

Transport leichtlöslicher Salze in Monodeponien für MV-Rückstände

Daniela Sager^{1), 2)}, Soraya Heuss-Aßbichler¹⁾, Adi Heindl²⁾

¹⁾ Department für Geo- und Umweltwissenschaften
Ludwig-Maximilians-Universität München

²⁾ Forschungs- und Entwicklungszentrum für Sondertechnologien FES, Schwabach

Retaining highly soluble salts within a landfill

Abstract

Heavy metals and chloride are environmentally relevant pollutants in residues from municipal solid waste incineration (MSWI) and it is essential to immobilize them. This study employs the principles of salty crusts as physical barriers in soils for monofills with MSWI-residues. Materials with lower permeability, than the residues, form hydraulic barrier layers and enhance the concentration of soluble salts in the leachate, causing precipitation of the highly soluble salts out of the pore solution. Experiments with Perspex columns were performed to study the effect on the discharge of salts with the leachate.

Abstract deutsch

Verschiedene umweltrelevante Elemente in MV-Schlacken wie Schwermetalle oder Chlorid können im Laufe der Deponierung gelöst werden und über das Sickerwasser aus der Deponie gelangen. Es ist anzunehmen, dass die Mobilisation von Chlorid und Sulfat mit sehr hohen Konzentrationen über Jahrzehnte anhält („wash off“). Die Freisetzung von Schwermetallen kann zeitverzögert nach einer Verschiebung des Systems zu niedrigeren pH-Werten infolge der Abnahme der Karbonatpufferung erfolgen (FÖRSTNER & HIRSCHMANN, 1997). In dem von uns ausgearbeiteten neuen Ansatz wird das Prinzip der Versalzung und der Bildung von salzreichen Schichten in Böden gezielt auf Monodeponien für MV-Rückstände angewandt. Schichten geringerer Durchlässigkeit als MV-Schlacke stellen hydraulische Barrieren dar, die eine Aufkonzentration der Salze im Sickerwasser oberhalb dieser Sperrschicht fördern und so eine Ausfällung der leichtlöslichen Salze aus der Porenlösung begünstigen. Um diese These zu überprüfen, wurden Säulenversuche initialisiert.

Keywords

MV-Schlacke, Monodeponie, Salzphasen, innere Barriere, Säulenversuche, Sperrschicht, Inkrustationen

1 Einleitung

Nach der deutschen Gesetzeslage darf seit 1. Juni 2005 Siedlungsmüll nicht mehr unbehandelt deponiert werden. Die thermische Behandlung von Siedlungsmüll bietet die Möglichkeit zur Reduzierung der Masse um ca. 70 % und des Volumens um ca. 90 %. Im Allgemeinen führt die Verbrennung zu einer Aufkonzentrierung der im Abfall vorhandenen Schwermetalle. Die Verbrennungsprodukte, die bei ca. 800 - 1.000° C im Brenn-

bett entstehen, stellen bei Atmosphärenbedingungen meist thermodynamisch instabile Phasen dar und weisen daher ein hohes Reaktionspotential auf. Verschiedene Ansätze der Speichermineralbildung beabsichtigen umweltrelevante Schadstoffe in möglichst schwerlösliche Verbindungen zu fixieren und somit das Auslaugverhalten zu verringern. Im Rahmen eines Versuchsvorhabens auf der Monodeponie Waldering (Deponieklasse III) der Stadtwerke Rosenheim wurden bis zum Dezember 2004 Rauchgasreinigungsrückstände (RGR) und MV-Schlacken in Sandwichbauweise eingebaut. Stoffbilanzen in einem Bauabschnitt der Deponie haben gezeigt, dass mit dem Sickerwasser erheblich geringere Salzkonzentrationen als erwartet ausgetragen wurden. Die Stadtwerke Rosenheim haben daraufhin eine Voruntersuchung gestartet und im Jahr 1995 in diesem Bauabschnitt eine Bohrung durchgeführt. In den Bohrproben wurde zum Teil ein hoher Anteil des Minerals Ettringit $[\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}]$ beobachtet (PICOLAB, 1995). Daraufhin wurde angenommen, dass Ettringit als Speichermineral neben Chlorid insbesondere Schwermetalle wie Blei 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). Es konnte gezeigt werden, dass sich die Ettringitkonzentration von 25 % auf 3 % verringert hat (HEUSS-ASSBICHLER ET AL. 2002).

Die deponierten RGR bestehen vorwiegend aus CaCl_2 . Die chemische und mineralogische Untersuchung ergab für Bohrproben aus einer Bohrtiefe von sieben Metern auffallend hohe Konzentrationen leichtlöslicher Salzphasen (zusammengefasst als Leitfähigkeit in mS/cm , Abb. 1A). In dieser Zone hat sich eine etwa zwei Meter mächtige Salzschicht bestehend aus NaCl und KCl aufgebaut (HEUSS-ASSBICHLER ET AL. 2004). Bemerkenswert sind hohe Konzentrationen an Blei und Arsen im Eluat dieser Feststoffproben (Abb. 1B und 1C). Es ist auffallend, dass in den Schlackeproben oberhalb und unterhalb der salzreichen Schicht trockenere Bedingungen mit niedrigen Wassergehalten bis etwa 15 Gew. - % beobachtet wurden. Aus Deponieberichten konnte entnommen werden, dass etwa in der Höhe der jetzt vorliegenden Salzschicht während einer längeren Zeitperiode keine Schlacke deponiert wurde und dieser Deponiebereich als Straße für schwere Baufahrzeuge genutzt wurde. Es ist anzunehmen, dass diese Auflast lokal eine Änderung der Permeabilität bewirkte und zu einer Änderung in der Durchflussrate des Sickerwassers geführt hat.

Diese Beobachtungen waren Anlass, dass ein anderes Wirkungsschema für die geringen Salzkonzentrationen im Sickerwasser in Betracht zu ziehen ist. Einen vollständig neuen Ansatz im Sinne einer „inneren Barriere“ stellt die Bildung eines Salzhorizonts innerhalb des Deponiekörpers dar: Leichtlösliche Salzphasen im Sickerwasser werden aufkonzentriert und ihre Ausfällung aus der Porenlösung begünstigt. Mit der Ausbildung eines Salzhorizonts können Schwermetallsalze auf Grund ihrer geringeren Restlöslich-

keit aus dem Sickerwasser extrahiert werden, so dass der Salzhorizont zusätzlich als „Filterschicht“ wirken kann.

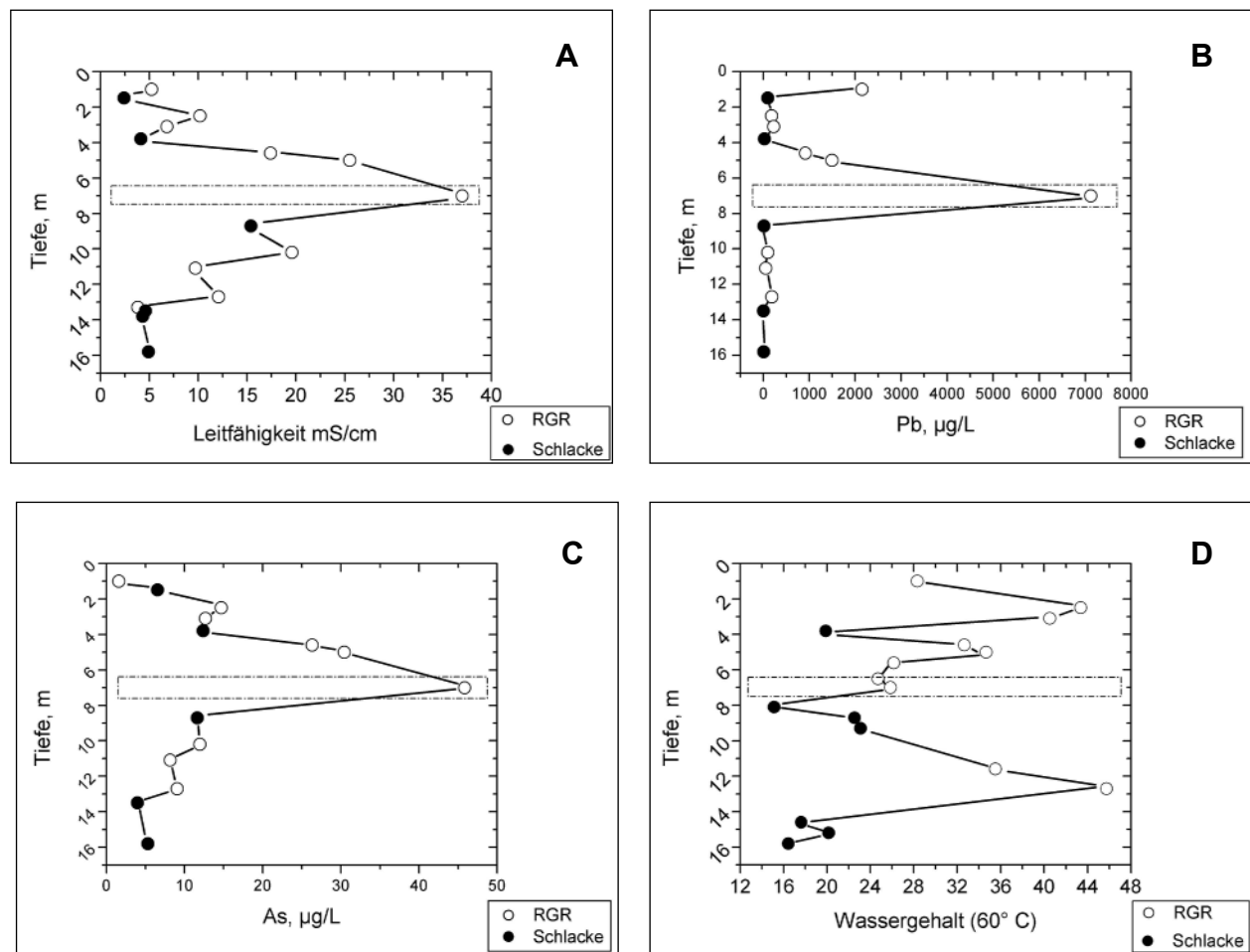


Abbildung 1 Eluatwerte der Feststoffproben in Abhängigkeit von der Tiefe - A) Leitfähigkeit in mS/cm, B) Pb-Konzentration in µg/L, C) As-Konzentration in µg/L und D) Wassergehalt in Gew.-% der bei 60° C getrockneten Proben

2 Versuchsdurchführung

2.1 Materialien

MV-Schlacke stellt ein sehr inhomogenes Phasengemisch dar. Durch ihre Aufbereitung und Weiterbehandlung wird das Elutionsverhalten des Materials stark beeinflusst. Für Säulenversuche wurden zwei verschiedene MV-Schlacken verwendet. Es wurde jeweils eine repräsentative Probe des Ausgangsmaterials als Bezugsgröße analysiert.

Die MV-Schlacke der MVA-Ingolstadt (Schlacke A) wird nach der Aufbereitung direkt ohne Zwischenlagerung auf der Deponie abgelagert. Die MV-Schlacke des MHKW-Rosenheim (Schlacke B) wird mehrfach umgelagert. Bei der Aufbereitung wird sie entschrottet und in zwei Fraktionen getrennt. Dies soll ein beschleunigtes Abfließen ver-

schiedener chemischer und physikalischer Reaktionsprozesse bewirken und damit zu einer raschen Alterung der Schlacke beitragen (FÖRSTNER & HIRSCHMANN, 1997).

Die Fraktion 0-4 mm, hier als Schlacke-Feinkorn (SFK) bezeichnet, wurde bei den Versuchsanordnungen als Sperrschicht (Sperrschicht) zur Verringerung der Durchlässigkeit verwendet.

Die unterschiedliche Schlackebehandlung spiegelt sich in den chemischen Analysen wider. Bezüglich der leichtlöslichen Salze im Feststoff der eingesetzten Materialien ergeben die Untersuchungen (RFA) folgende Unterschiede: Schlacke A weist höhere Chlorid- sowie Natriumgehalte auf als Schlacke B, was auf die unverzügliche Deponierung zurückzuführen ist (Tab. 1). Die erhöhten Kaliumgehalte in der Schlacke A sind vermutlich auf Beimengungen von Holzasche zurückzuführen. Trotz der längeren Lagerungszeit sind die Sulfat- und Kupfergehalte in der MV-Schlacke B höher. Die Gehalte an Calcium entsprechen einander.

Tabelle 1 Vergleich der chemischen Zusammensetzung im Feststoff (RFA) von Schlacke A (MVA Ingolstadt) und Schlacke B (MHKW Rosenheim), SFK und RGR

	Schlacke A	Schlacke B	SFK	RGR
CaO (Gew.-%)	20,0	22,4	22,9	44,5
K ₂ O (Gew.-%)	1,4	0,8	0,8	2,2
Na ₂ O (Gew.-%)	1,7	1,4	1,2	1,9
SO ₃ (Gew.-%)	1,8	2,6	2,7	2,9
Cl (ppm)	10.150	7.400	6.160	109.200
Cu (ppm)	5.000	6.400	6.000	800

Die chemische Zusammensetzung der zwei Kornfraktionen der Schlacke A stimmt größtenteils miteinander überein. Bemerkenswert sind nur die geringeren Chloridgehalte für SFK. Die Rauchgasreinigungsrückstände (RGR) sind auf Grund ihrer sehr hohen Chloridgehalte auffallend.

Im Eluat wurden der pH-Wert, die Leitfähigkeit und Konzentrationen der gelösten Elemente bestimmt (Tab. 2). Der pH-Wert ist für die Schlacke A mit 12,1 basischer als für Schlacke B mit 10,6 und entspricht dem der RGR. Die Leitfähigkeit gibt Auskunft über die leichtlöslichen Phasen. Je geringer die Leitfähigkeit ist, desto weniger leichtlösliche Spezies ist in Lösung. Im Eluat der Schlacke A wurden mehr leichtlösliche Phasen in Lösung gebracht als bei der Schlacke B. Das zeigt sich entsprechend in den erhöhten Chlorid-, Natrium- und Kaliumkonzentrationen. Analog zu der Feststoffanalyse ist die Sulfatkonzentration für Schlacke B höher. Im Gegensatz zur Feststoffanalyse sind die Kupferkonzentrationen der Schlacke A mit 1,00 mg/l deutlich höher als die der Schlacke B mit etwa 0,02 mg/l.

Tabelle 2 Vergleich der chemischen Zusammensetzung im Eluat (DEV-S4 Test) von Schlacke A (MVA Ingolstadt) und Schlacke B (MHKW Rosenheim), SFK und RGR

	Schlacke A	Schlacke B	SFK	RGR
pH-Wert	12,1	10,6	10,7	12,2
Lf, mS/cm	4,2	1,8	2,1	29,6
Ca, mg/L	250	220	170	4400
K, mg/L	130	70	70	1100
Na, mg/L	230	160	220	1300
Cl, mg/L	350	280	320	8000
SO ₄ , mg/L	10	530	420	970
Cu, mg/L	1,000	0,020	0,040	0,004

Die Ca-Konzentrationen entsprechen auch in den Eluaten einander. Die Fraktion 0-4 mm der Schlacke A entspricht wiederum im Wesentlichen der Körnung 4-32 mm. Korrespondierend mit der sehr hohen Leitfähigkeit wird bei RGR ein hoher Anteil an leichtlöslichen Salzen (Ca, Na, K, Cl) - um den Faktor größer zehner - eluiert. Die Kupferkonzentrationen in den RGR sind vernachlässigbar gering.

2.2 Säulenversuche

Die Säulenversuche im Labor bestehen aus Plexiglassäulen mit einem Meter Länge und 15 cm im Durchmesser (Abb. 2A). Die Basis der Säule ist mit einem perforierten Plättchen abgedeckt, um den Abfluss vor Verstopfung zu schützen (Abb. 2B). Verschiedene Versuchsanordnungen wurden als Parallelversuche angesetzt, um die zeitliche Entwicklung verfolgen zu können. Sie wurden über einen Zeitraum bis zu eineinhalb Jahren untersucht.

Anhand der Säulenversuche wollten wir klären, ob SFK als Sperre eine Wirkung zeigt. Es wurde jeweils eine Säule der beiden Versuchsanordnungen ohne Sperre nur mit Schlacke als Blindversuche befüllt (Tab. 3), um das Auslaugverhalten der unverdichteten MV-Schlacken A und B zu untersuchen. In zwei weitere Säulen je Versuchsanordnung wurde SFK als Sperre (3-4 cm mächtig) stark verdichtet eingebaut, um eine Sperrwirkung zu erreichen. Um noch salzreichere Bedingungen schaffen zu können, wurden eine Säule der Versuchsanordnung B (VA-B) am Top der Säule mit RGR (2-3 cm mächtig) bedeckt.

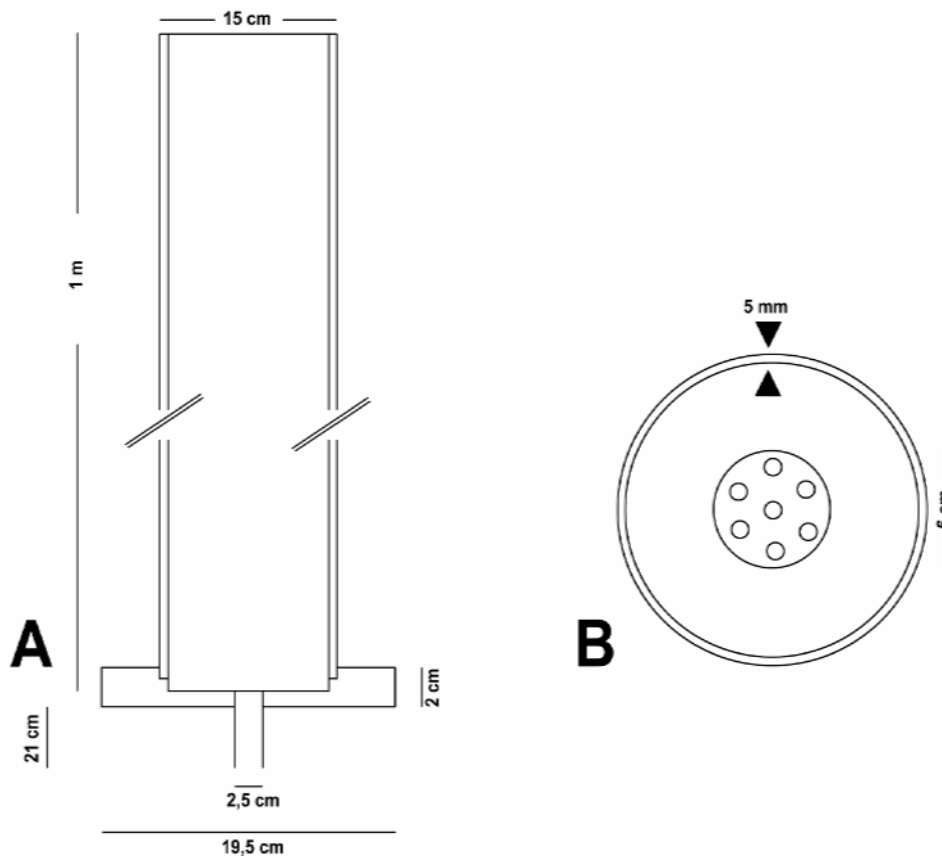


Abbildung 2 Skizze der Versuchssäule – A) Querschnitt der Säule und B) zeigt Basis der Säule mit perforiertem Ausguss

Tabelle 3 Vergleich der Säulenversuche der Versuchsanordnungen A und B (LW=Leitungswasser, MSW=Modellsickerwasser)

MV-Schlacke	Schlacke A MVA-Ingolstadt		Schlacke B MHKW-Rosenheim		
Körnung	0-32 mm		4-32 mm		
Säulenversuche	Versuchsanordnung A (VA-A)		Versuchsanordnung B (VA-B)		
	ohne Sperre	mit Sperre	ohne Sperre	mit Sperre	mit Sperre mit RGR
MV-Schlacke	x	x	x	x	x
SFK		x		x	x
RGR					x
Bewässerung	MSW	MSW	LW/MSW	LW/MSW	LW/MSW
Liter pro Woche	0,3	0,3	2 bzw. 0,3	2 bzw. 0,3	2 bzw. 0,3
Versuchszeit	8 Monate	8 Monate	17 Monate	16 Monate	15,5 Monate

Die zwei Säulen der Versuchsanordnung A (VA-A) wurden fortwährend pro Woche mit 0,3 L Modellsickerwasser bewässert (Tab. 4). Als Bezugsgröße wurde die durchschnittliche Niederschlagsmenge einer niederschlagsreichen Gegend verwendet (1200 mm pro Jahr). Umgerechnet auf den Querschnitt der Säulen sind dies ca. 0,3 Liter pro Woche. Zu Versuchsbeginn wurden die drei Säulen der VA-B pro Woche mit zwei Litern Leitungswasser bewässert, um mit Hilfe von erhöhtem Durchfluss Langzeiteffekte simu-

lieren zu können (Zeitraffermaßnahmen, FÖRSTNER & HIRSCHMANN, 1997). Nach etwa 100 Tagen Versuchszeit wurden diese Säulen ebenfalls mit Modellsickerwasser bewässert, um den Salzinput zu erhöhen. Nach etwa 170 Tagen Versuchszeit wurde die Sickerwassermenge auf 0,3 L pro Woche reduziert, um sich nach natürlichen Niederschlagsverhältnisse zu richten.

Die Säulen der VA-A wurden nach einer Versuchsdauer von 8 Monaten abgebrochen und geöffnet. Zwei weitere Parallelversuche mit einer geplanten Laufzeit von 18 Monaten werden fortgeführt. Die aktuelle Laufzeit beträgt 14 Monate. Die drei Säulenversuche der VA-B wurden nach einer Laufzeit von 15,5 bis 17 Monaten beendet.

Tabelle 4 Chemische Zusammensetzung des Modellsickerwassers

CaCl ₂ ·2H ₂ O	250 mg/l	Calcium
Na ₂ SO ₄	444 mg/l	Natrium
CaCl ₂ ·2H ₂ O	808mg/l	Chlorid
Na ₂ SO ₄	800 mg/l	Sulfat
PbCl ₂	8 mg/l	Blei
CuCl ₂ ·2H ₂ O	2 mg/l	Kupfer
ZnCl ₂	3,4 mg/l	Zink

2.3 Probennahme und Methodik

2.3.1 Sickerwasser

Die Sickerwasserproben wurden mit ICP-AES (Kationen) und Ionenchromatographie (Anionen) analysiert. Sickerwasser wurde zusätzlich auf Geruch, Farbe, Menge, pH-Wert, Leitfähigkeit untersucht.

2.3.2 Eluat- und Feststoffuntersuchungen

Die Feststoffproben wurden nach Ablauf der Versuchszeit gemäß dem DEV-S4 Testverfahren (EN 12457/4) eluiert und die Konzentrationen mit IC und ICP-OES, sowie die pH-Werte und Leitfähigkeiten bestimmt. Zusätzlich wurden von allen Materialien der Wassergehalt (bei 105° C) und der Glühverlust (1050° C) ermittelt. Im Folgenden werden exemplarisch nur die Wassergehalte diskutiert. Die Feststoffproben aus den beiden Versuchen ohne Sperre wurden in acht gleich große Segmente aufgeteilt (Abb. 3A). Das Material der drei Säulen mit Sperre wurde in 10 Proben aufgeteilt, wobei der Bereich ober- und unterhalb der Sperrschicht in geringeren Abständen beprobt wurde (Abb. 3B). Die mit einem x gekennzeichneten Segmente wurden für das Elutionsverfahren ausgewählt. Jeweils die Hälfte des Probenmaterials wurde im Trockenschrank bei 40° C getrocknet und mittels Schwingscheibenmühle gemahlen.

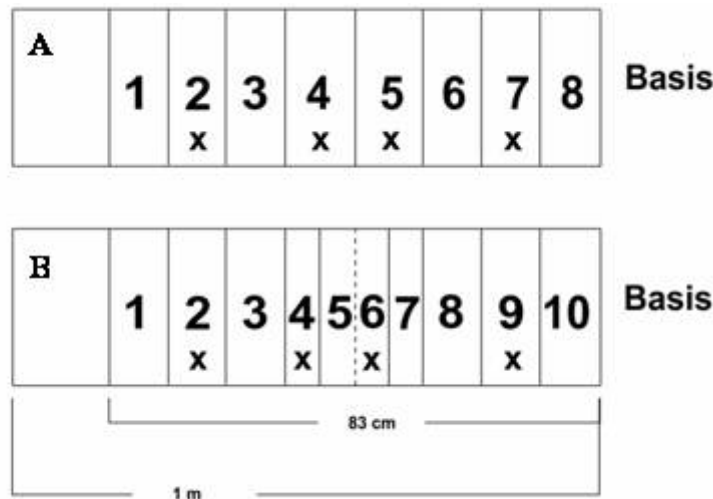


Abbildung 3 Skizze der Probeneinteilung: A) für Säulenversuche ohne Sperre und B) für Säulen mit Sperre

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Sickerwasserentwicklung

Bei der VA-A wurden alle Rahmenbedingungen wie Bewässerungsart und –modus während der Versuchsdurchführung unverändert beibehalten (Tab. 3). In der Anfangsphase steigen die Sickerwassermengen an und schwanken deutlich (Abb. 4A). Erst nach etwa 70 Tagen pendelt sich die Menge auf durchschnittlich 140 – 150 mL ein. Nach 180 Tagen nimmt bei beiden Säulen die Sickerwassermenge erneut zu. Nach einer Versuchsdauer von 200 Tagen ist der Austrag für die Säule mit Sperre höher als für Säule ohne Sperre. Der Sickerwasseraustrag steigt auf maximal 200 mL an, während bei der Säule ohne Sperre ein maximaler Austrag von 160 mL verzeichnet wurde. Das bedeutet, dass das Wasserrückhaltevermögen für den Blindversuch höher ist.

Die Leitfähigkeit im Sickerwasser der beiden Säulen von VA-A hat von Beginn der Versuche bis etwa 120 Tage Versuchszeit einen großen Schwankungsbereich mit Werten zwischen 20 bis über 100 mS/cm (Abb. 4C). Für die beiden Säulen ist aber von Anfang an bis zum Versuchsende nach 290 Tagen eine abnehmende Tendenz zu beobachten. Die Leitfähigkeit ist zu diesem Zeitpunkt mit 10 mS/cm relativ hoch. Insgesamt weist das Sickerwasser aus dem Versuch mit Sperre eine geringere Leitfähigkeit auf als der Blindversuch. Auffallend ist, dass nach 280 Versuchstagen die Leitfähigkeit für den Versuch mit Sperre ansteigt.

Die Sickerwasserentwicklung für die Säulenversuche der VA-B ist komplexer hinsichtlich der Änderung der Rahmenbedingungen. Die Änderung der Bewässerungsmenge während der Versuchslaufzeit widerspiegelt sich in den Austragsmengen. In den ersten Versuchsmonaten wurde mit hohen Durchsatzmengen gearbeitet und die Säulen mit

Leitungswasser (LW) bewässert, um eine optimale Durchfeuchtung der MV-Schlacke zu erreichen. In dieser Zeit wird nahezu 100 % der Bewässerungsmenge wieder ausgetragen (Abb. 4B). Das bedeutet, dass es unter diesen Bedingungen zu einem starken „wash off“ der leichtlöslichen Salzphasen kommt. Die Leitfähigkeit zeigt, dass innerhalb von zwei Wochen die Hälfte des Salzeintrags ausgeschieden wurde. Nach etwa drei Monaten Versuchszeit wurden die drei Säulen der VA-B zusätzlich mit Salzen in Form von Modellsickerwasser (MSW) angereichert. Die Abbildung 4D zeigt, dass die Zugabe des Modellsickerwassers einen unmittelbaren Anstieg der Leitfähigkeit bewirkt.

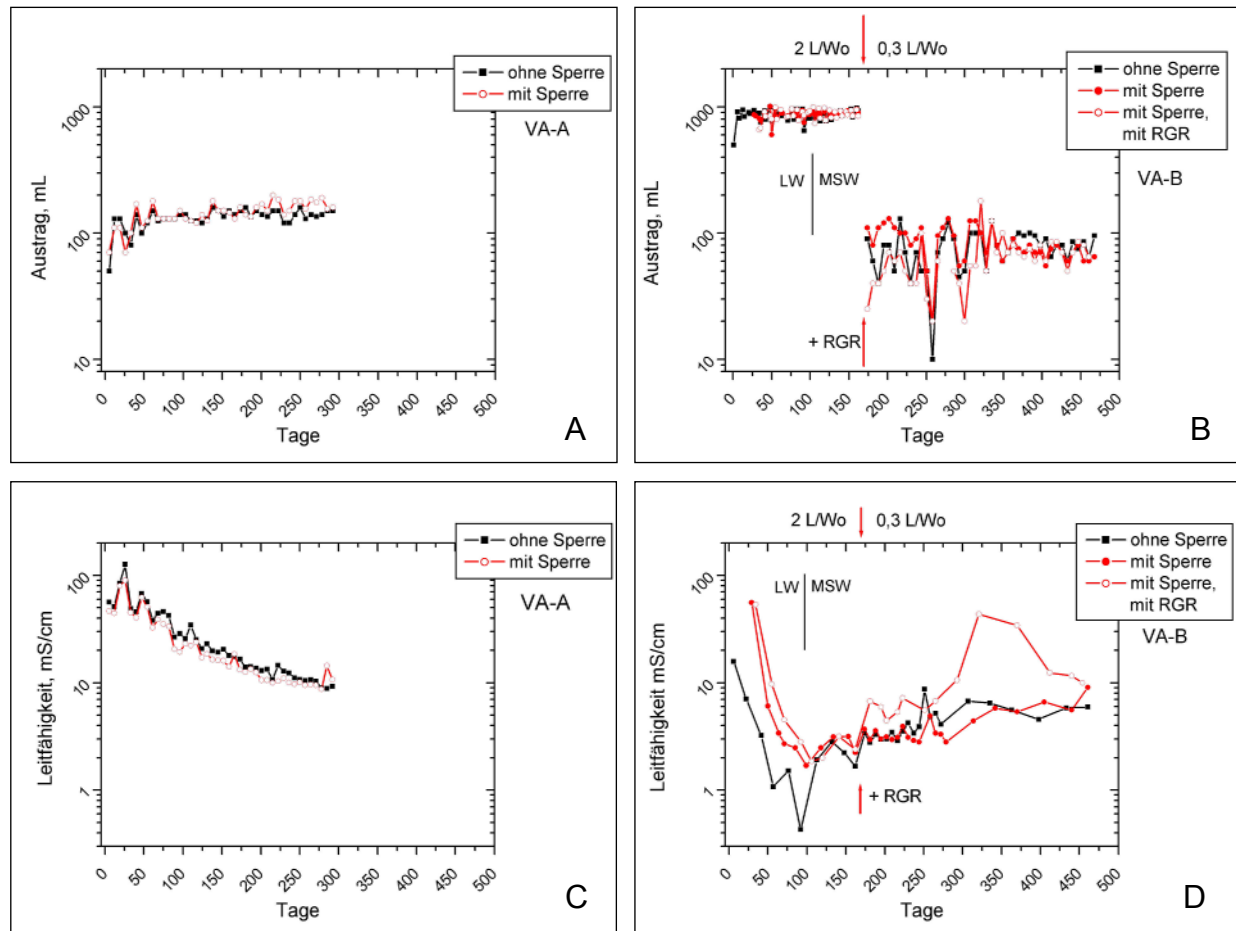


Abbildung 4 Vergleich der Sickerwasserentwicklung der der zwei Säulenversuche der VA-A und der drei Säulenversuche der VA-B bezogen auf den Austrag in mL (A, B) und Leitfähigkeit in mS/cm (C, D); (LW=Leitungswasser, MSW=Modellsickerwasser)

Nach etwa sechs Monaten wurde die Wasserzugabe von 2 Liter pro Woche auf 0,3 Liter pro Woche reduziert. Zu diesem Zeitpunkt wurde die Säule mit Sperre und RGR erneut mit frischen RGR (2 cm mächtig) am Top der Säulen abgedeckt. Die Reduzierung der Sickerwassermenge führte dazu, dass ein Teil des Sickerwassers innerhalb der Säulen zurückgehalten wird (Abb. 4B). In diesem Fall sickert nur ein Drittel der zugegebenen Wassermenge durch die Säulen durch. Über einen Zeitraum von etwa 200 Tagen nach der Reduzierung der Bewässerungsmenge sind die Sickerwassermengen starken

Schwankungen unterworfen. Der Austrag für die Säule mit Sperre ist generell am höchsten, für den Versuch mit Sperre und RGR hingegen am geringsten. Nach etwa 360 Tagen pendelt sich die Sickerwassermenge auf Werte zwischen 50 – 100 mL ein. Es ist sehr auffällig, dass ab diesem Zeitpunkt beide Versuche mit Sperre einen verringerten Austrag an Sickerwasser verzeichnen im Vergleich zum Blindversuch, d.h. das Wasserrückhaltevermögen ist nun in den Säulen mit Sperre höher. Für den Versuch mit RGR bewirkt die Reduzierung der Bewässerungsmenge zusammen mit der Zugabe der RGR zudem eine starke Erhöhung der Leitfähigkeit im Sickerwasser (Abb. 4D). Die maximale Wirkung des zusätzlichen Salzeintrags durch RGR zeigt sich erst nach drei Monaten. Die maximale Leitfähigkeit von 40 mS/cm ist deutlich höher als die gemessene Leitfähigkeit im Eluat frischer RGR-Proben. Beinahe innerhalb der gesamten Versuchsdauer verzeichnet dieser Versuch die höchste Leitfähigkeit im Sickerwasser. Der Versuch ohne Sperre zeichnet sich bis zu einer Versuchsdauer von 225 Tagen mit der geringsten Leitfähigkeit aus. Bei beiden Versuchen, ohne Sperre und mit Sperre, nimmt die Leitfähigkeit nach der Reduzierung der Bewässerungsmenge zunächst nur geringfügig zu. Jedoch nach insgesamt 10 Monaten Versuchszeit erhöht sich die Leitfähigkeit – für den Versuch mit Sperre mit stark ansteigender Tendenz. Nach 430 Versuchstagen gleichen sich die Werte für die Leitfähigkeit für die zwei Versuche mit Sperre an, bei einem Wert von 10 mS/cm. Diese Leitfähigkeit entspricht dem Wert aus der VA-A nach 200 Versuchstagen. Die Leitfähigkeit für den Versuch ohne Sperre pendelt sich dagegen um 6 mS/cm ein.

3.2 Feststoffproben

Die Schlacke A für die zwei Säulenversuche der Versuchsanordnung A hat einen Wassergehalt von durchschnittlich 18 Gew.-% (Abb. 5A). Nach einer Versuchsdauer von 8 Monaten wurden Wassergehalte in den Feststoffproben zwischen 17 – 25 Gew.-% gemessen. Der Blindversuch verzeichnet großteils niedrigere Wassergehalte als die Säule mit Sperre. Innerhalb der Sperrschicht wurde der höchste Wassergehalt mit 25 Gew.-% gemessen. Dies dokumentiert das große Wasserrückhaltevermögen dieser Schicht.

Das Ausgangsmaterial für die drei Säulen der VA-B hat einen Wassergehalt von durchschnittlich 17 Gew.-% (Abb. 5B). Nach 17 Monaten wurde der Blindversuch abgebrochen. Vom Top zu Basis nehmen die Wassergehalte einen s-förmigen Verlauf an und schwanken nur geringfügig (19 – 24 Gew.-%). Bei der Versuchssäule mit Sperre (Laufzeit 16 Monate) weisen die Feststoffproben insgesamt niedrigere Wassergehalte auf. Während die Sperrschicht einen Wassergehalt von 23 Gew.-% aufweist, wurden unmittelbar darunter trockene Bedingungen bestimmt. Bei der Säule mit RGR am Top (Laufzeit 15,5 Monate) zeigt diese RGR-Schicht die höchsten Wassergehalte mit 50 Gew.-%. Dies zeigt, dass RGR ein starkes Wasserrückhaltevermögen hat. Aber auch die Sperrschicht ist im Vergleich mit 33 Gew.-% sehr wasserreich. Auffällig sind sehr trockene

Abfallforschungstage 2006 www.wasteconsult.de

Bedingungen sowohl oberhalb als auch unterhalb der Sperre, die sogar noch trockener sind (bis zu 18,4 Gew.-%) als beim Versuch mit Sperre.

Die MV-Schlacke A hat im Eluat eine Leitfähigkeit von 4,3 mS/cm. Die gemessene Leitfähigkeit im Eluat der Feststoffproben der beiden Säulen der VA-A zeigt, dass vom Top zur Basis der Säulen die Leitfähigkeit ansteigt (Abb. 5C). Beide Säulen haben einen hohen Konzentrationsbereich für die Salze (bis zu ca. 1,7 mS/cm). Insgesamt nimmt die Leitfähigkeit für die Säule mit Sperre stärker zu: vom Top zur Basis von 1,05 mS/cm auf 1,67 mS/cm. Es ist bemerkenswert, dass sich trotz des etwas höheren Sickerwasser-austrags für diese Säule im Vergleich zum Blindversuch deutlich mehr Salze innerhalb der Säule ansammeln konnten. Bei diesem Versuch konnte die Wirksamkeit der Sperrschicht bzgl. Filterung der Salze aus dem Sickerwasser nicht beobachtet werden.

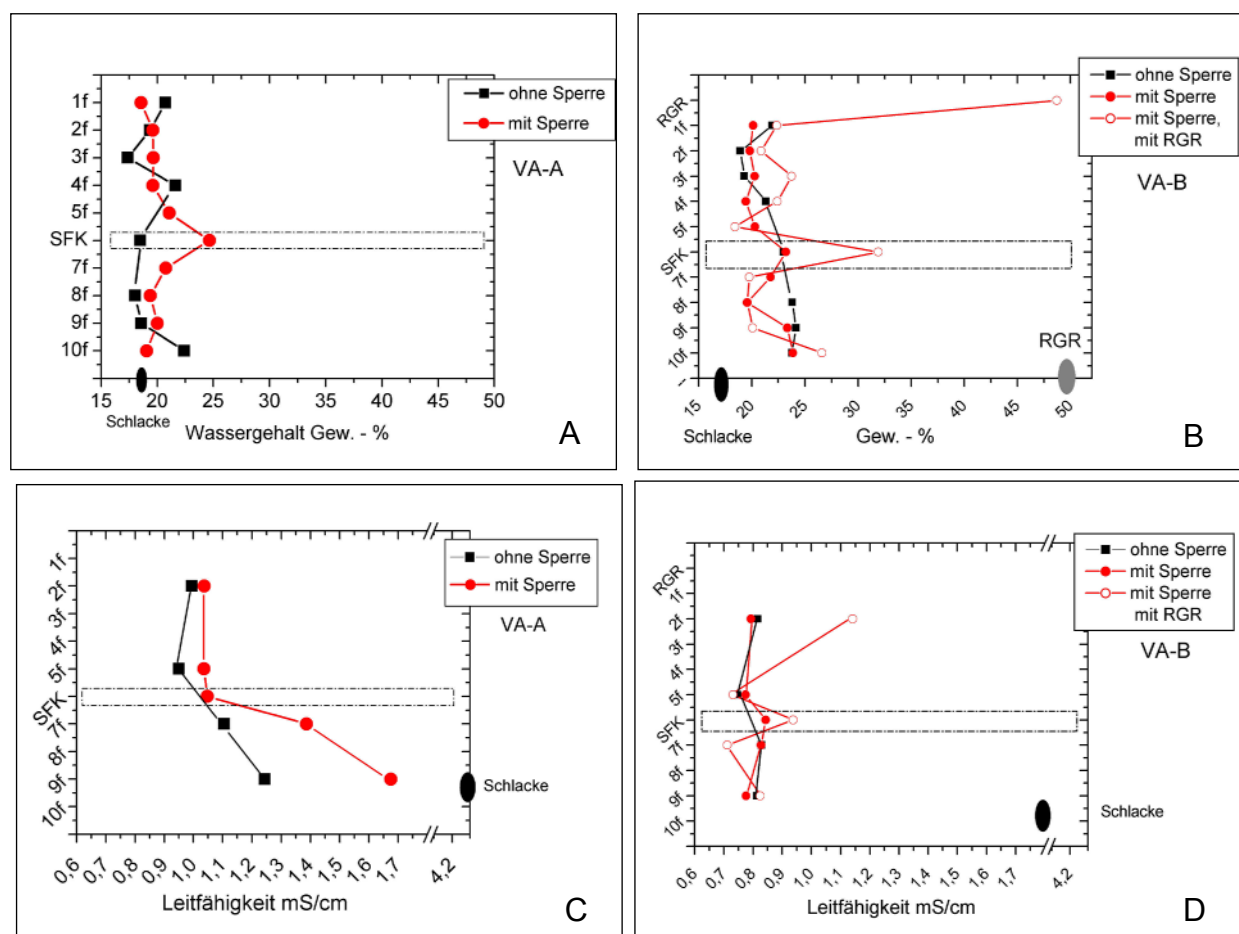


Abbildung 5 Vergleich der Wassergehalte der Feststoffproben der zwei Säulenversuche der VA-A und der drei Säulenversuch der VA-B (A, B) und Leitfähigkeit in mS/cm im Eluat (C,D)

Das Ausgangsmaterial für die Säulen der VA-B hat im Eluat eine Leitfähigkeit von ca. 1,8 mS/cm (Abb. 5D). Das Eluat ist also deutlich salzärmer als bei VA-A (4,3 mS/cm). Nach Versuchsende zeigen die Säulensegmente für die drei Versuche deutlich niedrigere Leitfähigkeiten als das Ausgangsmaterial. Beim Versuch ohne Sperre pendelt die

Leitfähigkeit für die vier Feststoffproben zwischen 0,75 mS/cm und maximal 0,83 ms/cm. Der Verlauf der Leitfähigkeit in den Segmenten der Versuchssäule mit Sperre zeigt bereits eine Wirksamkeit der Sperrschicht bzgl. Filterung der Salze aus dem Sickerwasser. Innerhalb der Sperre wurden die höchsten Konzentrationen an leichtlöslichen Phasen gemessen (0,84 mS/cm). Darunter nehmen die Konzentrationen ab und sind geringer als beim Blindversuch. Besonders deutlich wird die Wirkung aber bei der Säule mit Sperre und RGR. Frische RGR haben eine Leitfähigkeit von 29 mS/cm. Direkt unterhalb der RGR-Schicht wurden im Vergleich maximale Werte von 1,1 mS/cm ermittelt. Ebenso wurden innerhalb der Sperrschicht erhöhte Leitfähigkeiten größer 0,9 mS/cm gemessen. Oberhalb und unterhalb der Sperre hingegen sind die niedrigsten Leitfähigkeiten und damit Salzkonzentrationen zu verzeichnen. Sie sind niedriger als für den Blindversuch und den Versuch mit Sperre.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die experimentellen Untersuchungen zum Langzeitverhalten von MV-Schlacke werden im Allgemeinen bei wassergesättigten Bedingungen durchgeführt. Kritisch für die Salzbildung ist das Verhältnis Wasserzufuhr zu Wasserabfluss. Im Boden können innerhalb der ungesättigten Sickerwasserzone über das Kapillarwasser die hochkonzentrierten Lösungen aufsteigen und die leichtlöslichen Salze auskristallisieren. Um eine Akkumulation von leichtlöslichen Salzen im Boden erzielen zu können, dürfen die Salze nicht ausgewaschen werden bzw. muss die Evaporation die Niederschlagsmenge übersteigen (VENGOSH, 2003). Aus diesen Gründen wurden unsere Versuchsanordnungen unter wasserungesättigten Bedingungen durchgeführt.

Die Sickerwasserentwicklung der beiden Säulenversuche mit der salzreichen Schlacke A zeigt wenig Unterschied zwischen dem Versuch ohne Sperre und mit Sperre. Beim Versuch mit Sperre fällt auf, dass der Wassergehalt in den einzelnen Segmenten größtenteils höher ist als beim Blindversuch. Diese Beobachtung belegt, dass das eingebaute SFK seine Wirkung als Sperrschicht noch nicht erreicht hat.

Weiter ist beim Versuch mit Sperre der Austrag an Sickerwasser größer. Die etwas niedrigere Leitfähigkeit im Sickerwasser kann jedoch nicht allein auf den höheren Wasseraustrag zurückgeführt werden. Bei gleicher Versuchsdurchführung reichern sich bevorzugt unterhalb der Sperre Salze an. Bemerkenswert ist, dass sich nach 300 Tagen Versuchszeit der Wasseraustrag beider Versuche angleicht. Zugleich nimmt die Leitfähigkeit für den Versuch mit Sperre zu. Diese Beobachtung kann der Beginn eines Trendwechsels sein.

Für zwei weitere Langzeitversuche aus VA-A wurde nämlich dieser Trendwechsel bereits nach 125 Versuchstagen beobachtet: Beim Versuch mit Sperre wurde zu diesem

Zeitpunkt weniger Sickerwasser ausgetragen als beim Blindversuch, somit ist das Wasserrückhaltevermögen für diese Säule größer (Abb. 6A). Nach weiteren 25 Tagen Versuchszeit nimmt die Leitfähigkeit im Sickerwasser des Versuchs mit Sperre markant zu und bleibt anschließend stets höher als die im Sickerwasser des im Blindversuchs (Abb. 6B). Weiter wurden oberhalb der Sperrschicht optisch Salzanreicherungen beobachtet. Bei den Säulenversuchen der VA-B kommt das Wasserrückhaltevermögen bei den beiden Versuchen mit Sperre bzw. zusätzlich mit RGR zur Geltung. Sowohl oberhalb als auch unterhalb der SFK-Schicht sind die einzelnen Segmente trockener. Zusätzlich wurden unterhalb der Sperre niedrige Salzkonzentrationen in den Eluatn der Feststoffproben gemessen. D.h. der Korngrößenübergang reicht aus, um als physikalische Sperre zu wirken. Die erhöhte Leitfähigkeit innerhalb der Sperrschicht weist darauf hin, dass speziell bei Zugabe von RGR die Voraussetzung für eine Anreicherung der Salze in der SFK-Schicht erreicht wurde. Die markante Abnahme der Leitfähigkeit im Sickerwasser nach ca. 350 Tagen ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass innerhalb der Sperre Salz sättigungsbedingungen erreicht sein müssen. Dies korrespondiert mit der Beobachtung, dass bei den Versuchen mit Sperre der Sickerwasseraustrag tendenziell geringer war.

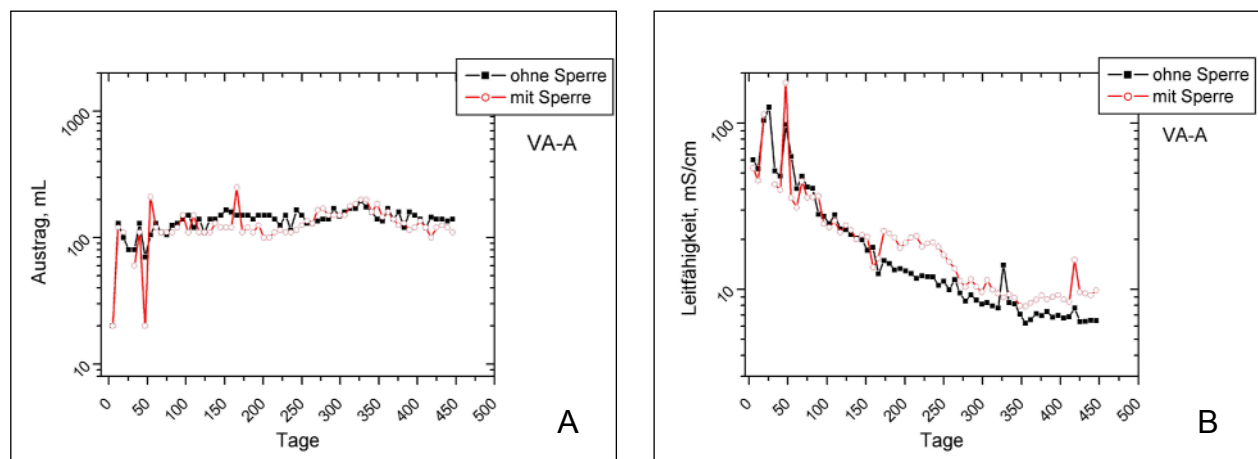


Abbildung 6 Austrag in mL und Leitfähigkeit im Sickerwasser für den aktuellen Blindversuch ohne Sperre und den Versuch mit SFK als Sperre der VA-A bezogen auf einen Zeitraum von 450 Tagen, Entwicklung wird noch weiter untersucht

Mit der Umstellung von Leitungswasser auf Modellsickerwasser und mit der Reduzierung der Bewässerungsmenge für die Säulenversuche der VA-B wollten wir erreichen, dass die Bildung eines Salzhorizonts forciert wird. Die Änderung der Bewässerungsmenge bei VA-B zeigt nachweislich, dass auch im Maßstab von Säulenversuchen der Salzaustrag deutlich beeinflusst werden kann. Dies bestätigt eine starke Salzausschwemmung bei stark erhöhtem Wasserdurchfluss in Form von wolkenbruchartigen Regenschauern. Eine Reduzierung der Bewässerungsmenge führt dazu, dass ein erhöhter Teil der Wasserzugabe innerhalb der Säule zurückgehalten wird.

Die Säulenversuche belegen, dass Prozesse innerhalb der Säule über einen Zeitraum von mehr als 100 Tage dauern können und z.T. setzt eine Wirkung auf eine Veränderung erst nach mehr als 100 Tage ein. Die Säulenversuche belegen somit, dass sich auch nach einer Versuchsdauer von 15 Monaten immer noch Veränderungen im Versuchsaufbau ergeben. HEUSS-ASSBICHLER ET AL. (2002) beschreibt für Feldversuche, dass eine Versuchszeit von 11 Monaten nicht ausreicht, um Aussagen über eine langfristige stabile Fixierung von Chloriden und Schwermetallen machen zu können.

Um unsere aufgestellten Thesen untermauern zu können, werden zusätzlich zu den Säulenversuchen Feldversuche als Testfelder und Großlysimeter betrieben. Die aktuelle Versuchszeit dieser Ansätze ist minimal 15 Monate. Diese Versuche werden noch bis Oktober 2006 analysiert.

5 Danksagung

Dieses Projekt wird vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz im Rahmen der EU-Strukturförderung für regionale Entwicklung (EFRE) finanziert.

6 Literatur

- | | | |
|--|------|--|
| DIN EN 12457-4 | 2003 | Charakterisierung von Abfällen; Auslaugung: Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen – Teil 4, Ausgabe 2003-01. |
| 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. |
| Förstner, U., Hirschmann, G. | 1997 | Langfristiges Deponieverhalten von Müllverbrennungsschlacken. Abschlußbericht an das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie. |
| Magel, G., Heuss-
Abfallforschungstage 2006 | 2003 | H ₂ -produzierende abiotische Reaktionen in MVA-
www.wasteconsult.de |

- | | | |
|----------------------------|------|---|
| Aßbichler, S. & Fehr, K.T. | | Schlackedeponien, 3. Zwischenbericht an das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen. |
| PICOLAB | 1995 | Mineralogisch-chemische Untersuchung einer Bohrkernprobe der Monodeponie Waldering: Bindungszustand der Salze und Schwermetalle, 44 pp. LfU-Bericht, Bayern |
| Vengosh, A. | 2003 | Salinization and Saline Environments. Treatise on Geochemistry, 9, 333 – 365. |

Anschrift der Verfasser(innen)

Dipl.-Geol. Daniela Sager
Department für Geo- und Umweltwissenschaften, Sektion Mineralogie
Ludwig-Maximilians-Universität
MünchenTheresienstraße 41/III
D-80333 München
Telefon +49 89 21 80 4272
Email sager@min.uni-muenchen.de
Website: www.impg-muenchen.de

PD Dr. Soraya Heuss Aßbichler
Department für Geo- und Umweltwissenschaften, Sektion Mineralogie
Ludwig-Maximilians-Universität
MünchenTheresienstraße 41/III
D-80333 München
Telefon +49 89 21 80 4252
Email soraya@min.uni-muenchen.de
Website: www.impg-muenchen.de

Dr. Adi Heindl
Forschungs- und Entwicklungszentrum für Sondertechnologien
Siemensstraße 3-5
D-91126 Rednitzhembach
Telefon +49 9122 6313 32
Email Adi.Heindl@fes-schwabach.de
Website: www.fes-schwabach.de