

Workshop Sickerwasserprognose: „Parameterermittlung und Anwendung an einem Fallbeispiel“

Zusammenfassung und Überblick

Jens Fahl

Technische Universität Dresden, Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten

Inhalt

1. Einleitung
 2. Neuerungen innerhalb der Gesetzeslage, weitere zu erwartende Änderungen
 3. Grundlegende Methodik zur Erstellung von Sickerwasserprognosen
 4. Laborverfahren zur Ermittlung von Parametern, aktuelle Situation und Auswirkungen
 5. Einsatz von Computerprogrammen (Stofftransportmodelle), Darstellung der Workshop-Fallbeispiele
- Anhang: Vergleichsrechnungen mit dem analytischen Programm (ALTEX 1-D) und dem numerischen Programm (SIWAPRO DSS) an der TU Dresden**

1. Einleitung

Im Altlasten- und Bodenschutzrecht gilt das Gefahrenabwehrprinzip. Dabei ist die Frage zu klären, ob von Verdachtsflächen Gefahren für Schutzgüter ausgehen oder nicht. Wenn bekannt ist, dass Kontaminationen mit Schadstoffen im Boden vorliegen, ist auch die mögliche Gefährdung des Schutzgutes Grundwasser durch diese Schadstoffe zu prüfen.

Für eine Gefährdungsabschätzung dieser Fallkonstellation (Wirkungspfad Boden-Grundwasser) schreibt die Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV) im § 4 Abs. 3 die Durchführung einer Sickerwasserprognose vor. Der Begriff „Sickerwasserprognose“ wird laut § 2 BBodSchV wie folgt definiert:

Sickerwasserprognose:

Abschätzung der von einer Verdachtsfläche, altlastverdächtigen Fläche, schädlichen Bodenveränderung oder Altlast ausgehenden oder in überschaubarer Zukunft zu erwartenden Schadstoffeinträge über das Sickerwasser in das Grundwasser, unter Berücksichtigung von Konzentrationen und Frachten und bezogen auf den Übergangsbereich von der ungesättigten zur wassergesättigten Zone

Die laut Gesetzgeber für diese Abschätzung der Stoffeinträge vorgeschlagenen Methoden sind im Anhang 1, Punkt 3.3 der BBodSchV erwähnt:

Verfahren zur Abschätzung des Stoffeintrags aus Verdachtsflächen oder altlastverdächtigen Flächen in das Grundwasser

Die Stoffkonzentrationen und -frachten im Sickerwasser und der Schadstoffeintrag in das Grundwasser im Übergangsbereich von der ungesättigten zur wassergesättigten Bodenzone (Ort der Beurteilung) können abgeschätzt werden, es sei denn, günstige Umstände ermöglichen eine repräsentative Beprobung von Sickerwasser am Ort der Beurteilung.

Diese Abschätzung kann annäherungsweise

- *durch Rückschlüsse oder Rückrechnungen aus Untersuchungen im Grundwasserabstrom unter Berücksichtigung der Stoffkonzentration im Grundwasseranstrom, der Verdünnung, des Schadstoffverhaltens in der ungesättigten und gesättigten Bodenzone sowie des Schadstoffinventars im Boden,*
- *auf der Grundlage von In-situ-Untersuchungen oder*
- *auf der Grundlage von Materialuntersuchungen im Labor (Elution, Extraktion), bei anorganischen Stoffen insbesondere der Elution mit Wasser, gemäß Tabelle 2 auch unter Anwendung von Stofftransportmodellen erfolgen.*

In der Praxis stellen sich meist folgende Probleme:

1. Die Rückrechnungen aus Konzentrationen im Grundwasseranstrom und –abstrom unterhalb der kontaminierten Bodenschichten ermöglichen nur Beurteilungen des aktuellen Ist-Zustandes, jedoch keine Prognosen über künftig zu erwartende Schadstoffeinträge.
2. Die Durchführung von direkten In-situ – Untersuchungen (Direktbeprobung von Sickerwasser am „Ort der Beurteilung - OdB“) ist in der Regel messtechnisch nicht möglich und würde wiederum nur aktuelle Ist-Werte liefern, jedoch keine prognostische Einschätzung zukünftiger Werte am OdB.

Daher ist es in den meisten Fällen einer Sickerwasserprognose unumgänglich, sowohl um das Austragsverhalten der Schadstoffquelle in der ungesättigten Bodenzone („Quellstärke“) zu ermitteln als auch die Schutzfunktion darunterliegender Bodenschichten („Transportstrecke“) zu quantifizieren. Nur mit Hilfe der ungefähren Kenntnis dieser zwei Aspekte lassen sich mögliche Schadstoffausträge in weiterer Zukunft abschätzen.

Die „Quellstärke“, im engeren Sinne die Schadstoffkonzentration im Sickerwasser im Bereich der Kontamination, lässt sich durch Materialuntersuchungen im Labor (Elution, Extraktion) ermitteln. Für die Prognose des weiteren Verlaufs der Schadstoffkonzentrationen (auch zeitlich) auf dem Transportweg zum Grundwasser stellt die Verwendung von Stofftransportmodellen die fast alternativlose Methode der Wahl dar.

Die Frage, in welchem Ausmaß Sickerwasserprognosen in der Altlasten- und Bodenschutzpraxis relevant sind, oder noch werden, könnte ein Blick in die Altlastenkataster der Bundesländer beantworten. Als Beispiel sei hier eine Filterabfrage innerhalb des Sächsischen Altlasten-Katasters (SALKA) genannt, Stand Januar 2011:

Filterkriterien zur Datenbankabfrage SALKA: (Datenquelle: LfULG)

- *Gesamtdatenbank Freistaat Sachsen,*

- *Schutzgut = Grundwasser;*

- *Altlastenbearbeitung der Fläche auf Stufe „Orientierende Untersuchung (OU) abgeschlossen“ mit dem Ergebnis der OU „Empfehlung zur Durchführung einer Detailuntersuchung (DU)“*

Die Recherche mit diesen Filterkriterien listet in der SALKA-Datenbank **847 altlastverdächtige Flächen in Sachsen**, bei denen der hinreichende Verdacht einer Gefährdung des Schutzgutes Grundwasser besteht (Stufe OU abgeschlossen mit Handlungsbedarf DU bzw. DU begonnen) Bei einem nicht unerheblichen Teil dieser Verdachtsflächen wird eine Sickerwasserprognose zur Klärung des Gefährdungspotentials durchzuführen sein. Nach den Erfahrungswerten des Projektcontrollers für sächsische Altlasten-Freistellungsfälle (ARGE AFC Sachsen, kleinere Untermenge aller Flächen) sind derzeit bei ca. 5% der Freistellungsfälle aus der Detailuntersuchung (laufende bzw. geplante Vorhaben) quantitative Sickerwasserprognosen vorhanden. Bei ca. 25% dieser Fälle aus der DU ist der Bearbeitungsstand noch unzureichend (bzw. keine Angaben). Für knapp 70% der Fälle wird eingeschätzt, dass keine quantitativen Sickerwasserprognosen möglich/erforderlich sind.

Insgesamt kommen bei der Abschätzung des zukünftigen Bedarfs an Sickerwasserprognosen auch noch Flächen dazu, die derzeit noch einen geringeren Erkundungsstand aufweisen bzw. schon in der Sanierungsuntersuchung sind.

2. Neuerungen innerhalb der Gesetzeslage, weitere zu erwartende Änderungen

Grundwasserverordnung

Im November 2010 trat die neue Grundwasserverordnung (Verordnung zum Schutz des Grundwassers, GrwV) in Kraft. Die jetzige Form hat jedoch keine Auswirkung auf den Themenbereich Sickerwasserprognose. Sie stellt lediglich eine 1:1 Umsetzung der Europäischen Grundwasserrichtlinie dar. Der ursprüngliche Plan, mit der neuen Verordnung erstmalig die LAWA (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser) – Geringfügigkeitsschwellenwerte für die Beurteilung einer nachteiligen Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit festzuschreiben, ist mit der jetzigen Version der Verordnung nicht umgesetzt worden.

„Mantelverordnung“ – Verabschiedung 2012/13 geplant

Im Rahmen der geplanten „Mantelverordnung“ sollen **Novellierungen** an der **Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung** (BBodSchV, vom 12. Juli 1999) sowie an der im November 2011 inkraftgetretenen **Grundwasserverordnung** (GrwV) umgesetzt werden. Bestandteil der „Mantelverordnung“ soll auch das Inkrafttreten der **„Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken“** (Ersatzbaustoffverordnung, EBV) sein.

- Auswahl einiger geplanter Änderungen an der **BBodSchV** (Novellierung, Entwurf Mantelverordnung 06.01.2011):

Fokussierung auf **Frachtermittlung**:

Entwurf § 3 (5a) „Im Rahmen der Detailuntersuchung sollen die derzeitigen und in überschaubarer Zukunft zu erwartenden Schadstofffrachten ermittelt werden.“

Definierung eines „anrechenbaren Grundwasservolumens“ („**Einmischzone**“):

Entwurf § 4 (7b) „Überschreitet bei altlastverdächtigen Flächen die Schadstoffkonzentration im Boden am Ort der Beurteilung den Prüfwert nach Anhang 2, Tabelle 3.1.2 oder Tabelle 3.1.3, ist nach Anhang 1, Nummer 3.3 zu ermitteln, inwieweit der Prüfwert im obersten Meter des Grundwassers unterhalb derjenigen Fläche überschritten wird, auf der Prüfwertüberschreitungen in Bodenproben festgestellt wurden. Der Verdacht einer Altlast ist ausgeräumt, wenn die nach Anhang 1 Nummer 3.3 ermittelte Schadstoffkonzentration im anrechenbaren Grundwasservolumen den jeweiligen Prüfwert nach Anhang 2, Tabelle 3.1.2 oder Tabelle 3.1.3 nicht übersteigt.“

Bisher war nicht klar geregelt, wie bei einer Prüfwertüberschreitung am OdB (d.h. am Übergangsbereich von ungesättigter zur wassergesättigten Zone) weiter vorzugehen ist. Der Novellierungstext sieht vor, dass innerhalb der Gefährdungsabschätzung ein definiertes Grundwasservolumen unterhalb der Kontamination betrachtet wird und dort eine Mischkonzentration zwischen dem jährlich von oben zuströmenden Sickerwasser und dem seitlich zuströmenden Grundwasser (1 m –Schicht) gebildet wird.

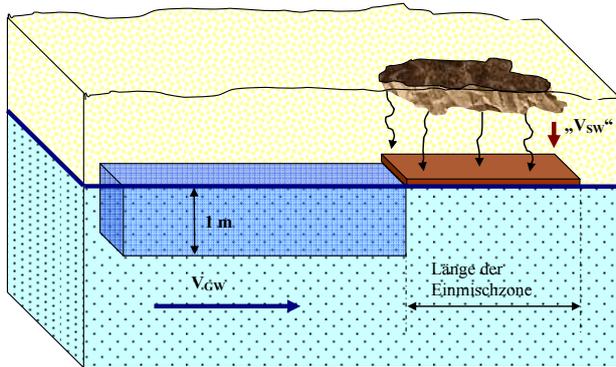


Abb. 1: Skizze zur Verdeutlichung des Konzeptes der „Einmischzone“: Das belastete Sickerwasser tritt ins Grundwasser ein und wird dort verdünnt. Es wird eine resultierende Mischkonzentration zwischen dem jährlich zuströmenden Sickerwasser (brauner Quader) und dem jährlich vorbeiströmenden Grundwasser (oberste 1 m –Schicht, blauer Quader) errechnet.

Berechnungsformel zur Berücksichtigung der Einmischzone des Grundwassers unterhalb von bestehenden Bodenverunreinigungen :

$$c_{mix} = c_{SW} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1m \cdot v_{GW}}{l_{mix} \cdot v_{SW}}} + c_{GW} \cdot \frac{1}{1 + \frac{l_{mix} \cdot v_{SW}}{1m \cdot v_{GW}}}$$

Gl. (1), Quelle: Entwurfstext
 Mantelverordnung, 06.01.2011

- c_{mix} = Konzentration in der Einmischzone [g/l]
- c_{SW} = Konzentration im Sickerwasser [g/l]
- c_{GW} = Konzentration im Grundwasser [g/l] (Hintergrundkonzentration)
- v_{GW} = Grundwasserfließgeschwindigkeit [m/Jahr]
- l_{mix} = Länge der Einmischzone in Fließrichtung [m]
- v_{SW} = Sickerwasserrate [m/Jahr]

Weitere geplante Veränderungen der BBodSchV betreffen u.a. die Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung bei Sanierungsmaßnahmen sowie Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen.

Eindeutig ist im Novellierungsentwurf die Abkehr vom Bodensättigungsextrakt (BSE) und vom Schüttelverfahren nach DIN 38414-4 („S 4^c –Test, mit Wasser-Feststoffverhältnis von 10:1) zu erkennen. Die neuen Schüttel- und Perkolationsverfahren basieren auf einem Wasser-Feststoffverhältnis von 2:1. (s. Kap. 4)

- Geplante Veränderungen und Ergänzungen an der **Grundwasserverordnung**:

Es beabsichtigt, Geringfügigkeitsschwellenwerten verbindlich festzuschreiben, ein Vorhaben, welches bis zum Inkrafttreten der GrwV im November 2010 noch nicht umgesetzt werden konnte. Jedoch werden diese Schwellenwerte reine Immissionswerte für das Grundwasser darstellen und nicht unmittelbar für die Bewertung von Altlasten oder auch den Einbau Ersatzbaustoffe gelten. Die Geringfügigkeitsschwellenwerte gelten für das Grundwasser und werden am Ort des Eintritts in das Grundwasser gemessen. Die Prüfwerte nach BBodSchV gelten weiterhin für den Übergangsbereich von der ungesättigten zur wassergesättigten Bodenzone.

- Ersatzbaustoffverordnung (EBV)

Die bisher in Deutschland anfallenden mineralischen Abfälle (jährlich ca. 200 Mio. t, davon allein 100 Mio. t Boden und Steine) wurden mit Hilfe der Mitteilung 20 der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) vom 6. November 1997 auf abfallspezifische Anforderungen überprüft. In Abhängigkeit der Schadstoffbelastungen wurden Einschränkungen bezogen auf mögliche Wiederverwertung (Einbaustandorte und Einbauweisen) festgelegt und die mineralischen Abfälle mit „Zuordnungswerten“ (von Z0 bis Z2) klassifiziert. Die Entscheidung wurde aufgrund von Feststoff- und Eluatwerten der LAGA M 20 getroffen.

Große Mengen dieser Abfälle wurden für bautechnische Zwecke und für Verfüllungsmaßnahmen wiederverwertet. Mit dem sogenannten „Tongrubenurteil II“ des Bundesverwaltungsgerichtes (BVerwG, vom 14. April 2005 [7 C 26/03]) wurde die Vollzugstauglichkeit der LAGA M 20 bestritten, vor allem bezüglich mangelnder Vorsorgemaßstäbe im Sinne des Bundes-Bodenschutzgesetzes zur Verhinderung des Entstehens schädlicher Bodenveränderungen. Als Folge entwickelte sich in den Bundesländern eine uneinheitliche Vollzugspraxis, mit vielen aufwändigen Einzelfallprüfungen aufgrund der fehlenden gesetzlichen Vorgaben. Mit der Ausarbeitung der Ersatzbaustoffverordnung sollte diesem dringenden Regelungsbedarf begegnet werden.

Diese Verordnung soll eine schadlose Verwertung von mineralischen Abfällen, industriellen Nebenprodukten und Recyclingprodukten vor allem beim Einbau in technischen Bauwerken sicherstellen und fokussiert insbesondere auf den Schutz des Bodens und des Grundwassers.

Im Rahmen dieser Verordnung wird erstmalig der Begriff „**Ersatzbaustoffe**“ definiert. Darunter fallen alle mineralischen Abfälle, industriellen Nebenprodukte, Baurecyclingprodukte und Bodenmaterial, die Primärrohstoffen ersetzen.

Um den für Grundwasser und Boden schadlosen Einbau der Ersatzbaustoffe zu gewährleisten, legt die EBV spezifische „Materialwerte“ fest, welche sich auf Eluatkonzentrationen gelöster Schadstoffe beziehen. In Abhängigkeit hydrogeologischer Gegebenheiten in Kombination mit den natürlichen Abbau- und Rückhalteprozessen auf der Sickerstrecke werden den unterschiedlichen „Ersatzbaustoffen“ Einsatzmöglichkeiten zugewiesen (zulässige / unzulässige Bauweisen etc.). Der EBV liegt ein Vorsorgeprinzip zur Vermeidung nachteiliger Veränderungen der Wasserbeschaffenheit zugrunde. Daher wurden die „Materialwerte“ (zulässige Konzentrationen) so festgelegt, dass beim Eintritt des Sickerwassers in das Grundwasser die Prüfwerte der Grundwasserverordnung (§ 13 a Artikel 1) nicht überschritten werden.

Das Auslageverhalten der Ersatzbaustoffe beim Kontakt mit Niederschlags- und Sickerwasser soll durch genormte Elutionsverfahren ermittelt werden (s. Kap. 4). Neben der eigentlichen Quellkonzentration („Quellstärke“) werden die Prozesse auf dem weiteren Transportweg berücksichtigt: Abbau- und Rückhaltevermögen repräsentativer Bodenarten (über lange Prognose-Zeiträume), Anreicherungsverfahren.

Bei der Berechnung von Material-Eluatwerten sollen folgende Randbedingungen berücksichtigt werden:

- Unterscheidung nach Bodenarten Sand/Lehm/Schluff/Ton
- 1 Meter Transportstrecke für Rückhalte-/Abbauprozesse
- Nutzung der Filterkapazität (gegeben durch die Differenz aus Bodenvorsorgewert und Hintergrundwert) gemittelt über eine 1 Meter mächtige Bodenzone nur zu 50 % zum Erhalt der Filterfunktion des Bodens
- Betrachtungszeitraum 200 Jahre (technische Bauwerke)
- Berücksichtigung hydraulischer Verdünnungsprozesse innerhalb des technischen Bauwerks bzw. einer Einbauschicht (z.B. Frostschuttschicht) und der gemittelten Sickerwasserraten entlang der

Bauwerksunterkanten. Im Falle einer Umströmung von Teilen des Bauwerks bzw. der Einbauschicht mit Ersatzbaustoffen mit potenziellen umweltrelevanten Stoffausträgen führt der Anteil des unkontaminierten Niederschlags-/ Sickerwassers zu einer Verdünnung der über das Bauwerk gemittelten Konzentration; die resultierenden Verdünnungsfaktoren führen zu einer Erhöhung der zulässigen Konzentrationen im Eluat.
- Ermittlung der Materialwerte im Säulenkurzeluat mit einem Wasser- /Feststoffverhältnis von 2:1 bzw. im ausführlichen Säulenversuch mit einem Wasser-/Feststoffverhältnis von 4:1 nach DIN 19528.

Innerhalb der fachbegleitenden Diskussionen zum Entwurf der EBV wurden neue Laborverfahren zur Bestimmung des Auslaugungsverhaltens der Ersatzbaustoffe empfohlen. Das bisher in der Abfallwirtschaft verwendete Verfahren nach DIN 38414-4 („S 4“ –Test, Schüttelversuch mit Wasser-Feststoffverhältnis von 10:1) erwies sich nach Erfahrungen aus dem BMBF-Verbundvorhabens „Sickerwasserprognose“ als nicht repräsentativ für mittel- und langfristige Prognosezeiträume. Die neuen Verfahren wurden z.T. schon in DIN – Normen überführt und werden in Kap. 4 vorgestellt.

3. Grundlegende Methodik zur Erstellung von Sickerwasserprognosen

Die Kernpunkte bei der Erstellung von Sickerwasserprognosen sollen hier noch einmal grob umrissen werden. In der Frühphase der Existenz der BBodSchV wurde die Sickerwasserprognose in einer Veröffentlichung der OFD Hannover, der Leitstelle des Bundes für Boden- und Grundwasserschutz (OFD, 2002), wie folgt charakterisiert:

Sickerwasserprognose-

- Sie ist keine Messung, sondern eine **Schätzung**.
- Sie beschreibt neben dem aktuellen Zustand **auch zukünftige Ereignisse**.
- Sie berücksichtigt **Konzentrationen und Frachten**.
- Sie bezieht sich auf einen bestimmten räumlichen Abschnitt des Untergrundes.
- Sie stellt eine Bilanzierung des Schadstofftransfers von der ungesättigten in die wassergesättigte Bodenzone dar.

„Das Ergebnis der Sickerwasserprognose kann daher nicht mit einer Zahl allein beschrieben werden. Es kann darum auch nicht durch einfachen numerischen Vergleich mit den Ergebnissen einer anderen Sickerwasserprognose oder festgelegten Orientierungswerten bewertet werden. Es stellt vielmehr eine Einzelfallbezogene fachgutachterliche Beschreibung dar, die als Grundlage für eine Gefährdungsabschätzung für den Wirkungspfad Boden - Grundwasser dient.“

Die Kernaufgabe einer Sickerwasserprognose ist die Abschätzung derzeitiger und zukünftiger Schadstoffeinträge in das Grundwasser. Die engere Begriffsbestimmung nach § 2 BBodSchV schließt dabei nur die Stoffeinträge in das Grundwasser ein, die über das Sickerwasser aus der ungesättigten Zone erfolgen.

Die Arbeitshilfe der Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO, 2006) bezeichnet diesen Fall der ausschließlichen Schadstoffeinträge über das Sickerwasser als „**Standardfall**“.

Nicht im „Standardfall“ berücksichtigte Fallkonstellationen sind Schadstoffeinträge über Präferenzielle Fließwege, Einträge durch nichtwässrige organische Phasen, Einträge über die Bodenluft und Schadstoffquellen, die direkt in der gesättigten Zone liegen.

Eine Sickerwasserprognose für Standorte, die zur Modellvorstellung „Standardfall“ zählen, könnte nach LABO (2006) in folgenden Teilschritten ablaufen:

1. Konzepterstellung

- Sichtung und Auswertung aller bereits zum Standort vorliegenden Erkenntnisse, z. B. aus der orientierenden Untersuchung
- Entwicklung einer Modellvorstellung über die Standortverhältnisse und eines Konzepts zur Durchführung der Sickerwasserprognose in diesem Einzelfall

- Benennung der benötigten Parameter für die Beschreibung der Schadstoffquelle und für die Transportbetrachtung
- Aufstellung des Untersuchungsprogramms (z. B. Beprobungsplan)

2. Durchführung der Untersuchungen

3. Standortbeschreibung mit Angabe von Parametern und Messgrößen

4. Beschreibung der Schadstoffquelle

5. Transportbetrachtung

6. Fachliche Beurteilung der Ergebnisse der Sickerwasserprognose

Für die Punkte 3, 4 und 5 sind umfangreiche Daten und Parameter zu ermitteln. Im Einzelnen werden Informationen aus folgenden Bereichen benötigt:

Für die Standortbeschreibung:

Wasserhaushalt am Standort, meteorologische Daten (Niederschlag, Temperatur), Bodenbedeckung / Vegetation / Versiegelung (Abschätzung der Verdunstung), Zukünftige Nutzungen, Relief, Zwischenabfluss, Wasserbilanz, Abschätzung von Sickerwasser- bzw. Grundwasserneubildungsrate, Instationarität

Beschreibung der Sickerstrecke, Aufbau und Mächtigkeit der ungesättigten Zone, Grundwasserflurabstand und -schwankungsbereich, Unterkante der Schadstoffquelle, Bodenart, Bodenkennwerte (Korngrößenverteilung, Porosität, hydraulische Leitfähigkeit, Tongehalt, Lagerungsdichte, Karbonat, Kohlenstoffgehalt, Kationenaustausch- und Pufferkapazität, Boden-pH, Hintergrundgehalte), geologische Schichten, bevorzugte Fließwege, Stauschichten, Feldkapazität, Wassergehalts/Wasserspannungs-Daten

Für die Beschreibung der Schadstoffquelle:

Schadstoffinventar der Quelle (Schadstoffart, -masse und räumliche Verteilung)

Derzeitige und zukünftige Schadstofffreisetzung (Ergebnis physikalisch-chemischer und biologischer Wechselwirkung zwischen dem mit Schadstoffen verunreinigten Boden und dem durchsickernden Wasser.

Zur Beschreibung des Freisetzungsverhaltens sind Elutions- und Extraktionsuntersuchungen im Labor geeignet.

Für die Transportbetrachtung:

Geometrie der Transportstrecke, Mächtigkeit, geologische Schichtung, bevorzugte Fließwege, Stauschichten, Grundwasserflurabstand und -schwankungsbereich

Kennwerte der geologischen Schichten (Korngrößenverteilung, Porosität, Tongehalt, Lagerungsdichte, Karbonat, Kohlenstoffgehalt, Sorptions-, Kationenaustausch- und Pufferkapazität.), Feldkapazität, Wassergehalts/Wasserspannungs-Daten

Sickerwasserbewegung, Sickerwasserrate, Instationarität

Schadstofftransportdaten, Dispersivität, Sorption, biologischer Abbau, Flüchtigkeit

Zur Ermittlung des Rückhaltevermögens (Sorption) und z.T. für die Abschätzung biologischer Abbauprozesse Laboruntersuchungen (Säulenversuche, batch-Versuche) geeignet.

Bei Kenntnis einer ausreichenden Anzahl von Parametern ist es möglich, den Schadstoffeintrag in das Grundwasser ausgedrückt in Frachten (z.B. kg/a) und Konzentrationen (z.B. µg/l) abzuschätzen. Es bietet sich hier der Einsatz von Stofftransportmodellen an, die auf mathematischem Wege die Prozesse der Wasserbewegung und des Stofftransports nachbilden. Mit Hilfe der Stofftransportmodellierung lassen sich in der Zukunft liegenden Stoffeinträge am Ort der Beurteilung (OdB) berechnen.

Die gewonnenen Einzelergebnisse aus Untersuchungen und Berechnungen sind sachgerecht für eine räumliche und zeitliche Integration am Gesamtstandort zu verwenden. Eine Plausibilitätsprüfung der gewonnenen Erkenntnisse ist notwendig

(Literaturdaten/Vergleichsfälle, etc.). Alle Ergebnisunsicherheiten der prognostischen Aussagen und Modellierungen einer Sickerwasserprognose sollten dokumentiert werden.

4. Laborverfahren zur Ermittlung von Parametern, aktuelle Situation und Auswirkungen

An Boden- und Materialproben können durch Extraktionsversuche die Schadstoffgesamtgehalte bestimmt werden. Elutions-Laborversuche dienen hauptsächlich dem Zweck, die Quellkonzentrationen schadstoffbelasteter Boden- und Materialproben zu ermitteln. Manche Elutions-Versuche sind auch geeignet, das zeitliche Auslaugungsverhalten dieser Proben für kürzere, überschaubare Zeiträume (z.B. 10-20 Jahre) abzuschätzen.

In der jetzigen, noch gültigen Fassung der BBodSchV, war für anorganische Schadstoffe die Durchführung eines Bodensättigungsextraktes (BSE) festgeschrieben. Anderere Elutionsverfahren (z.B. DIN 19730 oder DIN 38414-4) waren auch zulässig, wenn die „Gleichwertigkeit“ der Ergebnisse in Bezug auf Bodensättigungsextrakt „sichergestellt“ ist.

Um den Austrag organischer Stoffe aus entnommenen Proben zu quantifizieren, wurden nicht weiter spezifizierte Säulenversuche („unter Beachtung der Standortbedingungen am Entnahmestort, insbesondere im Hinblick auf die Kontaktzeit“) gefordert.

Die geplante Mantelverordnung mit der darin enthaltenen Novellierung der BBodSchV und der neuen Ersatzbaustoffverordnung (EBV) verabschiedet sich komplett von den o.g. Laborversuchsmethoden.

In der Praxis zeigten sich schon lange die Probleme mit dem BSE (vor allem die nicht eindeutig definierte zuzugebende Wassermenge [„...bis zur Fließgrenze des Bodens..] und die geringe Ausbeute an Eluat für weitere chem. Analysen) und auch die Schwierigkeiten bei der Deutung der Eluatwerte der Versuche nach DIN 38414-4 („S 4“-Test). Die langjährigen Diskussionen im Zusammenhang mit der geplanten Einführung der EBV zeigten auch im Themenbereich Einbau von Ersatzstoffen / Einhaltung des vorsorgenden Grundwasserschutzes die methodischen Mängel des „S 4“-Tests auf, z.B. die fehlende Eignung das Auslaugungsverhalten über mittelfristige Zeiträume (ca. 10 – 50 Jahre) repräsentativ abzubilden.

Anstelle des ungeeigneten BSE und des „S 4“-Tests soll in der BBodSchV nun der bereits genormte Schüttelversuch nach DIN 19529 mit einem definierten Wasser-Feststoffverhältnis von 2:1 vorgeschrieben werden. Für den Einsatz bei anorganischen Schadstoffen ist die Tauglichkeit bereits nachgewiesen. Für den Einsatz eines Schüttelverfahrens für organische Schadstoffen läuft die Validierung und das Normungsverfahren für einen sehr ähnlichen Schüttelversuch, welcher jetzt im Entwurfsstadium liegt (E DIN 19527).



Abb. 2: Klassischer Überkopfschüttler für Versuche nach DIN 38414-4 und DIN 19528 / E DIN 19527.

Das Wasser-Feststoffverhältnis von 2:1 wird auch innerhalb der bereits als DIN 19528 genormten Säulenversuchmethodik festgeschrieben. Dieser sogenannte Säulenkurzeluat-Versuch ist sowohl für anorganische als auch für organische Schadstoffe zugelassen und soll in der neuen BBodSchV festgeschrieben werden.

Der Säulenkurzeluat-Versuch nach DIN 19528 wird auch wichtiger Bestandteil der geplanten Ersatzbaustoffverordnung, wo er zu Ermittlung der Materialwerte der einzelnen Ersatzbaustoffe dient.

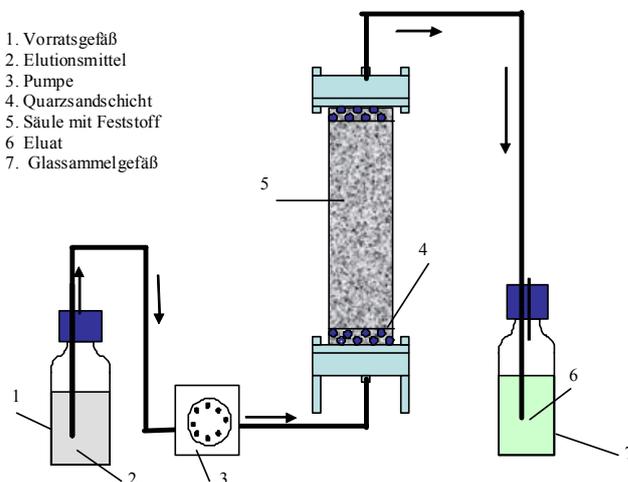


Abb. 3: Schematischer Aufbau des Säulenversuchs nach DIN 19528

Säulenversuch – „Säulenschnelltest“ nach DIN 19528, vorgeschriebene Methodik:

- Verwendung von Säule aus Glas mit Verschlusskappen,
- Innendurchmesser 5 cm bis 10 cm.
- befüllbare Säulenhöhe mindestens 4faches vom Säuleninnendurchmesser

- bei organische Stoffen zur Minderung des biologischen und des photochemischen Abbaus die befüllten Säulen vor Lichteinstrahlung schützen (z. B. Einwickeln in Alufolie).
- Quarzsandbett aus Quarzsand (5.4) im unteren und oberen Abschnitt der Säule, für gleichmäßiges An- und Abströmen des Wassers über den gesamten Querschnitt der Säule sicherzustellen.

Formel zur Bestimmung der Durchflussrate (gefordert ist **Kontaktzeit** in der Säule **von 5 h**)

$$q = \frac{l \times \pi \times r^2 \times n}{t \times 60}$$

- q - der Durchfluss in Milliliter je Minute, ml/min;
- r - der Innenradius der Säule in Zentimeter, cm;
- l - die Länge des mit dem zu untersuchenden Feststoff befüllten Säulenabschnittes in Zentimeter, cm;
- n - der Porenanteil (bzw. die Porosität) des zu untersuchenden Feststoffs in der Säule, dimensionslos;
- t - die Sättigungsdauer (2 h) bzw. Kontaktzeit während der Elution (5 h) in Stunden, h.

Die DIN 19528 wurde mit einem laborübergreifenden Ringversuch erfolgreich validiert und genormt.

Auswirkungen auf die jetzige Form der „Sächsischen Musterleistungsbeschreibungen“ für Laborative Untersuchungen zur Sickerwasserprognose (Sächs. MLB; LfULG, 2004) ?

Die Sächs. MLB sieht in 3 Ebenen Laborversuche zur Ermittlung von Parametern vor, die für eine qualifizierte Sickerwasserprognose innerhalb der Detailuntersuchung benötigt werden. Dazu gehören in der „Laborebene A“ Schüttelversuche nach DIN 38414-4 („S 4“ -Test) und spezielle intermittierende Säulenversuche in Laborebene B und C. Bei schlecht durchlässigen Böden ($k_f < 10^{-7}$ m/s) ist anstelle der intermittierenden Säulenversuche ein Bodensättigungsextrakt (BSE) vorgesehen.

Mit Sicherheit wird der „S 4“ –Test nach DIN 38414-4 mit seinem Wasser-Feststoff-Verhältnis von ca. 10:1 ersetzt werden durch die neuen Methoden mit Wasser-Feststoff-Verhältnis von 2:1 (DIN 19529, E DIN 19527).

Da es im Entwurf der Novellierung der BBodSchV keine Konvention zur Ermittlung einer „echten“ Prognose gibt, kann und sollte die Musterleistungsbeschreibung von Sachsen mit den intermittierend betriebenen Säulenversuchen nach wie vor angewendet werden.

Fachliche Diskussionen zu kontinuierlich/diskontinuierlich (=intermittierend) betriebenen Säulenversuchen und Gleichgewichtseinstellungen wird es nach wie vor geben.

Das LfULG beauftragte im 2008 zwei Dresdner Labore, die an den Ringversuchen Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM, im Auftrag des Umweltbundesamts, UBA) zur Validierung des Säulenversuchs nach DIN 19528 teilnahmen, mit der Weiterführung dieser Säulenversuche in intermittierender Betriebsweise nach Sächs. MLB.

Bei den Versuchsergebnissen zeigten sich nicht die befürchteten starken Konzentrationsanstiege im Eluat nach einem Stillstand des Wassers in der Säule. Jedoch kam neben speziellen Erstazbaustoff-Materialien in den Säulen nur ein kontaminierter Boden zum Einsatz, der vorher (um gezielt mit Schadstoffen für den Ringversuch der BAM dotiert zu werden) homogenisiert wurde und außerdem dann gestört in den Säulen eingebaut war.

Es steht z.B. die Frage im Raum, ob die 5-stündige „Verweilzeit“ (kontinuierliches Fließen des Wassers!) in der Säule nach der DIN 19528 –Methodik ausreicht, um z.B. bei ungestört entnommenen, natürlich gelagerten Bodenproben (Linerkernproben) Gleichgewichtskonzentrationen einstellen zu können, z.B. auch mit Schadstoffanteilen, die in hydraulisch

inaktiven Feinporen des Bodens fixiert sind und nur über Diffusionsprozesse in das fließrelevante Grobporensystem gelangen können. Susset und Leuchs (2008) beurteilen die „Kontaktzeit“ des DIN 19528 als ausreichend, so auch für hochsorptive Stoffe wie PAK.

Ebenso strittig ist die Verfahrensweise der DIN 19528 für schlecht durchlässige Böden, die dann mit Anteilen von Quarzsand vermischt werden sollen. Zumindest für Versuche innerhalb der Laborebene C der Sächs. MLB (Transportterm, auch zur Ermittlung des Biolog. Abbaus) ist eine derart intensive Störung der Bodenprobe (z.B. durch Belüftung und ggf. Beeinflussung durch stoffliche Eigenschaften des Quarzsandes) fragwürdig.

5. Einsatz von Computerprogrammen (Stofftransportmodelle), Fazit der Fallbeispiele

Standorte, an denen eine ausreichende Anzahl an Parametern für die Beschreibung des Wasserhaushaltes, der Schadstoffquelle und des Transportbereiches bekannt ist, eignen sich für die Anwendung von Stofftransportmodellen. Mit deren Hilfe kann eine prognostische Berechnung der Sickerwasserfrachten und Konzentrationen in verschiedenen Tiefen erfolgen.

Eine Modellierung auf der Basis vieler im Feld oder im Laborversuch ermittelter Parameter kann qualifizierte Sickerwasserprognosen liefern. Aber auch der Einsatz einer Stofftransportmodellierung auf der Basis geschätzter Parameter kann eine verbal-argumentative Sickerwasserprognose zumindest unterstützen und zum besseren Verständnis möglicher Prozesse und Schwankungsbreiten beitragen.

Eine klassische Stofftransportmodellierung innerhalb einer Sickerwasserprognose orientiert sich an der Modellvorstellung des LABO – „Standardfalls“ (s. Kap. 3). Bekannt sind dabei die Schadstoffkonzentration im Sickerwasser beim Verlassen der Schadstoffquelle und die Sickerwasserrate (Volumenstrom). Der Stofftransport findet nur über das Sickerwasser statt, Verfrachtungen über Bodenluft oder sich bewegende nichtwässrige Phasenkörper finden nicht statt.

Es existieren verschiedene Ansätze zur Lösung dieser Fallkonstellation. Häufigster Ansatz ist die numerische Berechnung der ungesättigten Strömung über die RICHARDS-Gleichung und die parallele Verwendung der Konvektions-Dispersions-Gleichung zur Berechnung des Stofftransports (z.B. Programme HYDRUS, SIWAPRO DSS, EXPOSI, SEEPER). Auf analytischem Wege ist die RICHARDS-Gleichung nicht lösbar.

Analytische Programme (z.B. ALTEX 1D) können die Konvektions-Dispersions-Gleichung jedoch unter der Voraussetzung stationärer Sickerwasserströmung (konstante Wassergehalte) berechnen.

Weitere Lösungsansätze sind Massenbilanz-Methoden, bei der die Transportstrecke wie ein homogener Reaktor (auch mehrschichtig) gerechnet wird, innerhalb dessen die im Sickerwasser gelösten Schadstoffe durch Sorption zurückgehalten und durch biologischen Abbau eliminiert werden.

Kompliziertere Fallkonstellation, die über die Vorstellung des „Standardfalls“ hinausgehen, liegen z.B. vor, wenn der Standort durch eine komplexe Geologie/Hydrogeologie gekennzeichnet, instationäre Prozesse abgebildet werden sollen, wenn präferenzielle Fließwege, Einträge direkt aus nichtwässrigen organischen Phasen oder der Eintrag über die Bodenluft mit berücksichtigt werden muss. Dann kommen komplexere, numerische Programme zur Anwendung. Einige Standardprogramme können den Stofftransport über Bodenluft berechnen (z.B. HYDRUS, ALTEX 1D). Die Einbeziehung präferentieller Fließwege gestaltet sich programmtechnisch schwieriger, Lösungsansätze dazu verwenden z.B. „Zwei-Regionen-

Modelle“ (Lennartz, 2003) mit mobilen und immobilen Regionen oder rechnenden Boden als dual-poröses System.

Das Ergebnis einer Transportprognose mit einem Stofftransportmodell soll die Abschätzung der innerhalb des Prognosezeitraums am Übergang von ungesättigter Zone in das Grundwasser auftretenden Stoffkonzentration im Sickerwasser und der Stofffrachten sein. Die typischen Parameter, die zwingend für Lösungsverfahren auf Basis der Konvektions-Dispersions-Gleichung benötigt werden, werden nachfolgend aufgelistet:

Notwendige Parameter für Stofftransportmodellierung (nach LABO, 2006)

- Länge der Transportstrecke

Beginn an Unterkante der Schadstoffquelle, endet am OdB / GW-Spiegel

- **Sickerwasserrate**, GWN oder Ganglinie des instationären Sickerwasserzuflusses aus der Schadstoffquelle

- Dispersionskoeffizient

(Dispersion führt zu einem räumlichen Auseinanderdriften der aus der Quelle austretenden Schadstoffe, geringfügige Verdünnung der Konzentration durch Verteilung der Schadstoffmasse auf größeres Volumen verteilt, longitudinale Dispersion führt nur zu einem Auseinanderziehen der Schadstofffront in Strömungsrichtung)

- Retardationsfaktor oder Sorptionskoeffizienten

(Retardationsfaktor R beschreibt Verzögerung des Schadstofftransports durch Sorptionsprozesse an der Bodenmatrix. R kann aus Sorptionskoeffizienten wie dem k_D -Wert errechnet werden)

- Abbaukoeffizient

(Maß für den biologischen Abbau, meist als Halbwertszeit angeben)

- Austragsfunktion der Schadstoffquelle

(zur Vereinfachung werden meist zwei Versionen des zeitlichen Schadstoffaustrags aus der Quelle unterschieden: Konstante Quellkonzentration, zum Zeitpunkt x auf Null fallend; oder Exponentiell abnehmende Konzentration)

- **weitere Parameter** zur Beschreibung des **Sickerwasserflusses** (Porosität, Trockenrohddichte, Feldkapazität, Restwassergehalt, Werte zur Beschreibung der Wassergehalts-/Wasserspannungskurve [van Genuchten-Parameter])

Hauptprobleme in der Praxis

Zur Bewertung unterschiedlicher Stofftransportmodelle (Computersoftware) wurden bereits mehrere Programmvergleiche durchgeführt (LfULG 2008, Kemmesies 2008, LABO 2003). Neben dem eigentlichen Vergleich der unterschiedlichen Software-Lösungen erfolgte dabei auch eine Beurteilung der sensitivsten Parameter für die Modellierungsergebnisse.

Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass vor allem die Unsicherheiten und möglichen Schwankungsbreiten der Parameter

- **Quellkonzentration**
- **Retardationsfaktor** (bzw. Sorptionskoeffizienten, wie k_D -Wert)
- **Abbaukoeffizient** (biologischer Abbau) sowie
- **Sickerwasserrate** (Grundwasserneubildung)

den stärksten Einfluss auf Berechnungsergebnisse haben.

In der Praxis stellt sich die Frage, wie realitätsnahe Angaben über diese sensitiven Parameter und deren mögliche Schwankungsbreite am Standort zu erhalten sind.

Auch wenn Einzel- (Punktmesswerte) oder vereinzelte Ergebnisse von Laborversuchen vorliegen sollten, bleibt trotzdem die Unsicherheit einer heterogenen Verteilung dieser Parameter am Standort. Feldböden können sowohl bezogen auf die hydraulischen, als auch auf die chemischen und biologischen Eigenschaften sehr heterogen sein (Chen et al, 1995; Piccolo et al., 1998). Für Risikoabschätzungen sollten deshalb Retardations- und Abbaukoeffizienten als Eingangsgrößen mit einer starken Variabilität behandelt werden.

Der Modellierer müsste sich z.B. die Frage stellen: „Wann ist in welcher Tiefe/Ort mit welchem Bioabbau zu rechnen?“ Der biologische Abbau hängt stark von weiteren Kriterien wie dem O₂-Gehalt, Wassergehalt, Temperatur (Sommer-Winter), Redoxpotenziale, Substratangebot, Verfügbarkeit anderer Elektronenakzeptoren (z.B. Nitrat) ab, welche alle Schwankungen unterliegen können.

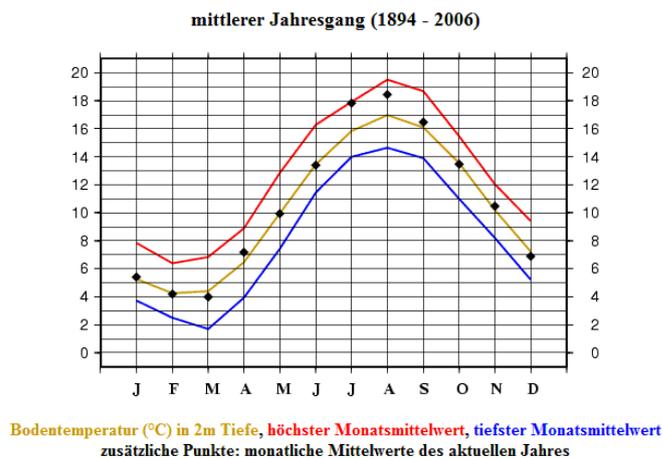


Abb. 4: Jahresgang der Bodentemperatur in 2 m Tiefe (Potsdam) als eine Einflussgröße auf den biologischen Abbau. Quelle: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V., Säkularstation Potsdam Telegrafenberg, http://saekular.pik-potsdam.de/2007_de/

Sickerwasserprognose erstellt werden soll, repräsentative Zonen zu unterteilen, die sich jeweils in ihrem Quellaustragsverhalten, ihren hydraulischen Eigenschaften und der zu erwartenden Sorptions- und Bioabbau-Intensität ähneln. An diesen Zonen müssen dann Einzelrechnungen mit jeweiliger Belegung der Parameter durchgeführt werden.

Generell ist die Variation der o.g. Parameter innerhalb von Szenarienrechnungen anzuraten. Mögliche Schwankungsbreiten der Parameter lassen sich z.T. schon aus Literaturwerten ableiten und werden im besten Fall noch durch Laborversuche mit Standortbodenproben validiert.

Neuere Trends und Lösungsmöglichkeiten gegenüber manuellen Szenarienrechnungen stellen automatisierte Szenarienvariationen mit zufallsgenerierten Parametern dar. In diesen Fällen variiert die Software automatisch die ausgewählten Parameter (innerhalb vorgegebener Schwankungsbreiten) mittels statistischer Verfahren (z.B. Monte Carlo Simulation).

Zum Abschluss sei hier noch in diesem Zusammenhang ein interessanter Ringversuch von Brown et al. (1996) erwähnt:

Die Autoren untersuchten die Variabilität von Modellierungsergebnissen für einen gegebenen Feldversuch (zur Pestizidverlagerung), indem sie alle verfügbaren Informationen zum Feldversuch identisch an fünf verschiedene Modellierergruppen übergaben. Jede der Modellierergruppen sollte die Daten mit den drei Modellen LEACHP, PRZM2 und VARLEACH nachrechnen. Die besten Ergebnisse zeigte in der Regel die Modellierung mit LEACHP, die schlechtesten VARLEACH.

Innerhalb der Modelle gab es jedoch deutliche Unterschiede zwischen den Berechnungsergebnissen verschiedenen Gruppen, was die Autoren der Studie als **subjektive**

Komponente der Modellierung bezeichneten. Die Gründe für diese Subjektivität wurden darin gesehen, dass aus den verfügbaren Daten für kein Modell alle Inputparameter eindeutig abgeleitet werden konnten. Probleme verursachten hauptsächlich die Dispersivität, die Anfangsbedingungen und Faktoren, die den biologischen Abbau der Pestizide beeinflussten. Daraus abgeleitet, spielen die Erfahrungen, die der jeweilige Modellierer mitbringt, eine entscheidende Rolle.

Fazit der Workshop-Fallbeispiel-Berechnungen:

In Vorbereitung zum Workshop wurden 2 Fallbeispiele mit den Programmen ALTEX 1D, SIWAPRO DSS und EXPOSI vergleichsweise berechnet. Bei den 2 Fällen handelte es sich um einen BTEX-Schadensfall (hohe Kontamination, z.T. Phasenanteile in der Quelle) und einen Standort mit PAK-Kontaminationen (moderate Kontamination).

Die Modellierung erfolgte in allen 3 Programmen eindimensional und stationär mit einer jährlichen Sickerwasserrate von 200 mm. Die Größe der kontaminierten Fläche wurde mit 100 m² angenommen.

Innerhalb jedes Fallbeispiels wurden 2 Varianten gerechnet,

- eine Variante mit Literatur-basierten Werten für die gesättigte hydraulische Durchlässigkeit k_f , Porosität, linearer Verteilungskoeffizient k_D (Sorptionsparameter), und den Biologischen Abbau $\lambda_{1/2}$ (Halbwertszeit).
- sowie eine 2. Variante mit Werten, die in Laborversuchen ermittelt worden.

Tabelle 1 listet einige Berechnungsergebnisse der Vergleichsrechnungen mit ALTEX 1D, SIWAPRO DSS und EXPOSI auf:

Sickerwasserprognose

Fallbeispiel 1

Variante1 : Daten aus Datenbanken

BTEX (Benzol)

			mit 100% mob		
			ALTEX	ExpoSi	SiWaPro 300a
Maximale Konzentration	C_{max}	$\mu\text{g/l}$	171,9	249	336,2
Zeitpunkt der maximalen Konzentration	t_{cmax}	a	72,0		87,5
Zeitpunkt der Prüfwert- Überschreitung	$t_{pwü}$	a	6,0	5	5,2
Dauer PW- Überschreitung	t_{pw}	a	113,0		109,7
max. Emissionsstärke GW	J_{s2max}	$\text{mg}/(\text{m}^{2*}\text{a})$	34,4		67,2

Fallbeispiel 1

Variante2 : Daten aus Versuchen

BTEX (Benzol)

			ALTEX	ExpoSi	SiWaPro 600a
Maximale Konzentration	C_{max}	$\mu\text{g/l}$	2938,5	3310	3400
Zeitpunkt der maximalen Konzentration	t_{cmax}	a	189,0	175	166,7
Zeitpunkt der Prüfwert- Überschreitung	$t_{pwü}$	a	43,0	40	38,4
Dauer PW- Überschreitung	t_{pw}	a	634,0		535,3
max. Emissionsstärke GW	J_{s2max}	$\text{mg}/(\text{m}^{2*}\text{a})$	587,7		680

Fallbeispiel 2

Variante1 : Daten aus Datenbanken

PAK (Naphthalin)

			mit 100% mob		
			ALTEX	ExpoSi	SiWaPro 200a
Maximale Konzentration	C_{max}	$\mu\text{g/l}$	25,7	15,7	13,5
Zeitpunkt der maximalen Konzentration	t_{cmax}	a	66,0	44	50,2
Zeitpunkt der Prüfwert- Überschreitung	$t_{pwü}$	a	11,0	18	23,7
Dauer PW- Überschreitung	t_{pw}	a	3435,0		176,3
max. Emissionsstärke GW	J_{s2max}	$\text{mg}/(\text{m}^{2*}\text{a})$	5,1		2,7

Fallbeispiel 2

Variante2 : Daten aus Versuchen

PAK (Naphthalin)

			ALTEX	ExpoSi	SiWaPro 200a
Maximale Konzentration	C_{max}	$\mu\text{g/l}$	0,2	-	0
Zeitpunkt der maximalen Konzentration	t_{cmax}	a	579,0	-	200
Zeitpunkt der Prüfwert- Überschreitung	$t_{pwü}$	a	-	-	-
Dauer PW- Überschreitung	t_{pw}	a	0,0		-
max. Emissionsstärke GW	J_{s2max}	$\text{mg}/(\text{m}^{2*}\text{a})$	-		0

Tab. 1: Berechnungsergebnisse der Fallbeispiel-Modellierungen)

(SIWAPRO DSS wurde mit unterschiedlichen Simulationszeiträumen gerechnet)

Es zeichnet sich ab, dass alle Programme Konzentrationen im selben Größenordnungsbereich errechnen. Es ergibt sich bei allen drei Programmen in diesen Standardfällen der gleiche Handlungsbedarf.

Fallbeispiel 1 Variante 1	weitere Erkundung (Detailuntersuchung)
Fallbeispiel 1 Variante 2	Sanierungsuntersuchung
Fallbeispiel 2 Variante 1	weitere Erkundung (Detailuntersuchung)
Fallbeispiel 2 Variante 2	kein weitere Handlungsbedarf

Mögliche Ursachen für die nicht genaue Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse sowie Parameterbelegungen können im Workshop mit den Programmautoren diskutiert werden.

Literatur:

- BMBF, TZW Karlsruhe, 2008: BMBF - Förderschwerpunkt „Sickerwasserprognose“: Vergleich der Transportmodelle. Abschlussbericht, KP Ingenieurgesellschaft für Wasser und Boden mbH.
- BMU, 2011: Arbeitsentwurf der Mantelverordnung Grundwasser/Ersatzbaustoffe/Bodenschutz, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), pdf-Dokument, Version vom 06.01.2011, http://www.bmu.de/gesetze_und_verordnungen/verordnungsentwuerfe/regierungsinterne_abstimmung/doc/46921.php
- Brown, C.D.; Baer, U.; Guther, P.; Trevisan, M.; Walker, A.; 1996: Ring test with the models LEACHP, PRZM-2 and VARLEACH -Variability between model users in prediction of pesticide leaching using a standard data set. Pesticide Science 47:249–258.
- Chen, W.; Wagenet, R.J.; 1995: Solute transport in porous media with sorption site heterogeneity. Environ. Sci. Technol. 29:2725–2734.
- Gimmi, T., 2004: Verlagerung gelöster Stoffe durch den Boden ins Grundwasser. Schriftenreihe Umwelt Nr. 349. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.
- LABO, 2003: „Arbeitshilfe Sickerwasserprognose bei orientierenden Untersuchungen“, Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO), Altlastenausschuss (ALA), pdf-Dokument, http://www.labo-deutschland.de/documents/SiWaPrognose-120903_91f.pdf
- LABO, Länderfinanzierungsprogramm „Wasser und Boden 2003“: LABO-Fördervorhaben B 2.01 „Sensitivitätsanalysen bewertungsrelevanter Parameter in Simulationsmodellen zur Sickerwasserprognose“, Abschlussbericht, KP Ingenieurgesellschaft für Wasser und Boden mbH http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/cms/WaBoAb_prod/WaBoAb/Vorhaben/LABO/B_2.01/index.jsp
- LABO, 2006: „Arbeitshilfe Sickerwasserprognose bei Detailuntersuchungen“, Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO), Altlastenausschuss (ALA), pdf-Dokument, http://www.labo-deutschland.de/documents/Ah_Du_1208_732_8fa.pdf
- Lennartz, B., 2003: Die Bestimmung der Schadstoffkonzentration im Sickerwasser (Sickerwasserprognose) unter Berücksichtigung des schnellen Stofftransportes, altlasten spektrum 4/2003
- LfULG, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2004): „Laborative Untersuchungen zur Sickerwasserprognose im Rahmen der Detailuntersuchung - Musterleistungsbeschreibung“, im Fachinformationssystem Altlasten unter www.umwelt.sachsen.de/lfulg
- Kemmesies, O., Euler, B.; 2008: BMBF-Förderschwerpunkt „Sickerwasserprognose“: Vergleich der Transportmodelle. Abschlussbericht KP Ingenieurgesellschaft für Wasser und Boden im Auftrag des HSL, Gunzenhausen, 30.06.2008 http://www.ibwabo.de/pdf/SiWaPro_VergleichDerTransportModelle.pdf
- OFD Hannover, 2002 : „Arbeitshilfen Boden- und Grundwasserschutz 9“, Aktuelle Informationen der OFD Hannover, Leitstelle des Bundes für Boden- und Grundwasserschutz, pdf-Dokument, http://www.ofd-hannover.de/BGWS/BGWSDocs/Downloads/Aktuelles/AHBoGwS_Akt_9.PDF

Piccolo, A.; Conte, P.; Scheunert, I.; and Paci, M.; 1998:. Atrazine interactions with soil humic substances of different molecular structure. *J. Environ. Qual.* 27:1324–1333.

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2008: Programmvergleich Sickerwasserprognose: „HYDRUS, EXPOSI, SIWAPRO DSS, ALTEX, AF-Verfahren“. Abschlussbericht, Auftragnehmer ARCADIS Consult GmbH, DGFZ, noch unveröffentlicht

Susset, B., Leuchs, W. (im Auftrag des UBA), 2008: Ableitung von Materialwerten im Eluat und Einbaumöglichkeiten mineralischer Ersatzbaustoffe. Umsetzung der Ergebnisse des BMBF-Verbundes „Sickerwasserprognose“ in konkrete Vorschläge zur Harmonisierung von Methoden. FKZ 205 74 251, Abschlussbericht, Umweltbundesamt Dessau.