/L). Die Salzzugabe bewirkt, dass die Cl- und Na-Konzentrationen für dieses Testfeld über den gesamten Versuchszeitraum hoch bleiben und zu Versuchsende im Bereich von 10 (Cl) und 5 (Na) mg/L liegen.

Weitere Parameter

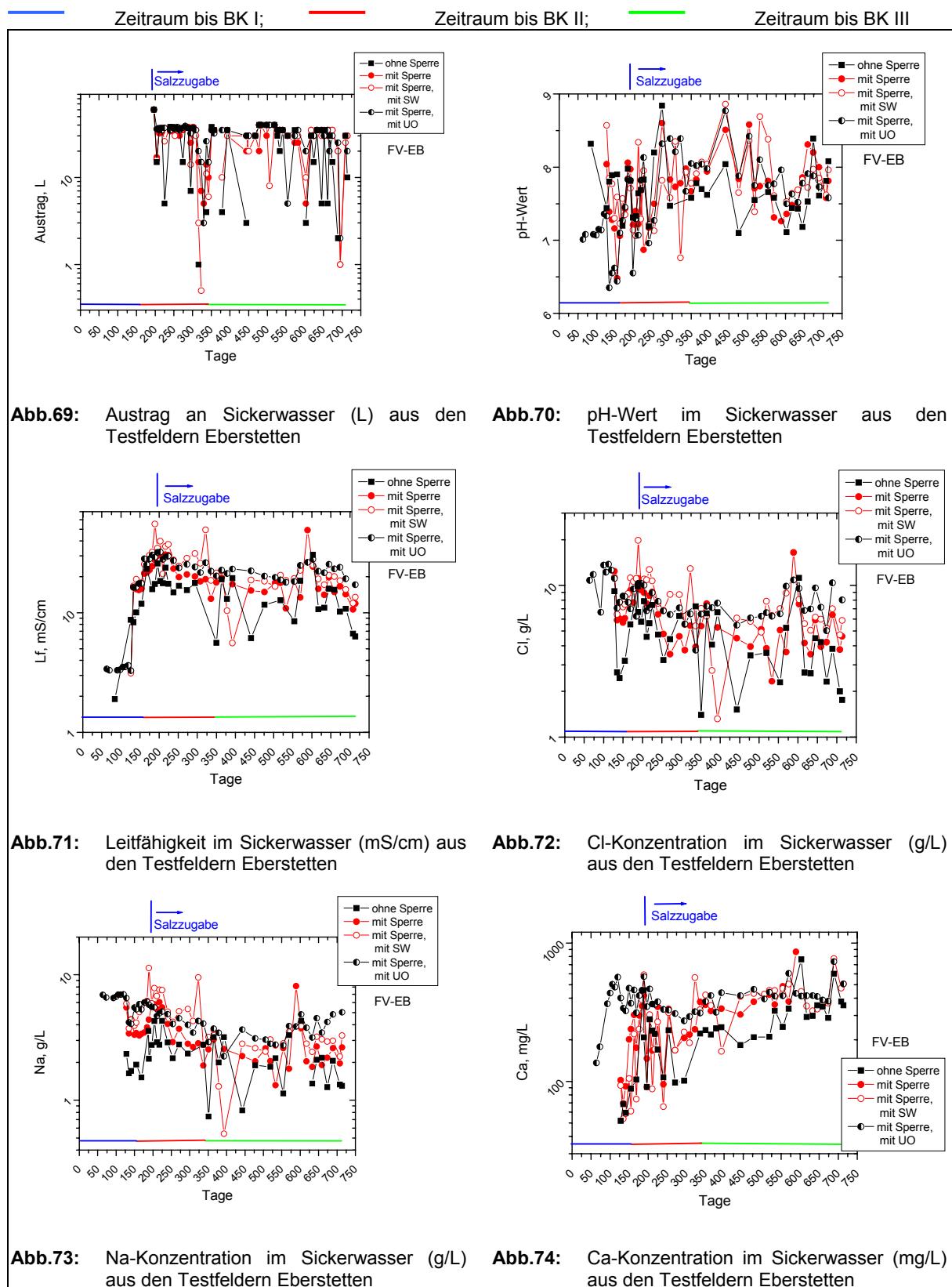
Die Ca-Konzentrationen (Abb. 74) im Sickerwasser aus dem Testfeld EB3 (Sperre, SW) nehmen von Beginn an tendenziell zu (von ca. 54 auf 500 mg/L). Die Salzzugabe hat kaum einen Einfluss auf diesen Trend, da die Entwicklung auch für den Blindversuch beobachtet wurde. Die Ca-Konzentrationen sind jedoch höher im Vergleich zum Blindversuch. Für das

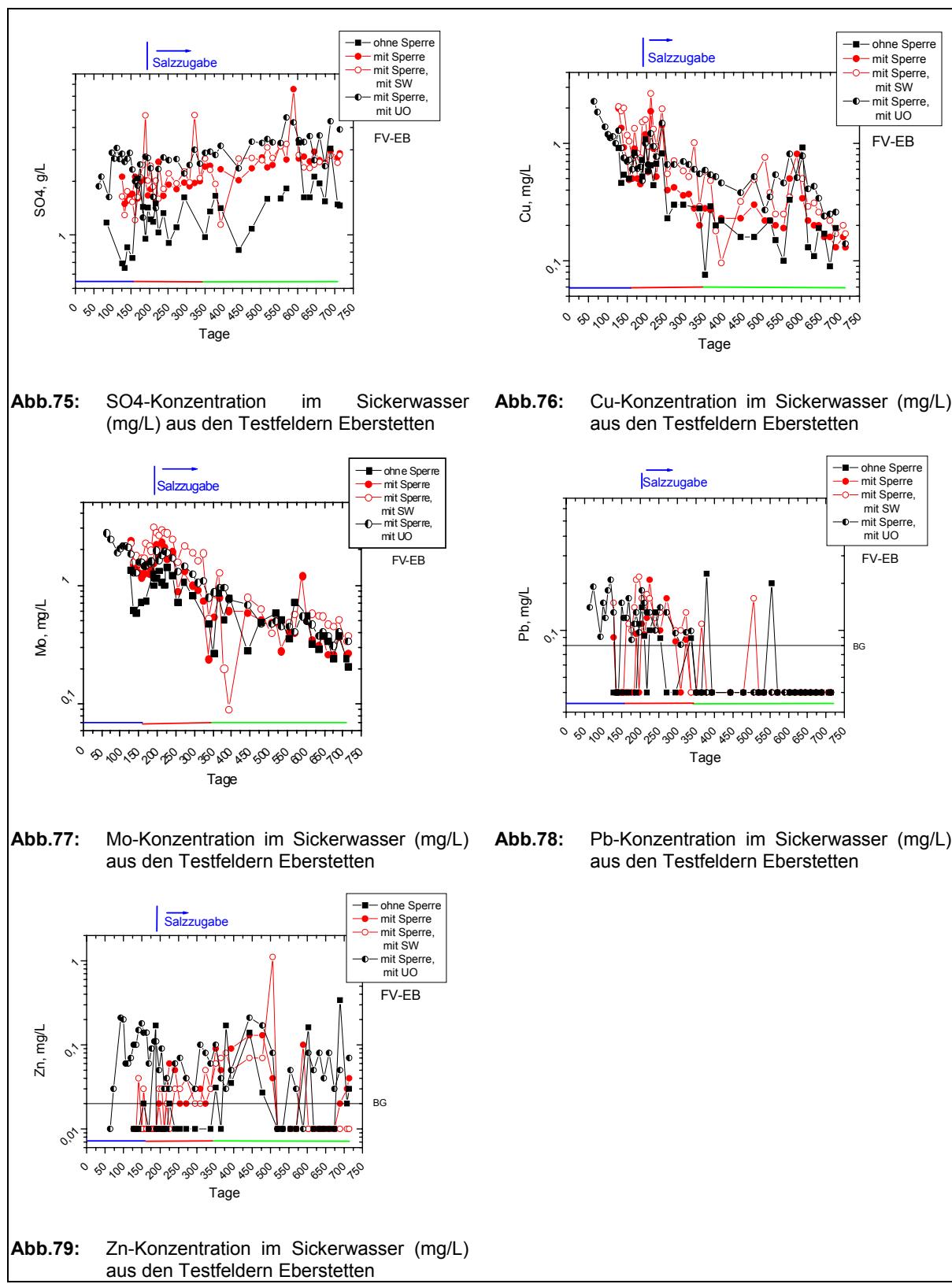
Testfeld EB4 sind die Ca-Konzentrationen bereits zu Beginn (ab 75 Tagen) sehr hoch (300 – 600 mg/L) und ändern sich kaum mit fortschreitender Versuchsdauer. Zu Versuchsende nach 720 Tagen liegen die Ca-Konzentrationen im Sickerwasser aus den vier Testfeldern in einem ähnlichen Konzentrationsbereich zwischen 300 – 500 mg/L.

Bezogen auf den Parameter SO₄ zeigt sich für die Testfelder EB3 und EB4 - analog dem Blindversuch - eine geringfügige Konzentrationszunahme (von ca. 1 auf 5 mg/L) mit fortwährender Versuchsdauer (Abb. 75). Wiederum wurden von Beginn an für das Testfeld EB4 (Sperre, UO) die höchsten Konzentrationen verzeichnet. Für das Testfeld EB3 (SW) sind die SO₄-Konzentrationen etwas geringer und liegen in einem ähnlichen Bereich wie für das Testfeld EB 2 (mit Sperre, ausschließlich Niederschlag).

Bezüglich der Parameter Cu (Abb. 76) und Mo (Abb. 77) zeigt sich auch für die Testfelder EB3 sowie EB4 - ähnlich den Versuchen ohne Salzzugabe (Blindversuch und EB2) - eine starke Konzentrationsabnahme im Versuchsverlauf (Abb. 76). Insgesamt bewirkt aber die Zugabe von SW und UO, dass hier ab einer Versuchsdauer von 250 Tagen im Sickerwasser deutlich höhere Cu-Konzentrationen als ohne Salzzugabe analysiert wurden (ca. 0,7 mg/L). Bezogen auf den Parameter Mo wurden insbesondere im Sickerwasser aus dem Testfeld EB3 (Sperre, SW) generell hohe Konzentrationen gemessen (ca. 0,4 – 3 mg/L).

Für den Parameter Pb (Abb. 78) wurden lediglich im ersten Versuchsjahr Pb-Konzentrationen im Sickerwasser im Bereich zwischen 0,1 bis 0,2 mg/L analysiert, danach lagen die Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze (< 0,08 mg/L). Bezogen auf den Faktor Zn (Abb. 79) wurden für das Testfeld EB 4 (Sperre, UO) zu Versuchsbeginn vglw. hohe Zn-Sickerwasserkonzentrationen gemessen (max. 0,2 mg/L). Bis zum Versuchsende nahmen die Zn-Konzentrationen tendenziell ab und lagen in einem Bereich zwischen 0,05 – 0,08 mg/L. Für das Testfeld EB3 (Sperre, SW) wurden meist Zn-Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze (0,02 mg/L) festgestellt. Nach 200 bis 500 Versuchstage wurden Werte zwischen 0,03 – 0,08 mg/L und ein einzelner Spitzenwert mit 1,1 mg/L erreicht.





Frachtenberechnung

Aufgrund näherungsweise bestimmter Sickerwassermengen über die ersten acht Monate Laufzeit, ist der berechnete Frachtaustrag nur als Näherungswert zu betrachten (Tab. 26). Für das Testfeld EB3 (Sperre, SW) wurden insgesamt etwa 1,5 Prozent des Cl-Gehalts und 0,3 Prozent des Na-Gehalts ausgetragen. Für das Testfeld EB4 (Sperre, UO) zeigt sich die

Wirkung der Salzzugabe. Innerhalb des Testfeldes wurden mehr an leichtlöslichen Spezies (Cl, SO₄, Na) zurückgehalten, als über das Sickerwasser ausgetragen wurden (positives Vorzeichen). Der Austrag an Schwermetallen ist für beide Testfelder vernachlässigbar gering.

Tab. 26: Zusammenfassung der Frachtenberechnung, Abreicherung bzw. Anreicherung in % bezogen auf die Ausgangsmenge, für die Testfelder Eberstetten mit Sperre und zusätzlichem Beitrag von Salzen: EB3 – Deponiesickerwasser und EB4 – Konzentrat aus der Umkehrosmose

Versuchsbezeichnung	EB1 ohne Sperre	EB2 mit Sperre	EB3 mit Sperre	EB4 mit Sperre
Versuchsanordnung	Testfelder Eberstetten			
Dauer in Wochen	102			
Bewässerung	NS	NS	SW, NS	UO, NS
Parameter	Proz. Abreicherung	Proz. Ab-/Anreicherung		
Cl	-1,89	-2,85	-1,5	+3,7
SO ₄	-0,24	-0,50	-0,3	+0,7
Na	-0,59	-1,00	-0,31	+0,25
Ca	-0,006	-0,011	-0,004	-0,005
Cu	-0,0003	-0,0004	-0,0003	-0,0004
Mo	-0,16	-0,25	-0,20	-0,06
Pb	-0,0001	-0,0002	+0,0002	+0,0005
Zn	-0,00001	-0,00002	+0,0001	+0,0002

4.3.3 Wirkung von künstlicher Bewässerung – Lysimeter Raindorf

Die beiden Großlysimeter in Raindorf, ein Versuch ohne Sperre (Blindversuch) und einer mit Sperre, wurden ausschließlich künstlich bewässert. Mit einem Kunststoffdeckel wurden die Lysimeter vor Niederschlagszutritt geschützt. In einer Anfangsphase bis zum Zeitpunkt der ersten Bohrkampagne (Laufzeit 5 Monate) wurden die beiden Lysimeter mit Leitungswasser (Menge 50 Liter/Woche) bewässert. Damit wurde eine Vergleichsbasis mit den anderen Feldversuchen geschaffen. Danach wurde die Bewässerungsmenge auf 10 Liter pro Woche verringert und zugleich von Leitungswasser auf Modellsickerwasser (Zusammensetzung vgl. Tab. T-1, tabellarischer Anhang) umgestellt. Nach 10 Monaten wurde der Modus auf die doppelte Bewässerungsmenge in doppelter Zeiteinheit (20 Liter/2 Wochen) umgestellt, damit eine größere Menge für eine gleichmäßige Bewässerung der Lysimeter zur Verfügung stand. Der Salzgehalt der Lösungen blieb dabei gleich. Die Gesamtaufzeit bis zur dritten Bohrkampagne betrug 719 Tage. Danach wurden weiterhin alle 14 Tage Sickerwasserproben gezogen und chemisch analysiert. Nach 830 Tagen wurde die Bewässerungsart von Modellsickerwasser auf Leitungswasser umgestellt. Hiermit sollte untersucht werden, inwiefern sich das Fehlen von Salzen auf die weitere Feststoff- und Sickerwasserentwicklung auswirkt, z.B. ob sich die an den Kornoberflächen angelagerten Salzverkrustungen zurückbilden oder stabil bleiben. Der beobachtete Versuchszeitraum betrug insgesamt 910 Tage.

Im Folgenden sind Wassergehalt, Glühverlust und ausgewählte Eluatparameter zu Versuchsbeginn (Ausgangsmaterial), zum Zeitpunkt der jeweiligen Bohrkampagnen

(Ergebnisse der Bohrkampagne I und II) und zu Versuchsende (Ergebnisse der Bohrkampagne III) und der summarische Frachtenaustrag innerhalb von 719 Tagen dargestellt. Die Konzentrationsverläufe im Sickerwasser beziehen sich auf einen Zeitraum von 910 Tagen.

Wassergehalt und Glühverlust

Die Tabelle 27 zeigt die Werte für Wassergehalt und Glühverlust (1050°C) für die Bohrproben der dritten Bohrkampagne der beiden Lysimeter in Raindorf.

Im Vergleich zum Ausgangsmaterial (10,1 bzw. 14,9 Gew.-%) weisen die Feststoffproben aus den Bohrkernproben der drei Bohrkampagnen großteils deutlich höhere Wassergehalte und Glühverluste (bis max. 21,5 bzw. 27,5 Gew.-%) auf (Abb. 80 und 81). Für den Blindversuch nehmen die Werte für Wassergehalt und Glühverlust vom Top zur Basis hin zu. Die niedrigsten Wassergehalte und Glühverluste wurden an den Bohrproben der ersten Bohrkampagne (Laufzeit fünf Monate) gemessen (15,2 – 18,4 bzw. 18,4 – 22,7 Gew.-%). Die höchsten Werte für Wassergehalt und Glühverlust wurden tendenziell für die Bohrproben der dritten Bohrkampagne (Laufzeit ca. 26 Monate) ermittelt (max. 18 bzw. 24,5 Gew.-%). Generell wurden für das Lysimeter mit Sperre in den Bohrproben höhere Wassergehalte und Glühverluste gemessen. Hier zeigten sich insbesondere nach der ersten und zweiten Bohrkampagne Diskontinuitäten. Nach der ersten Bohrkampagne war speziell der Bereich ober- und innerhalb der Sperrsicht, aber auch an der Basis, feuchter (max. 20,5 bzw. 25,2 Gew.-%). Der Bereich unterhalb der Sperre war vglw. trocken (17,5 bzw. 21,8 Gew.-%). Nach der zweiten Bohrkampagne (Laufzeit ca. 12 Monate) wurden für den Versuch mit Sperre unmittelbar oberhalb und unterhalb der Sperrsicht die höchsten Werte für Wassergehalt und Glühverlust ermittelt (21,3 bzw. 27,2 Gew.-%). Nach der dritten Bohrkampagne zeigen sich für den Versuch mit Sperre im Profilverlauf keinerlei Unterschiede mehr. Die Werte liegen im Bereich von 20 – 21 bzw. 26 – 27 Gew.-%. Der Profilverlauf ähnelt dem Blindversuch, lediglich die Werte für Wassergehalt und Glühverlust sind für das Lysimeter mit Sperre höher.

Tab. 27: Verteilung der Parameter Wassergehalt und Glühverlust entlang des Versuchsprofils der Bohrkampagne III, Großlysimeter Raindorf: Lysimeter ohne Sperre (RA 1) und mit Sperre (RA 2) im Vergleich, für die Proben ober- bzw. unterhalb der Sperrsicht wurde jeweils ein Mittelwert gebildet

Versuchsbezeichnung	RA 1	RA 2	RA 1	RA 2
Aufbau	ohne Sperre	mit Sperre	ohne Sperre	mit Sperre
Parameter	<i>Wassergehalt</i> Gew.-%			<i>Glühverlust*</i> Gew.-%
Ausgangsmaterial	10,1		14,9	
oberhalb der Sperre	$18,3 \pm 0,3$	$19,6 \pm 0,1$	$23,9 \pm 0,5$	$26,2 \pm 0,3$
innerhalb der Sperre		20,1		26,0
unterhalb der Sperre	$19,3 \pm 0,1$	$20,5 \pm 0,5$	$24,3 \pm 0,3$	$26,4 \pm 0,1$

* der Glühverlust wurde bei 1050°C ermittelt und bezieht sich auf die Originalsubstanz, d.h. Gv – Wg entspricht der Definition des Parameters Glühverlust in der AbfAbIV (2001)

Eluate

pH-Wert

Die pH-Werte im Eluat der Feststoffproben beider Lysimeter liegen in einem engen Band zwischen 11,4 und 11,7 (Abb. 82). Nach einer Versuchsdauer von ca. 26 Monaten zum Zeitpunkt der dritten Bohrkampagne reagieren die Eluate der Bohrproben im Vergleich zum Ausgangsmaterial (pH 11,9) und zu den vorangegangenen Bohrkampagnen etwas weniger alkalisch.

Leitfähigkeit und leichtlösliche Spezies (Cl, Na)

Im Vergleich zum Ausgangsmaterial zeigt sich zunächst für eine Laufzeit von fünf Monaten, in der ausschließlich mit Leitungswasser bewässert wurde, eine deutliche Verringerung der Leitfähigkeiten von ca. 3 (Ausgangsmaterial) auf min. 1,6 mS/cm in den Eluatproben aus beiden Lysimetern (Abb. 83). Für den Blindversuch nehmen die Werte vom Top zur Basis hin zu (von 1,6 auf 2,6 mS/cm). Für das Lysimeter mit Sperre wurde auch innerhalb der Sperre eine vglw. hohe Leitfähigkeit im Eluat (2,5 mS/cm) festgestellt. Unterhalb der Sperre nehmen die Leitfähigkeiten geringfügig ab. Die generelle Erhöhung der Leitfähigkeiten für beide Lysimeter bis zur zweiten Bohrkampagne ist auf die Umstellung von einer anfänglichen Bewässerung mit Leitungswasser auf eine Bewässerung mit Modellsickerwasser zurückzuführen. Der Profilverlauf der beiden Lysimeter ähnelt einander. Dennoch wurde für das Lysimeter mit Sperre innerhalb der Sperrsicht mit 2,6 mS/cm der höchste Wert gemessen. Unterhalb der Sperrsicht nehmen die Leitfähigkeiten deutlicher ab im Vergleich zum Blindversuch (ca. 2,4 mS/cm). In den Eluaten der dritten Bohrkampagne waren die Leitfähigkeiten wieder etwas rückläufig. Es ist jedoch bemerkenswert, dass für den Blindversuch die topnächsten Proben (1f, 2f) vglw. hohe Eluat-Leitfähigkeiten aufweisen (ca. 2,5 mS/cm) und zur Basis hin die Werte niedriger werden (ca. 2,2 mS/cm). Für das Lysimeter mit Sperre hingegen zeigt sich im Profilverlauf kaum ein Unterschied und die Bohrproben sind weniger salzreich im Vergleich zum Blindversuch. Lediglich die basisnächste Probe (4f) weist einen geringfügig erhöhten Wert auf (ca. 2,3 mS/cm).

Für den Parameter Cl (Abb. 84) zeigte sich für beide Lysimeter bis zur zweiten Bohrkampagne (Laufzeit ca. 12 Monate) kaum eine Differenzierung zum Ausgangsmaterial (250 mg/L). Auch im Profilverlauf beider Lysimeter ist kein nennenswerter Unterschied zu erkennen. Tendenziell wurden im basisnahen Bereich, entsprechend der natürlichen Entwicklung, höhere Cl-Eluatkonzentrationen gemessen. Nach der dritten Bohrkampagne (Laufzeit 26 Monate) hat sich insbesondere für den Blindversuch eine starke Aufkonzentration herauskristallisiert. Analog der Leitfähigkeit wurden hier die höchsten Cl-Konzentrationen mit max. 630 mg/L in den topnahen Proben (1f, 2f) und geringere Werte an der Basis (min. 430 mg/L) festgestellt. Für den Versuch mit Sperre sind die Cl-Konzentrationen insgesamt geringer (350 – 400 mg/L).

Entlang des Bohrprofils nehmen die Cl-Eluatkonzentrationen vom Top zur Basis hin nur geringfügig zu.

Für den Parameter Na zeigt sich für den Blindversuch ebenfalls eine Anreicherung mit der Zeit, infolge der Bewässerung mit Modellsickerwasser (Abb. 85). Insbesondere für die oberflächennächste Probe des Blindversuchs wurde eine max. Konzentration von ca. 290 mg/L nach der dritten Bohrkampagne bestimmt. Für das Lysimeter mit Sperre zeigt sich im zeitlichen Verlauf kaum ein Unterschied. Die Verteilung entlang des Bohrprofils ist nach allen drei Bohrkampagnen ähnlich.

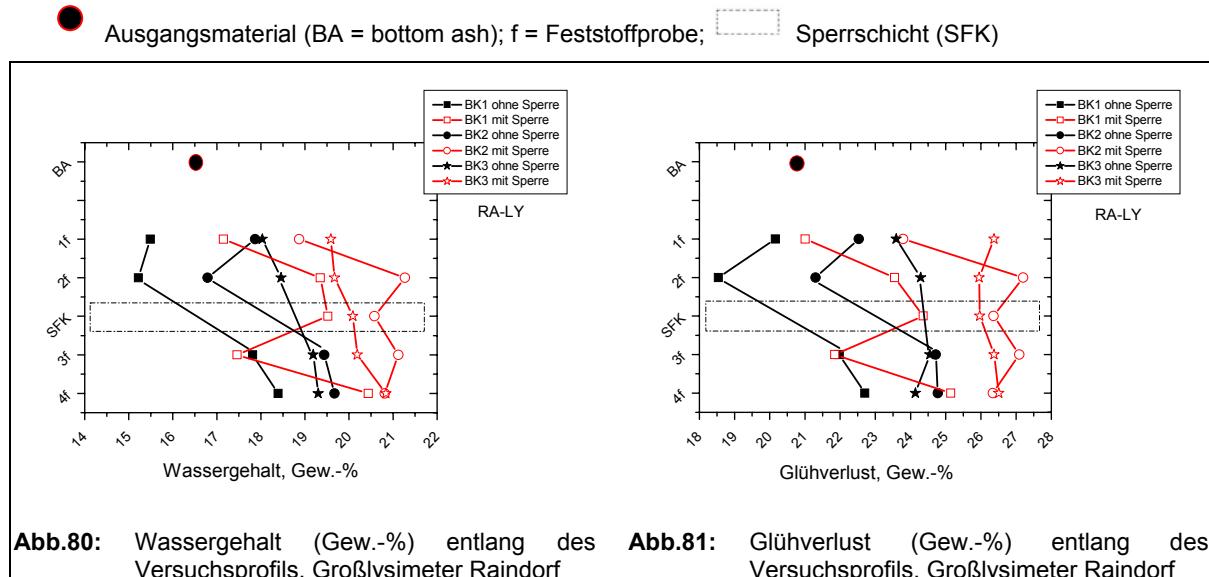
Weitere Parameter

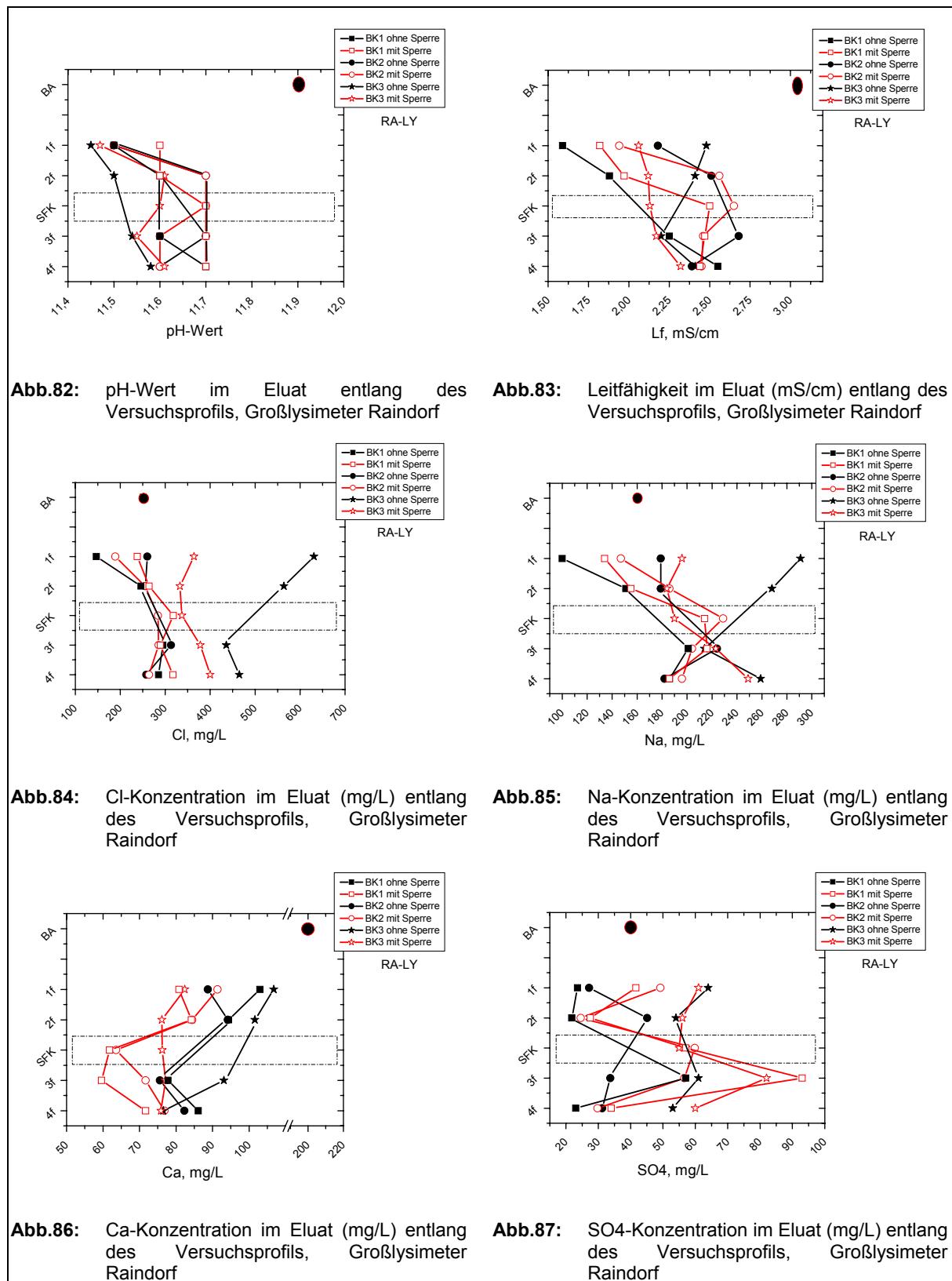
Der Parameter Ca (Abb. 86) zeigt im Vergleich zum Ausgangsmaterial (200 mg/L) eine starke Konzentrationsabnahme mit Werten im Bereich von ca. 60 bis 110 mg/L für die Eluate aus beiden Lysimetern. Generell sind die Ca-Eluatkonzentrationen für den Blindversuch höher im Vergleich zum Versuch mit Sperre. Trotz der Zugabe von Ca mit dem Modellsickerwasser ist die Anreicherung mit fortwährender Versuchsdauer geringfügig. Der Verlauf entlang des Bohrprofils ist für beide Lysimeter für die ersten beiden Bohrkampagnen vergleichbar. Für beide Lysimeter zeigt sich entgegen den Parametern Cl und Na tendenziell eine Konzentrationsabnahme vom Top zur Basis. Für das Lysimeter mit Sperre wurden insbesondere innerhalb der Sperrsicht vglw. geringe Ca-Konzentrationen (ca. 63 mg/L) beobachtet. Nach der dritten Bohrkampagne bestätigen sich für den Blindversuch die starke Anreicherung am Top und eine Abnahme zur Basis hin. Für das Lysimeter mit Sperre hingegen fällt auf, dass die Verteilung an Ca entlang des Bohrprofils wiederum sehr gleichmäßig ist (Werte zwischen 75 – 80mg/L).

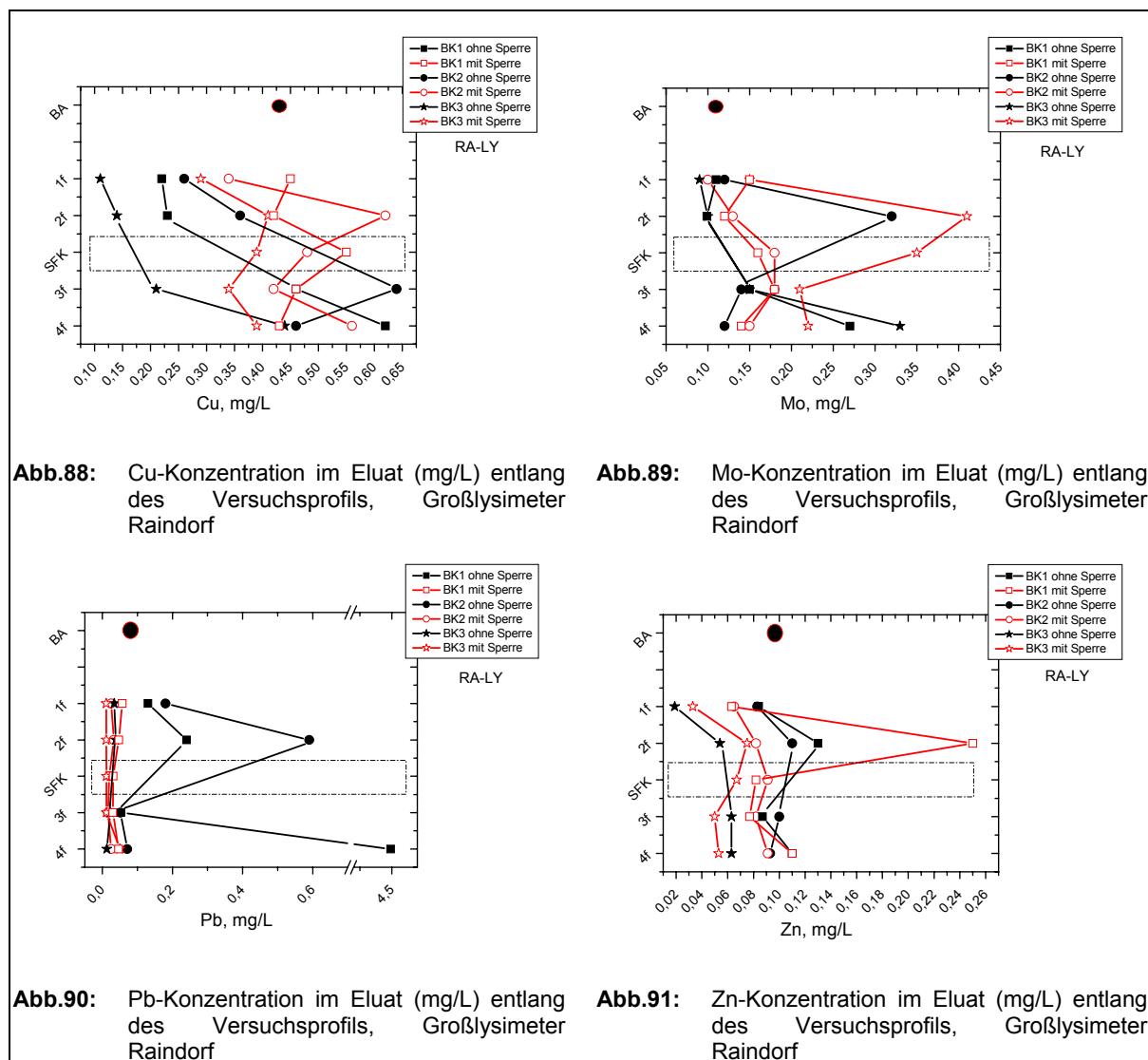
Bezogen auf den Parameter SO₄ (Abb. 87) nehmen die Eluatkonzentrationen der Bohrproben mit fortschreitender Versuchsdauer im Vergleich zum Ausgangsmaterial (40 mg/L) zu. Insbesondere nach der dritten Bohrkampagne (Laufzeit 26 Monate) werden vglw. hohe SO₄-Konzentrationen gemessen (ca. 50 bis 85 mg/L). Für den Blindversuch ist die Verteilung entlang des Profils zu diesem Zeitpunkt sehr gleichmäßig. Für das Lysimeter mit Sperre ist es bemerkenswert, dass sowohl nach der ersten Bohrkampagne (Laufzeit fünf Monate) als auch nach der dritten Bohrkampagne die Probe direkt unterhalb der Sperre besonders stark an Sulfat angereichert ist (max. 94 mg/L).

Für den Parameter Cu (Abb. 88) nehmen die Eluatkonzentrationen mit fortwährender Versuchsdauer tendenziell ab (von max. 0,65 auf min. 0,1 mg/L). Im Ausgangsmaterial betrug die Cu-Konzentration 0,43 mg/L. Speziell nach der dritten Bohrkampagne wurden für den Versuch ohne Sperre die niedrigsten Konzentrationen bestimmt. Entlang des Bohrprofils nehmen jedoch die Cu-Eluatkonzentrationen vom Top zur Basis zu. Für den Versuch mit Sperre sind die Eluatkonzentrationen deutlich höher und speziell oberhalb der Sperre ist die Cu-Konzentration im Eluat hoch. Diese Tendenz wurde auch nach der zweiten Bohrkampagne

(Laufzeit ca. 12 Monate) sehr ausgeprägt beobachtet. Dieselbe Entwicklung wurde auch für Mo festgestellt (Abb. 89). Für das Lysimeter mit Sperr wurde nach der dritten Bohrkampagne oberhalb der Sperrsicht eine markante Erhöhung der Mo-Konzentration im Eluat festgestellt (max. 0,4 mg/L). Für den Blindversuch entsprechen die Mo-Konzentrationen in den topnahen Proben dem Ausgangsmaterial (0,11 mg/L). Die Probe an der Basis (4f) weist ebenfalls einen vglw. hohen Mo-Wert auf (0,33 mg/L). Bezogen auf den Parameter Pb (Abb. 90) wurde lediglich für den Blindversuch nach der ersten Bohrkampagne in der basisnahen Probe ein außergewöhnlich hoher Pb-Wert (4,5 mg/L) gemessen. Dies kann durch einzelne Partikel, z.B. in Form von Legierungen oder auch durch Mineralsalze wie Bleisulfat bedingt sein. Auch nach der zweiten Bohrkampagne waren für den Blindversuch die Pb-Konzentrationen noch leicht erhöht (max. 0,6 mg/L). Für das Ausgangsmaterial und die weiteren Feststoffproben lagen die Werte im Bereich < 0,08 mg/L. Für den Parameter Zink (Abb. 91) lagen die Werte überwiegend im Bereich zwischen 0,019 – 0,130 mg/L und waren somit z.T. geringer im Vergleich zum Ausgangsmaterial (0,097 mg/L). In einer Einzelprobe (Lysimeter mit Sperr, Probe 2f, Bohrkampagne 1) wurde ein Wert von 0,25 mg/L ermittelt. Zwischen Blindversuch und Lysimeter mit Sperr sind für die Parameter Pb und Zn keine signifikanten Unterschiede zu erkennen.







Sickerwasserentwicklung

Die Tabelle 28 gibt einen Überblick über die Wasserbilanz der beiden Lysimeter Raindorf.

Tab. 28: Bewässerungs- und Austragsmengen für die Großlysimeter Raindorf ohne (RA1, Blindversuch) und mit Sperre (RA2) im Vergleich

Versuchsbezeichnung	RA1	RA2
Sperrsicht	ohne	mit
Befüllung	Schlacke A	
Bewässerung	Modellsickerwasser	
Dauer in Wochen	131	
Eingebaute Schlackemenge in kg	14.200	14.200
Bewässerungsmenge in L pro Monat	47,7	47,7
Bewässerungsmenge insgesamt in L	1.440	1.440
Austrag Sickerwasser in L	408	318
kumulierter Austrag in %	28,3	22,1
kumulierter Rückhalt in L pro kg Schlacke	0,285	0,292

In das Lysimeter ohne Sperre wurden insgesamt 14,2 Tonnen MV-Schlacke eingebaut und in das Lysimeter mit Sperre 13,4 Tonnen und hier zusätzlich als Sperrsicht 0,8 Tonnen

Schlacke-Feinkorn. Die Gesamtbewässerungsmenge über den Versuchszeitraum von 910 Tagen betrug 1.440 Liter. Seit Versuchsbeginn wurden aus dem Lysimeter ohne Sperre insgesamt 408 Liter ausgetragen. Das entspricht 28,3 % der Bewässerungsmenge. Für das Lysimeter mit Sperre war der Austrag mit 318 Liter geringer. Das entspricht 22,1 % der Bewässerungsmenge. Der kumulierte Wasserrückhalt für das Lysimeter mit Sperre ist geringfügig höher (0,292 L/kg Schlacke) – analog den Säulenversuchen der VA-A.

Austrag an Sickerwasser

Innerhalb der ersten Phase bis 160 Versuchstage ist der Austrag an Sickerwasser fast so hoch wie die Bewässerungsmenge von 50 L/Woche (Abb. 92). Die Reduktion der Bewässerungsmenge auf 10 L/Woche führt zu einer raschen Abnahme der Austragsmenge auf weniger als fünf Liter, mit Sperre sogar auf weniger als zwei Liter. Der erneute Wechsel auf 20L/2 Wochen nach 290 Tagen führt zu einem schwankenden Sickerwasseraustrag. Es ist auffällig, dass die Entwicklung der Sickerwassermengen für beide Lysimeter gleich verläuft. Die Spitzenwerte an Austragsmengen (max. 30 Liter) nach 719 Tagen sind darauf zurückzuführen, dass während der dritten Bohrkampagne der Kunststoffdeckel über einige Tage offen blieb. Zu diesem Zeitpunkt hat es zeitweise stark geregnet und der Anteil an Niederschlag führte zu einem erhöhten Sickerwasseraustrag. Nachdem das Bewässerungsmedium von Modellsickerwasser auf Leitungswasser umgestellt wurde (nach 825 Tagen), wurde etwas zeitverzögert deutlich weniger an Sickerwasser (min. 0,6 L) ausgetragen. Diese Entwicklung wurde für beide Lysimeter beobachtet. Geringe Austragsmengen wurden jedoch während der Versuchsdurchführung aufgrund hoher Verdunstung während der Sommermonate mehrmals beobachtet.

pH-Wert

Die wechselnden Bewässerungsmodi wirken sich auf die Entwicklung des pH-Wertes im Sickerwasser aus. Generell sind die pH-Werte im Sickerwasser aus dem Blindversuch höher im Vergleich zum Lysimeter mit Sperre (Abb. 93). In der ersten Phase (Bewässerung mit Leitungswasser - 50 L/Wo), liegen die pH-Werte für den Blindversuch bei etwa pH 12 und für das Lysimeter mit Sperre im Bereich zwischen pH 10 bis 11,5. Die zweite Phase umfasst den Zeitraum ab 160 bis 290 Versuchstage, in dem mit 10 L/Woche Modellsickerwasser bewässert wurde. Für den Blindversuch bleiben die pH-Werte im Sickerwasser hoch (11,5 – 12). Für das Lysimeter mit Sperre führt die Sickerwassermengenreduktion zu einer kontinuierlichen Abnahme des pH-Werts auf Minimalwerte von 8,9. Danach steigen die pH-Werte im Sickerwasser aber stetig an. Die dritte Phase umfasst den Zeitraum ab 290 Tagen, damit einher geht die Umstellung des Bewässerungsmodus auf 20 Liter alle 14 Tage. Erst diese Umstellung führt für den Blindversuch zu einer abrupten Abnahme des pH-Wertes auf 9,7. In der Folgezeit steigen die pH-Werte geringfügig an. Auf das Lysimeter mit Sperre hat diese

Umstellung keine Auswirkung. Es ist jedoch sehr auffällig, dass ab hier die Entwicklung der pH-Werte im Sickerwasser für beide Lysimeter gleich verläuft. Zum Zeitpunkt der dritten Bohrkampagne (ca. 720 Tage) liegen die pH-Werte im Sickerwasser aus dem Blindversuch bei 9,9 und für das Lysimeter mit Sperre bei 9,8. Bis zu einer Laufzeit von 830 Tagen wird ein Anstieg der pH-Werte beobachtet. Erst die Umstellung auf Leitungswasser führt erneut zu einer kurzzeitigen und geringfügigen Abnahme. In den letzten 40 Versuchstagen steigt der pH-Wert im Sickerwasser aus beiden Lysimetern wiederum kontinuierlich an.

Leitfähigkeit und lösliche Salze (Cl, Na)

Die Leitfähigkeiten beider Sickerwässer bewegen sich zumeist zwischen 30 bis 45 mS/cm (Abb. 94). Die Sickerwässer aus dem Blindversuch weisen einen geringeren Salzgehalt auf als für das Lysimeter mit Sperre. Es ist bemerkenswert, dass die Entwicklung der Leitfähigkeit im Sickerwasser für beide Lysimeter von Beginn an überwiegend gleich verläuft. Der Wechsel des Bewässerungsmodus von 50 L/Woche Leitungswasser auf 10 L/Woche Modellsickerwasser führt für den Blindversuch zu keiner unmittelbaren Änderung der Entwicklung der Leitfähigkeiten. Erst nach 275 Versuchstagen nimmt die Leitfähigkeit ohne ersichtlichen Zusammenhang abrupt ab. Dies ist auch für das Lysimeter mit Sperre deutlich zu erkennen. Jedoch führte hier die Sickerwassermengenreduktion unmittelbar zu einer geringfügigen aber kontinuierlichen Abnahme der Leitfähigkeit. Die erneute Umstellung auf den doppelten Salzbetrag in doppelter Zeitabfolge zeigte keine unmittelbare Wirkung. In den Wintermonaten (400 – 525 Tage) ist die Entwicklung der Leitfähigkeit sehr sprunghaft. Es kann kein offensichtlicher Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und Menge an Sickerwasseraustrag hergestellt werden. In der Folgezeit bis zum Zeitpunkt der dritten Bohrkampagne (Laufzeit 719 Tage) bleiben die Leitfähigkeiten im Sickerwasser auf einem konstanten Niveau: für den Blindversuch bei ca. 39 mS/cm und für den Versuch mit Sperre bei ca. 43 mS/cm. Nach der dritten Bohrkampagne steigen die Leitfähigkeiten im Sickerwasser aus beiden Lysimetern erneut an und erreichen beide nach 910 Tagen einen Wert von 48 mS/cm.

Die Entwicklung der Parameter Cl und Na im Sickerwasser korreliert bis zu einer Versuchsdauer von 550 Tagen sehr gut mit der Leitfähigkeit (Abb. 95 und 96). Die Cl-Konzentrationen liegen in einem Bereich zwischen 8 – 20 g/L und die Na-Konzentrationen zwischen 4 – 10 g/L. Bezogen auf den Parameter Cl bleiben nach den Wintermonaten (400 – 525 Versuchstage) für den Blindversuch die Konzentrationen auf einem konstanten Niveau, das sich bis zu Versuchsende (910 Tage) nur geringfügig verändert (im Mittel 13 g/L). Für den Versuch mit Sperre erreichen die Cl-Konzentrationen nach den Wintermonaten vglw. hohe Werte (max. 18 g/L). Nach 750 Tagen gleichen sich die Entwicklungen beider Lysimeter an.

Für den Parameter Na steigen nach den Wintermonaten für beide Lysimeter die Konzentrationen kontinuierlich an, wobei die Na-Konzentrationen zwischen 750 und 850

Tagen auf einem sehr konstanten Niveau bleiben. Zu Versuchsende liegen die Na-Konzentrationen im Bereich von 10 g/L.

Weitere Parameter

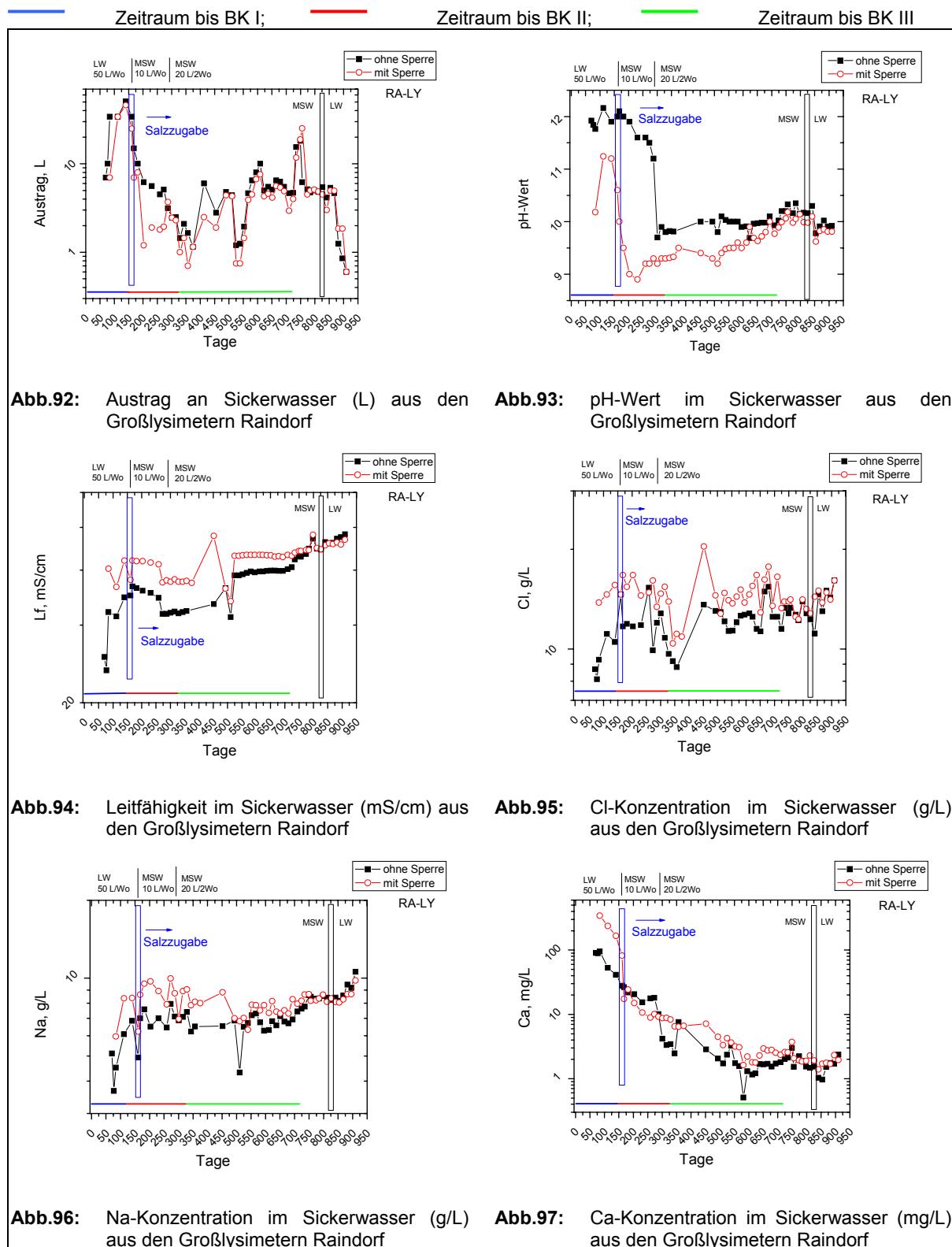
Mit fortwährender Versuchsdauer wird der Parameter Ca im Vergleich zu den Säulenversuchen und Testfeldern vglw. stark und kontinuierlich ausgewaschen (von max. 400 mg/L auf ca. 1 mg/L). Die Entwicklungen der Ca-Konzentrationen in den Sickerwässern aus den beiden Lysimetern verlaufen gegen Versuchsende näherungsweise gleich, bei Werten um 1 bis 3 mg/L (Abb. 97).

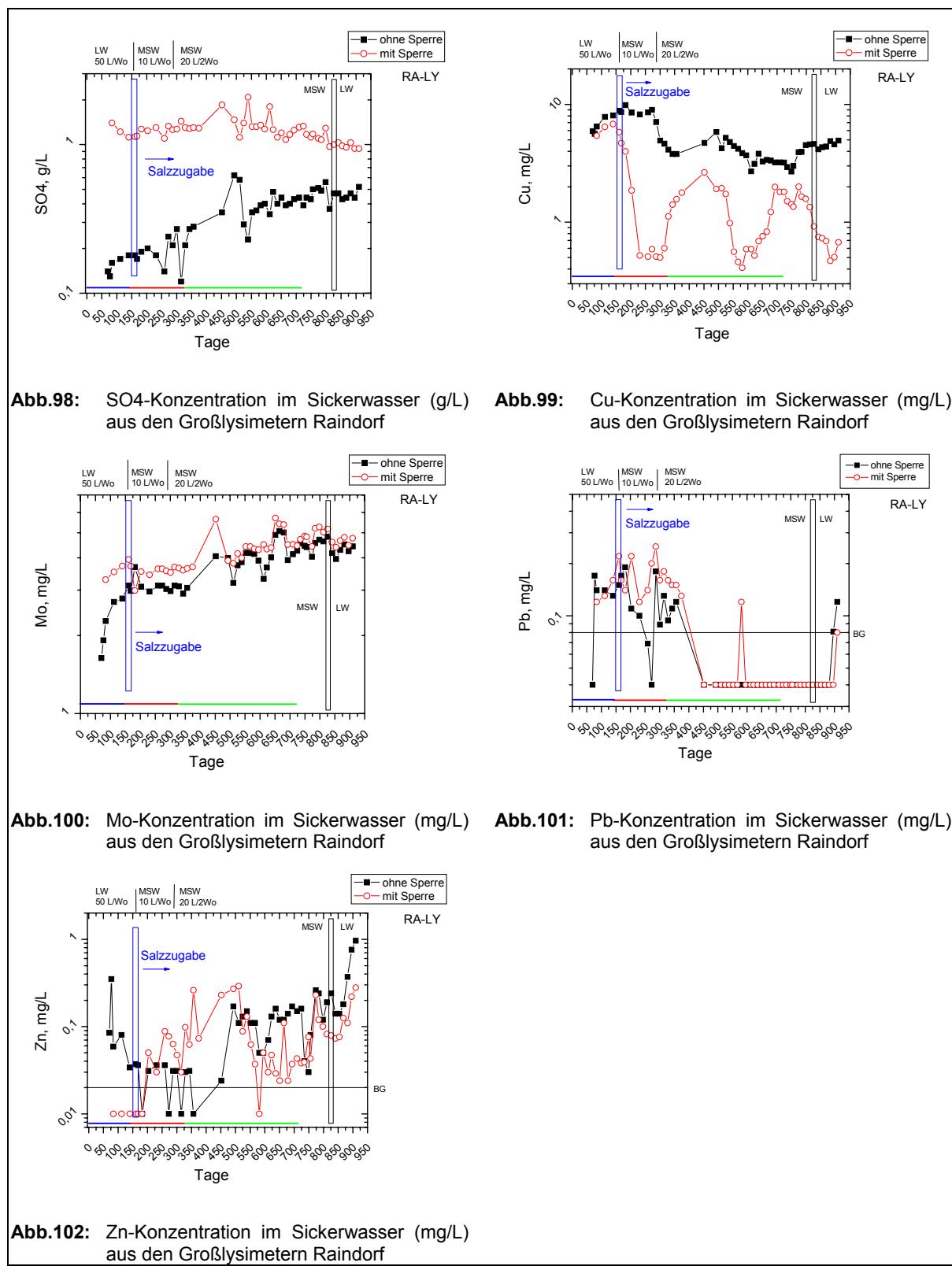
Bezogen auf den Parameter SO₄ ist die Sickerwasserentwicklung für die beiden Lysimeter sehr unterschiedlich (Abb. 98). Für den Blindversuch liegen die SO₄-Konzentrationen zu Beginn bei etwa 0,1 mg/L. Für das Lysimeter mit Sperre startet der Versuch bei vglw. hohen SO₄-Werten zwischen 1 bis 2 g/L, die auch bis zu Versuchsende etwa auf diesem Niveau bleiben. Mit Reaktionsfortschritt nähert sich die SO₄-Konzentration im Sickerwasser aus dem Blindversuch nur langsam diesem Niveau an. Nach 910 Tagen betrug die Konzentration 0,5 g/L.

Auch für den Parameter Cu, dem Schwermetall mit den höchsten Sickerwasserkonzentrationen (bis 10 mg/L), zeigte sich ein deutlicher Unterschied zwischen beiden Lysimetern (Abb. 99). Trotz anfänglich gleicher Ausgangskonzentrationen (etwa 6 mg/L) wurden im Versuchsverlauf im Sickerwasser aus dem Blindversuch deutlich höhere Cu-Konzentrationen analysiert als im Lysimeter mit Sperre. Für das Lysimeter mit Sperre waren starke zyklische Schwankungen der Cu-Konzentrationen sehr bemerkenswert. Die Maximalwerte fielen stets in den Sommermonaten an und näherten sich dann dem Niveau des Blindversuchs. In den Wintermonaten waren die Cu-Konzentrationen viel geringer.

Die Mo-Konzentrationen stiegen in den Sickerwässern aus beiden Lysimetern von minimal 1,6 (für den Blindversuch) auf etwa 4 mg/L an (Abb. 100). Die Entwicklung ist vergleichbar mit der leichtlöslichen Spezies (Cl, Na). Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Mo- und Ca-Konzentration. Vor allem bei geringen Ca-Konzentrationen ist das Molybdän vglw. mobil. Weitere Schwermetalle waren wenig auffällig. Die Pb-Konzentrationen (Abb. 101) bewegten sich zu Versuchsbeginn bis etwa 400 Versuchstage großteils in einem Bereich zwischen 0,09 – 0,25 mg/L. Generell waren die Pb-Konzentrationen aus dem Lysimeter mit Sperre im Vergleich zum Blindversuch erhöht. In der Folgezeit lagen die Werte hauptsächlich unterhalb der Bestimmungsgrenze. Es ist jedoch auffällig, dass in den letzten Sickerwasserproben die Pb-Werte wiederum erhöht waren (ca. 0,1 mg/L). Die Salzzugabe führte über die Versuchszeit für den Parameter Zn zu einer geringfügigen Zunahme der Konzentration bis max. 0,4 mg/L (Abb. 102). Insgesamt war die Entwicklung größeren Schwankungen unterworfen. Nach der Umstellung von Leitungswasser auf Modellsickerwasser wurde ebenfalls deutlich mehr an Zn mobilisiert. Diese Tendenz war für den Blindversuch deutlicher ausgeprägt und zu

Versuchsende betragen die Zn-Konzentrationen ca. 1,0 mg/L und für das Lysimeter mit Sperrre etwa 0,3 mg/L.





Frachtenberechnungen

Der Frachtenaustrag ist bei beiden Lysimetern für die leichtlöslichen Salze in etwa gleich hoch (Tab. 29). Die über das Sickerwasser zugegebenen Ionen Cl, SO₄, Na und Ca reichern sich in beiden Lysimetern an. Für die Lysimeter Raindorf begünstigt das kleine L/S-Verhältnis von 0,1 im Vergleich zu den Säulenversuchen mit L/S von 1,9 eine Anreicherung der leichtlöslichen Spezies. Die Anreicherung von Na und Cl im Lysimeter mit Sperre ist etwas höher als beim

Blindversuch, dafür ist die Anreicherung an Ca und Sulfat etwas geringer. Der Parameter Cu wird über Sickerwasser aus dem Lysimeter mit Sperre im Vergleich zum Blindversuch weniger stark ausgetragen. Die restlichen Schwermetalle werden nur zu sehr geringen Anteilen ausgetragen. Die ermittelten Frachtenbeträge sind meist so gering, dass sie nicht als signifikant anzusehen sind.

Tab. 29: Zusammenfassung der Frachtenberechnung, Abreicherung bzw. Anreicherung in % bezogen auf die Ausgangsmenge, Blindversuch (RA1) und Versuch mit Sperre (RA2)

Versuchsbezeichnung	RA1		RA2
	ohne Sperre		mit Sperre
Versuchsanordnung			Lysimeter Raindorf
Dauer in Wochen	130		
Bewässerung	MSW/LW		
Parameter	Proz. Ab-/Anreicherung		
Cl	+6,78		+7,07
SO4	+0,50		+0,41
Na	+3,12		+3,29
Ca	+0,059		+0,058
Cu	-0,003		-0,001
Mo	-0,54		-0,53
Pb	-0,0002		-0,0001
Zn	-0,00004		-0,00002

4.3.4 Fazit zur Wirkung von salzreichen Lösungen

Die Ergebnisse zu den Säulenversuchen der VA-A, Testfelder Eberstetten und Lysimeter in Raindorf haben gezeigt, dass die Salzkonzentration im Bewässerungsmedium eine wichtige Rolle spielt. Folgende Cl-Konzentrationen wurden den einzelnen Versuchsanordnungen über salzreiche Lösungen zugeführt: 0,7 g/L den Säulenversuchen über das Modellsickerwasser, 3,9 g/L dem Testfeld EB3 über das Deponiesickerwasser, 11,8 g/L dem Testfeld EB4 über das Konzentrat aus der Umkehrosmose sowie 20,2 g/L den Lysimetern in Raindorf über das Modellsickerwasser. Zusammen mit dem unterschiedlichen L/S-Verhältnis der einzelnen Versuchsanordnungen beeinflusst die Zusammensetzung des Bewässerungsmediums direkt die Feststoff- und Sickerwasserentwicklung.

Feststoffentwicklung:

- Zugabe von salzreichen Lösungen: im Vergleich zu Versuchsreihen, die mit Leitungswasser bewässert wurden oder dem natürlichen Niederschlag ausgesetzt waren, hat die Zugabe von salzreichen Lösungen generell höhere Wassergehalte in den Feststoffproben bewirkt, d.h. das Wasserrückhaltevermögen hat sich verstärkt und v.a. in Horizonten unterhalb der Sperre wurde ein vglw. trockenes Milieu begünstigt.
- Salzakkumulationen entlang des Profils: für die Säulenversuche der VA-A wurden diese v.a. unterhalb der Sperrsicht sowohl für eine Bewässerung mit Leitungswasser als auch mit Modellsickerwasser festgestellt. Die Erhöhung der Salzkonzentration für das

Testfeld EB4 mit Sperre verstärkt eine Salzanreicherung und v.a. in topnahen Proben wurden erhöhte Eluat-Leitfähigkeiten festgestellt. Für die Großlysimeter in Raindorf mit Sperre wurde nach der dritten Bohrkampagne im Bohrprofil eine gleichmäßige Verteilung festgestellt und für den Blindversuch hingegen eine deutliche Salzakkumulation der topnahen Probe

Sickerwasserentwicklung

- Bewässerungsmenge: eine Wassermengenreduktion, wie sie für die Lysimeter in Raindorf vorgenommen wurde, hat deutlichen Einfluss auf die Sickerwasserentwicklung, z.B. Entwicklung des pH-Werts insbesondere für den Blindversuch drastischer Abfall im pH-Wert
- Sickerwassermengen: für die Säulenversuche wurden als Folge der Bewässerung mit Modellsickerwasser geringere Menge an Sickerwasser ausgetragen; für die Sickerwasserentwicklung der Lysimeter Raindorf haben Temperaturunterschiede die Mengen beeinflusst: für Dezember sowie Juni liegt generell ein Minimum an Sickerwasseraustrag vor
- Temperaturunterschiede: für die Lysimeter in Raindorf zeigt sich für den Parameter Cu deutlich, dass die Entwicklung jahreszeitliche Schwankungen unterworfen ist - Minimalwerten beziehen sich auf die Sommermonate und Maximalwerte auf die Wintermonate; es ist erstaunlich das die Entwicklung nur Lysimeter mit Sperre betrifft
- pH-Werte im Sickerwasser: für die Säulenversuche und die Testfelder in Eberstetten wurden für die Versuche mit Sperre höhere pH-Werte gemessen im Vergleich zum Blindversuch; für die Lysimeter in Raindorf hingegen ist es umgekehrt; für die Säulenversuche haben sich die pH-Werte mit fortschreitender Versuchsdauer zu deutlich niedrigeren Werten verlagert, eine Bewässerung mit MSW hat zudem zu niedrigeren Werten geführt; für die Testfelder in Eberstetten wurden pH-Werte in einem schmalen Band zwischen pH 6-9 gemessen und für die Lysimeter in Raindorf wurden Trendwechsel im Versuchsverlauf festgestellt – nach anfänglich alkalischen pH-Werten nehmen die pH-Werte stark ab und liegen zu Versuchsende bei pH 10
- Salzzugabe in Form von salzreichen Lösungen: für die Säulenversuche wurde ein Anstieg der Leitfähigkeit im Sickerwasser verzeichnet, zudem haben sich die Auswaschraten mit fortschreitender Versuchszeit verringert; für die Testfelder in Eberstetten bewirkt die Zugabe von UO deutlich höhere Salzgehalte, für die Lysimeter in Raindorf steigen die Leitfähigkeiten im Sickerwasser mit zunehmender Versuchszeit an
- Parameter Ca: für die Säulenversuche wurde mit Reaktionsfortschritt ein Anstieg an Ca verzeichnet; für die Testfelder in Eberstetten wurden generell sehr hohe Konzentrationen gemessen und die Tendenz ist ebenfalls ansteigend; für die Lysimeter in Raindorf hingegen wurde Ca verstärkt über das Sickerwasser ausgetragen

Zeitraffermaßnahmen

- Zugabe von salzreichen Lösungen: Abweichende Entwicklungen im Sickerwasser zwischen Blindversuch und Versuch mit Sperrsicht treten früher ein und die beobachteten chemischen und mineralogischen Reaktionen kommen generell stärker zum Tragen, d.h. die Wirkung der Sperre kann innerhalb einer kürzeren Zeit sichtbar gemacht werden

Frachtenberechnung:

- Zugabe von salzreichen Lösungen: für die Säulenversuche ist bemerkenswert, dass trotz der Salzzugabe in Form von MSW insgesamt prozentual weniger austragen wurde. Für die Testfelder in Eberstetten war die Auswaschung aufgrund des kleineren L/S-Verhältnisses deutlich schwächer und für die Lysimeter in Raindorf hat sich gezeigt, dass eine Auswaschung nur für die Schwermetalle stattfand
- Anreicherung: für die Säulenversuche konnte bzgl. der Parameter Ca und SO₄ sowie Zn und Pb durch die Salzzugabe in Form von MSW sogar eine Anreicherung innerhalb der Säule festgestellt werden, dies trifft auch für das Testfeld EB4 (Sperre, UO) für Cl, SO₄, Na) und für die Lysimeter in Raindorf für Cl, Na, Ca, SO₄
- Wirkung der Sperre: für den Blindversuch wurden im Vergleich zum Säulenversuch mit Sperre - analog den LW-Versuchen - Cl und Na stärker zurückgehalten

4.4 WIRKUNG VON RAUCHGASREINIGUNGSRÜCKSTÄNDEN

4.4.1 Versuchsanordnung C

Die Versuchsanordnung C besteht aus einem Blindversuch (Säule ohne Sperrsicht, RBV) und einer Säule mit Sperrsicht (RSFK). Die Sperrsicht besteht hier aus Schlacke-Feinkorn (2-3 cm mächtig) und unmittelbar darüber aus einer Schicht aus Rauchgasreinigungsrückständen (RGR, 1 cm mächtig). Mit der Versuchsanordnung C sollte eine sehr salzreiche Ausgangssituation (RGR als Sperrsicht) untersucht werden. Die Säulenversuche der Versuchsanordnung C wurden noch nicht rückgebaut. Die Säulenversuche der VA-C haben eine aktuelle Laufzeit von 544 Tagen. Für sie werden daher lediglich die Sickerwässer diskutiert. Bis zu einer Laufzeit von etwa 500 Tagen wurden beide Säulen mit Modellsickerwasser bewässert. Danach wurde auf Leitungswasser umgestellt.

Sickerwasserentwicklung

Die Tabelle 30 gibt einen Überblick über die Wasserbilanz der beiden Säulenversuche der Versuchsanordnung C. Die kumulierte Bewässerungsmenge für den beobachteten Versuchszeitraum betrug 23 Liter. Davon wurde in Bezug auf den Blindversuch 48% und für die Säule mit Sperrsicht mit 47% geringfügig weniger ausgetragen. Das L/S-Verhältnis betrug in etwa 1,9 L/kg und liegt damit in einem vergleichbaren Bereich mit den Säulenversuchen der Versuchsanordnung A. Die eingebauten Schlackemengen sind in etwa gleich groß. Für den Säulenversuch mit Sperrsicht (RSFK) kristallisiert sich heraus, dass hier im Vergleich zum Blindversuch der kumulierte Rückhalt an Wasser (in L/kg Schlacke) höher ist: 1,06 L/kg (RSFK) und 1,12 L/kg (RBV).

Tab. 30: Bewässerungs- und Austragsmengen für die VA-C ohne (RBV) und mit Sperre (RSFK) im Vergleich

Versuchsbezeichnung	RBV	RSFK
Versuchsanordnung	VA-C	
Befüllung	Schlacke A	
Bewässerung	Modellsickerwasser	
Dauer in Wochen	77	
Eingebaute Schlackemenge in kg	17,5	16,5
Bewässerungsmenge in L pro Monat	1,2	1,2
Bewässerungsmenge insgesamt in L	23,1	23,1
Austrag Sickerwasser in L	11,1	10,9
kumulierter Austrag in %	48,2	47,2
kumulierter Rückhalt in L pro kg Schlacke	1,06	1,12

Sickerwasseraustrag

Der Austrag an Sickerwasser ist für beide Säulen vergleichbar (Abb. 103). Für die Säule ohne Sperre werden durchschnittlich 145 mL ausgetragen und für den Versuch mit Sperre und RGR 143 mL. Phasenweise, etwa nach 100 bis 225 Tagen bzw. nach 425 Tagen, wird für die Säule mit Sperrsicht und RGR vglw. weniger Sickerwasser ausgetragen.

pH-Wert

Im Sickerwasser aus den Säulen der VA-C nehmen die pH-Werte mit fortwährender Versuchsdauer ab, für den Versuch ohne Sperre von 10,7 auf 6,9 und für den Versuch mit Sperre und RGR von 11,5 auf 9,4 (Abb. 104). Für die Versuchsanordnung ist sehr auffällig, dass ab einer Versuchsdauer von 100 Tagen das Sickerwasser aus dem Blindversuch deutlich niedrigere pH-Werte aufweist, als der Versuch mit Sperre und RGR. Bei den zuvor diskutierten Versuchen (Säulenversuche der Versuchsanordnung A und Testfelder Eberstetten) lagen die pH-Werte immer in einem vergleichbaren Bereich bzw. in den Sickerwässern aus den Lysimetern Raindorf wurden für den Blindversuch höhere pH-Werte ermittelt.

Leitfähigkeit und leichtlösliche Spezies (Cl, Na)

Die Leitfähigkeit nimmt im Sickerwasser mit fortwährender Versuchsdauer ab (Abb. 105). Zu Versuchsbeginn wurden für den Blindversuch etwa 65 mS/cm und nach 19 Monaten Laufzeit etwa 4,5 mS/cm gemessen. Der Einbau von RGR für die Säule mit Sperre bewirkte zu Versuchsbeginn eine deutlich erhöhte Leitfähigkeit mit 220 mS/cm. In der Folgezeit wurden jedoch für die Leitfähigkeit im Sickerwasser aus den beiden Säulen ähnliche Werte festgestellt. Es ist bemerkenswert, dass phasenweise entweder für den Blindversuch oder für die Säule mit Sperre und RGR höhere Werte gemessen wurden. Ab einer Versuchsdauer von 460 Tagen fällt auf, dass das Sickerwasser aus der Säule mit Sperre und RGR konzentrierter ist. Die Umstellung des Bewässerungsmodus auf Leitungswasser wirkt sich im beobachteten Versuchszeitraum nicht auf die Entwicklung der Leitfähigkeit aus.

Bezogen auf den Parameter Cl ist speziell in den ersten 300 Tagen das Sickerwasser aus dem Versuch mit Sperre und RGR höher konzentriert als das Sickerwasser aus dem Blindversuch. Über die RGR werden kontinuierlich leichtlösliche Spezies dem Sickerwasser zugeführt (Abb. 106). Für den Versuch ohne Sperre nehmen die Cl-Konzentrationen von 24,8 auf 1,2 mg/L ab und für den Versuch mit Sperre und RGR von 128 auf 1,4 mg/L. Die Bewässerung mit Leitungswasser führt zu einem deutlichen Abfall der Cl-Konzentration für beide Versuche.

Durch die Wirkung der RGR ist auch die erste Sickerwasserprobe für den Versuch mit Sperre stark an Na angereichert (32 mg/L). Überwiegend verhält sich die Na-Konzentration ähnlich wie die Cl-Konzentration im Sickerwasser (Abb. 106).

Weitere Parameter

Für Ca zeigt sich beim Versuch mit Sperre deutlich die Wirkung der RGR (Abb. 107). In einer Anfangsphase von 50 Tagen ist die Ca-Konzentration im SW aus dem Versuch ohne Sperre um ein Vielfaches geringer (max. 1,5 mg/L), während für den Versuch mit Sperre die Konzentration von 21.000 mg/L auf 2,4 mg/L abnimmt. Ähnlich den Säulen aus der

Versuchsanordnung A erhöht sich auch hier die Ca-Konzentration mit fortwährender Versuchsdauer. Dabei ist das Sickerwasser aus dem Blindversuch überwiegend konzentrierter. Hohe SO₄-Konzentrationen wurden nur in den ersten beiden Sickerwasserproben des Versuchs mit Sperre und RGR analysiert (max. 1,8 g/L). In der Folgezeit schwanken die SO₄-Konzentrationen für den Versuch ohne Sperre zwischen 0,4 und 1,3 mg/L und für den Versuch mit Sperre und RGR zwischen 0,1 und 1,2 mg/L (Abb. 108). Die Umstellung auf eine Bewässerung mit Leitungswasser führte zu deutlich geringeren SO₄-Konzentrationen. Dies gilt auch für die Parameter Cu und Mo (beide Abb. 109). Für Cu zeigt sich in den Sickerwässern aus beiden Säulen eine kontinuierliche Auswaschung von anfänglich 20 auf 1 mg/L. Das Sickerwasser aus dem Versuch mit Sperre und RGR ist überwiegend konzentrierter. Für den Parameter Mo nimmt die Konzentration von 12,6 auf 0,8 mg/L ab. Lediglich zu Versuchsbeginn bis etwa 100 Tage war das Sickerwasser aus dem Blindversuch konzentrierter. Für den Parameter Pb (Abb. 110) liegen die Werte ab 130 Tagen unterhalb der Bestimmungsgrenze (<0,08 mg/L). Eine Einzelmessung für die erste Sickerwasserprobe aus dem Lysimeter mit Sperre und RGR ergab eine vglw. hohe Pb-Konzentration mit 0,92 mg/L. Auch für die Säulenversuche der VA-C ist die Sickerwasserentwicklung für den Parameter Zn (Abb. 110) starken Schwankungen unterworfen. Zum Teil liegen die Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze (< 0,02 mg/L). Es werden aber auch Maximalwerte um 0,31 mg/L erreicht.

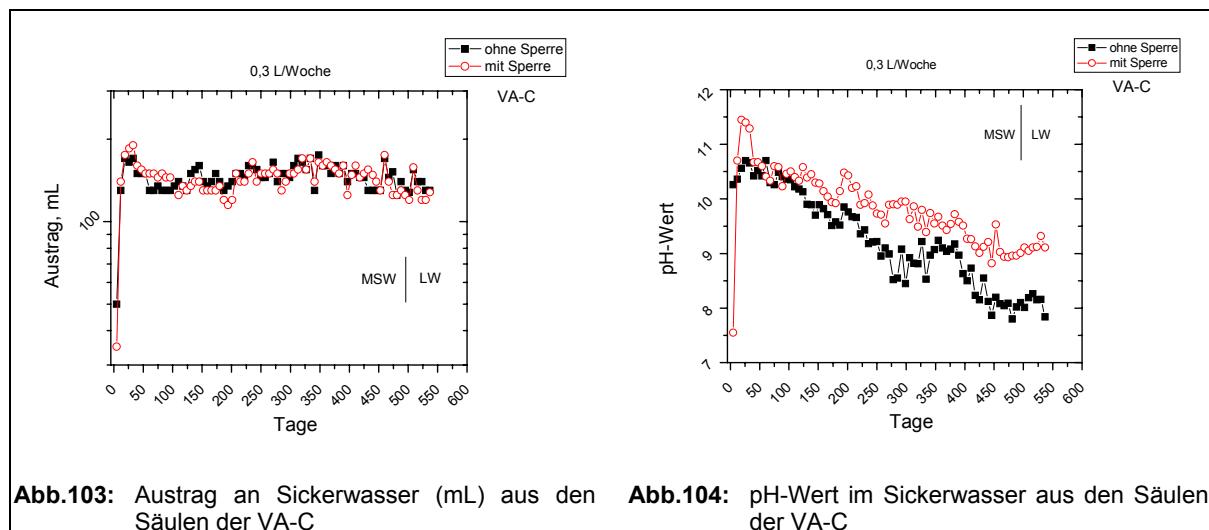
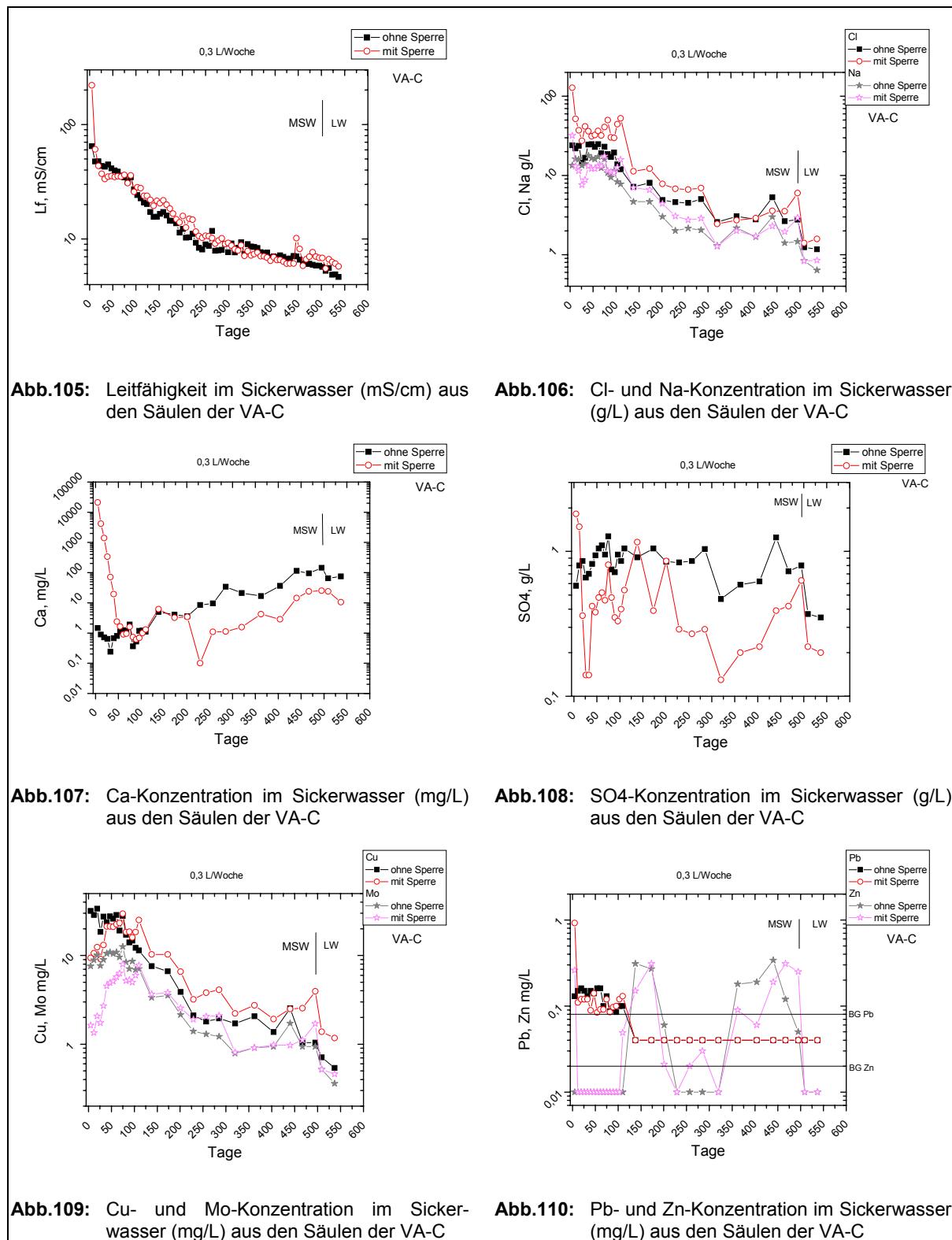


Abb.103: Austrag an Sickerwasser (mL) aus den Säulen der VA-C

Abb.104: pH-Wert im Sickerwasser aus den Säulen der VA-C



Frachtenberechnungen

Der Frachtenaustrag für den Blindversuch entspricht dem Verlauf des zuvor diskutierten Blindversuch IBV3 aus der VA-A (Tab. 31). Für die Säule mit Sperrre und RGR ergibt sich ein stärkerer Austrag für Cl und Na im Vergleich zum Säulenversuch ISFK3 der VA-A. Offensichtlich verstärkt der Beitrag der RGR die Auswaschung leichtlöslicher Spezies. Für beide Säulen der VA-C wurde als Folge der Bewässerung mit MSW die Parameter SO4 und

Ca innerhalb der Säulen angereichert. Mo wird in der Säule RSFK weniger stark ausgetragen, der Parameter Cu hingegen stärker. Eine in etwa gleich hohe Anreicherung ist für Pb und Zn gegeben, die über das Modellsickerwasser zugeführt wurden.

Tab. 31: Zusammenfassung der Frachtenberechnung, Abreicherung bzw. Anreicherung in % in Bezug auf die Ausgangsmenge, Blindversuch (RBV), und Versuch mit Sperre (RSFK)

Versuchsbezeichnung	RBV		RSFK
	ohne Sperre	mit Sperre	
Versuchsanordnung		VA-C	
Dauer in Wochen		77	
Bewässerung		MSW/LW	
Parameter	Proz. Ab-/Anreicherung		
Cl	-30,1	-45,9	
SO ₄	+2,50	+3,76	
Na	-19,8	-22,7	
Ca	+0,35	+0,30	
Cu	-0,033	-0,045	
Mo	-9,81	-7,03	
Pb	+0,56	+0,59	
Zn	+0,067	+0,069	

4.4.2 Großlysimeter Waldering

Ein Lysimeterversuch wurde als Blindversuch (WA 1, ohne Sperre) durchgeführt und in das Lysimeter WA2 wurde auf halber Höhe eine Sperre aus Schlacke-Feinkorn verdichtet eingebaut. Beide Großlysimeter Waldering wurden am Top mit RGR abgedeckt. Hier wurde im Besonderen der kontinuierliche Einfluss der leichtlöslichen Salze aus den RGR auf Feststoffgehalte bzw. Eluat- und Sickerwasserkonzentrationen untersucht. Bei der Betrachtung der Ergebnisse muss in den Vordergrund gestellt werden, dass neben dem SFK in mittlerer Höhe auch die RGR in der obersten Schicht der Lysimeter eine Diskontinuität im Sinne eines Korngrößenwechsels entlang des vertikalen Versuchsprofils darstellen. Die Großlysimeter in Waldering wurden nicht abgedeckt und waren dem natürlichen Niederschlag ausgesetzt (min. 1000 mm/Jahr). Im Gegensatz zu den Großlysimetern Raindorf ist daher hier eine verstärkte Auswaschung zu erwarten. Im Folgenden sind Wassergehalt, Glühverlust und ausgewählte Eluatparameter zu Versuchsbeginn, zum Zeitpunkt der jeweiligen Bohrkampagnen (Ergebnisse der Bohrkampagnen I und II) und zu Versuchsende (Ergebnisse der Bohrkampagne III) sowie die Konzentrationsverläufe im Sickerwasser kurz dargestellt. Da es für diese Lysimeter keine Sickerwassererfassung gab, fehlen in diesem Kapitel die Ergebnisse zum summarischen Frachtaustrag.

Wassergehalt/Glühverlust

Die Parameter Wassergehalt bzw. Glühverlust haben sich mit fortschreitender Versuchsdauer im Vergleich zum Ausgangsmaterial (10,1 bzw. 14,9 Gew.-%) erhöht (Abb. 111 und 112). Für den Blindversuch nehmen die Werte mit fortwährender Versuchsdauer von min. 16,3 bzw.

21,2 Gew.-% auf max. 22,1 bzw. 27,6 Gew.-% zu. Die Verteilung entlang des Bohrprofils ist sehr gleichmäßig. Im Gegensatz zum Blindversuch zeigt sich für das Lysimeter mit Sperre eine Diskontinuität sowohl für den Wassergehalt als auch für den Glühverlust. Im Profilverlauf liegen die höchsten Werte innerhalb der Sperre vor. Unmittelbar ober- und unterhalb der Sperre hingegen sind die Werte deutlich niedriger. Diese Tendenz wurde vor allem nach der ersten und dritten Bohrkampagne beobachtet. Es fällt auf, dass auch beim Blindversuch in der Probe 2f der dritten Bohrkampagne ein trockeneres Milieu vorliegt. Dies ist vermutlich auf die aufstauende Wirkung der RGR zurückzuführen. Die Tabelle 32 zeigt die Wassergehalte und Glühverluste der Feststoffproben aus der dritten Bohrkampagne für die beiden Großlysimeter.

Tab. 32: Verteilung der Parameter Wassergehalt und Glühverlust entlang des Versuchsprofils der 3. Bohrkampagne, Testfeld ohne Sperre (WA 1) und Testfeld mit Sperre (WA 2) nach 102 Wochen Versuchsdauer; Niederschlagszutritt, für die Proben ober- bzw. unterhalb der Sperrsicht wurde jeweils ein Mittelwert gebildet

Großlysimeter	WA1	WA2	WA1	WA2
Aufbau	ohne Sperre	mit Sperre	ohne Sperre	mit Sperre
Parameter	Wassergehalt Gew.-%		Glühverlust* Gew.-%	
Ausgangsmaterial	$10,1 \pm 0,8$		$14,9 \pm 2,0$	
oberhalb der Sperre	$21,3 \pm 1,1$	$22,4 \pm 1,4$	$26,4 \pm 1,6$	$28,1 \pm 2,3$
innerhalb der Sperre	-	25,6	-	32,0
unterhalb der Sperre	$20,8 \pm 0,8$	$21,2 \pm 2,3$	$26,4 \pm 1,6$	$26,6 \pm 2,6$

*der Glühverlust wurde bei 1050° C ermittelt und bezieht sich auf die Originalsubstanz, d.h. Gv – Wg entspricht der Definition des Parameters Glühverlust in der (AbfAblV)

Eluate

pH-Wert

Die pH-Werte im Eluat der Bohrproben nehmen mit fortwährender Versuchszeit zu. Sie sind höher im Vergleich zur Ausgangsschlacke, aber geringer im Vergleich zu den RGR, die einen pH-Wert von 12,2 aufweisen (Abb. 113). In der Zunahme des pH-Wertes zeigt sich der Einfluss der RGR. Insbesondere nach der dritten Bohrkampagne weisen die Eluate der Bohrproben aus beiden Lysimetern die höchsten pH-Werte auf. Zum diesem Zeitpunkt sind für das Lysimeter mit Sperre die pH-Werte (max. pH 12) alkalischer als für den Blindversuch (max. pH-Wert 11,6). Vom Top zur Basis nehmen die pH-Werte im Eluat für beide Lysimeter ab.

Leitfähigkeit und leichtlösliche Salzphasen (Cl, Na)

Bis zur zweiten Bohrkampagne (Laufzeit 46 Wochen) wird die Leitfähigkeit im Eluat der Bohrproben im Vergleich zum Ausgangsmaterial deutlich erhöht (Abb. 114). Dies ist auf den Beitrag der RGR zurückzuführen. Frische RGR haben eine Eluat-Leitfähigkeit von 29,6 mS/cm. Bis zur zweiten Bohrkampagne sind für den Versuch mit Sperre die Eluat-Leitfähigkeiten höher (max. 3,0 mS/cm) als für den Blindversuch (max. 2,8 mS/cm). Nach der dritten Bohrkampagne nimmt die Leitfähigkeit deutlich ab. Für das Lysimeter mit Sperre sind die Werte am geringsten (min. 0,7 mS/cm). Für den Blindversuch liegen sie bei min.

0,9 mS/cm. Die Verteilung entlang des Versuchsprofils hat sich mit fortwährender Versuchsdauer verändert. Für den Blindversuch zeichnete sich zunächst infolge der RGR eine Abnahme der Eluat-Leitfähigkeit vom Top zur Basis ab. Für den Versuch mit Sperre hingegen kristallisierte sich eine deutliche Salzanreicherung im Bereich der Sperre heraus. Nach der zweiten Bohrkampagne zeigte sich für beide Lysimeter indessen eine Zunahme der Eluat-Leitfähigkeit vom Top zur Basis. Dies zeigt, dass nach 46 Wochen Laufzeit der Beitrag von RGR den Auswaschungseffekt nicht mehr ausgleichen konnte. Nach der dritten Bohrkampagne wurde für beide Lysimeter eine gleichmäßige Verteilung festgestellt mit den niedrigsten Eluat-Leitfähigkeiten (min. 0,7 mS/cm).

Für die Parameter Cl und Na zeigt sich eine vergleichbare Eluat-Entwicklung wie für die Leitfähigkeit (Abb. 115 und 116). Mit fortwährender Versuchsdauer nehmen für den Blindversuch die Cl-Konzentrationen im Eluat von max. 800 auf min. 100 mg/L und die Na-Konzentrationen von max. 225 auf min. 12 mg/L ab. Für das Lysimeter mit Sperre ist die Auswaschung der leichtlöslichen Spezies z.T. stärker: für Cl von max. 900 auf min. 20 mg/L und für Na von max. 277 auf min. 10 mg/L. Eine Anreicherung speziell innerhalb der Sperrsicht ist nicht festzustellen.

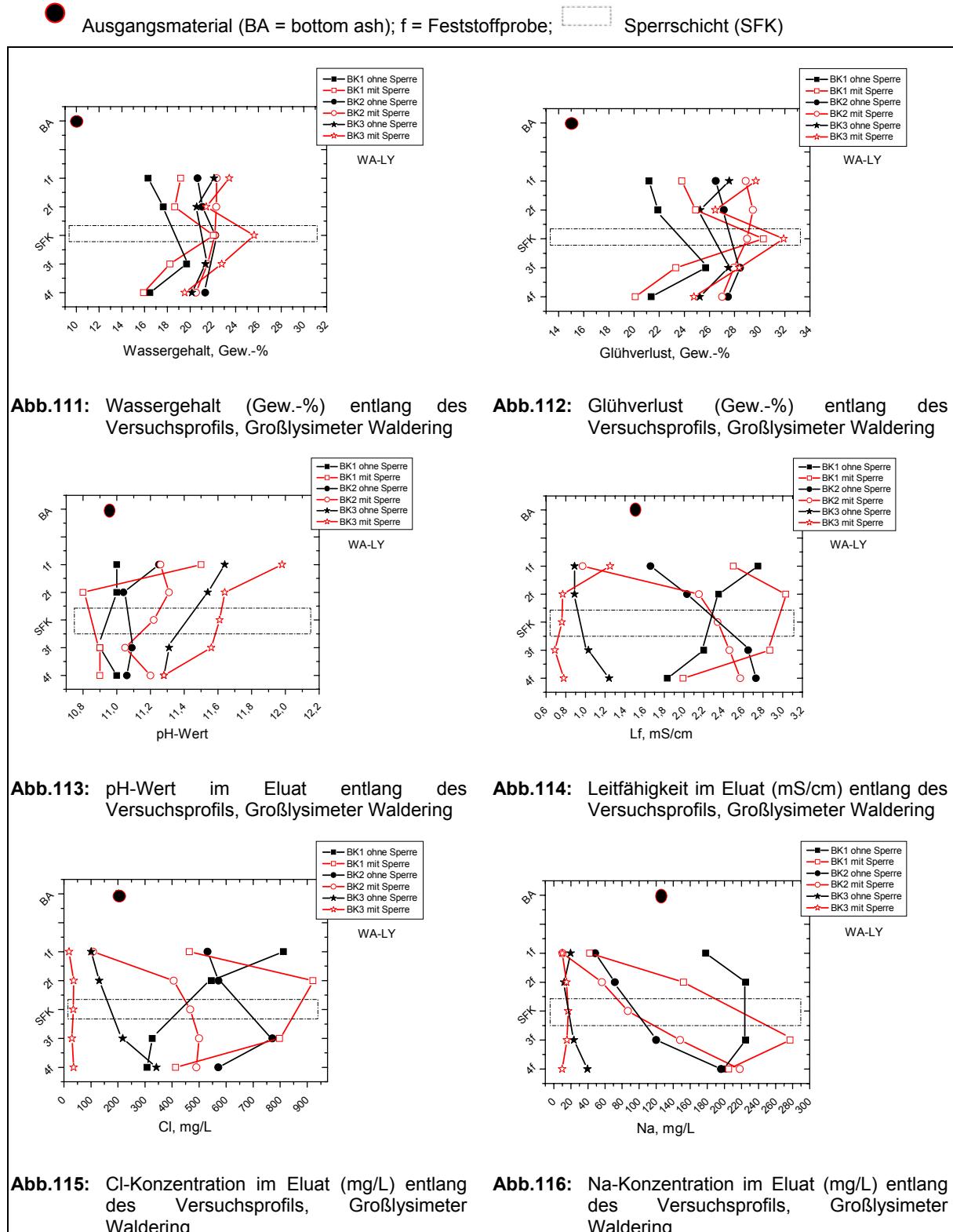
Weitere Parameter

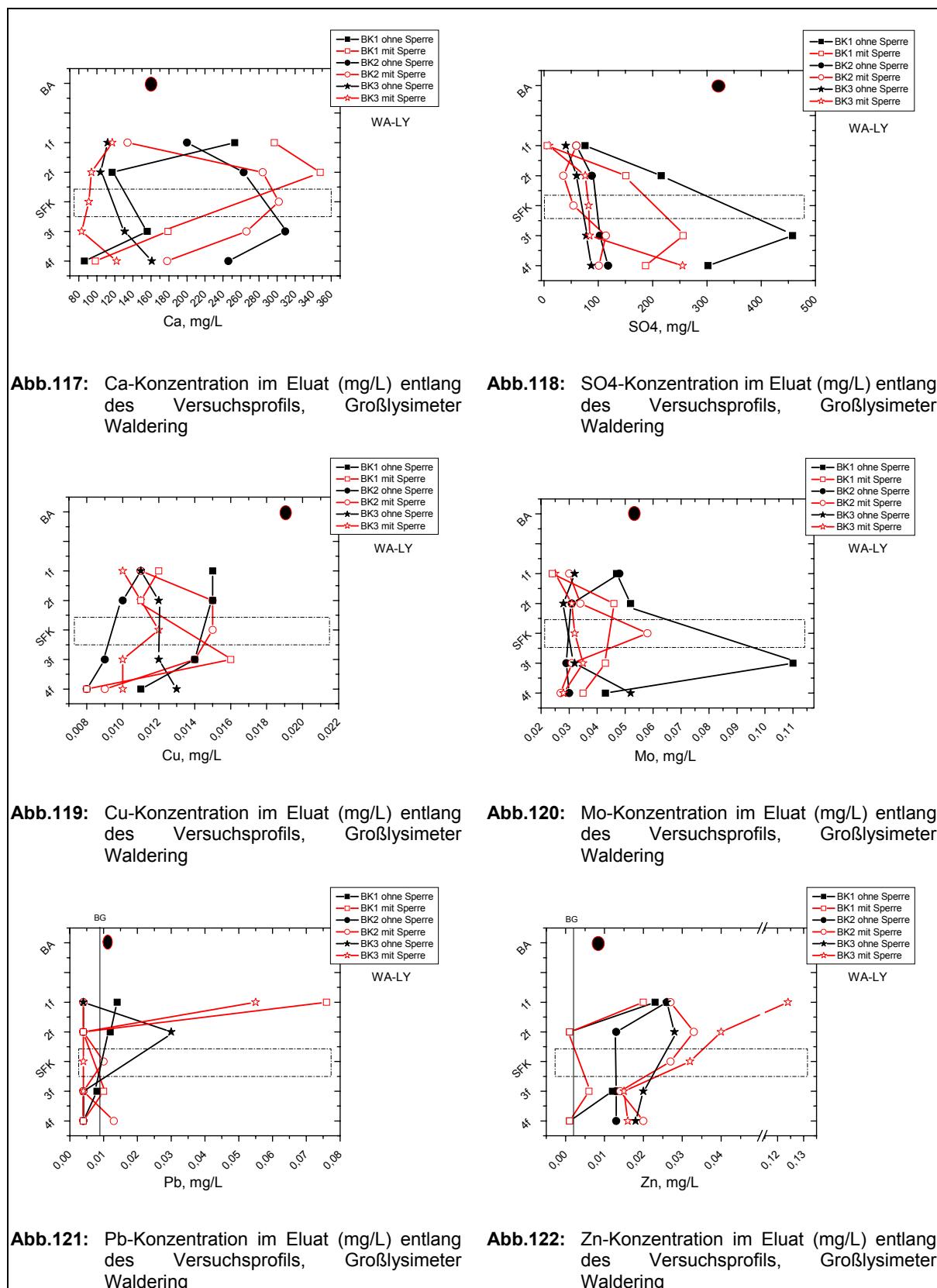
Für Ca zeigt sich mit fortwährender Versuchsdauer bis zur zweiten Bohrkampagne für beide Versuche eine Anreicherung im Vergleich zur Ausgangsschlacke (Abb. 117). Dies ist als Folge des Einflusses der RGR zu sehen. Die Ca-Konzentration im Eluat für frische RGR liegt bei 4.380 mg/L. Nach der zweiten Bohrkampagne hat sich für das Lysimeter mit Sperre eine deutliche Ca-Anreicherung innerhalb der Sperre gezeigt (max. 300 mg/L). Nach der dritten Bohrkampagne nimmt Ca infolge Auswaschung stark ab. Für beide Lysimeter – analog der Leitfähigkeit – wurde eine gleichmäßige Verteilung entlang des Bohrprofils festgestellt. Eine Anreicherung speziell innerhalb der Sperrsicht war nicht mehr zu beobachten.

Der Parameter SO₄ wurde nach der ersten Bohrkampagne für beide Lysimeter deutlich ausgewaschen (Abb. 118). Eine Anreicherung innerhalb der Sperrsicht konnte nicht festgestellt werden. In den Bohrproben der zweiten und dritten Bohrkampagne sind kaum noch Unterschiede in den SO₄-Eluatkonzentrationen der beiden Lysimeter erkennbar.

Für den Parameter Cu (Abb. 119) waren die Feststoffproben im Vergleich zum Ausgangsmaterial (0,019 mg/L) abgereichert. Die Eluatkonzentrationen lagen im Bereich zwischen 0,008 – 0,016 mg/L. Bei Mo zeigt sich für beide Lysimeter mit einer Ausnahme (Probe 3f, Blindversuch, erste Bohrkampagne) eine tendenzielle Auswaschung (Abb. 120). Insbesondere nach der zweiten Bohrkampagne wurde innerhalb der Sperrsicht eine Anreicherung an Mo beobachtet (max. 0,06 mg/L). Nach der dritten Bohrkampagne verhält sich die Mo-Entwicklung im Eluat für beide Lysimeter analog den leichtlöslichen Spezies. Für den Parameter Pb (Abb. 121) ist auffällig, dass am Top des Lysimeters mit Sperre auch nach

der dritten Bohrkampagne ein erhöhter Wert ($0,055 \text{ mg/L}$) gemessen wurde. Für die übrigen Proben lagen die Pb-Konzentrationen großteils unterhalb der Bestimmungsgrenze ($< 0,008 \text{ mg/L}$) und erreichten maximale Werte um $0,03 \text{ mg/L}$. Für Zn ist eine Anreicherung gegenüber dem Ausgangsmaterial festzuhalten (Abb. 122). Die Konzentrationen sind jedoch mit max. $0,12 \text{ mg/L}$ gering. Nach der dritten Bohrkampagne ist im Vergleich zum Blindversuch für das Lysimeter mit Sperrre eine deutliche Zn-Abreicherung vom Top zur Basis erkennbar.





Sickerwasserentwicklung

Für die Großlysimeter Waldering war keine Sickerwasserfassung gegeben, daher ließ sich die Sickerwassermenge nur auf Basis von Einzelmessungen extrapoliieren. Die kumulierte Sickerwassermenge aus dem Blindversuch war mit 2.251 Litern gegenüber dem Lysimeter mit

Sperre (2.099 Liter) leicht erhöht (Tab. 33). Aufgrund der geringen Datenbasis ist der Sickerwasseraustrag als näherungsweise gleich anzusetzen. Dies gilt auch für den Rückhalt in L pro kg Schlacke. Für beide Versuche liegt der Betrag bei etwa bei 0,4 L je kg Schlacke.

Tab. 33: Bewässerungs- und Austragsmengen für die Großlysimeter Waldering ohne (WA1) und mit Sperre (WA2) im Vergleich

Versuchsbezeichnung	WA1 ohne Sperre	WA2 mit Sperre
Versuchsanordnung	Großlysimeter Waldering	
Befüllung	Schlacke B	
Bewässerung	Niederschlag	
Dauer in Wochen	103	
Eingebaute Schlackemenge in kg	8.800	8.800
durchschnittliche Bewässerungsmenge in L pro Monat	170	170
Bewässerungsmenge insgesamt in L pro 1,8m ²	4.092	4.092
Austrag Sickerwasser in L	2.251	2.099
kumulierter Austrag in %	55,0	51,3
kumulierter Rückhalt in L pro kg Schlacke	0,35	0,36

pH-Wert

Generell ist für beide Lysimeter die Entwicklung des pH-Werts im Sickerwasser starken Schwankungen unterworfen. Die pH-Werte im Sickerwasser aus dem Blindversuch sind generell alkalischer und bewegen sich zwischen 8,3 und 12,5. Im Vergleich dazu liegen sie für den Versuch mit Sperre zwischen 6,6 und 12,4 (Abb. 123).

Leitfähigkeit und leichtlösliche Spezies (Cl, Na)

Die Sickerwässer der Großlysimeter Waldering weisen zunächst eine vglw. geringe Leitfähigkeit (ca. 23 mS/cm) auf (Abb. 124). Nach etwa 75 Versuchstagen steigt die Leitfähigkeit deutlich an und liegt für beide Lysimeter zwischen 40 – 80 mS/cm. Für den Blindversuch nimmt die Leitfähigkeit im Sickerwasser nach 400 Tagen und für das Lysimeter mit Sperre zeitverzögert nach 475 Tagen stark ab (auf min. 10 mS/cm). Diese Abnahme ist hier jahreszeitlich bedingt und die Zeitspanne fällt mit den Wintermonaten zusammen. In der Folgezeit ist in den Sommermonaten die Entwicklung der Leitfähigkeit Schwankungen unterworfen und zu Versuchsende hin steigt die Leitfähigkeit tendenziell wieder an. Während des beobachteten Versuchszeitraums ist das Sickerwasser aus dem Lysimeter mit Sperre phasenweise salzreicher im Vergleich zum Blindversuch. In den letzten 100 Versuchstagen wurde jedoch über das Sickerwasser aus dem Lysimeter mit Sperre weniger an leichtlöslicher Spezies ausgetragen.

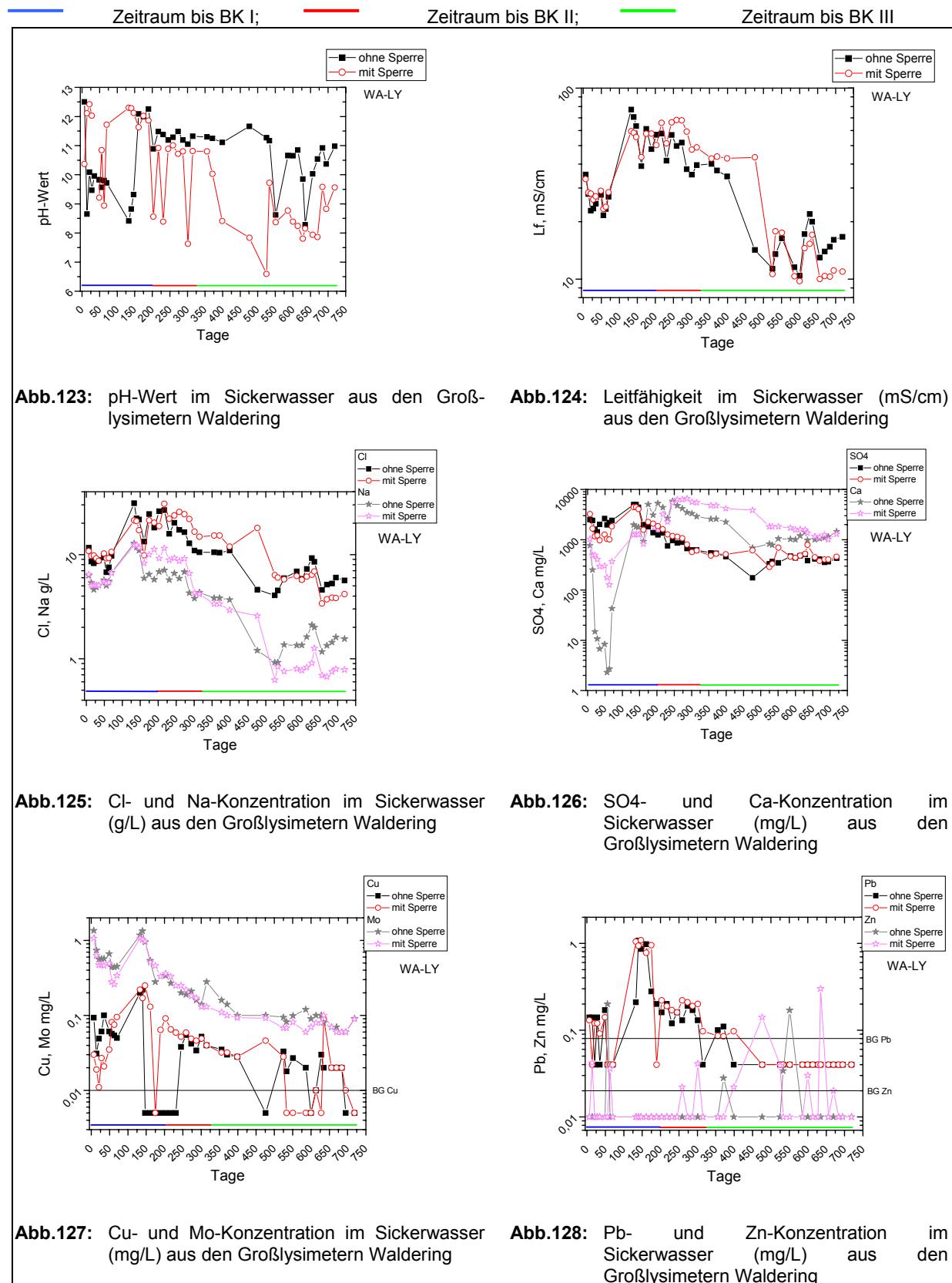
Für den Parameter Cl, aber auch in abgeschwächter Form für Na, zeigt sich eine vergleichbare Entwicklung wie bei der Leitfähigkeit (beide Abb. 125). Auffällig ist auch hier, dass mehrfach ein Trendwechsel in der Sickerwasserentwicklung einsetzt. Phasenweise ist das Sickerwasser aus dem Lysimeter mit Sperre salzreicher. Für Cl verläuft in einer ersten Phase bis etwa 250 Tage die Entwicklung von Blindversuch und Versuch mit Sperre parallel.

Für Na umfasst dieser Zeitraum jedoch lediglich 150 Tage. Dann werden im Sickerwasser aus dem Lysimeter mit Sperre höhere Cl- und Na-Konzentrationen analysiert. Für Cl setzt nach 600 Tagen und für Na bereits früher nach 300 Tagen erneut ein Trendwechsel ein. Nunmehr sind die Cl- und Na-Konzentrationen für das Lysimeter mit Sperre niedriger.

Weitere Parameter

Für die Großlysimeter Waldering bewirken die RGR ebenfalls sehr hohe Ca-Konzentrationen im Sickerwasser (max. 6.580 mg/L). Anfänglich nehmen die Ca-Konzentrationen ab (Abb. 126). Die Entwicklung ist für den Blindversuch stärker als für den Versuch mit Sperre. Nach etwa 100 Versuchstagen steigen die Ca-Konzentrationen für beide Versuche erneut bis max. 6,6 g/L an. Die Ca-Konzentrationen aus dem Lysimeter mit Sperre weisen nach 250 Tagen höhere Werte auf. Nach 500 Versuchstagen nähern sich die Werte vergleichbaren Konzentrationen um 1 g/L. Bezogen auf die SO₄-Konzentration sind nur geringfügige Unterschiede im Sickerwasser aus den beiden Lysimetern festzustellen (Abb. 126). Ein SO₄-Maximum (ca. 5 g/L) wird für beide Lysimeter nach 130 Tagen erreicht. In der Folgezeit nehmen die Konzentrationen ab. Gegen Ende der Versuchsdauer liegen die Konzentrationen deutlich unter 1 g/L.

Für den Parameter Cu (Abb. 127) werden lediglich Maximalwerte um 0,03 mg/L erreicht. Im Vergleich dazu wurden im Sickerwasser aus den Lysimetern Raindorf max. 9,8 mg/L und für die Testfelder in Eberstetten max. 2,3 mg/L erreicht. Die Mo-Konzentrationen im Sickerwasser nehmen kontinuierlich von anfänglich ca. 1,35 mg/L auf 0,06 mg/L ab (Abb. 127). Die Pb-Konzentrationen im Sickerwasser liegen nach einer Versuchszeit von 400 Tagen unterhalb der Bestimmungsgrenze (Abb. 128). Es ist auffallend, dass nach etwa 125 Tagen im Frühling eine verstärkte Mobilisierung von Pb mit Spitzenwerten von 1,1 mg/L auftrat. Die Zn-Konzentrationen (Abb. 128) schwanken in beiden Versuchsaufbauten um 0,1 mg/L, liegen aber oftmals unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,02 mg/L. Für die Sickerwasserentwicklung der Schwermetalle sind zwischen den Lysimetern kaum Unterschiede zu erkennen.



4.4.3 Fazit zur Wirkung von Rauchgasreinigungsrückständen

Der Einbau von RGR, entweder als Sperrsicht oder als Deckschicht an der Oberfläche, gewährleistet eine kontinuierliche Salzzugabe. Eine große Wirksamkeit haben die RGR auf die Sickerwasserentwicklung der Parameter Ca und Pb. Dies ist auf die hohen Gehalte an leichtlöslichen Verbindungen in frischen RGR zurückzuführen.

Feststoffentwicklung:

- Wassergehalt und Glühverlust: generell Zunahme mit fortschreitender Versuchsdauer, nach der dritten Bohrkampagne für den Blindversuch mit Sperre gleichmäßige Verteilung entlang des Profils, für das Lysimeter mit Sperre deutlich erhöhte Werte im Bereich der Sperre – Hinweis auf Stauwasser
- Wirkung der Sperrsicht auf Salzanreicherungen: bis zu einer Versuchsdauer von 42 Wochen; nach der letzten Bohrkampagne gleichmäßige Verteilung entlang des Bohrprofils; eventuell Verletzung der Sperrsicht und Verlust der Wirksamkeit für bestimmte Spezies wie Cl, Na oder Ca

Sickerwasserentwicklung:

- pH-Werte im Sickerwasser: die Entwicklung ist für Säulenversuche und Lysimeter sehr unterschiedlich; für den Säuleversuch mit Sperre und RGR sind die pH-Werte nach 100 Tagen deutlich höher im Vergleich zum Blindversuch; für das Lysimeter Waldering mit Sperre hingegen sind die pH-Werte etwa ab 170 Versuchstagen großteils deutlich geringer im Vergleich zum Blindversuch
- Trendwechsel: generell ist die Sickerwasserentwicklung geprägt von mehrfachen Trendwechsel, Wechsel je nach Element zu einer anderen Zeit
- Cl-Konzentration im Sickerwasser: für den Säulenversuch mit Sperre und RGR sind die Sickerwässer in Anfangsphase bis etwa 300 Tage konzentrierter im Vergleich zum Blindversuch; für die Lysimeter Waldering generell niedrigere Konzentrationen und die Entwicklungen sind einander vergleichbar
- Ca-Konzentration im Sickerwasser: Entwicklungen der Säulenversuche und Lysimeter weichen stark voneinander ab - für den Säulenversuch RSFK ist infolge der Sperrsicht aus SFK und RGR bis etwa 50 Versuchstage das Sickerwasser stark aufkonzentriert; in der Folgezeit nehmen die Ca-Konzentrationen stark ab; analog den Säulenversuchen der VA-A wird ab einer Versuchsdauer von ca. 350 Tagen ein Anstieg der Ca-Konzentrationen mit fortwährender Versuchsdauer verzeichnet; für die Lysimeter Waldering werden ab einer Versuchsdauer von 150 Tagen generell deutlich höhere Ca-Konzentrationen gemessen
- SO₄-Konzentrationen im Sickerwasser: für die Sickerwässer aus dem Säulenversuch mit Sperre und RGR von Beginn an deutlich geringer im Vergleich zum Blindversuch und es

- werden auch deutlich geringere Konzentrationen im Vergleich zu den Lysimetern Waldering festgestellt, hier waren die Entwicklungen vergleichbar
- Pb-Konzentrationen im Sickerwasser: für den Säulenversuch mit Sperre und RGR werden über den gesamten Versuchszeitraum mehrmals Werte > 0,1 mg/L gemessen, die Spitzenwerte an Pb (bis max. 1 mg/L), wie sie für die Lysimeter Waldering nach einer Versuchsdauer von 130 Tagen festgestellt wurden, wurden nicht erreicht

Frachtenberechnung:

- Auswaschung an leichtlöslicher Spezies (Cl): für den Säulenversuch mit Sperre und RGR wurden im Vergleich zum Blindversuch oder zu den Säulenversuchen der VA-A deutlich höhere Beträge verzeichnet
- Anreicherung an SO₄, Ca, Pb, Zn: die Beträge sind vergleichbar mit den Säulenversuchen der VA-A, hier wird die Entwicklung vom Modellsickerwasser vorgegeben und weniger von den RGR

4.5 WIRKUNG DER BEWÄSSERUNGSMENGE

4.5.1 Säulenversuche der Versuchsanordnung B

Die Laufzeiten der Säulenversuche aus der Versuchsanordnung B (VA-B) liegen zwischen 62 und 67 Wochen. Für die Säulenversuche der VA-B wurden während der Versuchsdurchführung die Rahmenbedingungen (u.a. Bewässerungsmenge, Bewässerungsmedium) verändert. Im Folgenden werden aus der Versuchsanordnung B der Blindversuch (BV1) und die Versuchsanordnungen mit Sperrsicht (SFK3 und RSFK3) exemplarisch dargestellt. Die Säule RSFK3 wurde zusätzlich am Top der Säule mit RGR abgedeckt. Bereits nach 50 Versuchstagen wurde das Bewässerungsmedium von Leitungswasser auf Modellsickerwasser umgestellt. Zusätzlich wird die Entwicklung einer weiteren Säule mit Sperre und RGR am Top (RSFK2) vorgestellt. Sie wurde ausschließlich mit Leitungswasser bewässert. Zu Versuchsbeginn bis etwa 175 Versuchstage wurde mit einer Menge von zwei Litern bewässert. An zwei nicht aufeinander folgenden Tagen wurden jeweils morgens und abends 500 mL appliziert. In der Folgezeit wurde die Menge auf 0,3 Liter pro Woche reduziert, bei gleichbleibender Zusammensetzung des Modellsickerwassers. An einem Tag wurden morgens und abends 150 mL Sickerwasser aufgegeben. Die Säulen RSFK2 und RSFK3 wurden zu diesem Zeitpunkt mit frischen RGR (0,5 kg) an der Oberfläche der Säulen abgedeckt.

Wassergehalt und Glühverlust

Die Tabelle 34 zeigt die Werte für Wassergehalt und Glühverlust (1050°C) für den Blindversuch und die Versuche mit Sperre sowie RGR. Die eingebaute Schlacke B hat einen Wassergehalt von ca. 20 Gew.-% und einen Glühverlust von 23 Gew.-%.

Tab. 34: Verteilung der Parameter Wassergehalt und Glühverlust entlang des Säulenprofils, Säule ohne Sperre (BV1) und mit Sperre (SFK3, RSFK2 und RSFK3) im Vergleich, für die Proben ober- bzw. unterhalb der Sperrsicht wurde jeweils ein Mittelwert gebildet

Versuchsbezeichnung	BV1	SFK3	RSFK2	RSFK3	BV1	SFK3	RSFK2	RSFK3	
Aufbau	ohne Sperre	mit Sperre	mit Sperre	mit Sperre	ohne Sperre	mit Sperre	mit Sperre	mit Sperre	
Parameter	Wassergehalt Gew.-%					Glühverlust* Gew.-%			
Ausgangsmaterial	20,2					23,3			
oberhalb der Sperre	20,4 ± 1,5	20,0 ± 0,4	20,1 ± 2,1	21,6 ± 2,0	25,9 ± 2,1	26,0 ± 0,8	26,4 ± 2,2	28,3 ± 3,0	
innerhalb der Sperre	-	23,2	35,6	31,9	-	28,5	43,4	39,4	
unterhalb der Sperre	23,7 ± 0,5	22,1 ± 1,9	21,3 ± 3,6	21,5 ± 3,4	29,4 ± 0,9	27,2 ± 2,4	27,6 ± 3,5	26,9 ± 3,8	

* der Glühverlust wurde bei 1050° C ermittelt und bezieht sich auf die Originalsubstanz, d.h. Gv – Wg entspricht der Definition des Parameters Glühverlust in der AbfAblV (2001)

Sowohl der Blindversuch (BV1) als auch die Säule mit Sperre (SFK3) zeigen ähnliche Wassergehalte zwischen 19 und 24 Gew.-% (Abb. 129a und 129b) und Glühverluste zwischen 23 und 31 Gew.-% (Abb. 130a und 130b). In beiden Fällen ergeben die Werte einen s-förmigen Verlauf mit niedrigen Werten im oberen Bereich und hohen Werten im unteren

Bereich. Darüber hinaus weist die Sperrsicht bei SFK3 eine aufstauende Wirkung auf, mit einem etwas höheren Wassergehalt (23,2 Gew.-%) innerhalb der Schicht und trockenen Bedingungen unterhalb der Sperrsicht (Probe 8f, 19,6 Gew.-%). Die Aufbringung von RGR (zu Versuchsbeginn und nach 175 Versuchstagen) an der Oberfläche der Säulen RSFK2 und RSFK3 machen die aufstauende Wirkung der Sperrsicht viel deutlicher (Abb. 129b und 130 b). Für die Sperrsicht wurden sehr hohe Wassergehalte bis 36 Gew.-% bzw. Glühverluste bis 44 Gew.-% und trockene Verhältnisse (bis zu 17 Gew.-% bzw. 25 Gew.-%) unterhalb der Sperrsicht festgestellt. Zudem befindet sich auch unmittelbar oberhalb der Sperrsicht eine sehr trockene Zone. Diese kann auf die Aufbringung der RGR zurückgeführt werden. Augenscheinlich bewirkt der Korngrößenübergang von RGR zu MV-Schlacke einen ähnlichen Effekt wie im Bereich der Sperrsicht.

Die basisnahen Proben weisen z.T. erhöhte Wassergehalte bzw. Glühverluste auf. Diese Werte sind vermutlich auf einen Aufstau des Sickerwassers an der Basis zurückzuführen.

Eluate

pH-Wert

Die pH-Werte im Eluat der Säulenproben liegen im alkalischen Milieu zwischen 11,0 und 11,5. Im Vergleich zum Ausgangsmaterial (pH 10,6) sind die Werte somit alkalischer (Abb. 131). Die Ausgangsschlacke für die Lysimeter Waldering, die ebenfalls mit Schlacke B befüllt wurden, weist im Durchschnitt einen höheren pH-Wert von 11,0 im Eluat auf. Somit hat sich der pH-Wert der Eluate der Säulenproben trotz der hohen Auswaschraten zu Beginn der Säulenversuche im Vergleich zum Ausgangsmaterial kaum verändert und liegt z.T. höher.

Leitfähigkeit und leichtlösliche Spezies (Cl, Na)

Das Ausgangsmaterial hat im Eluat eine Leitfähigkeit von ca. 1,8 mS/cm. Der Blindversuch BV1 zeigt entlang des Säulenprofils eine gleichmäßige Verteilung der Leitfähigkeit im Eluat (Abb. 132). Beim Säulenversuch mit Sperre (SFK3) ist die Wirksamkeit der Sperrsicht kaum zu erkennen. Die Werte für die Leitfähigkeit liegen für die beiden Versuche im Bereich um 0,8 mS/cm. Durch die Zugabe von RGR kommt die Wirksamkeit der Sperrsicht deutlich zum Vorschein: bei RSFK2 (LW) und RSFK3 (MSW) wurden unmittelbar oberhalb und unterhalb der Sperrsicht für die Leitfähigkeit Minimalwerte gemessen: Leitfähigkeit ca. 0,65 mS/cm. Innerhalb der Sperrsicht der Säulen RSFK2 und RSFK3 hingegen sind die Werte - ähnlich wie in der obersten Schicht und an der Basis der Säule - deutlich erhöht (max. 0,92 mS/cm). Die Bewässerung mit MSW für die Säule RSFK3 bewirkt im Vergleich zur Säule RSFK2 (LW) eine Erhöhung der Leitfähigkeit im Eluat. Diese Entwicklung konnte auch für die Parameter Cl und insbesondere für Na noch deutlicher beschrieben werden. Die Eluatkonzentrationen für Cl und Na des Ausgangsmaterials liegen bei 280 bzw. 163 mg/L. Die Verteilung entlang des Säulenprofils ist für den Blindversuch und die Säule SFK3 vergleichbar mit dem Verhalten der

Leitfähigkeit (Abb. 133 und 134). Für die Cl- und Na-Konzentrationen wurden Werte bis max. 30 mg/L festgestellt. Die höchsten Cl-Eluatkonzentrationen kommen für die Säule RSFK3 vor (max. 68 mg/L). Auch hier wurde eine Salzanreicherung am Top, innerhalb der Sperrsicht sowie an der Basis festgestellt. Unmittelbar ober- und unterhalb der Sperrsicht betrugen die Cl-Konzentrationen etwa 33 mg/L. Für die Säule RSFK2 (LW) wurden generell geringe Cl-Konzentrationen analysiert (max. 20 mg/L). Für den Parameter Na zeigt sich für die Säule RSFK2 eine vergleichbare Entwicklung zur Leitfähigkeit, jedoch bleiben die Na-Werte tendenziell gering (zwischen 5 – 13 mg/L). Für die Säule RSFK3 wurde hier entgegen der Verteilung für die Leitfähigkeit innerhalb der Sperre sogar eine Abreicherung an Na deutlich (ca. 13 mg/L).

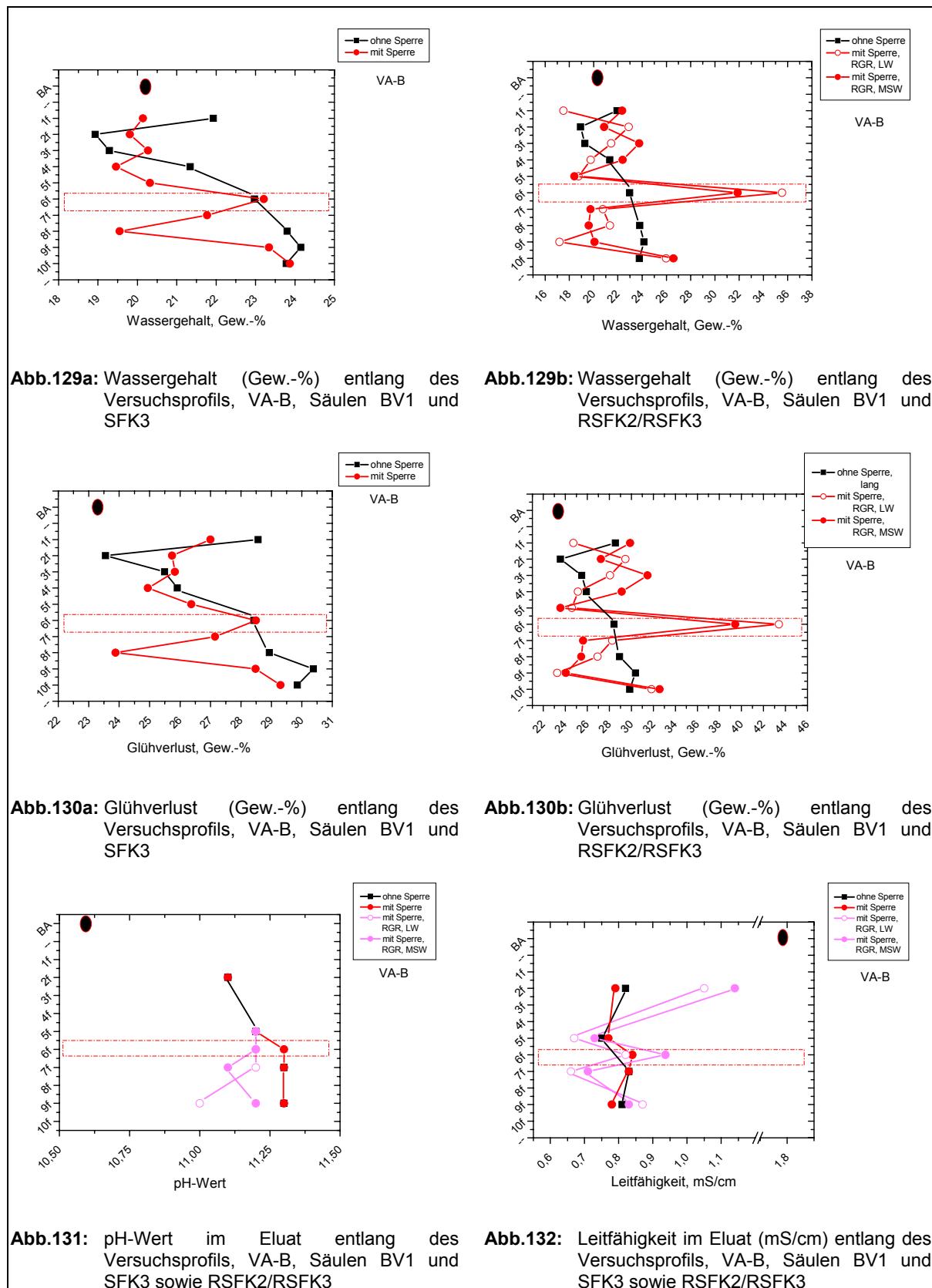
Weitere Parameter

Hinsichtlich der Parameter Ca und SO₄ (Abb. 135 und 136) lässt sich die Wirksamkeit der Sperrsicht für alle drei Säulen mit Sperre (SFK3, RSFK2 und RSFK3) feststellen. Die Verteilung entlang des Profils ist ähnlich dem Verhalten des Parameters Cl. Jedoch sind die Ca- und SO₄-Konzentrationen insbesondere für die Säulen mit RGR geringer im Vergleich zum Blindversuch.

Bezüglich der Schwermetalle zeigt bzgl. des Parameter Cu (Abb. 137) für den Blindversuch und den Versuch mit Sperre (SFK3) kein Unterschied bzgl. der Verteilung entlang des Säulenprofils. Tendenziell nimmt die Cu-Eluatkonzentration vom Top zur Basis hin zu: für den Blindversuch von 0,006 auf 0,013 mg/L und für SFK3 von 0,004 auf 0,009 mg/L. Für die beiden Säulen mit Sperre und RGR (RSFK2 und RSFK3) hingegen hat sich eine deutliche Anreicherung am Top der Säulen (max. 0,021 mg/L) und innerhalb der Sperrsicht (max. 0,014 mg/L) herauskristallisiert. Hier ist auffällig, dass insbesondere für die LW-Säule (RSFK2) die höchsten Werte ermittelt wurden. Für den Parameter Mo waren die Säulenproben im Vergleich zum Ausgangsmaterial (0,09 mg/L) abgereichert (Abb. 138). Tendenziell entspricht die Verteilung entlang der jeweiligen Säulenprofile dem Verhalten des Parameters Cu. Maximal werden Mo-Eluatkonzentrationen um 0,06 mg/L erreicht. Die Konzentrationen für den Parameter Pb sind in den Eluatproben großteils unterhalb der Bestimmungsgrenze (Abb. 139). Diese Entwicklung ist erstaunlich für die beiden Säulen mit RGR als Decksicht, da in frischen RGR erhöhte Anteile an leichtlöslichen Pb-Verbindungen vorliegen. Auch die Entwicklung des Parameters Zn ist bemerkenswert (Abb. 140): Bei den Versuchsanordnungen mit Sperrsicht sind die Konzentrationen im Eluat durchwegs niedriger im Vergleich zum Blindversuch (0,008 – 0,014 mg/L). Für die zwei Säulenversuche mit Sperre und RGR fällt aber auf, dass speziell die Probe unmittelbar unterhalb der RGR-Decksicht (max. 0,091 mg/L) und die Probe aus der Sperrsicht (max. 0,021 mg/L) wiederum deutlich erhöhte Zn-Konzentrationen aufweisen.



Ausgangsmaterial (BA = bottom ash); f = Feststoffprobe; Sperrsicht (Probe 6f)



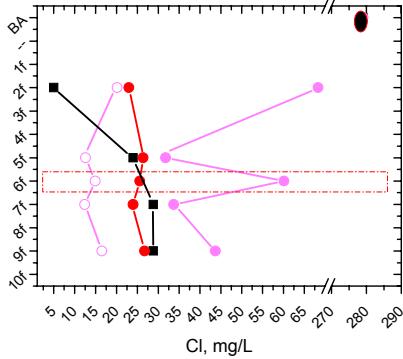


Abb.133: Cl-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-B, Säulen BV1 und SFK3 sowie RSFK2/RSFK3

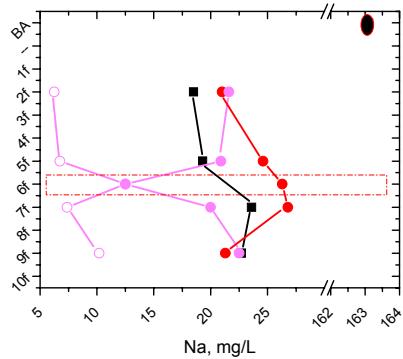


Abb.134: Na-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-B, Säulen BV1 und SFK3 sowie RSFK2/RSFK3

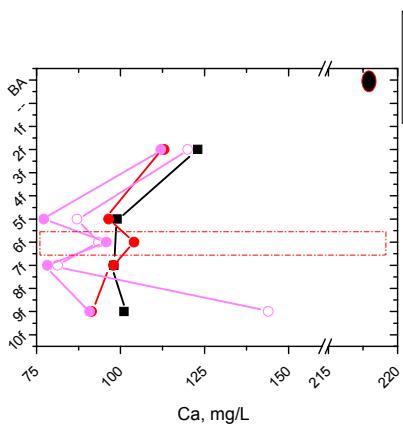


Abb.135: Ca-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-B, Säulen BV1 und SFK3 sowie RSFK2/RSFK3

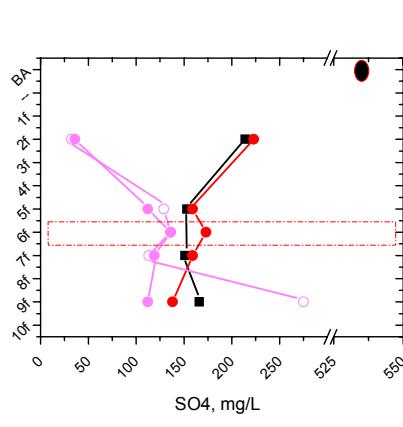


Abb.136: SO4-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-B, Säulen BV1 und SFK3 sowie RSFK2/RSFK3

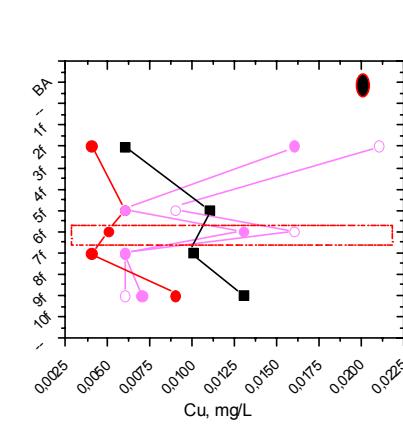


Abb.137: Cu-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-B, Säulen BV1 und SFK3 sowie RSFK2/RSFK3

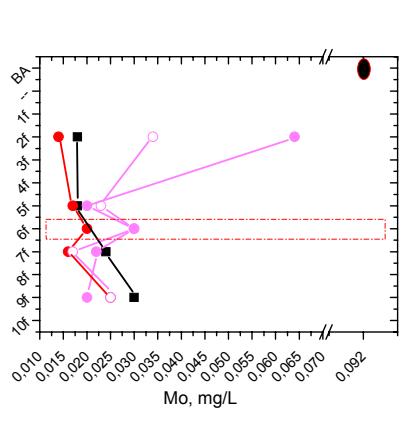
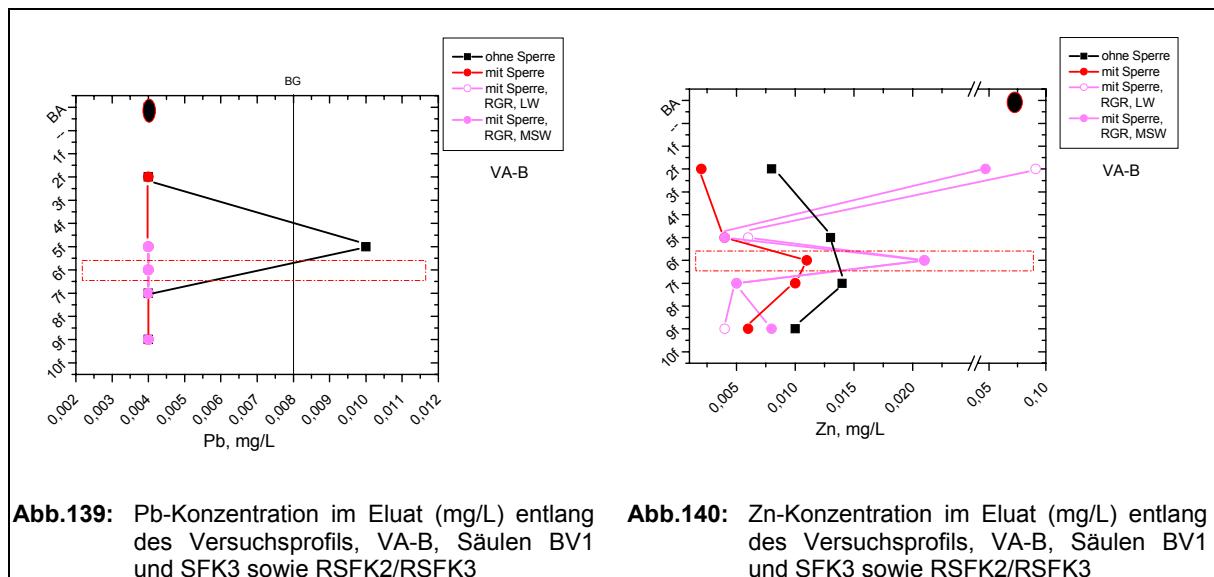


Abb.138: Mo-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-B, Säulen BV1 und SFK3 sowie RSFK2/RSFK3



Sickerwasserentwicklung

Die Tabelle 35 zeigt eine Übersicht über die Wasserbilanz der Säulenversuche der VA-B bei unterschiedlichen Bewässerungsbedingungen.

Tab. 35: Mittelwerte zu Austragsmengen und proz. Austrag für die Säulenversuche der VA-B für unterschiedliche Bewässerungsmengen

	BV1	SFK3	RSFK2	RSFK3
Dauer in Wochen	67	64	62	62
Bewässerung	MSW	MSW	LW	MSW
Schlackenmenge in kg	12,4	17,5	17,9	13,4
Bewässerungsmenge in mL pro Woche	2.000			
Zeitraum in Tagen	Phase 1 0-50	Phase 2 50-175	Phase 1 0-50	Phase 2 50-175
Austrag in mL pro Woche	1.701	1.732	1.670	1.772
kumulierter Austrag in %	85%	87%	84%	87%
kumulierter Rückhalt in L pro kg Schlacke	0,18	0,33	0,08	0,20

Reduzierung der Sickerwassermenge

Bewässerungsmenge in mL in Wochen	300							
Zeitraum in Tagen	Phase 3 175-350	Phase 4 350-470	Phase 3 175-370	Phase 4 370-450	Phase 3 175-370	Phase 4 370-430	Phase 3 175-370	Phase 4 370-430
Austrag in mL pro Woche	73	83	95	70	75	110	60	72
kumulierter Austrag in %	24%	28%	32%	23%	25%	37%	20%	24%
kumulierter Rückhalt in L pro kg Schlacke	0,47	0,30	0,29	0,24	0,33	0,17	0,43	0,27

Die L/S-Verhältnisse sind insbesondere für den Blindversuch sehr hoch (6,2 L/kg). Aber auch für die drei Säulen mit Sperre sind die Werte im Vergleich zu den Säulenversuchen der VA-A und VA-C deutlich höher (3,7 – 4,9). Der Wasserrückhalt pro kg Schlacke ist bei allen Säulenversuchen mit insgesamt 0,81 bis 1,28 L/kg sehr hoch. Aus den Berechnungen gehen insbesondere für den Blindversuch (1,29) und die Säule RSFK3 (1,06) höhere Werte für das

Wasserrückhaltevermögen hervor. Für die Säulen mit Sperre (SFK3) und RGR (RSFK2) sind die Werte mit 0,81 L/kg Schlacke deutlich geringer.

Grundsätzlich kann die Versuchsdauer der einzelnen Säulenversuche in vier verschiedene Phasen unterteilt werden. Die erste Phase umfasst den Zeitraum von 50 Tagen. Hier wurde lediglich mit Leitungswasser bewässert. Nach 50 Tagen wurde das Bewässerungsmedium auf Modellsickerwasser umgestellt. Eine Ausnahme ist RSFK2, da hier ausnahmslos mit Leitungswasser bewässert wurde. Die Phase zwei dauert von 50 bis 175 Tage. Nach diesem Zeitraum (175 – 350 Tage) wurde die Bewässerungsmenge von 2.000 mL pro Woche auf 300 mL pro Woche reduziert (Phase drei). Die Phase drei ist geprägt von deutlichen Schwankungen in der Sickerwasserentwicklung. Innerhalb der anschließende Phase vier (350 bis Versuchsende) verläuft die Sickerwasserentwicklung wesentlich kontinuierlicher.

Sickerwasseraustrag

Die Abb. 141a und 141b zeigen die zeitliche Entwicklung des Sickerwassers bezogen auf den Austrag in mL. Die Versuche wurden mit einer hohen Bewässerungsmenge von 2 x 1 Liter pro Woche gestartet. Innerhalb der ersten Phase betrug der Austrag an Sickerwasser für den Blindversuch und den Versuch mit Sperre (SFK3) etwa 84% der Bewässerungsmenge. Für die beiden Säulen mit Sperre und RGR war der prozentuale Austrag mit etwa 79% etwas geringer. Innerhalb der Phase zwei, vermutlich infolge zunehmender Wassersättigung, steigen die prozentualen Austräge an und liegen für alle vier Versuche zwischen 86 – 88%. Die Reduktion der SW-Menge auf 300 mL pro Woche nach 175 Tagen bewirkte eine Reduktion der Austragsmenge etwa auf 20-40 % der Bewässerungsmenge. In der dritten Phase bis etwa 350 Tage ist die Austragsmenge an Sickerwasser deutlichen Schwankungen unterworfen. Danach setzt ein Trendwechsel bezogen auf die Austragsmenge ein. Für den Blindversuch betrug die Sickerwassermenge wöchentlich durchschnittlich 73 mL. In der Folgezeit erhöhte sich der Betrag auf etwa 83 mL. Für die Säule mit Sperre (SFK3) wurde innerhalb der dritten Phase mit wöchentlich etwa 95 mL deutlich mehr Sickerwasser ausgetragen. Innerhalb der vierten Phase jedoch verringerte sich der Betrag auf nur noch 70 mL. Die Zugabe von RGR hatte unterschiedliche Auswirkungen. Für die Säule RSFK2 wurden generell sehr hohe Beträge an Sickerwasser ausgetragen: in der dritten Phase wöchentlich 75 mL und in der vierten deutlich mehr mit 110 mL. Für die Säule RSFK3 (MSW) hingegen ist im Durchschnitt sehr wenig Sickerwasser angefallen. Innerhalb der dritten Phase wurden wöchentlich nur ca. 60 mL und innerhalb der vierten Phase etwa 72 mL gemessen.

pH-Wert

Für den Blindversuch startete der pH-Wert bei 7,5. Innerhalb der ersten vierzehn Tage lagen die Werte deutlich unter pH 10. Für den Versuch mit Sperre (SFK3) ist die Entwicklung ähnlich. Der Versuch startete jedoch schon bei pH 9,0. In der Folgezeit bis zu einer Laufzeit

von 150 Tagen blieben die pH-Werte dann aber im alkalischen Bereich um pH 11 (Abb. 142a). Die beiden Säulen mit Sperre und RGR weichen deutlich ab (Abb. 142b). Zu Versuchsbeginn wurde in den Sickerwässern ein pH-Wert zwischen 8,5 bis 9,0 gemessen. Bis zum Zeitpunkt der Reduktion der Bewässerungsmenge stiegen die Werte lediglich bis etwa pH 10 an. Nachdem der Bewässerungsmodus umgestellt wurde, fielen für alle Versuche die pH-Werte auf Werte um 8 ab. In dieser Phase wurden für den Blindversuch generell die höchsten pH-Werte analysiert. Zwischen dem Versuchstag 150 und 300 konnten aus technischen Gründen keine pH-Werte gemessen werden. Im Gegensatz zu den Säulenversuchen der VA-C (insbesondere RSFK) sowie der Großlysimeter Waldering wurden hier nach 300 Tagen deutlich geringere pH-Werte analysiert.

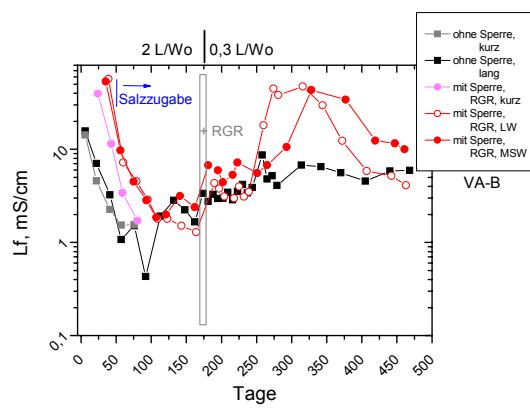
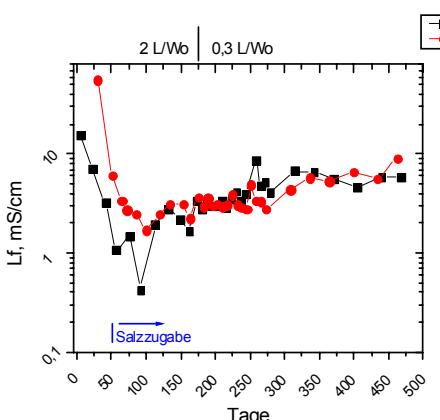
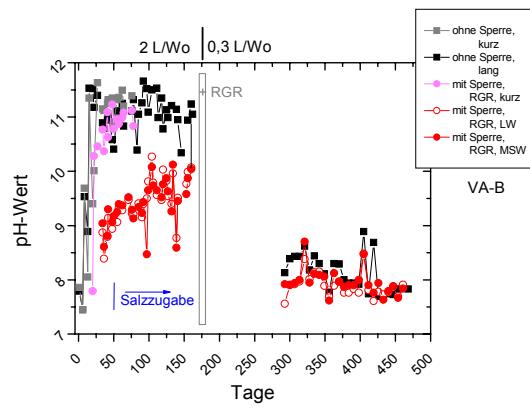
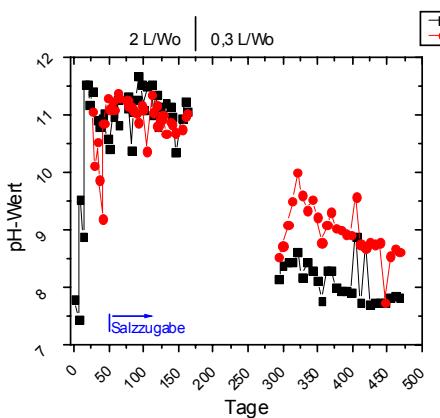
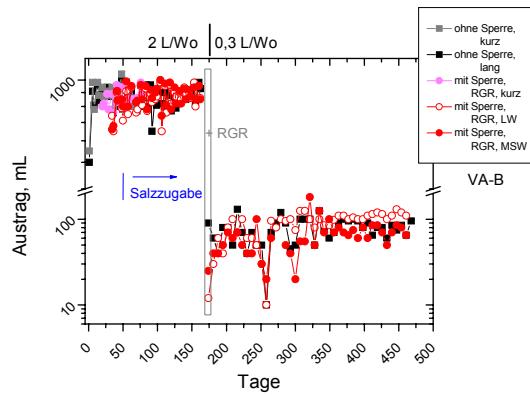
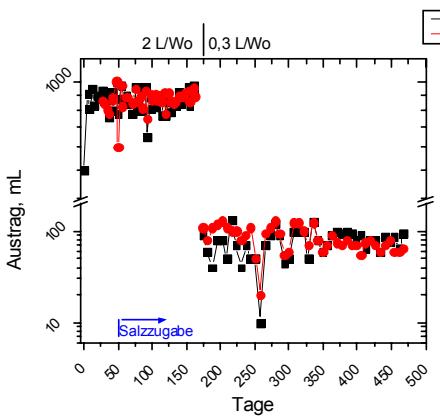
Leitfähigkeit und leichtlösliche Spezies (Cl, Na)

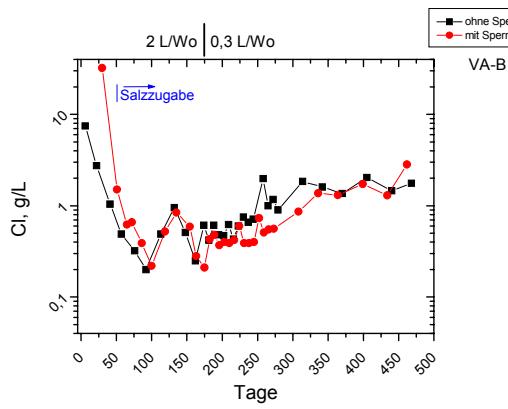
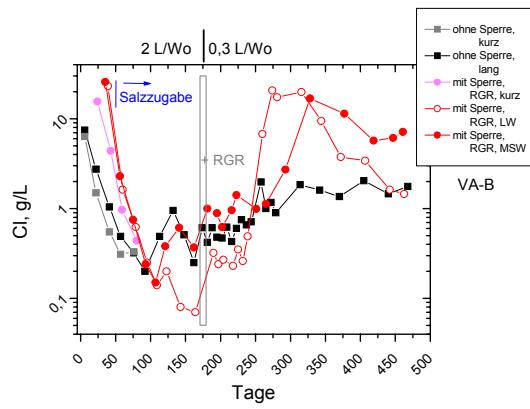
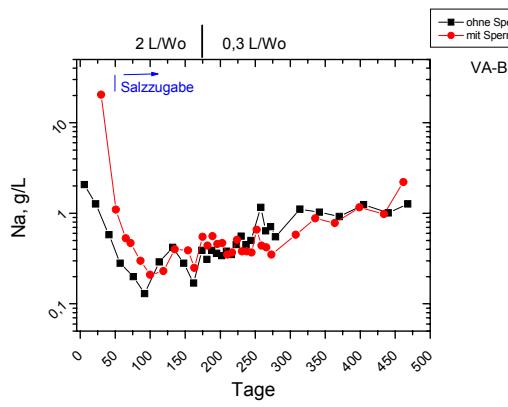
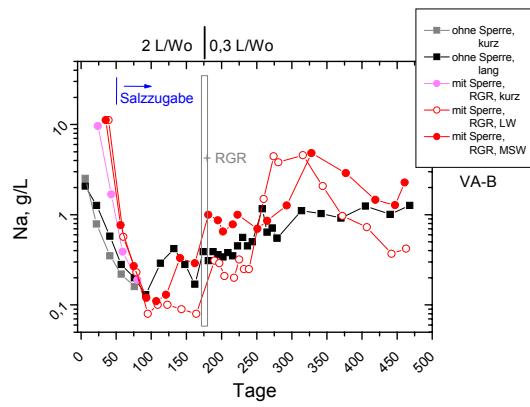
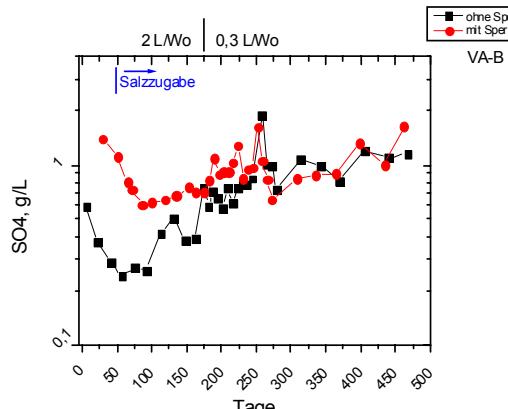
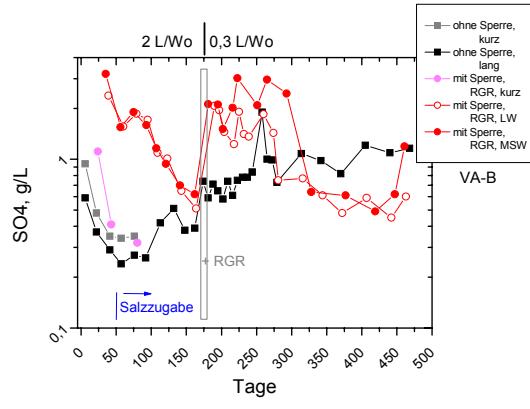
In der Anfangsphase bis etwa 50 Tage fiel durch die wöchentliche Zugabe von zwei Litern Leitungswasser die Leitfähigkeit im Sickerwasser aller Versuche stark ab (Abb. 143a/b). Die Ausgangswerte waren im Sickerwasser aus RSFK2 und RSFK3, bedingt durch die RGR, deutlich höher. Nach der Umstellung von Leitungswasser auf Modellsickerwasser (Salzzugabe) stabilisierte sich die Leitfähigkeit und stieg wieder leicht an. Die Reduzierung der Bewässerungsmenge führte lediglich zu einem geringfügigen Anstieg der Leitfähigkeit. Der stärkere Anstieg bei den Versuchen RSFK2 und RSFK3 ist auf den Einfluss der frischen RGR, die zu diesem Zeitpunkt erneut am Top der Säulen aufgebracht wurden, zurückzuführen. Es ist jedoch sehr auffällig, dass der Anstieg der Leitfähigkeit für diese beiden Säulen stark zeitverzögert stattfand, d.h. die Freisetzung leichtlöslicher Spezies aus den RGR erfolgte erst 100 bis 150 Tage nach der erneuten RGR-Zugabe. Die Phase dieser neuerlichen Freisetzung hielt etwa 150 Tage an. Es ist bemerkenswert, dass für die Säule RSFK3 trotz Bewässerung mit MSW im Gegensatz zu RSFK2 (LW) diese Entwicklung später einsetzte. Zu Versuchsende wurde für die Säule RSFK2 sogar eine geringere Leitfähigkeit gemessen als für den Blindversuch. Für die Säule RSFK3 lagen die Werte nur geringfügig höher. Auch die leichtlöslichen Spezies Cl und Na zeigen ähnliche Tendenzen (Abb. 144a/b und 145a/b). Vergleicht man bzgl. Cl die Säulen BV1 und SFK3 miteinander, sieht man, dass sich trotz hoher Anfangskonzentration für die Säule SFK3 ($> 30 \text{ g/l}$) und verhältnismäßig niedriger Anfangskonzentration für die Säule BV1 ($< 10 \text{ g/l}$) die Sickerwasserentwicklungen nach etwa 10 Wochen angleichen. Für die Säulen RSFK2 und RSFK3 bewirken die Reduzierung der Wassermenge und die Salzzugabe infolge frischer RGR ebenfalls – analog der Leitfähigkeit – einen zeitverzögerten Anstieg der Cl- und Na-Sickerwasserkonzentrationen. Für den Parameter Cl ist es überraschend, dass die Wirkung der RGR für die Säule RSFK2 (LW) sogar deutlicher ausfällt als für die Säule RSFK3 (MSW). Hier sind die Cl-Konzentrationen zu Versuchsende für RSFK3 mit ca. 8 mg/L deutlich höher im Vergleich zu RSFK2 und zum Blindversuch (max. 2 mg/L).

Weitere Parameter

Für die Parameter SO₄ und Ca lässt sich nach der anfänglichen starken Auswaschung (min. ca. 30 mg/L bzw. 0,25 g/L) für die Säulen BV1 und SFK3 nach der Wasserreduktion eine Konzentrationszunahme erkennen (Abb. 146a/b sowie 147a/b). Für die Säulen RSFK2 und RSFK3 zeigt sich für SO₄ und Ca nach der erneuten RGR-Zugabe und der verringerten Wasserzugabe ein deutlicher Konzentrationsanstieg. Die Sickerwasserentwicklung für den Parameter Ca ist vergleichbar mit dem Parameter Cl. Dafür setzt für den Parameter SO₄ die Freisetzung unmittelbar nach der Wassermengenreduktion und der erneuten Aufbringung von RGR ein. Dieser Effekt spricht für die hohe Durchlaufgeschwindigkeit dieser Spezies. Nach einer Versuchsdauer von etwa 300 Tagen sind die SO₄-Konzentrationen für die RGR-Säulen jedoch deutlich geringer als für den Blindversuch.

Die Schwermetalle Cu (max. 1,3 mg/l) und Mo (max. 3 mg/l) treten in erhöhten Konzentrationen auf (Abb. 148 a/b und 149a/b). Für den Parameter Cu ist ein geringfügiger Anstieg für alle vier Versuche als Folge der Reduktion der Sickerwassermenge zu sehen. Hier wird die Entwicklung nicht vom Einfluss der RGR überlagert. Für den Parameter Mo zeigt sich, dass eine verstärkte Freisetzung ebenfalls durch die Sickerwassermengenreduktion bewirkt wird. Für die Säulen mit RGR wurde zudem beobachtet, dass – analog der Entwicklung für SO₄ – Mo infolge der erhöhten Salzzufuhr für die Säulen RSFK2 und RSFK3 durch die frischen RGR unmittelbar und verstärkt freigesetzt wird. Diese erhöhte Mobilisierbarkeit ist jedoch nur von kurzer Dauer (etwa 70 Tage). In der Folgezeit ist die Sickerwasserentwicklung für Mo mit dem Blindversuch vergleichbar. Die Konzentrationen der restlichen Metalle Pb (Abb. 150a/b) und Zn (Abb. 151a/b) erreichen max. 0,2 mg/l. Für den Blindversuch und die Säule mit Sperre (SFK3) bewirkt die Reduktion der Sickerwassermenge unmittelbar einen geringfügig höheren Impuls für die Pb-Konzentration. Erst nach etwa 300 Tagen steigt die Pb-Konzentration im Sickerwasser kontinuierlich an. Für die beiden Säulen mit Sperre und RGR wird der Pb-Anstieg in erster Linie durch die hohen Gehalte an leichtlöslichem Pb in frischen RGR dominiert. Analog den leichtlöslichen Spezies setzt die Pb-Freisetzung hier ebenfalls zeitverzögert ein. Der Konzentrationsanstieg für den Parameter Zn im Sickerwasser ist hauptsächlich auf die Verringerung der Sickerwassermenge zurückzuführen. Einzelne erhöhte Zn-Konzentrationen wurden für die Säule RSFK3 (MSW) analysiert (max. 0,15 mg/L).



**Abb.144a:** Cl-Konzentration im Sickerwasser (g/L), VA-B, Säulen BV1 und SFK3**Abb.144b:** Cl-Konzentration im Sickerwasser (g/L), VA-B, Säulen BV1 und RSFK2/RSFK3**Abb.145a:** Na-Konzentration im Sickerwasser (g/L), VA-B, Säulen BV1 und SFK3**Abb.145b:** Na-Konzentration im Sickerwasser (g/L), VA-B, Säulen BV1 und RSFK2/RSFK3**Abb.146a:** SO₄-Konzentration im Sickerwasser (g/L), VA-B, Säulen BV1 und SFK3**Abb.146b:** SO₄-Konzentration im Sickerwasser (g/L), VA-B, Säulen BV1 und RSFK2/RSFK3

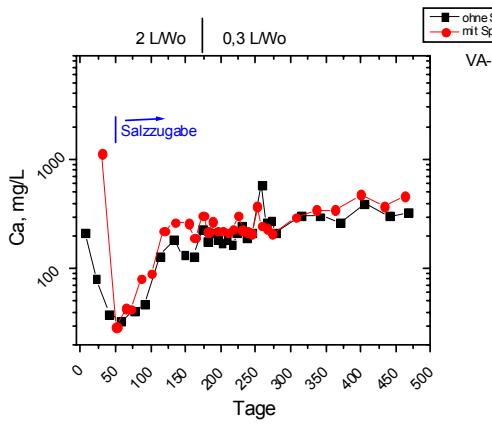


Abb.147a: Ca-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-B, Säulen BV1 und SFK3

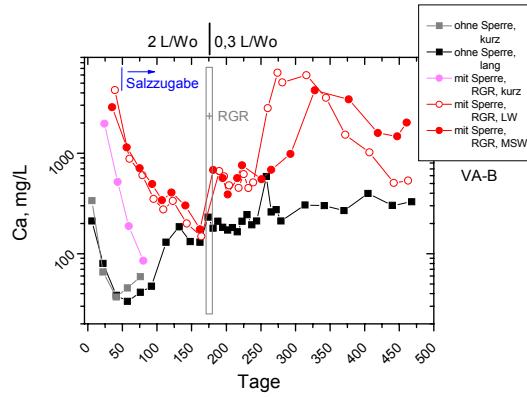


Abb.147b: Ca-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-B, Säulen BV1 und RSFK2/RSFK3

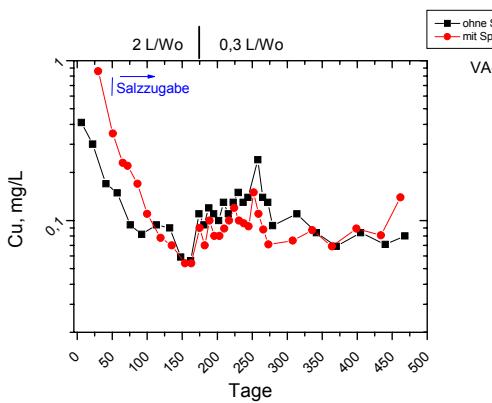


Abb.148a: Cu-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-B, Säulen BV1 und SFK3

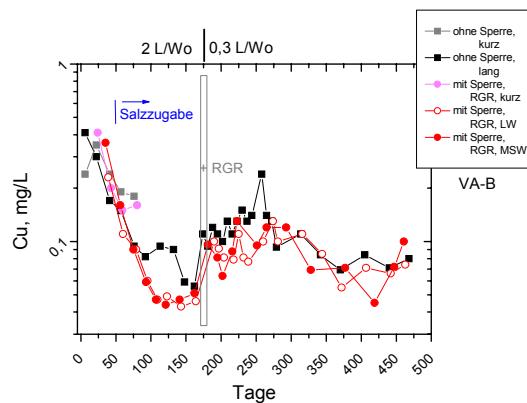


Abb.148b: Cu-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-B, Säulen BV1 und RSFK2/RSFK3

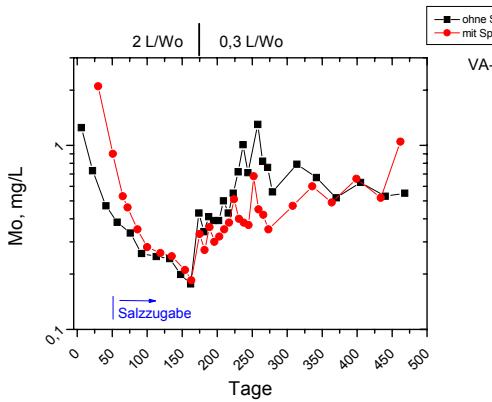


Abb.149a: Mo-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-B, Säulen BV1 und SFK3

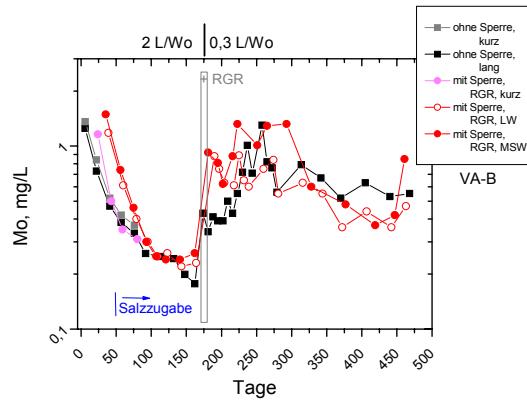


Abb.149b: Mo-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-B, Säulen BV1 und RSFK2/RSFK3

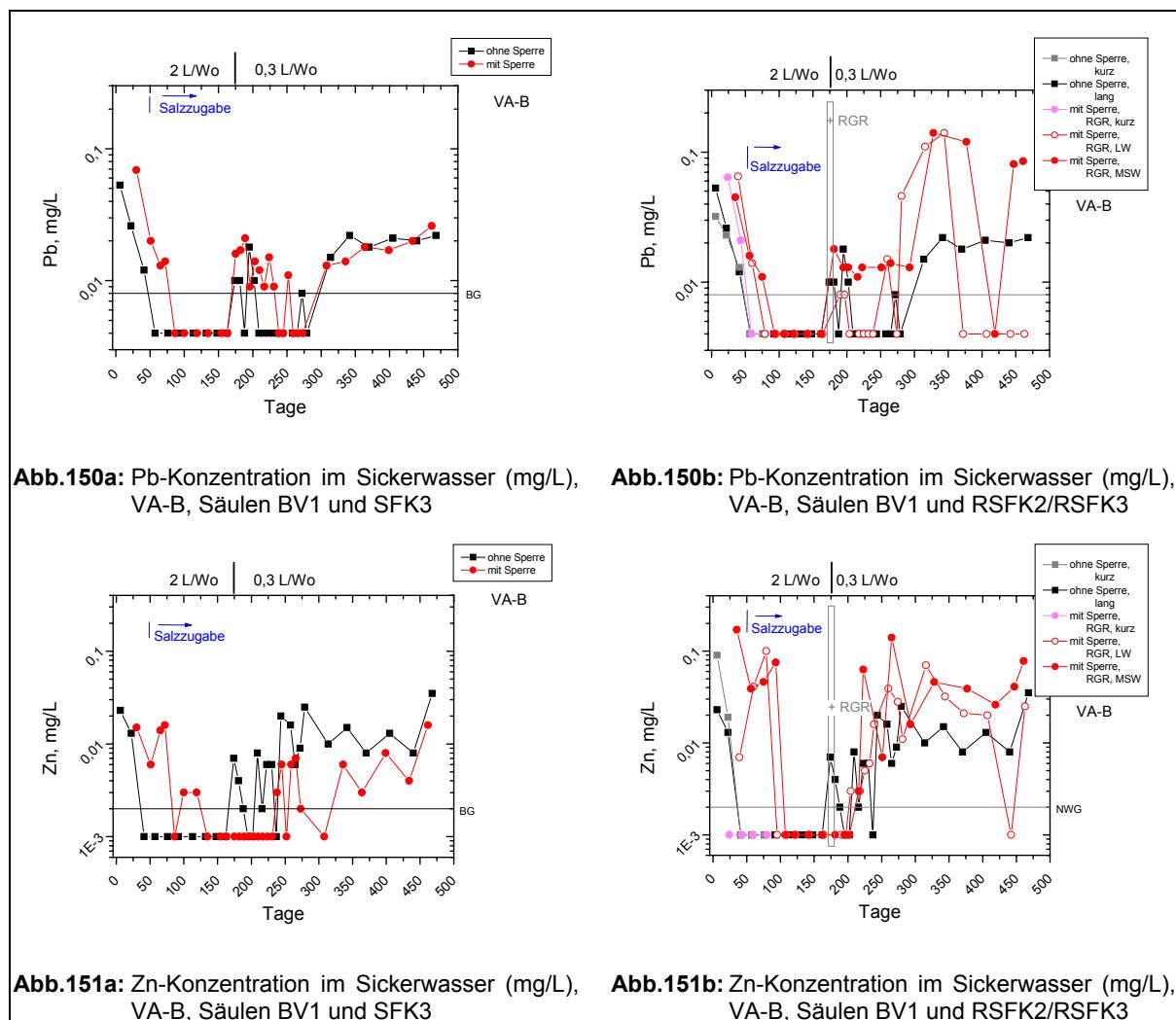


Abb.150a: Pb-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-B, Säulen BV1 und SFK3

Abb.150b: Pb-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-B, Säulen BV1 und RSFK2/RSFK3

Abb.151a: Zn-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-B, Säulen BV1 und SFK3

Abb.151b: Zn-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-B, Säulen BV1 und RSFK2/RSFK3

Frachtenbilanzen

Für die Säulenversuche wurden in der Anfangsphase z.T. Austräge an leichtlöslicher Spezies bis 80% verzeichnet. Da Analysefehler nicht ausgeschlossen werden können, wurde die Frachtenberechnung erst mit der 3. Versuchswöche gestartet. Die Werte sind daher lediglich als qualitativ zu bewerten. Nach 50 Tagen wurde die Bewässerung von Leitungswasser auf Modellsickerwasser umgestellt. Die Salzzugabe hat bewirkt, dass für den Blindversuch (BV1) und die Säule mit Sperre (SFK3) eine Anreicherung an Cl, SO₄, Ca, Na (bei BV1), Cu, Pb und Zn festzustellen ist (Tab. 36). Die Salzfracht wird in erster Linie von NaCl getragen. Mo wird vor allem in BV1 ausgetragen, da hier die Wirkung einer Sperre fehlt.

Der Beitrag der RGR für den Säulenversuchen RSFK2 mit Sperre hat gezeigt, dass hier alle angegebenen Parameter, v.a. Cl, ausgewaschen werden. Durch die zusätzliche Salzzugabe in Form von MSW für den Versuch RSFK3 wird weniger an leichtlöslicher Spezies über das Sickerwasser ausgetragen. Außerdem kommt es hier z.T. zu einer Anreicherung für die Spezies Na, Zn, Pb und Cu innerhalb der Säule.

Neben der Wirkung der Sperrsicht wird eine Auswaschung durch den Einbau von RGR-Schichten begünstigt.

Tab. 36: Zusammenfassung der Frachtenberechnung, Abreicherung bzw. Anreicherung von Spezies in % in Bezug auf die Ausgangsmenge, Blindversuch (BV1), Versuch mit Sperre (SFK3) und Versuch mit Sperre und RGR (RSFK2, RSFK3)

Versuchsbezeichnung	BV1 ohne Sperre	SFK3 mit Sperre	RSFK2 mit Sperre & RGR	RSFK3 mit Sperre & RGR
Versuchsanordnung	VA-B			
Dauer in Wochen	67	64	62	62
Bewässerung	LW/MSW	LW/MSW	LW	LW/MSW
Parameter	proz. Ab-/Anreicherung			
Cl	+9,63	+5,06	-17,33	-5,89
SO4	+5,75	+1,29	-7,82	-1,99
Na	+0,68	-3,86	-4,41	+0,56
Ca	+0,68	+0,39	-0,72	-0,25
Cu	+0,100	+0,081	-0,002	+0,110
Mo	-6,24	-3,48	-2,45	-3,31
Pb	+0,97	+0,84	-0,0004	+1,06
Zn	+0,12	+0,08	-0,0004	+0,10

4.5.2 Fazit zur Wirkung der Bewässerungsmenge

Die Änderung der Bewässerungsmenge während der Versuchslaufzeit spiegelt sich in den Austragsmengen wider. Die Umstellung des Bewässerungsmodus von 2 L pro Woche auf 300 mL pro Woche zeigt deutlich, dass das Wasserrückhaltevermögen von der Bewässerungsmenge beeinflusst wird. Die Ergebnisse zur Versuchsanordnung B korrespondieren mit den Ergebnissen der Modellversuche mit Kunststoffkugeln.

Wasserrückhaltevermögen:

- Ausbildung einer Schichtung: die verschiedenen Korngrößenübergänge von RGR, MV-Schlacke und SFK begünstigen wechselnde stark feuchte und sehr trockene Zonen entlang des Säulenprofils
- Wirkung der Sperrsicht: hohe Wassergehalte innerhalb der Sperre
- Zugabe von RGR: auffällig hohe Wassergehalte innerhalb der Sperre und vglw. trockene Bedingungen innerhalb und unterhalb der Sperre

Wirkung der Salzzugabe auf Salzanreicherungen entlang des Profils:

- Zugabe von Modellsickerwasser und RGR: insbesondere für die Säule RSFK3 mit Sperre werden deutlich höhere Cl-Eluatkonzentrationen festgestellt, im Gegensatz zur Säule ohne RGR-Deckschicht (SFK3) werden hier auch deutlich höhere Eluat-Konzentrationen für Cu, Mo und Zn verzeichnet
- Parameter Ca und SO4: weder eine Bewässerung mit MSW noch der Einbau einer RGR-Deckschicht haben einen Einfluss auf die Entwicklung

Sickerwasserentwicklung:

- Große Bewässerungsmengen: nahezu 100 % der Bewässerungsmenge wird wieder ausgetragen
- Große Bewässerungsmengen: wassergesättigte Bedingungen begünstigen einen starken „wash off“ der leichtlöslichen Salzphasen
- Kleine Bewässerungsmengen: lediglich ca. 25 % der Bewässerungsmenge wird ausgetragen
- Reduzierung der Sickerwassermenge: Konzentrationsanstieg für nahezu alle Parameter (Ausnahme Cu) für den Blindversuch und den Versuch mit Sperre (SFK3)
- Zugabe von RGR: Sickerwasserentwicklungen werden z.T. durch die Wirkung der RGR unmittelbar überlagert (insbesondere für SO₄ und Mo)
- Zugabe von RGR: Freisetzung aus den frischen RGR erfolgt z.T. zeitverzögert nach etwa 100 – 150 Tagen (insbesondere für Cl, Na, Ca, Pb)

Frachtenberechnung

- Anreicherung an Spezies: mit Ausnahme von Mo und Na Anreicherung v.a. für den Blindversuch und den Versuch mit Sperre, jedoch ist für diesen Versuch die Anreicherung geringer
- Bewässerung mit Leitungswasser: für die Säule RSFK2 generell Auswaschung für alle angeführten Parameter
- Bewässerung mit Modellsickerwasser: für die Säule RSFK3 auch geringfügige Anreicherung an Na, Cu, Pb und Zn
- RGR-Deckschicht: führt zu einer verstärkten Auswaschung an Cl, zudem werden auch noch die Parameter Ca und SO₄ mit geringen Beträgen ausgetragen

4.6 WIRKUNG DER VERSUCHSZEIT

4.6.1 Zeitversuche der Versuchsanordnung A

Die Säulenversuche ohne Sperre (IBV1, IBV2, IBV3) und mit Sperre (ISFK1, ISFK2, ISFK3) der Versuchsanordnung A (VA-A) wurden als Zeitversuche mit max. zwei Jahren Laufzeit durchgeführt (Versuche „lang“). Die Versuche „kurz“ (IBV1 und ISFK1) haben Laufzeiten von 18 Wochen, die Versuche „mittel“ (IBV2 und ISFK2) von 42 Wochen und die Versuche „lang“ (IBV3 und ISFK3) von 103 Wochen. Alle Zeitversuche wurden mit Modellsickerwasser bewässert. Im Folgenden wird die zeitliche Entwicklung für Wassergehalt, Glühverlust, ausgewählte Eluatparameter, Konzentrationsverläufe im Sickerwasser und summarischen Frachtaustrag kurz dargestellt. Die detaillierten Beschreibungen zu den Versuchen „lang“ finden sich in Kapitel 4.3.1. In den folgenden Abbildungen sind die Blindversuche und die Versuche mit Sperre z.T. getrennt voneinander dargestellt.

Wassergehalt und Glühverlust

Die Tabelle 37 und die Abbildungen 152 und 153 zeigen die Werte für Wassergehalt und Glühverlust (1050°C) der Blindversuche und Versuche mit Sperre. Die Werte liegen zwischen ca. 16 und 22 bzw. 22 und 30 Gew.-%. Grundsätzlich nehmen die Werte zur Basis hin leicht zu. Für den Versuch „kurz“ mit Sperre (18 Wochen) ist noch kein Unterschied zum Blindversuch festzustellen. Die aufstauende Wirkung der Sperre zeigt sich jedoch bei ISFK2 bereits nach einer Versuchszeit von 42 Wochen deutlich (Wassergehalt 24,7 Gew.-% und Glühverlust 30,6 Gew.-%). Diese Werte sind sogar höher als für den Versuch ISFK3 „lang“.

Tab. 37: Verteilung der Parameter Wassergehalt und Glühverlust entlang des Säulenprofils, Säule ohne Sperre (IBV3) und mit Sperre (ISFK3) im Vergleich, Bewässerung mit Modellsickerwasser, für die Proben ober- bzw. unterhalb der Sperrsicht wurde jeweils ein Mittelwert gebildet

Versuchsbezeichnung	IBV1	IBV2	ISFK1	ISFK2	IBV1	IBV2	ISFK1	ISFK2
Aufbau	ohne Sperre		mit Sperre		ohne Sperre		mit Sperre	
Parameter	<i>Wassergehalt Gew.-%</i>							<i>Glühverlust* Gew.-%</i>
Ausgangsmaterial	18							22,8
oberhalb der Sperre	18,4 ± 1,1	19,8 ± 1,9	18,9 ± 1,1	19,7 ± 0,9	22,9 ± 1,6	24,9 ± 1,9	24,0 ± 1,2	25,3 ± 0,8
innerhalb der Sperre	-	-	19,1	24,7		-	23,2	30,6
unterhalb der Sperre	20,8 ± 1,4	19,4 ± 2,0	19,6 ± 0,4	19,8 ± 0,8	26,9 ± 1,3	24,6 ± 3,4	24,6 ± 0,5	25,4 ± 1,0

* der Glühverlust wurde bei 1050° C ermittelt und bezieht sich auf die Originalsubstanz, d.h. Gv – Wg entspricht der Definition des Parameters Glühverlust in der AbfAblV (2001)

Eluate

pH-Wert

Bei den Blindversuchen und Versuchen mit Sperre liegen die pH-Werte im Eluat der Feststoffproben im alkalischen Milieu zwischen 11,2 und 11,7. Sie sind im Vergleich zum Ausgangsmaterial (pH-Wert 12,1) etwas niedriger (Abb. 154). Die höchsten Werte wurden für die Feststoffproben aus der Säule „kurz“ festgestellt.

Leitfähigkeit und leichtlösliche Spezies (Cl, Na)

Für das Ausgangsmaterial betrug die Leitfähigkeit 4,22 mS/cm. Mit zunehmender Versuchsdauer nimmt die Leitfähigkeit ab. Am Versuchsende wurden Werte zwischen 0,75 und 1,0 mS/cm gemessen (Abb. 155). Für die Säulen „kurz“ zeigt sich noch kein Unterschied zwischen der Säule mit Sperre und dem Blindversuch. Für die Säulen „mittel“ zeigen sich ähnlich den Versuchen „lang“ erhöhte Leitfähigkeiten für die Feststoffproben aus der Säule mit Sperre und insbesondere eine Salzanreicherung unterhalb der Sperre.

Im Eluat wurde bei allen Experimenten eine deutliche zeitabhängige Abnahme der Konzentrationen für Cl und Na festgestellt (Abb. 156 und 157): für Cl von 352 mg/L bis zu 45 mg/L und für Na von 232 mg/L bis zu 13 mg/L.

Weitere Parameter

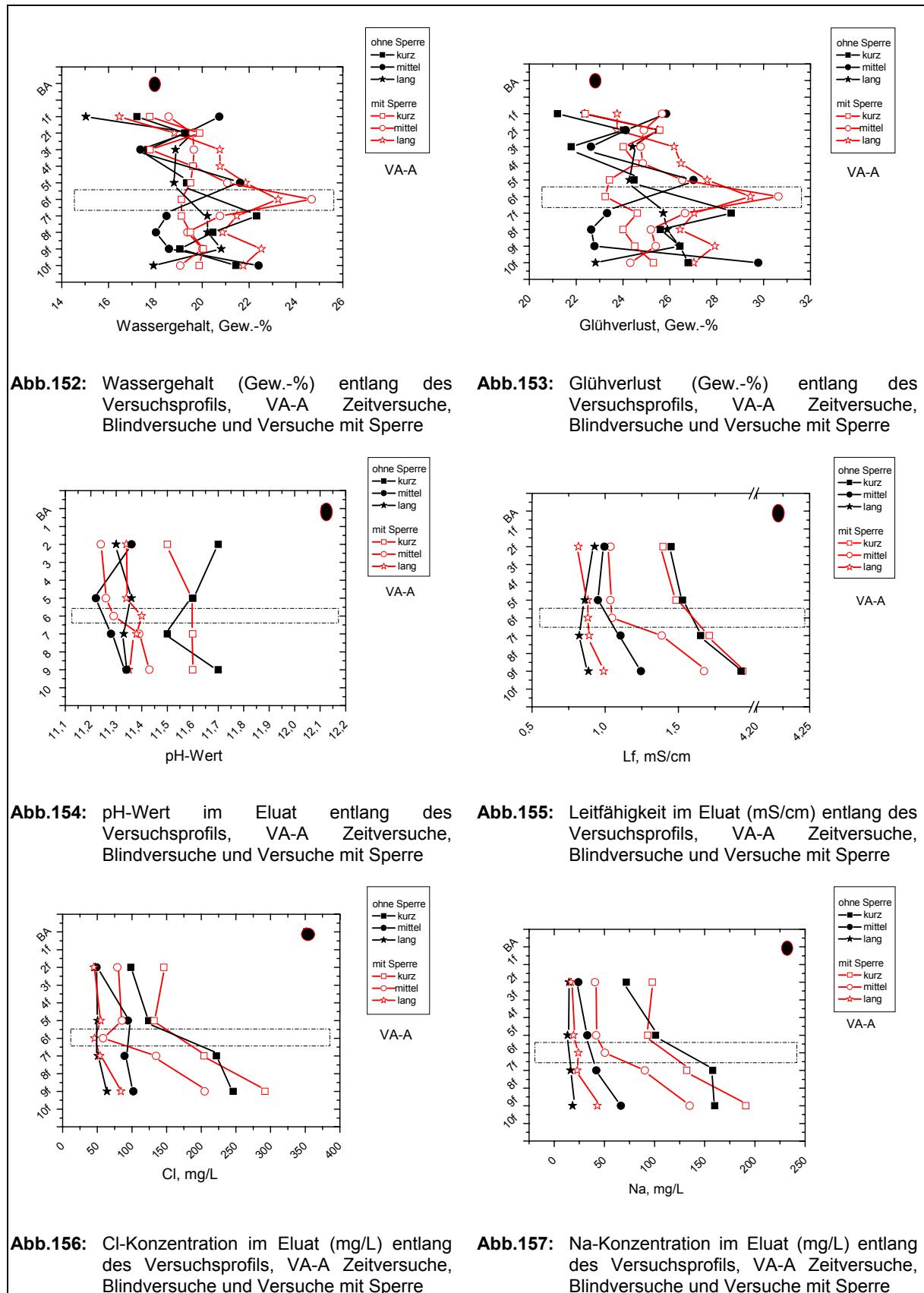
Bezogen auf den Parameter Ca zeigt sich generell eine Abreicherung im Vergleich zum Ausgangsmaterial (253 mg/L). Im zeitlichen Verlauf der einzelnen Blindversuche zeigen sich keine Unterschiede (Abb. 158). Die Ca-Konzentrationen liegen zwischen 10 – 125 mg/L. Für die Säulenversuche mit Sperre fällt auf, dass für den Versuch „lang“ überwiegend die höchsten Ca-Konzentrationen festgestellt wurden (bis 110 mg/L), d.h. hier wurde Ca mit der Zeit sogar angereichert. Im Ausgangsmaterial wurden für SO₄ niedrige Konzentrationen gemessen (10 mg/L). In allen Feststoffproben der Versuchsanordnungen, sowohl ohne als auch mit Sperre, wurden höhere SO₄-Gehalte ermittelt (Abb. 159). Für den Parameter SO₄ zeigt sich wiederum eine Zeit-Abhängigkeit. Innerhalb der Sperre zeigt SO₄ eine tendenzielle Anreicherung. In Bezug auf die Schwermetalle wurde der Parameter Cu im Vergleich zum Ausgangsmaterial (0,66 mg/L) abgereichert (Abb. 160). Überwiegend liegen die Cu-Eluatkonzentrationen in einem Bereich zwischen 0,1 bis 0,35 mg/L. Lediglich für die Versuche „kurz“ wurden an der Basis höhere Werte gemessen: Blindversuch (0,8 mg/L) und Versuch mit Sperre (0,4 mg/L). Für die Versuche „lang“ wurden insgesamt die niedrigsten Cu-Eluatkonzentrationen ermittelt. Die gilt auch für den Parameter Mo (Abb. 161). Im Vergleich zu Cu kommt hier die zeitliche Entwicklung noch deutlicher zum Vorschein. Für die Versuche „kurz“ wurden Werte zwischen 0,08 und 0,1 mg/L und für die Versuche „lang“ zwischen 0,02 und 0,04 mg/L. Für die Parameter Pb (Abb. 162) und Zn (Abb. 163) wurden im Vergleich zum Ausgangsmaterial z.T. deutlich geringere Eluatkonzentrationen gemessen. Eine zeitliche Abhängigkeit hinsichtlich An- oder Abreicherung ist für den beobachteten Versuchszeitraum für beide Parameter nicht zu erkennen.



Ausgangsmaterial (BA = bottom ash); f = Feststoffprobe;



Sperrsicht (Probe 6f)



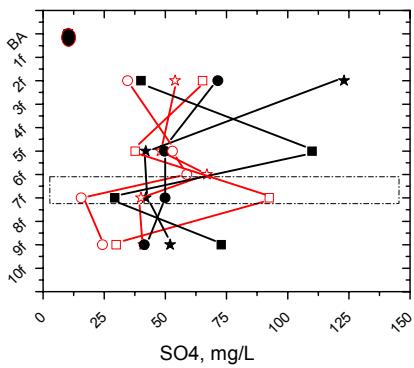


Abb.158: SO₄-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A Zeitversuche, Blindversuche und Versuche mit Sperre

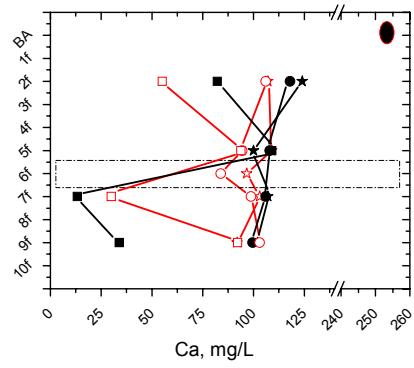


Abb.159: Ca-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A Zeitversuche, Blindversuche und Versuche mit Sperre

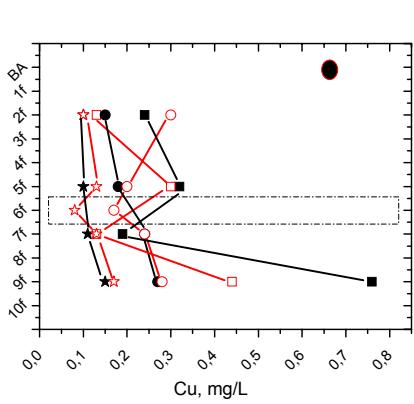


Abb.160: Cu-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A Zeitversuche, Blindversuche und Versuche mit Sperre

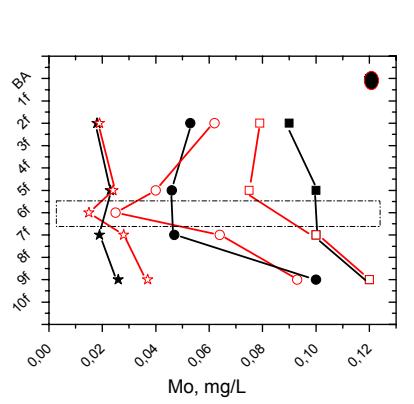


Abb.161: Mo-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A Zeitversuche, Blindversuche und Versuche mit Sperre

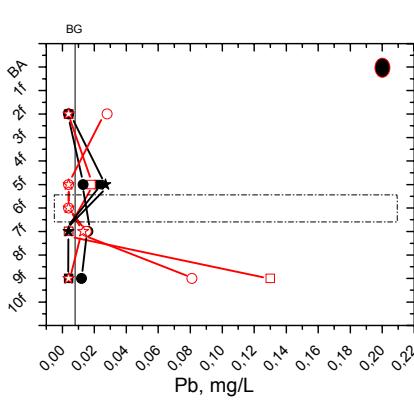


Abb.162: Pb-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A Zeitversuche, Blindversuche und Versuche mit Sperre

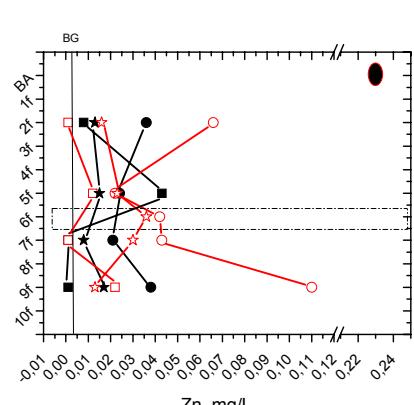


Abb.163: Zn-Konzentration im Eluat (mg/L) entlang des Versuchsprofils, VA-A Zeitversuche, Blindversuche und Versuche mit Sperre

Sickerwasserentwicklung

Die Tabelle 38 gibt eine Zusammenfassung der Wasserbilanz der Versuche. Für die Zeitversuche ohne Sperre lag der Austrag an Sickerwasser, bezogen auf die zugegebene Menge und die gesamte Versuchsdauer, zwischen 43 bis 45 %, und für die Zeitversuche mit Sperre zwischen 39 bis 48 %. Der Wasserrückhalt in L pro kg Schlacke ist im Vergleich zu den Blindversuchen bei den Versuchen mit Sperre höher (Versuch ISFK1 und ISFK3) bzw. etwa gleich hoch (Versuch ISFK2). Die Sperre zeigt damit eine vergleichbare Wirkung wie bei dem Versuchspaar IBV0 und ISFK0, das mit Leitungswasser bewässert wurde.

Tab. 38: Bewässerungs- und Austragsmengen für die Zeitversuche aus VA-A ohne (IBV1, IBV2, IBV3) und mit Sperre (ISFK1, ISFK2, ISFK3)

Versuchsbezeichnung	IBV1	IBV2	IBV3	ISFK1	ISFK2	ISFK3
Versuchsanordnung	VA-A					
Befüllung	Schlacke A					
Bewässerung	Modellsickerwasser					
Dauer in Wochen	18	42	103	18	42	103
Eingebaute Schlackemenge in kg	15,5	16,5	16,0	14,5	15,6	15,5
Bewässerungsmenge in L pro Monat	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Bewässerungsmenge insgesamt in L	5,4	12,6	30,9	5,4	12,6	30,9
Austrag Sickerwasser in L	2,4	5,6	14,0	2,1	6,1	13,4
kumulierter Austrag in %	43,5	44,3	45,3	38,9	48,3	44,0
kumulierter Rückhalt in L pro kg Schlacke	0,46	0,74	1,51	0,50	0,73	1,60

Austrag an Sickerwasser

Bei den Blindversuchen weichen die Austräge an Sickerwasser nur wenig voneinander ab (Abb. 164a). Die zeitliche Entwicklung zeigt kaum Unterschiede. Generell kann festgestellt werden, dass nach einer anfänglichen Stabilisierungsphase von ca. 100 Tagen sich der Austrag des Sickerwassers für den weiteren Versuchsverlauf zwischen 100 und 200 mL pro Woche bewegt.

Bei den drei Zeitversuchen mit Sperre treten im vergleichbaren Zeitabschnitt von 300 Tagen deutliche Abweichungen untereinander auf (Abb. 164b). Speziell für den Versuch „mittel“ werden ab einer Versuchsdauer von 120 Tagen höhere Austräge verzeichnet.

pH-Wert

Bei den Blindversuchen nimmt der pH-Wert nach einem anfänglichen Ansteigen bis zu einem Maximalwert von 11,5 auf etwa 8,5 ab (Abb. 165a). Untereinander zeigen die Blindversuche keinen Unterschied.

Für die Versuche mit Sperre hingegen wurden insbesondere für den Versuch „mittel“ Abweichungen festgestellt (Abb. 165b). Im Vergleich zu den Versuchen mit Sperre „kurz“ und „lang“ sind in einer Anfangsphase ab 100 bis 200 Tagen die pH-Werte für den Versuch „mittel“ höher und in der Folgezeit dann geringer.

Der pH-Wert im Sickerwasser wurde aus technischen Gründen erst ab einer Laufzeit von 60 Tagen gemessen.

Leitfähigkeit und leichtlösliche Spezies (Cl, Na)

Für die Blindversuche spiegeln die anfänglich hohen Leitfähigkeiten (max. 130 mS/cm) eine verstärkte Auswaschung der leichtlöslichen Salze wider (Abb. 166a). Erst für den Versuch „lang“ verflacht nach 350 Versuchstagen die Kurve auf Werte um 6,6 mS/cm.

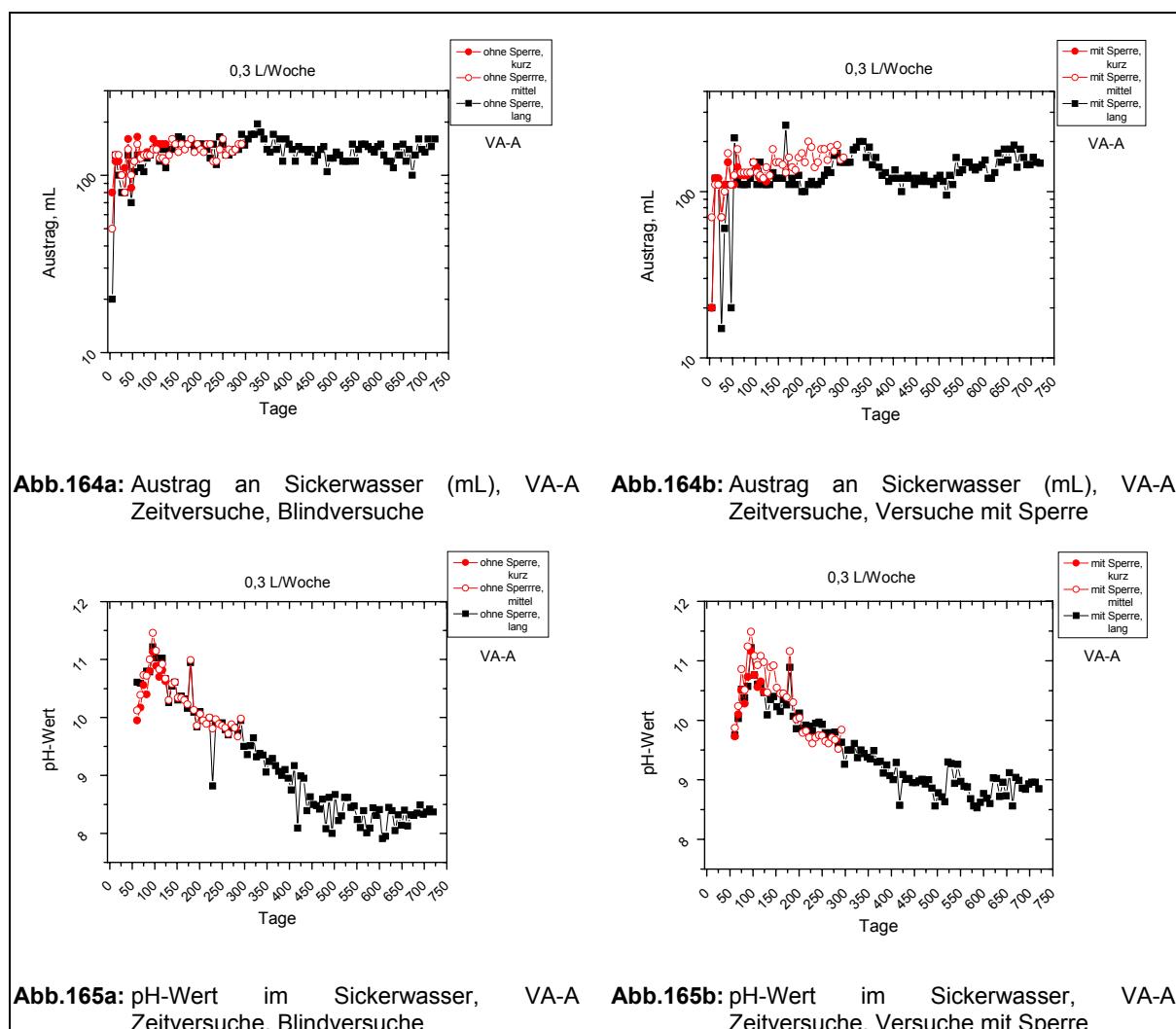
Der Verlauf der Leitfähigkeiten weicht für die Säulenversuche mit Sperre von diesem Trend ab (Abb. 166b). Insbesondere für den Versuch „mittel“ werden ab einer Versuchsdauer von 100 Tagen geringere Leitfähigkeiten im Sickerwasser analysiert. Für den Versuch mit Sperre „lang“ ist der wellenförmige Kurvenverlauf bemerkenswert. Die Parameter Cl und Na (Abb. 167a/b) sind mit der Entwicklung der Leitfähigkeit sehr gut vergleichbar. Für den Säulenversuch „lang“ mit Sperre zeigt sich nach 100 bis 300 Versuchstagen eine starke Aufkonzentration an Cl und Na im Sickerwasser. Diese Entwicklung konnte für den Versuch „mittel“ (ISFK2) nicht beobachtet werden.

Weitere Parameter

Für beide Versuchsreihen (Blindversuche sowie Versuche mit Sperre) ist die Entwicklung des Ca stärkeren Schwankungen unterworfen (Abb. 168a/b). Die Ca-Konzentration steigt erst nach 275 Tagen deutlich an. Diese Beobachtung des Ca-Anstiegs ist für die Versuche „kurz“ und „mittel“ noch nicht beobachtbar gewesen. Der Anstieg ist mit einer kontinuierlichen Abnahme des pH-Werts im Sickerwasser korrelierbar.

Bezogen auf den Parameter SO₄ korrelieren die Sickerwasserentwicklungen für die Blindversuche miteinander (Abb. 168a). Lediglich in einer Anfangsphase bis 100 Tage weichen die Konzentrationen geringfügig voneinander ab. Für die Zeitversuche mit Sperre weichen die einzelnen Entwicklungen stärker voneinander ab (Abb. 168b). Insbesondere für den Versuch „mittel“ werden nach einer Versuchsdauer von 50 Tagen deutlich geringere SO₄-Konzentrationen im Vergleich zu den Versuchen mit Sperre „kurz“ und „lang“ analysiert. Für die Parameter Cu und Mo (beide Abb. 169a/b) weichen für beide Versuchsanordnungen (Blindversuche und Versuche mit Sperre) die einzelnen Sickerwasserentwicklungen voneinander ab. Für die Versuche „lang“ werden überwiegend die höchsten Cu- und Mo-Konzentrationen analysiert. Für den Versuch „mittel“ sind sie z.T. deutlich geringer. Für die Parameter Pb und Zn (beide Abb. 170a/b) sind die Sickerwasserentwicklungen z.T. starken Schwankungen unterworfen. Bezogen auf den Parameter Pb liegen die Konzentrationen für die Blindversuche „kurz“ und „mittel“ bereits zu Versuchsbeginn teilweise unterhalb der Bestimmungsgrenze (< 0,08 mg/L). Für den Blindversuch „lang“ sind die Pb-Konzentrationen ab einer Versuchsdauer von 300 Tagen anhaltend kleiner als die Bestimmungsgrenze. Für die Säulenversuche mit Sperre korrelieren die Pb-Konzentrationen in der Anfangsphase etwas

besser, obwohl auch hier für die Versuche „kurz“ und „mittel“ die Werte geringfügig kleiner sind. Für den Säulenversuch mit Sperre „lang“ liegen die Pb-Konzentrationen ab einer Versuchsdauer von 450 Tagen durchgehend unterhalb der Bestimmungsgrenze. Für den Parameter Zn weichen die Sickerwasserentwicklungen für die Blindversuche z.T. deutlich voneinander ab. Für die Versuche „kurz“ und „mittel“ werden z.T. sehr hohe Werte bis max. 0,2 mg/L gemessen. Für den Blindversuch „lang“ liegen die Werte max. bei 0,03 mg/L. In der Folgezeit sind die Zn-Werte hauptsächlich kleiner als die Bestimmungsgrenze. Erst nach einer Versuchsdauer von 450 Tagen werden für den Blindversuch „lang“ Spitzenwerte bis 0,5 mg/L erreicht. Für die Säulenversuche mit Sperre werden zu Versuchsbeginn lediglich Zn-Konzentrationen um 0,08 mg/L beobachtet. Eine Einzelmessung für die Säule „mittel“ zu Versuchsende wies 0,7 mg/L Zn auf. Für den Versuch „lang“ mit Sperre wurden nach einer Versuchsdauer von 450 Tagen ebenfalls Spitzenwerte bis 0,7 mg/L gemessen.



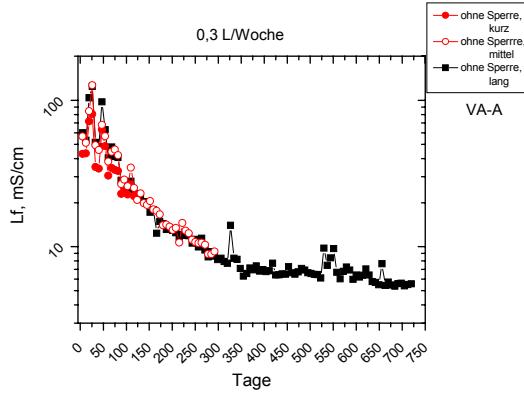


Abb.166a: Leitfähigkeit im Sickerwasser (mS/cm), VA-A Zeitversuche, Blindversuche

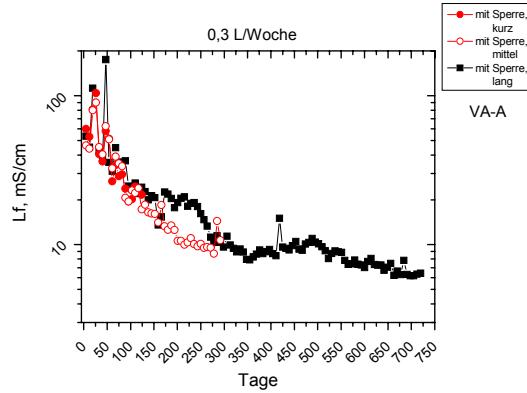


Abb.166b: Leitfähigkeit im Sickerwasser (mS/cm), VA-A Zeitversuche, Versuche mit Sperrre

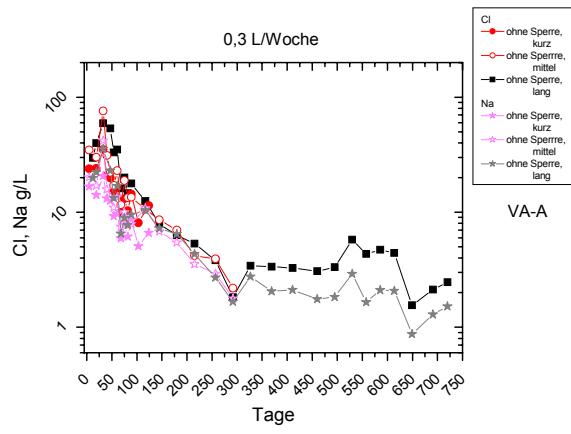


Abb.167a: Cl- und Na-Konzentration im Sickerwasser (g/L), VA-A Zeitversuche, Blindversuche

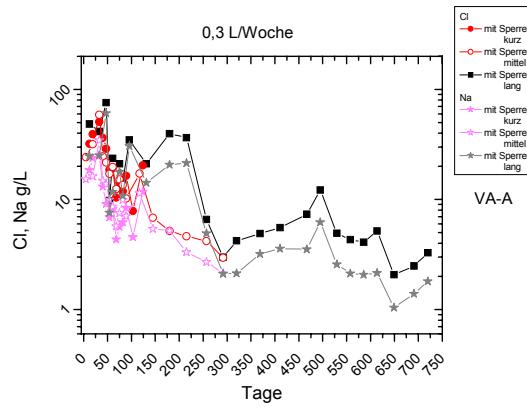


Abb.167b: Cl- und Na-Konzentration im Sickerwasser (g/L), VA-A Zeitversuche, Versuche mit Sperrre

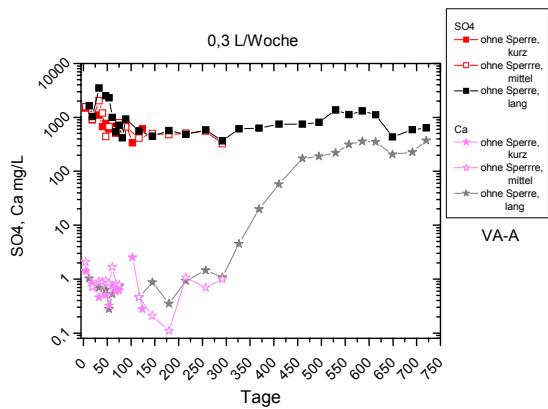


Abb.168a: Ca- und SO4-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-A Zeitversuche, Blindversuche

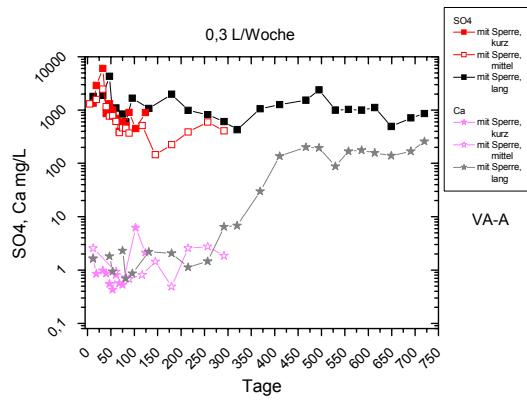


Abb.168b: Ca- und SO4-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-A Zeitversuche, Versuche mit Sperrre

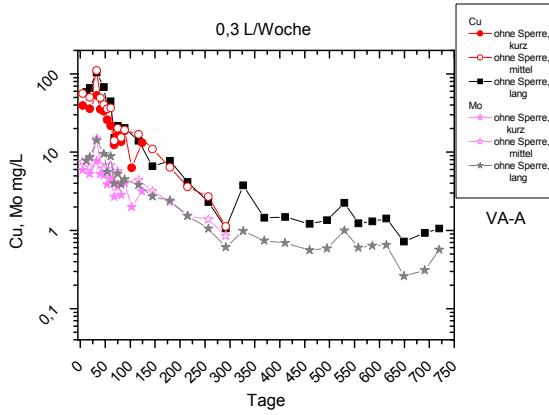


Abb.169a: Cu- und Mo-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-A Zeitversuche, Blindversuche

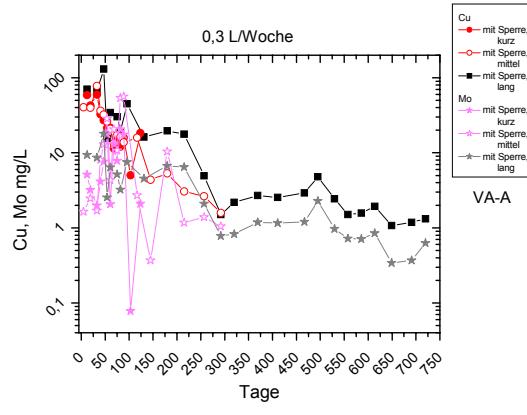


Abb.169b: Cu- und Mo-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-A Zeitversuche, Versuche mit Sperre

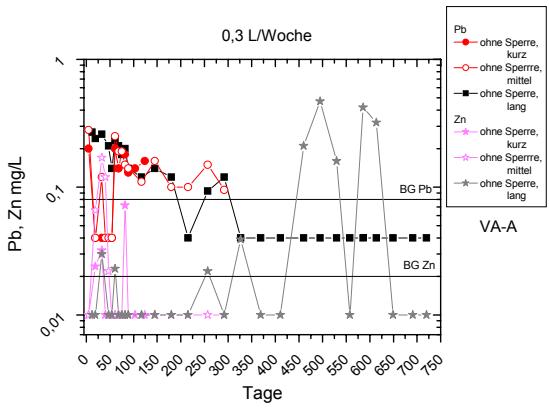


Abb.170a: Pb- und Zn-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-A Zeitversuche, Blindversuche

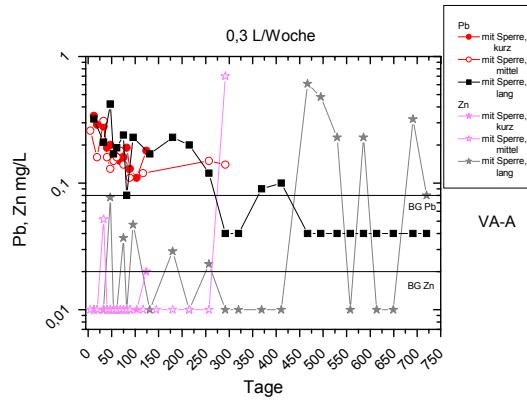


Abb.170b: Pb- und Zn-Konzentration im Sickerwasser (mg/L), VA-A Zeitversuche, Versuche mit Sperre

Frachtenberechnung

Insgesamt wird bei den Versuchen „lang“ der größte Anteil an leichtlöslichen Spezies wie Cl und Na ausgetragen (Tab 39). Es ist bemerkenswert, dass für die leichtlösliche Spezies für alle Zeitversuche mit Sperre eine verstärkte Auswaschung festgestellt wurde. Durch Zugabe von Modellsickerwasser reichern sich für die Zeitversuche bereits ab einer Versuchsdauer von 18 Wochen die Parameter Ca, SO₄, Pb und Zn innerhalb der Säulen an. Mit fortschreitender Versuchsdauer verstärkt sich die Anreicherung innerhalb der Säule.

Tab. 39: Zusammenfassung der Frachtenberechnung, Abreicherung bzw. Anreicherung in % bezogen auf die Ausgangsmenge, Blindversuche und Versuche mit Sperre im Vergleich

Versuchsbezeichnung	IBV1	IBV2	IBV3	ISFK1	ISFK2	ISFK3
Sperre		ohne		mit		
Versuchsanordnung		VA-A		VA-A		
Dauer in Wochen	18	42	103	18	42	103
Bewässerung		MSW		MSW		
Parameter		Proz. Ab-/Anreicherung		Proz. Ab-/Anreicherung		
Cl	-19,0	-26,0	-31,6	-25,9	-27,0	-34,0
SO4	+0,77	+1,84	+3,90	+0,50	+1,98	+2,76
Na	-11,0	-19,5	-25,9	-11,7	-19,7	-46,1
Ca	+0,097	+0,21	+0,47	+0,10	+0,22	+0,50
Cu	-0,062	-0,094	-0,060	-0,063	-0,069	-0,076
Mo	-3,08	-5,89	-7,64	-3,18	-5,62	-10,4
Pb	+0,15	+0,32	+0,82	+0,16	+0,34	+0,84
Zn	+0,018	+0,039	+0,098	+0,019	+0,041	+0,10

4.6.2 Fazit zur Wirkung der Versuchszeit

Die Zeitversuche der Versuchsanordnung A haben gezeigt, dass der Faktor Zeit für verschiedene Entwicklungen und Tendenzen von großer Bedeutung ist.

Wasserrückhaltevermögen

- Versuch „kurz“: keine Wirksamkeit der Sperre hinsichtlich Aufstauvermögen
- Versuch „mittel“: Wirksamkeit einer Sperrsicht hinsichtlich Wasserrückhaltevermögen hier bereits sehr deutlich

Salzanreicherungen entlang des Profils

- Zugabe von Modellsickerwasser: die Anteile an leichtlöslichen Spezies sind im Feststoff mit fortwährender Versuchsdauer rückläufig, d.h. die Feststoffproben der Säulen „lang“ weisen im Vergleich zum Ausgangsmaterial großteils die niedrigsten Salzgehalte auf
- Parameter Ca: die Ca-Gehalte nehmen mit fortwährender Versuchsdauer tendenziell zu (insbesondere für Zeitversuche mit Sperre)
- Parameter SO4: keine Zeitabhängigkeit

Sickerwasserentwicklung

- Übertragbarkeit der Zeitversuche: für die Blindversuche ist die Sickerwasserentwicklung für einen Großteil der Parameter (Ausnahme Pb, Zn) gleich, somit kann ein Großteil der Tendenzen bereits ab einer Laufzeit von sechs Monaten („mittel“) abgeleitet werden; für die Versuche mit Sperre hingegen gibt es keine oder eine nur sehr eingeschränkte Korrelierbarkeit hinsichtlich aller Parameter, d.h. insbesondere Versuch „mittel“ zeigt abweichende Tendentwicklungen im Sickerwasser

- Wichtigkeit von Langzeitversuchen: anhand der Versuche „kurz“ und „mittel“ ist Anstieg der Ca-Konzentration nicht ableitbar, Ca-Zunahme korreliert mit einer pH-Wert Abnahme

Frachtenberechnung:

- Begünstigung einer Auswaschung: im Gegensatz zu den Blindversuchen für alle Zeitversuche mit Sperre eine verstärkte Auswaschung an leichtlöslicher Spezies
- Zugabe von Modellsickerwasser: bereits ab einer Versuchsdauer von 18 Wochen Anreicherung an Ca, SO₄, Pb und Zn innerhalb der Säulen an

5. MINERALOGISCHE ERGEBNISSE

Als Vergleichsbasis dienen die Ausgangsmaterialien Schlacke A (MVA Ingolstadt) und Schlacke B (MHKW Rosenheim) sowie Schlacke-Feinkorn (SFK) und Rauchgasreinigungsrückstände (RGR). Für die mineralogischen Untersuchungen wurden die Feststoffproben aus den Säulenversuchen IBV3 und ISFK3 der VA-A sowie die Bohrproben aus den Großlysimetern nach der dritten Bohrkampagne herangezogen. Ausschlaggebend hierfür war, dass es sich bei diesen Versuchen um Langzeitversuche handelt (Laufzeit 103 Wochen). Feststoffanalysen der Schlacke A haben gezeigt, dass v.a. durch die vglw. hohen Cl-Gehalte eine sehr salzreiche Ausgangssituation bestand. Zudem wurden den Versuchen über das Modellsickerwasser kontinuierlich Salze zugeführt. Als Beispiel für einen Zustand der maximalen Salzakkumulation mit hohen Gehalten an Cl und Na (Abb. B-2 im grafischen Anhang) wurde die Bohrprobe BA 1-15 (vgl. Kapitel 2) aus dem Salzhorizont der Monodeponie Waldering gewählt. Diese Gegebenheit soll als „stabiler“ Endzustand betrachtet werden.

5.1 KORNGRÖßenVERTEILUNG

Die getrockneten Feststoffproben wurden in drei Kornfraktionen gesiebt: < 125 µm (Fraktion a), 125 µm bis 1 mm (Fraktion b) und > 1 mm (Fraktion c). Bei der Korngrößenverteilung wurde untersucht, ob sich leichtlösliche Spezies und Schwermetalle bevorzugt innerhalb einer bestimmten Kornfraktion anreichern. Die Ergebnisse zu den Ausgangsmaterialien Schlacke A und Schlacke B, Schlacke-Feinkorn und Rauchgasreinigungsrückstände (RGR) wurden bereits in Kapitel 3.1 und 4.1 detailliert beschrieben. In diesem Kapitel wird ausschließlich die chemische Verteilung in Abhängigkeit von der Korngröße dargestellt.

5.1.1 Ausgangsmaterialien

In der Tabelle 40 sind für die Schlacken A und B die Feststoffanalysen (RFA) der drei Fraktionen im Vergleich zur Gesamtfraktion veranschaulicht.

In der Tabelle wurde jeweils die Kornfraktion mit den höchsten Gehalten grau unterlegt. Die Untersuchungen zur Korngrößenverteilung haben für beide Schlacken A und B gezeigt, dass für die Parameter CaO, SO₃ und Cl die höchsten Gehalte in der feinsten Fraktion a (< 125 µm) gemessen wurden. Für den Parameter Na₂O fällt auf, dass insbesondere innerhalb der groben Fraktion c (> 1mm) vglw. hohe Werte festgestellt wurden. In der Gegenüberstellung der beiden Schlacken A und B bzgl. der feinsten Fraktion a lässt sich erkennen, dass die Schlacke A insgesamt höhere Cl- und Na-Werte aufweist. Für den Parameter Cl fällt sehr deutlich auf, dass für die Schlacke A in allen Fraktionen fast doppelt so hohe Gehalte festgestellt wurden wie für die Schlacke B. Für die Schlacke B sind hingegen die CaO- und SO₃-Gehalte höher.

Tab. 40: Zusammenfassung chemischer Parameter der Feststoffanalysen in Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung für die Schlacken A und B

Parameter	Einheit	Schlacke A			Schlacke B				
		gesamt	a < 125 µm	b 125 µm – 1 mm	c > 1mm	gesamt	a < 125 µm	b 125 µm – 1 mm	c > 1mm
CaO	Gew.-%	18,5	24,5	22,4	18,6	18,9	29,1	22,8	16,4
Na ₂ O	Gew.-%	2,0	1,6	1,5	1,8	1,9	1,2	1,3	2,9
SO ₃	Gew.-%	1,8	3,3	2,5	1,6	2,0	4,0	2,8	1,2
Cl	ppm	9.522	17.174	13.841	8.273	5.261	8.693	7.779	2.720
Cu	ppm	5.719	6.897	6.242	5.900	4.402	5.773	6.275	3.232
Pb	ppm	1.620	1.896	1.995	1.508	1.276	2.138	1.952	3.111
Zn	ppm	6.651	13.007	9.806	5.945	7.850	12.660	10.759	3.148

Hinsichtlich der Schwermetalle hat die Untersuchung zur Korngrößenverteilung ergeben, dass für beide Schlacken A und B die höchsten Zn-Gehalte ebenfalls in der feinsten Fraktion a (< 125 µm) gemessen wurde. Die Zn-Gehalte beider Schlacken entsprechen einander.

Für die Schlacke A ist auch der Faktor Cu in der feinsten Fraktion a angereichert. Im Vergleich zur Schlacke B ist der Cu-Gehalt höher. Hier weist der Parameter Cu innerhalb der Fraktion a und b tendenziell höhere Werte auf. Der Faktor Pb zeigt in der Korngrößenverteilung eine gleichmäßige Verteilung an. Es wurde lediglich innerhalb der groben Fraktion c der Schlacke B ein vglw. hoher Wert ermittelt (3.100 ppm).

Die Untersuchungen der Ausgangsmaterialien hinsichtlich der chemischen Korngrößenverteilung haben sehr deutlich gemacht, dass eine Anreicherung speziell an leichtlöslicher Spezies vor allem innerhalb der feinen Fraktion a (< 125 µm) stattfindet. Aus diesem Grund wurde für die folgenden Untersuchungen besonders diese Fraktion beleuchtet.

5.1.2 Säulenversuche (VA-A)

In den Tabellen 41 und 42 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zur Korngrößenverteilung für den Blindversuch (IBV3) und den Versuch mit Sperre (ISFK3) aufgelistet. Für den Blindversuch (IBV3) sowie für die Säule mit Sperre (ISFK3) wurden für die Parameter Cl, SO₃ und CaO erhöhte Werte in der feinsten Fraktion a ermittelt.

Generell hat sich gezeigt, dass im Vergleich zum Ausgangsmaterial mit Reaktionsfortschritt insbesondere der Parameter Cl in den Feststoffproben stark abgereichert wurde. In der feinsten Fraktion a wurden die höchsten Cl-Gehalte (etwa 5.600 ppm) festgestellt. Im Vergleich zum Ausgangsmaterial (17.000 ppm) waren die Werte damit deutlich geringer. Für den Parameter Na₂O wurde für die grobe Fraktion durchschnittlich ein Wert von 1,7 Gew.-% gemessen. Im Vergleich zum Ausgangsmaterial zeigt sich somit kein Unterschied. Es ist aber bemerkenswert, dass innerhalb der feinen Fraktionen a und b der Feststoffproben die Na₂O-Gehalte mit durchschnittlich 0,8 Gew.-% deutlich geringer sind im Vergleich zum

Ausgangsmaterial (1,6 Gew.-%). Demnach wurden über das Sickerwasser bevorzugt die Anteile dieser Spezies ausgetragen. Diese Entwicklungen entsprechen den Ergebnissen der Frachtenberechnungen. Bezogen auf die Säulenversuche wurde berechnet, dass die Zugabe von Salzen über das Modellsickerwasser keine Anreicherung an Cl und Na in den Feststoffproben bewirkt hat. Für die Parameter CaO und SO₃ hingegen wurden innerhalb der feinsten Fraktion a zum Teil höhere Gehalte im Vergleich zum Ausgangsmaterial (24,5 Gew.-% bzw. 3,3 Gew.-%) festgestellt: durchschnittlich für CaO 30 Gew.-% und für SO₃ 3,5 Gew.-%. Diese beiden Parameter haben sich somit innerhalb der Säulen angereichert. Bezuglich der Schwermetalle zeigten sich keine auffälligen Änderungen im Vergleich zum Ausgangsmaterial.

Eine bevorzugte Verteilung in den Feststoffproben konnte für den Blindversuch entlang des Säulenprofils für die Parameter Cl und SO₃ festgestellt werden. Bezogen auf den Faktor Cl wies die basisnahe Probe (5.160 ppm) und bezogen auf SO₃ die topnahe Probe (3,9 Gew.-%) den höchsten Gehalt auf. Durch den Einbau einer Sperrsicht ergaben sich für den Versuch mit Sperre im Vergleich zum Blindversuch abweichende Entwicklungen. Entlang des Säulenprofils wurde für den Parameter Cl in den Proben oberhalb der Sperre und insbesondere an der Basis eine Anreicherung (4.728 - 5.612 ppm) in der feinsten Fraktion festgestellt. Innerhalb der Sperrsicht jedoch wurde für Cl der geringste Wert mit nur 2.464 ppm (Fraktion a) gemessen. Die Probe aus der Sperrsicht (SH, 6f der Säule ISFK3) weist in der Fraktion c einen erhöhten Wert für Cl auf.

Für den Faktor SO₃ wurden für diese Säule in der feinsten Fraktion nicht nur am Top, sondern auch unmittelbar unterhalb der Sperrsicht (3,7 Gew.-%) und vor allem innerhalb der Sperrsicht (5,1 Gew.-%) sehr hohe Anteile festgestellt. Für den Blindversuch wurde für die Parameter CaO und Na₂O keine bevorzugte Verteilung lokalisiert. Für die Säule mit Sperre zeigten sich hingegen für die Parameter CaO und Na₂O im Vergleich zum Blindversuch abweichende Verteilungen. Innerhalb der Sperrsicht wurde eine Anreicherung an CaO (32,9 Gew.-%, Fraktion a) beobachtet. Für den Faktor Na₂O ist bemerkenswert, dass speziell in der Probe unmittelbar oberhalb der Sperre (5f) der höchste Wert (2,1 Gew.-%) innerhalb der groben Fraktion c gemessen wurde.

Bezogen auf die Schwermetalle Cu, Pb und Zn lag ebenso eine Anreicherung in der feinsten Fraktion a vor. Für den Blindversuch wurde für den Parameter Pb keine bevorzugte Verteilung beobachtet. Für die Faktoren Cu und Zn hingegen wurde in der mittleren Probe 5f (Cu: 6.712 ppm) und in der topnahen Probe (Zn: 11.665 ppm) erhöhte Werte festgestellt. Für die Säule mit Sperre jedoch fällt auf, dass innerhalb der Sperrsicht die Cu-Gehalte gering (5.345 ppm) und speziell an der Basis in allen drei Fraktionen deutlich höher (max. 7.010 ppm) sind. Auch für den Parameter Zn konnten höhere Werte in den Fraktionen b oder c festgestellt werden. Zn wies innerhalb der Sperrsicht vergleichsweise sehr hohe Gehalte (10.539 – 15.795 ppm) auf. Zudem lässt sich entlang des Säulenprofils auch eine Anreicherung an der Basis und am

Top der Säule erkennen (11.048 – 12.333 ppm). Für den Parameter Pb weist die Säule mit Sperre einen abweichend hohen Wert (7.101 ppm) innerhalb der groben Fraktion c in der topnächsten Probe auf. Tendenziell erkennt man aber auch eine Anreicherung (1.936 – 2.321 ppm) innerhalb der feinen Fraktion a. Der höchste Wert wurde hier innerhalb der Sperrsicht (2.321 ppm) festgestellt.

5.1.3 Feldversuche (Großlysimeter Raindorf)

Im Gegensatz zu den Säulenversuchen hat bezüglich der Großlysimeter Raindorf die Bewässerung mit Modellsickerwasser bewirkt, dass hier innerhalb der Lysimeter ein großer Anteil an Cl, Na, SO₃ und Ca zurückgehalten wurde (Tab. 43 und 44). Generell fällt auf, dass insbesondere die Bohrproben aus dem Lysimeter ohne Sperre höhere Gehalte an leichtlöslichen Spezies und Schwermetalle aufweisen als die aus dem Versuch mit Sperre. Besonders deutlich zeigt sich diese Tendenz für den Parameter Cl. Während für die Säulenversuche eine massive Auswaschung festzustellen war, lag bezüglich der Lysimeter Raindorf sogar eine Anreicherung im Vergleich Ausgangsmaterial (17.200 ppm) vor. Insbesondere für den Blindversuch wurden in den oberflächennahen Proben in der feinsten Fraktion a Cl-Gehalte bis zu 19.000 ppm gemessen. Vom Top zur Basis nahmen die Gehalte ab. Im Vergleich zum Blindversuch war für das Lysimeter mit Sperre eine geringfügige Abnahme der Cl-Gehalte festzustellen mit dem niedrigsten Werte unmittelbar unterhalb der Sperre. Am Top dieses Lysimeters wurde lediglich ein Wert um 15.000 ppm und innerhalb der Sperrsicht um 13.700 ppm gemessen. In den übrigen Bohrproben schwankten die Werte zwischen 12.000 – 13.000 ppm. Auch für den Parameter SO₃ wurden im Vergleich zum Ausgangsmaterial (3,3 Gew.-%) zum Teil höhere Gehalte festgestellt. In der feinen Fraktion a der Feststoffproben aus dem Blindversuch wiesen speziell die oberflächennahen Proben höhere SO₃-Gehalte (ca. 3,7 Gew.-%) auf. Für das Lysimeter mit Sperre wich das Verteilungsmuster von dem des Blindversuchs ab. Hier wurde für den Parameter SO₃ eine Anreicherung vor allem unterhalb der Sperrsicht (max. 3,8 Gew.-%) beobachtet. Die Probe aus der Sperrsicht wies den kleinsten SO₃-Wert (3,1 Gew.-%) auf.

Der Parameter CaO stellt eine Ausnahme dar. Insgesamt wurden für den Blindversuch im Vergleich zum Lysimeter mit Sperre geringere Werte um 27,7 Gew.-% festgestellt. Die Gehalte sind damit höher im Vergleich zum Ausgangsmaterial mit 24,5 Gew.-%. Für beide Lysimeter reicherte sich CaO in den basisnahen Proben an. Für das Lysimeter mit Sperre wurden speziell unterhalb der Sperre die höchsten Werte beobachtet.

Es ist bemerkenswert, dass im Gegensatz zum Ausgangsmaterial die grobe Fraktion c der Lysimeterproben durchgehend relativ hohe Na₂O-Gehalte aufzeigt. Für den Blindversuch zeigten sich insbesondere im mittleren Bereich (Proben 2f, 3f) höhere Na₂O – Werte. Für das Lysimeter mit Sperre ist die Verteilung entlang des Profils gleichmäßig mit Gehalten zwischen 2,1 und 2,4 Gew.-%. Lediglich die Probe unterhalb der Sperrsicht fällt mit einem vglw.

geringen Wert von 1,8 Gew.-% aus dem Rahmen. Während für die Säulenversuche insbesondere die Fraktion a stark an Na₂O abgereichert war, sind hier die Werte vergleichbar mit den Werten im Ausgangsmaterial. Für den Blindversuch zeigte sich sogar eine Anreicherung. Betreffend die Schwermetalle wurden im Vergleich zum Ausgangsmaterial zum Teil deutlich höhere Gehalte gemessen. Auch diese Entwicklung wichen von der der Säulenversuche ab. Dort wurde eine Abreicherung v.a. an Cu und Zn beobachtet. Für das Lysimeter Raindorf mit Sperre ist auffallend, dass die Gehalte der Parameter Cu, Pb und Zn vom Top zur Basis hin kontinuierlich abnehmen. Für das Lysimeter mit Sperre hingegen waren die Parameter Cu und Pb sehr gleichmäßig entlang des Bohrprofils verteilt. Für Cu reichten die Werte von 4.908 bis 6.602 ppm und für Pb von 1.219 bis 2.729 ppm. Für Pb wurden z.T. höhere Gehalte in der groben Fraktion c festgestellt. Sehr auffällig für das Lysimeter mit Sperre war, dass der Parameter Zn die höchsten Werte im Bereich der Sperrsicht (2f, SH, 3f; 13.420 – 14.023 ppm) aufweist. Am Top und an der Basis hingegen waren die Werte niedriger (11.343 – 11.760 ppm).

Tab. 41: Zusammenfassung der Korngrößenverteilung der Feststoffproben aus der Säule ohne Sperre der VA-A

Parameter	Einheit	IBV3-2f				IBV3-4f				IBV3-5f				IBV3-7f			
		g ¹	a	b	c	g ¹	a	b	c	g ¹	a	b	c	g ¹	a	b	c
CaO	Gew.-%	19,5	29,6	24,1	17,7	20,1	30,4	23,8	19,0	19,9	30,2	23,9	18,6	21,0	30,5	24,1	17,0
Na ₂ O	Gew.-%	1,2	0,6	0,7	1,6	1,2	0,7	0,8	1,4	1,2	0,7	0,8	1,6	1,4	0,7	0,8	1,8
SO ₃	Gew.-%	2,0	3,9	3,0	1,5	2,0	3,5	2,6	1,6	1,8	3,2	2,4	1,5	2,0	3,3	2,5	1,2
Cl	ppm	2.784	3.994	3.463	2.173	3.559	4.630	4.478	2.992	3.435	4.558	4.452	2.859	4.160	5.160	5.091	2.819
Cu	ppm	5.756	6.363	5.346	4.562	5.676	6.145	5.722	4.521	5.994	6.712	6.135	4.638	4.665	5.961	5.493	4.476
Pb	ppm	1.501	1.868	1.769	1.723	1.835	1.936	1.834	1.361	1.450	1.952	1.845	1.845	1.420	1.981	1.848	1.275
Zn	ppm	6.343	11.665	8.471	4.608	6.883	11.552	8.546	5.664	5.650	11.395	8.491	5.653	6.698	10.915	8.461	4.417

¹ g = Gesamtfraktion**Tab. 42:** Zusammenfassung der Korngrößenverteilung der Feststoffproben aus der Säule mit Sperre der VA-A

Para-meter	Einheit	ISFK3-2f				ISFK3-5f				ISFK3 – SH*				ISFK3-7f				ISFK3-9f			
		g ¹	a	b	c	g ¹	a	b	c	g ¹	a	b	c	g ¹	a	b	c	g ¹	a	b	c
CaO	Gew.-%	19,9	29,5	24,3	17,6	20,3	29,9	24,0	17,4	20,3	32,9	25,1	20,0	20,4	30,6	23,7	17,3	19,6	29,1	23,1	18,1
Na ₂ O	Gew.-%	1,3	0,6	0,8	1,5	1,4	0,7	0,9	2,1	1,5	0,6	0,8	1,5	1,3	0,7	0,9	1,5	1,2	0,9	1,0	1,9
SO ₃	Gew.-%	2,3	3,8	2,8	2,4	1,9	3,5	2,7	1,1	2,0	5,1	3,0	2,1	2,1	3,7	2,6	1,2	1,8	3,3	2,4	1,3
Cl	ppm	3.251	4.579	4.192	2.767	3.413	4.728	4.571	2.730	2.313	2.464	2.768	2.210	3.378	4.598	4.427	3.082	4.152	5.612	5.100	3.021
Cu	ppm	4.483	5.719	5.450	4.317	4.579	6.153	5.528	4.201	4.721	5.345	5.328	5.599	5.267	6.316	5.694	5.500	5.379	6.803	5.965	7.010
Pb	ppm	1.319	1.936	1.821	7.101	1.651	2.009	1.847	1.053	1.581	2.321	2.091	1.716	1.546	2.033	1.838	1.266	1.601	1.963	1.822	1.487
Zn	ppm	5.501	11.048	8.403	4.740	4.981	10.810	8.430	4.695	7.356	12.904	10.539	15.795	6.750	10.594	8.411	4.863	6.670	12.333	9.020	5.734

¹ g = Gesamtfraktion; *SH = Sperrhorizont, Sperrschiecht

Tab. 43: Zusammenfassung der Korngrößenverteilung der Feststoffproben aus dem Lysimeter ohne Sperre der Großlysimeter Raindorf

Parameter	Einheit	RA1-1f				RA1-2f				RA1-3f				RA1-4f			
		g ¹	a	b	c	g ¹	a	b	c	g ¹	a	b	c	g ¹	a	b	c
CaO	Gew.-%	17,1	27,1	19,5	15,0	17,7	27,0	20,6	15,7	16,6	26,8	20,3	16,1	17,8	27,7	22,8	19,0
Na ₂ O	Gew.-%	2,1	2,2	1,9	2,2	1,9	2,1	2,0	2,5	1,9	1,8	1,8	2,6	2,2	1,8	1,8	2,2
SO ₃	Gew.-%	1,8	3,6	2,1	1,1	1,7	3,7	2,3	1,2	1,5	3,4	2,2	1,3	1	3,3	2,5	1,3
Cl	ppm	11.594	19.105	14.283	7.866	11.720	18.201	15.597	8.179	8.620	15.776	12.777	7.302	8.315	15.345	13.533	7.847
Cu	ppm	7.594	7.546	7.007	8.038	6.697	7.165	7.360	5.917	6.882	6.638	6.736	6.647	5.501	6.447	5.950	4.293
Pb	ppm	4.290	3.848	3.187	1.886	2.365	3.556	2.909	2.610	1.814	2.453	2.337	2.384	1.686	1.872	1.726	1.153
Zn	ppm	9.790	16.700	11.118	8.841	9.246	15.717	11.077	6.791	6.313	13.100	9.345	8.146	7.384	12.526	9.454	6.120

¹ g = Gesamtfraktion

Tab. 44: Zusammenfassung der Korngrößenverteilung der Feststoffproben aus dem Lysimeter mit Sperre der Großlysimeter Raindorf

Parameter	Einheit	RA2-1f				RA2-2f				RA2-SH*				RA2-3f				RA2-4f			
		g ¹	a	b	c	g ¹	a	b	c	g ¹	a	b	c	g ¹	a	b	c	g ¹	a	b	c
CaO	Gew.-%	17,9	26,6	21,9	16,3	17,0	27,4	23,3	17,2	19,9	26,7	22,3	17,7	20,5	28,3	22,7	17,3	18,9	28,1	22,5	16,6
Na ₂ O	Gew.-%	2,0	1,7	1,6	2,4	2,0	1,6	1,6	2,1	1,9	1,7	1,6	2,4	1,5	1,6	1,5	1,8	1,9	1,7	1,5	2,4
SO ₃	Gew.-%	1,3	3,2	2,4	1,1	1,5	3,3	2,6	1,2	2,0	3,1	2,5	1,2	2,2	3,8	2,6	1,6	1,6	3,6	2,4	1,1
Cl	ppm	7.123	14.974	12.104	5.861	6.750	13.106	11.578	6.017	9.034	13.722	11.063	6.698	9.144	12.131	10.657	6.821	7.811	13.156	10.930	5.730
Cu	ppm	6.602	6.436	6.024	6.423	6.400	5.912	5.670	5.799	5.399	6.189	6.397	4.908	4.910	6.341	6.122	5.151	5.177	6.337	6.169	5.215
Pb	ppm	1.219	1.929	1.791	2.275	2.627	1.781	1.739	1.514	1.522	1.718	1.652	1.253	1.750	2.180	1.970	2.729	1.353	1.897	1.788	1.438
Zn	ppm	6.003	11.343	8.686	5.773	6.509	14.023	10.374	5.107	7.087	13.420	10.109	4.865	7.697	13.456	10.750	6.916	5.824	11.760	9.074	4.941

* SH = Sperrhorizont, Sperrsicht

¹ g = Gesamtfraktion

5.1.4 Salzhorizont der Monodeponie Waldering

Die Bohrprobe BA 1-15 stammt unmittelbar aus dem beobachteten Salzhorizont der Monodeponie Waldering aus einer Bohrtiefe von sieben Metern (Tab. 45). Die Untersuchungen zur Korngrößenverteilung haben gezeigt, dass mit wenigen Ausnahmen (Na_2O und Cl) kaum Unterschiede in den einzelnen Fraktionen feststellbar sind. Im Vergleich zu den Ausgangsmaterialien Schlacke A und B fallen für die Bohrprobe BA 1-15 die deutlich höheren CaO- und Cl-Gehalte auf: CaO (36,4 Gew.-%) und Cl (14,2 Gew.-%). Im Gegensatz zu den Ausgangsmaterialien werden hier die höchsten Na_2O -Gehalte innerhalb der feinsten Fraktion a (< 125 µm) gemessen. Die Werte für Na_2O (6,0 Gew.-%) und Cl sind außergewöhnlich hoch. Die Gehalte sind sogar höher als in frischen RGR-Proben: Na_2O bei 1,9 Gew.-% und für Cl nur bei 10,9 Gew.-%. Der Faktor SO_3 ist für die Bohrprobe BA 1-15 in der groben Fraktion c (> 1 mm) mit einem Wert von 3,8 Gew.-% am höchsten. In der Schlacke B hingegen wurde in dieser Fraktion lediglich ein Wert 1,2 Gew.-% festgestellt. Bezuglich der feinen Fraktion a ist die Verteilung umgekehrt: hier wurde für die Schlacke B ein Gehalt von 4,0Gew.-% und für die Bohrprobe BA 1-15 nur ein Gehalt von 3,4 Gew.-% ermittelt.

Eine weitere markante Auffälligkeit ist, dass die Cu-Gehalte im Vergleich zu den Ausgangsmaterialien (max. 6.900 ppm) mit 970 ppm deutlich geringer sind. Vor allem innerhalb der feinsten Fraktion a (< 125 µm) der Probe BA 1-15 ist der Parameter Cu deutlich abgereichert. Die Pb- und Zn-Gehalte weisen in etwa dieselben Konzentrationsbereiche auf wie die Schlacke B. Für die Bohrprobe BA 1-15 wurden die geringsten Werte innerhalb der feinen Fraktion a festgestellt: für Pb 2.845 und für Zn 10.804 ppm.

Tab. 45: Zusammenfassung der Korngrößenverteilung der Bohrprobe 1-15 aus dem Salzhorizont in BA 1 der Monodeponie Waldering

Parameter	Einheit	BA 1 - 15 - Salzhorizont			
		gesamt	a < 125 µm	b 125 µm – 1 mm	c > 1mm
CaO	Gew.-%	35,0	36,4	35,4	35,2
Na_2O	Gew.-%	1,6	6,0	2,6	2,3
SO_3	Gew.-%	3,5	3,4	3,7	3,8
Cl	ppm	127.341	141.542	112.853	107.366
Cu	ppm	1.031	970	1.038	1.069
Pb	ppm	3.899	2.845	3.492	3.346
Zn	ppm	11.497	10.804	12.436	12.464

5.1.5 Fazit zur Korngrößenverteilung

Eine bevorzugte Anreicherung an leichtlöslichen Salzen und Schwermetallen (insbesondere Zink) in MV-Schlacken findet sich:

- innerhalb der feinen Fraktion a (< 125 µm),
- eine Ausnahme ist Na₂O (grobe Fraktion c > 1mm),
- Pb zeigt keine bevorzugte Verteilung.

Die wichtigsten Erkenntnisse bzgl. der Zugabe von Modellsickerwasser:

- im Vergleich zum Ausgangsmaterial wurde für die Säulenversuche eine massive Auswaschung an Cl und Na₂O und für die Lysimeter hingegen eine Anreicherung festgestellt,
- die Salzzugabe führte für alle Versuche zu einer Anreicherung an CaO und SO₃ - hier ist die Entwicklung für die Säulenversuche deutlicher als für die Lysimeter,
- bezogen auf die Schwermetalle liegt im Vergleich zum Ausgangsmaterial für die Säulenversuche ein ähnlicher Konzentrationsbereich bzw. eine geringfügige Auswaschung (Cu, Zn) vor und für die Lysimeter hingegen zeigte sich eine Anreicherung an Cu, Pb und Zn insbesondere für den Blindversuch

Der Einbau einer Sperrsicht hat zum Teil deutliche Unterschiede entlang des Versuchsprofils zwischen Blindversuch und Versuch mit Sperre bewirkt. Die folgenden Punkte spiegeln die wichtigsten Erkenntnisse wider:

- Säulenversuche: gleichmäßige Verteilung an CaO und Pb, Anreicherung für SO₃ und Zn am Top und für Cl, Na₂O und Cu in den basisnahen Proben für den Blindversuch sowie Anreicherung innerhalb der Sperrsicht an CaO, SO₃, Pb und Zn; zudem Anreicherung an Na₂O unmittelbar oberhalb der Sperrsicht in der groben Fraktion c, Abreicherung an Cl und Cu innerhalb der Sperrsicht sowie an der Basis und für Zn am Top sowie an der Basis für den Säulenversuch mit Sperre.
- Lysimeter: deutliche Anreicherung für SO₃, Cl, Cu, Pb und Zn am Top und für Na₂O in den mittleren Proben für den Blindversuch sowie Anreicherung für Cl und Zn sowie Abreicherung für SO₃ im Bereich der Sperrsicht, zudem deutliche Anreicherung für CaO und SO₃ an der Basis sowie für Cl am Top für das Lysimeter mit Sperre.

Für die Bohrprobe BA 1-15 aus dem Salzhorizont der Monodeponie Waldering zeigen sich Auffälligkeiten:

- außergewöhnlich hohe Gehalte an Cl und Na₂O,
- die Werte sind auch höher im Vergleich zu frischen RGR-Proben,
- insbesondere der Parameter Cu ist im Vergleich zu Schlacke B stark abgereichert, vor allem die Probe innerhalb der Sperre weist den niedrigsten Wert auf.

5.2 RELATIVE ANTEILE VON MINERALPHASEN

MV-Schlacke ist ein Multiphasengemisch. Die Röntgenpulveraufnahmen haben gezeigt, dass die Materialien z.T. aus mehr als 10 verschiedenen Mineralphasen bestehen. Die einzelnen Peaks überlagern sich z.T aufgrund der zahlreichen Mineralphasen in MV-Schlacken. Generell konnten etwa 7 Phasen mittels Röntgenpulverdiffraktometrie eindeutig identifiziert werden. Bei vielen Phasen in MV-Schlacken handelt es sich um Mischkristalle. In einzelnen Diffraktogrammen hat sich zudem auch ein Glasbuckel gezeigt, der auf aufgeschmolzene Schlackepartikel und amorphe Bestandteile hinweist. Deshalb ist eine quantitative Analyse, z.B. mittels Rietveld-Methode, nicht möglich. Der zeitliche Aufwand hätte den Rahmen dieser Arbeit gesprengt. Aus diesem Grund wurde hier eine Abschätzung der relativen Anteile von Mineralphasen durchgeführt. Die Auswertung der Röntgenbeugungsdaten erfolgte mit dem Softwarepaket ADM V6 der Firma Dr. A Wassermann, Kempten (2001). Die Abschätzung der relativen Anteile einer Mineralphase wurde anhand der Peakhöhe charakteristischer Peaks im Diffraktogramm durchgeführt. Der relative Anteil einer Phase wird in den folgenden Tabellen durch die Anzahl der Kreuze (+) symbolisiert (Tab. 46). Ein Strich (-) bedeutet, dass die Phase nicht nachweisbar war.

Tab. 46: Symbole zur Abschätzung der relativen Anteil einer Mineralphase

Symbol	Bedeutung
++++	Sehr viel vorhanden
+++	Viel vorhanden
++	Wenig vorhanden
+	Sehr wenig vorhanden
-	Röntgenographisch nicht nachgewiesen

Zusätzlich zur routinemäßigen Auswertung mit ADM wurden reine Mineralphasen der Mineralogischen Staatssammlung am Museum „Reich der Kristalle“ in München röntgenographisch untersucht. Folgende Phasen konnten in den Schlacke-Proben eindeutig identifiziert werden: Quarz, Calcit, Gips, Anhydrit, Halit, Sylvan, Ettringit, Hydrocalumit, Fe-Oxide (u.a. aus der Spinell-Gruppe) und Silikate (u.a. aus der Melilith-Gruppe). In einzelnen Diffraktogrammen hat sich zudem auch ein Glasbuckel gezeigt, der auf aufgeschmolzene Schlackepartikel und amorphe Bestandteile hinweist. Analysiert und ausgewertet wurden die Gesamtfraktion und die Fraktionen a (< 125 µm), b (125 µm - 1mm) und c (> 1 mm). Ein Vergleich der Gesamtfraktion und der einzelnen Fraktion hat gezeigt, dass die Gehalte für die Hauptphasen Quarz und Calcit sowie Spinell und Melilith in etwa vergleichbar sind. Für die löslichen Salzphasen wie Ettringit, Hydrocalumit, Gips, Halit oder Sylvit wurden insbesondere in der feinen Fraktionen a die größten Anteile beobachtet. Aufgrund dieser Beobachtungen sowie aufgrund der Ergebnisse zur Korngrößenverteilung, wo eine bevorzugte Anreicherung

der Salze und Schwermetalle innerhalb der feinen Fraktion a festgestellt wurde, wurde auch bei der Auswertung der Diffraktogramme das Hauptaugenmerk auf die feine Fraktion a gelegt. Für die Feststoffproben aus den Säulen jedoch war in der Fraktion a zu wenig Material für eine qualitative Analyse vorhanden, daher wurde hier die Fraktion b (125 µm – 1mm) detaillierter untersucht.

5.2.1 Ausgangsmaterialien

Die Tabelle 47 zeigt eine Auflistung der Mineralphasen der Ausgangsmaterialien Schlacke A (MVA Ingolstadt) und Schlacke B (MHKW Rosenheim) sowie Schlacke-Feinkorn (SFK) und Rauchgasreinigungsrückstände (RGR).

Tab. 47: Relative Anteile von Mineralphasen in den Ausgangsmaterialien (feine Fraktion a)

Mineralphasen	Schlacke A	Schlacke B	SFK	RGR
Quarz	++++	++++	++++	+
Calcit	++++	+++	+++	+++
Portlandit	-	-	-	++++
Gips	-	+	+	+
Anhydrit	+	++	++	-
Halit	+	-	+	+++
Sylvin	+	-	-	+++
Ettringit	++	++	++	-
Hydrocalumit	++	-	+	-
Spinell	-	++	++	-
Melilith	++	++	+	-

Die Schlacken A und B weisen als Hauptphasen Calcit und Quarz auf. Zudem konnten auch Melilith $[(\text{Ca},\text{Na})_2(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe}^{2+})(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_7]$ und ein Vertreter der Spinell-Gruppe Magnesioferrit $(\text{Mg}\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_4)$ identifiziert werden. Ein Unterschied besteht darin, dass Schlacke A höhere Calcit-Gehalte aufweist und Schlacke B hingegen höhere Quarz- und Melilith-Gehalte. Für Schlacke A konnte im Gegensatz zu Schlacke B das Mineral Hydrocalumit $[\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6[\text{Cl}_{1-x}(\text{OH})_x]\cdot 3\text{H}_2\text{O}]$ nachgewiesen werden. Dafür wurden in der Schlacke B Gips- und Anhydrit festgestellt. Ettringit $[\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}]$ ist in beiden Schlacken vorhanden. Entsprechend der chemischen Analyse wurde in der salzreichen Schlacke A zudem Halit und Sylvin detektiert. Das Schlacke-Feinkorn (SFK) zeigt denselben Mineralbestand wie die Schlacke B. Hinweise auf höhere Salzgehalte sind die Phasen Halit und Hydrocalumit.

Die Rauchgasreinigungsrückstände (RGR) fallen mit ihrem relativ hohen Anteil an Portlandit auf. Auch die Anteile an Halit- und Sylvin sind im Vergleich zu MV-Schlacke auffällig hoch. Im

Vergleich zu MV-Schlacke sind die Quarz-Anteile vergleichsweise gering; die Calcit-Anteile hingegen sind in etwa gleich hoch.

5.2.2 Säulenversuche (VA-A)

Die Feststoffproben aus den Säulen IBV3 (ohne Sperre „lang“) und ISFK3 (mit Sperre „lang“) weisen im Wesentlichen dieselben Mineralphasen auf wie die Ausgangsschlacke A. Die Tabelle 48 zeigt eine Auflistung der Mineralphasen. Bemerkenswert ist, dass die Anteile an Anhydrit höher sind. Entlang der Säulenprofile variieren die Anteile an Mineralphasen. Am deutlichsten lassen sich die Unterschiede anhand der Mineralphasen Ettringit und Hydrocalumit erarbeiten. Für den Blindversuch hat die Feststoffanalyse eine topnahe Sulfatanreicherung ergeben. Entsprechend wurde im Diffraktogramm dieser Probe ein höherer Ettringit-Anteil beobachtet. Im Gegenzug dafür ist der Hydrocalumit-Peak nur sehr klein und schlecht ausgeformt. Zu Basis hin nimmt der Anteil an Ettringit ab und der von Hydrocalumit zu.

Für die Säule mit Sperre lässt sich derselbe Mineralbestand beschreiben wie für den Blindversuch. Für die Proben oberhalb der Sperre sind die Ettringit- und Hydrocalumit-Gehalte in etwa gleich hoch. Innerhalb der Sperrsicht (ISFK3-SH) wurde mit 5,1 Gew.-% ein sehr hoher Sulfat-Gehalt ermittelt. Übereinstimmend war der Ettringit-Anteil deutlich höher und der Hydrocalumit-Anteil vernachlässigbar gering. Zudem ist auch der Calcit-Gehalt höher. Gips konnte eindeutig identifiziert werden. Auffällig ist hier ein geringerer Quarz-Anteil.

Tab. 48: Relative Anteile von Mineralphasen in den Feststoffproben aus den Säulen IBV3 (ohne Sperre „lang“) und ISFK3 (mit Sperre „lang“), feine Fraktion a

Mineralphasen	ohne Sperre				mit Sperre				
	IBV3-2f	IBV3-4f	IBV3-5f	IBV3-7f	ISFK3-2f	ISFK3-5f	ISFK3-SH	ISFK3-7f	ISFK3-9f
Quarz	+++	+++	++++	++++	++++	++++	+++	++++	++++
Calcit	++	++	++	++	++	++	++	++	++
Gips	-	-	-	-	-	-	+	-	-
Anhydrit	+	+	-	+	+	+	+	+	-
Halit	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Sylvin	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ettringit	++	++	+	+	+	+	++	++	++
Hydrocalumit	+	+	++	++	+	+	-	++	++
Spinell	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Melilit	+	+	+	+	+	+	+	+	+

5.2.3 Feldversuche (Großlysimeter Raindorf)

Die Tabelle 49 zeigt eine Übersicht über die relativen Anteile der Mineralphasen für die zwei Feldversuche der Großlysimeter Raindorf. Der Mineralbestand stimmt überwiegend mit dem der Ausgangsschlacke A überein. Auffällig ist, dass im Vergleich zu den Säulenproben die Bohrproben aus den Lysimeterproben z.T. sehr hohe Anteile an Hydrocalumit aufweisen. Dies korrespondiert mit den viel höheren Cl-Gehalten in diesen Proben. Generell wirkt sich die Verteilung der Parameter Cl und SO₄ im Feststoff unmittelbar auf den Mineralbestand aus. Für den Blindversuch wurden insbesondere in den topnahen Proben hohe Gehalte an Cl und SO₄ gemessen. Folglich sind in diesen Proben die Hydrocalumit- und Ettringit-Anteile erhöht. Am deutlichsten zeigen sich Unterschiede zwischen Blindversuch und Lysimeter mit Sperre in der basisnächsten Probe. Für das Lysimeter mit Sperre sind die Calcitanteile deutlich geringer als für den Blindversuch, während die Quarz-Anteile höher sind. Für das Lysimeter mit Sperre ist zusätzlich die Phase Gips eindeutig identifizierbar. In der Probe unmittelbar unterhalb der Sperrsicht ist auch der Ettringit-Anteil am höchsten. Diese Beobachtung korrespondiert mit höheren SO₃-Werten an der Basis. Die Cl-Gehalte sind für dieses Lysimeter an der Basis geringer, daher konnte sich auch kaum noch Hydrocalumit ausbilden. Die Probe aus der Sperrsicht hingegen weist den höchsten Hydrocalumitgehalt auf.

Tab. 49: Relative Anteile von Mineralphasen in den Feststoffproben aus den Lysimetern RA1 (ohne Sperre) und RA2 (mit Sperre) der dritten Bohrkampagne (feine Fraktion a)

Mineralphasen	ohne Sperre				mit Sperre				
	RA1-1f	RA1-2f	RA1-3f	RA1-4f	RA2-1f	RA2-2f	RA2-SH	RA2-3f	RA2-4f
Quarz	++	++	++	+++	+++	+++	+++	++	++++
Calcit	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	++
Gips	+	+	-	-	-	-	-	+	+
Anhydrit	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Halit	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Sylvin	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ettringit	+	++	+	+	+	+	+	++	+
Hydrocalumit	+++	+++	++	++	++	++	+++	+	+
Spinell	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Melilit	+	+	++	++	+	+	+	+	+

5.2.4 Salzhorizont der Monodeponie Waldering

Die Bohrprobe BA 1-15 wurde direkt aus dem Salzhorizont aus einer Tiefe von sieben Metern entnommen. Auffällig sind für diese Probe die außergewöhnlich hohen Anteile an Halit (Tab. 50). Auch Calcit, Anhydrit und Sylvin sind in relativ hohen Anteilen vertreten. Als weitere Phasen wurden in großen Mengen Hydrocalumit und ein Vertreter der Spinell-Gruppe (z.B. Magnesioferrit) bestimmt. Zudem wurde noch Quarz identifiziert. In der Arbeit von Magel

(2003) wurde beschrieben, dass es in den Bohrproben aus BA1 von 2000 bereits zu einem Ettringit-Abbau zu Gunsten von Hydrocalumit gekommen ist. Für die vorliegende Arbeit wurden dieselben Proben untersucht, die in Plastikeimern in Kellerräumen auf der Monodeponie Waldering gelagert werden. Eine weitere Alterung von vier Jahren hat dazu geführt, dass nunmehr nicht mehr Ettringit vorliegt, sondern viel mehr Monosulfat ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot12\text{H}_2\text{O}$).

Tab. 50: Relative Anteile von Mineralphasen im Salzhorizont der Monodeponie Waldering (BA1-15)

BA 1-15 Mineralphasen							
Quarz	+	Gips	-	Hydrocalumit	++	Sylvin	+++
Calcit	+++	Anhydrit	+++	Monosulfat	++	Spinell	++
Portlandit	-	Ettringit	-	Halit	++++	Melilit	+

5.2.5 Fazit zu den relativen Anteilen von Mineralphasen

Die Röntgenpulverdiffraktometrie eine sehr empfindliche Methode. Bezuglich der Hauptphasen Quarz und Calcit sowie Spinelle und Melilithe zeigt sich kaum ein Unterschied im Profilverlauf. Jedoch können merkliche Unterschiede für leichtlösliche Mineralphasen wie Halit, Sylvin, Gips, Ettringit und Hydrocalumit in den einzelnen Proben entlang des vertikalen Versuchsprofils erarbeitet werden.

Fazit zu den relativen Anteilen von Mineralphasen

- Die Verteilung der Parameter im Feststoff wirkt sich unmittelbar auf den Mineralbestand aus.
- Geringfügige Milieuunterschiede für Cl und SO₄ reichen aus, um die Mineralverteilung zu ändern.
- SO₄-reiche Lösungen führen zur Bildung von Ettringit und Cl-reiche Lösungen zur Bildung von Hydrocalumit.
- Aus den Ergebnissen zur Gesamtchemie lässt sich ableiten, dass eine Erhöhung im SO₃-Gehalt um 0,5% bereits ausreicht, um die Mineralverteilung zu beeinflussen.

5.3 DIVERSE MINERALPHASEN IN MV-SCHLACKEPROBEN

Verschiedenartige Salzphasen konnten in frischen (Ausgangsmaterialien) sowie in gealterten Schlackeproben (Feststoffproben aus Säulen- und Feldversuchen) makroskopisch festgestellt werden. Die Mineralbeschreibungen, Aufnahmen mit Licht- sowie Rasterelektronenmikroskopie und Infrarotspektroskopie (mittleren Infrarotbereich von 4000 bis 400 cm⁻¹) finden sich im mineralogischen Anhang. Die Tabelle D-5.1 im experimentellen Anhang gibt eine generelle Übersicht über die Infrarot-Bandenverteilung wichtiger Mineralklassen, Aquo- und Hydroxokomplexe, Kristallwasser und Kohlendioxid.

Für die Schlacke A wurden zahlreiche, unterschiedlich gefärbte Salze untersucht (Abb. B-1a bis B-2b, mineralogischer Anhang). Für die Schlacke B hingegen wurden makroskopisch deutlich weniger Salzphasen festgestellt (Abb. B-3a und B-3b, mineralogischer Anhang). Die Aufnahmen mit Lichtmikroskop und REM haben gezeigt, dass die Phasen hauptsächlich gelartig sind: Die Oberflächen sind zum Teil glatt, sowie brüchig bis splittrig. In wenigen Fällen lassen sich auch nadelige Kristalle erkennen. Generell konnten röntgenographisch keine schwermetallhaltigen Mineralphasen in den Feststoffproben nachgewiesen werden. Für die Salzphasen der Schlacke A war eine Mineralbestimmung mittels Pulverröntgendiffraktometrie zudem ausgeschlossen, da die Phasen röntgenamorph waren.

Die Tabelle 51 zeigt einen Überblick über die mineralogische Phasenzusammensetzung, die mittels EDX-Detektion in Salzburg bestimmt wurde. Mit dieser Methode konnte kein C nachgewiesen werden. Die Proben wurden am FES in Schwabach mit einem RBSD-Detektor (Robinson-Backscatter-Detektor) untersucht. Mit dieser Ausstattung konnte auch Kohlenstoff qualitativ analysiert werden. In sämtlichen Salzphasen wurde ein C-Peak festgestellt. Daher sind Karbonat- und Hydrocarbonatkomponten denkbar.

Tab. 51: Elementverteilung in den Mineralphasen in den Ausgangsmaterialien (Schlacke A und B), ermittelt mittels EDX-Analyse

Farbe	Probe	Elemente	Beschreibung	
			Lichtmikroskop	REM
Weiß	Schlacke A	Zn, O	gelartig, muscheliger Bruch, durchscheinend z.T. auch Kristalle	Nadeln
Türkis	Schlacke A	Al, Cl, Ca, O, K	gelartig, muscheliger Bruch, durchscheinend,	glatt, muscheliger Bruch
Türkis	Schlacke B	Al, O, Cl, Na, Cu	mikrokristallin, z.T. sehr weich	splittrig, brüchig

Für die weißen Mineralphasen der Schlacke A wurden hauptsächlich die Elemente Zn und O festgestellt. Mit dem REM lässt sich erkennen, dass die einzelnen Kristalle bei starker Vergrößerung nadelig ausgebildet sind. Mittels Infrarotuntersuchung wurden neben Kristallwasser (3840 und 1620 cm⁻¹) und OH-Gruppen (3640 cm⁻¹) auch Anteile an Karbonat (1420 cm⁻¹) und Sulfat (1108 cm⁻¹) in der weißen Salzphase festgestellt. Morphologisch sieht

man weiße nadelige Kristalle. Aus dieser Beobachtung kommt das Mineral Brianyoungit, $Zn_3[(OH)_4/(CO_3),(SO_4)]$ in Frage.

Die Oberflächen der türkisen Mineralphasen der Schlacken A und B sind glatt ausgebildet. Ihr mit muscheligem Bruch oder z.T. auch stark splittrig und brüchig. Die Infrarotanalysen haben ergeben, dass die Salzphasen sehr wasserhaltig sind (Kristallwasser und z.T. OH-Gruppen). Die Elemente Al, Cl, Ca, O, K, Na und Cu wurden analysiert. Hierfür kommt Afghanit ($(Na,Ca,K)_8(Si,Al)_{12}O_{24}(SO_4,Cl,CO_3)_3 \cdot H_2O$) ein Mischkristall der Cancrinit-Gruppe in Frage.

Neben den Mineralphasen in den Ausgangsmaterialien wurde ein besonderes Augenmerk auf die Bohrprobe aus der Bohrkampagne 2000 im Bausabschnittes BA1 der Monodeponie Waldering gesetzt. In den Bohrproben aus verschiedenen Tiefen sind die Salzphasen besonders zahlreich und mannigfaltig ausgebildet. Die einzelnen Salzphasen waren sehr gut auskristallisiert und eigneten sich neben Licht- und Rasterelektronenmikroskopie und Infrarotspektroskopie daher auch für die Röntgenpulverdiffraktometrie. Deshalb konnten hier die verschiedenen Phasen detaillierter untersucht werden. Die einzelnen Salzphasen wurden anhand ihrer Farben (weiß, blau, türkis, beige) makroskopisch unterschieden.

Weisse Salzphasen

Die Aufnahmen mit Licht- und Rasterelektronenmikroskopie finden sich im mineralogischen Anhang unter Abb. C-1a bis C-4a. Die Tabelle 52 zeigt einen Überblick über die chemische Zusammensetzung der weißen Salzphasen in den einzelnen Bohrproben, ermittelt mittels EDX-Detektion.

Tab. 52: Elementverteilung in den Mineralphasen aus den Bohrproben im Bauabschnitt 1 der Monodeponie Waldering, ermittelt mittels EDX-Analyse

Farbe	Bohrprobe	Bohrtiefe in m	Elemente	Beschreibung	
				<i>Lichtmikroskop</i>	<i>REM</i>
Weiß	BA 1-13	5,5	Ca, Cl, Al, O	mikrokristallin, matt	mikrokristallin
	BA 1-14	6,5	Ca, Al, Cl, O	mikrokristallin, matt	mikrokristallin, z.T. feine Nadeln
	BA 1-15	7	Ca, Cl, O, S, Al	einzelne Kristalle, durchscheinend	nadelig, z.T. verkrustet
	BA 1-17	8,5	Ca, Cl, Al, O	z.T. gel-, glasartig	Blättchen

Im Allgemeinen besteht die chemische Zusammensetzung überwiegend aus den Elementen Ca, Cl, Al und O. Dieser Bestand widerspiegelt die Strukturformel von Hydrocalumit: $Ca_2Al(OH)_6[Cl_{1-x}(OH)_x] \cdot 3H_2O$. Neben Hydrocalumit kommt aber auch Friedel'sches Salz ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) in Frage (Bothe et al., 2004). Für die Bohrprobe BA 1-15 aus dem Salzhorizont konnten zudem Gipsnadeln ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) festgestellt werden. Die fein tafelige Ausbildung der Hydrocalumitkristalle in der Bohrprobe BA 1-17 zeigt besonders gut die Abb. C-4b im mineralogischen Anhang. Die Tabelle 53 zeigt einen Überblick über die

mineralogische Phasenzusammensetzung dieser weißen Salzphasen in verschiedenen Bohrproben, die mittels Pulverdiffraktometrie ausgewertet wurden. Es bestätigt sich, dass die weißen Salzphasen aus den vier Bohrproben aus unterschiedlicher Tiefe sich hauptsächlich aus Hydrocalumit zusammensetzten. Es wurden auch größere Anteile an Sodalith ($\text{Na}_8[\text{Cl}_2(\text{AlSiO}_4)_6]$) detektiert. In geringen Anteilen wurden noch Gips, Halit und Sylvan festgestellt. Für die Probe BA 1-13 aus einer Tiefe von fünfeinhalb Metern wurde auch ein Calcitpeak ausgewertet. Es fällt auf, dass die beiden weißen Mineralphasen aus den Bohrproben BA 1-17 und 1-14 schlechter auskristallisiert sind als die in BA 1-13 und BA 1-15, was sich in breiten Peaks äußert. Zudem weisen sie einen deutlichen Glasbuckel im Bereich zwischen $15 - 20^\circ \text{ 2}\theta$ auf.

Tab. 53: Relative Anteile von Mineralphasen in den weißen Salzphasen aus den Bohrproben im Bauabschnitt 1 der Monodeponie Waldering

Mineralphasen aus	1-13	1-14	1-15	1-17
Bohrtiefe in m	5,5	6,5	7	8,5
Farbe	weiß			
Calcit	++	-	-	-
Gips	+	+	+	+
Halit	++	+	+	+
Sylvan	+	+	+	+
Hydrocalumit	++++	++++	++++	++++
Sodalith	+	+++	++	+++

Die Abb. 171 zeigt eine typische Bandenverteilung im mittleren Infrarotbereich für die weiße Salzphase aus der Bohrprobe BA 1-13. Deutlich zu unterscheiden sind Banden für die OH-Gruppe (3640 cm^{-1}), Kristallwasser (3840 und 1620 cm^{-1}) und Sulfatbande (1108 cm^{-1}) und Chloridbande (bei 532 cm^{-1}).

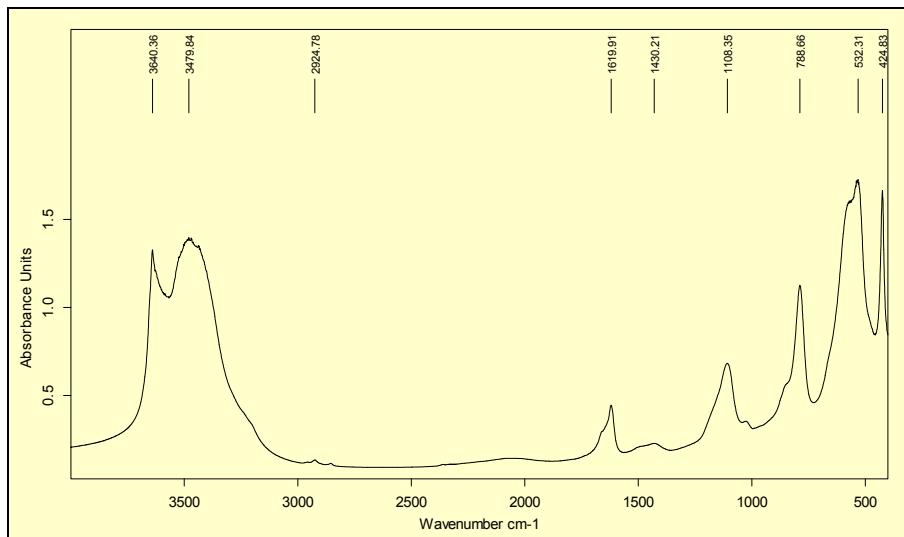


Abb. 171: Bandenverteilung im mittleren Infrarotbereich für die weiße Salzphase aus der Bohrprobe BA 1-13

Die weißen Salzphasen aus den Bohrproben BA 1-14, 1-15 und 1-17 weisen dasselbe Spektrum auf, jedoch variieren die Bandenhöhen. Für BA 1-14 und BA 1-15 ist kaum eine Karbonatbande identifizierbar. Auch die Sulfatbande ist mit Ausnahme von BA 1-13 nicht sehr stark ausgeprägt.

Beige Salzphase

Die beige Salzphase aus BA 1-13 zeigt in der REM-Aufnahme nadelige Kristalle (Abb. C-5a, mineralogischer Anhang). Die EDX-Analyse hat ergeben, dass die Phase aus den Elementen Ca, Si, Cl, O, S, Na und K besteht. Mit Hilfe der Pulverdiffraktometrie wurde in erster Linie Ettringit bestimmt (Tab. 55). Zusätzlich wurden noch Halit, Sylvan und Quarz analysiert. In geringen Anteilen konnte noch Anhydrit und Calcit festgestellt werden. Das Infrarotspektrum der beigen Salzphase wurde eindeutig als Ettringit identifiziert (Abb. C-5b, mineralogischer Anhang). Es handelt sich um ein typisches Sulfatspektrum mit einer starken Bande bei 1107 cm^{-1} , einer mittleren Bande bei 600 cm^{-1} und einer schwachen Bande bei 988 cm^{-1} . Zusätzlich zeigen sich Banden für Kristallwasser (3430 und 1636 cm^{-1}), OH-Gruppen (3540 cm^{-1}). Die Bande bei 1420 cm^{-1} deutet auf einen CO_3 -Gehalt hin.

blaue und türkise Salzphasen

Die chemische Zusammensetzung der blauen und türkisen Mineralphasen in den Proben 1-13, 1-14, 1-15 und 1-17 stimmt großteils überein. Die Aufnahmen mit dem Lichtmikroskop (Abb. C-6a bis C-10a, mineralogischer Anhang) zeigen die intensiv leuchtenden Farben dieser Phasen. Mittels EDX-Detektor wurden folgende Elemente bestimmt (Tab. 54):

Tab. 54: Elementverteilung in den Mineralphasen aus den Bohrproben im Bauabschnitt 1 der Monodeponie Waldering, ermittelt mittels EDX-Analyse

Farbe	Bohrprobe	Bohrtiefe in m	Elemente	Beschreibung	
				Lichtmikroskop	REM
Blau	BA 1-13	5,5	Cl, Cu , Ca, O, K	Leuchtend blau, mikrokristallin	schalenartig
Türkis	BA 1-13	5,5	Cu , Cl, O, Ca, K	Keine Aufnahme	nadelig
Türkis	BA 1-15	7	Ca, Al, Cl, S, O, Cu	Leuchtend blau und türkis, nierig	Blättchen
Blau	BA 1-17	8,5	Al, Cl, Cu , O, Ca, K	Intensiv dunkelblau und hellblau, nierig	splittrig
Türkis	BA 1-17	8,5	Al, Cl, Na, Ca, O, K, Cu	Keine Aufnahme	stengelig

Es konnte jeweils eindeutig Cu nachgewiesen werden. In den Schlackeproben konnte jedoch mittels Röntgendiffraktometrie keine schwermetallhaltige Phase identifiziert werden. Die Auswertung der blauen und türkisen Salzphasen mit XRD hat sich zum Teil als sehr schwierig herausgestellt. Eindeutig identifiziert werden konnten Halit bzw. K-reicher Halit (Tab. 55). Bei der Probe 1-17 konnten in geringen Anteilen auch Hydrocalumit und Monosulfat festgestellt

werden. Für die türkise Mineralphase aus 1-17 konnten nur Halit, K-reicher Halit und Sylvin identifiziert werden. Die makroskopisch gelartigen Salzphasen hingegen sind schlecht auskristallisiert. Die Untersuchungen mittels Infrarotspektroskopie haben für die blauen Phasen ergeben, dass es sich um Salze mit Karbonatbanden handelt: eine starke Bande bei 1426 cm^{-1} und eine schwache bei 875 cm^{-1} . Zudem wurde viel Kristallwasser festgestellt bei $3502 - 3446\text{ cm}^{-1}$ und 1618 cm^{-1} und weiters eine Chloridbande bei 700 cm^{-1} .

Als mögliche Mineralphasen mit der oben genannten chemischen Zusammensetzung und der auffallenden Farbgebung kommt in Betracht: ein Vertreter der Cancrinit-Gruppe (z.B. Afghanit, $(\text{Na},\text{Ca},\text{K})_8(\text{Si},\text{Al})_{12}\text{O}_{24}(\text{SO}_4,\text{Cl},\text{CO}_3)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

Tab. 55: Relative Anteile von Mineralphasen in den farbigen Salzphasen aus den Bohrproben im Bauabschnitt 1 der Monodeponie Waldering

Mineralphasen aus	1-13	1-13	1-15	1-17	1-17	1-17
Bohrtiefe in m	5,5	5,5	7	8,5	8,5	8,5
Farbe	beige	blau	blau	blau	türkis	grün
Quarz	++	-	-	-	-	-
Calcit	+	+	+	+	+	+
Halit	++	-	+++	++	++	++
Halit, K-reich	-	+	+++	++	+++	-
Sylvin	++	-	-		++	++
Hydrocalumit	-	++	-	++		-
Monosulfat	-	+	-	+	++	-
Ettringit	++++	-	-	-	-	-
Cancrinit-Gruppe	-	++++	++++	++++	-	-
Kroehnkit	-	-	-	-	-	++++

Grüne Salzphasen

In der Bohrprobe 1-17 wurde eine grüne Mineralphase separiert. Mittels Röntgenpulverdiffraktometrie wurde neben Halit, Sylvin und Calcit zusätzlich ein Mineral namens Kroehnkit ($\text{Na}_2\text{Cu}(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) beschrieben. Mit Infrarotspektroskopie (Abb. C-11b, mineralogischer Anhang) konnten neben Kristallwasser, OH-Gruppe, und Sulfatbanden auch Karbonatbanden nachgewiesen werden.

6. DISKUSSION

Für die Diskussion aller Versuchsanordnungen müssen eine Reihe verschiedener Faktoren beachtet werden. Die Ergebnisse belegen insgesamt die große Bedeutung von Langzeitversuchen.

Die Chemie und Mineralogie der Ausgangsmaterialien – Schlacken und RGR – beeinflussen direkt die Feststoff- und Sickerwasserentwicklung. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Großteil der chemischen und mineralogischen Prozesse zum Teil erst nach einer Laufzeit von 12 Monaten zum Tragen kommt. Für die einzelnen Versuchsanordnungen wurden mit fortschreitender Versuchsdauer mehrere Trendwechsel in der Sickerwasserentwicklung für verschiedene Spezies (z.B. leichtlösliche Salze oder Schermetalle) beobachtet. Verschiedene Prozesse sind auf sich ändernde pH-Werte zurückzuführen (z.B. Anstieg der Ca- Konzentration mit abnehmenden pH-Werten).

Auch die Menge des Bewässerungsmediums steuert die Sickerwasserentwicklung. Ein wichtiger Faktor ist das Verhältnis von Gesamtflüssigkeitsmenge zu eingebauter Schlackemenge (Tab. 56). Dieses Verhältnis in L/kg wird auch als L/S-Verhältnis (Liquid/Solid) bezeichnet. Die Gesamtflüssigkeitsmenge setzt sich zusammen aus Wassergehalt in der Schlacke zu Versuchsbeginn und Bewässerungsmenge, die über den gesamten Versuchszeitraum kumuliert wird.

Tab. 56: L/S-Verhältnisse in L/kg Schlacke bei den unterschiedlichen Versuchsanordnungen, die weißen Zeilen stehen für Blindversuche, die grau hinterlegten Zeilen für Versuche mit Sperrschicht

Versuch	VA	Dauer	Schlackemenge (inkl. Wasser- gehalt)	Wassergehalt		Trocken- masse	Bewäs- serungs- menge	L/S- Verhältnis
		Wochen	kg	Gew.-%	kg	kg	L bzw. kg	L/kg
IBV0	VA-A	103	18,0	18,0	3,2	14,8	30,6	2,3
IBV3		103	16	18,0	2,9	13,1	30,9	2,6
ISFK0		103	13,8	18,0	2,5	11,3	30,6	2,9
ISFK3		103	15,5	18,0	2,8	12,7	30,9	2,7
BV1	VA-B	67	12,4	20,2	2,5	9,9	58,9	6,2
SFK3		64	17,5	20,2	3,5	14,0	52,9	4,0
RSFK2		62	17,9	20,2	3,6	14,3	48,6	3,7
RSFK3		62	13,4	20,2	2,7	10,7	49,6	4,9
RBV	VA-C	77	17,5	18,0	3,2	14,4	23,1	1,8
RSFK		77	16,5	18,0	3,0	13,5	23,1	1,9
EB1 [#]	FV-EB	102	35.200	15,1	5.315	29.885	13.500	0,6
EB2 [#]		102	37.300	15,1	5.632	31.668	13.500	0,6
EB3 [#]		102	46.500	15,1	7.022	39.479	16.800	0,6
EB4 [#]		102	40.500	15,1	6.116	34.385	16.800	0,7
RA1	LY-RA	103	14.200	16,5	2.343	11.857	1.440	0,3
RA2		103	14.200	16,5	2.343	11.857	1.440	0,3
WA1 [#]	WA-LY	103	8.800	10,1	889	7.911	4.092	0,6
WA2 [#]		103	8.800	10,1	889	7.911	4.092	0,6

[#]: die kumulierte Bewässerungsmenge bezieht sich auf die monatliche Niederschlagsmenge für diese Region

Bei den Eluatversuchen liegt das L/S-Verhältnis bei 10/1 (dies entspricht 10 L/kg Schlacke). Für die Säulenversuche wurden im Durchschnitt etwas geringere Werte errechnet: 10/2 (VA-B), 10/4 (VA-A) und 10/6 (VA-C). Die L/S-Verhältnisse liegen bei mehr als 1,8 L/kg Schlacke. Bei den Feldversuchen sind die Werte deutlich geringer. Für die Testfelder in Eberstetten hingegen liegt das L/S-Verhältnis durchschnittlich bei 10/16, für die Lysimeter Waldering bei 10/17 und für die Lysimetern Raindorf bei 10/33. Das entspricht einem Wert von weniger als 0,7 L/kg Schlacke.

Auch die Salzkonzentration des Bewässerungsmediums spielt eine wesentliche Rolle. Mit der frischen Schlacke wird ein Chloridgehalt von 0,2 bis 0,5 g/L (Eluatwert) eingetragen. Folgende Cl-Konzentrationen wurden den einzelnen Versuchsanordnungen über salzreiche Lösungen zugeführt: 0,7 g/L den Säulenversuchen über das Modellsickerwasser, 3,9 g/L dem Testfeld EB3 über das Deponiesickerwasser, 11,8 g/L dem Testfeld EB4 über das Konzentrat aus der Umkehrosmose sowie 20,2 g/L den Lysimetern in Raindorf über das Modellsickerwasser. Für die Versuchsreihen mit RGR-Schichten kann als annähernde Bezugsgröße der Eluatwert frischer RGR-Proben herangezogen werden: 8 g/L Cl.

Neben den oben genannten Faktoren beeinflussen Inhomogenitäten im Aufbau eines Deponiekörpers die Feststoff- und Sickerwasserentwicklung maßgebend. Besonders gut ist die Wirkung einer Inhomogenität für die Entwicklung des Wassergehalts sowie des Glühverlustes der Feststoffproben entlang des vertikalen Versuchsprofils zu sehen. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass für einen homogenen Aufbau (Blindversuch) die Verteilung sehr gleichmäßig ist bzw. die Wassergehalte vom Top zur Basis hin zunehmen. Die maximal erreichten Wassergehalte liegen bei ca. 21 Gew.-%. Der Einbau einer Sperrsicht (SFK) bewirkt einen deutlichen Wechsel des Wassergehalts in den Schichten. Es ist sehr auffällig, dass im Vergleich zu den Blindversuchen die Wassergehalte tendenziell höher sind. Durch eine Bewässerung mit salzreichen Lösungen, wie Modell-, Deponiesickerwasser oder Konzentrat aus der Umkehrosmose, oder durch Einbau von RGR-Schichten wird dieser Effekt noch verstärkt. Vor allem im Bereich der Sperrsicht wurden Werte bis max. 36 Gew.-% gemessen. Die hohen Feuchtigkeiten innerhalb der Sperrsicht weisen darauf hin, dass sich hier Stauwasser bilden kann und das Sickerwasser nur langsam nach unten sickert. Für den Bereich unterhalb der Sperrsicht hingegen wurde im Allgemeinen ein trockenes Milieu festgestellt.

Die Tabelle 57 zeigt eine Gegenüberstellung aller Versuche bezüglich ihres Aufbaus und ihrer Bewässerungsmodi. Im Folgenden werden die Versuche mit ähnlichen Laufzeiten miteinander verglichen.

Tab. 57: Verhältnis Bewässerungsmenge zu eingebauter Schlackemenge; weiße Felder stehen für Blindversuche, graue Felder stehen für Versuche mit Sperrsicht

Versuch	VA	Dauer	Schlackemenge (inkl. Wasser- gehalt)	Wassergehalt Ausgangsmaterialien		Schlacke Trocken- masse	Bewäs- serungs- menge	Sicker- wasser- austrag	Differenz (Bewässerung - Austrag)	Restbetrag (inkl. Wassergehalt im Ausgangsmaterial)	kumulativer Wasser- rückhalt*
		Wochen	kg	Gew.-%	kg	kg	L bzw. kg				L/kg
IBV0	VA-A	103	18,0	18,0	3,2	14,8	30,6	14,7	15,9	19,1	1,297
IBV1		18	15,5	18,0	2,8	12,7	5,4	2,4	3,0	5,8	0,456
IBV2		42	16,5	18,0	3,0	13,5	12,6	5,6	7,0	10,0	0,737
IBV3		103	16,0	18,0	2,9	13,1	30,9	14,0	16,9	19,8	1,508
ISFK0		103	13,8	18,0	2,5	11,3	30,6	15,5	15,1	17,6	1,554
ISFK1		18	14,5	18,0	2,6	11,9	5,4	2,1	3,3	5,9	0,497
ISFK2		42	15,6	18,0	2,8	12,8	12,6	6,1	6,5	9,3	0,728
ISFK3		103	15,5	18,0	2,8	12,7	30,9	13,4	17,5	20,3	1,596
BV1	VA-B	67	12,4	20,2	2,5	9,9	58,9	42,9	16,0	18,5	1,871
SFK3		64	17,5	20,2	3,5	14,0	52,9	37,8	15,1	18,6	1,335
RSFK2		62	17,9	20,2	3,6	14,3	48,6	35,9	12,7	16,3	1,143
RSFK3		62	13,4	20,2	2,7	10,7	49,6	34,8	14,8	17,5	1,638
RBV	VA-C	77	17,5	18,0	3,2	14,4	23,1	11,1	12,0	15,2	1,056
RSFK		77	16,5	18,0	3,0	13,5	23,1	10,9	12,2	15,2	1,121
EB1	FV- EB	102	35.200	15,1	5.315	29.885	13.500	1.342	12.158	17.473	0,585
EB2		102	37.300	15,1	5.632	31.668	13.500	1.785	11.715	17.347	0,548
EB3		102	46.500	15,1	7.022	39.479	16.800	1.778	15.022	22.044	0,558
EB4		102	40.500	15,1	6.116	34.385	16.800	2.300	14.500	20.616	0,600
RA1	LY- RA	103	14.200	16,5	2.343	11.857	1.440	408	1.032	3.375	0,285
RA2		103	14.200	16,5	2.343	11.857	1.440	318	1.122	3.465	0,292
WA1	WA- LY	103	8.800	10,1	889	7.911	4.092	2.251	1.841	2.730	0,345
WA2		103	8.800	10,1	889	7.911	4.092	2.099	1.993	2.882	0,364

* kumulativer Wasserrückhalt = (Restbetrag / Bewässerungsmenge); die verdunsteten Wassermenge wurde dabei berücksichtigt

Es zeigt sich, dass im Allgemeinen das berechnete Wasserrückhaltevermögen (Anteil aus Rückhalt und Verdunstung) in Liter pro kg Schlacke für die Versuchsreihen mit Sperrsicht größer ist. Dies gilt insbesondere für die Säulenversuche der Versuchsanordnungen A und C sowie für die Großlysimeter Raindorf und Waldering. Weiters unterstreichen die Zeitversuche der VA-A, dass sich mit zunehmender Laufzeit die Wirksamkeit einer Sperrsicht innerhalb eines Versuchsprofils steigt. Anhand der Testfelder in Eberstetten wird deutlich, dass durch Erhöhung der zugegebenen Salzgehalte über das Bewässerungsmedium das Wasserrückhaltevermögen nochmals verstärkt wird.

Die Säulen der Versuchsanordnung B stellen eine Ausnahme dar. Für den Blindversuch und den Versuch mit Sperr und RGR (RSFK3) liegen im Vergleich erhöhte Werte des Wasserrückhalts vor: hier sind vglw. geringe Schlackemenge verwendet worden, so dass der Beitrag der Verdunstung stärker zum Tragen kommt.

Die komplexe Beziehung zwischen Bewässerungsrate und Bewässerungsmenge und die Wirkung der Sperrsicht auf das Wasserrückhaltevermögen wird besonders eindrucksvoll anhand der Modellversuche mit Kunststoffkugeln deutlich. Für den Blindversuch mit homogenem Aufbau blieben die Austragsmengen je Zyklus konstant. Die Durchlaufzeit hat sich mit zunehmender Versuchszeit kaum verändert. Im Vergleich dazu waren die Austragsmengen an Sickerwasser für die Säule mit Sperrsicht niedriger. Bei kleinen Bewässerungsmengen nahmen die Austragsmengen mit der Laufzeit – trotz des relativ großen Schwankungsbereichs - deutlich ab. Das bedeutet, dass durch die Applikation kleiner Wassermengen die Wirkung der Sperrsicht verstärkt wird.

Ein Durchlässigkeitsunterschied infolge Korngrößenwechsel verlängert die Verweilzeit des Sickerwassers innerhalb des Versuchskörpers. Hierdurch können die Lösungen innerhalb der Säule länger wechselwirken. Durch das Aufstauen des Sickerwassers im Bereich der Sperrsicht können die leichtlöslichen Salze aufkonzentriert werden. Die für die verschiedenen Versuchsanordnungen beobachteten erhöhten Salzkonzentrationen im Feststoff im Bereich der Sperrsicht weisen darauf hin, dass eine Aufkonzentration zusammen mit dem Wechsel des Wassergehalts in den Schichten letztlich zu einer Ausfällung von Salzen aus der Porenlösung führt.

Ein wichtiges Fazit der Modellversuche ist, dass vor allem die Salzakkumulationen entlang des vertikalen Versuchsprofils sehr viel Wasser speichern können. Für die Versuche mit Sperrsicht führen die vermehrten Salzanlagerungen im Bereich der Sperr somit zu einer Vergrößerung des Wasserrückhaltevermögens. Zudem hat sich herausgestellt, dass deutlich mehr Wasser gespeichert werden kann, wenn eine Bewässerungsmenge nicht einmalig appliziert wird, sondern auf mehrere Raten aufgeteilt wird.

Die Untersuchungen zeigen weiter, dass die oben genannten Faktoren neben der Feststoffentwicklung auch direkt die Entwicklung des Sickerwassers beeinflussen. Im Allgemeinen werden für Deponien nur wenige bestimmte Parameter kontinuierlich erfasst. Auf

der Monodeponie Waldering sowie der Deponie in Eberstetten zum Beispiel werden Proben vierteljährlich gezogen. Für Deponien liegen nur wenige Untersuchungen vor, die die zeitliche Entwicklung der Sickerwasserqualität aufzeichnen. Um die Sickerwasserqualität und die zeitliche Entwicklung des Deponiesickerwassers abschätzen zu können, werden in vielen Arbeiten die Ergebnisse aus Laborversuchen („Batch-Versuche“) oder Lysimeterversuchen herangezogen (Hjelmar, 1990; van der Sloot, 1996; Kosson et al., 1996; Förstner & Hirschmann, 1997). Verschiedene Abschätzungen basieren auf hydrogeochemischen Modellierungen (Dijkstra et al., 2003 & 2006; Meima & Comans, 1997).

Eine klassische Vorgehensweise, um die einzelnen Versuche bezüglich ihres Auslaugverhaltens untereinander vergleichbar zu machen, stellt die Frachtenberechnung dar. Ziel der Frachtenberechnung ist es, für einen bestimmten Versuchszeitraum den prozentualen Austrag an leichtlöslichen Spezies und Schwermetallen zu berechnen. Als Grundlage dienen neben den Konzentrationen im austretenden Sickerwasser auch die sich mit der Zeit verändernden Feststoffgehalte. Verschiedene Studien haben gezeigt, dass mit dem ersten austretenden Sickerwasser hohe Konzentrationen an Salzen (Cl, SO₄, Na, K, Ca) zu erwarten sind (Hjelmar, 1990; Mesters, 1993; Förstner & Hirschmann, 1997; Abbas et al., 2003). Diese Entwicklung wird auch als „wash-off“-Effekt bezeichnet. Gleichzeitig führt die Auswaschung von Alkali- und Erdalkalihydroxiden (u.a. Ca) zu hohen pH-Werte im Sickerwasser. Für Deponien wird für diesen Vorgang ein Zeitraum über einige Jahrzehnte anberaumt. Innerhalb dieser Phase ist mit einer weitgehenden Abreicherung der Cl- und SO₄-Anteile zu rechnen. In der Tabelle 58 sind für alle Versuchsanordnungen die Anfangs- und Endgehalte für den Parameter Chlorid in g/kg Schlacke sowie der prozentuale Austrag über die Versuchsdauer zusammengestellt. Wie in den Abbildungen C-1 bis C-8 (Säulenversuche) und Abbildungen D-1 bis D-8 (Feldversuche) im graphischen Anhang deutlich zu sehen ist, liegt für verschiedene Parameter der Versuchsanordnungen eine starke Auswaschung vor. Die Untersuchungen zeigen, dass unter bestimmten Umständen auch eine Anreicherung erfolgen kann.

Tab. 58: Chloridgehalte in g/kg Schlacke bei den unterschiedlichen Versuchsanordnungen zu Versuchsbeginn und Versuchsende, sowie der Austrag an Cl in mg/kg und %, die weißen Zeilen stehen für Blindversuche, die grau hinterlegten Zeilen für Versuche mit Sperrsicht

Spezies	Versuch	VA	Sperre	Top	Dauer	Beginn	Ende	Austrag	Austrag	
					Wochen	g/kg	g/kg	g/kg	%	
IBV0		VA-A		-	103	10,17	6,78	-3,39	-33,20	
IBV3				-	103	10,15	6,95	-3,20	-31,60	
ISFK0			SFK	-	103	10,00	5,80	-4,20	-42,20	
ISFK3			SFK	-	103	10,01	6,63	-3,38	-34,00	
BV1		VA-B		-	67	5,23	5,79	+0,65	+9,63	
SFK3			SFK		64	5,62	5,90	+0,28	+5,06	
RSFK2			SFK	RGR	62	11,40	9,43	-1,97	-17,30	
RSFK3			SFK	RGR	62	13,39	12,60	-0,79	-5,89	
RBV		VA-C		-	76	10,17	7,09	-3,09	-30,10	
RSFK			SFK/RGR	-	76	13,03	7,03	-6,00	-45,90	
EB1		FV-EB		-	102	9,39	9,21	-0,18	-1,89	
EB2			SFK	-	102	9,24	8,98	-0,26	-2,85	
EB3			SFK	-	102	9,24	9,11	-0,14	-1,50	
EB4			SFK	-	102	9,24	9,55	+0,31	+3,70	
RA1		LY-RA		-	103	9,77	10,43	-0,66	+6,78	
RA2			SFK	-	103	9,56	10,23	+0,67	+7,07	
WA1	CI	WA-LY		-	RGR	103	18,19	14,99	-3,20	-17,58
WA2			SFK	RGR	103	18,24	13,93	-4,3	-23,64	

Die Frachtenberechnung zeigt entsprechend den Prognosen, dass für die Referenzversuche, die mit Leitungswasser bewässert wurden (IBV0 und ISFK0) oder rein dem natürlichen Niederschlag ausgesetzt waren (Testfelder Eberstetten: EB1 und EB2), eine verstärkte Auswaschung erfolgt. Hier dominiert generell eine prozentuale Abreicherung für alle Parameter, d.h. sowohl für leichtlösliche Salze als auch für die Schwermetalle. Für die Säulenversuche wurden mit bis zu 42% deutlich mehr an Cl ausgetragen als für die Testfelder (max. 3 %). Dieser deutliche Unterschied kann damit erklärt werden, dass für die Säulenversuche das Verhältnis Bewässerungsmenge zu eingebauter Schlackemenge deutlich größer ist im Vergleich zu den Testfeldern. Demnach ist bei einem L/S - Verhältnis größer 1 die Auswaschungsrate deutlich höher. Ein L/S - Verhältnis kleiner 1 bewirkt, dass im gleichen Zeitabschnitt die leichtlöslichen Spezies deutlich stärker zurückgehalten werden. Das bedeutet, dass hierdurch die Zeit, die für das Auswaschen benötigt wird um ein mehrfaches verlängert wird. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass eine Sperre unter Umständen die Wirkung des Austrags leicht löslicher Spezies verstärken kann. Den Frachtenberechnungen zu Folge ist der prozentuale Austrag für verschiedene Spezies bei den Versuchsanordnungen mit Sperre höher. Beim Säulenversuche mit Sperre wurde prozentual mehr an Cl, Na und Cu ausgetragen. Für das Testfeld Eberstetten mit Sperre trifft dies auf sämtliche Parameter zu. Die Parameter Ca (Tab. C-12 tabellarischen Anhang) und SO4 werden generell nur wenig mobilisiert.

Trotz Zufuhr zusätzlicher Salze durch die Bewässerung mit Modellsickerwasser (Säulenversuche der VA-A) bzw. mit Deponiesickerwasser (Testfeld EB3), überwiegt für den

Parameter Cl eine Auswaschung. Für die Säulen (IBV3, ISFK3, RBV) liegt der prozentuale Austrag im Bereich von 30% und für das Testfeld EB3 bei 1,5%.

Durch die Salzzugabe über das Bewässerungsmedium kommt es hingegen zu einer Anreicherung im Feststoff für Ca. Hier ist besonders für die Säulenversuche die Anreicherung deutlich ausgeprägter im Vergleich zu den Feldversuchen.

Im Falle von hochsalinaren Lösungen, wie Umkehrosmosekonzentrat, setzt der generelle wash-off leichtlöslicher Spezies gar nicht ein, sondern es erfolgt sogar eine Umkehrung der Trends. Ab einer Salzzugabe von 11,8 g/L mit diesem Bewässerungsmedium und einem L/S-Verhältnis < 1 wurde eine Anreicherung der sehr mobilen Spezies Cl beobachtet. Das Testfeld EB4 verzeichnet eine prozentuale Anreicherung von 3,4%. Für die Großlysimeter Raindorf (Modellsickerwasser) wurde für Cl sogar eine prozentuale Anreicherung bis zu 7% festgestellt. Diese Entwicklung wurde auch für Na beobachtet (Abb. C-4, graphischer Anhang).

Die Zugabe von RGR als Deckschicht bzw. als Sperrsicht führt hingegen zu vglw. hohen Cl-Austrägen mit dem Sickerwasser (max. 46 %). Es macht offensichtlich einen merklichen Unterschied, ob leichtlösliche Spezies in Form von salzreichen Lösungen zugeführt werden oder in Form von RGR als Feststoff. Bei den Lysimetern Waldering wird trotz kleinem Verhältnis zwischen Bewässerungsmenge und eingebauter Schlackemenge der Parameter Cl stark ausgewaschen (bis zu 24 %). Es hat sich deutlich gezeigt, dass die Wirkung der RGR dominiert und die Auswaschung leichtlöslicher Salze verstärkt. Die Zugabe von RGR bewirkt jedoch nur geringfügig höhere Ca- und SO₄-Anteile im Sickerwasser. Auch hier wird für das Lysimeter mit Sperre prozentual mehr an Cl, Na und Ca ausgetragen.

Für die Säulenversuche der VA-B wurde festgestellt, dass vor allem sehr hohe Bewässerungsmengen den so genannten „wash-off“ leichtlöslicher Spezies verstärken können. Hier wurden für die ersten Versuchswochen z.T. Cl-Austräge bis 80% verzeichnet. Da ein analytischer Fehler nicht ausgeschlossen werden konnte, wurden für die Frachtenberechnung erst die Werte nach der dritten Versuchwoche herangezogen. Das hat dazu geführt, dass für den Blindversuchs (BV1) und den Versuch mit Sperre (SFK3), beide wurden nach etwa 50 Versuchstagen mit Modellsickerwasser bewässert, trotz der großen Bewässerungsmengen zu Beginn der Versuche eine Anreicherung an leichtlöslicher Spezies (v.a. Cl) stattgefunden hat. Für die Säulen mit RGR als Deckschicht hingegen wurde dennoch eine Auswaschung beobachtet. Für den Säulenversuch mit RGR und mit Leitungswasser (RSFK2) ist die Entwicklung zudem deutlicher als für den mit RGR und mit Modellsickerwasser (RSFK3).

Für die Schwermetalle wird davon ausgegangen, dass infolge der hohen Pufferkapazität (v.a. Karbonatpuffer) von MV-Schlacke eine Mobilisation erst nach einer Zeitdauer von mehreren Jahrhunderten bis Jahrtausenden stattfindet (Förstner & Hirschmann, 1997; Lahl, 1994). Die vorliegende Untersuchung hat ergeben, dass von den untersuchten Parametern die Faktoren Cu und Mo vglw. mobil sind (Tab. C-13 und C-14, tabellarischen Anhang). Die Beträge für die

Schwermetalle Pb und Zn sind vernachlässigbar gering. Für diese beiden Elemente wurde eine geringfügige Anreicherung für die Säulenversuche IBV3 und ISFK3 sowie RBV und RSFK, die Testfelder EB3 und EB4 sowie für die Großlysimeter Raindorf festgestellt.

Die bisherigen Ergebnisse haben gezeigt, dass das L/S-Verhältnis unterschiedliche Entwicklungen im Feststoff und im Sickerwasser bewirkt. Bei einem Verhältnis > 1 dominiert Auswaschung und für ein Verhältnis < 1 z.T. Anreicherung der Parameter Na und Cl.

Verschiedene Autoren haben das L/S-Verhältnis verwendet, um die verschiedenen Größenanordnungen der Versuche vergleichen zu können. Dabei werden jedoch die Konzentrationen der gelösten Sickerwasserkomponenten (Stoffaustrag in mg/kg Schlacke) in Abhängigkeit von der Sickerwassermenge als Funktion des L/S -Verhältnisses beschrieben (Chandler et al., 1997). Im Gegensatz zur Frachtenberechnung, wo die Feststoffgehalte je Probe in die Berechnungen einfließen, wird für diese Darstellungsweise eine Korrektur bzgl. der Salzzugabe über salzreiche Lösungen nicht vorgenommen. Mit dieser Methode soll ein direkter Vergleich von Ergebnissen aus den Labor- und Feldversuchen und eine Extrapolation der Ergebnisse auf einen Deponiemaßstab möglich gemacht werden (Hjelmar, 1990). Nach Chandler et al. (1997) kann die Freisetzung von Spezies vier verschiedenen Typen zugeordnet werden (Tab. 59).

Tab. 59: Verlauf der Kurven für kumulierte Freisetzung der Spezies versus L/S-Verhältnis (nach Chandler et al., 1997)

Typ I	betrifft v.a. Alkalimetalle und Halogenide; ist charakterisiert durch <u>rasche Freisetzung</u> der verfügbaren Konzentration bis zu einem L/S Verhältnis von 1 bis 2. Die Steigung der Kurve ist dabei ≥ 1 (für L/S<1), ab L/S > 1 ist die Steigung annähernd 0, was vollständige Auswaschung bedeutet
Typ II	betrifft u.a. Pb und Zn; die Freisetzung wird von der Löslichkeit der Spezies in der wässrigen Phase gesteuert, dabei ist meist eine starke pH-Abhängigkeit gegeben; es liegt ein linearer Kurvenverlauf vor
Typ III	betrifft u.a. SO ₄ ; die Spezies werden innerhalb der Matrix von einer weiteren Spezies (z.B. Ba) zurückgehalten. Die Freisetzung erfolgt zeitlich verzögert, erst nach Auswaschung an der zweiten Spezies. Zu Versuchsbeginn ist die Steigung der Freisetzung versus L/S-Verhältnis klein, aber mit zunehmender Reaktionszeit nimmt die Steigung exponentiell an
Typ IV	betrifft u.a. Cu in Gegenwart organischer Säuren; zu Beginn eine verstärkte Freisetzung als Folge der erhöhten Löslichkeit in Gegenwart von Komplexbildnern. Zu Versuchsbeginn ist die Steigung der Kurve annähernd linear (> 1), langfristig gesehen flacht die Kurve deutlich ab; im Gegensatz zu Typ 1 tritt eine Auswaschung der Spezies nicht ein

Der Verlauf der Parameter Cl und Na entspricht in etwa dem Typ I (Abb. 172 und 173). Die Säulenversuche der VA-A, die mit Leitungswasser bewässert wurden, entsprechen diesem Trend. Es ist sehr auffällig, dass der Versuche mit Sperre (ISFK0) im Gegensatz zum Blindversuch (IBV0) den Bereich mit einer Steigung annähernd 0 noch nicht erreicht hat.

Innerhalb des beobachteten Versuchszeitraums wurden für ISFK0 insgesamt mehr an Cl und Na ausgetragen als für IBV0. Vom gesamten verfügbaren Gehalt an Cl im Feststoff (max. 8.100 mg/kg) wurden ab einem L/S-Verhältnis 0,2 bis 0,4 aus der Säule mit Sperre etwa die Hälfte (Cl: 4.200 mg/kg) und vom gesamten verfügbaren Gehalt an Na im Feststoff (max. 12.600 mg/kg) etwa ein Drittel (Na: 3.900 mg/kg) ausgetragen.

Eine Bewässerung mit Modelsickerwasser für die Säulenversuche der VA-A hat dazu geführt, dass für die Blindversuche etwa ab einem L/S-Verhältnis von 0,15 und für die Versuche mit Sperre ab einem L/S-Verhältnis von 0,4 insgesamt mehr an leichtlöslicher Spezies ausgetragen wurden: für den Versuch ISFK3 4.900 mg/kg Cl und 6.400 mg/kg Na. Für das Testfeld Eberstetten EB1, das ausschließlich dem Niederschlag ausgesetzt war, wurde insgesamt am wenigsten an leichtlöslicher Spezies ausgewaschen. Durch die Vergrößerung der Schlackemenge hat sich hier die Auswaschung um einen Faktor 25 verlangsamt. Die Bewässerung mit Konzentrat aus der Umkehrosmose für das Testfeld EB4 mit Sperre hat geringfügig höhere kumulierte Cl-Gehalte zur Folge. Für die Lysimeter in Raindorf zeigt sich kaum ein Unterschied im Kurvenverlauf. Hier ist jedoch auffällig, dass bei einer anfänglich sehr hohen Bewässerungsmenge bis 150 Tagen nahezu ein Drittel an Cl und Na ausgetragen wurde. Sehr charakteristisch verhalten sich auch die Versuche der Versuchsanordnungen mit Schlacke B, die mit vglw. hohen Wassermengen bewässert wurden. Es ist sehr bemerkenswert, dass mit RGR Zugabe zwischen den Lysimetern Waldering und den Säulenversuchen der VA-B kein nennenswerter Unterschied besteht. Auch die Säulenversuche der VA-A fügen sich sehr gut diesem Trend. Für die Säulenversuche der VA-B belegt insbesondere die Versuchssäule mit RGR und Modellsickerwasser (RSFK3) das verstärkt Auslaugverhalten. Hier wurde bei einem L/S-Verhältnis von 4 etwa das größte Potential für Cl-Auswaschung (8.000 mg/kg Cl) innerhalb einer Versuchsdauer von 62 Wochen erreicht. Auch für die Säule mit Sperre und RGR (RSFK) der VA-C ist der Kurvenverlauf ebenfalls vergleichbar. Hier wird bestätigt, dass der Einbau einer RGR-Schicht das Auslaugverhalten zusätzlich verstärkt.

Die SO₄-Entwicklungen (Abb. 174) der einzelnen Versuchsanordnungen mit unterschiedlichem Größenmaßstab sind tendenziell gut untereinander vergleichbar. Eine Trendentwicklung ähnlich Typ III gemäß der Klassifizierung nach Chandler et al. (1997) kann nicht bestätigt werden. Vielmehr zeigt sich, dass mit zunehmendem L/S-Verhältnis eine kontinuierliche Freisetzung an SO₄ gemäß dem Typ II stattfindet. Somit kann anhand von Säulenversuchen in etwa der Trend für Feldversuche oder für Deponien prognostiziert werden. Für eine Bewässerung mit Leitungswasser der VA-A wurde bis zu einem L/S-Verhältnis von 2 etwa 2% der gesamte verfügbare Menge (24.900 mg/kg) ausgetragen. Somit muss unter der Annahme, dass der Austrag langfristig in dieser Größenordnung liegt, ein Zeitraum von 100 Jahren bis zur vollständigen Auswaschung anberaumt werden. Für den Blindversuch war der Anteil geringer im Vergleich zur Säule mit Sperre (ISFK0). Eine

Bewässerung mit Modellsickerwasser (ISFK3: max. 1000 mg/kg) würde den Zeitraum etwa um die Hälfte verkürzen. Die Säulenversuche der VA-B verhalten sich ähnlich der Säulenversuche der VA-A, somit zeigt sich keine Wirkung der Zusammensetzung der Schlacke auf die Tendentwicklung. Lediglich die höhere SO₄-Konzentration im Ausgangsmaterial (Schlacke B) verstärkt die Auswaschung. Durch den Einbau der RGR-Schichten sind die SO₄-Mengen zusätzlich höher (max. 3.500 mg/kg). Auch die Lysimeter Waldering entsprechen diesem Trend. Bei den Lysimetern Raindorf ist die Entwicklung zwischen Blindversuch und Lysimeter mit Sperre bereits zu Versuchsbeginn sehr unterschiedlich. Eine verhältnismäßig starke Auswaschung an SO₄ in Raindorf trat vor allem in der Anfangsphase auf. Demnach wird durch hohe Bewässerungsmengen die Auslaugung deutlich verstärkt. Die Reduzierung der Wassermenge zeigt sich unmittelbar in der Änderung der Steigung der Kurve. Der kumulierte Austrag ist für das Lysimeter mit Sperre deutlich höher (max. 400 mg/kg). Die Tendentwicklung ist erstaunlicherweise vergleichbar mit den RGR-Versuchen. Der Blindversuch liegt hingegen im Bereich von Testfeld EB1 ohne Sperre (max. 50 mg/kg). Für das Testfeld EB4 mit Sperre und UO ist die Entwicklung vergleichbar mit den Säulenversuchen der VA-A.

In Bezug auf den Parameter Ca macht sich die Wirkung der Zusammensetzung der Schlacke am deutlichsten bei den Säulenversuchen bemerkbar. Für die Säulenversuche der VA-A ohne Sperre trifft der Trend III zu (Abb.175). Zuerst wurde ein verzögerter Austrag beobachtet mit lediglich 0,0002 % des verfügbaren Ca (140.000 mg/kg), der dann von einem raschen Anstieg abgelöst wird. Bei einem L/S-Verhältnis von 2 liegt der Austrag bereits bei 0,05% des verfügbaren Ca. Für den Versuch mit Sperre (ISFK0), der mit Leitungswasser bewässert wurde, ist die Auswaschung am stärksten verzögert. Die Bewässerung mit Modellsickerwasser führt insgesamt zu einem höheren Austrag von Ca (max. 90 mg/kg), insbesondere für den Blindversuch (IBV3). Für die MSW-Säulen würde es, unter der Voraussetzung dass sich der Kurvenverlauf nicht ändert, etwa 3000 Jahre benötigen bis der gesamte Ca-Gehalt ausgewaschen wird.

Für die Säulenversuche der VA-B wurde eine gealterte und vglw. salzarme Schlacke verwendet. Bei einem L/S-Verhältnis von 0,06 startet die Entwicklung bereits bei 0,2 % des verfügbaren Ca. Im Versuchsverlauf nimmt der Betrag nur mehr geringfügig zu.

Vor allem die Versuchsanordnungen mit RGR-Schichten, auch Versuch mit Sperre der VA-C (RSFK) stellen ein stark Ca-dominierendes System dar. Für die Säulenversuche der VA-B zeigt sich, dass die Bewässerung mit Modellsickerwasser bzw. der Einbau von RGR-Schichten den Austrag verstärken.

Bezogen auf die Feldversuche wurde die beste Übereinstimmung der Tendentwicklung zwischen den Säulenversuchen der VA-B und den Großlysimetern in Waldering (WA1 und WA2) festgestellt. Im Allgemeinen zeigt sich für die Feldversuche deutlich, dass mit Sperre

stets mehr Ca ausgetragen wird. Für die Lysimeter Raindorf wird ab einem L/S-Verhältnis von etwa 0,1 ein stationärer Zustand mit 300 mg/kg erreicht.

Betreffend die Schwermetalle zeigt einzig der Parameter Mo (Abb. 176), dass es sich hier um eine vglw. mobile Spezies handelt, die sich gemäß dem Typ IV verhält. Bei alkalischen Bedingungen ($\text{pH} > 5$) liegt Mo als ein sehr mobile Oxy-Anion hauptsächlich als MoO_4^{2-} vor (Chandler et al., 1997). Der kumulierte Austrag an Mo liegt für die Säulenversuche der VA-A bei einem L/S-Verhältnis von 5 in etwa im Bereich von 3 mg/kg. Es fällt auf, dass sich bezogen auf den Parameter Mo der Einbau einer Sperre bzw. die Zugabe von Modellsickerwasser nicht auswirkt. Der Abbildung 176 ist zu entnehmen, dass bei einem L/S-Verhältnis von 1 in etwa 20 % verfügbaren Mo ausgewaschen wurde. Bei gleich bleibender Steigung wird nach etwas mehr als 10 Jahren Mo vollständig ausgewaschen sein. Die Säulenversuche der VA-A können als „worst case scenario“ herangezogen werden. Für die Säulenversuche der VA-B ist der Mo-Austrag etwas geringer. Auch bei Zugabe von RGR werden die Beträge nicht erhöht. Für die Feldversuche liegen die Verfügbarkeiten bei deutlich geringeren Beträgen. Für das Testfeld EB1 ohne Sperre, nur Zutritt von Niederschlag, ist der Austrag am geringsten. Die Salzzugabe in Form von Konzentrat aus der Umkehrosmose für das Testfeld EB4 führte insgesamt zu höheren Konzentrationen. Für die Testfelder in Eberstetten sowie für die Lysimeter Waldering wurde kaum noch Mo mobilisiert. Hier stellt sich ein stationäres Gleichgewicht bei einem kleineren Mo-Wert ein. Nur für die Lysimeter Raindorf ist die Tendenz weiterhin ansteigend. Für die Lysimeter Raindorf ist der Trend ähnlich wie bei VA-B.

Für den Parameter Cu (Abb. 177) kann entsprechend der Klassifizierung nach Chandler et al. (1997) ein Typ IV beschrieben werden. Eine langfristige Auswaschung von Cu tritt nicht ein. Die Säulenversuche der VA-A zeigen die Entwicklung mit den höchsten Cu-Konzentrationen an. Die Säulenversuche der VA-A können auch hier als „worst case scenario“ herangezogen werden. Hier wurden bei einem L/S-Verhältnis von 2 ca. 8 mg/kg des gesamten verfügbaren Cu-Gehalt (6.000 mg/kg) ausgetragen, das entspricht 0,2%. Für die MSW-Säulen würde es, unter der Voraussetzung dass sich der Kurvenverlauf nicht ändert, etwa 1500 Jahre benötigen bis der gesamte Cu-Gehalt ausgewaschen wird. Vergleichbar dem Parameter Mo fällt auf, dass sich bezogen auf den Parameter Cu der Einbau einer Sperre bzw. die Zugabe von Modellsickerwasser nicht auswirkt.

Für die Säulenversuche der VA-B ist der Cu-Austrag deutlich geringer (max. 0,5 mg/kg). RGR-Schichten haben keine Wirkung auf die Cu-Mobilisation. Für die Testfelder Eberstetten und die Lysimeter Waldering ist insgesamt am wenigsten Cu verfügbar, wobei für das Testfeld EB1 der Austrag am geringsten ist. Für die Lysimeter Raindorf wurde bei einer anfänglich sehr hohen Bewässerungsmenge bis 150 Tagen etwa die Hälfte an mobilisierbarem Cu ausgewaschen. In der Folgezeit stellt sich ein stationäres Gleichgewicht bei einem Cu-Gehalt von 0,2 mg/kg ein.

— Gesamter verfügbarer Gehalt im Feststoff (Mittelwert aus Schlacken A und B)

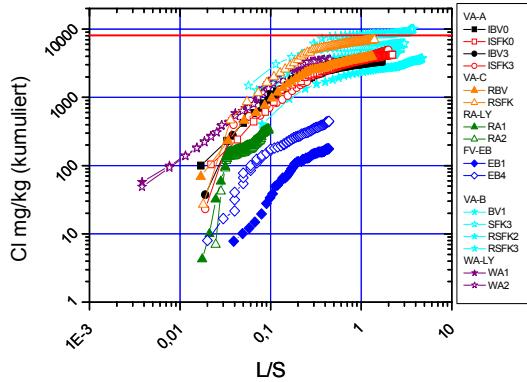


Abb.172: Cl-Konzentration in mg/kg (kumuliert) im Sickerwasser versus L/S-Verhältnis

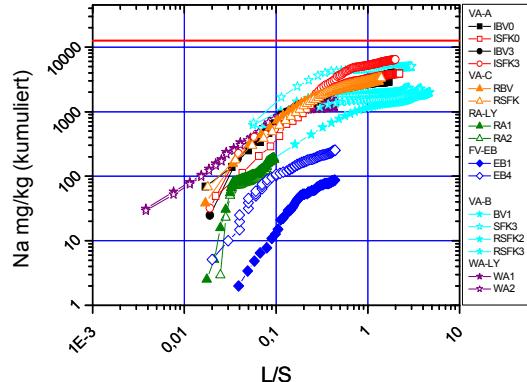


Abb.173: Na-Konzentration in mg/kg (kumuliert) im Sickerwasser versus L/S-Verhältnis

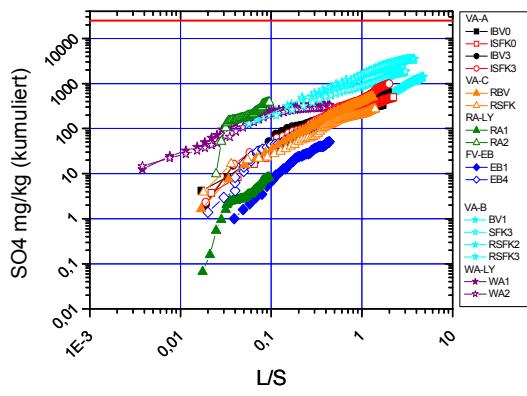


Abb.174: SO₄-Konzentration in mg/kg (kumuliert) im Sickerwasser versus L/S-Verhältnis

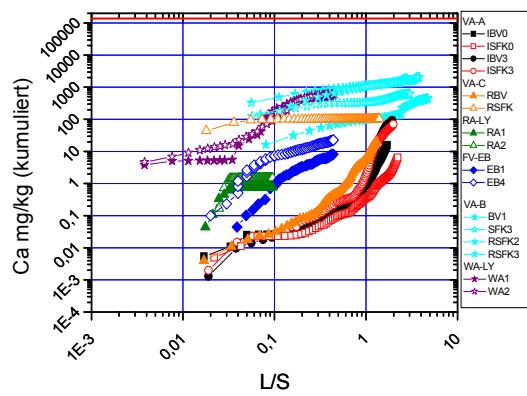


Abb.175: Ca-Konzentration in mg/kg (kumuliert) im Sickerwasser versus L/S-Verhältnis

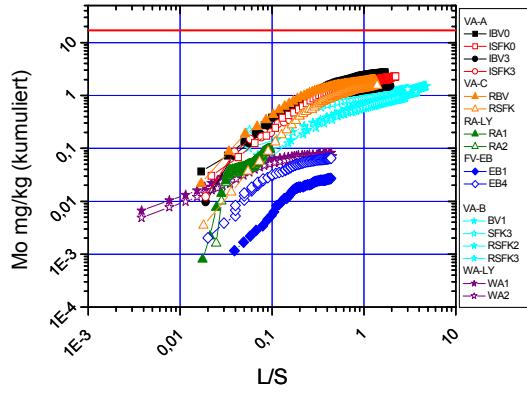


Abb.176: Mo-Konzentration in mg/kg (kumuliert) im Sickerwasser versus L/S-Verhältnis

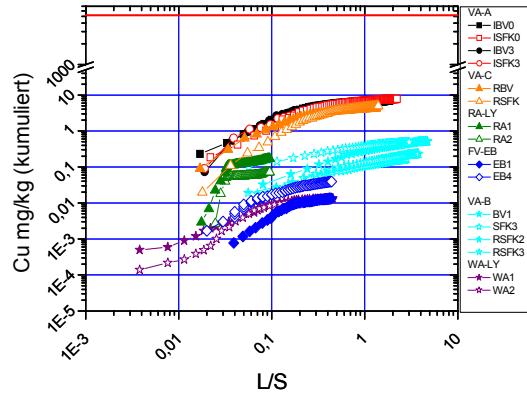
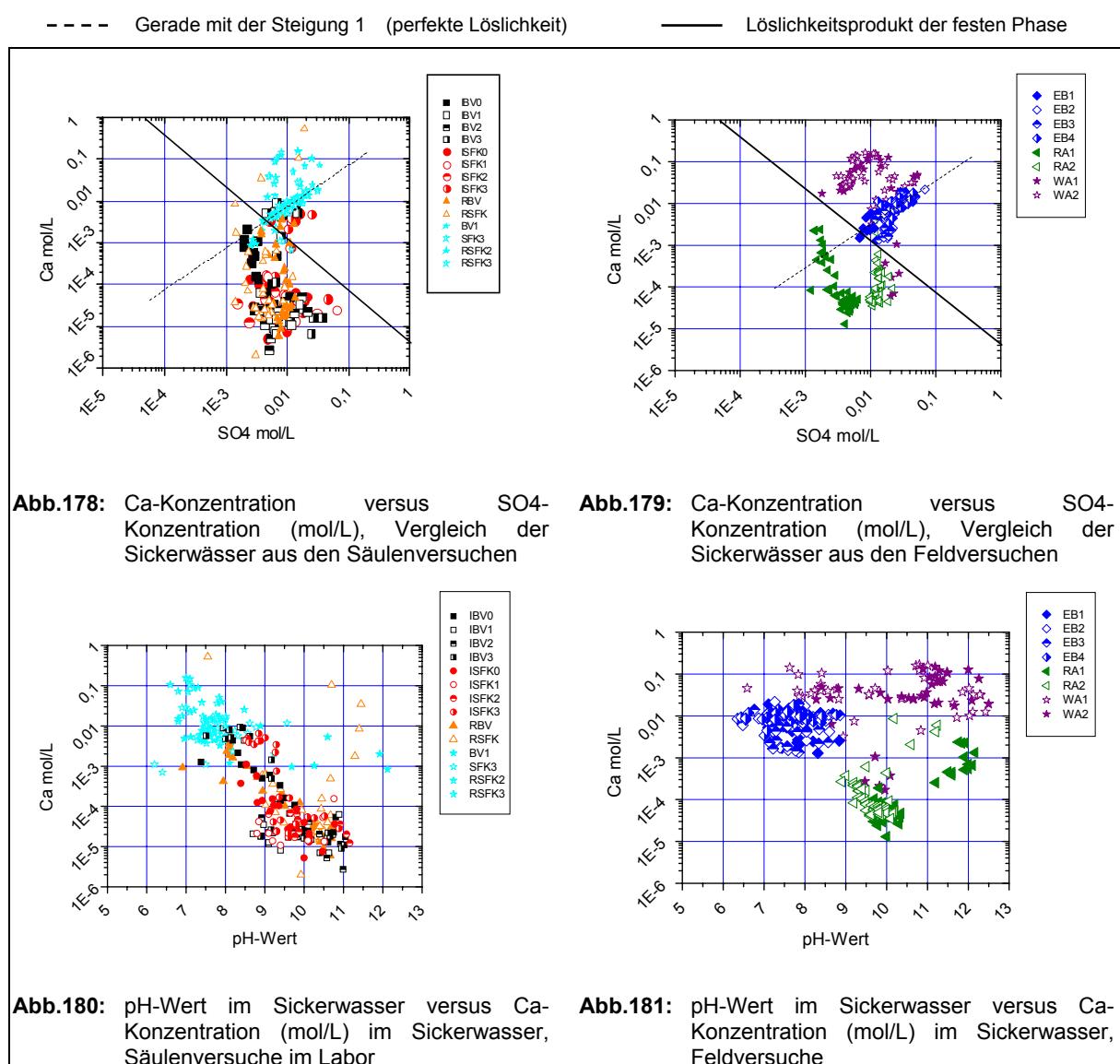


Abb.177: Cu-Konzentration in mg/kg (kumuliert) im Sickerwasser versus L/S-Verhältnis

Auffällig sind die unterschiedlichen Trends für Ca. Im Gegensatz zur Chandler et al. (1998), der einen linearen Trend gemäß Typ II vorgibt, zeigt dieser Parameter keine Abhängigkeit von der Löslichkeit. Für die Säulen- und Feldversuche wurden sowohl Trend Typ III und IV festgestellt. Die langfristige Freisetzung von verschiedener Spezies kann auch in Abhängigkeit vom pH-Wert bestimmt werden. Diese Methode wird vorrangig zur Beurteilung von Materialien bzgl. ihrer Verwertungs- und Ablagerungsbedingungen herangezogen (Meima & Comans,

1997; van der Sloot, 1996). Für die Parameter Ca- und SO₄ wird angenommen, dass für die Sickerwasserentwicklung keine Abhängigkeit vom pH-Wert, v.a. im Bereich zwischen pH-Werten 4-10, besteht (Chandler et al., 1997). Die verfügbaren Ca- und SO₄-Konzentrationen orientieren sich viel mehr an der Löslichkeitskurve von Gips. Gips ist ein leicht lösliches Mineral und es erlaubt hohe Konzentrationen an Ca sowie SO₄. Es besteht auch die Möglichkeit, dass Ettringit die Löslichkeit von Ca und SO₄ bei sehr alkalischen pH-Werten steuert. Der Zusammenhang zwischen Gipslöslichkeit und Ca- sowie SO₄-Konzentration kann man auch sehr gut vom Diagrammtyp Ca-Konzentration versus SO₄-Konzentration (mol/L) ableiten werden. Zahlreiche Untersuchungen zum Löslichkeitsverhalten von verschiedener Spezies wurden von Eugster & Jones (1979) durchgeführt. Die Gips-Löslichkeit in Wasser beträgt ca. 2 g/L (20°C) und das errechnete Löslichkeitsprodukt $1,4 \cdot 10^{-4}$ mol²/L². Die Abbildungen 178 und 179 veranschaulichen, dass für die Sickerwässer aus den MSW-Säulen der VA-A, aus den Säulen der VA-B und VA-C sowie aus den Lysimetern Waldering und aus den Testfeldern Eberstetten z.T. die Sättigungsbedingungen für Gips im Sickerwasser erreicht wurden. Für die Lysimeter Raindorf wurde für keine Probe Sättigungsbedingungen erreicht. Bei pH-Werten unter 10 zerfällt Ettringit und schwerlöslicher Calcit wird in Calciumhydrogencarbonat umwandelt, das eine höhere Löslichkeit aufweist. Damit wird Ca verstärkt ins Sickerwasser freigesetzt. Für die Zeitversuche der VA-A sowie für die Säulen der VA-C hat sich zudem herauskristallisiert, dass bei anfänglich sehr niedrigen Ca-Konzentrationen im Sickerwasser diese mit fortwährender Versuchsdauer und zugleich neutraler werdenden pH-Werten deutlich ansteigen (Abb. 180). Entgegen der Annahme, dass die ersten Sickerwässer als Folge der Auswaschung von Alkali- und Erdalkalihydroxiden stark alkalisch sind, liegen die pH-Werte für die Testfelder in Eberstetten z.T. überwiegend im neutralen Bereich (Abb. 181). Im Allgemeinen sind die Sickerwässer nicht im Gleichgewicht mit atmosphärischem CO₂ (380ppm), jedoch gab es hier für die austretenden Sickerwässer eine längere Verweilzeit im Auffangbehälter. Durch den Kontakt mit Luft kann das Sickerwasser mit Kohlendioxid aus der Luft teilweise neutralisiert bzw. karbonatisiert werden. Für die Lysimeter in Waldering (violette Sterne) werden die höchsten Ca-Konzentrationen im Sickerwasser erreicht. Die Entwicklung wird von der Wirkung der RGR überlagert.



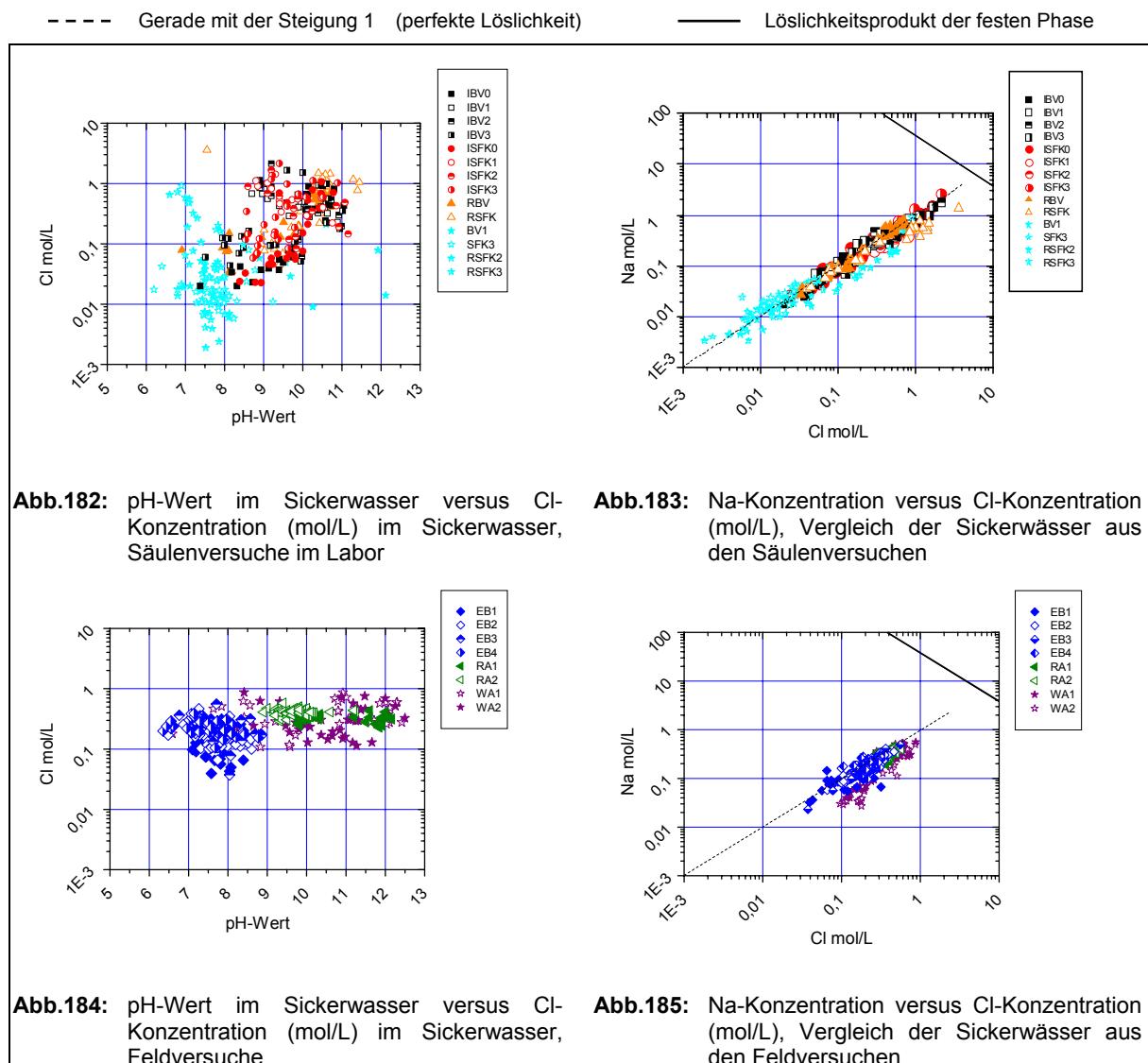
Wie zu erwarten, sind die Parameter Na und Cl generell stark löslich und werden in der Anfangsphase in hohen Konzentrationen aus der Ausgangsschlacke gelöst. Für die Säulenversuche ergibt sich eine scheinbare Konzentrationsabnahme des Cl mit abnehmendem pH-Wert (Abb. 182). Für die Säulenversuche der VA-B sind jedoch die L/S-Verhältnisse viel größer als für die der VA-A. Die niedrigen Cl-Konzentrationen im Sickerwasser sind von einer starken Verdünnung überlagert.

Im Allgemeinen wird angenommen, dass für leichtlösliche Spezies keine Festphase im Sickerwasser existiert (Chandler et al., 1997). Die NaCl-Löslichkeit in Wasser beträgt 358 g/L (20°C) und das errechnete Löslichkeitsprodukt 37,5 mol²/L². Für die Anfangskonzentrationen in den Sickerwässern aus den Säulen der VA-A wurde die Stabilitätsgrenze für Halit nur geringfügig unterschritten (Abb. 183). Im zweiten Versuchsjahr sind die Konzentrationen deutlich geringer. (Abb. 183).

Bei den Feldversuchen wurde – wie erwartet – keine pH-Abhängigkeit für Cl festgestellt (Abb. 184). Es hat sich jedoch herausgestellt, dass für die Testfelder Eberstetten und die Lysimeter in Raindorf trotz Einbau von Schlacke A, die pH-Entwicklungen deutlich unterschiedlich sind.

Auffällig ist, dass pH-Werte von Eluatwert und Sickerwasserwert nicht übereinstimmen. Die pH-Werte in den Sickerwässern sind mit fortschreitender Versuchsdauer deutlich niedriger als in den Eluaten aus den Feststoffproben. Während des Rückbaus der Säulen bzw. während der Bohrkampagnen kommt es zur Zerstörung ausgebildeter Partikelgefüge. Auch bei der Elution (Überkopf-Schüttler) kommt es zu einer mechanischen Beanspruchung der Schlackepartikel. Durch beide Eingriffe werden neue Oberflächen geschaffen, die erneut alkalische Anteile frei geben, jedoch geringer als zu Versuchsbeginn. In der Sickerwasserentwicklung jedoch findet jedoch eine gewisse Karbonatisierung, Verwitterung und Alterung des Materials an der Oberfläche statt.

Für die Sickerwasserentwicklung der Parameter Cl und Na zeigt sich – analog den Säulenversuchen – perfekte Löslichkeit (Abb. 185). Das heißt nicht, dass sich die Spezies nicht an Salzakkumulationen beteiligt, aber dieser Anteil wird über die Bewässerung wieder ersetzt (Eugster & Jones, 1979). Einzig die Sickerwässer aus den Lysimetern in Waldering (violette Sterne) weichen etwas von der idealen Löslichkeit ab, da hier der Parameter Ca dominiert.



Förstner & Hirschmann (1997) haben in ihren Studien mehrmonatige Laborlysimeterversuche durchgeführt. Die Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, dass die langfristige Metallfreisetzung aus den MV-Schlacken in der Hauptsache von den pH-Bedingungen gesteuert wird. Die vorliegenden Ergebnisse haben gezeigt, dass die Auslaugung von frischer Schlacke generell zu sehr hohen anfänglichen Cu-Konzentrationen im Sickerwasser führt. Der Austrag wird aber mit der Zeit geringer. Eventuell kann Tenorit (CuO) als kontrollierende Phase für die Cu-Freisetzung aus der Schlacke angenommen werden (Chandler et al., 1997). Für den Parameter Kupfer wurde mehrfach beschrieben, dass eine Mobilisierung deutlich von der DOC-Konzentration abhängt (Augsburg, et al. 1997; Meima, et al. 1999). Beachtliche Mengen an DOC können von den unverbrannten Anteilen der Schlacken freigesetzt werden. Für die Säulenversuche der VA-A wurden zu Versuchsbeginn bis etwa 130 Tage wurde die DOC-Konzentration im Sickerwasser stichprobenartig bestimmt. Vor allem bei hohen Cl- und DOC-Konzentrationen besteht eine lineare Abhängigkeit (Abb. 186). Es fällt zudem auf, dass für die Sickerwässer aus den Säulen der VA-A zwischen hohen Cl-Konzentrationen und DOC ebenfalls eine lineare Abhängigkeit besteht, was sich in einer perfekten Löslichkeit für Cl und Cu zeigt (Abb. 187).

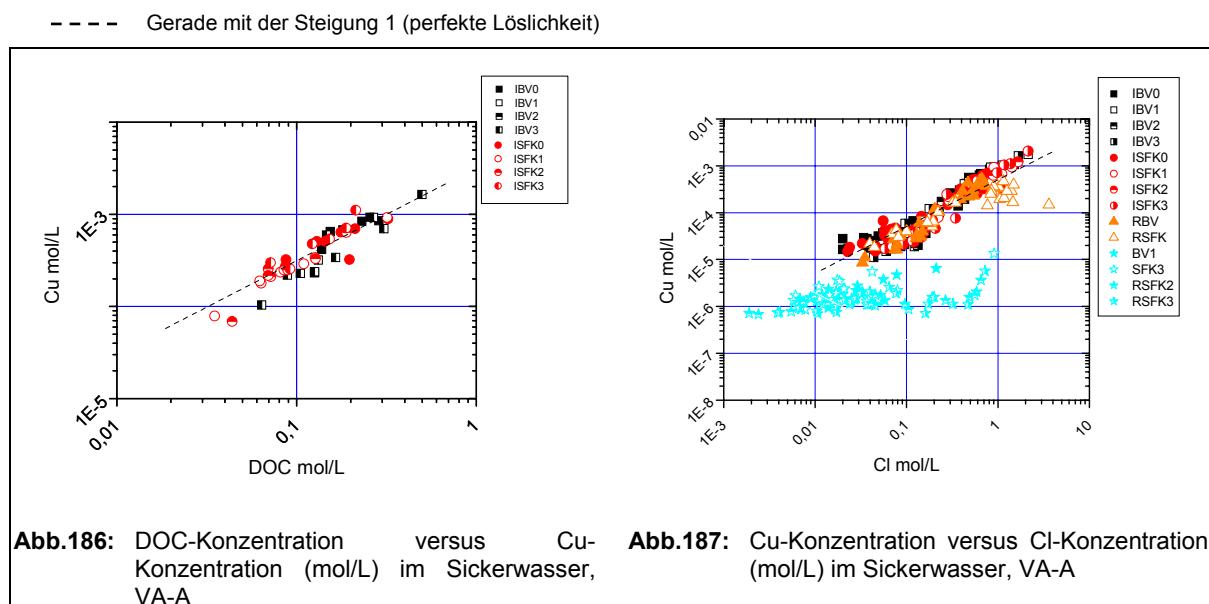


Abb.186: DOC-Konzentration versus Cu-Konzentration (mol/L) im Sickerwasser, VA-A

Abb.187: Cu-Konzentration versus Cl-Konzentration (mol/L) im Sickerwasser, VA-A

7. ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegenden Untersuchungen wurden bei wasserungesättigten Bedingungen durchgeführt. Große Wassermengen im Sinne eines „Flushing-Konzepts“ würden einen allgemeinen „Wash-off“ der Salze mit entsprechendem Verdünnungseffekt des Sickerwassers begünstigen (Hirschmann, 2003). Hierdurch werden verstärkt Anlagerungen an den Kornoberflächen ausgewaschen. Die Verweilzeit des Sickerwassers innerhalb des Deponiekörpers wird herabgesetzt. Diese Vorgänge setzen hohe L/S-Verhältnisse ($L/S > 6$) und somit einen hohen Wasserdurchfluss voraus. Bei einem „Flushing-Konzept“ ist zu beachten, dass mit einer Reduzierung der zugeführten Wassermenge trotz anfänglicher Auswaschung und auch ohne Sperre Salze erneut mobilisiert werden können, wie es Säulenversuche der VA-B zeigen. Dieser Effekt kann damit erklärt werden, dass als Folge großer Wassermengen v.a. die großen Poren durchströmt werden. Bei einer Reduzierung der Bewässerungsmenge werden auch die kleinen Poren am Fließgeschehen beteiligt werden. In diesen kleinen Poren befindet sich der größte Teil der auslaugbaren Stoffe (Hagenau et al., 2005).

Eine undurchlässige Oberflächenabdichtung würde langfristig zu einer Reduzierung der Feuchte innerhalb des Deponiekörpers führen. Folglich findet kein Transport salzreicher Lösungen entlang des Deponieprofils statt und die Benetzung der Kornoberflächen mit der Lösung wird verringert. Die hierdurch verursachte „Mumifizierung“ der Deponie verschiebt lediglich eine Alteration der Schlacke auf einen späteren Zeitpunkt.

Bisher wurde in der Praxis ein vorwiegend homogener Aufbau einer MV-Schlackedeponie, im Weiteren vereinfacht als Deponie bezeichnet, angestrebt, um eine möglichst gleichmäßige Alterung der Abfälle zu ermöglichen. Inhomogenitäten können jedoch während der Betriebsphase in verschiedenen Bereichen einer Deponie entstehen. Die vorliegenden Untersuchungen zielen daraufhin, die Folgen solcher Inhomogenitäten abzuschätzen.

Der Einbau einer Sperrsicht hat für einen Großteil der Versuche zu einer verstärkten Auswaschung an leichtlöslicher Spezies sowie an Schwermetallen geführt.

Wodurch kann aktuell eine Sperre entstehen?

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass sich bereits der Übergang an der Oberfläche der Deponie zur umgebenden Atmosphäre (Luft) als Inhomogenität auswirkt. Diese Zone stellt den obersten Kontakt der Feststoffe mit Niederschlag (Regen, Schnee) und Temperatur (Sonne, Frost) und ist daher verstärkt der Verwitterung ausgesetzt. Die zum Teil extrem feinkörnigen Reaktionsprodukte können die Porenräume ausfüllen und somit eine Änderung der Durchlässigkeit bewirken.

Bereits während der Betriebsphase werden verschiedene Bereiche einer Deponie als Anlieferungs- und Transportwege genutzt. Durch die Auflast der Baumaschinen werden diese Bereiche verdichtet. Dieser Vorgang trägt zu einem starken Korngrößenwechsel bei. In der

Folgezeit können daher diese Zonen eine Inhomogenität hinsichtlich der Durchlässigkeit innerhalb des Deponiekörpers darstellen. Dieser Prozess dürfte eine Ursache für den Aufbau einer zwei Meter mächtigen Salzschicht innerhalb des Bauabschnitts I der Monodeponie Waldering gewesen sein.

Oft verstreicht eine gewisse Zeit zwischen Verfüllen einer Deponie und dem Aufbau eines Überhöhungs- bzw. Profilierungskörpers. Diese Grenzschicht kann sich ebenfalls differenzierend auf Wassergehalt und Verteilung chemischer und mineralogischer Spezies im Profil auswirken. Das heißt, dieser Bereich kann ebenfalls als Sperre wirksam werden.

Voraussetzungen für die Wirksamkeit einer Sperre

Material

Jedes Material mit einem kleineren Durchlässigkeitsbeiwert (k_f -Wert) als der Deponiekörper selber erfüllt die Voraussetzungen für eine Inhomogenität hinsichtlich Aufstauen des Sickerwassers. Aber auch ein Korngrößenwechsel innerhalb des gleichen Materials reicht aus, um eine aufstauende Wirkung zu zeigen, wie es anhand der Modellversuche mit Kunststoffkugeln demonstriert werden konnte. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für den Kugelversuch mit Sperre als Folge des inhomogenen Aufbaus speziell im Bereich unterhalb der Sperre Salzakkumulationen in den Kugelhohlräumen festgestellt wurden. Daher ist die zurückgehaltene Wassermenge nicht nur abhängig von Porenvolumen und Porengrößenverteilung, sondern auch von der Intensität der Salzakkumulationen. Beide Faktoren erhöhen die Reaktionszeit des Sickerwassers mit dem umgebenden Material. Neben dem Potential, Wasser an die Matrix zu binden, ist der Beitrag des osmotischen Potentials zu berücksichtigen. D.h. mit Zunahme des Salzanteils in der Lösung kann Wasser in der salzreichen Zone auf Kosten der angrenzenden Zone angereichert werden. Damit wird die aufstauende Wirkung einer hydraulischen Sperre verstärkt (Scheffer & Schachtschabel, 1998).

Zeit

Die Sperre braucht eine gewisse Zeit, um seine Wirksamkeit entwickeln zu können. Die Untersuchungen zeigen, dass als erstes die Stauwirkung einsetzt. Die Durchlässigkeitsunterschiede bewirken, dass mit der erhöhten Verweilzeit des Sickerwassers die gelösten Spezies im Sickerwasser länger mit dem Feststoff wechselwirken können. Langfristig können dann innerhalb dieses Bereichs eine Aufkonzentration im Sickerwasser und die erwünschte Übersättigung für die Ausfällung potentieller Speicherminerale erreicht werden. Durch das Aufstauen des Sickerwassers entstehen unterhalb der Sperrsicht vergleichsweise trockene Bedingungen und begünstigen die Ausfällung aus der Porenlösung.

Wasserbilanz

Bewässerungsmenge sowie Bewässerungsmodi beeinflussen die Prozesse nachhaltig. Wichtig dabei ist das Verhältnis zwischen Wasserzufluss und Wasserabfluss sowie die Wechselfolge von Bewässerung und Trocknungsphasen durch den Beitrag der Evaporation. Der Modellversuch mit Kunststoffkugeln zeigte, dass vor allem bei geringen Bewässerungsmengen sich die Wirksamkeit der Sperrre im Sinne eines Wasserrückhaltevermögens verstärkt. In diesem Fall wird im Vergleich deutlich weniger Sickerwasser ausgetragen. Im Zusammenspiel der verschiedenen Faktoren kann somit auch bei humiden Klimaverhältnissen eine Salzanreicherung innerhalb der Deponie erfolgen, wie sie sonst nur in natürlichen salzreichen Systemen in ariden und semiariden Gebieten zu erwarten sind.

Beitrag salzreicher Lösungen

Es hat sich gezeigt, dass durch die zusätzliche Zugabe von salzreichen Lösungen, in Form von Modell- oder Deponiesickerwasser sowie Konzentrat aus der Umkehrosmose, das Wasserrückhaltevermögen zusätzlich verstärkt werden kann, da nicht nur Schlacke als poröses Material Wasser einbauen kann, sondern über die Salzverkrustungen zusätzliches Wasser gespeichert wird. Zudem werden durch die Zugabe von Salzen die chemischen und mineralogischen Prozesse verstärkt bzw. beschleunigt. Die Alteration der Reststoffe wird forciert. Die Ergebnisse der Säulen- und Feldversuche haben gezeigt, dass das Verhältnis Bewässerungsmenge zu eingebauter Schlackemenge (L/S-Verhältnis) ausschlaggebend für den Stoffaustausch ist. Bei den Säulenversuchen liegt generell ein L/S-Verhältnis > 1 vor. Vor allem leichtlösliche Spezies (Cl, Na) werden verstärkt ausgewaschen, sowohl für eine Bewässerung mit Leitungswasser als auch für eine Bewässerung mit Modellsickerwasser. Für die Feldversuche ist das L/S-Verhältnis < 1 . Bei hohen Salzkonzentrationen im Bewässerungsmedium kommt es hier sogar zu einer Umkehrung der Entwicklung. Leichtlösliche Spezies können sich innerhalb der Versuchsanordnung anreichern.

Einbau einer Sperrre

Generell werden Sanierungsmaßnahmen hinsichtlich der „inneren Barrièresysteme“ als technisch und finanziell aufwendig angesehen. Der Einbau einer Sperrsicht während der Betriebsphase erfordert hingegen keinen unverhältnismäßig großen Aufwand.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde Schlacke-Feinkorn (SFK) der Körnung 0-4 mm als Sperrsicht verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass bereits dieses Material die gewünschten Forderungen hinsichtlich Korngrößenwechsel erfüllt. Schlacke-Feinkorn bewirkte in den verschiedenen Versuchsdurchführungen ein Aufstauen von Sickerwasser. In zahlreichen Anlagen fällt infolge der Aufbereitung Schlacke-Feinkorn als Reststoff an, der deponiert werden muss. Die MV-Schlacke der Körnung 4-32 mm wird meist geotechnisch verwertet. Im Zuge des Einbaus innerhalb des Deponiekörpers kann so SFK ebenfalls verwertet werden.

Generell empfiehlt sich der Einbau einer Sperrsicht mindestens fünf bis zehn Meter oberhalb der Basis. Die Mächtigkeit der Sperrsicht soll mindestens 30 cm betragen, um eine optimale Wirksamkeit hinsichtlich einer Reduzierung der Durchlässigkeit zu gewährleisten. Wir empfehlen zusätzlich eine maschinelle Verdichtung des Feinkorns, um einen Durchlässigkeitsbeiwert (k_f -Wert) von kleiner gleich 10^{-8} m/s (schwach durchlässig) einzustellen. Bei sehr großen Deponien können auch mehrere Sperrsichten innerhalb des Deponiekörpers eingebracht werden.

Position der Sperre

Aufgrund der räumlich begrenzten Ausmaße von Labor- und Feldversuche wurde die Sperrsicht etwa auf halber Höhe der jeweiligen Versuchsaufbauten positioniert. Es muss oberhalb der Sperrsicht genügend Raum vorhanden sein, damit Salze und Schwermetalle durch Lösungsprozesse durchsickern bzw. mobilisiert werden können und unterhalb der Sperrsicht muss genügend Platz zur Ausbildung des Salzhorizonts bleiben. Der Bereich unterhalb der Sperrsicht muss ausreichend groß sein, damit Salze über kapillare Kräfte entgegen der Schwerkraft mobilisiert werden können.

Die verschiedenen Versuchsaufbauten zeigen, dass für die Ausbildung einer hydraulischen Sperre eine Deponiemächtigkeit von einem Meter ausreicht. Für die Ausbildung eines Salzhorizontes hingegen sind wesentlich größere Mächtigkeiten (z.B. Monodeponie Waldering > 7 Meter) nötig. Bei geringeren Mächtigkeiten kann der gesamte Bereich unterhalb Sperre mit leichtlöslichen Salzen angereichert sein.

Wirkungskreis einer Sperre

Es hat sich anhand unserer Feldversuche gezeigt, dass die Auswirkung unterschiedlicher Sickerwasserzusammensetzungen lokal begrenzt ist. Die wechselseitige Beeinflussung durch laterale Diffusion ist gering. Das bedeutet, dass eine lokal begrenzte Errichtung einer Sperrsicht, die nicht die gesamte Fläche der Deponie umfasst, ebenfalls wirksam werden kann. Es ist daher zu erwarten, dass beim Großmaßstab einer Deponie auch ein Eingriff in den Deponiekörper, z.B. in Form einer Bohrung, die Wirksamkeit der Sperrsicht bzgl. ihres Aufstauvermögens nicht beeinflussen oder gar aufheben würde.

Vorteile einer Sperre

- Die Sperre führt zu einer geringeren Austragsmenge an Sickerwasser. Dieser Vorgang wirkt sich kostengünstig für den Deponiebetrieb aus.
- Das erhöhte Wasserrückhaltevermögen zusammen mit der verstärkenden Wirkung von Salzakkumulationen (Salzhorizont) im Bereich der Sperre weist bei Starkregeneignissen zudem ein stärkeres Puffervermögen auf.

8. LITERATURVERZEICHNIS

17. BlmSchV (1990): Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe. (Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes) vom 23. November 1990, BGBl.
- AbfAbIV (2001): Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen. Abfallablagerungsverordnung, vom 20. Februar 2001 (BGBl. I S. 305 vom 24.7.2002, S. 2807; 13.12.2006 S. 2860).
- Abbas Z., Moghaddam A.P. & Steenari B.-M. (2003): Release of salts from municipal solid waste combustion residues. *Waste Management*, **23**, 291–305.
- Åberg A., Kumpiene J. & Ecke H. (2006): Evaluation and prediction of emissions from a road built with bottom ash from municipal solid waste incineration (MSWI). *Science of the Total Environment*, **355**, 1–12.
- Astrup T., Mosbæk H. & Christensen T.H. (2006): Assessment of long-term leaching from waste incineration air-pollution-control residues. *Waste Management*, **26**, 803–814.
- Augsburg A., Köster R., Amme M. & Eberle S.H. (1997): Mobilität und Festphasenspeziation von Kupfer aus Schlacken der Hausmüllverbrennung. *Müll und Abfall*, **3**, 144 – 153.
- Baccini P., Bader H.-P., Belevi H., Ferrari S., Gamper B., Johnson A., Kersten M., Lichtensteiger T. & Zeltner C. (1993): Deponierung fester Rückstände aus der Abfallwirtschaft. Endlager-Qualität am Beispiel Müllschlacke. Tagungsband der Tagung in der Kartause Ittingen, 14.–16. September 1993. vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Banwell C. N. & McCash E.M. (1999): Molekülspektroskopie: ein Grundkurs. Oldenbourg Verlag München, Wien, 417 S.
- Belevi H. & Baccini P. (1991): Long-term assessment of leachates from municipal solid waste landfills and bottom ash monofills. *Journal of Resource Management and Technology*, **19/2**, 68 – 73.
- Belevi H., Stämpfli D.M. & Baccini P. (1992): Chemical behaviour in municipal solid waste incinerator bottom ash in monofills. *Waste Management & Research*, **10**, 153 - 167.
- Bodénan F., Azaroual M. & Piantone P. (2000): Forecasting the longterm behaviour of municipal solid waste incineration bottom ash: rapid combined tests. In: Woolley, G.R., Goumans, J.J.J.M., Wainwright, P. (Eds.), *Waste Materials in Construction, Studies in Environmental Sciences 71*. Elsevier Sci, Amsterdam, pp. 475–482.
- Bothe Jr. J. V. & Brown P. W. (2004): PhreeqC modeling of Friedel's salt equilibria at 23 ±1 C. *Cement and Concrete Research*, **34**, 1057–1063.
- Bruder-Hubscher V., Lagarde F., Leroy M.J.F., Coughanowr C. & Enguehard F. (2001): Utilisation of bottom ash in road construction: a lysimeter study. *Waste Management and Research*, **19**, 557 – 566.
- Burg H. (1997): Chemisch-mineralogische Untersuchung von Müllverbrennungsschlacke: Zusammensetzung, Alterungsverhalten, bauphysikalische Eigenschaften. Diplomarbeit Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Chandler J., Eighmy T.T., Hartlen J., Hjelmar O., Kosson D.S., Sawell S., van der Sloot H. A. & Vehlow J. (1997): Municipal Solid Waste Incinerator Residues. In: *Studies in Environmental Sciences*, **67**. Amsterdam, NL: Elsevier. International Ash Working Group (IAWG), 1006 p.

- Chimenos J.M., Segarra M.A. & Espiell F. (1999): Characterization of bottom ash in municipal solid waste incinerator. *Journal of Hazardous Materials*, **A:64**, 211-222.
- Derie R. (1996): A new way to stabilise fly ash from municipal incinerators. *Waste Management*, **16**, 711–716.
- DIN EN 12457-4: Charakterisierung von Abfällen; Auslaugung: Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen – Teil 4; Ausgabe 2003-01.
- Dijkstra J. J., van der Sloot H. A. & Comans R. N.J. (2002): Process identification and model development of contaminant transport in MSWI bottom ash. *Waste Management*, **22**, 531-541.
- Dijkstra J. J., van der Sloot H. A. & Comans R. N.J. (2006): The leaching of major and trace elements from MSWI bottom ash as a function of pH and time. *Applied Geochemistry*, **21**, 335-351.
- Eighmy T.T., Eusden J.D., Marsella K., Hogan J., Domingo D., Krzanowski J.E. & Stämpfli D. (1994): Particle petrogenesis and speciation of elements in MSW incineration bottom ashes. In: Goumons, J.J.J.M., van der Sloot, H.A., Albers, Th.G. (Eds.), *Waste Materials in Construction*. Elsevier Science Publ. B.V, Amsterdam, 111 - 136.
- Eugster H.P. & Jones B.F. (1979): Behaviour of major solutes during closed-basin brine evolution. *American Journal of Science*, **279**, 609 – 631.
- Eusden, J.D., Eighmy, T.T., Hockert, K., Holland, E. & Marsella, K. (1999): Petrogenesis of municipal solid waste combustion bottom ash. *Applied Geochemistry*, **14**, 1073 – 1091.
- Ferreira C., Ribeiro A. & Ottosen L. (2003): Possible applications for municipal solid waste fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, **B96**, 201–216
- Fichtl K. & Oeltzschnner H. (1979): Die Reinigungswirkung von Lockersedimenten auf Sickerwässer aus Schlackedenponien. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz. Schriftenreihe Abfallwirtschaft, Heft **6**.
- Flegler St. L., Heckmann J. W. & Klomparens K. L. (1995): Elektronenmikroskopie: Grundlagen – Methoden – Anwendungen. 279 S. - Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag GmbH.
- Förstner U. & Hirschmann G. (1997): Langfristiges Deponieverhalten von Müllverbrennungsschlacken. Abschlußbericht an das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, 259 S.
- Förstner U. & Grathwohl P. (2003): Ingenieurgeochemie. Natürlicher Abbau und Rückhalt, Stabilisierung von Massenabfällen. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Forteza R., Far M., Seguí C. & Cerdá (2004): Characterization of bottom ash in municipal solid waste incinerators for its use in road base. *Waste Management*, **24** (9), 899-909.
- Fruchter J.S., Rai D. & Zachara J.M. (1990): Identification of Solubility-Controlling Solid Phases in a Large Fly Ash Field Lysimeter. *Environmental Science and Technology*, **24**, 1173-1179.
- Govindaraju K. (1994): Geostandards Newsletter. Special Issue of Geostandards Newsletter. Published by the International Working Group „Analytical Standards of Minerals, Ores and Rocks“ with the assistance of Center de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CNRS), **18**, 158 p.

- Hagenau J., Borg H., Fehse K.U. & Wolter M. (2005): Simulation der Auswaschung von organischen Verbindungen, Chlorid und Zink aus Deponiekörpern in Abhängigkeit von der Niederschlagsrate. Müll und Abfall, **37**, 82-90.
- Heuss-Aßbichler S., Spiegel W. & Speiser C. (2002): Untersuchungen des Speicherminerals Ettringit in Bezug auf dessen Wirkung als innere Barriere zur Verbesserung der Langzeitstabilität von Rauchgasreinigungsrückständen mit dem Ziel der emissionsneutralen Ablagerung. Endbericht an das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen.
- Heuss-Aßbichler S. (2004): Salt Horizons – as Heavy Metal Barriers within the Monofill for MSWI Residues. Applied Mineralogy, Pecchio et al. (eds.) 2004 ICAM-Br, Sao Paulo, 431 – 434.
- Hirschmann G. & Förstner U. (2000): Langzeitprognosen zum Sickerwasseraustrag von Schwermetallen aus Deponien von Müllverbrennungsschlacken. Long-term Assessment for the Leachate Release of Heavy Metals from Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash Monofills. Acta hydrochim. hydrobiol., **28**, 262 - 271.
- Hirschmann G. (2003): Langzeitverhalten von Deponien. In: Förstner, U. & Grathwohl, P. (Hrsg.). Ingenieurgeochemie - Natürlicher Abbau und Rückhalt, Stabilisierung von Massenabfällen. S. 273 – 297, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Hjelmar O. (1990): Leachate from land disposal of coal fly ash. Waste Management and Research, **8**, 429 - 449.
- Hjelmar O. (1996): Disposal strategies for municipal waste incineration residues. Journal of Hazardous Materials, **47**, 345-368.
- Hundesrügge T. (1990): Phasenanalytische Untersuchungen an Filteraschen aus Müllverbrennungsanlagen. Aufschluss 41, S. 281 – 285.
- Hundesrügge T. (1991): Abfall – Verbrennung – und dann? Qualitative und quantitative Betrachtungen an Rückständen aus Verbrennungsanlagen. Müll und Abfall, **8**, S. 500 – 510.
- Kida A., Noma Y. & Imada T. (1996): Chemical Speciation and Leaching Properties of Elements in Municipal Incinerator Ashes. Waste Management, **16**, 527-536, 1996.
- Kläntschi N., Lienemann P., Richner P. & Vonmont H. (1996): Elementanalytik: instrumenteller Nachweis und Bestimmung von Elementen und deren Verbindungen. Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg, Berlin, Oxford, 346 S.
- Kosson D.S., van der Sloot H.A. & Eighmy T.T. (1996): An approach for estimation of contaminant release during utilization and disposal of municipal waste combustion residues. Journal of hazardous Materials, **47**, 43 – 75.
- Johnson C.A. (1994): Das Langzeitverhalten von Müllschlacke im Hinblick auf die Mobilität von Schwermetallen und Salzen. In: Reimann, D.O. (Hrsg.): Entsorgung von Schlacken und sonstigen Reststoffen, Beiheft zu Müll und Abfall, **31**, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- Kersten M., Moor Ch. & Johnson C. A. (1995): Emissionspotential einer Müllverbrennungs-schlacken-Monodeponie für Schwermetalle. Müll & Abfall, **11**, 748–758.
- Kirby, C.S. & Rimstidt J.D. (1993): Mineralogy and Surface Properties of Municipal Solid Waste Ash. Environmental Science and Technology, **27**, 652 – 660.
- Kirby C.S. & Rimstidt J.D. (1994): Interaction of Municipal Solid Waste Ash with Water. Environmental Science and Technology, **28**, 443-451.

- Klein R. (2002): Wasser-, Stoff- und Energiebilanz von Deponien aus Müllverbrennungs-schlacken. Dissertation Technische Universität München, S. 204.
- Kluge G. (1982): Feststellung von Nennwerten an Müllverbrennungsschlacken. Texte des Umweltbundesamtes Berlin, **21/82**, 32 S.
- Knorr W., Hentschel, B., Marb, C., Schädel, S., Swerev, M., Vierle, O. & Lay, J.P. (1999): Rückstände aus der Müllverbrennung. Chancen für eine stoffliche Verwertung von Aschen und Schlacken. Hrsg. von Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Initiativen zum Umweltschutz, Bd. **13**. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- Lahl U. (1994): Schlackeaufbereitung durch Alterung und Laugung. In: Beihefte zu Müll und Abfall, **31**, 86-91.
- Lichtensteiger Th. (1996): Müllschlacken aus petrologischer Sicht. Geowissenschaften, **14**, 173-180.
- Lindsay W.L. (1979): Chemical Equilibria in soils. John Wiley & Sons Inc., New York, Chichester, Brisbane, Toronto, 449 pages.
- Magel G. (2003): Mineralogische und chemische Untersuchungen zur abiotischen Wasserstoffentwicklung in Müllverbrennungsrückständen. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München, Herbert Utz Verlag GmbH, S. 182.
- Magel G., Heuss-Aßbichler S. & Fehr K.T. (2003): H₂-produzierende abiotische Reaktionen in MVA-Schlackedeponien, 3. Zwischenbericht an das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen.
- Marb C., Hentschel B., Mallick R., Launer M., Bauer U., Gemeinhardt C., Gebser V. & Sippel C. (2002): Verwertung von MV-Rostschlacke in Bauvorhaben (Abschlussbericht). Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.) – Josef-Vogl-Technikum, Augsburg.
- Meima J.A. & Comans R. N. J. (1997): Geochemical Modeling of Weathering Reactions in Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ash. Environmental Science and Technology, **31**, 1269 – 1276.
- Meima J. A., Van Zomeren A. & Comans R. N. J. (1999): Complexation of Cu with Dissolved Organic Carbon in Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ash Leachates. Environmental Science and Technology, **33**, 1424 – 1429.
- Meima J. A. & Comans R. N. J. (1999): The leaching of trace elements from municipal solid waste incinerator bottom ash at different stages of weathering. Applied Geochemistry, **14**, 159 - 171.
- Meima J.A., Van der Weijden R.D., Eighmy T.T. & Comans R.N.J. (2002): Carbonation processes in municipal solid waste incinerator bottom ash and their effect on the leaching of copper and molybdenum. Applied Geochemistry, **17**, 1503-1513.
- Mesters K.(1993): Untersuchungen zur Mobilisierung von leichtlöslichen Salzen aus MV-Asche. Ergebnisse aus Feldversuchen. VGB-Kraftwerkstechnik, **73**, 1058-1061.
- Mostbauer P., Lechner P. & Meissl K. (2007): Langzeitverhalten von MVA-Reststoffen. Evaluierung von Testmethoden, „IMMO-Schlussbericht 2007“. ABF-BOKU, S. 158, Facultas Verlags- und Buchhandels AG, Wien.
- Nakamoto K. (1987): Infrared and Raman spectra of inorganic and coordination compounds. - 4. ed. - A Wiley Interscience publication, New York, 484 S.

- Nyquist R.A. & Kagel R.O. (1997): Infrared Spectra of Inorganic Compounds: (3800-45cm-1). Volume 4, Academic Press, New York, 495 S.
- Nzihou A. & Sharrock P., 2002. Calcium phosphate stabilisation of fly ash with chloride extraction. *Waste Management*, **22**, 235–239.
- Picolab (1995): Mineralogisch-chemische Untersuchung einer Bohrkernprobe der Monodeponie Waldering: Bindungszustand der Salze und Schwermetalle, 44 S. LfU-Bericht, Bayern.
- Pfrang-Stotz G. & Schneider, J. (1995): Comparative studies of waste incinerator bottom ashes from various grate and firing systems, conducted with respect to mineralogical and geochemical methods of examination. *Waste Management & Research*, **13**, 273 - 292.
- Pöllmann H (1994): Immobile Fixierung von Schadstoffen in Speichermineralen. In: Matschullat, J., Müller, G. (Hrsg). Geowissenschaften und Umwelt. S. 331 – 240. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Reimann O. (1992): Verwertungsmöglichkeiten von Müllverbrennungsschlacke. *Müll und Abfall*, **9**, 609 – 618.
- Reimann O. (1995): Schlackemenge und -inhaltsstoffe aus der thermischen Restabfallbehandlung, VDI Bildungswerk, Seminar 43-76-03: Schlackeaufbereitung, -verwertung und –entsorgung, am 9. und 10. März 1995 in München.
- Sabbas T., Polettini A., Pomi R., Astrup T., Hjelmar O., Mostbauer P., Cappai G., Magel G., Salhofer S., Speiser C., Heuss-Aßbichler S., Klein R. & Lechner P. (2003): Management of municipal solid waste incinerator residues. The PHOENIX working group on Management of MSWI Residues. *Waste Management*, **23**, 61-88.
- Sager D., Heindl A. & Heuss-Aßbichler S. (2004): EU 23 „Salzhorizont: Fixieren leichtlöslicher Spezies innerhalb des Deponiekörpers“, 1. Zwischenbericht an das BayStMUGV.
- Sager D., Heindl A. & Heuss-Aßbichler S. (2005): EU 23 „Salzhorizont: Fixieren leichtlöslicher Spezies innerhalb des Deponiekörpers“, 2. Zwischenbericht an das BayStMUGV.
- Sager D., Heindl A. & Heuss-Aßbichler S. (2006): EU 23 „Salzhorizont: Fixieren leichtlöslicher Spezies innerhalb des Deponiekörpers“, 3. Zwischenbericht an das BayStMUGV.
- Sager D., Heindl A. & Heuss-Aßbichler S. (2007): EU 23 „Salzhorizont: Fixieren leichtlöslicher Spezies innerhalb des Deponiekörpers“, Endbericht an das BayStMUGV.
- Scheffer F. & Schachtschabel P. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 494 S.
- Schneider J., Pfrang-Stotz G. & Kössl H. (1994): Charakterisierung von MV-Schlacken. In: Beihefte zu Müll und Abfall, **31**, 38 - 43.
- Shim Y. S., Rhee, S. W. & Lee, W. K. (2005): Comparison of leaching characteristics of heavy metals from bottom and fly ashes in Korea and Japan. *Waste Management*, **25**, 473 - 480.
- Siebert H. (1966): Anwendungen der Schwingungsspektroskopie in der Anorganischen Chemie. Bd. VII der Reihe „Anorganische und Allgemeine Chemie in Einzeldarstellungen“. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1966. 1. Aufl., 209 S.
- Simon F.-G., Schmidt V. & Carcer B. (1995): Alterungsverhalten von MVA-Schlacken. *Müll und Abfall*, **11**, 759 – 764.

- Speiser C., Baumann, T. & Niessner, R. (2000): Morphological and Chemical Characterization of Calcium-Hydrate Phases formed in Alteration Processes of Deposited Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ash. *Environmental Science and Technology*, **34**, 5030-5037.
- Speiser C. (2001): Exothermer Stoffumsatz in MVA-Schlackedeponien: Mineralogische und geochemische Charakterisierung von Müllverbrennungsschlacken, Stoff- und Wärmebilanz. Dissertation Technische Universität München, S. 261.
- Speiser C., Baumann T. & Niessner R. (2001): Characterization of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash by scanning electron microscopy and quantitative energy dispersive X-ray microanalysis (SEM/EDX)
- Stegemann J. A., Schneider J., Baetz B. W. & Murphy K. L. (1995): Lysimeter Washing of MSW incinerator bottom ash. *Waste Management & Research*, **13**, 149 - 165.
- Suhner B. (1986) Infrarot-Spektren von Mineralien. Band 1 und 2. Dissertation „Zur Anwendung der Infrarot-Spektroskopie in der Mineralogie“ an der Philosophisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Basel.
- Thomé-Kozmiensky K.J. (1994): Thermische Abfallbehandlung. 2. Auflage, EF-Verlag, Berlin.
- Van der Sloot H.A. (1990): Leaching behaviour of waste and stabilized waste materials; characterization for environmental assessment purposes. *Waste Management and Research*, **8**, 215 – 228.
- Van der Sloot H.A. (1996): Developments in evaluating environmental impact from utilization of bulk inert wastes using laboratory leaching tests and field verification. *Waste Management*, **16**, 65 – 81.
- Van der Sloot H.A., Kosson D.S., Eighmy T.T., Comans R.N.J. & Hjelmar O. (1996): Approach towards international standardization: a concise scheme for testing of granular waste leachability. In: Goumons, J.J.J.M., van der Sloot, H.A., Albers, T.G. (Eds.), Environmental aspects of construction with waste materials, *Studies in Environmental Science* **60**, Elsevier V., Amsterdam, 446-453.
- Van der Sloot H.A., Kosson D.S. & Hjelmar O. (2001): Characteristics, treatment and utilization of residues from municipal waste incineration. *Waste Management*, **21**, 753-765.
- Vehlow J. (1996): Municipal Solid Waste Management in Germany. *Waste Management*, **16**, 367-374.
- Vengosh A. (2003). Salinization and Saline Environments. In: Sherwood Lollar, B. (ed.), Environmental geochemistry (volume 9), Treatise in Geochemistry. Executive Editors: Holland, H.D. and Turekian, K.T., Elsevier Science.
- Zevenberger C & Comans R.N.J. (1994): Geochemical factors controlling the mobilization of major elements during weathering of MSWI bottom ash. In: Goumons, J.J.J.M., van der Sloot, H.A., Albers, T.G. (Eds.), Environmental aspects of construction with waste materials, *Studies in Environmental Science* **60**, Elsevier V., Amsterdam, 179–194.

ANHANG

<i>TABELLARISCHER ANHANG</i>	<i>TA1 – TA10</i>
<i>EXPERIMENTELLER ANHANG</i>	<i>EA1 – EA26</i>
<i>GRAPHISCHER ANHANG.....</i>	<i>GA1 – GA9</i>
<i>MINERALOGISCHER ANHANG.....</i>	<i>MA1 – MA10</i>

TABELLARISCHER ANHANG

Tab. T-1: Zusammensetzung der Modellsickerwässer aus Leitungswasser und Neutralsalzen für die Säulenversuche im Labor und für die Lysimeter Raindorf

		MSW-Säulenversuche		MSW-Lysimeter	
Parameter	Einheit	Quelle	Konzentration	Quelle	Konzentration
pH-Wert		NaOH	10,9	unkontrolliert	8,0
Lf	mS/cm		3,5		53,1
Cu	mg/L	CuCl ₂	2	n.v.	n.v.
Zn	mg/L	ZnCl ₂	3	n.v.	n.v.
Pb	mg/L	PbCl ₂	8	n.v.	n.v.
Na	mg/L	Na ₂ SO ₄	383	NaCl/Na ₂ SO ₄	12.157
Ca	mg/L	CaCl ₂	397	CaCl ₂	1.830
Cl	mg/L	Cu/Zn/Pb/CaCl ₂	711	NaCl/CaCl ₂	20.233
SO ₄	mg/L	Na ₂ SO ₄	799	Na ₂ SO ₄	2.386

n.v. = nicht vorhanden

Tab. T-2: Zusammensetzung Sickerwasser und Umkehrosmosekonzentrat

Parameter	Einheit	Sickerwasser (Einzelmessung vom 14.06.05)	Sickerwasser (Schwankungsbereich)	Umkehrosmose- konzentrat vom 11.05.05
pH	-	8,1	8,1 – 8,4	8
Leitfähigkeit	µS/cm	14.970	7.820 – 19.600	37.000
Cl	mg/L	3.930	1.280 – 4.000	11.800
SO ₄	mg/L	1.090	75 – 800	4.600
Al	mg/L	0,1	n.b.	0,22
Ca	mg/L	94	92 – 199	240
Co	mg/L	0,023	n.b.	< 0,02
Cr	mg/L	0,32	0,16 – 0,39	0,59
Cu	mg/L	0,2	0,26 – 0,45	0,25
Hg	mg/L	< 0,001	n.b.	< 0,001
K	mg/L	747	580 – 770	1.070
Mg	mg/L	55	92 – 210	106
Mo	mg/L	0,28	n.b.	0,83
Na	mg/L	3.260	1.850 – 3.260	4.340
Ni	mg/L	0,16	0,16 – 0,17	0,24
Pb	mg/L	0,12	< 0,05 – 0,12	0,2
Si	mg/L	18	11 – 26	46,4
V	mg/L	0,024	n.b.	0,036
Zn	mg/L	0,11	0,11 – 0,65	0,25

Tab. T-3: Unterschiedliche Versuchsreihen der Säulenversuche: Versuchsanordnung A, Schlacke der MVA Ingolstadt

VA-A	Säule	Material	Sper-re	Position ab Basis	Mächtig-keit	Bewäs-serung	Beginn	Ende	Dauer in Wochen
I	IBV0	Schlacke	keine			LW	11.01.05	02.01.07	103
	IBV1	Schlacke	keine			MSW	18.11.04	22.03.05	18
	IBV2	Schlacke	keine			MSW	18.11.04	06.09.05	42
	IBV3	Schlacke	keine			MSW	18.11.04	08.11.06	103
II	ISFK0	SFK, Schlacke	SFK	~39,5 cm	2 - 3 cm	LW	11.01.05	02.01.07	103
	ISFK1	SFK, Schlacke	SFK	~45,5 cm	2 - 3 cm	MSW	18.11.04	22.03.05	18
	ISFK2	SFK, Schlacke	SFK	~44,5 cm	2 - 3 cm	MSW	18.11.04	06.09.05	42
	ISFK3	SFK, Schlacke	SFK	~ 42 cm	2 - 3 cm	MSW	18.11.04	08.11.06	103

SFK: Schlacke-Feinkorn, MSW: Modellsickerwasser; LW: Leitungswasser

Tab. T-4: Unterschiedliche Versuchsreihen der Säulenversuche: Versuchsanordnung B, Schlacke des MHKW-Rosenheim

VA-B	Säule	Material	Sperre	Bewäs-serung	Beginn	Ende	Dauer in Wochen
I	BV1	Schlacke 12	keine	MSW	07.04.04	19.07.05	67
	BV2	Schlacke 12	keine	LW	07.04.04	22.06.04	11
II	SFK1	Schlacke 12, SFK	SFK	LW	19.04.04	23.06.04	9
	SFK2	Schlacke 11, SFK	SFK	LW	29.04.04	18.01.05	38
	SFK3	Schlacke 11, SFK	SFK	MSW	29.04.04	19.07.05	64
III	GT1	Schlacke 12, GT	GT	LW	23.04.04	23.06.04	9
	GT2	Schlacke 11, SFK, GT	GT+SFK	LW	05.05.04	18.01.05	37
	GT3	Schlacke 11, SFK, GT	GT+SFK	MSW	05.05.04	30.06.04	8
IV	RSFK1	Schlacke 12, SFK, RGR	SFK	LW	23.04.04	25.06.04	9
	RSFK2	Schlacke 11, SFK, RGR	SFK	LW	06.05.04	12.07.05	62
	RSFK3	Schlacke 11, SFK, RGR	SFK	MSW	06.05.04	12.07.05	62
V	RGT1	Schlacke 12, GT, RGR	GT	LW	23.04.04	25.06.04	9
	RGT2	Schlacke 11, SFK, GT, RGR	GT+SFK	LW	06.05.04	23.11.05	29
	RGT3	Schlacke 11, SFK, GT, RGR	GT+SFK	MSW	06.05.04	23.11.05	29

SFK: Schlacke-Feinkorn, GT: Geotextil, SFK: Schlacke-Feinkorn, RGR: Rauchgasreinigungsrückstände, MSW: Modellsickerwasser; LW: Leitungswasser; 12: LOS 12 und 11: LOS 11

Tab. T-5: Unterschiedliche Versuchsreihen der Säulenversuche: Versuchsanordnung C, Schlacke der MVA Ingolstadt

VA-C	Säule	Material	Sperre	Position ab Basis	Mächtigkeit	Bewäs-serung	Beginn	Ende	Dauer in Wochen
I	RBV	Schlacke	keine			MSW	13.10.05	20.03.07	77
II	RSFK	SFK, RGR, Schlacke	SFK,RGR	40 cm	2 - 3 cm	MSW	13.10.05	20.03.07	77

SFK: Schlacke-Feinkorn, RGR: Rauchgasreinigungsrückstände, MSW: Modellsickerwasser

Tab. T-6: Unterschiedliche Versuchsreihen der Feldversuche

FV	Versuch	Material	Sperrsicht	Position ab Basis	Mächtigkeit	Bewäs-serung
I	WA1	Schlacke, RGR	keine			NS
	WA2	Schlacke, SFK, RGR	SFK	55 cm	15 cm	NS
II	RA1	Schlacke	keine			MSW
	RA2	Schlacke, SFK	SFK	55 cm	10 cm	MSW
III	EB1	Schlacke	keine			NS
	EB2	Schlacke, SFK	SFK	80 cm	10 cm	NS
	EB3	Schlacke, SFK	SFK	80 cm	10 cm	SW
	EB4	Schlacke, SFK	SFK	80 cm	10 cm	UOK

NS: Niederschlag; MSW: Modellsickerwasser, SW: Deponiesickerwasser, UOK: Umkehrsmosekonzentrat

Tab. T-7: Methoden der Wahl zur Gewinnung von Bohrkernen für die Feldversuche

Versuch	BK I	BK II	BK III
WA1	Handbohrer	Handbohrer	Handbohrer
WA2	Handbohrer	Handbohrer	Handbohrer
RA1	Handbohrer	Handbohrer	Handbohrer
RA2	Handbohrer	Handbohrer	Handbohrer
EB1	Handbohrer	Rammkernbohrer	Schurf
EB2	Handbohrer	Rammkernbohrer	Schurf
EB3	-	Rammkernbohrer	Schurf
EB4	-	Rammkernbohrer	Schurf

Tab. T-8: Termine der drei durchgeführten Bohrkampagnen

Versuch	Beginn der Versuche	BK I	Dauer in Wochen	BK II	Dauer in Wochen	BK III	Dauer in Wochen
WA1	03.11.04	19.05.05	28	22.09.05	46	27.10.06	103
WA2	03.11.04	19.05.05	28	22.09.05	46	27.10.06	103
RA1	26.11.04	20.04.05	21	17.10.05	46	15.11.06	103
RA2	26.11.04	20.04.05	21	17.10.05	46	15.11.06	103
EB1	08.12.04	11.05.05	22	09.11.05	48	22.11.06	102
EB2	08.12.04	11.05.05	22	09.11.05	48	22.11.06	102
EB3	08.12.04	k.B.	k.B.	09.11.05	48	22.11.06	102
EB4	08.12.04	k.B.	k.B.	09.11.05	48	22.11.06	102

k.B.: keine Bohrung abgeteuft

Tab. T-9: Bezeichnungen und Entnahmetiefen für die Bohrkernproben: Die Sperrsicht aus Schlacke-Feinkorn ist die Probe 3f, Ausnahme BK III Eberstetten hier 4f

TESTFELDER EBERSTETTEN				
	EB-1	EB-2	EB-3	EB-4
	ohne Sperre/NS	mit Sperre/NS	mit Sperre/NS/SW	mit Sperre/NS/UO
BK I	1 f (0 - 50)	1 f (0 - 50)	keine Bohrung abgeteuft	
	2 f (50 - 90)	2 f (50 - 90)		
	3 f (90 - 150)	3 f (90 - 150)		
	4 f (150 - 200)	4 f (150 - 200)		
	-	-		
BK II	1 f (45 - 58)	1 f (45 - 58)	1 f (45 - 58)	1 f (45 - 58)
	2 f (80 - 90)	2 f (80 - 90)	2 f (80 - 90)	2 f (80 - 90)
	3 f (117 - 127)	3 f (100 - 115)	3 f (100 - 115)	3 f (100 - 115)
	4 f (147 - 157)	4 f (117 - 127)	4 f (117 - 127)	4 f (117 - 127)
	-	5 f (147 - 165)	5 f (147 - 165)	5 f (147 - 165)
BK III	1 f (bei 20)	1 f (bei 20)	1 f (bei 20 cm)	1 f (bei 20 cm)
	2 f (bei 50)	2 f (bei 50)	2 f (bei 50cm)	2 f (bei 50cm)
	3 f (bei 80)	3 f (bei 80)	3 f (bei 80)	3 f (bei 80)
	4 f (bei 140)	4 f (105 - 112)	4 f (103 - 110)	4 f (105 - 110)
	-	5 f (bei 140)	5 f (bei 140)	5 f (bei 140)
GROSSLYSIMETER				
	Waldering		Raindorf	
	ohne Sperre/NS	mit Sperre/NS	ohne Sperre/MSW	mit Sperre/MSW
BK I	1 f (0 - 50)	1 f (0 - 50)	1 & 2 f (0 - 70)	1 & 2 f (0 - 70)
	2 f (50 - 95)	2 f (50 - 95)	3 f (70 - 100)	3 f (70 - 90)
	3 f (95 - 120)	3 f (95 - 120)	4 f (100 - 130)	4 f (90 - 110)
	4 f (120 - 165)	4 f (120 - 165)	5 f (130 - 165)	5 f (110 - 130)
	-	-	-	6 f (130 - 165)
BK II	1 f (bei 50)	1 f (bei 50)	1 f (50 - 58)	1 f (48 - 52)
	2 f (bei 90)	2 f (88 - 96)	2 f (95 - 99)	2 f (88- 91)
	3 f (113 - 120)	3 f (95 - 110)	3 f (119 - 123)	3 f (108 - 112)
	4 f (bei 140)	4 f (110 - 115)	4 f (150 - 159)	4 f (118 - 123)
	-	5 f (bei 140)	-	5 f (148 - 154)
BK III	1 f (bei 50)	1 f (bei 50)	1 f (bei 50)	1 f (bei 50)
	2 f (bei 90)	2 f (bei 90)	2 f (bei 90)	2 f (bei 90)
	3 f (bei 115)	3 f (95 - 110)	3 f (bei 120)	3 f (105 - 110)
	4 f (bei 140)	4 f (bei 115)	4 f (bei 150)	4 f (bei 120)
	-	5 f (bei 140)	-	5 f (bei 150)

Tab. T-10: Feststoffgehalte (Oxide in Gew.-% und Spurenelemente in ppm) der Ausgangsmaterialien (RFA)

Material	Schlacke	Versuch	Gew.-%											
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	SO ₃	
WA LOS12	Schlacke B	VA-B	24,2	8,8	0,2	3,0	22,7	1,3	0,8	1,8	2,0	14,9	2,5	85,8
WA LOS12		VA-B	26,1	9,3	0,2	2,9	21,6	1,4	0,9	1,7	0,9	14,0	2,4	84,5
WA LOS12		VA-B	16,2	9,7	0,2	3,2	26,2	0,8	0,7	2,1	1,2	12,6	3,5	80,7
WA LOS 11		VA-B	29,9	8,1	0,2	3,0	19,1	1,9	0,8	1,4	0,6	17,2	2,1	86,8
Mittelwert		VA-B	24,1	9,0	0,2	3,0	22,4	1,4	0,8	1,7	1,2	14,7	2,6	84,5
WA LOS 6	Schlacke B	WA-LY	27,9	8,4	0,2	3,1	19,9	1,7	0,8	1,5	0,6	16,3	2,1	85,0
Schlacke IN	Schlacke A	VA-A	27,7	8,0	0,2	2,7	20,0	1,7	1,4	1,6	1,6	11,4	1,8	80,9
Schlacke EB		FV-EB	30,8	9,1	0,2	2,5	18,3	2,0	1,3	1,7	1,3	12,7	1,8	84,4
Mittelwert		RA-LY	29,2	8,5	0,2	2,6	19,1	1,8	1,3	1,6	1,4	12,0	1,8	82,6
WA RGR		RGR	4,1	2,5	0,0	0,5	49,9	1,7	0,9	0,4	0,2	0,7	2,9	75,9
WA RGR		RGR	5,6	3,2	0,1	0,8	39,2	2,1	3,4	0,6	0,4	1,3	2,9	72,2
Mittelwert		RGR	4,8	2,8	0,1	0,7	44,5	1,9	2,2	0,5	0,3	1,0	2,9	74,1
WA SFK		SFK	23,3	8,5	0,2	3,5	23,9	1,1	0,8	1,8	0,8	14,4	2,9	84,2
WA SFK		SFK	25,3	9,6	0,2	3,1	21,9	1,2	0,8	1,8	0,9	14,7	2,5	85,1
Mittelwert		SFK	24,3	9,1	0,2	3,3	22,9	1,2	0,8	1,8	0,9	14,6	2,7	84,7

WA: Waldering; IN: Ingolstadt; EB: Eberstetten; RA: Raindorf

Material	Schlacke	Versuch	ppm												
			Ba	Br	Cl	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Sn	Sr	V	W	Zn
WA LOS12	Schlacke B	VA-B	3.616	46	6.540	1.226	7.478	n.b.	387	4.061	407	737	61	131	11.168
WA LOS12		VA-B	3.421	44	7.134	1.201	6.136	18	350	2.052	231	675	66	141	10.037
WA LOS12		VA-B	3.849	80	10.499	1.228	6.779	28	409	2.073	393	688	76	149	15.831
WA LOS 11		VA-B	2.803	25,2	5.601	1.017	5.137	21,6	278	2.108	221	n.b.-	54	105	9.187
Mittelwert		VA-B	3.422	49	7.444	1.168	6.383	17	356	2.573	313	700	64	132	11.556
WA LOS 6	Schlacke B	WA-LY	3.615	28	5.623	1.046	4.214	14	288	1.622	370	508	70	109	8.038
Schlacke IN	Schlacke A	VA-A	3.708	42	10.147	942	5.006	20	232	1.876	226	n.b.	68	136	6.599
Schlacke EB		FV-EB	3.673	53	9.391	1.191	5.349	17	228	1.527	190	584	81	116	6.064
Mittelwert		RA-LY	3.691	48	9.769	1.067	5.178	18	230	1.702	208	n.b.	75	126	6.331
WA RGR		RGR	439	2.905	104.184	360	716	127	53	2.333	395	320	17	84	8.864
WA RGR		RGR	528	1.340	114.292	618	896	51	60	2.602	401	n.b.	9	43	7.725
Mittelwert		RGR	484	2.123	109.238	489	806	89	57	2.468	398	n.b.	13	64	8.294
WA SFK		SFK	4.082	38	6.918	1.236	5.347	10	333	2.231	214	538	74	131	9.871
WA SFK		SFK	4.026	29	5.407	1.297	6.629	29	323	1.856	204	n.b.	72	160	10.809
Mittelwert		SFK	4.054	34	6.163	1.267	5.988	19	328	2.044	209	n.b.	73	146	10.340

WA: Waldering; IN: Ingolstadt; EB: Eberstetten; RA: Raindorf

n.b.: nicht bestimmt

Tab. T-11: Eluatkonzentrationen der Ausgangsmaterialien (nach DIN EN 12457-4)

Material	Schlacke	Versuch	TR*	pH-Wert	Lf	NH ₄	Cl	SO ₄	Al	Ca	K	Mg	Na
			%	-	mS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
WA LOS 12	Schlacke B	VA-B	79,77	10,6	1,79	n.b.	279	535	1,435	218	66,7	0,283	163
WA LOS 6	Schlacke B	WA-LY	90,59	11,0	1,54	0,13	206	396	3,580	162	48,5	0,073	130
WA LOS 6		WA-LY	88,83	10,7	1,66	0,13	253	317	1,250	172	54,6	0,180	159
WA LOS 6		WA-LY	89,94	10,9	1,18	0,13	149	255	6,490	131	32,7	0,078	89
WA LOS 6		WA-LY	90,41	11,2	1,64	0,25	204	320	1,850	184	48,7	0,044	126
Mittelwert LOS 6		WA-LY	89,94	11,0	1,50	0,16	203	322	3,293	162	46,1	0,094	126
Schlacke IN	Schlacke A	VA-A/VA-C	81,98	12,2	4,18	0,53	313	4	16,900	269	111,0	0,003	194
Schlacke IN		VA-A/VA-C	80,97	12,1	4,42	0,95	404	12	5,160	244	157,0	0,006	279
Schlacke IN		VA-A/VA-C	83,20	12,1	4,06	0,51	338	16	3,280	246	131,0	0,008	224
Mittelwert IN		VA-A/VA-C	82,05	12,1	4,22	0,66	352	10	8,447	253	133,0	0,006	232
Schlacke EB	Schlacke A	FV-EB	88,22	10,7	2,54	n.b.	495	262	36,700	168	133,0	0,021	281
Schlacke RA	Schlacke A	RA-LY	94,10	11,9	3,04	0,39	251	40	8,290	199	100,0	0,012	160
WA SFK		SFK	85,40	10,7	1,77	n.b.	312	321	0,900	123	81,4	0,180	229
WA SFK		SFK	84,88	7,1	1,99	n.b.	279	560	0,068	220	51,8	1,450	202
WA SFK		SFK	85,79	11,3	2,48	n.b.	363	393	0,650	162	86,8	0,034	241
Mittelwert SFK		SFK	85,36	9,7	2,08	n.b.	318	425	0,539	168	73,3	0,555	224
WA RGR		RGR	70,42	12,2	29,60	1,11	8.000	967	< 0,007	4.380	1.140,0	0,009	1.330

*TR: Trockenrückstand nach DIN EN 12 880 – S 2a; WA: Waldering; IN: Ingolstadt; EB: Eberstetten; RA: Raindorf; n.b.: nicht bestimmt

			Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Si	V	Zn	TIC*	TOC*
Material	Schlacke	Versuch	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
WA LOS 12	Schlacke B	VA-B	0,029	0,020	0,092	0,005	< 0,008	4,62	0,007	0,073	n.b.	n.b.
WA LOS 6	Schlacke B	WA-LY	0,005	0,018	0,054	0,003	0,010	3,36	0,004	0,010	n.b.	n.b.
WA LOS 6	Schlacke B	WA-LY	0,024	0,021	0,058	< 0,001	0,009	4,19	0,005	0,003	n.b.	n.b.
WA LOS 6	Schlacke B	WA-LY	0,004	0,014	0,034	< 0,001	0,012	1,96	0,006	0,006	n.b.	n.b.
WA LOS 6	Schlacke B	WA-LY	0,032	0,023	0,064	0,002	0,011	4,67	0,006	0,014	n.b.	n.b.
Mittelwert Los 6		WA-LY	0,016	0,019	0,053	0,003	0,011	3,55	0,005	0,008	n.b.	n.b.
Schlacke IN	Schlacke A	VA-A/VA-C	0,006	0,630	0,096	0,005	0,230	0,72	0,001	0,270	2,79	35,60
Schlacke IN	Schlacke A	VA-A/VA-C	0,008	0,750	0,130	0,005	0,160	1,36	0,002	0,210	3,17	47,58
Schlacke IN	Schlacke A	VA-A/VA-C	0,010	0,600	0,120	0,003	0,210	1,41	0,002	0,220	4,16	37,02
Mittelwert IN	Schlacke A	VA-A/VA-C	0,008	0,660	0,115	0,004	0,200	1,16	0,002	0,233	3,37	40,07
Schlacke EB	Schlacke A	FV-EB	0,058	0,300	0,200	< 0,001	< 0,008	0,27	0,005	< 0,002	7,30	36,56
Schlacke RA	Schlacke A	RA-LY	0,028	0,430	0,110	0,003	0,077	1,98	0,004	0,097	3,13	24,46
WA SFK		SFK	0,095	0,026	0,130	< 0,001	0,014	7,91	0,009	0,003	8,58	5,94
WA SFK		SFK	0,120	0,049	0,130	< 0,001	< 0,008	5,28	0,011	0,071	6,54	17,22
WA SFK		SFK	0,120	0,038	0,110	< 0,001	0,020	6,30	0,004	0,022	n.b.	n.b.
Mittelwert SFK		SFK	0,112	0,038	0,123	< 0,001	0,011	6,50	0,008	0,032	7,56	11,58
WA RGR		RGR	0,033	0,004	0,085	< 0,001	7,260	0,01	0,001	0,850	n.b.	n.b.

* nach DIN EN ISO 1484; n.b.: nicht bestimmt

WA: Waldering; IN: Ingolstadt; EB: Eberstetten; RA: Raindorf

Tab. T-12: Wassergehalt und Glühverlust der Ausgangsmaterialien (nach DIN EN 12880-S2a und DIN EN 12879-S3a)

Material	Schlacke	Versuch	Gewichtsverlust in %			
			bei 30° C	bei 105°C	bei 550° C	bei 1050° C*
Los 12	Schlacke B	VA-B	13,33%	20,23%	-	23,31%
Los 6	Schlacke B	WA-LY	6,85%	9,41%	12,01%	12,99%
Los 6		WA-LY	8,10%	11,17%	13,80%	17,62%
Los 6		WA-LY	6,84%	10,06%	12,98%	15,01%
Los 6		WA-LY	6,23%	9,59%	12,69%	14,15%
Mittelwert Los 6		WA-LY	7,00%	10,06%	12,87%	14,94%
Schlacke IN	Schlacke A	VA-A/VA-C	15,71%	18,02%	21,07%	23,14%
Schlacke IN		VA-A/VA-C	16,62%	19,03%	22,12%	24,63%
Schlacke IN		VA-A/VA-C	14,85%	16,80%	19,29%	20,48%
Mittelwert IN		VA-A/VA-C	15,73%	17,95%	20,83%	22,75%
Schlacke EB	Schlacke A	FV-EB	12,70%	16,07%	18,80%	19,78%
Schlacke EB		FV-EB	12,50%	15,93%	18,25%	20,11%
Schlacke EB		FV-EB	11,64%	14,79%	17,00%	18,62%
Schlacke EB		FV-EB	10,71%	13,69%	15,74%	16,61%
Mittelwert EB		FV-EB	11,89%	15,12%	17,45%	18,78%
Mittelwert IN/EB	Schlacke A	RA-LY	13,81%	16,54%	19,14%	20,76%
WA SFK		SFK	8,24%	11,78%	14,86%	16,34%
WA SFK		SFK	7,84%	14,07%	n.b.	25,51%
WA SFK		SFK	9,41%	14,21%	18,39%	19,80%
Mittelwert SFK		SFK	8,50%	13,35%	16,62%	20,55%
WA RGR		RGR	16,59%	23,43%	n.b.	47,09%
WA RGR		RGR	5,42%	29,58%	47,54%	59,24%
Mittelwert RGR		RGR	11,00%	26,50%	47,54%	53,16%

*: der Glühverlust wurde bei 1050° C ermittelt und bezieht sich auf die Originalsubstanz, d.h. GV – Wg entspricht der Definition des Parameters Glühverlust in der AbfAbIV

n.b.: nicht bestimmt

Tab. T-13: Calciumgehalte in g/kg Schlacke bei den unterschiedlichen Versuchsanordnungen zu Versuchsbeginn und Versuchsende, sowie der Austrag in g/kg und %, die weißen Zeilen stehen für Blindversuche, die grau hinterlegten Zeilen für Versuche mit Sperrsicht

Spezies	Versuch	VA	Sperre	Top	Dauer	Beginn	Ende	Austrag	Austrag
					Wochen	g/kg	g/kg	g/kg	%
Ca	IBV0	VA-A	-	-	103	142,80	142,78	-0,015	-0,011
	IBV3		-	-	103	142,80	143,47	+0,67	+0,47
	ISFK0		SFK	-	103	143,552	143,546	-0,006	-0,005
	ISFK3		SFK	-	103	143,39	144,10	+0,71	+0,50
	EB1	FV-EB	-	-	102	130,83	130,82	-0,01	-0,006
	EB2		SFK	-	102	132,33	132,30	-0,02	-0,011
	EB3		SFK	-	102	132,33	132,32	-0,01	-0,004
	EB4		SFK	-	102	132,33	132,32	-0,01	-0,005
	RA1	LY-RA	-	-	103	136,81	136,89	-0,08	+0,06
	RA2		SFK	-	103	138,39	138,46	+0,07	+0,06
	RBV	VA-C	-	-	76	142,80	143,31	+0,51	+0,35
	RSFK		SFK/RGR	-	76	148,73	149,21	+0,49	+0,30
	WA1	WA-LY	-	RGR	103	163,40	162,85	-0,55	-0,32
	WA2		SFK	RGR	103	165,34	164,70	-0,64	-0,39
	BV1	VA-B	-		67	158,00	159,05	+1,05	+0,68
	SFK3		SFK		64	136,87	137,39	+0,51	+0,39
	RSFK2		SFK	RGR	62	146,57	145,40	-1,17	-0,72
	RSFK3		SFK	RGR	62	144,42	143,97	-0,45	-0,25

Tab. T-14: Kupfergehalte in g/kg Schlacke bei den unterschiedlichen Versuchsanordnungen zu Versuchsbeginn und Versuchsende, sowie der Austrag in g/kg und %, die weißen Zeilen stehen für Blindversuche, die grau hinterlegten Zeilen für Versuche mit Sperrsicht

Spezies	Versuch	VA	Sperre	Top	Dauer	Beginn	Ende	Austrag	Austrag
					Wochen	g/kg	g/kg	g/kg	%
Cu	IBV0	VA-A	-	-	103	5006,00	4999,22	-6,77	-0,14
	IBV3		-	-	103	5006,00	5002,81	-3,19	-0,06
	ISFK0		SFK	-	103	5041,60	5033,84	-7,75	-0,15
	ISFK3		SFK	-	103	5033,78	5029,98	-3,80	-0,08
	EB1	FV-EB	-	-	102	5349,00	5348,99	-0,01	-0,0003
	EB2		SFK	-	102	5378,08	5378,06	-0,02	-0,0004
	EB3		SFK	-	102	5378,09	5378,07	-0,02	-0,0003
	EB4		SFK	-	102	5378,09	5378,07	-0,02	-0,0004
	RA1	LY-RA	-	-	103	5178,00	5177,83	-0,17	-0,003
	RA2		SFK	-	103	5225,41	5225,34	-0,07	-0,001
	RBV	VA-C	-	-	76	5006,00	5004,34	-1,66	-0,03
	RSFK		SFK/RGR	-	76	4908,48	4906,24	-2,24	-0,05
	WA1	WA-LY	-	RGR	103	3800,58	3800,56	0,02	-0,0004
	WA2		SFK	RGR	103	3961,97	3961,95	-0,02	-0,0005
	BV1	VA-B	-		67	6806,92	6813,83	+6,92	+0,100
	SFK3		SFK		64	5161,19	5165,30	+4,11	+0,080
	RSFK2		SFK	RGR	62	4919,19	4919,07	-0,11	-0,002
	RSFK3		SFK	RGR	62	4844,49	4849,89	+5,39	+0,110

Tab. T-15: Molybdängehalte in g/kg Schlagke bei den unterschiedlichen Versuchsanordnungen zu Versuchsbeginn und Versuchsende, sowie der Austrag in g/kg und %, die weißen Zeilen stehen für Blindversuche, die grau hinterlegten Zeilen für Versuche mit Sperrsicht

Spezies	Versuch	VA	Sperre	Top	Dauer	Beginn Wochen	Ende g/kg	Austrag g/kg	Austrag %
Mo	IBV0	VA-A	-	-	103	20,00	17,28	-2,72	-13,50
	IBV3		-	-	103	20,00	18,50	-1,50	-7,60
	ISFK0		SFK	-	103	20,00	17,68	-2,32	-11,40
	ISFK3		SFK	-	103	19,99	17,86	-2,13	-10,40
EB	EB1	FV-EB	-	-	102	17,00	16,97	-0,02	-0,16
	EB2		SFK	-	102	17,09	17,05	-0,041	-0,25
	EB3		SFK	-	102	17,09	17,06	-0,03	-0,20
	EB4		SFK	-	102	17,09	17,08	-0,01	-0,06
RA	RA1	LY-RA	-	-	103	18,00	17,90	-0,10	-0,54
	RA2		SFK	-	103	18,06	17,96	-0,10	-0,53
RSFK	RBV	VA-C	-	-	76	20,00	18,06	-1,94	-9,81
	RSFK		SFK/RGR	-	76	22,06	20,48	-1,58	-7,03
	WA1	WA-LY	-	RGR	103	23,09	23,01	-0,08	-0,35
	WA2		SFK	RGR	103	23,55	23,44	-0,11	-0,46
BV	BV1	VA-B	-		67	17,78	16,57	-1,21	-6,24
	SFK3		SFK		64	21,06	20,32	-0,74	-3,48
	RSFK2		SFK	RGR	62	25,04	24,37	-0,67	-2,45
	RSFK3		SFK	RGR	62	26,29	25,39	-0,90	-3,31

EXPERIMENTELLER ANHANG

A Beschreibung der Säulenversuche im Labor

Die Säulenversuche der Versuchsanordnungen VA-A, VA-B und VA-C im Labor bestehen aus 24 Plexiglassäulen mit einem Meter Länge und 15 cm im Durchmesser (Abb. A-1, A).

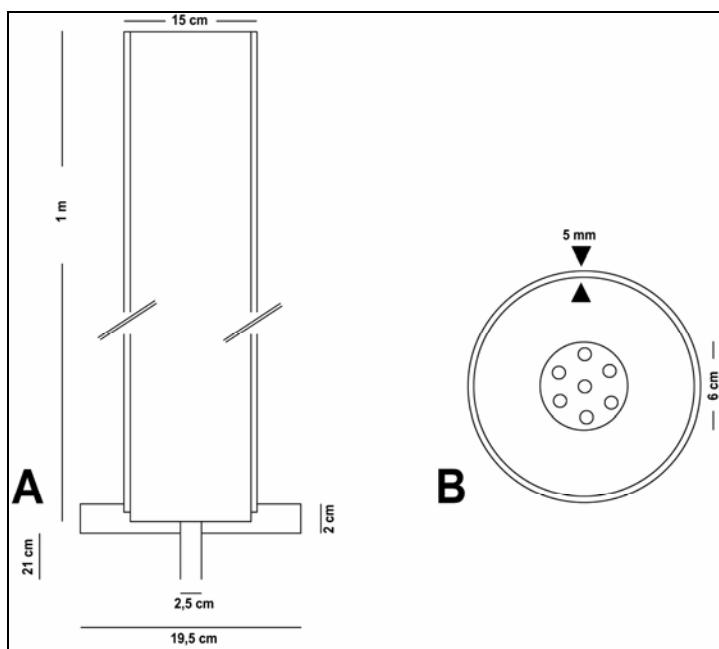


Abb. A-1: A Säulenversuche im Labor (Längsschnitt)
B Basis der Säulen im Querschnitt

Die Unterseite der Säulen stellt eine Plexiglasplatte dar, die zur Mitte hin angeschrägt ist (Abb. A-1, B). Ein perforiertes Plättchen (3 mm Löcher) schützt das Abflussrohr (ca. 20 cm lang und 22,5 cm im Durchmesser) vor eventueller Verstopfung durch gröberes Korn (Abb. A-2). An der Basis wurden die Säulen mit grobem Material gefüllt, um einen ungehinderten Sickerwasserabfluss zu gewährleisten (Abb. A-3).



Abb. A-2: Abflussrohre für das Sickerwasser in 1 Liter PE-Auffanggefäß (links)
Abb. A-3: Grobes Material an der Basis der Säule (rechts)



Die Säulen wurden längsseitig halbiert. Die beiden Säulenhälften wurden mittels Profilringen und Klemmen dicht miteinander verbunden (Abb. A-4). Zur Bewässerung diente ein Kunststoffeimer, der an der Unterseite perforiert wurde, um Regentropfen simulieren zu können (Abb. A-5). Als Materialien für die Sperrsicht wurden Schlacke-Feinkorn (SFK) und z.T. auch Geotextil (GT) jeweils getrennt oder in Kombination verwendet (Abb. A-6 und A-7). Die Korngröße von MV-Schlacke umfasst einen Bereich [0-32 mm] und von Schlacke-Feinkorn lediglich [0-4 mm]. Durch den Einbau des SFK wurde in Folge des Korngrößenwechsels eine Verringerung der Durchlässigkeit erzielt und somit eine Sperrwirkung erreicht.



Abb. A-4: Profilringe und Klemmen, welche die beiden Plexiglashälften dicht zusammenhalten (links)

Abb. A-5: Perforierter PE-Kübel zur besseren Simulation von Regentropfen (rechts)

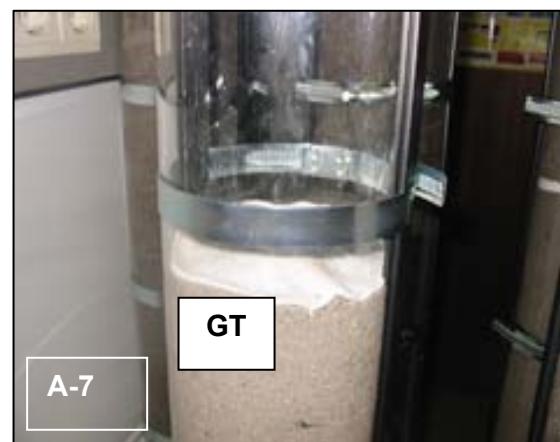


Abb. A-6: Schlacke-Feinkorn (SFK) als Sperrsicht (links)

Abb. A-7: Geotextil (GT) als Sperrsicht (rechts)

Um sehr salzreiche Ausgangsbedingungen simulieren zu können, wurden einige Säulen der Versuchsanordnung B (VA-B) am Top der Säulen mit Rauchgasreinigungsrückständen (ca. 3 cm mächtig) abgedeckt (Abb. A-8). Für die Versuchsanordnung C hingegen wurde als Sperrsicht Schlacke-Feinkorn verdichtet eingebaut (ca. 2 cm mächtig) und unmittelbar darüber eine 1 cm mächtige Lage RGR (Abb. A-9).

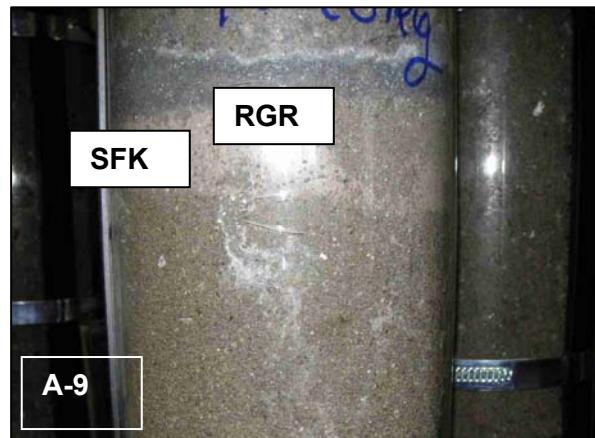
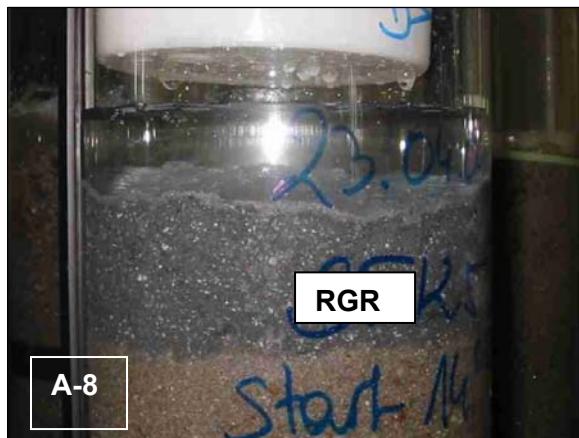


Abb. A-8: RGR als Abdeckschicht bei Säulenversuchen der VA-B (links)

Abb. A-9: RGR als Sperrschicht in Kombination mit SFK für den Säulenversuch mit Sperrre der VA-C (rechts)

Modellversuch mit Kunststoffkugeln

Die beiden Plexiglassäulen MoV1 und MoV2 wurden mit 11 mm großen Kunststoffkugeln gefüllt (Abb. A-10). In die Säule MoV2 wurde zusätzlich auf halber Höhe eine Sperrschicht eingebaut. Diese besteht aus kleineren Kugeln mit 2 mm im Durchmesser (A-11).

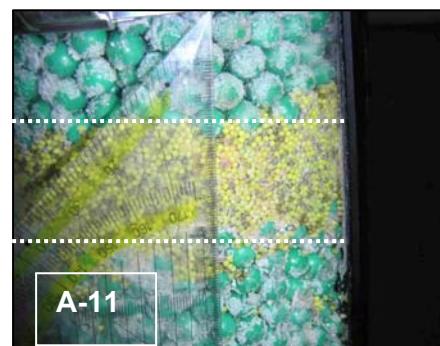


Abb. A-10: Vergleich der Säulen MoV1 (ohne Sperrre) und MoV2 (mit Sperrre) des Modellversuchs mit Kunststoffkugeln (links)

Abb. A-11: Vergrößerter Ausschnitt der Sperrre aus MoV2 (rechts)

B Beschreibung der Feldversuche

Testfelder Eberstetten

Die Abbildung B-1 zeigt einen schematischen Aufbau eines der vier Testfelder in Eberstetten und Abbildung B-2 eine Übersichtsphotographie der räumlichen Anordnung. Der Aufbau der Testfelder erfolgte vom 07.12.2004 bis 08.12.2004. Die Grundfläche für jedes Testfeld ist eine zusammenhängende plane Fläche ($4 \times 5 \text{ m}$). Das Gefälle nimmt jeweils zum Zentrum des Testfeldes hin zu, damit anfallendes Sickerwasser zentral zusammenläuft.

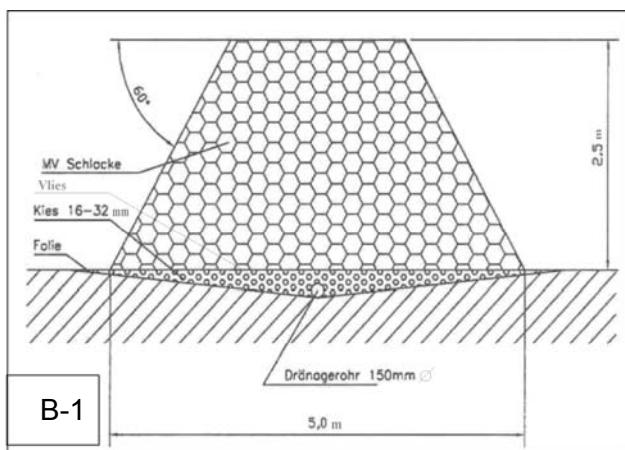


Abb. B-1: Skizze der Testfelder Eberstetten (links)

Abb. B-2: Übersichtsphotographie der Testfelder Eberstetten (rechts)

Auf die Grundfläche wurde für jedes Testfeld eine wasserundurchlässige Folie aufgebracht. Darüber erfolgte eine Kiesschüttung mit einer Mächtigkeit von etwa 15 cm (Abb. B-3). In die Kiesschüttung der Körnung 16 – 32 mm wurde zentral ein 5 m langes perforiertes Drainagerohr zum Ableiten der Sickerwässer eingebracht. Um den ausgeschwemmten Feinstanteil zurückzuhalten, wurde die Kiesschüttung mit einem wasserdurchlässigen Textilvlies abgedeckt (Abb. B-4). Die MV-Schlacke der MVA-Ingolstadt (Schlacke EB) wurde mit einem Bagger bis zu einer Höhe von 2,5 m aufgetürmt und zu Pyramidenstümpfen geformt (Abb. B-5). Das Testfeld 1 (EB1) dient als Blindversuch ohne Sperrsicht und steht isoliert von den übrigen Feldern. Die Testfelder EB2 bis EB4 haben getrennte Kunststoffbahnen (Abb. B-6), jedoch wurde ihr Aufbau zusammenhängend gewählt, damit eine möglichst große Oberfläche geschaffen werden konnte (Abb. B-7).

Mit Hilfe der Baggerschaufel wurde die Oberfläche der drei Testfelder mit Sperrsicht in regelmäßigen Abständen eingekerbt, um die Testfelder optisch voneinander trennen zu können (Abb. B-8 und B-9).



B-3



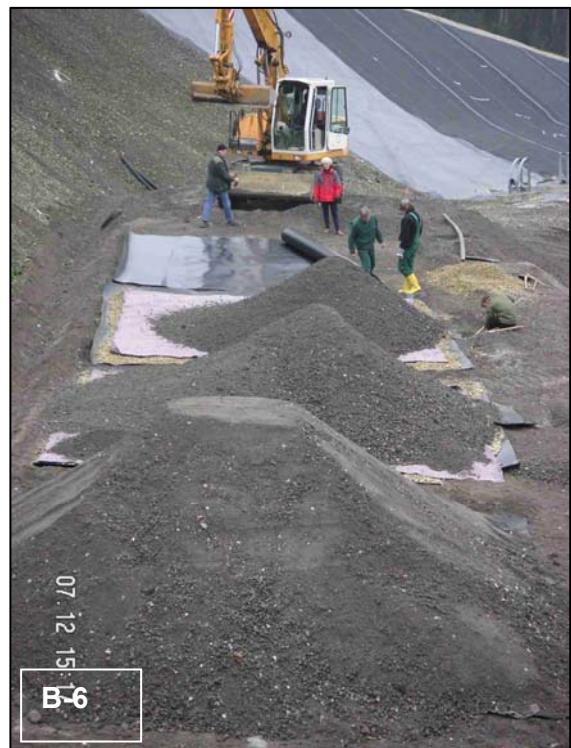
B-4



B-5



B-7



B-6

Abb. B-3: Aufbringung einer Kiesschüttung auf eine Folie, in die Kiesschüttung wurde ein Drainagerohr eingebracht (links)

Abb. B-4: Wasserdurchlässiges Textilvlies schützt Sickerwasser vor ausgeschwemmtem Feinstanteil (rechts)

Abb. B-5: Auftürmen der MV-Schlacke zu Pyramidenstümpfen (links - oben)

Abb. B-6: Getrennte Basisflächen der drei Testfelder mit Sperrsicht (rechts)

Abb. B-7: Gemeinsame Oberfläche der drei Testfelder mit Sperrsicht (links - unten)



Abb. B-8: Optische Trennung der drei Testfelder mit Sperrsicht mittels Baggerschaufel (links)

Abb. B-9: Einkerbung zur optischen Trennung (rechts)

Die 15 cm mächtige Sperrsicht aus SFK wurde mit einem Rüttler verdichtet eingebaut (Abb. B-10). Alle Testfelder waren dem natürlichen Niederschlag ausgesetzt, zudem wurden zwei Testfelder mit Sperre mit sehr salzreichen Lösungen bewässert (Abb. B-11). Das Testfeld EB3 wurde zusätzlich mit Sickerwasser aus der Deponie Eberstetten und das Testfeld EB4 mit einem Konzentrat aus der Umkehrsmose bewässert. Die Menge betrug 50 Liter pro Woche.



Abb. B-10: Verdichten des Schlacke- Feinkorns mittels Rüttler (links)

Abb. B-11: Zusätzliche künstliche Bewässerung von zwei Testfeldern mit Sperre, Testfelder EB3 (Deponiesickerwasser) und Testfeld EB4 (Konzentrat aus der Umkehrsmose) – (rechts)

Großlysimeter Raindorf

Die Abbildung B-12 zeigt eine Skizze der beiden Großlysimeter Raindorf. Die Großlysimeter wurden am 26.11.2004 analog den Testfelder Eberstetten folgendermaßen verfüllt: an der Basis mit einer etwa 2 cm mächtigen Kunststoffplatte dicht abgeschlossen, darüber Kiesschüttung der Körnung 16-32 mm und wasserdurchlässiges Textilvlies, gefüllt mit MV-Schlacke IN (Schlacke A der MVA-Ingolstadt). In das Lysimeter RA 2 wurde zusätzlich in einer Höhe von 75 cm ab der Basis eine verdichtete 10 cm mächtige Schicht Schlacke-Feinkorn (SFK) eingebaut. Die Großlysimeter Raindorf bestehen aus Kunststoffzyllindern mit

einer Höhe von 220 cm und einem Durchmesser von 250 cm (Abb. B-13). Die Wandstärke der Ringe beträgt etwa 10 cm.

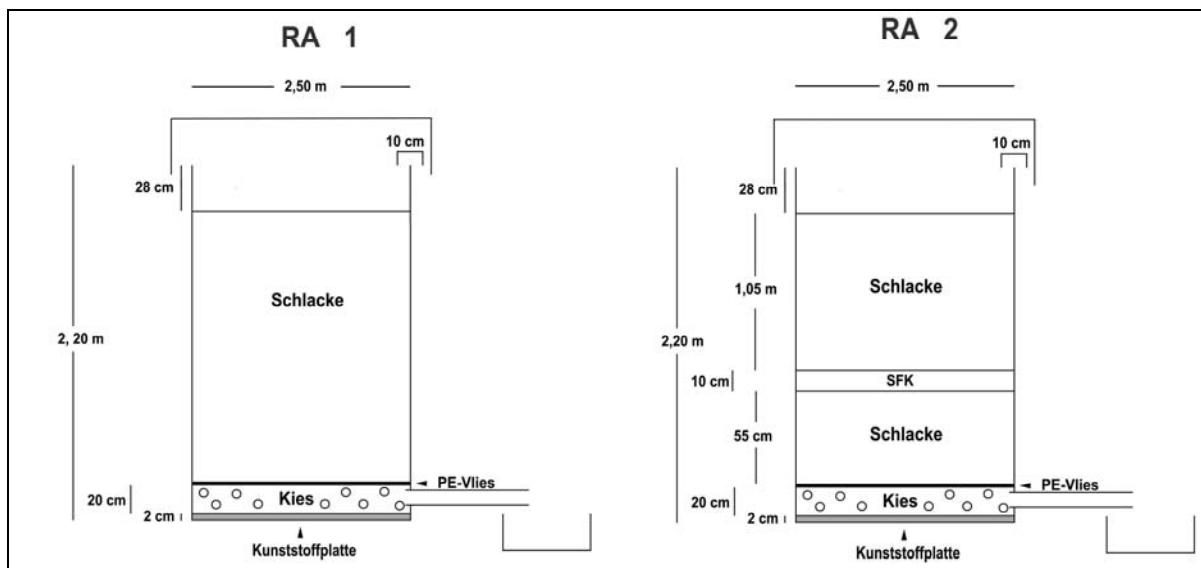


Abb. B-12: Skizze zu den Großlysimetern Raindorf



Abb. B-13: Großlysimeter Raindorf, bestehend aus Kunststoffzylindern

Mittels Kunststoffdeckel können die Großlysimeter verschlossen werden, damit wird der Zutritt von Regenwasser unterbunden (Abb. B-14).

Durch regulierbare Abflussrohre wurde das Sickerwasser aus den Großlysimetern abgeleitet (Abb. B-15). Somit kann für die Frachtenberechnungen die genaue Sickerwasserabgabe für beide Lysimeter erfasst werden.

**Abb. B-14:** Kunststoffdeckel zum Verschließen der Großlysimeter Raindorf (links)**Abb. B-15:** Regulierbares Abflussrohr (rechts)

Großlysimeter Waldering

Die Abbildung B-16 zeigt eine Skizze der beiden Großlysimeter Waldering. Verfüllt wurden die Lysimeter am 03.11.2004. Die Lysimeter wurden von der Basis bis zum Top folgendermaßen verfüllt: Basis mit Kiesschüttung der Körnung 8-16 mm, darüber ein wasserdurchlässiges Textilvlies; gefüllt mit entschrotteter Schlacke B des MHKW Rosenheim aus LOS 6 (seit Juni 2004 auf der Monodeponie Waldering gelagerte Schlacke). In das Lysimeter WA2 wurde zusätzlich im unteren Drittel eine verdichtete 15 cm mächtige Schicht Schlacke-Feinkorn (SFK) eingebaut. Die Großlysimeter bestehen aus Betonzylinern mit einem Meter Höhe und einem Durchmesser von eineinhalb Metern (Abb. B-17). Für die Versuche wurden zwei Zylinder übereinander gestellt und mittels PU-Schaum abgedichtet. An der Innenseite wurden die Betonzyliner mit 0,5 cm starken rechteckigen Styroporplatten ausgekleidet (Abb. B-18). Diese sollen in den Wintermonaten Temperaturunterschiede zwischen Beton und Schlackematerial verringern.

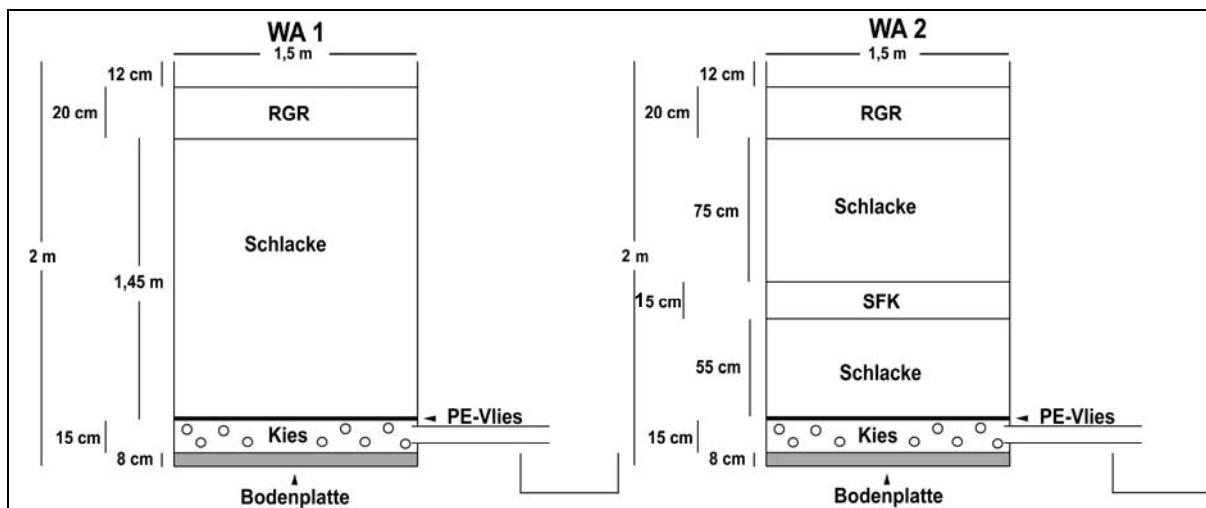
**Abb. B-16:** Skizze zu den Großlysimetern Waldering



Abb. B-17: Großlysimeter (WA1 und WA2) bestehend aus zwei Betonringen (links)

Abb. B-18: Innenauskleidung der Betonringe mit 0,5 cm starken Styroporplatten (rechts)

Am Top der Säulen wurden die Großlysimeter Waldering mit einer 20 cm mächtigen Schicht aus Rauchgasreinigungsrückständen (RGR) abgedeckt (Abb. B-19). Das Aufbringen der RGR sollte eine kontinuierliche Zuführung salzreicher Lösungen gewährleisten. Die beiden Lysimeter waren nur dem natürlichen Niederschlag ausgesetzt.



Abb. B-19: 20 cm mächtige RGR-Schicht am Top der Großlysimeter

C. Probennahme

Säulenversuche im Labor

Nach Beendigung der Säulenversuche wurden die Säulen waagrecht gelegt und die Klemmen und Profilringe entfernt. Mit Hilfe einer Metallplatte wurde die Schlacke in den Plexiglasschalen in zwei Hälften getrennt (Abb. C-1). Die Schlacke-Proben aus den Blindversuchen wurden in 8 gleich große Proben á 10 cm aufgeteilt (Abb. C-2, oben). Die Feststoffproben aus den Säulen mit Sperrsicht wurden in 10 Proben aufgeteilt. Der Bereich ober- und unterhalb der Sperrsicht wurde jeweils in geringeren Abständen entnommen (Abb. C-2, unten). Jeweils die Hälfte des Probenmaterials wurde im Trockenschrank bei 40° C getrocknet und mittels Schwingscheibenmühle gemahlen.

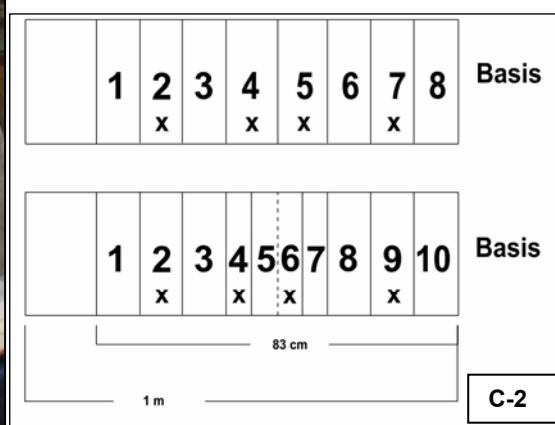


Abb. C-1: Säulenhälften aus Plexiglas, getrennt mittels Metallplatte (links)

Abb. C-2: Skizze der Probeneinteilung, x an diesen Proben wurde Feststoffanalytik mittels RFA und Elution nach DIN EN 12457-4 (DEV-S4 Test) sowie Mineralphasenbestimmung mit XRD durchgeführt (rechts)

Feldversuche

Die erste Bohrkampagne (BK I) im April und Mai 2005 diente als Referenz, um die chemischen Zusammensetzung der Versuchsfelder in einem frühen Zustand nach dem Aufbau ermitteln zu können. Die Probennahme erfolgte mittels Handbohrer (Abb. C-3 bis C-5) mit einem Durchmesser von 10 cm (max. Tiefe 1,7 m). Je Großlysimeter in Raindorf und Waldering wurde eine Bohrung abgeteuft. In Eberstetten waren bis zum Zeitpunkt der ersten Bohrungen noch alle vier Testfelder dem natürlichen Niederschlag ausgesetzt. Aus diesem Grund wurden nur das Testfeld EB1 (ohne Sperre) und als ein Beispiel für Testfelder mit Sperre das Testfeld EB 2 beprobt. Erst im Juni 2005 wurde mit der Zugabe von salzreichen Lösungen auf die Testfelder EB3 und EB4 begonnen.



Abb. C-3: Durchführung der ersten Bohrkampagne (BK I) mittels Handbohrer (links)

Abb. C-4: Probennahme während der ersten Bohrkampagne (Mitte)

Abb. C-5: Bohrkopf des Handbohrers (rechts)

Die zweite Bohrkampagne (BK II) erfolgte im September, Oktober und November 2005. Bei der ersten Bohrkampagne zeigte sich für die Testfelder Eberstetten, dass eine Probennahme mittels Handbohrer nicht möglich ist. Die Probennahme während der zweiten Bohrkampagne erfolgte daher mit Hilfe eines motorbetriebenen Rammkernbohrgerätes mit einem Bohrdurchmesser von 10 cm und einer Kernlänge von ca. 80 cm (Abb. C-6 und C-7).

Durch einen Hebelmechanismus konnte die Rammkernsonde gezogen werden (Abb. C-8). Die genaue Angabe der Bohrprobentiefe (max. 1,65 m) ist jedoch nicht möglich, da durch die Auflast des Bohrgerätes die Schlackeproben stark verdichtet wurden (Abb. C-9).



Abb. C-6: Probennahme mittels motorbetriebenem Rammkernbohrgerät (links)

Abb. C-7: Rammkern mit einem Bohrdurchmesser von 10 cm und einer Kernlänge von ca. 80 cm (rechts)



Abb. C-8: Ziehen des Rammkerns durch Hebelwirkung (links)

Abb. C-9: Bohrprobe der BK II Eberstetten (rechts)

Während der dritten Bohrkampagne im Oktober und November 2006 wurden die Großlysimeter Waldering und Raindorf mittels Handbohrer beprobt. Im Rahmen der Rückbaumaßnahmen der vier Testfelder Eberstetten wurden die Testfelder mittels Schurf beprobt (Abb. C-10). Das dabei entstandene Profil konnte exakt ausgemessen und die Probennahmetiefen genau bestimmt werden (Abb. C-11).

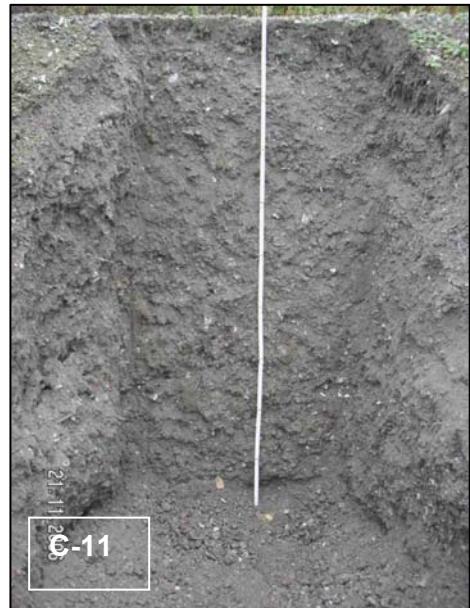


Abb. C-10: Beprobung der Testfelder Eberstetten mittels Baggerschurf (links)

Abb. C-11: Profil eines Schurfs mit einer Tiefe von etwa 1,8 Metern (rechts)

D. Untersuchungsmethoden Feststoffe

Die Grundlagen zur Elementanalytik (RFA, XRD, ICP-OES, IC) wurden aus Kläntschi et al. (1996), Grundlagen zur Rasterelektronenmikroskopie aus Flegler et al. (1995) und Grundlagen zur Molekülspektroskopie aus Banwell & McCash (1999) entnommen.

D-1: Röntgenfluoreszenzanalytik (RFA)

Tab. D-1.1: Geräte- und Messparameter für die Röntgenfluoreszenzanalyse

Gerät	Bruker axs S4 Pioneer
Software	Spectra <i>Release 2001</i> for Quantification and Evaluation
Betriebsart	Messung an fixen Spektrometerpositionen (peak und background)
Analysatorkristalle	PET, LiF 200, OVO-55
Zählzeit	6-30 s pro Element (automatisch optimiert je nach Zählrate bis $\sigma < 3\%$ erreicht ist)
Trägermaterial	Pulverpresstabletten

Zur Bestimmung der Hauptelemente werden üblicherweise Schmelztabletten mit Lithiumtetraborat angefertigt. Durch den z.T. hohen Cl-Anteil in den Schlacke- und RGR-Proben werden aber die Pt-Abgießschalen stark angegriffen und die Schmelztabletten neigen dazu, beim Abkühlen zu zerspringen (Magel, 2003). Aufgrund dieser Erfahrungen wurden für die vorliegenden Messungen Pulverpresstabletten angefertigt. Die Pulverpresstabletten bestehen aus 8 g feingemahlener und trockener Probe ($< 63 \mu\text{m}$) und 2 g eines Tablettierungsmittels (Hoechst Wachs C, Mikropulver der Fa. Merck). Das Gemisch wurde 30 Minuten geschüttelt und dann bei ca. 15 Tonnen 10 Sekunden gepresst. Die Tabelle D.1-6 gibt eine Übersicht über die oxid- und elementspezifischen Geräteeinstellungen.

Tab. D-1.2: Messparameter je Oxid bzw. Element, Röntgenfluoreszenzanalytik

	Linien	Analysator-Kristall	Kollimator	Detektor	Spannung/Strom	Nachweis-grenze	Typische Fehler** für Schlacke A bei Konz. von:		Typische Fehler** für Schlacke B bei Konz. von:	
			dg		kV/mA	Oxide: Gew.-% Elemente: ppm	Konz. Gew.-%	Stat. Dev.	Konz. Gew.-%	Stat. Dev.
SiO ₂	Kα1	PET	0,46	f*	30/10	0,009	24	0,1	23	0,1
Al ₂ O ₃	Kα1	PET	0,46	f*	30/10	0,005	8	0,1	6	0,05
MnO	Kα1	LiF 200	0,23	s*	60/50	0,002	0,2	0,002	0,2	0,001
MgO	Kα1	OVO-55	0,46	f*	27/50	0,002	3,5	0,02	3,4	0,02
CaO	Kα1	LiF 200	0,23	f*	50/20	0,005	20,5	0,04	21	0,04
Na ₂ O	Kα1	OVO-55	0,46	f*	27/111	0,001	2	0,01	1,8	0,01
K ₂ O	Kα1	LiF 200	0,23	f*	50/30	0,002	1	0,01	0,7	0,01
TiO ₂	Kα1	LiF 200	0,23	f*	50/60	0,004	1,5	0,01	1,4	0,01
P ₂ O ₅	Kα1	PET	0,46	f*	30/100	0,002	1,5	0,1	0,5	0,004
Fe ₂ O ₃	Kβ1	LiF 200	0,23	s*	60/7	0,054	11	0,1	15	0,1
SO ₃	Kα1	PET	0,46	f*	30/100	0,002	2,5	0,01	2,8	0,01
Ba	Lα1	LiF 200	0,23	f*	50/60	90	0,3	0,003	0,2	0,003
Br	Kα1	LiF 200	0,23	f*	60/50	45	0,005	0,0002	0,002	0,0002
Cl	Kα1	PET	0,46	f*	30/100	21	0,7	0,003	0,4	0,003
Cr	Kα1	LiF 200	0,23	f*	50/60	24	0,1	0,001	0,1	0,001
Cu	Kα1	LiF 200	0,23	s*	60/50	27	0,4	0,001	0,3	0,001
Mo	Lα1	PET	0,23	f*	27/111	11	0,002	0,001	0,004	0,001
Ni	Kα1	LiF 200	0,23	s*	60/50	24	0,02	0,0003	0,03	0,0003
Pb	Lβ1	LiF 200	0,23	s*	60/50	219	0,2	0,001	0,1	0,001
Sn	Kα1	LiF 200	0,23	s*	60/50	261	0,02	0,001	0,01	0,001
Sr	Kα1	LiF 200	0,23	s*	60/50	39	0,1	0,0003	0,05	0,0003
V	Kα1	LiF 200	0,23	f*	50/60	23	0,01	0,001	0,01	0,001
W	Lα1	LiF 200	0,23	s*	60/50	225	0,03	0,001	0,03	0,001
Zn	Kα1	LiF 200	0,23	s*	60/50	29	0,7	0,002	0,9	0,002

* f = Flow Counter; s = Scintillation Counter; ** nur bezogen auf die Zählstatistik

Messprogramm:

Das Standardmessprogramm für geogene Materialien wurde speziell für die MV-Reststoffe adaptiert und mit international zertifizierten Standards kalibriert. Um auch die Fehler bei den z.T. sehr hohen Cl-Gehalten in den Proben möglichst gering zu halten, wurde im Labor ein eigener Standard angefertigt.

Als Mischbasis wurde der interne Standard S1RF des Instituts für Mineralogie der Universität Salzburg verwendet. Dieser Standard besteht aus folgenden Oxiden und Elementen (Tab. D-1.2):

Tab. D-1.3: Zusammensetzung des Standards S1RF

S1RF					
Oxide		Elemente			
Gew.-%		ppm		ppm	
SiO_2	65,2	Ag	1	La	83
Al_2O_3	15,85	As	3	Mo	5
CaO	2,2	Ba	1100	Nb	18
P_2O_5	0,2	Bi	2	Ni	6
TiO_2	0,65	Br	0,4	Pb	140
Fe_2O_3	3,9	Cd	6	Rb	221
K_2O	6,2	Ce	149	Sn	1
MgO	0,9	Cl	7	Sr	191
MnO	0,05	Co	24	Th	40
Na_2O	3,2	Cr	20	V	33
SO_3	0,1	Cs	6	Y	40
		Cu	8	Zn	680
		Ga	22	Zr	345

Tab. D-1.4: Zusammensetzung des dotierten Standards S1RF dot

„S1RF dot“					
Oxide		Elemente			
Gew.-%		ppm		ppm	
SiO_2	46,7	Ag	1	Ga	15
Al_2O_3	11,4	As	2	La	58
CaO	21,6	Ba	788	Mo	4
P_2O_5	0,1	Bi	1	Nb	13
TiO_2	0,5	Br	0	Ni	1004
Fe_2O_3	2,8	Cd	1004	Pb	5100
K_2O	4,4	Ce	104	Rb	154
MgO	0,7	Cl	11000	Sn	1000
MnO	0,0	Co	17	Sr	133
Na_2O	2,3	Cr	1271	Th	28
SO_3	3,1	Cs	4	Zn	10487
		Cu	5006	Zr	247

Dem Standard S1RF wurden Oxide und Elemente in den genannten Prozentanteilen zugemischt (Tab. D-1.3). Dieser Standard wurde als „S1RF dot“ benannt. Aus dieser Zumischung wurde die Zusammensetzung des dotierten Standards „S1RF dot“ berechnet (Tab. D-1.4).

Tab. D-1.5: Proz. Zumischung an Oxiden und Elementen zum Standards S1RF

SO_3	3,0%	Ni	0,1%
CaO	20,0%	Pb	0,5%
Cd	0,1%	Sn	0,1%
Cl	1,1%	W	0,1%
Cu	0,5%	Zn	1,0%
Cr	0,1%		

Alle Feststoffproben wurden im Trockenschrank bei 40° C getrocknet. Dadurch wurde einzig das oberflächlich gebundene Wasser ausgetrieben. Die Anteile an Kristallwasser, Hydroxiden und Karbonat bleiben noch zur Gänze in den Proben enthalten. Die Analysen mit der Röntgenfluoreszenz ergaben für die Feststoffproben aus den Säulen- und Feldversuchen aus diesem Grund niedrige prozentuale Summen an Oxiden (zwischen 70 – 90 Gew.- %). Unter Berücksichtigung der Wassergehalte bzw. Glühverluste dieser Proben errechnen sich Summen um 100 %.

In der Tabelle D-1.5 sind die Messergebnisse der ausgewählten Standards, gemessen mit Bruker axs S4 Pioneer, den Literaturdaten der internationalen Standards aus dem Geostandards Newsletter (Govindaraju, 1994) bzw. errechneten Gehalten gegenübergestellt. Vor jeder Messserie wurden diese Standards gemessen. Folglich sind in der Tabelle D-1.6. Mittelwerte mit Standardabweichung eingetragen. Der Standard W0 besteht aus frisch aufbereiteter MV-Schlacke der Körnung 0 – 6 mm (Magel, 2003).

Wie die Tabelle zeigt, ist die Reproduzierbarkeit der Messwerte für die Standardtabletten ausgezeichnet. Es bestehen allerdings z.T. systematische moderate Abweichungen von den Sollwerten, was vermutlich auf die gewählte Probenpräparation zurückzuführen ist. Aus der Literatur ist hinlänglich bekannt, dass RFA Daten von Pulverproben vor allem bei Elementen mit hoher Konzentration oft weniger genau sind als bei Gläsern, da Korngrößeneffekte und die Gitterstrukturen der Mineralkomponenten die Kalibrierung erschweren.

Tab. D-1.6: Sollwerte (graue Spalten) und Messwerte (MW, Standardabweichung, weiße Spalten) der Standardmaterialien zur Kalibrierung der RFA, k.A. = keine Angabe

	GXR-3	MW	NIM-L	MW	S1RF	MW	S1RF dot	MW	W 0	MW
SiO₂ (%)	13,4	14,4 ± 0,1	52,4	54 ± 0,1	65,2	64,8	46,7	42,4 ± 0,7	34,6	31,3 ± 0,0
Al₂O₃ (%)	12,1	12,0 ± 0,2	13,6	15,6 ± 0,1	15,9	15,5	11,4	10,6 ± 0,2	10,8	7,7 ± 0,1
MgO (%)	1,3	1,4 ± 0,1	0,3	0,2 ± 0,0	0,9	1,1	0,7	0,9 ± 0,0	3,2	3,2 ± 0,0
CaO (%)	19,0	18,9 ± 0,2	3,2	3,1 ± 0,0	2,2	2,1	21,6	21,8 ± 0,1	19,2	19,7 ± 0,0
Na₂O (%)	1,1	0,8 ± 0,0	8,4	8,0 ± 0,2	3,2	2,8	2,3	1,7 ± 0,1	3,4	2,3 ± 0,2
K₂O (%)	0,9	1,0 ± 0,1	5,5	5,8 ± 0,0	6,2	6,5	4,4	4,5 ± 0,1	0,8	0,9 ± 0,0
Fe₂O₃ (%)	27,1	23,3 ± 14,3	10,0	9,8 ± 0,2	3,9	3,9	2,8	3,0 ± 0,0	15,2	10,0 ± 6,3
SO₃ (%)	k.A.	0,3 ± 0,0	k.A.	0,1 ± 0,0	0,1	0,1	3,1	3,2 ± 0,1	2,0	2,1 ± 0,0
Ba (PPM)	5000	5457 ± 191	450	415 ± 1	1100	1117	788	812 ± 13	5000	4552 ± 14
Cl (PPM)	k.A.	878 ± 42	1200	1230 ± 110	k.A.	k.A.	11000	10048 ± 221	5600	7095 ± 23
Cr (PPM)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	1271	1277 ± 7	1000	1271 ± 7
Cu (PPM)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	5006	4685 ± 13	9800	5541 ± 4
Ni (PPM)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	1004	958 ± 6	330	319 ± 1
Pb (PPM)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	140	150	5100	5123 ± 23	2700	2866 ± 16
Sn (PPM)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	1000	1080 ± 16	k.A.	202 ± 7
W (PPM)	10700	13057 ± 28	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	1000	955 ± 13	k.A.	k.A.
Zn (PPM)	207	227 ± 9	400	461 ± 9	676	767	10487	10407 ± 65	7000	9548 ± 7

D-2: Röntgenpulverdiffraktometrie (XRD)

Für die Phasenanalytik der Feststoffproben und Salzphasen standen drei Diffraktometer zur Verfügung. Die Tabelle D-2.1 gibt Auskunft über Meßparameter für die Röntgenpulveraufnahmen der drei Geräte:

Tab.D-2.1: Geräte- und Messparameter für die Röntgenpulveraufnahmen

	Siemens D 500	Philips PW 1720	STOE STADI P
Institut	Universität Salzburg/ Mineralogie	Universität München/ Mineralogie	
Schrittweite [$^{\circ} 2\Theta$]	0,02	0,02	0,01
Betriebsart	step scan	step scan	continuous scan
Zählzeit [s]	5	10	5
Röhrenspannung [kV]	40	20	30
Anodenstrom [mA]	45	30	40
Röntgenstrahlung	CuK $\alpha_{1,2}$	CuK $\alpha_{1,2}$ bzw. CoK $\alpha_{1,2}$	CuK $\alpha_{1,2}$
Primärmonochromator	Nein	Nein	Ja - Germanium
Sekundärmonochromator	Ja	Ja	Nein
Bereich [$^{\circ} 2\Theta$]	5-75	5-65	5-65
Software	EVA	ADM	ADM

Die Röntgenpulverdiffraktometrie gibt Auskunft über den kristallinen Aufbau der Bestandteile einer Probe. Die Spektrometer wurden vor den jeweiligen Messungen mit einem Si-Standard kalibriert. Die MV-Schlackeproben wurden mit einem Siemens D 500 bzw. einem Philips PW 1720 analysiert. Der Sekundärmonochromator unterdrückt die Fluoreszenzstrahlung. Dadurch bietet sich die Möglichkeit zur Untersuchung von eisenhaltigen mineralischen Proben. Für die Schlackeproben haben sich daher die Diffraktometer mit Sekundärmonochromator angeboten. Bei den Messungen wurde darauf geachtet, dass für die Auswertung ausreichend hohe Impulsraten erzeugt wurden. Zum Teil wurden schlecht auskristallisierte Proben auch über einen langen Zeitraum bei kleinen Schrittweiten gemessen.

Für die einzelnen Salzphasen wurde ein STOE Transmissions-Pulverdiffraktometer STADI P verwendet. Der Vorteil eines STOE-Transmissionsdiffraktometers ist, dass infolge des Primärmonochromators nur die CuK α_1 – Strahlung durchgelassen wird. Dadurch wird die Auflösung für die einzelnen Reflexe besser. Sie bietet einen großen Vorteil für die Strukturanalyse. Die Aufnahme von mineralogischen Proben erschwert sich jedoch, da nur durch den Primärmonochromator keine Fluoreszenzstrahlung unterdrückt werden kann. Die Aufnahme von Fe-haltigen Proben ist daher unmöglich.

D-3: Lichtmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie

Von den einzelnen Salzphasen wurden Aufnahmen mit Hilfe eines Lichtmikroskops (Firma Zeiss), ausgestattet mit einer Digitalkamera LEICA DFC 480 (Auflösung 2560x1920 Pixel), durchgeführt.

Für die hochauflösenden Untersuchungen standen zwei Rasterelektronenmikroskope (REM) zur Verfügung.

Tab.D-3.1: Geräte- und Messparameter für die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen

	Mikroskop I	Mikroskop II
Gerätename	Leica 430 Stereoscanner	LEO 1450 VP (variable pressure)
Institut	Universität Salzburg/Geologie	Forschungs- und Entwicklungszentrum für Sondertechnologien (FES), Schwabach
Software	Leo UIF (Mikroskop) EDWIN Win-Tools (EDX-Analytik)	Noran System SIX
Vakuum	Hochvakuum 10^{-5} Pa	Niedrigvakuum 20 – 30 Pa
Probenvorbereitung	Besputtern mit C oder Au	Keine
Atmosphäre	-	N_2
Anregungsspannung	7, 15 oder 20 kV	15 oder 20 kV
Probenstrom	200 pA	200 pA
Arbeitsabstand	25 mm	24,8 mm
Detektoren	SE & EDX (SiLi)	SE, VPSE, RBSD, EDX (SiLi)
Vergrößerungsbereich	10 – 70.000 fach	30 – 30.000 fach

Bei der Rasterelektronenmikroskopie (REM) müssen die Proben wasserfrei sein und elektrisch leitend. Eine sehr gute Leitfähigkeit erhält man durch das sogenannte „sputter-coating“ mit Gold (für SE-Detektion). Eine Bedampfung mit Kohlenstoff ist für die Elementbestimmung vorteilhaft. Der Vorteil des LEO 1450 VP (variable pressure) ist, dass hier die Proben nicht vorbehandelt werden müssen. Durch die Messung im Niedrigvakuum in Kombination mit einer N_2 -Atmosphäre ist es nicht erforderlich, die Probe vorher leitfähig zu machen.

Im Vergleich zur Lichtmikroskopie, wo die Wellenlängen des sichtbaren Lichtes ausgenutzt werden, verwendet man in der Rasterelektronenmikroskopie (REM) die viel kürzeren Wellenlängen beschleunigter Elektronen als Energiequelle. Die beschleunigten Elektronen bieten ein hohes Auflösungsvermögen (bis max. 1 nm). Aufgrund der ausgezeichneten Tiefenschärfe ermöglicht diese Methode die Abbildung dreidimensionaler Strukturen.

Die Elektronen eines abrasternden und feingeübündelten (primären) Strahls dringen in die Probe ein und treten dort in Wechselwirkung mit den Probenatomen. Die Wechselwirkungen erzeugen eine Vielzahl von Sekundärprodukten, wie Elektronen unterschiedlicher Energie (u.a. sekundäre Elektronen, rückgestreute Elektronen), Röntgenstrahlen, Wärme und Licht. Der SE-Detektor (Elektronenfänger) registriert die Sekundärelektronen, die zur Abbildung der Probenoberfläche verwendet werden. Die Absorption und das Austreten von Sekundärelektronen sind die wichtigsten Faktoren, die in der REM dazu beitragen, ein vorwiegend topographisches Bild zu erzeugen. Kleine Erhebungen auf der Probenoberfläche haben eine kürzere Weglänge als flache Bereiche, sodass mehrere Sekundärelektronen austreten können. Solche Bereiche erscheinen im Bild hell.

Mit einem angeschlossenen EDX-Detektor, der energiedispersive Röntgenspektren aufnimmt, ist eine Analyse der Elementzusammensetzung möglich, indem elementspezifische Röntgenstrahlen detektiert werden, anhand deren Energie die betreffenden Elemente identifiziert werden können.

D-4: Infrarotspektroskopie

Die Salzphasen wurden mit einem EQUINOX 55 Hochleistungs- FT-IR-Spektrometer von Bruker analysiert. Die Tabelle D-4.1 liefert detaillierte Informationen zum Gerät:

Tab.D-4.1: Messparameter für die Infrarotspektroskopie

Gerätename	Bruker EQUINOX 55	
Institut	Sektion Mineralogie, LMU München	
Software	OPUS	
Infrarotbereich	Mittleres Infrarot (MIR)	Fernes Infrarot (FIR)
Probenträgermaterial	KBr	PE-Pulver
Frequenzbereich	400 – 4000 cm ⁻¹	75 – 550 cm ⁻¹
Messung	Transmission od. Absorption	Transmission od. Absorption
Strahlenquelle	Globar	Globar
Strahlenteiler	KBr	Mylar, 6 µm
Detektor	dTGS*	dTGS/PE
Art der Detektion	Wärmestrahlung	Wärmestrahlung
Spiegelgeschwindigkeit	6; 10 kHz	6; 10 kHz
Anzahl der Scans	32	32
Auflösung	4 cm ⁻¹	4 cm ⁻¹

* Pyroelektrische Detektoren aus deuteriertem Triglycinsulfat

Die Infrarotspektroskopie als zusätzliche Methode wurde angewendet, da hier bereits wenige Milligramm Probe ausreichen, um eine Analyse durchführen zu können. Neben Aufnahmen

im mittleren Infrarot-Bereich ($400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$) wurden auch Aufnahmen im fernen Infrarotbereich durchgeführt ($550 - 75 \text{ cm}^{-1}$). Diese Auswertungen sind jedoch weniger aufschlussreich als die MIR-Aufnahmen. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit ausschließlich MIR-Spektren diskutiert. Spektren bekannter Mineralphasen im Ausgangsmaterial oder in den Bohrproben aus dem Bauabschnitt BA 1 der Monodeponie Waldering, die bereits mit Pulverdiffraktometrie identifiziert wurden, anorganischer Salze aus dem Labor, sowie bekannter und beschriebener Proben der Mineralogischen Staatssammlung München und publizierte Spektren in der entsprechenden Literatur (Siebert, 1966; Nakamoto, 1986; Suhner, 1986; Nyquist & Kagel, 1997) wurden als Vergleichsbasis herangezogen.

Gerätebesonderheiten:

Das Bruker Equinox 55 ist ein Zweistrahlgerät. Dabei wird die Strahlung der Quelle mit Hilfe eines Strahlenteilers (vgl. Tab. D-4) in zwei Strahlen aufgeteilt. Eine Hälfte (Messstrahl) gelangt auf einen festen Spiegel und die zweite Hälfte (Referenzstrahl) auf einen beweglichen Spiegel. Den Strahlenteiler und die beiden Spiegel nennt man Interferometer (Michelson-Interferometer). Am Strahlenteiler werden die Strahlen wieder zusammengeführt und sie überlagern sich dort. Je nach der Position des beweglichen Spiegels und in Abhängigkeit von den im Strahl enthaltenen Frequenzen kommt es im Detektor zu konstruktiver oder destruktiver Interferenz. So erhält man ein sogenanntes Interferogramm, mit einem großen Maximum dort, wo beide Spiegel gleich weit vom Strahlenteiler entfernt sind und somit alle Frequenzen additiv interferiert haben, und relativ flachen Ausläufern. Über Fourier-Transformation (math. Rechenoperation) werden aus den mit Hilfe eines Interferometers gemessenen Interferogrammen IR-Spektren berechnet.

Probenvorbereitung:

Für die Infrarotspektroskopie reicht eine Probenmenge von max. drei Milligramm. Die Proben wurden zuvor im Trockenschrank bei 40° C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die trockene Probe wurde fein gemahlen. Für die Aufnahmen im MIR wurden genau drei Milligramm der Probe mit 200 Milligramm KBr (Kaliumbromid) kurz vermengt, damit eine homogene Verteilung der Probe im Trägermaterial zustande kommen kann. Für den MIR-Bereich bietet sich neben KBr auch NaCl an, da beide Mineralsalze oberhalb von ca. 400 cm^{-1} durchlässig sind. Somit kann die Streuung auf ein Minimum reduziert werden. Unter hohem Druck wird das Trägermaterial mit der Probe zähflüssig und kann zu einer durchscheinenden Scheibe verpresst werden. Mit Hilfe einer Halterung wird diese direkt in den Infrarotstrahl eingebracht. Für die Messungen im fernen Infrarot (FIR) wurde als Trägermaterial Polyethylenpulver („Uvasol“) verwendet, da dieses Material ab 75 cm^{-1}

transparent ist. Bei der Probenvorbereitung wurde darauf geachtet, dass drei Milligramm der Probe mit exakt 50 Milligramm Uvasol vermengt wurden.

Tab. D-5.1: Typische Bandenverteilung wichtiger Mineralklassen, Kristallwasser, Aquo- und Hydroxokomplexe

	Intensität und Bandenlage cm ⁻¹				
	Sehr stark	Stark	Mittel	Schwach	Variabel
Karbonate	1530 - 1320	1410 - 1450	1160 890 - 800	1100 - 1020	745 - 670
Sulfate	1130 - 1080		1200 - 1140 680 - 580	1065 - 955 530 - 405	
Silikate	1100 - 900				
Chloride					610 - 220 200 - 100
Oxide					1020 - 970
Kristallwasser			3600 - 3200 1630 - 1600	600 - 300	
CO ₂	2349/1337/667				
Aquo-Komplexe			3550 - 3200 1200 - 600	1630 - 1600 600 - 300	
Hydroxo-Komplexe Me – OH			3760 - 3000 1200 - 700		900 - 300

E. Untersuchungsmethoden Eluate und Sickerwässer

Die Eluate und Sickerwässer wurden neben den Parametern pH-Wert und Leitfähigkeit auch auf ihre Kationen- und Anionenkonzentrationen untersucht: die Kationenkonzentrationen mittels ICP-OES und die Anionenkonzentrationen mittels Ionenchromatographie (IC).

E-1: Induktiv gekoppeltes Plasma mit Atom-Emissionsspektrometer (ICP-OES)

Tab.E-1.1: Messparameter für die optische Emissionsspektroskopie (OES)

Gerätename	Varian Vista CCD Simultaneous ICP-OES
Institut	Forschungs- und Entwicklungszentrum für Sondertechnologien (FES), Schwabach
Software	VISTA
Schlauchmaterial	Teflon, dadurch kein Memory-Effekt
Kühlung	Peltier – Element bei -35° C
Zerstäuber	Sea-Spray
Argonfluss	18 Liter/Minute

Die ICP-OES, optische Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma, zählt zu den Multielementmethoden, d.h. dass zahlreiche Elemente simultan analysiert werden können. Als energiereiche Anregungsquelle, um nahezu alle Elemente anregen zu können, dient ein Argon-Plasma. Ein Plasma ist ein bei hohen Temperaturen ionisiertes Gas aus Atomen, Ionen und Elektronen. Die Ionisation des Gases wird beim ICP durch die Einkopplung induktiver, elektrischer Energie in einen Argongasstrom erreicht. Die Temperatur im Plasmakern beträgt 6000 – 8000°C. Simultane Spektrometer verfügen über einen Polychromator, wobei für jede Emissionslinie jeweils ein Detektor vorhanden sein muss. Die freigesetzte Strahlung enthält Informationen über Anzahl und Art der Atome im Plasma (beteiligte Energieniveaus), sodass die qualitative Analyse durch Messung der Wellenlänge der emittierten Strahlung und eine quantitative Analyse durch Messung der Intensität dieser Strahlung ermöglicht wird. Das Verfahren muss durch Messung von Bezugslösungen bekannter Konzentrationen kalibriert werden.

Die Tabelle E-1.2 zeigt eine Übersicht über die gemessenen Elemente und die dazugehörigen Bestimmungsgrenzen. Die angegebenen Bestimmungsgrenzen stehen gleichzeitig für den analytischen Fehler des Instruments. Bei der Darstellung der Messergebnisse in den einzelnen Diagrammen ist der analytische Fehler kleiner als die eingetragenen Symbole.

Bei der Analytik treten geringere Matrixeffekte auf, wobei beachtet wurde, dass bei sehr salzreicher Matrix die Proben stark verdünnt wurden. Je nach Salzgehalt, die Messbereiche wurden zuvor mit einem Cl-Schnelltest von Merck eingegrenzt, wurde die Ausgangsprobe

um den Faktor 10, 100 oder 1000 verdünnt. Durch die Verdünnung erhöhen sich dementsprechend auch die Bestimmungsgrenzen.

Die Zeitversuche haben gezeigt, dass trotz heterogener Zusammensetzung der Schlacke die Ergebnisse sehr gut reproduzierbar sind.

Tab. E-1.2: Übersicht über die Bestimmungsgrenzen (BG) der einzelnen Elemente bei unverdünnten Proben. Musste eine Probe aufgrund zu hoher Salzgehalte verdünnt werden, erhöhen sich die Bestimmungsgrenzen um den Verdünnungsfaktor.

Parameter	Bestimmungsgrenze		DIN-Norm
Cl	1	mg/l	DIN EN ISO 10304-2
SO ₄	1	mg/l	DIN EN ISO 10304-2
Al	0,002	mg/l	DIN EN ISO 11885
Ba	0,001	mg/l	DIN EN ISO 11885
Ca	0,007	mg/l	DIN EN ISO 11885
Cr	0,001	mg/l	DIN EN ISO 11885
Cu	0,001	mg/l	DIN EN ISO 11885
Fe	0,003	mg/l	DIN EN ISO 11885
K	0,005	mg/l	DIN EN ISO 11885
Mg	0,002	mg/l	DIN EN ISO 11885
Mo	0,002	mg/l	DIN EN ISO 11885
Na	0,01	mg/l	DIN EN ISO 11885
Ni	0,001	mg/l	DIN EN ISO 11885
Pb	0,008	mg/l	DIN EN ISO 11885
Si	0,003	mg/l	DIN EN ISO 11885
Sr	0,001	mg/l	DIN EN ISO 11885
V	0,001	mg/l	DIN EN ISO 11885
W	0,04	mg/l	DIN EN ISO 11885
Zn	0,002	mg/l	DIN EN ISO 11885

E-2: Ionenchromatographie

Sämtliche Sickerwasser- und Eluatproben wurden mittels eines „Dionex ICS 1000“ Ionenchromatographen untersucht. Die Analyse beruht auf dem Prinzip, dass Anionen zwischen einer mobilen und einer stationären Phase unterschiedlich verteilt werden, d.h. die Trennung erfolgt aufgrund der unterschiedlichen Affinität zur stationären Phase.

Hier verfügen die stationären Phasen über geladene Endgruppen - organische Polymere (\varnothing 5-10 µm). Die in der mobilen Phase (Eluent) vorhandenen Analytionsen der Probe treten mit den Endgruppen in Wechselwirkung. Im Eluenten-Reservoir befindet sich die mobile Phase Na₂CO₃. Die Hochdruck-Pumpe fördert den Eluenten mit der vorgewählten Flussrate (1 mL/min). Bevor die zu analysierende Probe der mobilen Phase injiziert wird, wird das System mit Standardlösungen kalibriert. Danach werden über den Injektor 25 µl der zu analysierenden Probe der mobilen Phase hinzugefügt. Während die mobile Phase mit der Probe durch die Trennsäule (IonPac AS9-HC) gepumpt wird, wird die Probe infolge

Ionenaustausches in die einzelnen Analyten aufgegliedert. Die Probenionen wandern abhängig von der Wechselwirkung unterschiedlich schnell durch die Trennsäule.

Ein nachgeschalteter Suppressor enthält einen stark sauren Kationenaustauscher (Austauscherharz – SO₃H), der mit Protonen beladen ist. Dadurch wird die Leitfähigkeit des Eluenten weitgehend beseitigt, so dass die elektrische Leitfähigkeit der getrennten Ionen im nachfolgenden Detektor mit großer Empfindlichkeit erfasst werden kann. Die Ionen werden anhand ihrer Retentionszeiten identifiziert und quantifiziert (Vergleich mit Standardlösung).

Tab.E-2.1: Messparameter für die Ionenchromatographie

Gerätename	Dionex ICS 1000
Institut	Forschungs- und Entwicklungszentrum für Sondertechnologien (FES) Schwabach
Software	CHROMELEON
Eluent	9 mmol/L Na ₂ CO ₃
Flußrate	1 mL/Minute
Säulentemperatur	30° C
Suppressortemperatur	35° C
Detektor	Leitfähigkeitsmeßzelle
Säulen	IonPac NG1 (Vorsäule Organik)
	IonPac AS 9 (Vorsäule)
	IonPac As9-HC (Trennsäule)

F. Untersuchungsparameter

F-1: Eluatzusammensetzung

Elutionstests gemäß DIN EN 12457-4 wurden zur Beurteilung der Auslaugbarkeit der Materialien durchgeführt. Die Konzentrationen leichtlöslicher Salze und Schwermetalle wurden für alle Feststoffproben bestimmt. Dabei wird bei einem Flüssigkeits- zu Feststoffverhältnis von 10:1 (Liquid/Solid; L/S=10) das unbehandelte Material 24 Stunden über Kopf mit demineralisiertem Wasser geschüttelt. Der Solidanteil errechnet sich aus dem prozentualen Trockenrückstand. Im Verlauf des Elutionsverfahrens stellt sich spontan ein pH-Wert von 10 bis 11 ein, der von der chemischen Zusammensetzung der MV-Schlacke (v.a. durch den Ca-Anteil) erzeugt wird. Hierdurch werden mit dem Testverfahren vor allem leichtlösliche Bestandteile erfasst. Die Schwermetalle (Cu, Pb, Zn) werden bei einem pH-Wert von 10 nur geringfügig gelöst. Mittels Ionenchromatographie werden die Anionen- und mit ICP-OES die Kationenkonzentrationen im Eluat analysiert.

F-2: Wassergehalt und Glühverlust

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden von sämtlichen Feststoffproben aus den Säulen- und Feldversuchen der Wassergehalt (WG) bei 30°C und 105°C sowie der Glühverlust (GV) bei 550°C und 1050°C aus der Originalsubstanz ermittelt (nach DIN EN 12880-S2a und DIN EN 12879-S3a), um neben dem Porenwasser auch das Kristallwasser und chemisch gebundenes Wasser in den Schlacken zu erfassen. Der Wert des Glühverlusts liegt damit stets über dem Wassergehalt, der bei 105 °C ermittelt wurde. Die Trocknung erfolgt jeweils bis zur Gewichtskonstanz (3 bis 5 Tage).

Der Glühverlust, der in der Abfallablagerungsverordnung (AbfAblV, 2001) aufgeführt ist, wird nicht aus der Originalsubstanz sondern aus dem Trockenrückstand bei 550 °C ermittelt. Er soll für die Deponiekasse I einen Wert von 3 Gew.-% und für die Deponiekasse II einen Wert von 5% nicht überschreiten und dient zur Abschätzung des Anteils organischer Inhaltsstoffe. Der Glühverlust im Sinne der AbfAblV entspricht der Differenz zwischen dem Glühverlust aus der Originalsubstanz bei 550°C und dem Wassergehalt aus der Originalsubstanz bei 105 °C. Zur Ermittlung der organischen Anteile in den Schlacken wurde der TOC aus dem Trockenrückstand, gemäß AbfAblV, bestimmt.

F-3: Korngrößenverteilung

Zur Bestimmung der Korngrößenverteilung wurden getrocknete Proben in Anlehnung an die DIN 18123 (1983) gesiebt. Folgende Siebweiten wurden für die detaillierten Untersuchungen verwendet: 0,080 mm, 0,125 mm, 0,250 mm, 0,500 mm, 1mm, 4 mm und 16 mm. Für die Überblicksuntersuchungen wurden die Maschenweiten 0,125 mm und 1 mm verwendet.

GRAPHISCHER ANHANG

A Feststoffanalytik (RFA) der Bohrkernproben auf der Deponie Waldering, Bauabschnitt 1

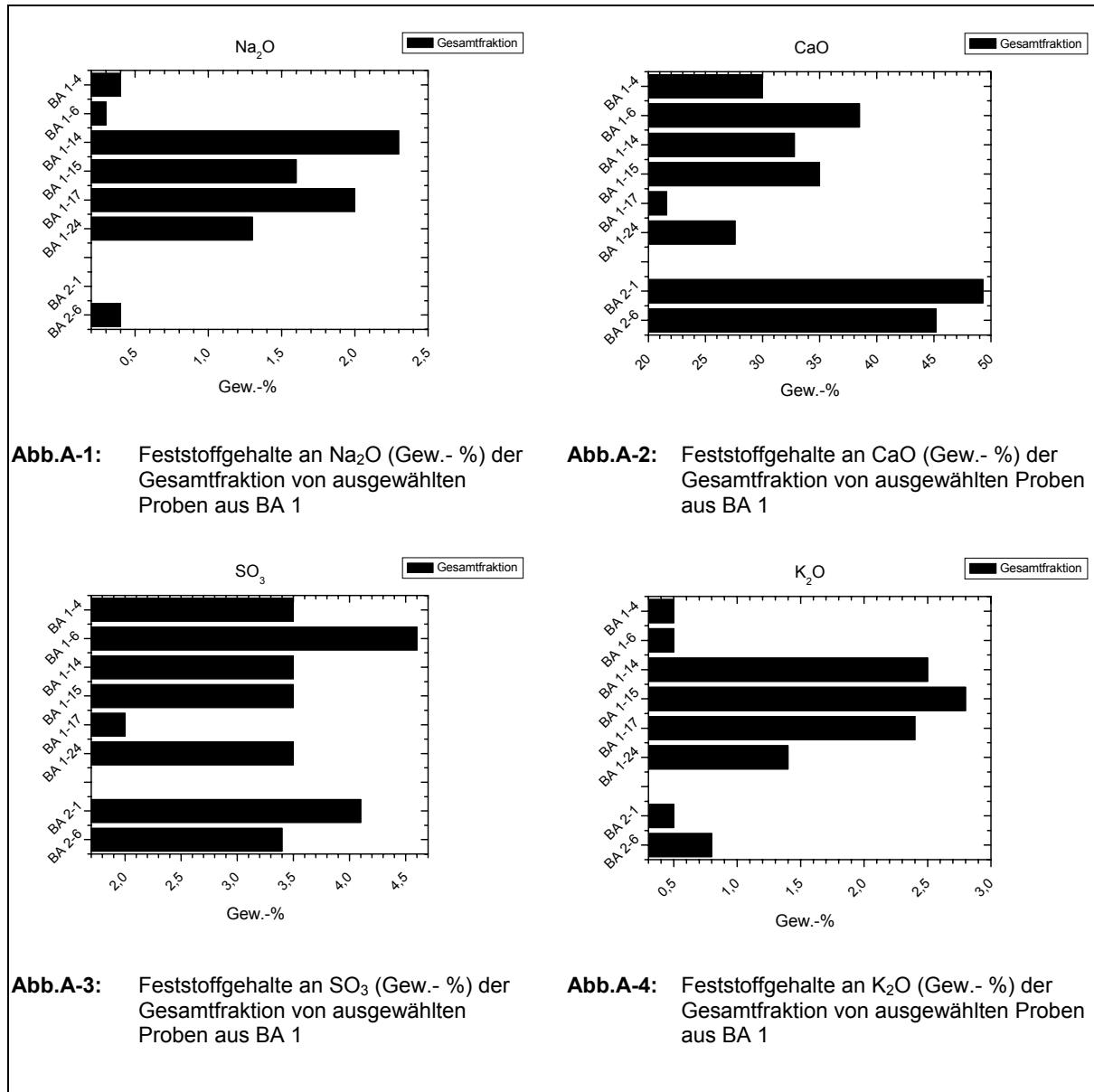


Abb.A-1: Feststoffgehalte an Na₂O (Gew.- %) der Gesamtfraktion von ausgewählten Proben aus BA 1

Abb.A-2: Feststoffgehalte an CaO (Gew.- %) der Gesamtfraktion von ausgewählten Proben aus BA 1

Abb.A-3: Feststoffgehalte an SO₃ (Gew.- %) der Gesamtfraktion von ausgewählten Proben aus BA 1

Abb.A-4: Feststoffgehalte an K₂O (Gew.- %) der Gesamtfraktion von ausgewählten Proben aus BA 1

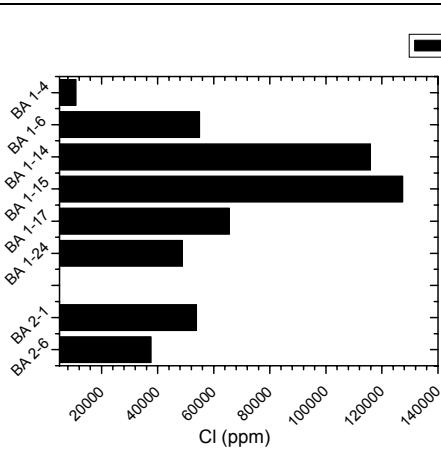


Abb.A-5: Feststoffgehalte an Cl (ppm) der Gesamtfraktion von ausgewählten Proben aus BA 1

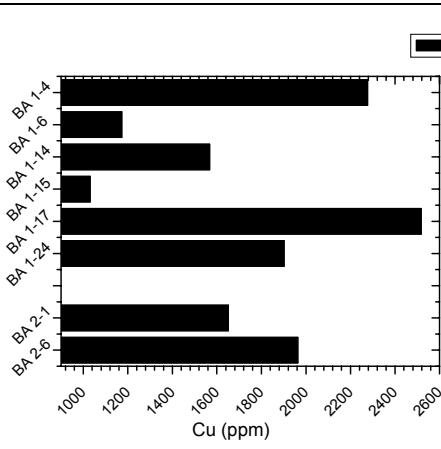


Abb.A-6: Feststoffgehalte an Cu (ppm) der Gesamtfraktion von ausgewählten Proben aus BA 1

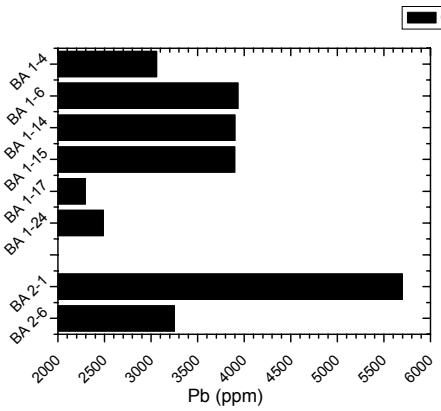


Abb.A-7: Feststoffgehalte an Pb (ppm) der Gesamtfraktion von ausgewählten Proben aus BA 1

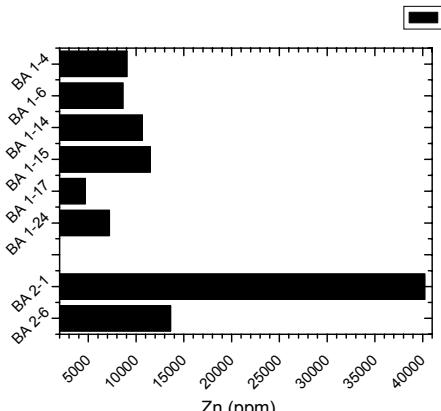


Abb.A-8: Feststoffgehalte an Zn (ppm) der Gesamtfraktion von ausgewählten Proben aus BA 1

B Eluate von Bohrkernproben auf der Deponie Waldering, Bauabschnitt 1

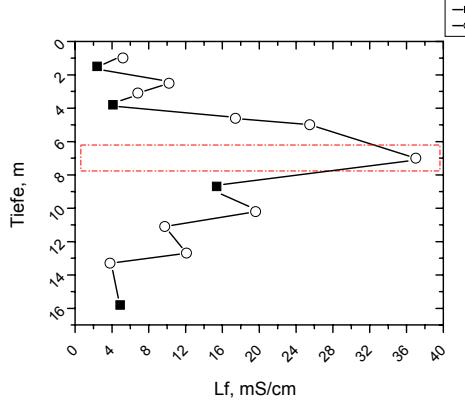


Abb.B-1: Änderung der Leitfähigkeit (mS/cm) in Abh. von der Bohrtiefe, Salzhorizont in 7m Tiefe

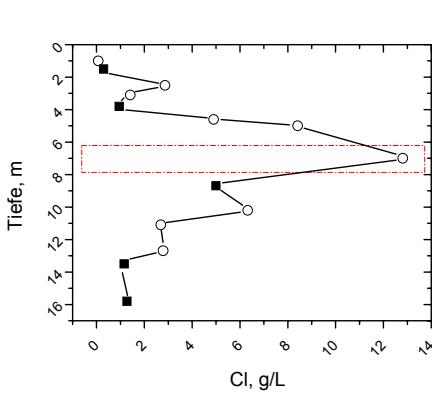


Abb.B-2: Änderung der Eluatkonzentration von Cl (g/L) in Abh. von der Bohrtiefe, Salzhorizont in 7m Tiefe

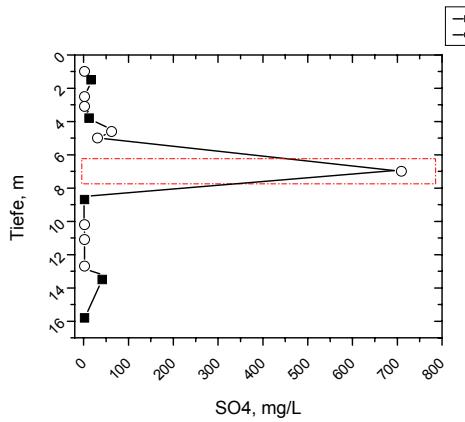


Abb.B-3: Änderung der Eluatkonzentration von SO4 (mg/L) in Abh. von der Bohrtiefe, Salzhorizont in 7m Tiefe

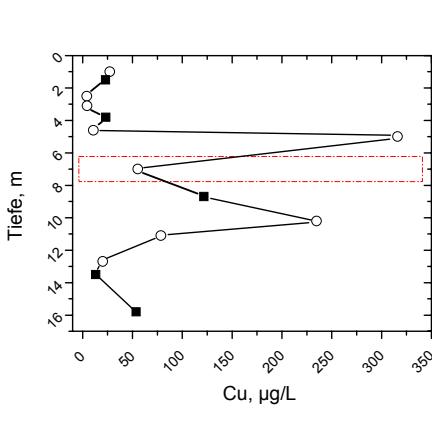


Abb.B-4: Änderung der Eluatkonzentration von Cu (µg/L) in Abh. von der Bohrtiefe, Salzhorizont in 7m Tiefe

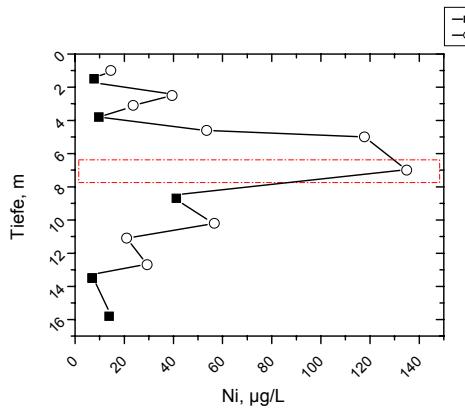


Abb.B-5: Änderung der Eluatkonzentration von Ni (µg/L) in Abh. von der Bohrtiefe, Salzhorizont in 7m Tiefe

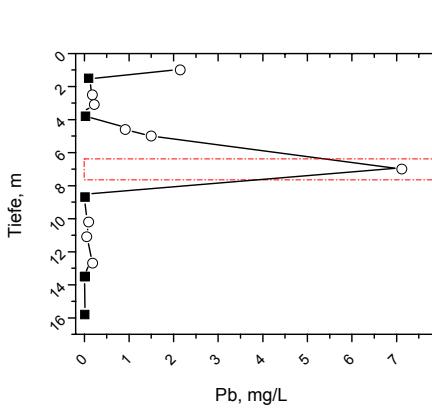
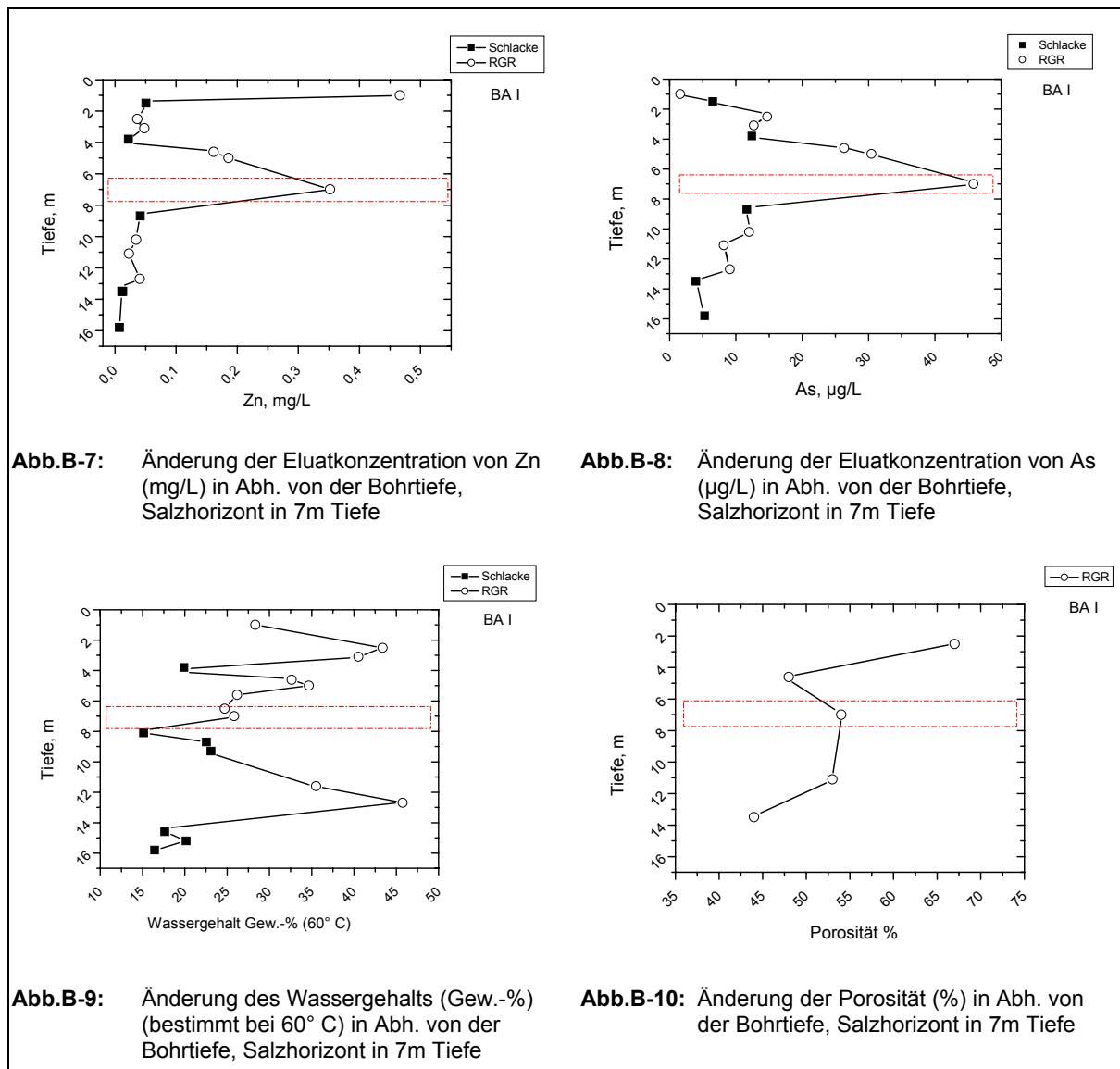


Abb.B-6: Änderung der Eluatkonzentration von Pb (mg/L) in Abh. von der Bohrtiefe, Salzhorizont in 7m Tiefe



C Frachtenberechnungen zu den Feldversuchen

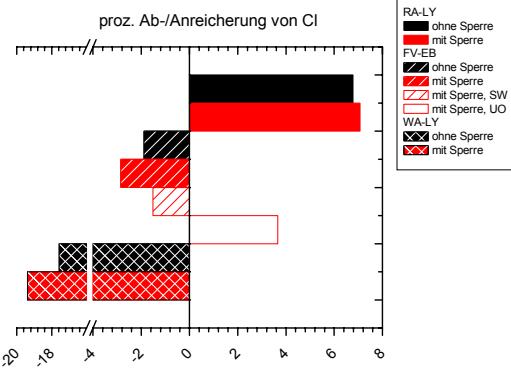


Abb.C-1: Proz. Ab-/Anreicherung von Cl bezogen zum Gesamtgehalt, Vergleich der unterschiedlichen Feldversuche

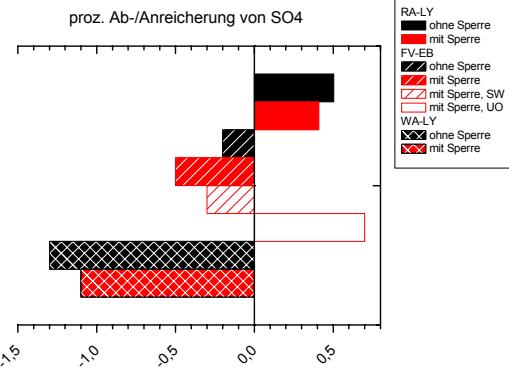


Abb.C-2: Proz. Ab-/Anreicherung von SO4 bezogen zum Gesamtgehalt, Vergleich der unterschiedlichen Feldversuche

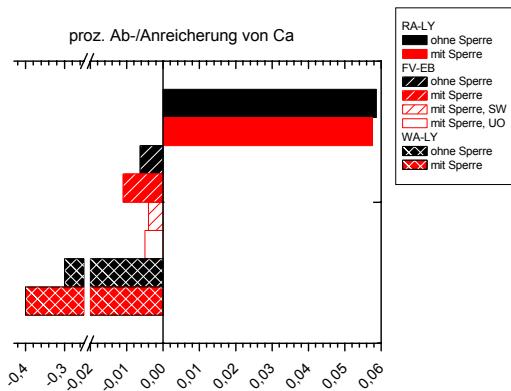


Abb.C-3: Proz. Ab-/Anreicherung von Ca bezogen zum Gesamtgehalt, Vergleich der unterschiedlichen Feldversuche

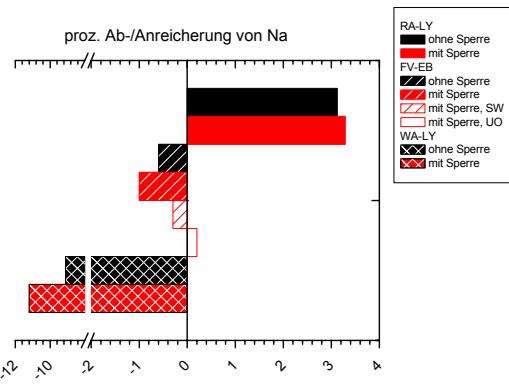


Abb.C-4: Proz. Ab-/Anreicherung von Na bezogen zum Gesamtgehalt, Vergleich der unterschiedlichen Feldversuche

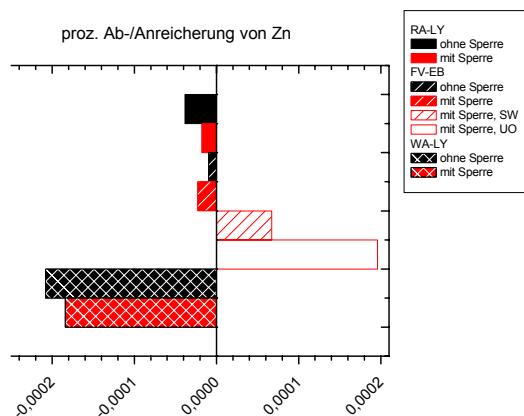


Abb.C-5: Proz. Ab-/Anreicherung von Zn bezogen zum Gesamtgehalt, Vergleich der unterschiedlichen Feldversuche

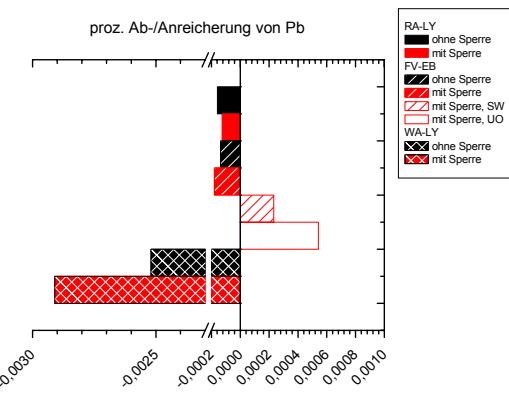
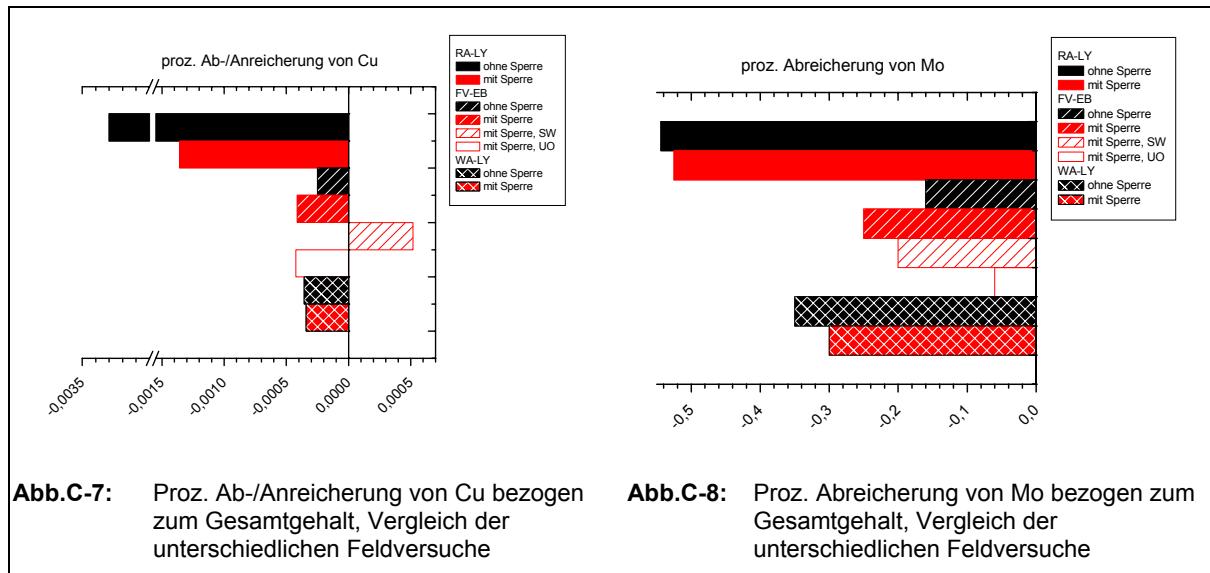
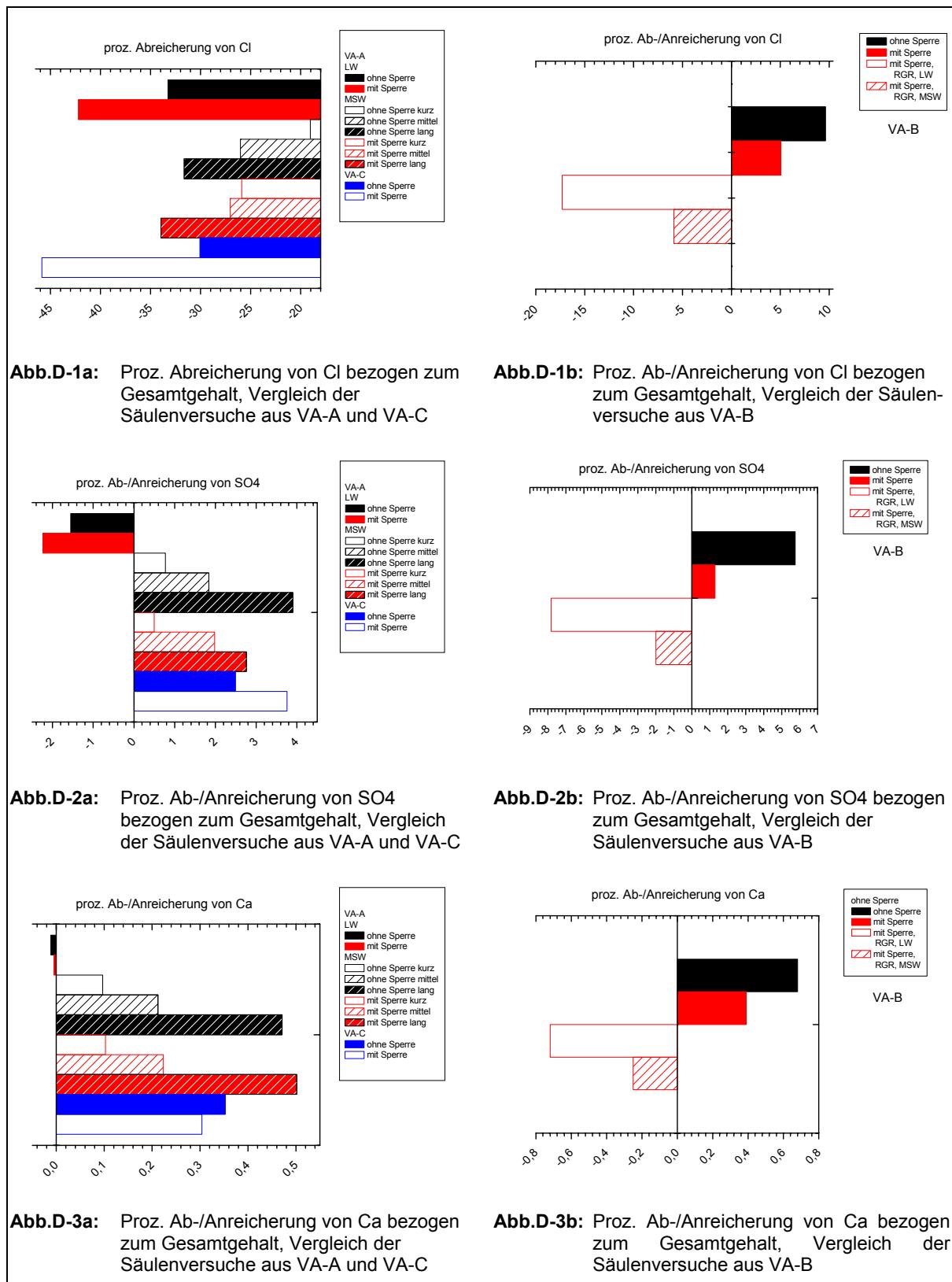
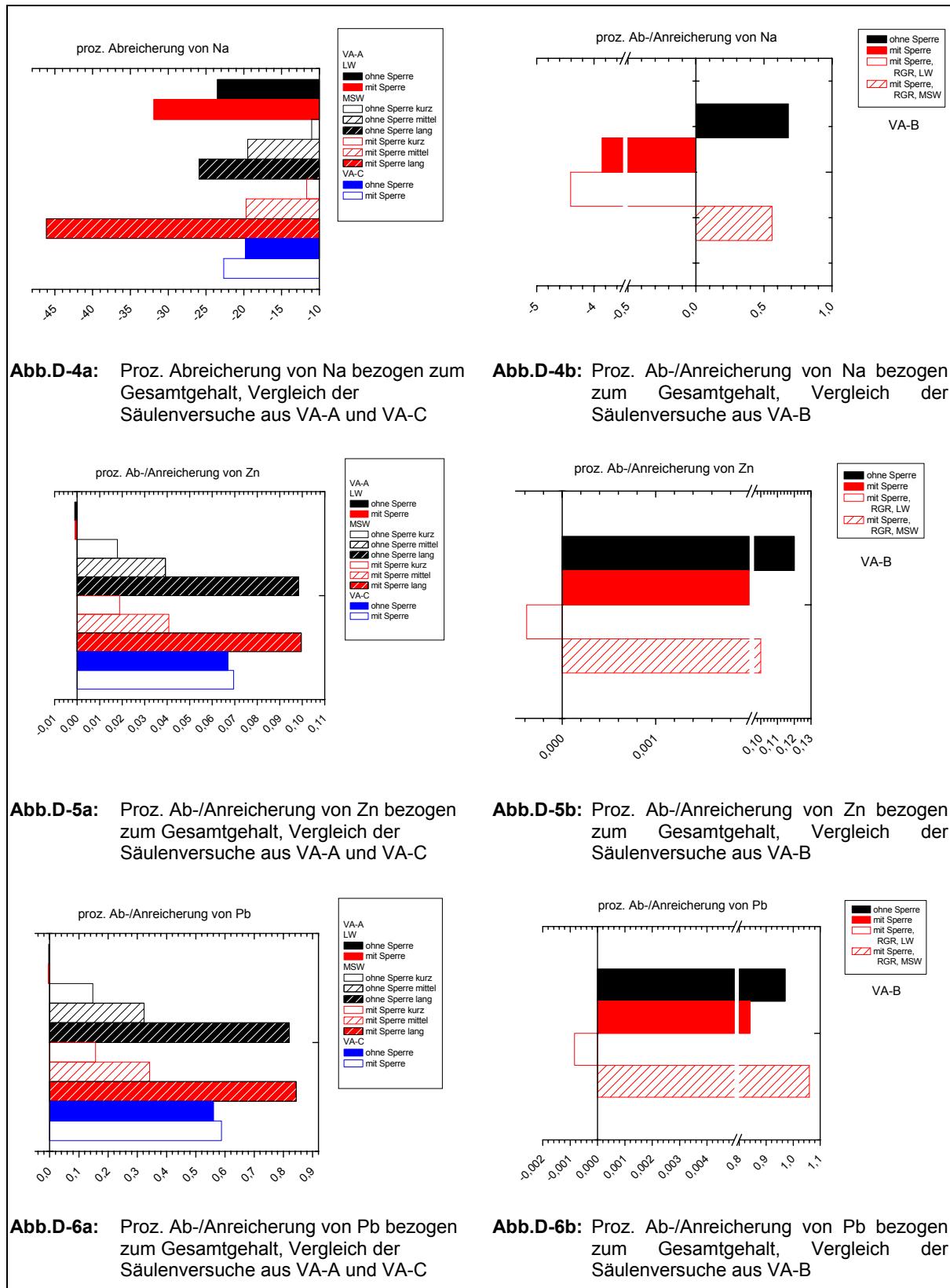


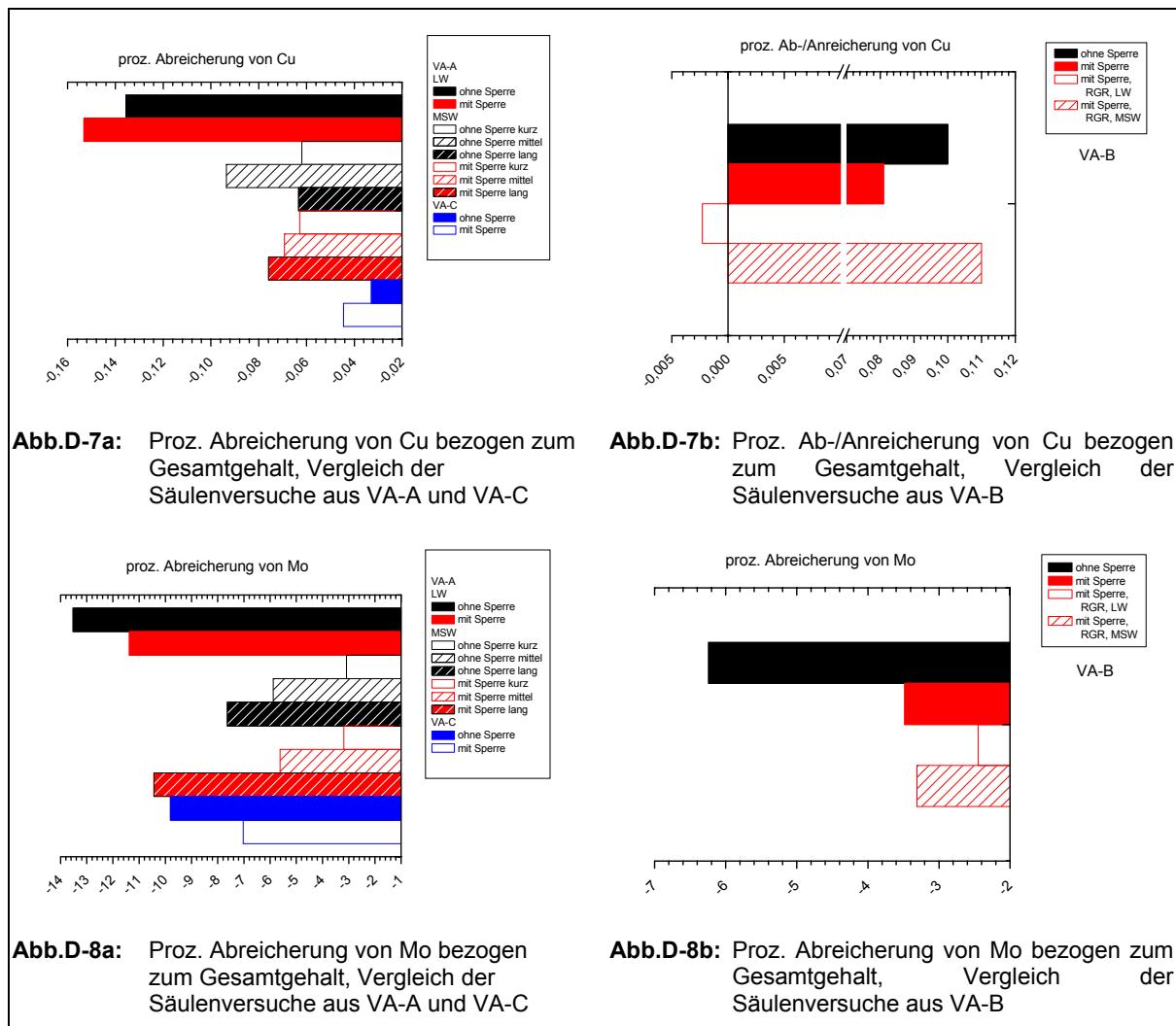
Abb.C-6: Proz. Ab-/Anreicherung von Pb bezogen zum Gesamtgehalt, Vergleich der unterschiedlichen Feldversuche



D Frachtenberechnung zu den Säulenversuchen der VA-A und VA-B







Mineralogischer Anhang

A Mineralphasen in Rückständen aus der Müllverbrennung

1. Mineralname:	Quarz
2. Chemische Formel:	SiO_2
3. Kristallsystem:	trigonal; Hochquarz - über 573° C gebildet - hexagonal
4. Morphologie:	Pseudomorphosen der trigonalen nach der hexagonalen Modifikation; radialstrahlig, stengelig, körnig, derb, oft Zwillingsbildung
5. Farbe und Glanz:	farblos und manigfaltig gefärbt; Glasglanz bis Fettglanz
6. Natürliches Vorkommen:	In hydrothermalen Gängen, als Bestandteil von Graniten, Pegmatiten, Quarzporphyren und Gneisen, als Gangart in Erzgängen, auf alpinen Klüften, in Sedimentgesteinen und Böden
7. Paragenese:	Calcit, Feldspat, Fluorit, Erze, Granat und viele andere
8. Röntgenstrukturanalyse:	3.342 (100), 4.257 (22), 1.8179 (14), 1.5418 (9), 2.457 (8), 2.282 (8), 1.3718 (8); synthetisch

1. Mineralname:	Calcit
2. Chemische Formel:	CaCO_3
3. Kristallsystem:	trigonal
4. Morphologie:	als Skalenoeder, Rhomboeder und Prisma mit Basis, prismatisch; linsenförmig, nadelig, tafelig, oft auch strahlig, kugelig, nierig, spätig, derb
5. Farbe und Glanz:	farblos, weiß, gelb, braun, durch Fremdbeimengungen vielfältig gefärbt; Glasglanz
6. Natürliches Vorkommen:	sehr häufiges gesteinbildendes Mineral, in Kalkstein, Marmor, Kreide, als Gangart von vielen hydrothermalen Gängen, in Drusen von Erzgängen, in Blasenhohlräumen von vulkanischen Gesteinen
7. Paragenese:	Dolomit, Quarz, Erzminerale, uvm.
8. Röntgenstrukturanalyse:	3.035 (100), 2.285 (18), 2.095 (18), 1.913 (17), 1.875 (17), 2.495 (14), 3.86 (12); synthetisch

1. Mineralname:	Portlandit
2. Chemische Formel:	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
3. Kristallsystem:	trigonal
4. Morphologie:	tafelig, faserig, derb
5. Farbe und Glanz:	farblos, weiß bis grünlich; Perlmuttglasglanz
6. Natürliches Vorkommen:	als Alterationsprodukt von Ca-Silikaten, in Fumarolen, als Fällungsprodukt alkalischer Quellen aus ultramafischen Gesteinen
7. Paragenese:	Afwillit, Calcit, Larnit, Spurrit, Halit, Hydrocalumit, Ettringit
8. Röntgenstrukturanalyse:	2.628 (100), 4.90 (74), 1.927 (42), 1.796 (36), 3.112 (23), 1.687 (21), 1.484 (13); synthetisch

1. Mineralname:	Gips
2. Chemische Formel:	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
3. Kristallsystem:	monoklin
4. Morphologie:	prismatisch; tafelig, auch linsenförmig, nadelig, faserig, schuppig, derb, körnig, rosettenförmig, oft Zwillinge mit einspringenden Winkeln
5. Farbe und Glanz:	farblos, weiß, durch Beimengungen auch alle anderen Farben möglich, durchsichtig bis undurchsichtig; Perlmuttglanz
6. Natürliches Vorkommen:	Sedimentgestein, auch teilweise als marine Salzablagerung, in Böden unmittelbar aus Evaporation entstanden oder am häufigsten durch die Hydratation von Anhydrit an der Erdoberfläche; in Oxidationszonen von Erzlagerstätten durch chemische Reaktionen zwischen Schwefelsäure und Karbonatgestein oder schwefelhaltiger vulkanischer Gase mit Ca-reichem Gestein; hydrothermal ziemlich selten
7. Paragenese:	Durch Übersättigung in Paragenese mit Karbonaten (Calcit, Aragonit,...) und Salze (Halit), Anhydrit,
8. Röntgenstrukturanalyse:	7.63 (100), 4.283 (100), 3.065 (75), 2.873 (45), 2.865 (35), 2.086 (25), 3.799 (17); synthetisch

1. Mineralname:	Anhydrit
2. Chemische Formel:	CaSO_4
3. Kristallsystem:	orthorhombisch
4. Morphologie:	prismatisch; tafelig, körnig, spätig, derb
5. Farbe und Glanz:	farblos, weiß, grau, blau; Glasglanz
6. Natürliches Vorkommen:	wichtiger Bestandteil in Evaporiten (Salzlagerstätten), Sedimenten, auch durch Dehydratation von Gips, in hydrothermalen Gängen oder auf alpinen Klüften
7. Paragenese:	Gips, Halit, Sylvit, Polyhalit, Karbonate
8. Röntgenstrukturanalyse:	3.499 (100), 2.849 (29), 2.3282 (20), 2.2090 (20), 1.8692 (16), 1.6483 (15), 1.7500 (11); synthetisch

1. Mineralname:	Halit, Steinsalz
2. Chemische Formel:	NaCl
3. Kristallsystem:	kubisch
4. Morphologie:	als Würfel oder seltener Oktaeder; häufig aufgewachsen, derb, körnig, faserig, dicht
5. Farbe und Glanz:	farblos, weiß, rötlich, gelb, grau, blau; Glasglanz, durchsichtig bis undurchsichtig
6. Natürliches Vorkommen:	Häufig in Sedimentgesteinen (Evaporite), an Austrittsstellen vulkanischer Gase, als Ausblühungen an der Erdoberfläche (aride, semiaride Gebiete)
7. Paragenese:	Sylvit, Polyhalit, Kieserit, Carnallit, Gips
8. Röntgenstrukturanalyse:	2.821 (100), 1.994 (55), 1.628 (15), 3.258 (13), 1.261 (11), 1.1515 (7), 1.410 (6); synthetisch

1. Mineralname:	Sylvin
2. Chemische Formel:	KCl
3. Kristallsystem:	kubisch
4. Morphologie:	Würfel in Kombination mit Oktaeder; körnig, derb
5. Farbe und Glanz:	Farblos, weiß, gelblich, orange, bräunlich; Glasglanz
6. Natürliche Vorkommen:	In Sedimentbecken als mächtige Salzlagen mit Halit, an Austrittsstellen vulkanischer Gase, als Ausblühungen in Steppen
7. Paragenese:	Halit, Carnallit, Anhydrit
8. Röntgenstrukturanalyse:	3.146 (100), 2.224 (59), 1.816 (23), 1.407 (20), 1.284 (13), 1.573 (8), 1.0490 (6); synthetisch

1. Mineralname:	Ettringit
2. Chemische Formel:	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$
3. Kristallsystem:	hexagonal
4. Morphologie:	prismatisch; nadelig, faserig
5. Farbe und Glanz:	farblos, weiß, gelb; Glasglanz
6. Natürliche Vorkommen:	in vulkanischen Gesteinen, in umgewandeltem Kalkstein durch magmatischen Kontakt oder in Xenolithen
7. Paragenese:	Portlandit, Afcwillit, Hydrocalumit, Phillipsit
8. Röntgenstrukturanalyse:	9.73 (100), 5.61 (80), 3.88 (50), 2.564 (45), 2.209 (45), 2.773 (40), 4.69 (39); synthetisch

1. Mineralname:	Hydrocalumit
2. Chemische Formel:	$\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6[\text{Cl}_{1-x}(\text{OH})_x] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
3. Kristallsystem:	monoklin
4. Morphologie:	pseudohexagonal; tafelig, derb
5. Farbe und Glanz:	farblos bis hellgrün; Glasglanz, durchscheinend
6. Natürliche Vorkommen:	selten, hydrothermal in Skarn, in Xenolithen
7. Paragenese:	Portlandit, Afcwillit, Ettringit, Hydrogrossular, Calcit
8. Röntgenstrukturanalyse:	7.92 (vvs), 3.99 (vs), 2.87 (s), 2.46 (s), 1.657 (ms), 2.70 (m), 2.24 (m); Scawt Hill (Irland)

1. Mineralname:	Sodalith
2. Chemische Formel:	$\text{Na}_8[\text{Cl}_2/(\text{AlSiO}_4)_6]$
3. Kristallsystem:	kubisch
4. Morphologie:	als Rhombendodekaeder; derb, körnig,
5. Farbe und Glanz:	farblos, weiß, grau, gelblich, grünlich, hell bis dunkelblau, rötlich; Glasglanz bis Fettglanz
6. Natürliche Vorkommen:	in Syeniten, Basalten, Phonolithen, Tephriten, in vulkanischen Auswürflingen
7. Paragenese:	Nephelin, Hämatit, Augit, Hornblende, Cancrinit
8. Röntgenstrukturanalyse:	3.63 (100), 6.30 (80), 2.10 (80), 2.57 (70), 2.38 (70), 1.569 (60), 1.480 (60); Ice River Canada

1. Mineralname und Mineralgruppe:	Cancrinit, Cancrinit-Gruppe
2. Chemische Formel:	$\text{Na}_6\text{Ca}_2[(\text{CO}_3)/(\text{AlSiO}_4)_3]_2$
3. Kristallsystem:	hexagonal
4. Morphologie:	prismatisch; nadelig, kurzsäulig, körnig, derb
5. Farbe und Glanz:	farblos, weiß, hellblau, honiggelb, orange, rosa; Glasglanz bis Perlmutt glanz
6. Natürliche Vorkommen:	als Primärmineral in alkalischen magmatischen Gesteinen, in Nephelinsyeniten und vulkanischen Auswürflingen
7. Paragenese:	Nephelin, Sanidin, Sodalith
8. Röntgenstrukturanalyse:	3.21 (100), 4.64 (90), 3.64 (70), 2.099 (70), 1.488 (50), 1.447 (50), 10.92 (40); York River Bancroft Kanada

1. Mineralname und Mineralgruppe:	Afghanit, Cancrinit-Gruppe
2. Chemische Formel:	$(\text{Na},\text{Ca},\text{K})_8(\text{Si},\text{Al})_{12}\text{O}_{24}(\text{SO}_4,\text{Cl},\text{CO}_3)_3 \text{H}_2\text{O}$
3. Kristallsystem:	trigonal
4. Morphologie:	prismatisch-bipyramidal; säulig-spindelförmig, körnig, derb
5. Farbe und Glanz:	tintenblau, hellblau; Glasglanz
6. Natürliche Vorkommen:	in vulkanischen Gesteinen, kontaktmetasomatisch, in Na-reichen Marmoren
7. Paragenese:	Lasurit, Sodalith, Nephelin, Olivin, Calcit, Pyrit, Cancrinit
8. Röntgenstrukturanalyse:	3.688 (100), 3.298 (100), 4.82 (80), 3.997 (60), 2.130 (60), 1.792 (60); Sar-e-Sang Afghanistan

1. Mineralname und Mineralgruppe:	Kröhnkit, Kröhnkit-Gruppe
2. Chemische Formel:	$\text{Na}_2\text{Cu}(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
3. Kristallsystem:	monoklin
4. Morphologie:	prismatisch; pseudooktaedrische Kristalle; massive Krusten, faserige oder körnige Aggregate
5. Farbe und Glanz:	hellblau, grünblau, grün; Glasglanz
6. Natürliche Vorkommen:	Sekundär in Oxidationszonen von Cu-Lagerstätten; in ariden Wüstengebieten
7. Paragenese:	Chalkanthit, Atacamit, Antlerit, Blödit
8. Röntgenstrukturanalyse:	6.33 (100), 3.278 (90), 2.757 (90), 2.925 (80), 3.715 (60), 4.145 (40), 3.099 (40), Chuquicamata Chile

1. Mineralname:	Brianyoungit
2. Chemische Formel:	Zn ₃ [(OH) ₄ /(CO ₃ ,SO ₄)]
3. Kristallsystem:	orthorhombisch oder monoklin
4. Morphologie:	blättrig, rosettenförmig
5. Farbe und Glanz:	weiß; Glasglanz
6. Natürliche Vorkommen:	selten, in Erzlagerstätten entstanden nach Bildung der Primärerze als Sekundärmineral, in der Oxidationszone von Pb-Zn-Erzen, umgeben von Kalkstein
7. Paragenese:	Gips, Smithsonit, Pyrit, Goethit
8. Röntgenstrukturanalyse:	15.44 (100), 7.88 (100), 2.714 (40), 1.565 (30b), 5.25 (20), 2.577 (20), 3.397 (20); Brownley Hill Mine England

1. Mineralname und Mineralgruppe:	Gehlenit, Melilith-Gruppe
2. Chemische Formel:	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇
3. Kristallsystem:	tetragonal
4. Morphologie:	kurzprismatisch; dicktafelig, körnig, derb
5. Farbe und Glanz:	farblos, weiß, grau, gelb, braun; Glasglanz
6. Natürliche Vorkommen:	in Ca-reichen ultramafischen Vulkaniten und in kontaktmetamorphen Gesteinen
7. Paragenese:	Karbonate, Stilbit, Heulandit, Natrolith
8. Röntgenstrukturanalyse:	2.848 (100), 1.818 (75), 1.921 (64), 3.066 ((43), 2.437 (38), 1.768 (36), 2.738 (32); Crestmore Kalifornien

1. Mineralname und Mineralgruppe:	Magnesioferrit, Spinell-Gruppe
2. Chemische Formel:	MgFe ₂ O ₄
3. Kristallsystem:	kubisch
4. Morphologie:	oktaedrisch; körnig, derb
5. Farbe und Glanz:	Schwarz bis braun oder rot; metallischer Glanz
6. Natürliche Vorkommen:	in Fumarolen, in hochmetamorphen Gesteinen, als Begleitmineral in Kimberlitien, Karbonatiten, alkalischen Gabbros
7. Paragenese:	Hämatit, Ti-Magnetit, Fe-reicher Diopsid
8. Röntgenstrukturanalyse:	2.525 (100), 2.96 (40), 1.481 (35), 1.612 (30), 2.094 (25), 1.709 (14), 1.090 (12); synthetisch

B Mineralphasen in den Ausgangsmaterialien (Schlacke A und B)

Abb.B-1a: Weiße Salzphase der Schlacke A,
Vergrößerung 10-fach

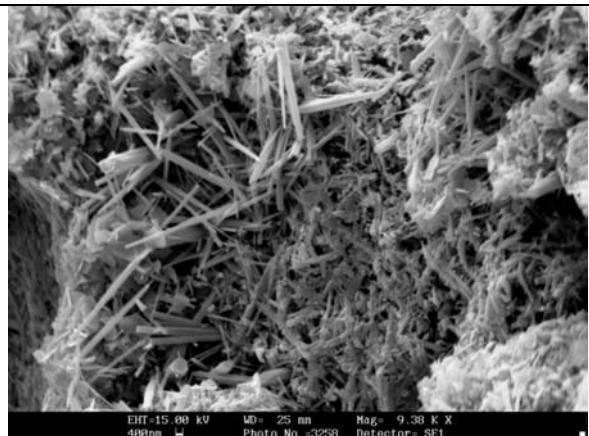


Abb.B-1b: Weiße Salzphase aus der Schlacke A,
Vergrößerung 9.380-fach



Abb.B-2a: Türkise Salzphase der Schlacke A,
Vergrößerung 25-fach

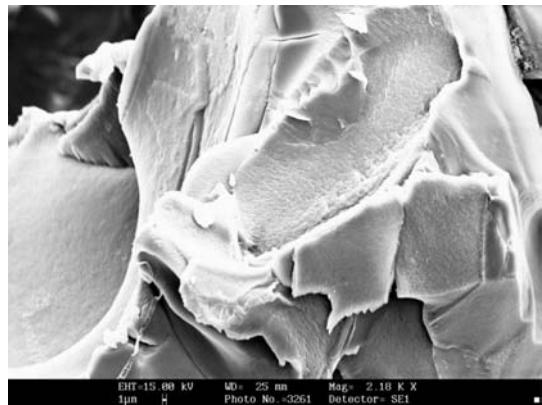


Abb.B-2b: Türkise Salzphase aus der Schlacke A,
Vergrößerung 2.100-fach

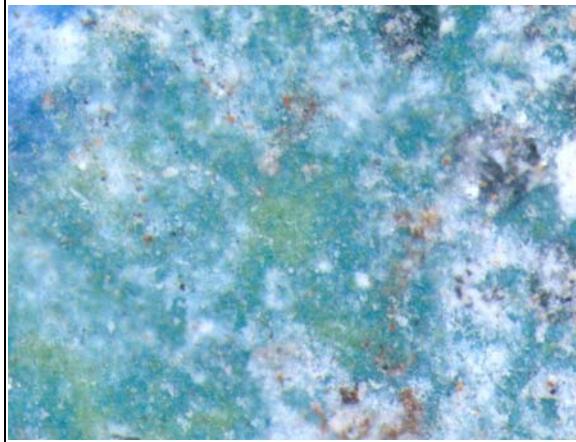


Abb.B-3a: Türkise Salzphase der Schlacke B,
Vergrößerung 25-fach

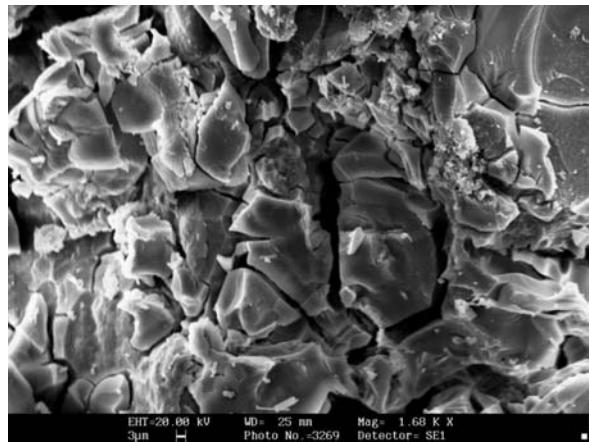


Abb.B-3b: Türkise Salzphase aus der Schlacke B,
Vergrößerung 1.600-fach

C Mineralphasen in Bohrproben aus BA 1 (Monodeponie Waldering)

Weisse Salzphasen



Abb.C-1a: Weisse Salzphase aus einer Bohrtiefe von 5,5 m (BA 1-13), Vergrößerung 20-fach

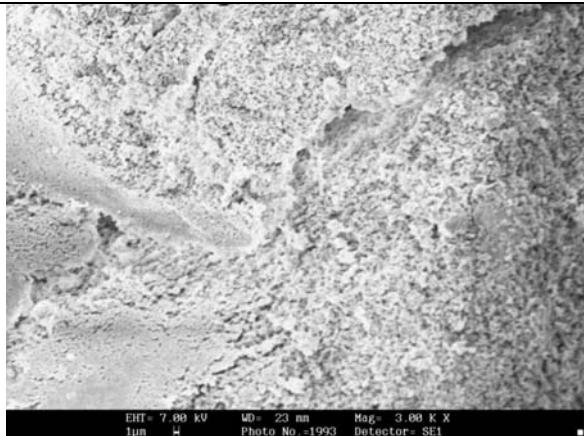


Abb.C-1b: Weisse Salzphase aus einer Bohrtiefe von 5,5 m (BA 1-13), Vergrößerung 3.000-fach



Abb.C-2a: Weisse Salzphase aus einer Bohrtiefe von 6,5 m (BA 1-14), Vergrößerung 12,5-fach



Abb.C-2b: Weisse Salzphase aus einer Bohrtiefe von 6,5 m (BA 1-14), Vergrößerung 1.000-fach



Abb.C-3a: Weisse Salzphase aus einer Bohrtiefe von 7 m (BA 1-15) - Salzhorizont, Vergrößerung 20-fach



Abb.C-3b: Weisse Salzphase aus einer Bohrtiefe von 7 m (BA 1-15) - Salzhorizont, Vergrößerung 1.000-fach



Abb.C-4a: Weiße Salzphase aus einer Bohrtiefe von 8,5 m (BA 1-17), Vergrößerung 20-fach

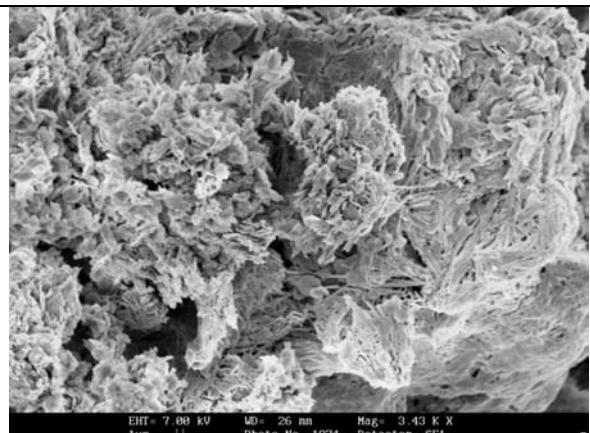


Abb.C-4b: Weiße Salzphase aus einer Bohrtiefe von 8,5 m (BA 1-17), Vergrößerung 3.430-fach

Beige Salzphase

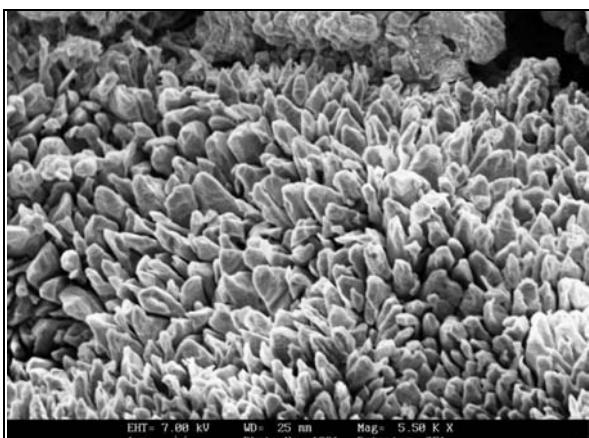


Abb.D-5a: Beige Salzphase aus einer Bohrtiefe von 5,5 m (BA 1-13), Vergrößerung 5.500-fach

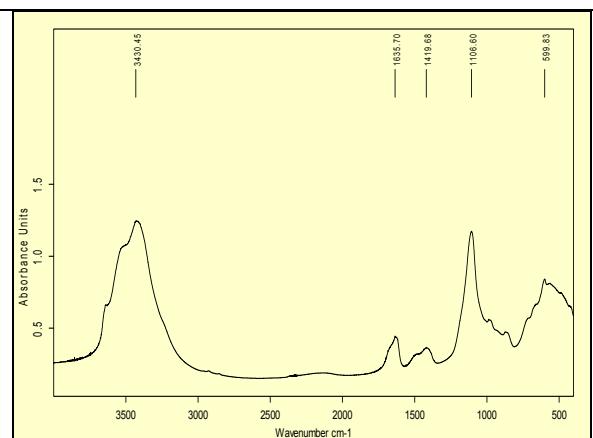


Abb.D-5b: Beige Salzphase aus einer Bohrtiefe von 5,5 m (BA 1-13), IR-Spektrum

Blaue und türkise Salzphasen

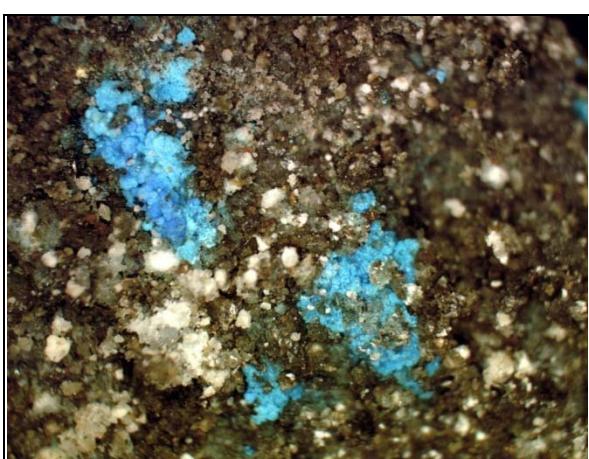


Abb.C-6a: Blaue und türkise Salzphase aus einer Bohrtiefe von 5,5 m (BA 1-13), Vergrößerung 8-fach

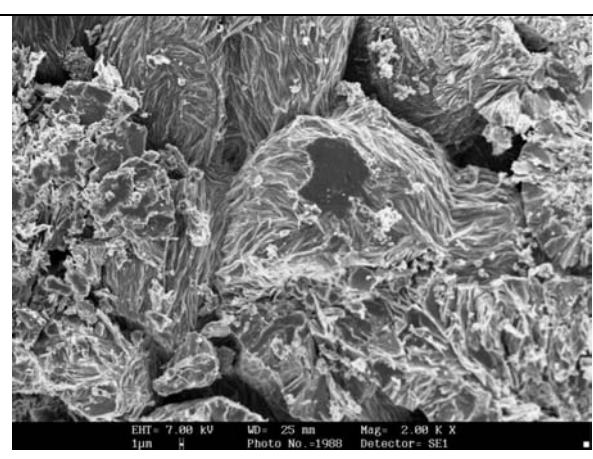


Abb.C-6b: Blaue Salzphase aus einer Bohrtiefe von 5,5 m (BA 1-13), Vergrößerung 2.000-fach

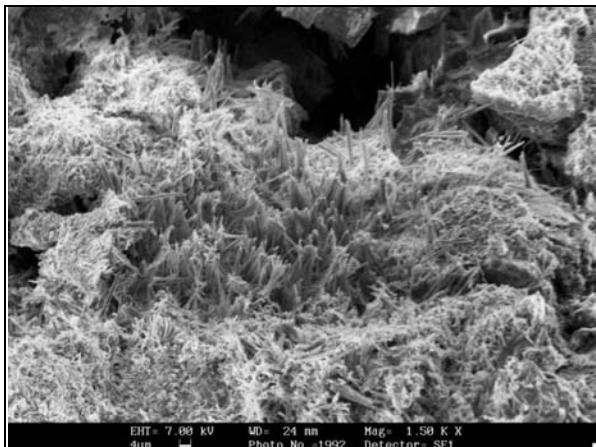


Abb.C-7a: Türkise Salzphase aus einer Bohrtiefe von 5,5 m (BA 1-13), Vergrößerung 1.500-fach

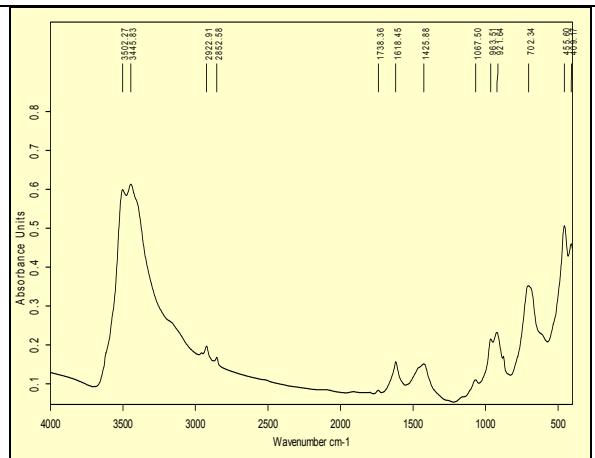


Abb.C-7b: Blaue Salzphase aus einer Bohrtiefe von 5,5 m (BA 1-13), IR-Spektrum

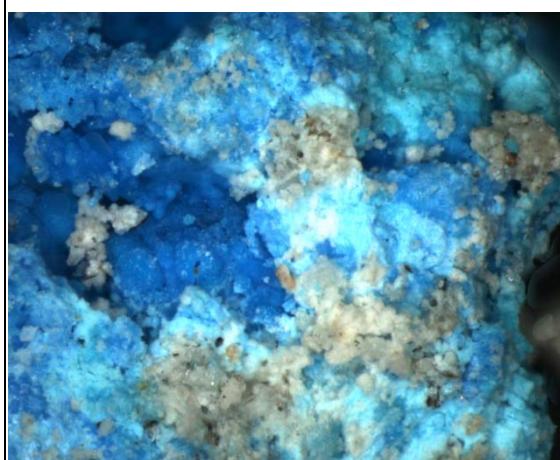


Abb.C-8a: Blaue und türkise Salzphasen aus einer Bohrtiefe von 7 m (BA 1-15) – Salzhorizont, Vergrößerung 25-fach

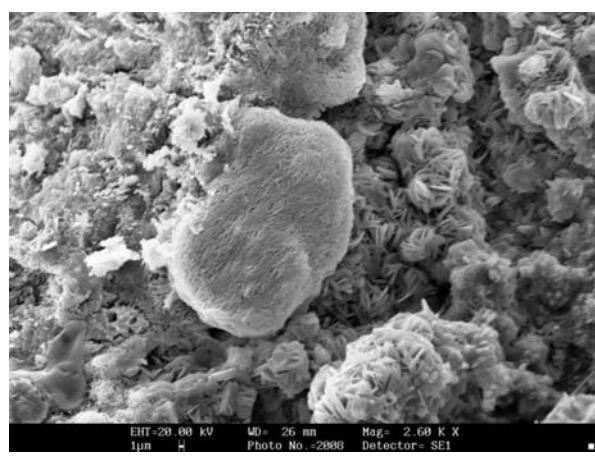


Abb.C-8b: Türkise Salzphase aus einer Bohrtiefe von 7 m (BA 1-15), Vergrößerung 2.600-fach

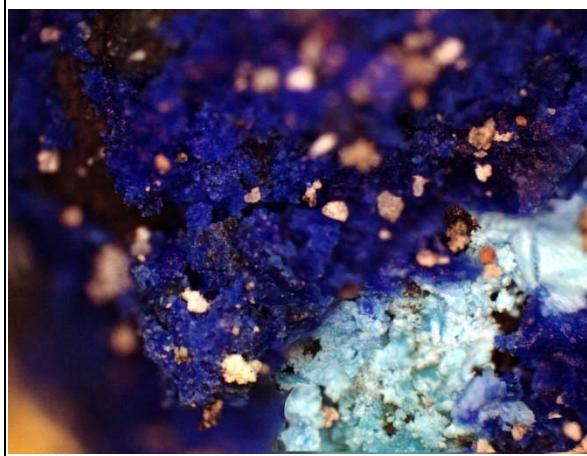


Abb.C-9a: Blaue und türkise Salzphasen aus einer Bohrtiefe von 8,5 m (BA 1-17), Vergrößerung 20-fach

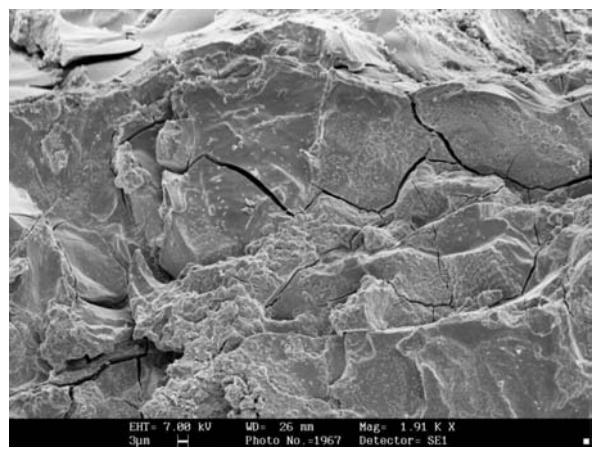


Abb.C-9b: Blaue Salzphase aus einer Bohrtiefe von 8,5 m (BA 1-17), Vergrößerung 3.430-fach

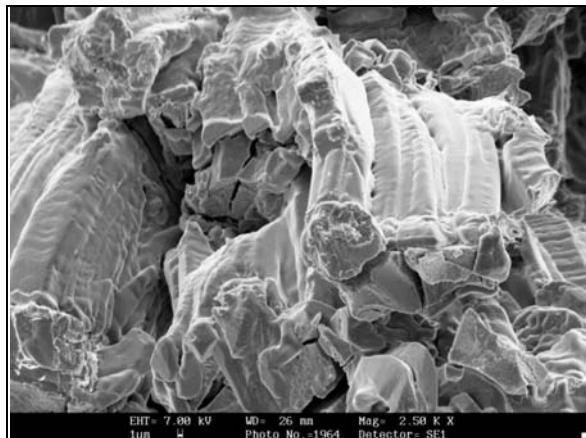


Abb.C-10a: Türkise Salzphase aus einer Bohrtiefe von 8,5 m (BA 1-17), Vergrößerung 2.500-fach

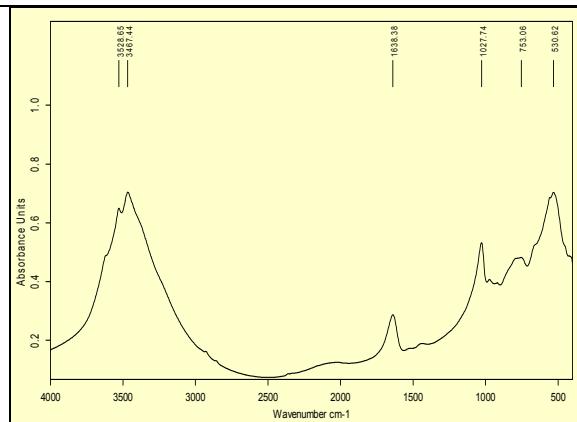


Abb.C-10b: Türkise Salzphase aus einer Bohrtiefe von 8,5 m (BA 1-17), IR-Spektrum

Grüne Salzphasen

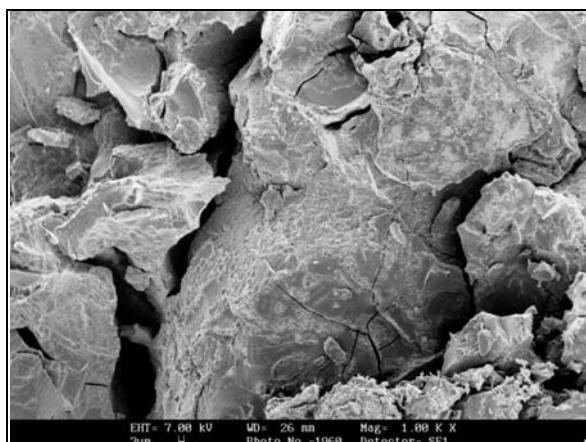


Abb.C-11a: Grüne Salzphase aus einer Bohrtiefe von 8,5 m (BA 1-17), Vergrößerung 3.430-fach

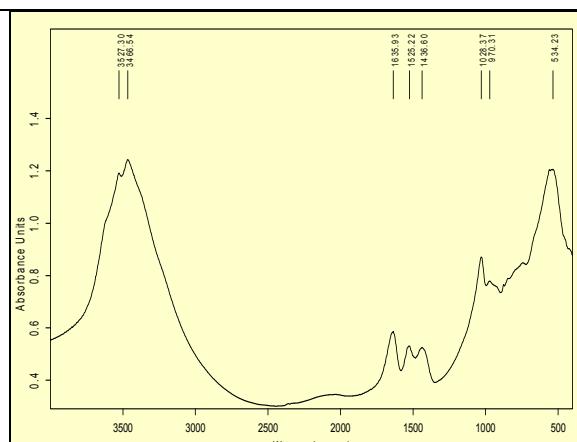


Abb.D-11b: Grüne Salzphase aus einer Bohrtiefe von 8,5 m (BA 1-17), IR-Spektrum

Persönliche Daten

Daniela Sager
geboren am 7.2.1979
wohnhaft in Salzburg

Ausbildungsweg

- | | |
|-------------|--|
| 1997 - 2000 | Studium der Erdwissenschaften an der Karl-Franzens-Universität in Graz: Erste Diplomprüfung am 20.12.1999 ; Studium der Technischen Geologie an der TU Graz |
| 2000 – 2003 | Studium der Geologie an der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Salzburg – Zweite Diplomprüfung am 5.11.2003 ; Thema: „Untersuchung zur Entfernung von Metallen aus Grubenwässern mit Hilfe von Kreidekalk“ betreut durch Univ. Prof. Dr. Wolfgang Riepe |
| 2004 – 2007 | Promotionsstudium an der Ludwig-Maximilians-Universität in München, Department für Geo- und Umweltwissenschaften – Sektion Mineralogie; Thema: „Lösungsprozesse und Transport leichtlöslicher Salze in Monodeponien für MV-Rückstände“; betreut durch Univ. Prof. Dr. Soraya Heuss-Aßbichler; Disputation am 20.12.2007 |

Berufst igkeit

- Jänner 2004 – Juni 2007 Wiss. Projektmitarbeiterin am Forschungs- und Entwicklungszentrum für Sondertechnologien in Schwabach/Nürnberg (FES); EU23: "Salzhorizont: Fixieren leichtlöslicher Spezies innerhalb des Deponiekörpers" im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz

Zusätzliche Aktivitäten an der Universität München

- | | |
|-------------------|--|
| | Tutorin der Sektion Mineralogie für Übungen zur Mineral- und Gesteinsbestimmung sowie Mikroskopierübungen |
| 30.6. – 31.8.2006 | Teilnahme am Rise Austauschprogramm des DAAD: wiss. Betreuerin in München für Zed Diyana Zulkafli – Studentin der Northwestern Universität, Evanston/Illinois (Einführen in wiss. Arbeiten, Literaturrecherche, Datenaufbereitung, chem. Arbeiten im Labor, Mithilfe bei Labor- und Feldversuchen) |

Die im Vorhaben erzielten Ergebnisse wurden fortlaufend auf Fachtagungen vorgestellt und in den zugehörigen Tagungsbänden veröffentlicht. Während der Projektmitarbeit in Schwabach wurden drei Zwischenberichte (Sager et al., 2004, 2005 und 2006) und ein Endbericht (Sager et al., 2007) verfasst.

Fachtagung	Datum	Präsentation	Titel
Fachtagung am Landesamt für Umwelt in Augsburg – „Deponieforschung in Bayern“	8.6. 2005	Vortrag	„Einbindung von Schadstoffen in Schlackedeponien; Speicherminerale, Salzhorizonte“
SARDINIA 2005 (Tenth International Waste Management and Landfill Symposium)	3. - 7. 10.2005	Poster	„Salt horizon: First results on retaining highly soluble salts within a landfill“
Abfallforschungstage in Hannover	16. - 17. 5.2006	Vortrag	„Transport leichtlöslicher Salze in Monodeponien für MV-Rückstände“
Tagung der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft in Hannover	25. - 27 9.2006	Vortrag	„Transport of highly soluble salts in MSWI-monofills residues“
Fachtagung am Landesamt für Umwelt in Augsburg- "Deponien zwischen 2005 und 2009 – Ende oder Weiterbetrieb"	27.09.2007	Vortrag	„Was bewirkt ein Korngrößenwechsel im Aufbau einer Deponie? Dargestellt am Beispiel einer MV-Deponie“
SARDINIA 2007 (Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium)	1. - 5. 10.2007	Vortrag	„The effect of grain size changeover on the mobilisation of highly soluble salts and heavy metals within landfills“