

**FEhS – INSTITUT  
FÜR BAUSTOFF-FORSCHUNG e.V.**

Bliersheimer Str. 62  
4 7 2 2 9 D U I S B U R G  
Telefon: 02065/9945 - 0  
Telefax: 02065/9945 - 10  
E-Mail: fehs @ fehs.de  
Internet: http://www.fehs.de

**Dezember 2014**

**ISSN 0948-4795**

**21. Jahrgang Nr. 2**

Auch 2014 hat sich das FEhS-Institut wieder intensiv mit Verordnungen befasst, die zukünftig erhebliche Auswirkungen auf die Verwendung und die Klassifizierung von Eisenhüttenschlacken haben werden.

Bedingt durch die Parlamentswahlen konnten erst 2014 die Arbeiten zur Mantelverordnung (MV) und damit auch zur Ersatzbauverordnung weitergeführt werden. Es zeichnet sich ab, dass das BMUB beabsichtigt, die MV bis 2016 abzuschließen. Inwieweit dies allerdings, nach den sehr restriktiven Forderungen der Bundesländer in Abstimmung mit der Industrie erreicht werden kann, ist weiterhin offen. Das FEhS-Institut ist gemeinsam mit dem BDI in die entsprechenden Beratungen hierzu eingebunden.

Am 23. Mai 2014 hat der Bundesrat der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV) mit zahlreichen Änderungen zugestimmt. Daher muss diese erneut in Brüssel notifiziert und dem Bundesrat zur Abstimmung vorgelegt werden. Die AwSV kann somit in der geänderten Fassung nicht vor dem 1. Quartal 2015 in Kraft treten. Während Hochofen- und LD-Schlacken bereits seit Jahren als nicht wassergefährdend eingestuft sind, muss dieser Nachweis nun noch für Elektroofenschlacken erbracht werden. Das FEhS-Institut bereitet hierzu entsprechende Expertisen vor.

Am 23./24. Oktober 2014 fand in Meitingen bereits das 3. Schlackensymposium statt. Im Rahmen der Veranstaltung, die von etwa 160 Teilnehmern besucht wurde, konnte wieder ein umfassender Überblick über den Stand der Forschung, Normung und Gesetzesinitiativen gegeben werden. Alle Vorträge wurden in einem Tagungsband veröffentlicht.

Anlässlich des zu Ende gehenden Jahres möchten wir uns wieder bei allen bedanken, die unsere Arbeit im vergangenen Jahr gefördert haben. Wir hoffen auf weitere erfolgreiche Zusammenarbeit.

**Wir wünschen Ihnen und Ihren Angehörigen ein frohes Weihnachtsfest  
sowie Gesundheit, Glück und Erfolg im Jahr 2015**



Vorstände, Geschäftsführungen und Mitarbeiter des FEhS – Instituts für Baustoff-Forschung e.V., des Fachverbands Eisenhüttenschlacken e.V. und der Arbeitsgemeinschaft Hüttenkalk e.V.

<b>Inhalt</b>	<b>Seite</b>
---------------	--------------

Reduzierung der Schwermetall-Mobilität aus Stahlwerksschlacken durch den Zusatz von mineralischen Additiven	1
---	---

R. Bialucha, M. Spanka

Nachhaltige Verwendung von Eisenhüttenschlacken unterstützt durch sechzig Jahre Forschung in Rheinhausen	9
--	---

H. Motz

Sorptionsverhalten von ungestörten Böden gegenüber Molybdän aus Stahlwerksschlacken	11
---	----

R. Bialucha, M. Leson

FEhS-Institut feiert Richtfest für neues Laborgebäude	16
---	----

H. Motz

## **Reduzierung der Schwermetall-Mobilität aus Stahlwerksschlacken durch den Zusatz von mineralischen Additiven**

Dr.-Ing. R. Bialucha, M. Spanka, M.Sc.

### **Einleitung**

Da im Rahmen der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie versucht wird, vorhandene

Ressourcen zukünftig noch intelligenter und effizienter zu nutzen sowie Primärrohstoffe zu substituieren, spielt eine hochwertige, umweltverträgliche und ressourcensparende

Verwendung von mineralischen Sekundärrohstoffen, wie es Stahlwerksschlacken (SWS) sind, eine große Rolle. Allerdings hat sich in den letzten Jahren gezeigt, dass

durch die extreme Verschärfung einiger umweltrelevanter Grenzwerte (z. B. für die Parameter Molybdän und Vanadium) in Verbindung mit den Geringfügigkeits-schwellenwerten [1] und der geplanten Einführung der Ersatzbaustoffverordnung (EBV) [2] einige Stahlwerksschlackenarten künftig im "offenen Wegebau" nicht mehr oder nur noch eingeschränkt eingesetzt werden dürfen.

Die dauerhafte Festlegung von Schwermetallen durch die Zufuhr und Einarbeitung von Materialien mit einem hohen Bindungsvermögen – sogenannte Additiven – in die SWS erscheint eine potentielle Möglichkeit zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit zu sein. Im Bereich der Altlastenforschung existieren schon seit längerem unterschiedliche Behandlungsweisen zur Immobilisierung von Schadstoffen aus kontaminierten Bodenmaterialien. Überwiegend handelt es sich dabei um Verfestigungsverfahren mit hydraulischen Bindemitteln. Auch Bewertungen aus der Literatur zum Einsatz von anderen Additiven beziehen sich im Wesentlichen auf Ergebnisse bodenkundlicher Untersuchungen. Das Ziel solcher Maßnahmen ist immer, dass Emissionen von im Material enthaltenen Schadstoffen langfristig unterhalb festgelegter Zielwerte abgesenkt werden. Dies wird zum Beispiel durch den Zusatz von Sorptionsträgern, wie Aluminiumsilikate, kalkhaltige, eisenhaltige oder phosphorhaltige Substanzen erreicht.

Im Rahmen eines von der Aif geförderten Forschungsvorhabens [3] wurde versucht, durch den Zusatz von mineralischen Additiven eine dauerhafte Fixierung von Schwermetallen – insbesondere Molybdän und Vanadium – aus SWS zu erreichen. Auf Grundlage der verschiedenen bodenkundlichen Untersuchungen wurden für dieses Forschungsvorhaben verschiedene Naturmaterialien, aber auch Materialien aus industriellen Produktionsprozessen ausgewählt, die bereits erfolgreich eingesetzt wurden, um das Bindungsvermögen für Schwermetalle zu erhöhen. Die Frage ist, ob der Zusatz von mineralischen Additiven tatsächlich zu einer nachhaltig wirksamen Schwermetall-Immobilisierung in SWS führt und ob der finanzielle Aufwand im Verhältnis zum Erfolg steht. Der große wirtschaftliche Wettbewerbsvorteil von SWS gegenüber Naturgestein ist vor allem die Kostenersparnis. Um den finanziellen Aufwand für die Behandlung möglichst gering zu halten, sollte der Fokus in diesem Forschungsvorhaben weniger auf die meist teuren Naturmaterialien gelegt werden, als

auf industrielle Nebenprodukte oder Reststoffe.

### **Auswahl der untersuchten Schlacken und Additive**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden insgesamt 11 SWS mittels eines Schüttelverfahrens mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis (L/S) von 2:1 gemäß DIN 19529 [4] vorab auf ihre Eignung untersucht. Anhand der Ergebnisse der Eluatanalysen wurden 2 LD-Schlacken (LDS) und 2 Elektroofenschlacken (EOS) ausgewählt. Es wurden gezielt die SWS mit den höchsten Schwermetall-Auslaugraten ausgewählt, um so den Effekt der Immobilisierung durch Additive deutlich erkennen zu können. Diese Proben sind somit keinesfalls als typische SWS zu betrachten.

Daneben wurden in Vorversuchen insgesamt 10 Materialien hinsichtlich ihrer Eignung als Additive untersucht. Dabei handelte es sich um Materialien aus verschiedensten Bereichen und mit unterschiedlichen Zusammensetzungen, die entweder als Produkt käuflich erwerblich sind oder die als Reststoff, z. B. in der Wasseraufbereitung, anfallen (Eisenoxidhydroxid (FeO(OH)), Kalkgranulat (KG), Kies-schlamm (KS), Naturbentonit (NB), Schlamm aus der Aluminiumerzeugung (SAI), Triplesuperphosphat (TSP), zwei verschiedene Wasserwerksschlämme (WWS und WWS I), Zeolith Mehl (ZM), Zeolith Granulat (ZG)). Im Gegensatz zu den Schlacken sollten die Additive keine oder nur sehr geringe Mengen an Schwermetallen enthalten bzw. auslaugen. Daher wurden die o. g. 10 Additive zunächst mittels Vollaufschluss hinsichtlich ihrer Feststoffgehalte analysiert sowie die Auslaugbarkeit mit Hilfe eines Schüttelverfahrens (DIN 19529 [4]) getestet. Anhand der Ergebnisse dieser Vorversuche konnten bereits 3 Additive (NB, SAI und TSP) für die weiteren Untersuchungen ausgeschlossen werden. Diese Additive enthielten entweder zu hohe Schwermetallgehalte oder sie waren vom Handling her ungeeignet (z. B. schlechte Filtrierbarkeit).

### **Untersuchungen**

Es existieren verschiedene Untersuchungsmethoden, um die Umweltverträglichkeit von mineralischen Baustoffen anhand von Laborversuchen zu bewerten. Angewandt wurden als Kurzzeit-Verfahren das modifizierte DEV-S4-Schüttelverfahren [5], das Schüttelverfahren 2:1 nach DIN 19529 [4] und der Säulenkurztest nach DIN 19528 [6]

in verschiedenen Körnungen. Außerdem erfolgte die Ermittlung des zeitlichen Auslaugverhaltens anhand des ausführlichen Säulenversuchs gemäß DIN 19528 [6] mit den Körnungen 0/1 mm und 0/22 mm für LDS bzw. 0/32 mm für EOS. Ferner wurden ein pH-Abhängigkeitsverfahren [7] (Körnung 0/1 mm) und eine sequentielle Extraktion (Körnung < 63 µm) durchgeführt. Das pH-Abhängigkeitsverfahren ermöglicht es, das Auslaugverhalten der Parameter in Abhängigkeit von verschiedenen konstant eingestellten pH-Werten zu untersuchen. Dies ist von Bedeutung, da durch die Zugabe von Additiven die im Allgemeinen sehr basischen pH-Werte von SWS verringert werden können. Das pH-Abhängigkeitsverfahren wurde zur Reduzierung des Aufwands an Analytik gegenüber der Originalvorschrift derart modifiziert, dass nur fünf pH-Werte (statt acht) zwischen 4 und 12 mittels Salpetersäure eingestellt wurden.

Die sequentielle Extraktion ist zwar kein genormtes Prüfverfahren, wird aber für verschiedene Fragestellungen in der Umweltanalytik, besonders in der Bodenkunde, seit langem erfolgreich angewandt. Untersuchungen an SWS mit dieser Methode liegen dagegen bisher kaum vor. Mit der sequentiellen Extraktion wird versucht, durch zunehmende Stärke der Extraktionsmittel die Schwermetalle im Feststoff entsprechend ihrer chemischen Bindungsformen getrennt zu erfassen und zu quantifizieren. Die chemische bzw. mineralische Bindungsform ist ein wichtiger Faktor bei der Auslaugung und derzeit für viele umweltrelevante Parameter nur sehr unvollständig bekannt. Die hier verwendete Extraktionsvorschrift beruht auf Veröffentlichungen von P. van Herck / C. Vandecasteele [8] sowie M. Sulkowski [9] und wurde nach Vorversuchen für SWS entsprechend angepasst (1. Fraktion dest. Wasser; 2. Fraktion Essigsäure; 3. Fraktion Na<sub>2</sub>-EDTA+NH<sub>2</sub>OH\*HCl und 4. Fraktion Vollaufschluss).

Um zu überprüfen, ob eine Zugabe von Additiven tatsächlich zu einer Reduzierung der Auslaugung von Schwermetallen führt, wurden Sorptionsversuche mit den 7 potentiell geeigneten Additiven durchgeführt. Dazu wurden in einem ersten Schritt jeweils mehrere Liter Eluat von jeder der 4 ausgewählten Schlacken hergestellt, die in einer feinen Körnung von 0/5 mm und bei einem L/S von 2:1 für 24 Stunden mittels Schüttelapparat ausgelaut wurden. Im zweiten Schritt wurden jeweils 60 g der 7 verschiedenen Additive mit 300 ml Schlackenuelat für 24 Stunden geschüttelt und anschließend die in den filtrierten Eluaten vorhandenen

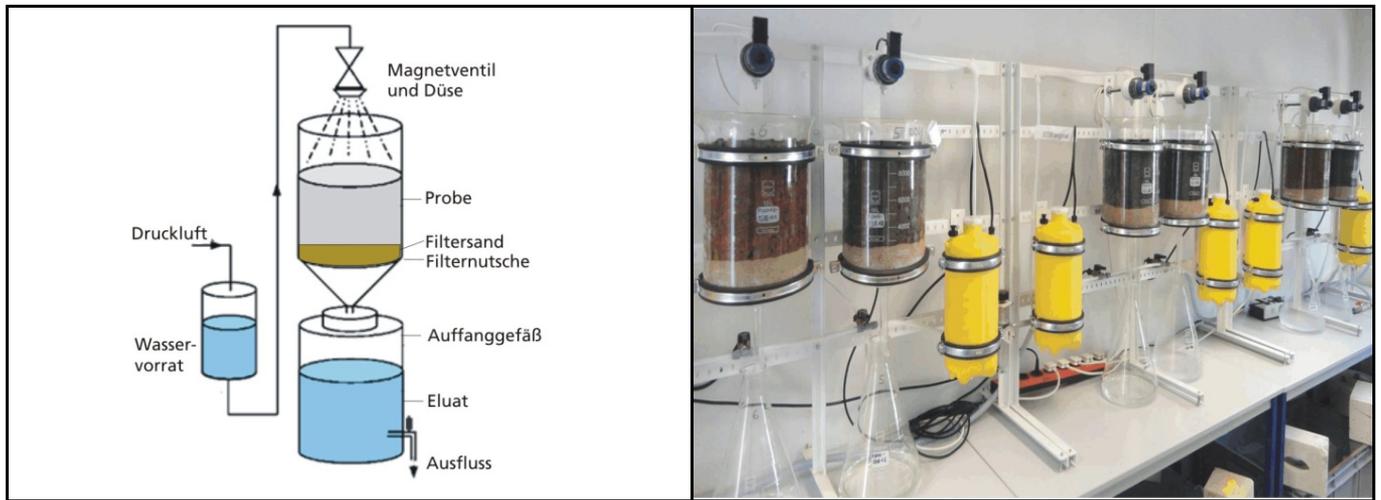


Bild 1: Skizze (links) und Foto (rechts) zum Aufbau der Sprühsäulenversuche

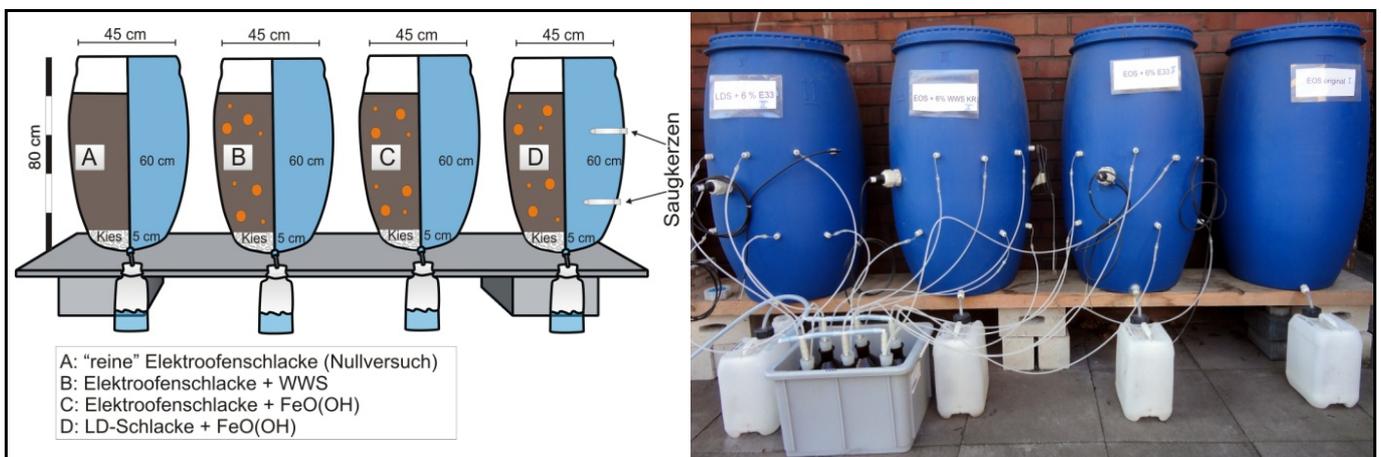


Bild 2: Skizze (links) und Foto (rechts) zum Aufbau der Lysimeterversuche

Konzentrationen analysiert. Durch diese Versuche ließ sich die Anzahl der potentiell geeigneten Additive weiter einschränken. Es wurden die beiden Additive ausgewählt, die am effektivsten die betrachteten umweltrelevanten Parameter aus den Schlackeneluat sorbierten. Mit diesen 2 Additiven (WWS und  $\text{FeO}(\text{OH})$ ) wurde anschließend das geeignete Mischungsverhältnis ermittelt. Dazu wurden die 4 Schlacken (0/22 mm für LDS bzw. 0/32 mm für EOS) jeweils mit 2, 4, 6, 8 bzw. 10 % eines der beiden ausgewählten Additive gemischt und anschließend mittels des Schüttelverfahrens 2:1 ausgelaugt. Als Ergebnis dieser Versuche wurde eine Zugabemenge an Additiven von 6 % als optimal ermittelt.

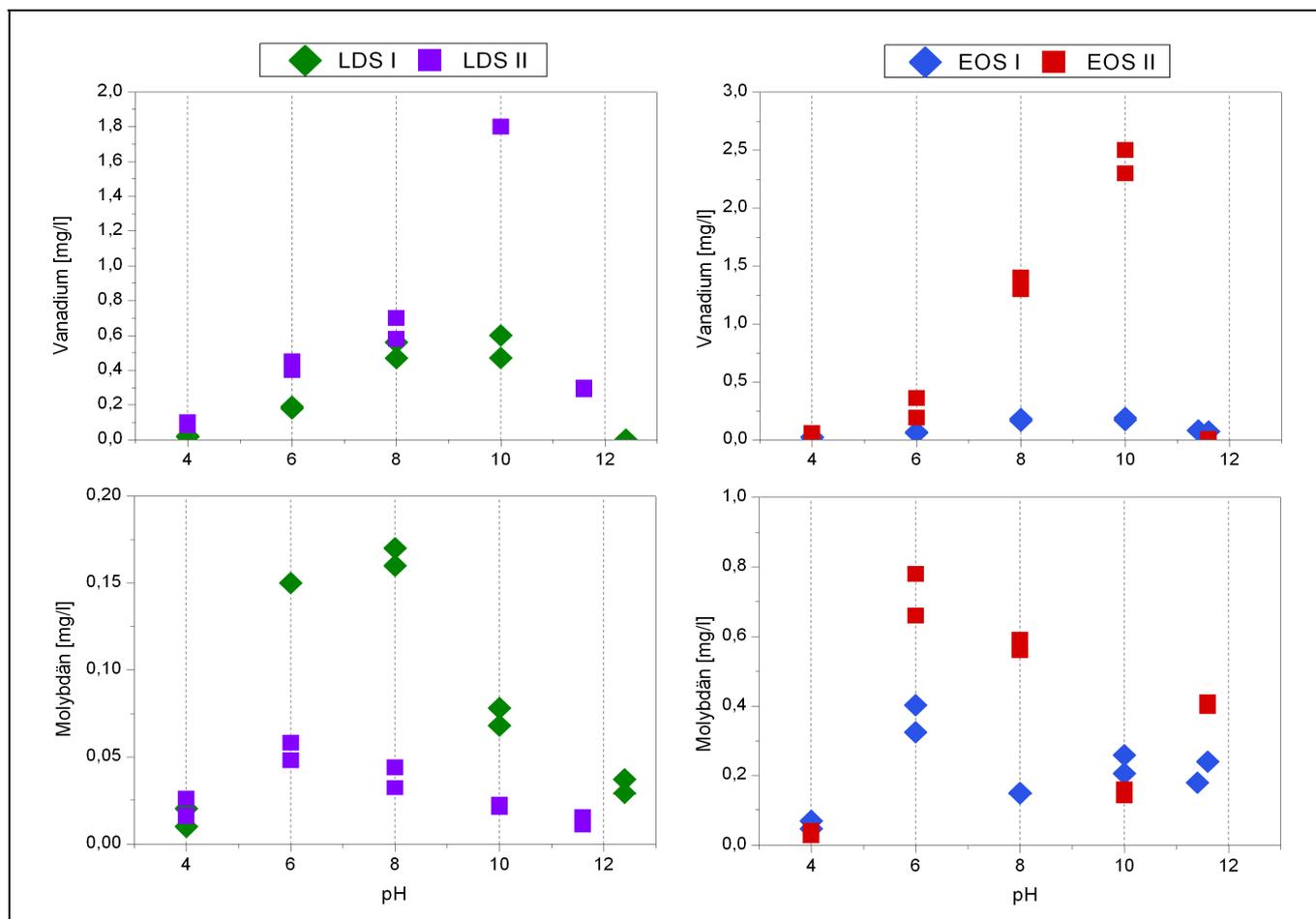
Nach der Ermittlung des am besten geeigneten Mischungsverhältnisses von 6 % wurden an den Schlacke-Additiv-Gemischen Untersuchungen zur Verdichtbarkeit und zur Durchlässigkeit durchgeführt, um den Einfluss der Additive auf die technischen Eigenschaften der Schlacken zu untersuchen. Zur Überprüfung einer homogenen

Mischbarkeit von SWS und Additiv wurden außerdem Versuche im Labor des FEHs-Instituts durchgeführt.

Neben den Kurzzeit-Laborversuchen wurden Langzeitversuche an den "reinen" SWS bzw. an den Schlacke-Additiv-Gemischen durchgeführt. Hierzu kamen in einem ersten Schritt Sprühsäulenversuche zum Einsatz, die bereits für verschiedene frühere Forschungsarbeiten verwendet wurden (Bild 1). Die Säulen verfügen über eine Beregnungsautomatik, die ein sekundengenaues Beregnen der Proben mit anschließenden Trocknungsphasen ermöglicht. Dadurch können natürliche Bewitterungsbedingungen im Zeitraffer simuliert werden, wobei ein Beregnungszyklus im Laborversuch etwa einem Zeitraum von zwei Monaten entspricht. Da pro Woche zwei solche Beregnungen durchgeführt wurden, entspricht die aufgegebene Wassermenge einem Zeitraum von vier Monaten. Die aufgegebene Wassermenge (demineralisiertes Wasser) je Beregnungszyklus orientierte sich an einer mittleren jährlichen Nieder-

schlagsmenge von 750 mm, abzgl. Oberflächenabfluss und Verdunstung von 250 mm. Für diese Versuche wurden 2 der 4 vorausgewählten SWS (je eine LDS II, Körnung 0/22 mm und eine EOS I, Körnung 0/32 mm) ausgewählt. Diese wiesen besonders hohe messbare Schwermetallkonzentrationen in den Eluaten der anderen Laborversuche auf. Für jede Schlackenart wurden drei Sprühsäulen befüllt ("reine" Schlacke, Gemisch aus Schlacke +  $\text{FeO}(\text{OH})$  bzw. Schlacke + WWS).

Da Laborversuche, bedingt durch Versuchsdauer, Zeitraffereffekt, Randläufigkeiten o. ä. die Praxisbedingungen nicht sehr gut abbilden, wurden im zweiten Schritt Versuche im Technikumsmaßstab durchgeführt (Bild 2). Die insgesamt 4 Lysimeter wurden einmal wöchentlich mit demineralisiertem Wasser beregnet. Die jeweils aufgegebene Wassermenge von 1,9 l orientierte sich dabei an den Mengen, die auch bei den Sprühsäulenversuchen aufgegeben wurden. Die 4 Behälter wurden wie folgt befüllt: "reine" EOS I, Gemisch aus EOS I +



**Bild 3:** Vanadium- und Molybdänkonzentrationen in den Eluaten des pH-Abhängigkeitsverfahrens für LDS I und II (links) sowie EOS I und II (rechts) (Doppelversuche)

FeO(OH) bzw. EOS I + WWS sowie LDS II + FeO(OH).

## Ergebnisse und Diskussion

### – Kurzzeit-Auslaugversuche im Labor

Um das Auslaugverhalten der "reinen" Schlacken zu untersuchen, wurden verschiedene Laborverfahren angewandt (s. Kapitel "Untersuchungen"). Im Folgenden wird vor allem auf die Ergebnisse der pH-Abhängigkeitsversuche und diejenigen der sequentiellen Extraktion eingegangen.

In **Bild 3** sind die Vanadium- und Molybdänkonzentrationen der Eluate aus den pH-Abhängigkeitsverfahren für die LDS und EOS dargestellt. Für alle vier Schlacken gilt, dass ausgehend vom natürlichen pH-Wert (rechts in den Diagrammen) die pH-Wert-Erniedrigung zunächst einen Anstieg der Vanadiumauslaugung bewirkt, wobei die höchsten Konzentrationen bei einem eingestellten pH-Wert von 10 bzw. 8 gemessen werden. Bei weiterer Erniedrigung des pH-Werts sinken die Konzentrationen auf ein niedrigeres Niveau, so dass

bei einem pH-Wert von 4 die geringsten Konzentrationen gemessen werden. Auch die Molybdänauslaugung nimmt bei allen vier Schlacken mit kleiner werdenden pH-Werten zu, wobei bei pH-Wert = 6 (bzw. pH-Wert = 8 bei LDS I) die höchsten Molybdänkonzentrationen ausgelaut werden. Bei einem pH-Wert von 4 ist die Molybdänkonzentration dagegen wiederum in allen vier Fällen sehr niedrig. Gleichzeitig beobachtet man bei diesem niedrigen pH-Wert einen extremen Anstieg der Eisen- und Aluminiumkonzentrationen (nicht im Diagramm dargestellt).

Offensichtlich werden bei dem niedrigen pH-Wert von 4 die Eisenoxide massiv angegriffen, so dass Eisen verstärkt an die Lösung abgegeben wird. Die Tatsache, dass gleichzeitig mit dem Anstieg der Eisenkonzentrationen die Molybdänkonzentrationen stark abnehmen, ist vermutlich auf die Fällung der Mineralphase  $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$  zurückzuführen. Laut [10] ist  $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$  ab einem pH-Wert von 4 in Lösungen stabil und kontrolliert somit möglicherweise die Löslichkeit des Molybdäns. Außerdem ist aus der Literatur [11] bekannt, dass die

Sorption von Molybdän an Eisen- und Aluminiumoxiden im Boden bei einem pH-Wert von 4 am stärksten ist und mit steigendem pH-Wert nach und nach schwächer wird. Gegebenenfalls liegt das Eisen im Eluat nicht nur in Form freier gelöster Eisenionen, sondern auch in Form von Eisenhydroxiden vor. Somit kann die Sorption an die Oberflächen der Eisenhydroxide oder an Eisenoxide der Schlackenpartikel eine weitere Molybdänsenke darstellen.

Um zu überprüfen, wie die Additive auf eine pH-Wert-Veränderung durch den Einfluss der Schlacken reagieren, wurde zusätzlich das pH-Abhängigkeitsverfahren an den Additiven durchgeführt (vgl. **Tabelle 1**). Die Versuche wurden nur bei zwei relevanten pH-Werten durchgeführt, dem natürlichen pH-Wert der Additive von etwa 8 und dem pH-Wert der Schlacken von 12. Anhand der Eluatanalysen wird deutlich, dass mit Ausnahme des Calciums die meisten Parameter aus beiden Additiven bei dem höheren pH-Wert von 12 deutlich mehr auslaugen. Aus dem Eisenoxidhydroxid werden Cr, Cu, Fe, Mo, V, Cl und  $\text{SO}_4$  verstärkt freigesetzt. Aus dem Wasserwerksschlamm werden vor

allem folgende Parameter in erhöhten Konzentrationen freigesetzt: Cr, Cu, Fe, Cl, F und SO<sub>4</sub>.

Bei der Auswertung der Ergebnisse der sequentiellen Extraktion muss berücksichtigt werden, dass diese Methode zwar helfen kann, die Verfügbarkeit der einzelnen Schwermetalle einzuschätzen, eine eindeutige Zuordnung zu definierten Mineralphasen ist jedoch nicht möglich. Kein Extraktionsmittel ist selektiv genug, um die Schwermetalle nur aus der gewünschten Phase herauszulösen [9].

Insgesamt lassen die Ergebnisse der sequentiellen Extraktion erkennen, dass im Vergleich zum Gesamtgehalt der Probe nur geringe Anteile von Bestandteilen der SWS wasserlöslich sind. Von den betrachteten Schwermetallen Chrom, Molybdän und Vanadium wird nur Molybdän in relevanten Mengen (bis 9 %, bezogen auf den Feststoffgehalt) gelöst. Durch Essigsäure in der 2. Fraktion werden neben Calcit und Freikalk insbesondere auch Kalksilikate gelöst. Da Vanadium in SWS zu gewissen Anteilen in Kalksilikaten gebunden vorliegt [12], werden in dieser Fraktion gleichzeitig bis zu 20 % des im Feststoff enthaltenen Vanadiums freigesetzt. Auch Molybdän ist teilweise in dieser Fraktion vorhanden, jedoch nahezu kein Chrom. Nach Anwendung des Reduktionsmittels in der 3. Fraktion wird laut der Auswertung der XRD-Analyse scheinbar keine Veränderung der Mineralogie hervorgerufen. Dennoch sind gewisse Anteile von Eisen (insbesondere bei LDS I mit 25 %), aber auch Vanadium und Molybdän gelöst worden. Die Gehalte an Chrom sind gegenüber der 2. Fraktion ebenfalls etwas höher. Ob und inwieweit in dieser Fraktion eisenreiche Phasen, wie Calciumferrite, Wüstite und Magnetite, angegriffen wurden oder welche Phasen sonst noch für die Freisetzung der gemessenen Bestandteile verantwortlich sind, lässt sich anhand der vorliegenden Ergebnisse nicht klären. Eine abschließende Interpretation der Ergebnisse ist bisher nicht möglich, da die angewandte Methode noch nicht ausgereift ist. Wie die Bilanzierung der Ergebnisse gezeigt hat, sind verglichen mit der Originalprobe beim Aufsummieren der einzelnen Fraktionen sowohl Minderbefunde als auch zu hohe Gehalte festgestellt worden. Die tatsächlichen Gründe hierfür konnten allerdings nicht abschließend geklärt werden. Im Trend lassen die Ergebnisse erkennen, dass generell die höchsten Schwermetallgehalte bei allen vier Schlacken in der letzten residualen Fraktion vorhanden sind.

	FeO(OH)		WWS		
	Additiv-pH-Wert 8,3	Schlacken-pH-Wert 12	Additiv-pH-Wert 8,1	Schlacken-pH-Wert 12	
Ca	mg/l	3,8	< 0,10	64	2,2
Cr	mg/l	< 0,001	0,004	0,001	0,018
Cu	mg/l	< 0,002	0,003	0,002	0,19
Fe	mg/l	< 0,010	0,13	0,027	0,64
Mo	mg/l	< 0,002	0,044	< 0,002	< 0,002
V	mg/l	< 0,002	0,008	< 0,002	< 0,002
Cl	mg/l	< 1,0	132	53	143
F	mg/l	< 0,4	< 0,4	< 0,4	1,8
SO <sub>4</sub>	mg/l	139	294	94	175

Tabelle 1: Konzentrationen in den Eluaten der mittels pH-Abhängigkeitsverfahren untersuchten Additive bei dem natürlichen pH-Wert der Additive bzw. dem pH-Wert der Schlacken

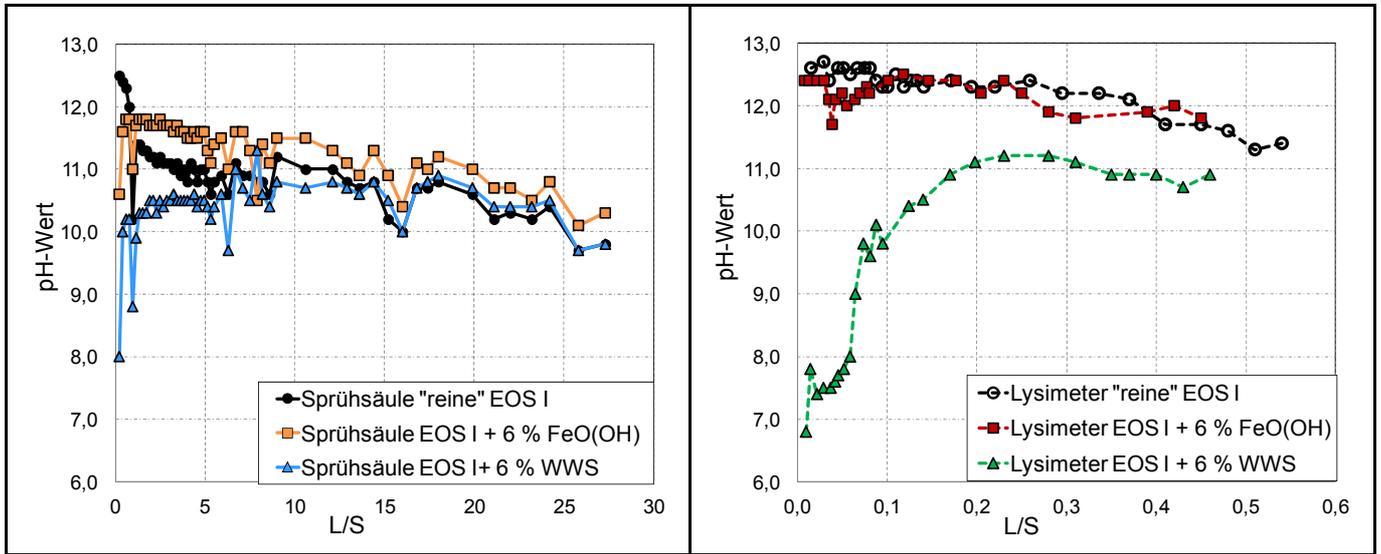
– **Langzeit-Auslaugversuche (Sprühsäulen- und Lysimeterversuche)**

Da bei den Sprühsäulenversuchen mit einem starken Zeiträffereffekt gearbeitet wird, sind die Ergebnisse dieses Langzeit-Laborversuchs nicht unmittelbar mit denen der Lysimeterversuche vergleichbar. Die Laufzeit der Sprühsäulenversuche von 95 Wochen entspricht "entzerrt", d. h., bezogen auf reale Niederschlagsbedingungen, 1520 Wochen (~ 29 Jahre). Die Aussagekraft der Ergebnisse der Lysimeterversuche ist im Vergleich zu denen der Sprühsäulenversuche nur begrenzt, da die bisherige Dauer der Lysimeterversuche mit 66 Wochen noch relativ kurz ist. Die Bewertung der Ergebnisse gibt daher nur den momentanen Zustand wieder. Zudem unterscheiden sich die beiden Langzeit-Versuchsserien durch sehr unterschiedliche L/S-Verhältnisse. Ein einziger Berechnungszyklus bei den Sprühsäulenversuchen entspricht einem L/S von 0,22, sodass bei einer Gesamtlaufzeit von 95 Wochen ein L/S-Verhältnis von 27 erreicht wird. Demgegenüber werden bei den Lysimeterversuchen nach einer Laufzeit von 66 Wochen erst L/S-Verhältnisse von 0,54 erreicht.

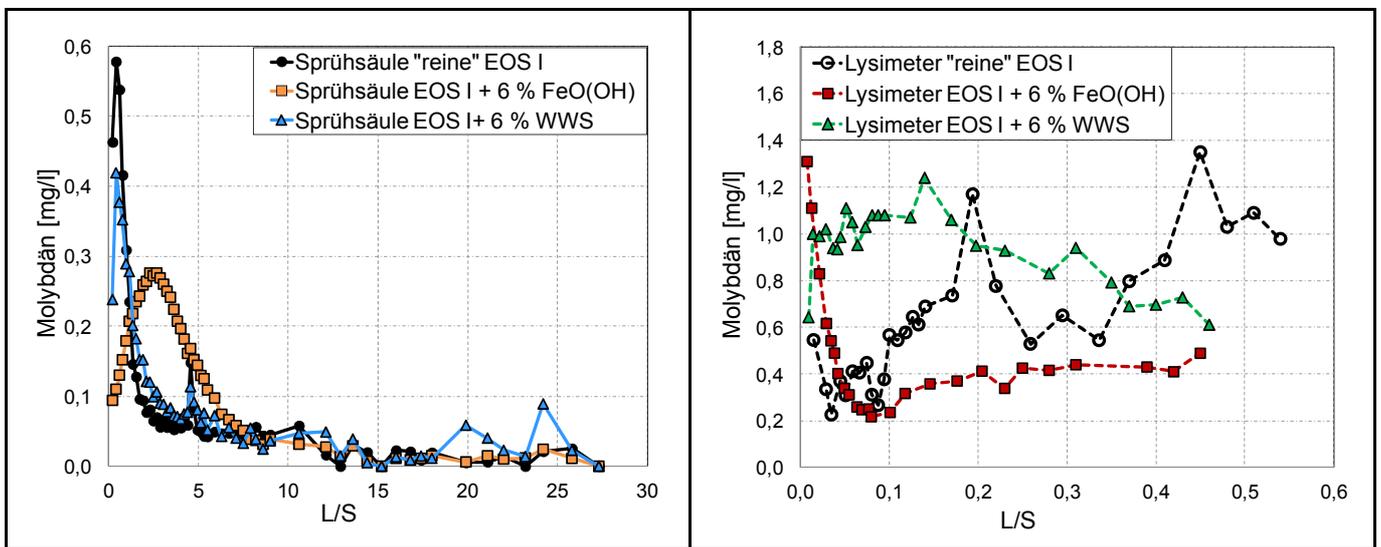
Im Folgenden werden die Ergebnisse der Langzeitversuche nur für die "reine" EOS I bzw. die EOS I-Additiv-Gemische vorgestellt, da mit dieser Schlacke alle Versuche durchgeführt wurden (s. Kapitel "Untersuchungen"). In Bild 4 links sind die pH-Werte aus den Sprühsäulenversuchen dargestellt. Für beide EOS-Gemische werden zu Beginn gegenüber der "reinen" EOS I niedrigere pH-Werte gemessen, wobei die Werte des EOS I-WWS-Gemischs unter denen des EOS I-FeO(OH)-Gemischs liegen. Ab einem L/S-Verhältnis von 2 liegen die pH-Werte des EOS I-FeO(OH)-Gemischs über denen der "reinen" EOS. Weiterhin nied-

riger sind die pH-Werte des EOS I-WWS-Gemischs, aber auch diese gleichen sich mit der Zeit dem pH-Wert der "reinen" EOS I an. Bei den Lysimeterversuchen (Bild 4, rechts) wird durch die Zugabe des Wasserwerksschlammes zu der EOS I der pH-Wert in den Sickerwässern ebenfalls deutlich verändert. So liegt dieser zu Beginn der Untersuchungen unter 7, um im Laufe der Versuchsdauer auf pH-Werte von 11 nach einem L/S von 0,2 anzusteigen. Die Zugabe des Eisenoxidhydroxids bewirkt nahezu keine Veränderung des pH-Werts im Vergleich zu dem der "reinen" EOS I.

An den ersten 3 Terminen wird für die "reine" EOS I die höchste Molybdänkonzentration aller untersuchten Eluate der Sprühsäulen (Bild 5, links) mit max. 0,6 mg/l gemessen. Die Konzentrationen sinken mit zunehmender Versuchsdauer, und ab einem L/S von 13 liegen die Konzentrationen häufig unterhalb der Bestimmungsgrenze (< 0,002 mg/l). Die Molybdänkonzentrationen des EOS I-FeO(OH)-Gemischs starten mit deutlich niedrigeren Werten von 0,1 mg/l und steigen im weiteren Verlauf auf ein Maximum von 0,28 mg/l bei einem L/S = 3 an, um schließlich ebenfalls auf Konzentrationen im Bereich der Bestimmungsgrenze zu sinken. Der Verlauf der Molybdänkonzentrationen des EOS I-WWS-Gemischs gleicht nahezu dem der "reinen" EOS I, nur zu Beginn der Versuchsreihe liegen die Konzentrationen unter der "reinen" EOS I. Im Gegensatz zu den Sprühsäulen werden bei den Lysimetern durch die Zugabe beider Additive zu Anfang höhere Molybdänkonzentrationen als bei der "reinen" EOS I erhalten (Bild 5, rechts). Die Molybdänkonzentration wird durch die Zugabe des Eisenoxidhydroxids bis zu einem L/S von 0,05 deutlich gegenüber der "reinen" EOS I erhöht. Danach beginnt die Molybdänkonzentration in



**Bild 4:** pH-Werte in den Eluaten der Sprühsäulenversuche (links) und der Lysimeterversuche (rechts) von "reiner" EOS I; EOS I + 6 % FeO(OH) und EOS I + 6 % WWS



**Bild 5:** Molybdänkonzentrationen der Eluate aus den Sprühsäulen- (links) und Lysimeterversuchen (rechts) von "reiner" EOS I; EOS I + 6 % FeO(OH) und EOS I + 6 % WWS

den Sickerwässern der "reinen" EOS I zu steigen und liegt über der des Gemischs. Die Molybdänkonzentration in den Sickerwässern des EOS I-WWS-Gemischs liegt im Vergleich zu der "reinen" EOS I bis zu einem L/S von 0,2 höher, anschließend sinken die Konzentrationen.

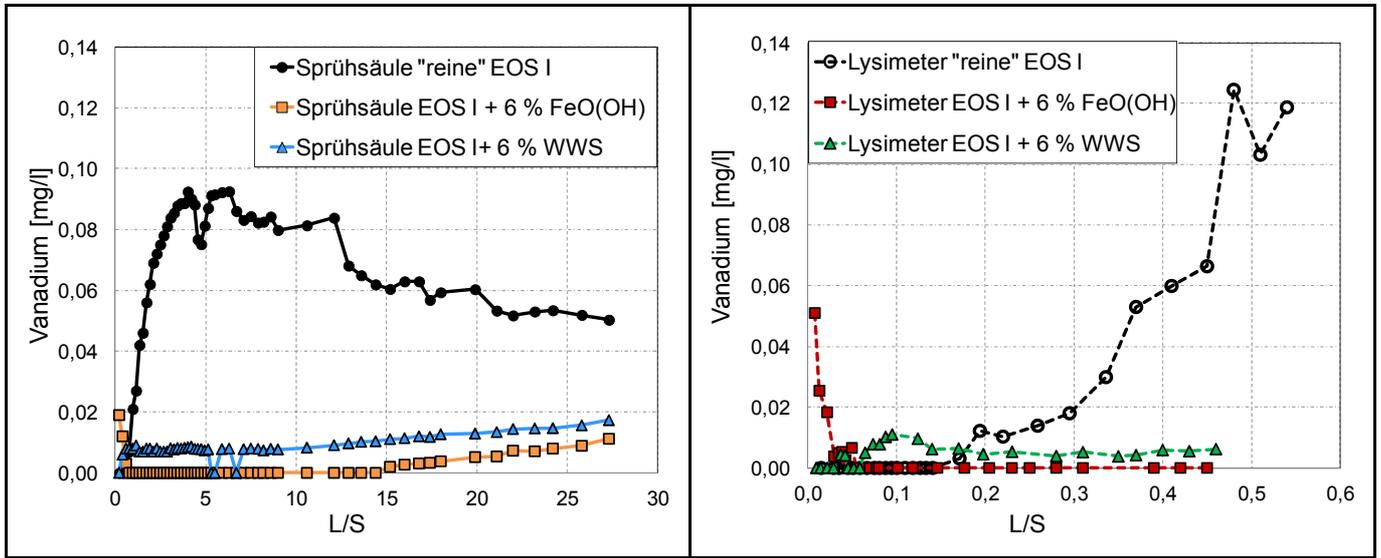
Die Vanadiumkonzentration kann sowohl durch die Zugabe des Eisenoxidhydroxids als auch durch den Wasserwerksschlamm langfristig verringert werden (Bild 6). Die Vanadiumkonzentration in den Eluaten der Sprühsäulenversuche der "reinen" EOS I steigt rapide auf Konzentrationen von 0,09 mg/l an, anschließend sinken die Konzentrationen langsam (Bild 6, links). Die Vanadiumkonzentrationen der beiden Gemische liegen deutlich unterhalb der "reinen" EOS I. Erst nach einem L/S von 15

steigen die Konzentrationen leicht an, wobei die des WWS-Gemischs etwas über denen des FeO(OH)-Gemischs liegen. In den Sickerwässern der Lysimeter mit dem EOS I-FeO(OH)-Gemisch (Bild 6, rechts) werden lediglich an den ersten Terminen höhere Vanadiumkonzentrationen gemessen, die dann aber im weiteren Versuchsverlauf unterhalb der Bestimmungsgrenze liegen. Dies zeigt, dass sich erst nach einer gewissen Zeitdauer bestimmte Rahmenbedingungen, wie z. B. eine gleichmäßige Perkolations eingestellt haben und erst danach eine Sorption von Vanadium erfolgt. Die Vanadiumkonzentrationen der "reinen" EOS I hingegen steigen ab einem L/S von 0,1 deutlich an.

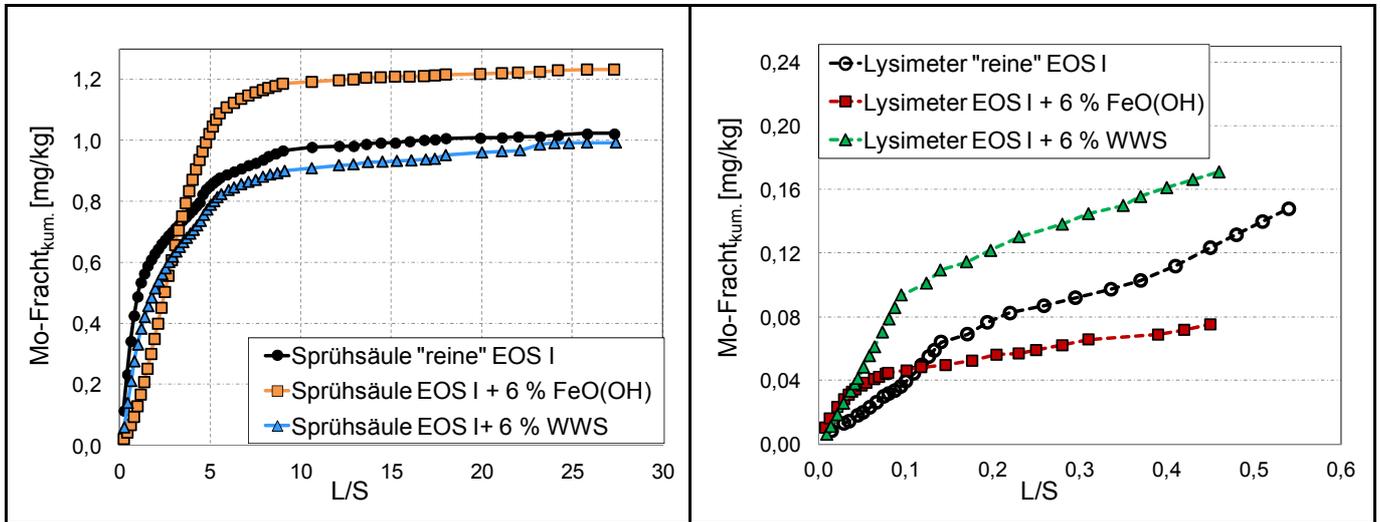
In den Bildern 7 und 8 sind die kumulierten Frachten der Sprühsäulen- und Lysimeter-

versuche für die EOS I dargestellt. Diese Darstellungsart gibt Aufschluss über die gesamten freigesetzten Mengen bzw. Frachten und ermöglicht so eine Auswertung bezüglich der Wirksamkeit der beiden Additive für einen längeren Zeitraum.

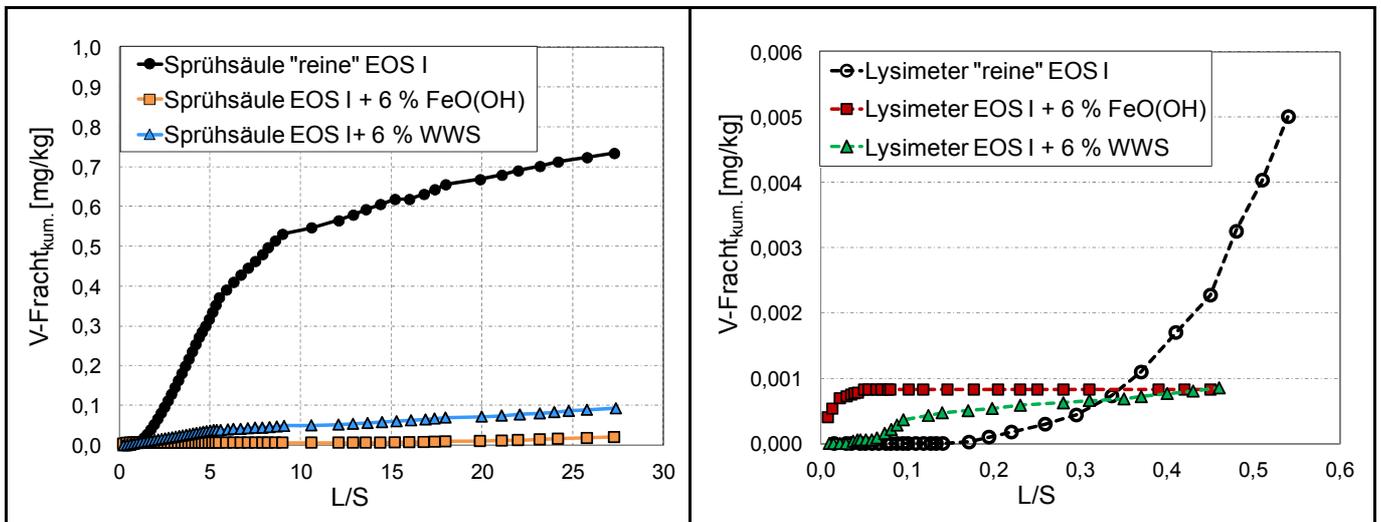
Bei den Sprühsäulenversuchen wird in Summe betrachtet am meisten Molybdän aus dem EOS I-FeO(OH)-Gemisch freigesetzt (Bild 7, links), obwohl bei diesem Gemisch anfangs (bis zu einem L/S-Verhältnis von 2) die niedrigsten Werte gemessen wurden. Aus der Literatur [13] ist bekannt, dass eine Sorption von Molybdän an Eisenoxide erst ab pH-Werten kleiner 10 einsetzt. Für das EOS I-FeO(OH)-Gemisch werden über den gesamten Untersuchungszeitraum jedoch höhere pH-Werte gemessen, die zudem über denen der "reinen" EOS I liegen.



**Bild 6:** Vanadiumkonzentrationen der Eluate aus den Sprühsäulen- (links) und Lysimeterversuchen (rechts) von "reiner" EOS I; EOS I + 6 % FeO(OH) und EOS I + 6 % WWS



**Bild 7:** Kumulierte Molybdänfrachten aus den Sprühsäulenversuchen (links) und den Lysimeterversuchen (rechts) für reine EOS I; EOS I + 6 % FeO(OH) und EOS I + 6 % WWS



**Bild 8:** Kumulierte Vanadiumfrachten der Eluate aus den Sprühsäulenversuchen (links) und den Lysimeterversuchen (rechts) für die EOS I

	Sprühsäulen		Lysimeter	
	EOS I + 6 % WWS	EOS I + 6 % FeO(OH)	EOS I + 6 % WWS	EOS I + 6 % FeO(OH)
Cr	↑	↑	↑	↑
Mo	↔	↑	↑	↓
V	↓	↓	↓	↓
F	↑	↑	↔	↑

**Tabelle 2:** Zusammenfassung der Wirksamkeit der Additive in den Sprühsäulen- und Lysimeterversuchen für EOS I

Zwischen dem EOS I-WWS-Gemisch und der "reinen" EOS I besteht kein großer Unterschied hinsichtlich der kumulierten Frachten in den Sprühsäulenversuchen.

Bei den Lysimeterversuchen wird bisher am meisten Molybdän aus dem EOS I-WWS-Gemisch freigesetzt, am wenigsten aus dem EOS I-FeO(OH)-Gemisch (Bild 7, rechts). Wie zuvor erläutert, ist ein Vergleich zwischen den Sprühsäulen- und Lysimeterversuchen zum jetzigen Zeitpunkt aber noch nicht realistisch, da bei den Lysimeterversuchen erst ein L/S-Verhältnis von 0,54 erreicht wurde gegenüber L/S = 27 bei den Sprühsäulenversuchen.

Anhand der Darstellung der kumulierten Vanadiumfrachten (Bild 8) für die EOS I wird deutlich, dass durch die Zugabe der beiden Additive eine Immobilisierung von Vanadium erfolgt. Dies kann sowohl für die Sprühsäulenversuche als auch für die Lysimeterversuche festgestellt werden.

Weitere wichtige umweltrelevante Parameter, wie Chrom und Fluorid, werden durch die Zugabe der Additive im Vergleich zu den "reinen" Schlacken nicht immobilisiert. **Tabelle 2** gibt für die EOS einen Überblick über die Wirksamkeit der beiden getesteten Additive FeO(OH) und WWS für die Sprühsäulenversuche und die Lysimeterversuche wieder. Die Ergebnisse aus beiden Versuchsreihen sind recht ähnlich, wobei zu berücksichtigen ist, dass – bedingt durch den Zeitraffereffekt – die Sprühsäulenversuche bereits einen wesentlich größeren Zeiträumen umfassen als die Lysimeterversuche.

### Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollten geeignete Additive identifiziert werden, die es erlauben, wirksam, langfristige und kostengünstig die Schwermetallfreisetzung – vor allem von Molybdän und

Vanadium – aus SWS zu reduzieren. Damit sollte in Hinblick auf die geplante EBV für Hersteller, Aufbereiter und Vermarkter von SWS der Absatz für den Einsatzbereich im Erd- und Wegebau weiterhin sichergestellt werden.

Nach Voruntersuchungen mittels Schüttelverfahren (DIN 19529) und Sorptionsversuchen wurden die beiden Additive FeO(OH) und WWS für weitere Versuche ausgewählt. Die Ergebnisse der Sorptionsversuche zeigten, dass die untersuchten Additive durchaus in der Lage sind, Schwermetalle, wie Molybdän und Vanadium, zu sorbieren. Anhand von Mischungsversuchen wurde eine optimale Zugabemenge von 6 % ermittelt.

Bei den anschließend durchgeführten Langzeitversuchen (Sprühsäulen- und Lysimeterversuche) bewirkten die beiden Additive (FeO(OH) und WWS) dagegen im Wesentlichen nur eine Immobilisierung von Vanadium. Kein Erfolg konnte dagegen bei der Verringerung der Molybdänauslaugung erzielt werden. Dies ist wahrscheinlich auf den Unterschied zwischen den Sorptionsversuchen und den Sprühsäulen- bzw. Lysimeterversuchen zurückzuführen. Bei den Sorptionsversuchen wurde dem hergestellten Schlackeneluat das jeweilige Additiv erst in einem zweiten Schritt hinzugegeben und nicht, wie bei den Sprühsäulen- oder Lysimeterversuchen, eine Mischung von Schlacke und Additiv hergestellt.

Weitere umweltrelevante Parameter, wie Chrom und Fluorid, erfuhren durch die Zugabe der Additive sogar eine Mobilisierung. Eine Ursache hierfür könnte die mit der Zugabe des Additivs verbundene Änderung des pH-Werts sein. Bessere Ergebnisse wären daher möglicherweise mit Additiven zu erzielen, die ähnliche pH-Werte wie die Schlacken selbst aufweisen. Das Ziel des Forschungsvorhabens, geeignete Additive

zu identifizieren, die langfristig Schwermetalle immobilisieren, wurde demnach nur zum Teil erreicht. Die beiden Additive sind nur geeignet, wenn eine Schlacke ausschließlich eine zu hohe Vanadiumauslaugrate aufweist.

### Dank

Das IGF-Vorhaben Nr. 17388 N der Forschungsvereinigung VDEh-Gesellschaft zur Förderung der Eisenforschung mbH wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

### Literatur

- [1] Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Bericht zur Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser, Düsseldorf, (2004)
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzstoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material – Entwurf Oktober 2012
- [3] Bialucha, R., Spanka, M.: Untersuchungen zur Reduzierung der Schwermetall-Mobilität aus Stahlwerksschlacken durch den Zusatz von mineralischen Additiven, Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 17388, (2014)
- [4] DIN 19529: Elution von Feststoffen – Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen Stoffen mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg, Januar 2009
- [5] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau – TP Gestein-StB Teil 7.1.1, Modifiziertes DEV-S4-Verfahren, Ausgabe 2008
- [6] DIN 19528: Elution von Feststoffen – Perkolationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen, Januar 2009

- [7] DIN CEN/TS 14997: Charakterisierung von Abfällen – Untersuchung des Auslaugungsverhaltens - Einfluss des pH-Wertes auf die Auslaugung bei kontinuierlicher pH-Wert-Kontrolle, (2007)
- [8] Van Herck, P., Vandecasteele, C.: Evaluation of the use of a sequential extraction procedure for the characterization and treatment of metal containing solid waste, Waste Management 21 (2001), S. 685-694
- [9] Sulkowski, M.: Speziesanalytische Untersuchungen an Boden- und Sedimentgesteinsproben auf der Grundlage von Extraktions- und Röntgenmethoden, Universität Essen, Dissertation, (2002)
- [10] Meima, J.A., Comans, R.N.J: The leaching of trace elements from municipal solid waste incineration bottom ash at different stages of weathering, Applied Geochemistry 14 (1999), pp. 159-171
- [11] Goldberg, S., Forster, H.S., Godfrey, C.L.: Molybdenum Adsorption on Oxides, Clay Minerals, and Soils, Soil Science Society of America 60 (1996), pp. 425-432
- [12] Drissen, P.: Mineralische Bindung von Spurenelementen in Stahlwerkschlacken, Report des FEHS – Instituts für Baustoff-Forschung e.V. 13, (2006), Heft 1, S. 6-8
- [13] Xu, N., Christodoulatos, C., Braidia, W.: Adsorption of molybdate and tetrathiomolybdate onto pyrite and goethite: Effect of pH and competitive anions, Chemosphere 62 (2006), 10, S. 1726-1735

## Nachhaltige Verwendung von Eisenhüttenschlacken unterstützt durch sechzig Jahre Forschung in Rheinhausen

Dr.-Ing. H. Motz

Schon seit der Herrschaftszeit der Römer werden Schlacken in großem Maße als Straßenbaustoff verwendet, wie alte Funde belegen [1, 2]. In der Folgezeit wird über vielfältige Nutzungen der bei der Eisenherstellung gewonnenen Schlacken als Produkte berichtet [3-7]. Besonders hervorzuheben ist allerdings die Entdeckung der latent-hydraulischen Eigenschaft der schnell abgekühlten Hochofenschlacke, des Hütten-sands, durch Emil Langen 1862 [8, 4] und der Vegetationswirkung der in dem 1877 entwickelten Thomasverfahren gebildeten Thomasschlacke [7-9].

In der Folgezeit wurden andere Nutzungsmöglichkeiten für Schlacken zum Beispiel im Verkehrswegebau erschlossen, die bis heute angewandt werden. Gleichzeitig wurden die Verfahren zur Abkühlung von Schlacken weiterentwickelt, mit denen die dabei entstehenden neuen Produkte mit optimalen Eigenschaften auf möglichst wirtschaftliche Weise erzeugt werden konnten. Diese Methoden konzentrierten sich auf die Granulation der flüssigen Hochofenschlacke, ihre Verdüsung [4] zu Hüttenwolle und die Herstellung von Hüttenbims, der geschäumten Hochofenschlacke. Unzählige Verfahrensvorschläge wurden erarbeitet, erprobt, zu Patenten angemeldet, im betrieblichen Maßstab angewandt und in Veröffentlichungen ausführlich beschrieben [4, 5].

Trotz dieser Erfolge hat die Stahlindustrie in Deutschland seit jeher die Anwendungsforschung zu Eisenhüttenschlacken immer weiter vorangetrieben, um die daraus her-

gestellten Produkte normgemäß und mit höchster Wertschöpfung im Markt zu platzieren. Forschung und Entwicklung wurden zunächst in den jeweiligen Hüttenwerken betrieben, bald aber in eine Gemeinschaftsarbeit überführt, die ab 1860 beim Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh) erfolgte. Dort wurden ab 1921 die Arbeiten zu Hütten-sand und Hochofenstückschlacke von dem Ausschuss zur Verwertung der Hochofenschlacke wahrgenommen. 1935 erwie es sich als notwendig, den technisch-wissenschaftlichen Erfahrungsaustausch und die Koordinierung gemeinschaftlich auszuführender Entwicklungsaufgaben durch die Gründung einer wirtschaftspolitischen Organisation, der Fachgruppe "Hochofenschlacke", zu ergänzen.

Bereits ab 1945 wurden Möglichkeiten zur Herstellung eines gekörnten Thomasphosphats durch schnelle Abkühlung der flüssigen Thomasschlacke erprobt. Aus diesen Aktivitäten heraus wurde 1949 ein Technischer Ausschuss beim Verein der Thomasphosphat-Fabriken gegründet, der die betrieblichen Arbeiten koordinierte. Aufgrund der jeweils erzielten Ergebnisse wurden weitergehende gemeinschaftliche Untersuchungen geplant und ausgeführt [5]. Diese Aktivitäten führten schließlich 1953 zur Gründung der Arbeitsgemeinschaft Hüttenkalk, deren wichtigste Aufgabe es war, in enger Zusammenarbeit mit der Landwirtschaftlichen Versuchsanstalt der Thomasphosphat-Fabriken in Mülheim, die Entwicklung und den Absatz der aus Eisenhüttenschlacken erzeugten Hütten- und Konverterkalk zu fördern und deren Quali-

tätskontrolle zu überwachen. Die Arbeitsgemeinschaft Hüttenkalk hat heute ihren Sitz in Duisburg-Rheinhausen im FEHS-Institut. Sie verfügt nach wie vor an der Landwirtschaftlichen Versuchsanstalt in Mühlheim/Ruhr über eine eigenes Gewächshaus, in dem alle für die Untersuchung von Düngemitteln erforderlichen Pflanzversuche in eigener Regie durchgeführt werden.

Ab 1953 wurde innerhalb der deutschen Hüttenwerke verstärkt die Frage der Gründung einer zentralen Forschungseinrichtung diskutiert, die sich ausschließlich mit den aus Hochofenschlacken hergestellten Produkten befassen sollte. Es wurde schließlich 1959 zunächst ein Arbeitskreis "Hochofenschlackenforschung" gebildet, in dem Arbeiten abgestimmt wurden, die zur optimalen Nutzung des Hütten-sands im Zement und zur Verwendung der Hochofenstückschlacke im Verkehrswegebau wichtig waren. Man erkannte schnell, dass aufgrund der steigenden Qualitätsanforderungen in der Bauindustrie eine intensivere Forschung erforderlich war, so dass der Arbeitskreis in die Arbeitsgemeinschaft Hochofenschlackenforschung mit Sitz in Duisburg-Rheinhausen umgewandelt wurde. Ihre Aufgabe bestand in der "Förderung der technischen und wissenschaftlichen Arbeiten im Bereich der Erforschung, Herstellung und Verwendung von Hochofenschlacken und Folgeprodukten". Mit der Ausweitung der Forschungsaktivitäten wurde gleichzeitig auch der Bau eines Forschungsinstituts beschlossen, das auf einem vom Hüttenwerk Rheinhausen zur Verfügung gestellten Grundstück errichtet wurde. Das

Forschungsinstitut wurde am 13.11.1954 eingeweiht. Im Fokus der Arbeiten des neuen Forschungsinstituts standen auch weiterhin Fragen zur Herstellung und Nutzung von Hochofenstüchschlacken und Hüttensand.

Ab 1955 gewann die Tätigkeit der Arbeitsgemeinschaft Hochofenschlackenforschung und des angeschlossenen Forschungsinstituts innerhalb der Stahlindustrie, der Bauwirtschaft und Behörden immer mehr an Bedeutung, so dass 1968 von den Mitgliedern beschlossen wurde, die Arbeitsgemeinschaft in einen eingetragenen Verein mit dem Namen Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken e.V. (FEhS) umzuwandeln. Das 1954 eingeweihte Forschungsinstitut war somit die Keimzelle sämtlicher weiteren Forschungsaktivitäten der Stahlindustrie in Bezug auf Eisenhüttenschlacken.

Der Aufgabenbereich der FEhS wurde nach Gründung systematisch auf alle Nebenprodukte der Eisen- und Stahlindustrie ausgeweitet. Neben Forschung und Entwicklung, kamen Consultingarbeiten zur Entstehung und Verarbeitung von Eisenhüttenschlacken hinzu, ergänzt durch wachsende Aktivitäten im Prüfungs-, Überwachungs- und Zertifizierungsbereich von Zementen, Betonen und Mineralstoffen für den Verkehrswegebau. Der sich zunehmend ausweitende Aufgabenbereich hat schließlich zu der Umbenennung des Vereins in FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V. (FEhS-Institut) im Jahre 2003 geführt. Heute ist das FEhS-Institut eine Forschungseinrichtung von Stahlerzeugern in Deutschland, den Niederlanden, Österreich und der Schweiz sowie mehrerer Zementhersteller. Über Kooperationsverträge – unter anderem mit dem Fachverband Eisenhüttenschlacken e.V. – sind ebenfalls die meisten der in Deutschland tätigen Aufbereitungsfirmen für Hochofen- und Stahlwerksschlacke sowie Erzeuger und Aufbereiter von NE-Metall-schlacke mit dem FEhS-Institut verbunden.

Zweck des gemeinnützigen Vereins FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V. ist satzungsgemäß die Förderung der wissenschaftlichen Arbeit auf dem Gebiet der Entwicklung und Nutzung von Eisenhüttenschlacken sowie der bei der Eisen- und Stahlgewinnung entstehenden festen Reststoffe, unter denen Schlämme und Stäube als Sekundärrohstoffe verstanden werden. Der Verein verfolgt ausschließlich und

unmittelbar gemeinnützige Ziele. Aus diesem Grund verfolgt er keine politischen, auf Erwerb abzielenden oder eigenwirtschaftlichen Zwecke. Die Arbeitsbereiche hinsichtlich Forschung und Entwicklung umfassen heute die fünf Themengebiete Baustoffe, Umwelt, Verkehrsbau, Sekundärrohstoffe/Schlackenmetallurgie und Düngemittel. Die entsprechenden Aufgabenstellungen des Instituts werden aufgrund von Notwendigkeiten aus wissenschaftlichen Erkenntnissen, Entwicklungen in der Praxis und Ereignissen im Markt in Arbeitskreisen und Arbeitsgruppen entwickelt. Über die wesentlichen Arbeiten innerhalb der letzten 60 Jahre und die dabei bearbeiteten Schwerpunkte wird seit Einführung des Reports im Jahre 1994 regelmäßig berichtet. Die jeweiligen Jahrgänge des Reports der letzten 10 Jahre sind auf der Internetseite des Instituts ([www.fehs.de](http://www.fehs.de)) nachzulesen. Über die Schwerpunkte der Arbeiten der Forschungsabteilungen wurde aktuell in [6] berichtet.

Auf Betreiben des FEhS-Instituts wurde im Jahr 2000 die europäische Schlackenorganisation EUROSLAG gegründet. 15 Länder der EU sind inzwischen in dieser Organisation als Mitglieder vertreten. Das FEhS-Institut übt seit der Gründung die Geschäftsführung von EUROSLAG aus. 2012 ist es schließlich gelungen, ein weltweit arbeitendes Netzwerk "World of Iron and Steel Slag" (WoISS) mit folgenden Mitgliedern zu gründen: Australasian (iron and steel) Slag Association, Brazil Steel Institute, Canadian Slag Association, EUROSLAG, Nippon Slag Association und die National Slag Association (USA).

Zusammenfassend kann ausgeführt werden, dass für die Produkte aus Eisenhüttenschlacken aufgrund der über Jahrzehnte durchgeführten Forschungsaktivitäten des FEhS – Instituts für Baustoff-Forschung e.V. und seiner Vorgängerorganisationen, der Umsetzung dieser Erkenntnisse in den Stahlwerken, Zementwerken und Aufbereitungsunternehmen sowie der konsequenten Übertragung der Forschungsergebnisse in das technische Regelwerk seit vielen Jahren eine Nutzungsrate von mehr als 90 % besteht. Diese hohe Nutzungsrate wurde in Konkurrenz zu Produkten aus anderen industriellen Nebenprodukten und natürlichen Rohstoffen erreicht. Die zukünftigen Arbeiten werden deshalb wie bisher darauf ausgerichtet sein, die erreichten Nutzungs-raten zu sichern und auszuweiten sowie höherwertige Einsatzgebiete für die Produkte aus Eisenhüttenschlacken zu erschlie-

ßen. Dazu werden weiterhin erhebliche Anstrengungen erforderlich sein, um zum einen die notwendigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Labor, Technikum und Betrieb durchführen zu können und um zum anderen die resultierenden Erkenntnisse in die Praxis zu überführen.

Ziel ist es dabei nach wie vor, durch die Verwendung von Eisenhüttenschlacken als internes Recyclingmaterial, im Bauwesen und als Düngemittel eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft zu betreiben und natürliche Ressourcen zu schonen.

## Literatur

- [1] Beck, L.: Die Geschichte des Eisens F. Vieweg und Sohn, Braunschweig (1891)
- [2] Lüthi, A.: Recycling im Straßenbau im 10. Jahrhundert, Aus der Geschichte der Bautechnik, Hrsg. Fritz Scheidegger (Basel, Boston, Berlin (1992), S. 82-87
- [3] Kollo, H.: 125 Jahre Hüttensand – ein äußerst schätzbares Material, Beton-Informationen 27 (1987), Heft 5/6, S. 70
- [4] Fischer, W., Wolf, S.: Schwefel in Schlacke und Schlackenwolle, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart (1951)
- [5] Protokoll der 1. Sitzung des Technischen Ausschusses des Vereins der Thomasphosphat-Fabrikanten am 30.09.1949
- [6] Motz, H. et al.: Sechzig Jahre Schlackenforschung in Rheinhausen – Ein Beitrag zur Nachhaltigkeit – Schlacken aus der Metallurgie, Band 3, S. 193-208, ISBN 978-3-944310-17-6, TK Verlag (2014)
- [7] Ottenheim, K.: 50 Jahre Fachverband Hochofenschlacke, Vortrag am 11.04.1986
- [8] Grün, R.: Der Hochofenzement und seine Verwendung, Verlag Zement und Beton, Berlin (1928)
- [9] Protokoll der 1. Sitzung des Technischen Ausschusses des Vereins der Thomasphosphat-Fabrikanten am 30.09.1949

# Sorptionsverhalten von ungestörten Böden gegenüber Molybdän aus Stahlwerksschlacken

Dr.-Ing. R. Bialucha, Dipl.-Geogr. M. Leson

## Einleitung und Zielsetzung

Seit Anfang 2006 wird an einer Verordnung für die Verwertung von Abfällen und die Verwendung von industriellen Nebenprodukten/Mineralstoffen gearbeitet, die unter anderem den Einsatz von Schlacken und Recyclingbaustoffen bundeseinheitlich regeln soll. In dieser "Ersatzbaustoffverordnung" (EBV) [1] wurde erstmalig der Parameter Molybdän als Prüfparameter eingeführt, der bis dahin in keinem Straßenbauregelwerk enthalten war. Die vorgesehenen extrem niedrigen Grenzwerte beruhen auf der Annahme, dass Molybdän im Boden nur schwach oder gar nicht zurückgehalten wird. Als Folge kann die Verwendung größerer Mengen an Stahlwerksschlacken (SWS) – vor allem für den offenen Einbau – durch die EBV stark eingeschränkt werden. Die Reduzierung der Einsatzgebiete und damit der verwendbaren Mengen läuft dem Gedanken der Schonung natürlicher Ressourcen zuwider und würde außerdem den Aufbau zusätzlicher Deponiekapazitäten bedeuten.

Um Näheres über das Verhalten des Parameters Molybdän in Stahlwerksschlacken und die Sorptionsfähigkeit verschiedener Böden gegenüber Molybdän zu erfahren, hat das FEhS-Institut in den Jahren 2008 bis 2011 bereits ein AiF-Forschungsvorhaben [2, 3] bearbeitet. Hierfür wurde an sechs

Böden und sechs Stahlwerksschlacken in Laborversuchen die Molybdänauslaugung, u. a. in Abhängigkeit von Art und Dauer der Versuche, dem Feststoffgehalt, dem pH-Wert sowie der Korngröße untersucht. Weiterhin wurden Langzeitversuche im Labor (Sprühsäulenversuche) sowie im halbtechnischen Maßstab (Lysimeterversuche) durchgeführt, die über die Projektlaufzeit hinaus weiter betrieben wurden.

Die im Rahmen dieses Projekts neu aufgeworfenen Fragestellungen wurden zum Anlass genommen, in einem Folgeprojekt den Kenntnisstand über die in Böden ablaufenden Sorptionsprozesse zu erweitern.

Ziel des Anschlussprojekts war es zu untersuchen, ob im Gegensatz zur Annahme in der EBV Molybdän nicht dennoch längerfristig im Boden zurückgehalten wird. Sollte dies zutreffen, könnte im Zusammenhang mit der Kenntnis, dass die Freisetzung aus den Schlacken zeitlich begrenzt ist, in Bezug auf die EBV die Modellierung optimiert werden und dadurch höhere Grenzwerte zugelassen werden. Somit sollte im Speziellen das Abklingen der Molybdänfreisetzung sowie die Entwicklung der pH-Werte im Schlackeneluat und in den Bodenlösungen untersucht werden. Der Parameter pH-Wert ist eine der wichtigsten Steuergrößen für die Molybdänsorption. So können bei einem pH-Wert von ca. 4-5

[4, 5] die höchsten Sorptionsraten erwartet werden, die mit steigendem pH-Wert abnehmen. Während im ersten Projekt die Böden homogenisiert und von Hand in die Lysimeter gefüllt wurden, stand im besonderen Fokus des jetzigen Projekts die Untersuchung von ungestörten Bodenproben in Lysimeterversuchen. Diese wurden weitgehend ohne Störung des Bodengefüges in die Lysimeter eingebaut, um so noch realitätsnähere Werte bezüglich der Sorptionskapazität zu erhalten.

## Untersuchungsprogramm

Für die Bearbeitung des Forschungsvorhabens wurden zunächst drei Schlacken (jeweils eine LD-Schlacke (LDS), Elektrofenschlacke (EOS) und Edelstahlschlacke (EDS)) ausgewählt, die möglichst hohe Molybdänauslaugraten aufwiesen und daher nicht als typisch anzusehen sind. Durch die hohe Molybdänauslaugung können Prozesse besser erkannt bzw. erfasst werden. Von der LDS 1 des ersten Projekts [2] war noch ausreichend Probenmenge vorhanden, so dass diese auch für die neuen Untersuchungen verwendet wurde. Vorversuche mit dieser Schlacke hatten gezeigt, dass sich diese über die Zeit nicht wesentlich verändert hat und somit ein Vergleich mit den früheren Ergebnissen möglich war. Für neue Lysimeterversuche wurden zwei Böden ausgewählt, die aufgrund ihrer pH-Werte,

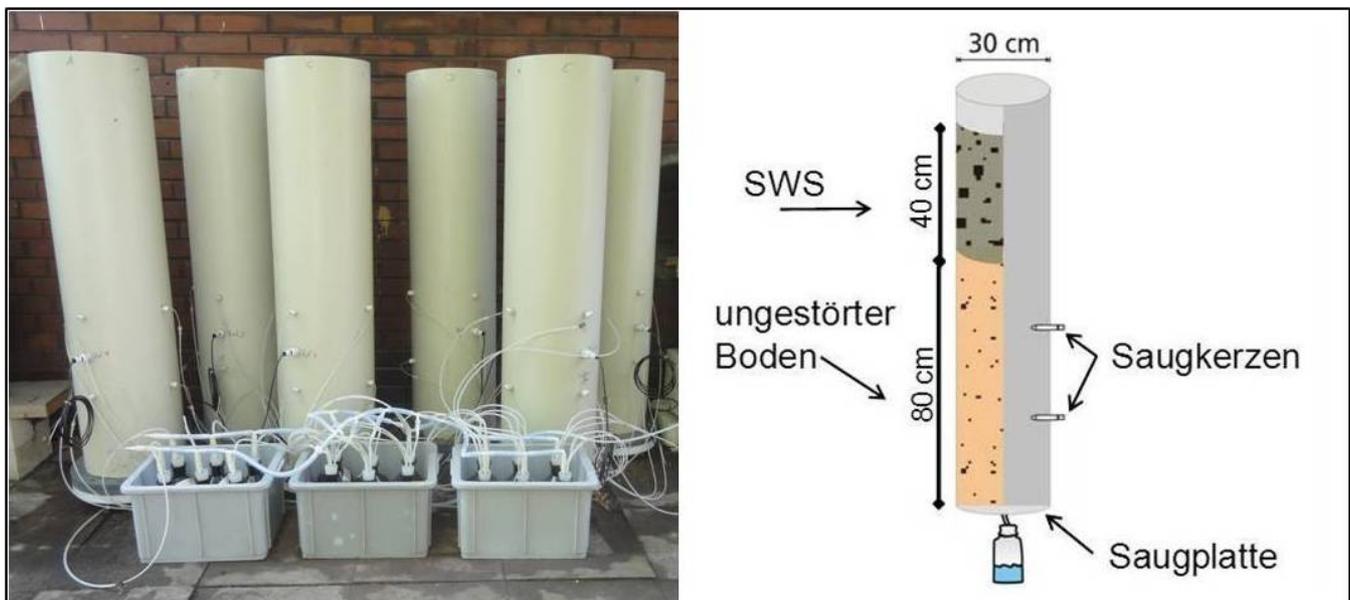


Bild 1: Lysimeter mit Schlacke über ungestörten Böden und Vorrichtung für die Sickerwasserprobenahme

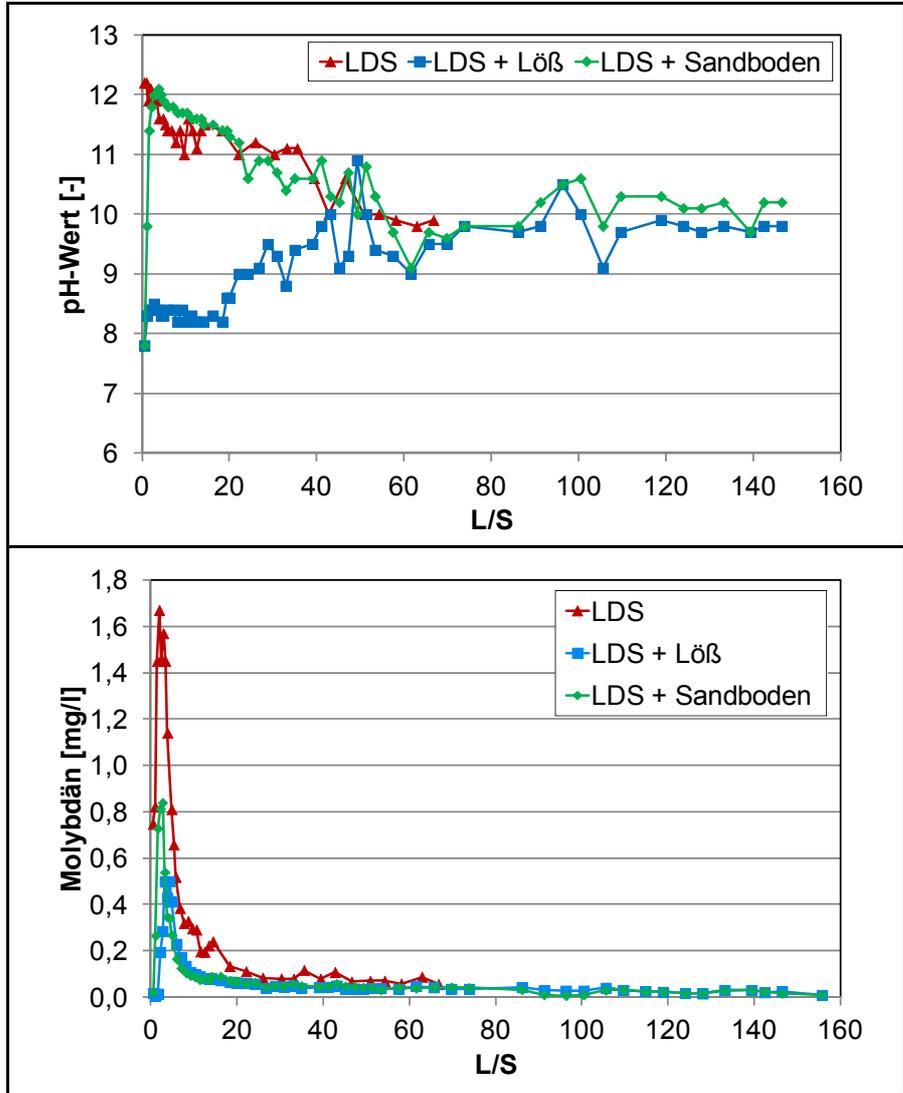
der Tongehalte sowie der Gehalte an Eisen- bzw. Aluminiumoxiden eine Sorption von Molybdän vermuten ließen.

Anhand von Sprühsäulenversuchen, die bereits im ersten Projekt verwendet wurden [2, 3], und Lysimeterversuchen wurde das Auslaugverhalten der Schlacken über einen langen Zeitraum beobachtet sowie die Sorptionsprozesse im Boden untersucht. Für beide Versuchsanordnungen wurde eine jährliche Niederschlagsmenge von 750 mm, abzüglich 250 mm Verdunstung, zugrunde gelegt. Die berechnete Wassermenge von 500 mm entspricht somit weitgehend den worst-case-Vorgaben der EBV (583 mm). Bei den Sprühsäulenversuchen entspricht ein Beregnungszyklus einer realen Niederschlagsmenge von 2 Monaten. Die Beregnung wurde 2mal je Woche durchgeführt, so dass je Woche eine Bewitterung von 4 Monaten simuliert werden konnte. Bezogen auf die in die Sprühsäulenapparatur eingebauten Schlackenmengen, entspricht eine Woche Versuchszeit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis (L/S) von 1. Zunächst wurden die Sprühsäulenversuche aus dem ersten Projektteil, die mit EOS 1 bzw. LDS 1 über Boden (Sandboden bzw. Löß) durchgeführt wurden, über 1 Jahr fortgesetzt. Um das Freisetzungverhalten der Schlacken zu untersuchen, wurden während des zweiten Projekts Sprühsäulenversuche mit der reinen LDS 1 bzw. den zwei neuen Schlacken (EOS, EDS) ohne Boden betrieben.

Bei den Lysimeterversuchen aus dem ersten Projekt entsprach der Schichtaufbau (20 cm Schlacke über 40 cm Boden, also einem Verhältnis von 2:1) - abgesehen von der



**Bild 2:** Eindringen eines Lysimeterrohres in den Boden



**Bild 3:** pH-Werte bzw. Molybdänkonzentrationen bei den Sprühsäulenversuchen mit LDS

größeren Menge - dem der Sprühsäulen. Während die EOS 1-Variante nach Abschluss des Projekts noch 2 weitere Jahre betrieben wurde, laufen die Untersuchungen mit der LDS 1 und den beiden Böden (Löss, Sandboden) aktuell noch weiter. Zusätzlich kamen im Anschlussprojekt noch insgesamt 9 Lysimeter hinzu. Diese bestehen aus drei Varianten mit reiner Schlacke (LDS 1, EOS, EDS) und 6 Varianten mit den drei Schlacken über jeweils einem der beiden neuen Böden (Schluffböden aus Essen (Boden E) bzw. Krefeld (Boden KR)). Von diesen neuen Lysimetern können aus zwei Tiefenstufen mittels Saugkerzen Sickerwasserproben aus der Bodenschicht entnommen werden. Weiterhin können Sickerwasser über eine Saugplatte am unteren Ende der Lysimeter gewonnen werden (Bild 1). Im ersten Projekt wurden die Böden homogenisiert, über ein Sieb von Hand lose in die Lysimeter gefüllt und anschließend leicht verdichtet. Dadurch wurde die natürliche Bodenschichtung zerstört, so dass die Verweilzeiten des Sicker-

wassers und die Kontaktflächen für Sorptionsprozesse zwar gleichmäßig verteilt waren, aber im Vergleich zur Realität stark verändert wurden.

Daher wurden für die neuen Versuche die Lysimeterrohre in den Boden geschlagen bzw. gedrückt (Bild 2). Auf diese Weise wurde der anstehende Boden auf möglichst schonende Art weitgehend ungestört in die Lysimeter eingebaut. Der so eingebaute Boden ist durch unterschiedlich tonige Bereiche gekennzeichnet, welche einerseits für das Sickerwasser weniger durchlässig sind, andererseits die höchsten Sorptionskapazitäten und Kontaktzeiten erwarten lassen.

**Ergebnisse und Diskussion der Langzeitversuche**

Im Folgenden werden exemplarisch Ergebnisse aus den Langzeitversuchen (Sprühsäulen- und Lysimeterversuche) mit LDS vorgestellt. In Bild 3 sind die pH-Werte

(oben) bzw. die Molybdänkonzentrationen (unten) der aus dem ersten Projekt fortgesetzten Sprühsäulenversuche mit LDS + Löß bzw. LDS + Sandboden dargestellt. Als Vergleich sind die Ergebnisse der im neuen Projekt durchgeführten Versuche mit der gleichen LDS ohne Boden (reine Schlacke) aufgetragen. Einen recht ähnlichen Verlauf beschreiben die pH-Werte des Versuchs mit der reinen Schlacke und der Variante LDS + Sandboden. Lediglich die Anfangswerte sind bei der Variante mit LDS + Sandboden deutlich niedriger im Vergleich zu dem Versuch mit reiner Schlacke. Bei der Variante mit LDS + Löß bleiben die pH-Werte zunächst unter 8,5. Danach nehmen sie stetig zu, so dass nach einer Versuchszeit von 50 Wochen (entsprechend einem L/S-Verhältnis von ca. 50) bei allen Varianten ein ähnlicher pH-Wert gemessen werden kann. Sowohl bei den Sprühsäulen als auch den Lysimeterversuchen beziehen sich die angegebenen L/S-Werte auf die angegebenen Wassermengen im Verhältnis zur Schlackenmenge. Die Ergebnisse verdeutlichen eine sehr geringe Pufferkapazität des Sandbodens gegenüber Basen, so dass der hohe pH-Wert des Schlackenuelats schnell erreicht wird. Die Pufferkapazität des Lößbodens ist dagegen deutlich höher.

Die Molybdänkonzentrationen in den Sprühsäulen mit LDS zeigen in allen Varianten einen recht ähnlichen Verlauf (Bild 3 unten). Allerdings sind die Anfangswerte des Versuchs mit reiner LDS deutlich höher. Ein wash-off-Effekt kann bei allen Varianten beobachtet werden, allerdings mit unterschiedlichen Konzentrationen. Daran schließt sich ein "Tailing" mit geringeren Konzentrationen an, die zunächst noch über dem niedrigen Geringfügigkeitsschwellenwert (GFS-Wert) von 0,035 mg/l [6], später auch darunter liegen. Laut Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) wird als GFS-Wert der Grenzwert eines Stoffes bezeichnet, bei dessen Unterschreitung eine Schädigung des Grundwassers auszuschließen ist. Anhand dieser Grenzwerte wurden die materialspezifischen Anforderungswerte (Materialwerte) der EBV im Wesentlichen abgeleitet. In den Varianten mit Boden setzt der Prozess des Tailings einige Zeit früher ein, und die Konzentrationen liegen allgemein auch niedriger als im Versuch mit reiner Schlacke. Die Zeit des Konzentrationsanstiegs beim Molybdän sowie die Abklingphase in der Variante mit Löß zeigen, dass dies bereits vor dem Anstieg des pH-Werts stattfindet. Trotz schlechter werdender Randbedingungen für eine Molybdänsorption durch steigende pH-

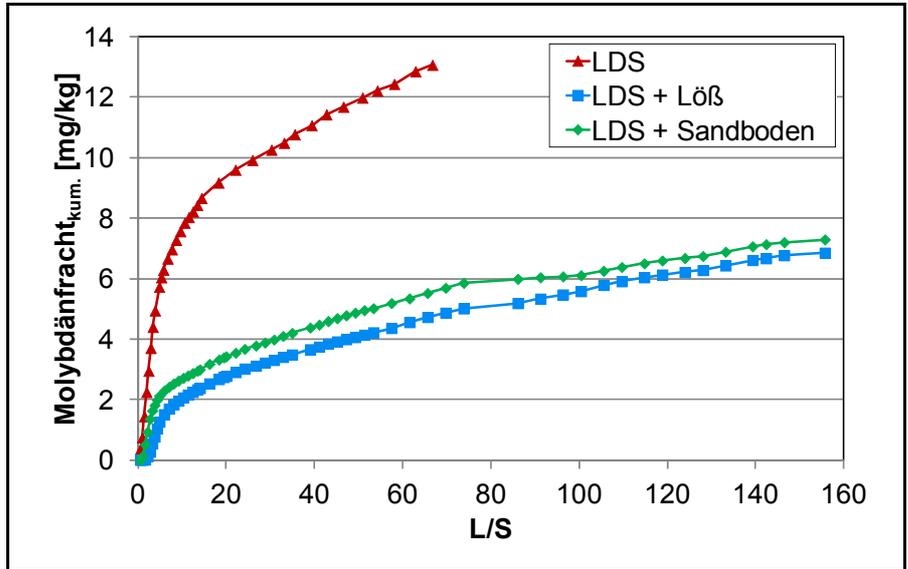


Bild 4: Kumulierte Molybdänfrachten in den Sprühsäulen mit LDS

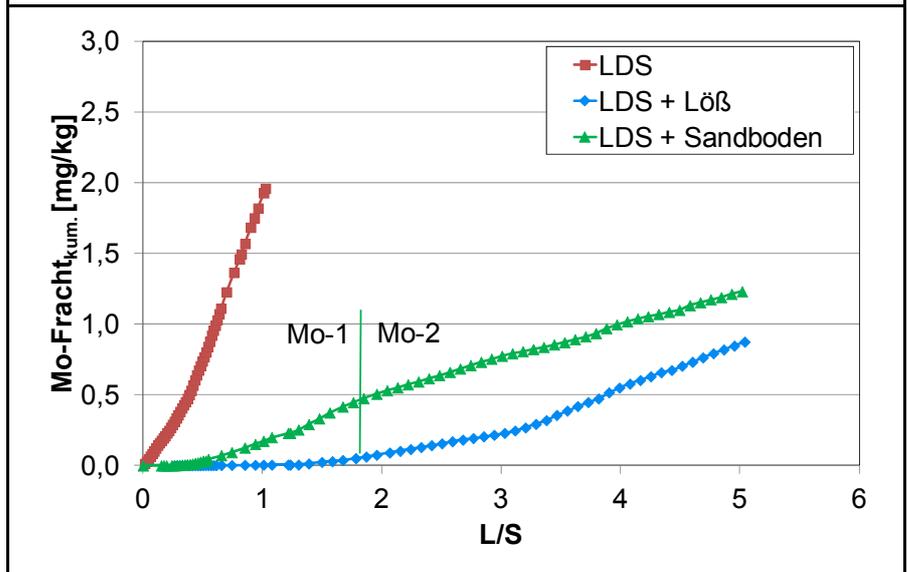
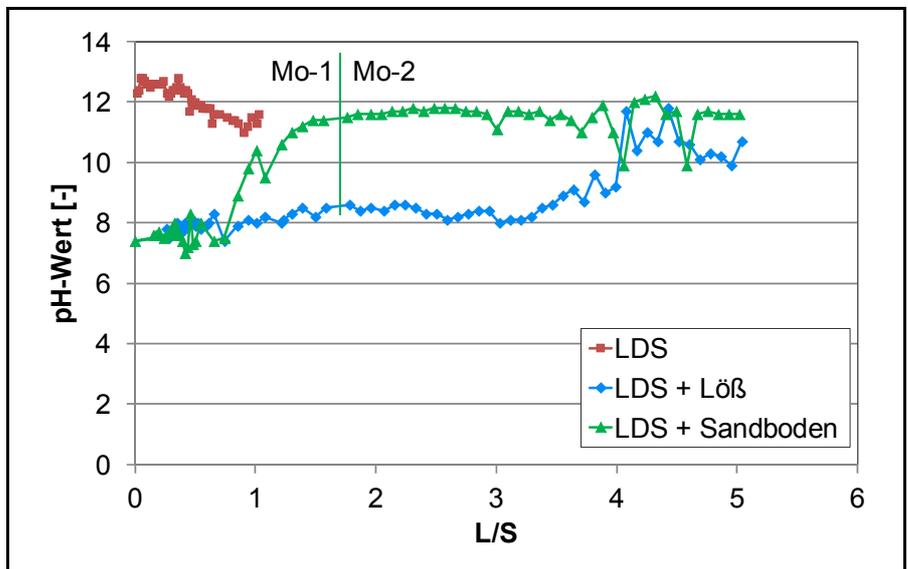


Bild 5: pH-Werte bzw. kumulierte Molybdänfrachten in den Lysimetern mit LDS + Böden aus dem ersten Projektteil sowie dem Versuch mit reiner LDS aus dem zweiten Projektteil

Werte bleiben die Molybdänkonzentrationen auf einem niedrigen Niveau, zunächst leicht über, später auch unter dem GFS-Wert.

Dass die Molybdänsorption auch bei höheren pH-Werten anhält, verdeutlicht die Umrechnung der Molybdänkonzentrationen in Frachten (Bild 4). Während bei der LDS die Frachten weiter relativ steil ansteigen, kann bei den Varianten mit Boden bereits bei geringen L/S-Verhältnissen ein Abflachen des Anstiegs beobachtet werden, so dass die Werte deutlich unter denen der reinen Schlacke bleiben. Sowohl die niedrigeren Frachten als auch die weniger steilen Anstiege veranschaulichen eine anhaltende Molybdänsorption. In der Literatur [z. B. 4, 5] wird beschrieben, dass eine Molybdänsorption erst bei pH-Werten von < 10 einsetzt und bei pH-Werten von < 5 besonders hoch ist. Auch, wenn die Sorptionskapazität hier in den basischen Bodenlösungen gering sein mag, so ist sie doch ausreichend, um einen großen Teil des eingebrachten Molybdäns zu binden.

Die im ersten Projekt gestarteten Lysimeterversuche mit LDS (bzw. EOS) und den beiden Böden (Löß bzw. Sandboden) wurden während des zweiten Projekts weitergeführt und werden im Fall der LDS-Variante auch jetzt noch fortgesetzt. Zusätzlich wurde nun ein Versuch mit reiner LDS gestartet, die allerdings in ein neues Lysimeterrohr gefüllt wurde, also eine andere Oberfläche bzw. Schichthöhe aufweist, von der Probenmenge aber auch den alten Versuchen entspricht. Da sich die Beregnungsmenge (500 mm) auf die Fläche bezieht, verringert sich durch den geringeren Durchmesser der Lysimeterrohre die Beregnungsmenge bei den neuen Lysimetern von 1,9 L auf 0,7 L je Woche. Ein Vergleich der "alten" mit den "neuen" Lysimetern kann daher nur über das L/S-Verhältnis und nicht über die Zeit erfolgen. In Bild 5 sind die Ergebnisse der Lysimeterversuche mit LDS + Löß bzw. Sandboden nach einer Versuchszeit von fast 240 Wochen (Projektteil 1: bis 78 Wochen entsprechend einem L/S = 1,6) sowie des neuen Versuchs mit reiner LDS dargestellt. Ähnlich wie bei den Sprühsäulen, nähern sich die pH-Werte der Variante mit Sandboden den Werten der reinen Schlacke an. Insgesamt wird nur ein sehr geringes L/S-Verhältnis von 5 erzielt, welches in den Sprühsäulen bereits nach einer Versuchszeit von 5 Wochen erreicht wird. Daher ist ein Vergleich der Sprühsäulen mit den Lysimetern noch nicht möglich.

	Boden E	Boden KR
pH (CaCl <sub>2</sub> ), [-]	5,0	6,4
pH (H <sub>2</sub> O), [-]	5,9	6,9
Ton [g/kg]	175	150
Bodenart	Ut3-4	Uls
Fe <sub>o</sub> <sup>a</sup> [g/kg]	1,58	1,81
Fe <sub>d</sub> <sup>b</sup> [g/kg]	4,60	4,05
Al <sub>o</sub> <sup>a</sup> [g/kg]	1,65	1,20
Al <sub>d</sub> <sup>b</sup> [g/kg]	1,64	1,01

<sup>a</sup> Fe<sub>o</sub>/Al<sub>o</sub>: oxalatlösliches Eisen/Aluminium;  
<sup>b</sup> Fe<sub>d</sub>/Al<sub>d</sub>: dithionitlösliches Eisen/Aluminium

Tabelle 1: Eigenschaften der für Lysimeter verwendeten Böden

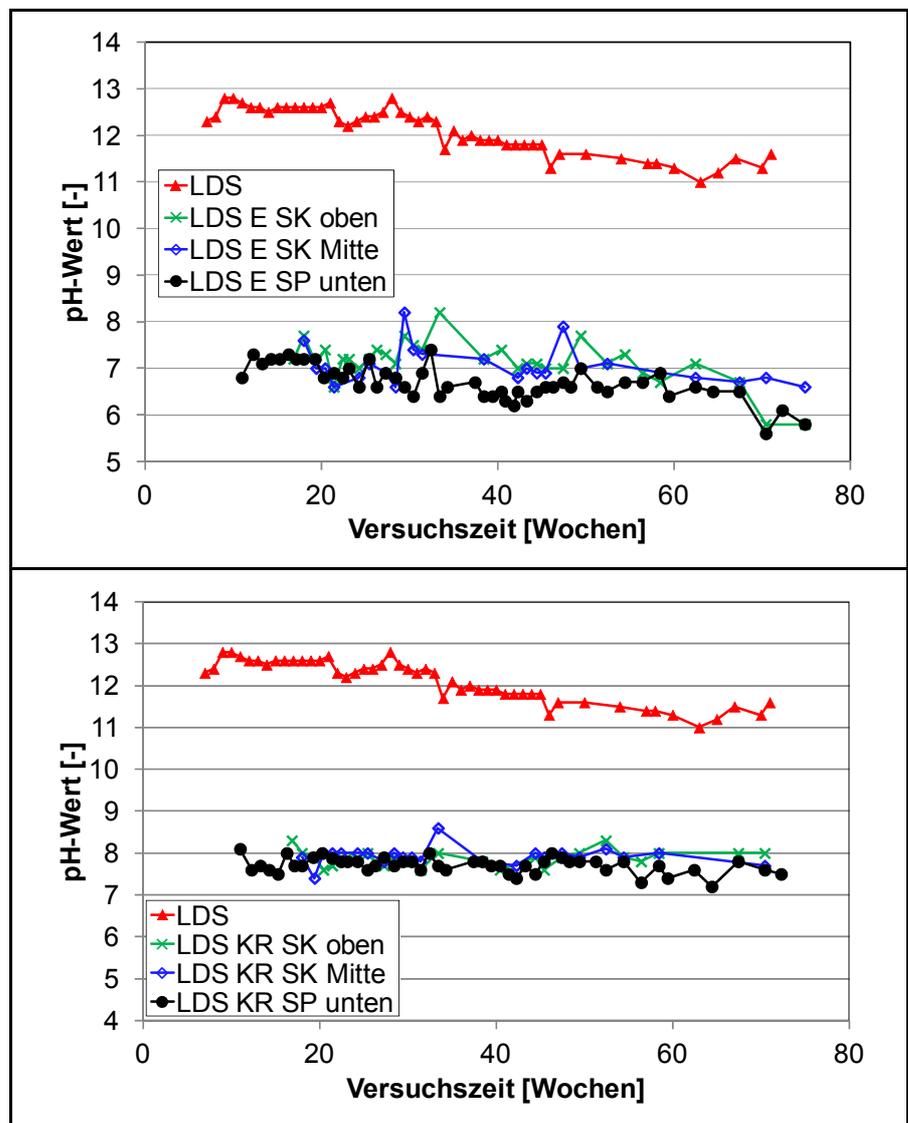


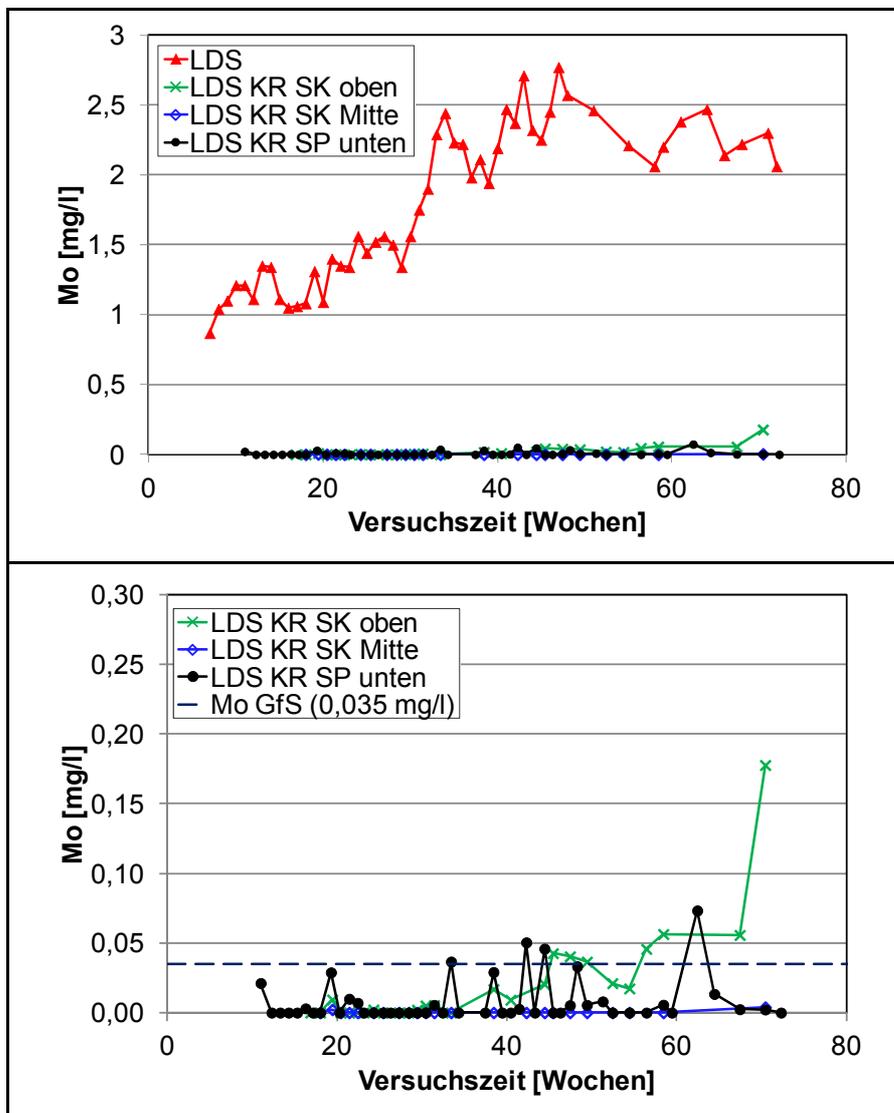
Bild 6: pH-Werte in den Lysimetern des zweiten Projektteils mit LDS (oben Boden E, unten Boden KR)

Die Molybdänfrachten zeigen ebenfalls ähnliche Effekte wie bei den Sprühsäulen. Während aus der Schlacke höhere Molybdänmengen auslaugen, kann bei den beiden Varianten mit Boden ein Anstieg der Molybdänfrachten erst zeitversetzt festgestellt werden. Auch hier findet eine bessere Bindung des Molybdäns im Lößboden statt, bei dem erst nach Beendigung des ersten Projekts, bzw. nach ca. 70 Wochen Versuchszeit, ein Anstieg der Molybdänfracht zu beobachten ist. Die kumulierten Frachten liegen in den Varianten mit Boden deutlich unter denen mit reiner Schlacke und weisen eine geringere Steigung auf, was eine Bindung des Molybdäns im Boden belegt.

Die neuen Lysimeter wurden mit ungestörten Böden befüllt, die sich unter anderem hinsichtlich ihrer pH-Werte unterscheiden. In [Tabelle 1](#) sind einige wichtige Parameter der Böden dargestellt. Der Boden aus Essen (Ut3-4: toniger Schluff) scheint aufgrund seines niedrigeren pH-Werts etwas bessere Voraussetzung für eine Molybdänsorption zu liefern als der Krefelder Boden (Uls: sandig-lehmiger Schluff). Bei weiteren relevanten Parametern wie Tongehalt und Eisen- bzw. Aluminiumoxiden unterscheiden sie sich nur geringfügig.

In [Bild 6](#) sind die pH-Werte in den Lysimetern mit reiner LDS bzw. mit LDS über je einem der beiden Böden dargestellt. Nach einer Versuchszeit von 72 Wochen wird bei den neuen Lysimeterversuchen ein L/S-Verhältnis von ca. 1 erreicht. Die Sickerwässer beider Bodenvarianten zeigen bisher wenig Beeinflussung durch die basischen Einträge aus der LDS, liegen allerdings leicht über den in den Originalbodenproben bestimmten pH-Werten (s. Tabelle 1). Etwas größere Schwankungen sind in den Sickerwässern sowohl aus den Saugplatten (SP) als auch aus den Saugkerzen (SK) beim Lysimeter mit dem Boden E zu beobachten. Zwischenzeitlich höhere pH-Werte könnten auf bevorzugte Sickerpfade im Boden deuten, auf denen das basische Sickerwasser schneller bzw. bevorzugt perkoliert. Durch die schnellere Perkolation kann der pH-Wert schlechter neutralisiert werden und erzeugt so eventuell leicht höhere Werte.

Die Molybdänkonzentrationen sind bei beiden Lysimetern sowohl in den Saugkerzen-Lösungen (SK) als auch in den Sickerwässern aus den Saugplatten (SP) in der Regel sehr gering (meist unter der Bestimmungsgrenze von 0,002 mg/l) und damit meistens deutlich unter dem GFS-Wert von 0,035 mg/l. Ausnahme davon



**Bild 7:** Molybdänkonzentrationen in den Lysimetern des zweiten Projekts  
oben: LDS bzw. LDS über dem Boden KR  
unten: Detailansicht der Werte aus dem Lysimeter mit LDS über Boden KR

bilden die Sickerwasserproben aus den oberen Saugkerzen (nach etwa 25 cm Sickerstrecke) in dem Lysimeter mit dem Boden KR ([Bild 7](#)), bei dem seit ca. der 45. Versuchswoche die Molybdänkonzentrationen zum Teil über dem GFS-Wert liegen. Ebenfalls sporadisch über dem GFS-Wert sind die Konzentrationen im Sickerwasser aus den Saugplatten am unteren Ende des Lysimeters. Dies lässt vermuten, dass es bei dem Einbau des Bodens in das Lysimeter durch Erschütterung beim Einschlagen bzw. Drücken zu Rissen oder Klüften gekommen ist und so bevorzugte Sickerpfade entstanden sind. Diese werden möglicherweise unter den ungesättigten Bedingungen in den Lysimetern nicht immer genutzt, so dass es zu stärkeren Schwankungen kommt. Daneben könnten die höheren Molybdänkonzentrationen in den oberen Saugkerzen aber auch erste Anzeichen einer nachlassenden Sorptionskapazität sein.

In den Lysimetern mit EOS oder EDS können in den Sickerwässern bisher nur sehr geringe Molybdänkonzentrationen, in der Regel unter der Bestimmungsgrenze von 0,002 mg/l, nachgewiesen werden.

Insgesamt zeigen beide ungestörte Böden gute Sorptionseigenschaften gegenüber Molybdän, da in der Regel selbst nach kurzer Sickerstrecke von nur 25 cm keine nennenswerten Molybdänkonzentrationen beobachtet werden können. Dies gilt insbesondere, da die hier verwendeten "untypischen" Schlacken besonders hohe Molybdäneinträge verursachen (vgl. Kapitel Untersuchungsprogramm). Ein abschließender Vergleich zwischen den Ergebnissen aus den Versuchen mit gestörtem bzw. ungestörtem Boden ist bisher nicht möglich, da die erreichten L/S-Verhältnisse in den neuen Lysimetern noch zu gering sind.

## Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Forschungsvorhabens war es unter anderem, die Kenntnisse aus einem Vorgängerprojekt bezüglich der langfristigen Auslaugung von Molybdän aus Stahlwerksschlacken und der Zurückhaltung des Molybdäns im Boden weiter zu vertiefen. Dabei sollten insbesondere praxisnahe Einbaubedingungen der Böden bei den Lysimeterversuchen simuliert werden.

Um das langfristige Auslaugverhalten zu untersuchen, wurden in einem ersten Schritt die Sprühsäulen- sowie Lysimeterversuche mit LDS bzw. EOS über gestörten Bodenproben aus dem Vorgängerprojekt fortgesetzt. Zusätzlich wurden Versuche mit der "reinen" LDS aus dem ersten Projekt zu Vergleichszwecken durchgeführt. In einem zweiten Schritt wurden neue Lysimeterversuche mit drei verschiedenen SWS (LDS (aus dem ersten Projekt), EOS bzw. EDS) über ungestörten Bodenproben durchgeführt. Hierfür wurden zwei Böden verwendet, die sich u. a. hinsichtlich der pH-Werte unterschieden. Im Unterschied zu dem ersten Projekt wurden die Böden weitgehend ungestört in die Lysimeter eingebaut.

Die aus dem Vorgängerprojekt fortgeführten Langzeitversuche (Sprühsäulen- und Lysimeterversuche) zeigen, dass sich die pH-Werte der Versuche mit SWS über Böden (Löß bzw. Sandboden) denen der Versuche mit reiner SWS anpassen. Auch, wenn die Voraussetzungen für eine Molyb-

dänsorption dadurch schlechter werden, zeigen die Ergebnisse, dass eine Sorption stattfindet und die Molybdänfrachten deutlich unter denen der Vergleichsversuche mit reiner Schlacke bleiben. Auch bei den neuen Lysimeterversuchen können aufgrund bisher geringer Molybdänkonzentrationen gute Sorptionseigenschaften vermutet werden. Ein abschließender Vergleich zwischen den Ergebnissen aus den Versuchen mit gestörtem bzw. ungestörtem Boden ist bisher nicht möglich, da die erreichten L/S-Verhältnisse in den neuen Lysimetern noch zu gering sind. Die Versuche sollen daher über das offizielle Ende des Projekts hinaus weiterlaufen.

## Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 16487 N der Forschungsvereinigung VDEh-Gesellschaft zur Förderung der Eisenforschung mbH wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

## Literatur

[1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzstoffen und für die

Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material – Entwurf Oktober 2012

- [2] Bialucha, R., Dohlen, M., Sokol, A.: Untersuchungen zu Bindungsformen von Molybdän in Stahlwerksschlacken und zum Sorptionsverhalten von Böden gegenüber Molybdän. Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 15831, (2011)
- [3] Sokol, A., Bialucha, R.: Untersuchungen zu Bindungsformen von Molybdän in Stahlwerksschlacken und zum Sorptionsverhalten von Böden gegenüber Molybdän, Report des FEhS – Instituts für Baustoff-Forschung e.V. 18 (2011) Nr. 2, S. 4-9
- [4] Xu, N.; Christodoulatos, C.; Braidia, W.: Adsorption of molybdate and tetrathiomolybdate onto pyrite and goethite: Effect of pH and competitive anions. *Chemosphere* 62 (2006), S. 1726-1735
- [5] Goldberg, S., Forster, H. S., Godfrey, C. L.: Molybdenum Adsorption on Oxides, Clay Minerals and Soils. *Soil Science of America Journal*, 60 (1996), S. 425-432
- [6] Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Bericht zur Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser, Düsseldorf, (2004)

## FEhS-Institut feiert Richtfest für neues Laborgebäude

Dr.-Ing. H. Motz

Am 13.11.1954 wurden die Labor- und Büroräume des FEhS-Instituts eingeweiht. 60 Jahre eines stetig wachsenden Aufgabengebiets erforderten seit 1980 fortwährenden Bedarf an Umbau- und Renovierungsmaßnahmen. Nach der grundlegenden Neugestaltung des Chemielabors im Jahr 2011 bestand nun dringender Bedarf, auch die Laboratorien für die Bereiche Verkehrsbau und Zementtechnologie neu zu gestalten und dabei zu vergrößern. Darüber hinaus bestand die Notwendigkeit, die Sozialräume für die Mitarbeiter des Instituts zu erweitern und zu modernisieren. Dies waren die Gründe dafür, dass der Vorstand des FEhS-Instituts im Jahr 2012 beschlossen hat, die bestehenden Gebäude durch einen Anbau zu erweitern. Der Neubau wurde auch deshalb

einer Sanierung der bestehenden Laboratorien vorgezogen, weil damit ihr Betrieb ohne Unterbrechung gewährleistet wurde.

Am 10. Oktober 2014 konnte nach anfänglichen Verzögerungen bei der Baugenehmigung endlich die Fertigstellung des Rohbaus und damit das Richtfest für das neue Laborgebäude gefeiert werden, Bild 1. Dieses wird auf einer über drei Geschosse verteilten ca. 1000 m<sup>2</sup> umfassenden Gesamtfläche neben neuen Sozialräumen und Büros die vollständig neu konzipierten Laborräume für die Bereiche Verkehrsbau und Zementtechnologie beherbergen.

Das FEhS-Institut trägt damit dem in den letzten Jahren deutlich erhöhten Auftrags-

volumen sowie den gestiegenen Anforderungen an die Prüftechnik Rechnung. Es ist geplant, das Gebäude Ende Januar 2015 bezugsfertig zu übernehmen und anschließend mit der Ausgestaltung der Innenräume zu beginnen.



Bild 1: Richtfest