
Lysimeteruntersuchungen zu Schadstoffmigrationsprozessen im Bereich kontaminierter Flächen des Ökologischen Großprojektes „SOW Böhlen“

K. HÄFNER, S. SCHMIDT, U. HAFERKORN, C. NITSCHKE, F. RICHTER und K.-J. GENSCHE

Summary

Lysimeter tests are an important method to estimate the substance entries into the ground-water. The substance settlement from the Lysimeter is the result of all migration processes at the original site of the Lysimeter. The aim of the used approach focuses on the use of Lysimeter tests as a necessary component of a model supported up scaling from the laboratory into the field area. The Lysimeter tests within the ÖGP Böhlen (beginning march 2005) are used in combination with laboratory tests to get representative data of present and future infiltration rates for BTEX, MKW, PAK, phenols in the groundwater. Substantial (partly with pollutants in phase) and lower contaminated monolithic soil core samples were assembled in four Lysimeters situated in a separated container station at the Lysimeter unit in Brandis. These soil core samples were differently combined with layers of damming horizon, vegetation and grit corresponding to the conditions of the original extraction location. Due to the described non classic test design the extraction of the monolithic soil cores was not carried out over the entire Lysimeter length, but a layer wise composition of the Lysimeter cores by means of a core drilling procedure developed by UGT GmbH. The Lysimeter tests are necessary for the investigation of the complex effects of water saturation, subsequent delivery of oxygen, vegetation layer and damming horizon on migration processes of contaminants, which can be hardly quantified on the laboratory scale. Due to the extreme heterogeneity of the unsaturated soil water zone and of the pollutant

distribution at the ÖGP site, the lysimeter results can not be transferred directly to the field area. For this purposes a model for simulating the unsaturated soil water flux in quantity and quality into the groundwater zone was developed (HYDRUS 1D/2D). First representative data for the pollutant freight of BTEX, MKW, PAK and phenols which reach the groundwater in future could be found out. By means of the used forecast model we received a good fit to the measured cumulative soil water outflow of the Lysimeter. The obtained comparability between laboratory and Lysimeter tests is the basis for a model supported forecast of the substance freight from the Lysimeter and with that for the assignment of the results to the field area at the location of the ÖGP Böhlen.

Kurzfassung

Lysimeteruntersuchungen sind ein wichtiges Verfahren zur Abschätzung der Stoffeinträge in das Grundwasser. Der Stoffaustrag aus dem Lysimeter ist dabei das Ergebnis aller am Lysimeterentnahmepunkt wirkenden Migrationsprozesse. Die Zielstellung des verwendeten Versuchsansatzes richtet sich auf den Einsatz von Lysimeteruntersuchungen als notwendigen Bestandteil eines modellgestützten up scalings vom Labor in den Feldbereich. Die im Bereich des Ökologischen Großprojektes Böhlen "ÖGP Böhlen" laufenden Lysimeterversuche (Beginn März 2005) sollen in Kombination mit laborativen Untersuchungen belastbare Daten zu aktuell und zukünftig eingetragenen Schadstofffrachten an BTEX, MKW, Phenolen, PAK in das Grundwasser liefern. In die vier Lysime-

ter der separaten Containerstation in der Lysimeteranlage Brandis (Sachsen) wurden hoch (teilweise mit Schadstoffen in Phase) und geringer kontaminierte monolithische Bodensubstrate, entsprechend den Standortverhältnissen verschieden kombiniert mit den Schichten Deckstauer, Vegetation, Kies eingebaut. Aufgrund des beschriebenen nichtklassischen Versuchsansatzes erfolgte keine monolithische Substratentnahme über die gesamte Lysimeterlänge, sondern eine schichtenweise Zusammensetzung der Lysimeterkerne mittels eines von der UGT GmbH entwickelten Kernbohrverfahrens. Mit den Lysimeterversuchen werden die im Labormaßstab nur aufwändig zu quantifizierenden Einflüsse der Wasserteilsättigung, Sauerstoffnachlieferung, der Vegetationsschicht und des Deckstauers auf die Schadstoffmigrationsprozesse untersucht. Aufgrund der extremen Heterogenität der ungesättigten Bodenzone und der Schadstoffverteilung am ÖGP-Standort ist eine direkte Übertragbarkeit der Lysimeterergebnisse auf die Fläche nicht möglich. Für diesen Zweck wurde ein Bodenwasserhaushalts-/Stofftransportmodell (HYDRUS 2D) aufgebaut. Es konnten erste belastbare Daten zu Schadstofffrachten für BTEX, MKW, PAK, Phenolen, die zukünftig in das Grundwasser gelangen, ermittelt werden. Mit dem verwendeten Prognosemodell wurden die kumulativen Sickerwassermengen in guter Übereinstimmung nachgebildet. Auf dieser Grundlage ist eine modellgestützte Prognose der Stofffrachten aus den Lysimetern und die geplante Übertragung der Ergebnisse in den Feldbereich am Standort ÖGP Böhlen grundsätzlich möglich.

Autoren: Dr. Klaus HÄFNER, Dr. Sylke SCHMIDT, RP-Leipzig, Umweltfachbereich, Braustr. 2, D-04107 LEIPZIG, sylke.schmidt@rpl.sachsen.de, Dr. Ulrike HAFERKORN, Umweltbetriebsgesellschaft, Dresdner Str. 78 C, D-01445 RADEBEUL, Claus NITSCHKE, BGD GmbH, Meraner Str. 10, D-01217 DRESDEN, Fred RICHTER, Dow Olefinverbund GmbH, Werk Böhlen, D-06248 SCHKOPAU, Klaus-Jürgen GENSCHE, Bundesanstalt für vereinigungsbedingte Sonderaufgaben c/o GESA mbH, Karl-Liebknecht-Str. 33, D-10178 BERLIN

Einführung

Lysimeter stellen ein geeignetes Arbeitsinstrument zur Untersuchung der Schadstoffeinträge aus der ungesättigten Bodenzone in das Grundwasser unter in situ Feldbedingungen dar. Der Stoffaustrag aus dem Lysimeter ist das Ergebnis aller am Entnahmeort wirkenden Migrationsprozesse wie z.B. Desorption, Diffusion und biologischer Abbau. Die ausgewählten Lysimeterentnahmepunkte befinden sich im Bereich des Ökologischen Großprojekts Böhlen (ÖGP Böhlen). Hierbei handelt es sich um einen südlich von Leipzig gelegenen, seit den 20ziger Jahren genutzten Industriestandort für Energieerzeugung, Karbochemie, Erdölchemie; bekannt unter dem Namen "Sächsische Olefinwerke Böhlen". Die massiven Boden- und Grundwasserkontaminationen mit Schadstoffen teilweise in Phase resultieren aus Kriegseinwirkungen und dem jahrzehntelangen Betrieb der chemischen Produktionsanlagen. Die Region (s. *Abbildung 1*) ist heute sowohl durch aktiven Bergbau als auch durch die Entstehung zahlreicher Tage-

baurestseen gekennzeichnet. Ziel ist die Entwicklung eines Gewässerverbundsystems "Leipziger Neuseenland" zur touristischen Nutzung. In diesem Zusammenhang ist zu gewährleisten, dass die Seewasserqualität nicht negativ durch Altlasten wie im Bereich ÖGP Böhlen beeinflusst wird.

Versuchskonzept

Die Zielstellung der Lysimeterversuche ist Gewinnung belastbarer Daten zu Schadstofffrachten an BTEX, PAK, MKW und Phenolen, die zukünftig aus der ungesättigten Bodenzone in das Grundwasser gelangen. Die Lysimeter fungieren als Konverter zwischen den im ÖGP Böhlen für ausgewählte Flächen durchgeführten Feststoff- und Eluatuntersuchungen und dem Feldbereich. Die Versuchskonzeption besteht in einem modellgestützten up-scaling von Laborversuchen (klassische Batchtests DIN-S4, statische Batchtests in Form von intermittierend betriebenen Säulenversuchen) über Freiland-Lysimeter in den Feldbereich. Die in Lysimeterperkolaten

bzw. in Bodenwasserproben aus dem Feldbereich analysierten Stoffkonzentrationen sind das Ergebnis komplex wirkender Migrationsprozesse. Zur Ermittlung des Anteils einzelner Migrationsprozesse, insbesondere Desorption und mikrobiologischer Abbau, an den im Lysimetersickerwasser feststellbaren Konzentrationsänderungen wurden folgende laborative Prozessuntersuchungen an Linern aus den Entnahmebereichen der kontaminierten Lysimetersubstrate durchgeführt:

- Intermittierend betriebene Säulenversuche (IBSV) zur Quelltermuntersuchung - Elution
- Intermittierend betriebene Säulenversuche (IBSV) zur Transporttermuntersuchung - Nachweis biologischer Abbauprozesse

Die Untersuchungsergebnisse bilden die Grundlage für das allgemeine Verständnis der in den Lysimetern ablaufenden Sickerwasser- und Schadstofftransportprozesse. Mit den Lysimeterversuchen werden die im Labormaßstab nur aufwändig zu quantifizierenden Einflüsse

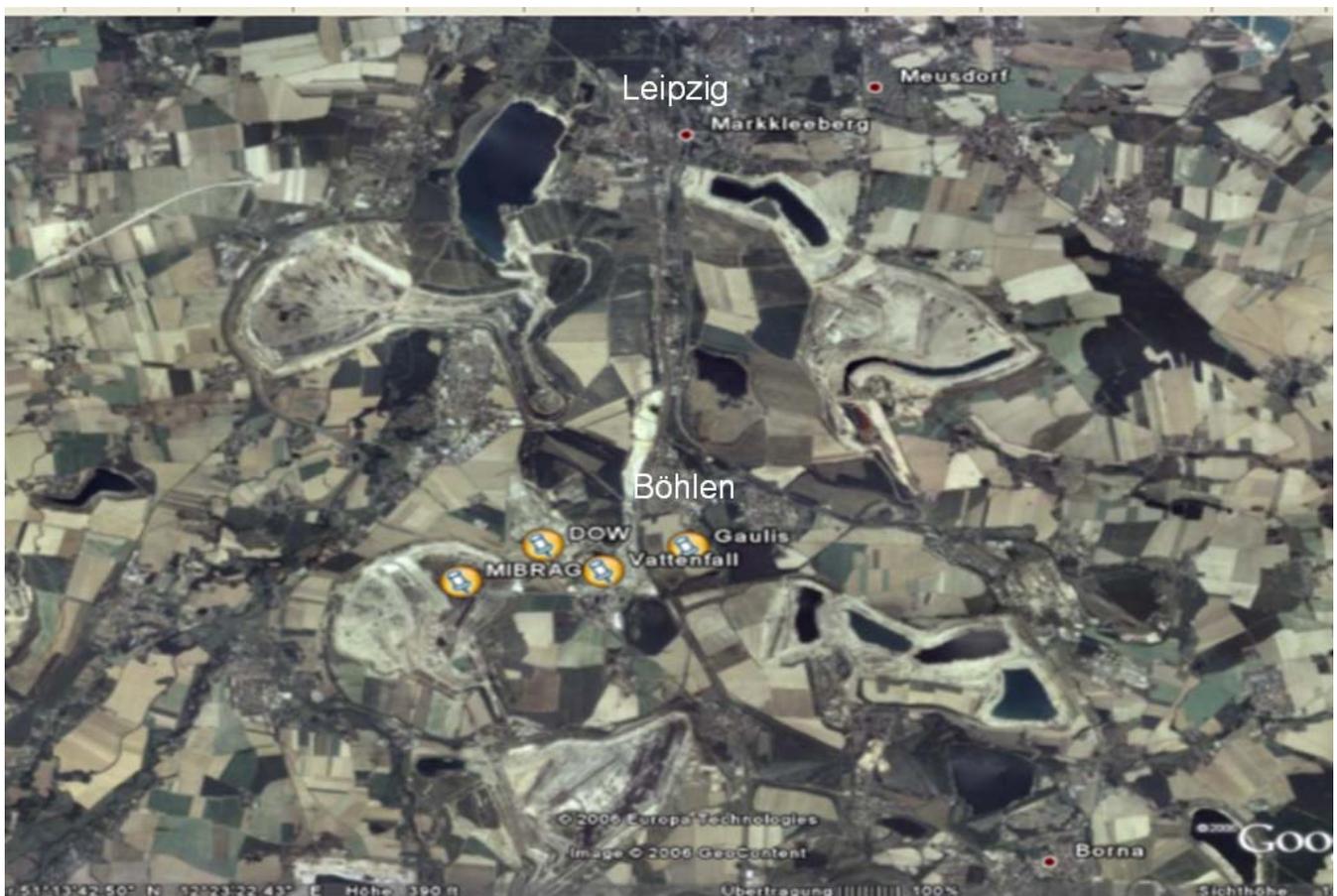


Abbildung 1: Luftbildaufnahme Südraum Leipzig

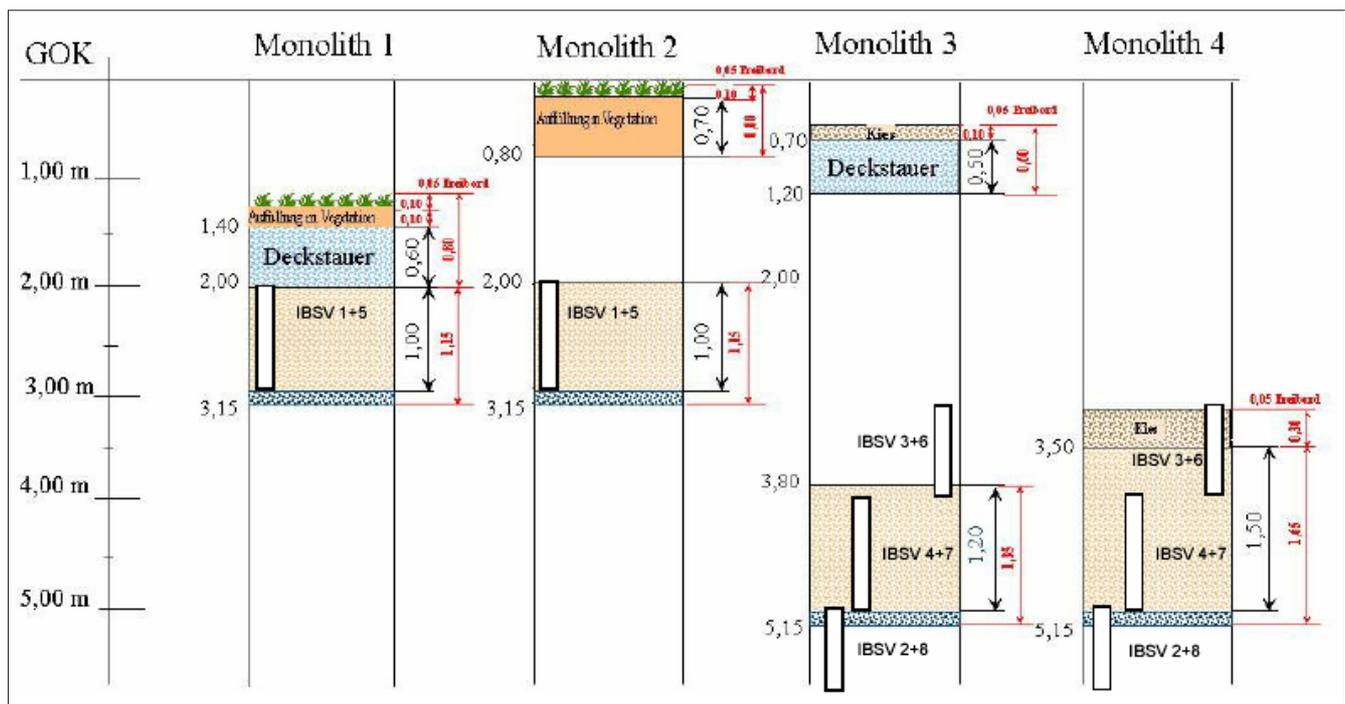


Abbildung 2: Schichtenaufbau der Lysimetermonolithie

der Wasserteilsättigung, der mit der Grundwasserneubildung verbundenen Sauerstoffnachlieferung, der Vegetationsschicht und des Deckstauers auf die Schadstoffmigrationsprozesse untersucht. Dazu wurden in die vier Lysimeter geringer und hoch (teilweise mit Schadstoffen in Phase) kontaminierte monolithische Bodensubstrate, entsprechend den Standortverhältnissen im ÖGP Böhlen verschieden kombiniert mit den Schichten Deckstauer, Vegetation, Kies eingebaut. Dieser prozessbezogene Lysimeteraufbau stellt einen neuen methodischen Ansatz im Vergleich zu den klassischen Lysimeterversuchen mit monolithische Substratentnahme über den gesamten Bodenhorizont dar. Aufgrund der extremen geologischen Heterogenität der ungesättigten Bodenzone und der Schadstoffverteilung am ÖGP-Standort ist eine direkte Übertragbarkeit der Lysimeterergebnisse in den Feldbereich nicht möglich. Für diesen Zweck wurde ein Bodenwasserhaushalts-/ Stofftransportmodell (HYDRUS 2D) aufgebaut.

Lysimeteraufbau und -betrieb

Die vier Lysimeter wurden schichtenweise, entsprechend den typischen Bodenverhältnissen am Standort aufgebaut

(s. Abbildung 2) und sind wie folgt charakterisiert:

Lysimeter 1 **Vegetation, Deckstauer**
geringer kontaminiertes Substrat

Lysimeter 2 **Vegetation**
geringer kontaminiertes Substrat

Lysimeter 3 **Kies, Deckstauer**
hoch kontaminiertes Substrat

Lysimeter 4 **Kies**
hoch kontaminiertes Substrat

Ergänzend sind in Abbildung 2 die Entnahmetiefen der Liner für die Laboruntersuchungen (IBSV) dargestellt. Die Entnahme der Bodenschichten Vegetation, Deckstauer und kontaminiertes Substrat erfolgte monolithisch mittels eines von der Umwelt-Geräte-Technik GmbH entwickelten Kernbohrverfahrens (s. Abbildung 3). Die vier Lysimeter wurden in Form einer separaten Containerstation in die Lysimeteranlage der Staatlichen Umweltbetriebsgesellschaft in Brandis eingebaut und sind seit März 2005 in Betrieb (Abbildung 4).

Die Lysimeter sind mit Wägeeinrichtung, Bodenfeuchtesonde, Tensiometer mit Temperatursensor sowie gasdichter Sickerwasserwassersammeleinrichtung ausgerüstet. Sie werden mit freiem Ausfluss betrieben. Sämtliche Messwerte sind über eine Datenfernleitung abrufbar.

Wasserhaushalt und Stofftransport - Ergebnisse der Lysimeter- und Laborversuche

Die Lysimetergruppen 1+2 und 3+4 weisen aufgrund der Vegetation auf den Lysimetern 1 und 2 stark unterschiedliche hydrologische Eigenschaften auf. Die im Beobachtungszeitraum von März 2005 bis August 2006 ermittelten Sickerwassermengen in der Reihenfolge Ly1 < Ly2 < Ly3 < Ly4 (s. Tabelle 1) entsprechen dem schichtenmäßigen Aufbau der Lysimeter.

Die Vegetation auf den Lysimetern 1 und 2 bewirkt eine um 50 - 60% geringere Sickerwasserbildung. Der Einfluss des Deckstauers (DS) auf die Sickerwassermenge ist dagegen vernachlässigbar (s. Abbildung 5). Zusammenfassend ist festzustellen, dass in den Lysimetern 1 und 2 aufgrund der Evaporation von der Bodenoberfläche durch kapillare Nachlieferung (aus bindigem Oberboden) sowie wegen der Transpiration durch die Vegetation eine im Vergleich zu den Lysimetern 3 und 4 nur geringe Sickerwasserbildung erfolgt. Dagegen bedingt die fehlende Vegetation und die Funktion der Kiesschicht als Kapillarsperre in den Lysimetern 3 und 4 eine Sickerwasserbildung nahe der Niederschlagsmenge



Abbildung 3: Entnahme der Lysimeterkerne



Abbildung 4: Lysimeter-Containerstation in Brandis

Tabelle 1: Sickerwassermengen und Ölphasenanteile in den Lysimetern 1 - 4

	□m Ausfluss [kg]	□m Phase [kg]	□Phase [g/cm³]	V Phase [l]	SiWa [mm]	Lysimeternaufbau
Lys1	122,7	-	-	-	122,7	mit homogenem DS, mit Vegetation
Lys2	357,5	-	-	-	357,5	ohne DS, mit Vegetation
Lys3	765,1	12,0	0,774	15,5	749,6	mit inhomogenem DS, ohne Vegetation
Lys4	804,8	18,5	0,842	22,0	784,8	ohne DS, ohne Veg.

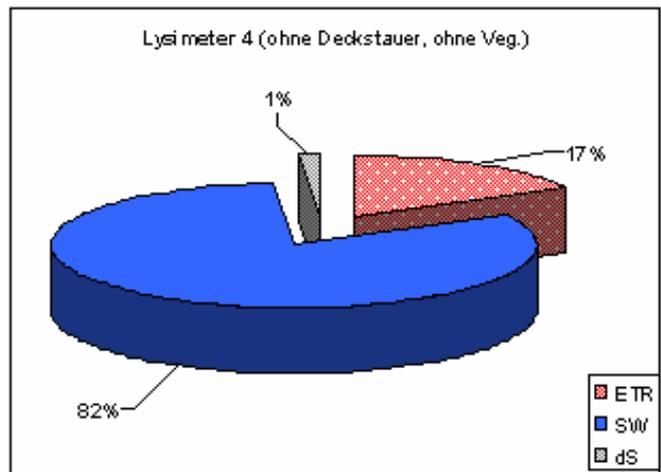
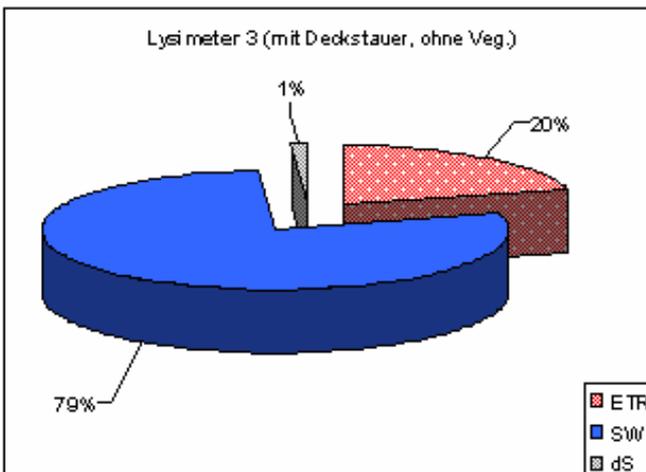
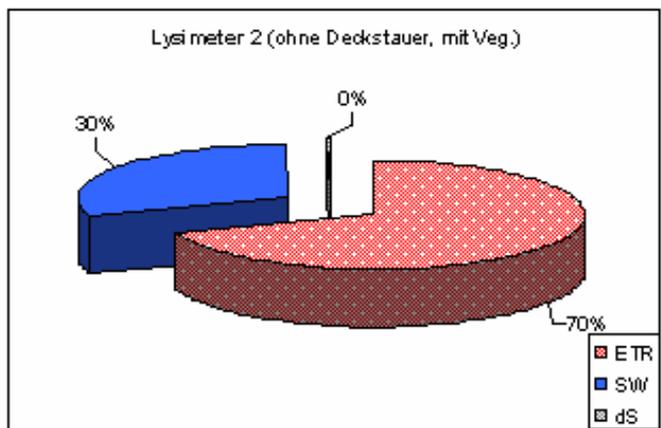
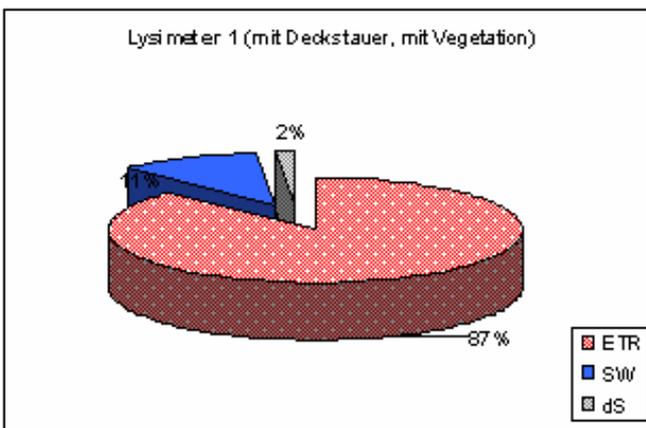


Abbildung 5: Verteilung der Wasserhaushaltskomponenten an den Lysimetern (ETR: reale Evapotranspiration, SW: Sickerwasseranfall, dS: Speicheränderung)

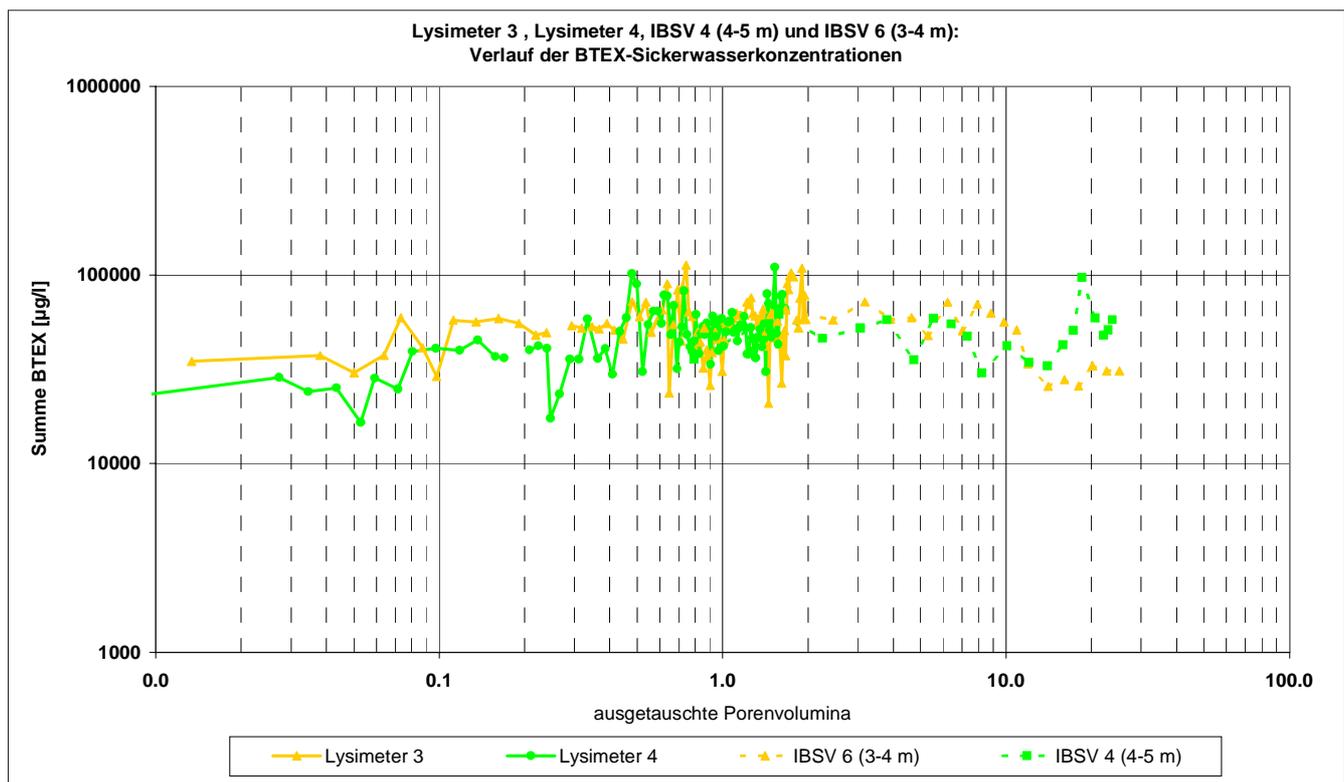


Abbildung 6: Vergleich der BTEX-Konzentrationsverläufe von Lysimeter 3 und 4 mit IBSV 4 und IBSV 6 als Funktion der ausgetauschten Porenvolumina

mit entsprechend hohen Schadstofffrachten teilweise in Phase.

Für den direkten Vergleich der Lysimetersickerwasseranalytik mit den Laborversuchen werden die Konzentrationsganglinien für BTEX, PAK (hauptsächlich Naphtalin), Phenolen auf ausgetauschte Porenvolumina (APV = kumulatives Sickerwasservolumen/Porenvolumen kontaminiertes Lysimetersubstrat) bezogen. Insgesamt ist eine größenordnungsmäßig gute Übereinstimmung der Schadstoffkonzentrationen und -frachten im Sickerwasser mit den in den Säulenversuchseluaten (IBSV, Schadstoffdesorption) ermittelten Werten feststellbar (s. *Abbildung 6*). Dabei liegen die Ergebnisse der intermittierend betriebenen Säulenversuche zur Schadstoffelution im Bereich der mittleren Sickerwasserkonzentrationen in den Lysimetern. Ergänzend wurden anhand von GC-MS-Untersuchungen zur Identifizierung von Metaboliten in allen vier Lysimetern biologische Abbauprozesse nachgewiesen, die jedoch mit geringer Intensität ablaufen. Insgesamt führen die biologischen Stoffwandlungsprozesse unter den Standortbedingungen zu keiner signifikanten Reduzierung des Schadstoffinventars. Sie werden stark von den Elutionsprozessen überprägt.

Zur Modellierung des Bodenwasserhaushalts und zum Schadstoffaustrag aus den Lysimetern wird das FE-Modell HYDRUS 2 D verwendet. Die ermittelten Sickerwasserausflusskurven konnten mit ausreichender Genauigkeit nachgebildet werden, wobei die Übereinstimmung zwischen gemessener mit modellierter Kurve im Falle der bewachsenen Lysimeter 1 und 2 etwas schlechter ist als bei Lysimeter 3 und 4. Für die Modellrechnungen zum Stoffaustrag wurden mittlere Schadstoffkonzentrationen an BTEX und Naphtalin und aus den Laborversuchen ermittelte Gesamtschadstoffinventare der Lysimeter als Ausgangsparameter verwendet. Die berechneten Stoffaustragszeiträume liegen stoffabhängig zwischen 30 und 1000 Jahren, wobei weniger das Gesamtschadstoffinventar sondern die hydraulischen Randbedingungen (Vegetation oder Kies) entscheidend sind.

Zusammenfassung und Ausblick

Aus den Lysimetersickerwasseranalysen, Schadstofffrachtberechnungen und den Ergebnissen der Modellierung mittels HYDRUS 2D ist abzuleiten, dass bei fehlender Vegetation in Kombination mit

nicht bzw. nicht homogen ausgebildeten Deckstauer ein Eintrag hoher Schadstoffmengen speziell von BTEX (tw. in Phase), Naphtalin und Phenolen in das Grundwasser über lange Zeiträume stattfindet. Mittels der eigens für den Standort ÖGP Böhlen von der BGD Boden- und Grundwasserlabor GmbH entwickelten Methodik zur Verarbeitung von Lysimeterdaten wurde eine direkte Vergleichbarkeit zwischen Lysimeter- und Laborversuchsergebnissen erzielt. Auf dieser Grundlage ist eine modellgestützte Prognose der Stofffrachten aus den Lysimetern und die geplante Übertragung der Ergebnisse in den Feldbereich am Standort ÖGP Böhlen grundsätzlich möglich. Zur Verifizierung der Daten und Gewinnung zusätzlicher Erkenntnisse hinsichtlich Übertragung der Lysimeterergebnisse auf die Gesamtfläche des ÖGP Böhlen ist geplant, die Lysimeterversuche über den ursprünglich vorgesehenen zweijährigen Betriebszeitraum hinaus um ein Jahr bis Ende Februar 2008 zu verlängern. Die längerfristige Beobachtung der Schadstofffreisetzungprozesse in den Lysimetern ist von grundlegender Bedeutung für die Strategie und die Kosten der Grundwasseranierung im Bereich des ÖGP Böhlen.