

Hausmülldeponie Hohberg

Lysimeter-Testfeld

09.09.2019

Markierungsversuch
zur Klärung der Wasserherkunft
unterhalb der Asphaltabdichtung

M. Sc. M. Merk, Dr. N. Göppert, Prof. Dr. N. Goldscheider
Erstellt für die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz
Baden-Württemberg (LUBW), 76231 Karlsruhe

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	II
1 Aufgabenstellung	1
2 Lysimeteranlage Deponie Pforzheim-Hohberg	1
2.1 Beschreibung des Lysimeters.....	2
2.1.1 Messprinzip.....	2
2.1.2 Lysimeteraufbau.....	3
2.1.3 Beschreibung der Abflusskomponenten	6
2.2 Niederschlag.....	6
3 Markierungsversuch	7
3.1 Tracereingabe	8
3.2 Probennahme.....	13
3.3 Ergebnisse	16
3.3.1 Auswertung des Abflussverhaltens	16
3.3.2 Durchgangskurven Oberflächenabfluss	17
3.3.3 Durchgangskurven OKF	18
3.3.4 Durchgangskurven KS und KBS	18
3.4 Modellierung der Durchgangskurven.....	19
4 Fazit	21
Anhang	24

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Geographische Lage der Hausmülldeponie Pforzheim-Hohberg	2
Abbildung 2: Auffangbehälter der vier Abflusskomponenten im Lysimeterhaus	3
Abbildung 3: Skizze des Lysimeters.....	4
Abbildung 4: Regelaufbau der Abdichtung im Lysimeter.....	4
Abbildung 5: Schematischer Querschnitt des Lysimeters mit Neutronensondenmessstellen.	5
Abbildung 6: Mögliche Herkunft des Wassers unterhalb der Asphaltsschicht.....	7
Abbildung 7: Zeitlicher Ablauf der Tracereingabe am 12.02.2018.....	8
Abbildung 8: Eingabe von 50 g Eosin in den Baggerschurf oberhalb des Lysimeterfeldes.....	9
Abbildung 9: Eosin im Baggerschurf oberhalb des Lysimeterfeldes nach der Eingabe.....	9
Abbildung 10: Lage der Neutronensondenmessstellen und Wassereingabepunkte.....	10
Abbildung 11: Eingabe von Sulforhodamin B an WP links.....	10
Abbildung 12: WP links nach Eingabe des Sulforhodamin B.....	11
Abbildung 13: Verteilung von Uranin mit einer Gießkanne auf der Lysimeterfläche	11
Abbildung 14: Uranin auf der Lysimeterfläche nach Abschluss der Verteilung.....	12
Abbildung 15: Beregnung des Lysimeterfeldes mit einem Gartensprinkler.....	12
Abbildung 16: Verteilung der Tracer auf der Lysimeteroberfläche und dem Baggerschurf.....	13
Abbildung 17: Deutlich grüne Verfärbung des Oberflächenabflusses	14
Abbildung 18: Deutlich violette Verfärbung des Abflusses aus dem OKF.....	14
Abbildung 19: Grüne Verfärbung des Oberflächenabfluss und violette Verfärbung des OKF....	15
Abbildung 20: Orangene Verfärbung des Abflusses aus dem OKF als Mischfarbe	15
Abbildung 21: Aus der KBS findet nur sehr geringer Abfluss statt	16
Abbildung 22: Abflüsse an OKF und Oberflächenabfluss	17
Abbildung 23: Durchgangskurve von Uranin am Oberflächenabfluss.....	17
Abbildung 24: Durchgangskurven von Uranin und Sulforhodamin B am OKF	18
Abbildung 25: Mit dem ADM modellierte Durchgangskurven am OKF.....	20
Abbildung 26: Mit dem 2RNE modellierte Durchgangskurven am OKF	20

1 Aufgabenstellung

Das Amt für Stadtentsorgung (Technische Dienste) der Stadt Pforzheim unterhält auf dem Hohberg nördlich der Stadt Pforzheim im Rahmen der Sicherung und Sanierung der Hausmülldeponie eine zur Technischen Anleitung Siedlungsabfall (TASi) alternative Oberflächenabdichtung.

Zur Ausführung der Deponie-Oberflächenabdichtung im Bauabschnitt I wurde ein Abdichtungssystem, bestehend aus einer Asphaltabdichtung mit unterliegender Kapillarsperre, realisiert. Auf Veranlassung des Regierungspräsidiums Karlsruhe, der zuständigen Genehmigungsbehörde für den Bau der Oberflächenabdichtung auf der Hausmülldeponie Pforzheim-Hohberg, wurde von der Stadt Pforzheim parallel zum Bau des ersten Abdichtungsabschnitts von September 2002 bis Dezember 2003 ein Großlysimeter auf der Deponie errichtet.

Die erste erfasste Abflusskomponente unterhalb der Asphaltabdichtungsschicht bildet die Kapillarschicht KS. Systembedingt sollte sie, bei einer dichten Asphaltabdichtung, mit der Zeit immer weniger Wasser führen und schließlich, nachdem die mineralische Tragschicht und die KS leergelaufen wären, versiegen. Da durch den als absolut dicht angenommenen Asphalt kein Wasser von oben einsickern kann und die Schichten unterhalb des Asphaltes in einer Wanne aus einer wasserdichten Kunststoffdichtungsbahn (KDB) eingebaut wurden, dürfte nach dem Versiegen auch zu keinem späteren Zeitpunkt Wasser aus der KS und KDB abfließen. Trotzdem wurde weiterhin ein geringer aber messbarer Abfluss erfasst.

Um Undichtigkeiten der Asphaltabdichtung auszuschließen, wurde von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) ein Markierungsversuch in Auftrag gegeben. Bei einem Markierungsversuch werden künstliche Tracer (üblicherweise Fluoreszenzfarbstoffe) ins Wasser eingegeben, um so die unbekanntesten Fließwege des Wassers zu erkunden (Käß, 2004; Leibundgut et al., 2009). Geklärt werden soll die Herkunft des Wassers unterhalb der Dichtungsschicht und Undichtigkeiten in der Asphaltabdichtung und dem Lysimeter ausgeschlossen werden.

2 Lysimeteranlage Deponie Pforzheim-Hohberg

Die Deponie der Klasse DK II befindet sich am nördlichen Rand des Stadtgebietes von Pforzheim und liegt teilweise im anschließenden Enzkreis (Abbildung 1). Der Standort der Deponie weist eine Höhendifferenz von 34 m auf (331 – 365 m.ü.NN). Die Lage des Eingangsbereichs ist in Gauß-Krüger-Koordinaten: R: ³⁴78359 H: ⁵⁴20780. Die Deponie hat eine Gesamtfläche (rekultivierter und noch aktiver Bereich) von ca. 16,12 ha, wobei 13,6 ha die genehmigte Deponiefläche einnehmen (Stand 2006). Im Süden liegen forstwirtschaftlich genutzte Flächen, sowie das Stadtgebiet von Pforzheim. Nördlich befinden sich überwiegend landwirtschaftlich genutzte Bereiche, welche teilweise der Wasserschutzzone IIIB und IIIA (in letzterer liegt auch die Deponie) zugewiesen sind.

Morphologisch betrachtet liegt die Deponie am Südrand der Katharinentalerhof Senke, die mit bis zu 30 m mächtigem Lösslehm gefüllt ist. Unmittelbar darunter befindet sich die Einheit des Oberen Muschelkalks. Hierbei handelt es sich um einen Karstgrundwasserleiter, der in der näheren Umgebung durch typische Karsterscheinungen wie Senken und Dolinen charakterisiert ist (z.B. Eisinger Loch). Über die Mächtigkeit der Lösslehmschicht direkt unterhalb der Deponie kann keine eindeutige Aussage getroffen werden.

Das anfallende Oberflächenwasser der Deponie, der angrenzenden Erd- und Altdeponie, sowie der Zufahrtsstraße werden der Fuchslochdoline zugeleitet. Dies beinhaltet das Oberflächenwasser der rekulti-

vierten Abschnitte, Straßen, Dachflächenwasser und Sickerwasser des Oberen Kiesflächenfilters (OKF). Deponiesickerwasser wird über verschiedene Drainagesysteme einem Speicherbecken zugeführt und von dort in die Sickerwasserbehandlungsanlage vor Ort geleitet.

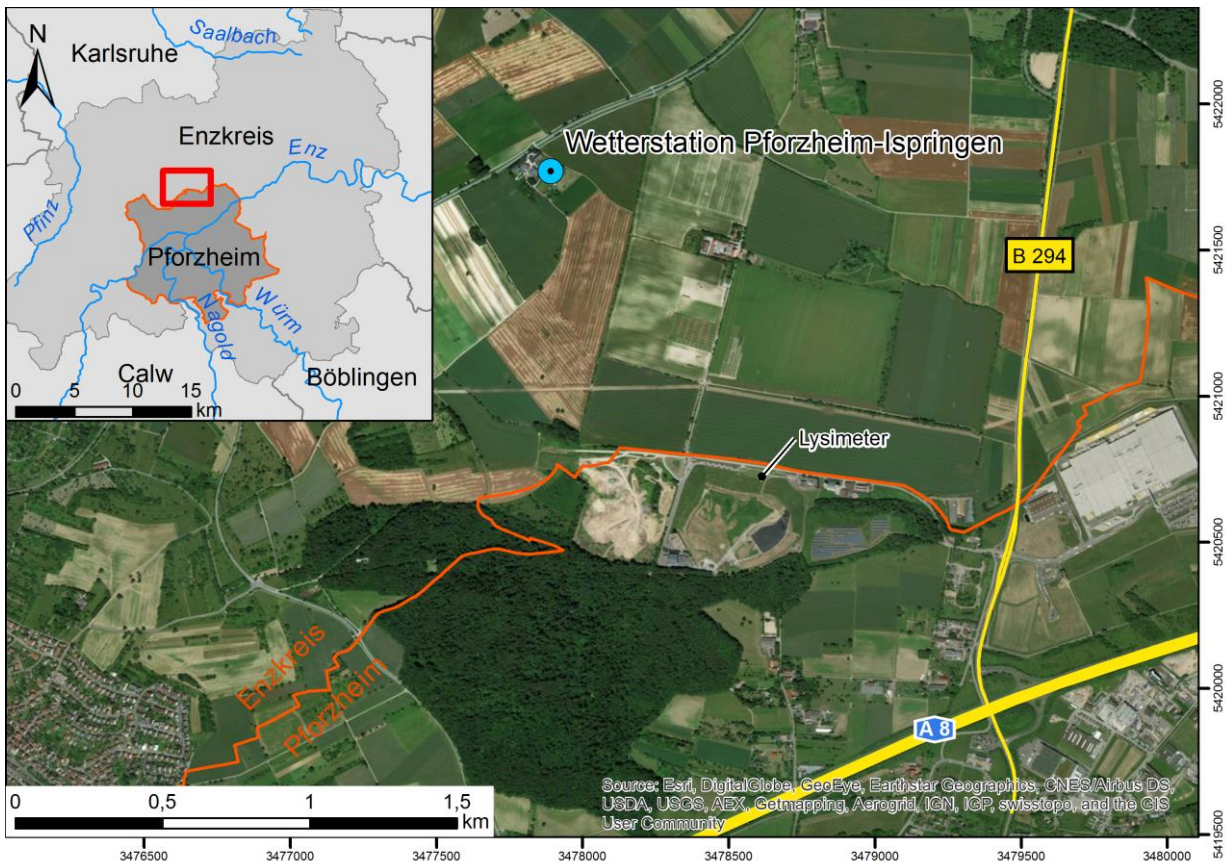


Abbildung 1: Geographische Lage der Hausmülldeponie Pforzheim-Hohberg. Die Grenze des Landkreis Pforzheim ist in der Übersicht dunkelgrau mit oranger Umrandung dargestellt. Der Ausschnitt des Luftbildes ist in der Übersicht rot markiert. (Quellen: WaBoA: Kreisgrenzen, Fließgewässer; ESRI: Luftbild; OSM: Straßen; DWD: Lage der Wetterstation).

2.1 Beschreibung des Lysimeters

2.1.1 Messprinzip

Das Großlysimeter befindet sich im nordwestlichen Bereich des Bauabschnitts I der Deponieoberflächenabdichtung. Das Lysimeter-Testfeld besitzt vier Abflusskomponenten, die jeweils getrennt gefasst, abgeleitet und in einem zentralen Messcontainer, Größe ca. 2,4 m × 4 m, kontinuierlich registriert werden. Für die detaillierte Bestimmung der einzelnen Schichtabflüsse wurde vom Lehrstuhl für Angewandte Geologie Karlsruhe ein Messsystem entwickelt, das die Firma UGT (Umweltgerätetechnik), Münchenberg, realisierte. Jede Abflusskomponente wird hierbei in einen eigenen Messzylinder (Abbildung 2) geleitet und die Wasserstände werden durch Ultraschallsensoren kontinuierlich (15-minütig), sowie ereignisgesteuert (Wasserstandsänderungen >2 cm), gemessen. Die Aufzeichnung wird auf einem zentralen Datenlogger in digitaler Form inklusive Datum und Uhrzeit aufgezeichnet. Bei einer maximalen Füllstandhöhe werden die an der Basis der Messzylinder angebrachten Magnetventile, welche über einzelne NIVU-MASTER-Kontrolleinheiten gesteuert werden, geöffnet und das angesammelte Wasser über die Ableitung abgeführt. Beim Unterschreiten eines minimalen Füllstandes wird das jeweilige Magnetventil wieder geschlos-

sen und der Messzyklus beginnt von neuem. Die Messwerte werden mit Hilfe einer speziellen Software am Computer vor Ort ausgelesen und gespeichert.

Zur Errechnung der Abflüsse wurden die Zeitreihen der Wasserstände in den Auffangbehältern in einzelne Segmente unterteilt. Anschließend wurde durch lineare Regression der Wasserstände gegen die Zeit die Steigung der einzelnen Segmente berechnet. Diese Steigung wurde mit dem Fassfaktor des jeweiligen Behälters in L/s umgerechnet. Der Abfluss wurde der mittleren Zeit des Segmentes zugeordnet und dazwischen linear auf die Zeiten der Probenahmen interpoliert.



Abbildung 2: Auffangbehälter der vier Abflusskomponenten im Lysimeterhaus. Die Proben zur Analyse werden direkt an den Abflüssen oberhalb der Behälter genommen.

2.1.2 Lysimeteraufbau

Die Lysimeterfläche beträgt 10 m × 10 m (100 m²) und besitzt eine Neigung von ca. 1:7 (8,2 °) (Abbildung 3 und 5). Nach Berücksichtigung der Hangneigung beträgt die auf die Horizontale projizierte Lysimeterfläche 97 m². Der Aufbau des Lysimeters entspricht dem genehmigten Regelaufbau der Deponieoberflächenabdichtung, wie er 2003 auf ca. 1,5 ha der Deponie im Bauabschnitt I realisiert wurde.

In Abbildung 5 ist der Aufbau der Oberflächenabdichtung schematisch dargestellt. Diese besteht von oben nach unten aus folgenden Schichten:

- 1,5 m Rekultivierungsschicht (wurzelfähiger Boden)
- 0,3 m Dränage (oberer Kiesflächenfilter, OKF)
- 0,075 m Asphaltabdichtung (realisiert wurden zwischen 7,5 und 15 cm)
- 0,2 m mineralische Tragschicht
- 0,2 m Kapillarschicht (KS)
- 0,1 m Kapillarbruchschicht (KBS).

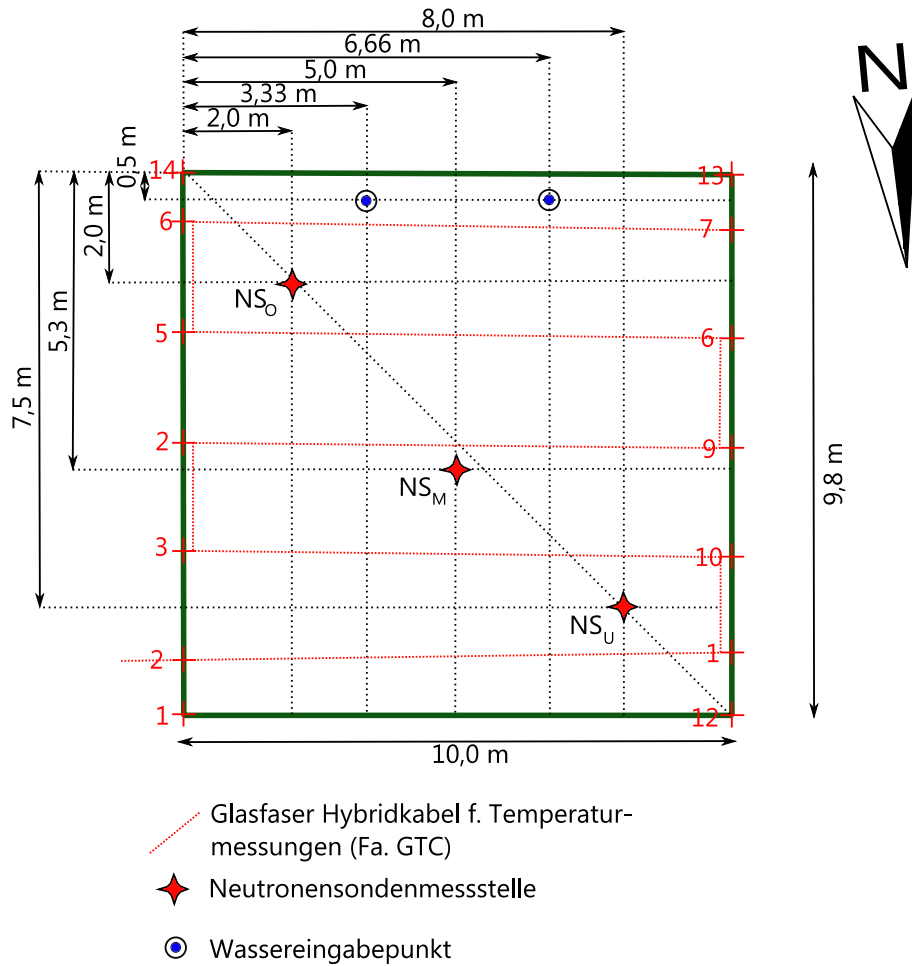


Abbildung 3: Skizze des Lysimeters mit Verlegungsplan eines Glasfaserkabels, Neutronensondenmessstellen und Wassereingabepunkte für mögliche Flutungsversuche.

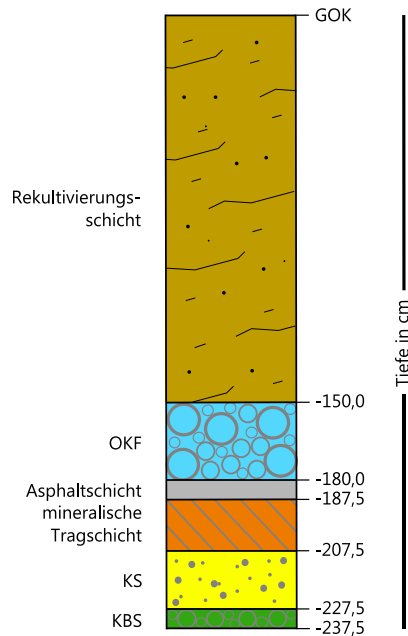


Abbildung 4: Regelaufbau der Abdichtung im Lysimeter.

Lysimeter-Tesfeld Hohberg Neigung 1 : 7 (8,2°)

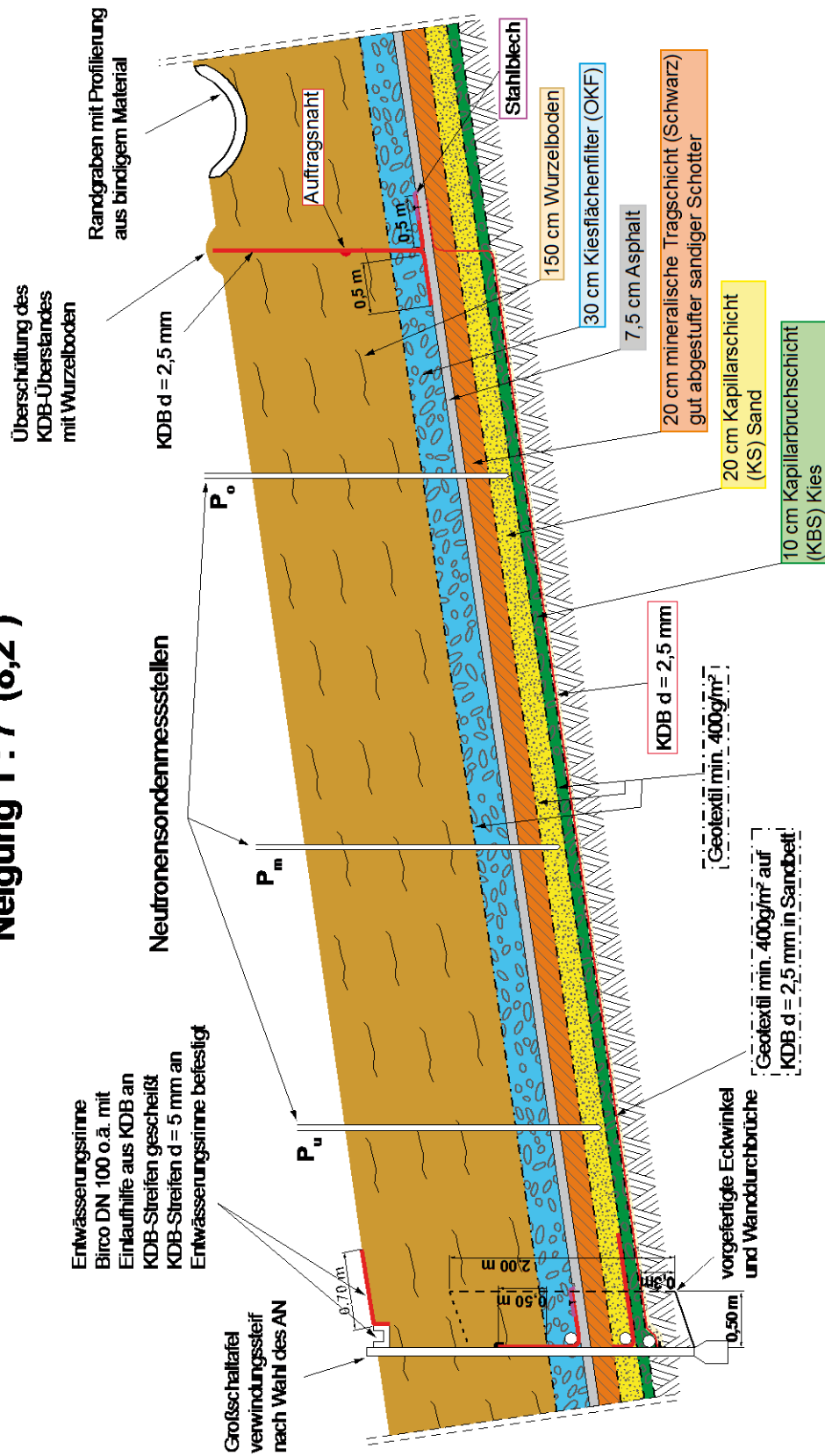


Abbildung 5: Schematischer Querschnitt des Lysimeters mit Neutronsondenmessstellen.

2.1.3 Beschreibung der Abflusskomponenten

Um die Wirksamkeit der Dichtungskomponenten und des Gesamtsystems bewerten zu können, wurden die Abflüsse nach dem in Absatz 2.1.1 beschriebenen Messprinzip einzeln erfasst und dokumentiert.

Die messtechnisch erfassten Abflusskomponenten sind:

- Oberflächenabfluss (Surface flow) (Surf) Q_{Surf}
- Abfluss des oberen Kiesflächenfilters (OKF) Q_{OKF}
- Kapillarschichtabfluss (KS) Q_{KS}
- Abfluss aus der kapillarbrechenden Schicht (KBS) Q_{KBS}

Die **Rekultivierungsschicht** dient dazu, den Großteil des anfallenden Niederschlages abzufangen, für die Vegetation zu speichern und der Evapotranspiration bereit zu stellen. Diese Schicht ist also maßgeblich dafür verantwortlich, wie viel Wasser in der unterliegenden Dränschicht ankommt. Bei sehr trockenen Bedingungen und starken Niederschlägen, wird relativ wenig Niederschlag versickert, sondern überwiegend oberflächlich abgeführt. Ähnlich verhält es sich bei einer Übersättigung des Bodens, wenn also kaum noch Infiltration möglich ist. Die Rekultivierungsschicht ist mit einer dichten Grasdecke bewachsen, was wiederum eine höhere Interzeption (Niederschlagswasser wird von den Blättern abgefangen und direkt verdunstet) und Transpiration begünstigt.

Der **Obere Kiesflächenfilter (OKF)** wirkt als Flächendränage über der Asphaltabdichtungsschicht. Systembedingt führt diese Schicht die größte Menge an Sickerwasser ab.

Die **Kapillarschicht (KS)** bildet die erste erfasste Abflusskomponente unterhalb der Asphaltabdichtungsschicht. Systembedingt sollte sie, bei einer angenommenen absolut dichten Asphaltsschicht, mit der Zeit immer weniger Wasser führen und schließlich, nachdem die mineralische Tragschicht und die KS leergelaufen wären, versiegen. Da durch den als absolut dicht angenommenen Asphalt kein Wasser von oben einsickern kann und die Schichten unterhalb des Asphalttes in einer wasserdichten KDB-Wanne eingebaut wurden, dürfte nach dem Versiegen auch zu einem späteren Zeitpunkt kein Wasser aus der KS abfließen ($Q_{\text{KS}} = 0$).

Die laterale Abflussmenge der **kapillarbrechenden Schicht (KBS)** spiegelt die Gesamtsystemdichtigkeit wider und entspricht der potentiellen Deponiesickerwasserneubildung. Die Analyse der KBS-Abflusswerte 2003 bis 2005 ergab sehr geringe Abflusswerte mit jeweils zunehmenden Tagesabflusshöhen in den Sommer- bis Herbstmonaten. Aufgrund der bautechnisch bedingten Umsetzung des Messcontainers Ende 2005 und der damit verbundenen Verkippung des Messhauses in den Jahren 2006 und 2007 sind fast keine nennenswerten Abflüsse registriert worden, da durch die Versetzung auch der Winkel der Zuflussrohre verstellt wurde. Die entstandene „Mulde“ hat sich (zumindest für den Zufluss der KBS) über einen Zeitraum von ca. 2 Jahren gefüllt und ausgeglichen. Seit dem Sommer 2008 wird wieder Abfluss gemessen, der mengenmäßig im Bereich der Vorjahre (vor Umsetzung des Containers 2005) liegt.

2.2 Niederschlag

Zur Bilanzierung wurde auf die frei verfügbaren Niederschlagsdaten der vom Deutschen Wetterdienst (DWD) betriebenen Station Pforzheim-Ispringen zurückgegriffen. Die Station befindet sich in ca. 1 km Entfernung zum Standort (Abbildung 1).

3 Markierungsversuch

Für das Wasser welches im Lysimeter aus der KS und KBS erfasst wurde gibt es mehrere mögliche Herkunftspfade (Abbildung 6). Zur Aufklärung wurde ein Markierungsversuch mit drei Tracern durchgeführt, um Hinweise auf die Herkunft des Wassers zu erhalten. Aufgegeben wurde der Tracer 1.) flächenhaft auf die Lysimeterfläche, 2.) punkthaft um die Bodenfeuchtemesspunkte und Wassereingabepunkte sowie 3.) in einem Baggerschurf oberhalb des Lysimeters. Nach der Eingabe wurden an den einzelnen Abflusskomponenten mit größer werdenden Zeitintervallen mehrere Monate lang Wasserproben genommen und auf die eingesetzten Tracer hin untersucht.

In jedem Fall ist zu erwarten, dass sich die auf der Lysimeterfläche aufgegebenen Tracer in den Abflüssen aus dem OKF und der Oberfläche nachweisen lassen. Dies ist ein Hinweis für eine erfolgreiche Tracereingabe.

Die obere Stützwand des Lysimeters könnte eine Undichtigkeit aufweisen (a.). In diesem Falle wäre der oberhalb des Lysimeterfeldes im Baggerschurf eingegeben Tracer im Abfluss des OKF nachweisbar. Sofern die Undichtigkeit der oberen Lysimeterstützwand unterhalb der Asphaltschicht liegt und der Tracer außerhalb des Lysimeters durch die Asphaltschicht sickert wäre auch ein positiver Nachweis aus KS und KBS möglich.

Die Durchgangskurven aus der KS und KBS unterhalb der Asphaltschicht könnten Hinweise zu Undichtigkeiten in der Asphaltschicht im Lysimeter selbst liefern. Möglich sind sowohl ein flächenhaftes Durchsickern über die gesamte Fläche der Asphaltschicht im Lysimeter (b.) oder ein Durchsickern entlang von präferentiellen Fließwegen. Diese werden bevorzugt in der Nähe der Messstellen vermutet (c.).

Als weitere, mit dem durchgeführten Tracerversuch nicht nachweisbare, Option kommt aufsteigendes Kondenswasser in Betracht (d.). Dieses könnte entlang eines Temperaturgradienten aus dem Müllkörper durch die KDB der Grundabdichtung im Lysimeter in die KS und KBS gelangen. Es würde auf Risse in der verbauten KDB hindeuten. Das aufliegende Geotextil könnte diesen Effekt durch Kapillarkräfte verstärken und ähnlich einem Kerzendocht Wasser in den Lysimeter saugen.

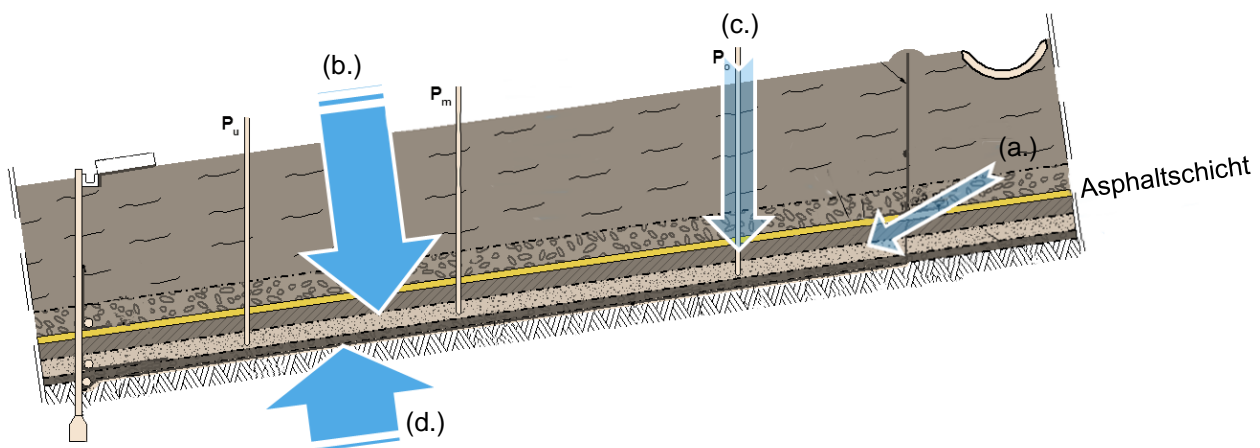


Abbildung 6: Mögliche Herkunft des Wassers unterhalb der Asphaltschicht.

Verwendet wurden die drei Tracer Uranin, Sulforhodamin B und Eosin. Uranin wurde flächenhaft auf dem gesamten Lysimeter verteilt und anschließend künstlich beregnet. Sulforhodamin B wurde im Bereich um die drei Neutronensondenmessstellen und der beiden Wassereingabepunkte aufgegeben. Diese beiden Tracer dienen dazu, mögliche Undichtigkeiten der Asphaltschicht im Lysimeter zu erkennen. Eosin wurde

in einem Baggerschurf oberhalb des Lysimeters eingegeben, um Wassereintritt von Außerhalb des Lysimeters zu erkennen.

3.1 Tracereingabe

Die Eingabe der Tracer fand am 12. Februar 2018 statt. Der zeitliche Verlauf der Eingabe ist in Abbildung 7 dargestellt. Zunächst wurde um 10:15 Uhr mit der Beregnung des Lysimeterfeldes begonnen. Durch eine Beregnung vor der eigentlichen Eingabe der Tracer soll der Porenraum im Boden vorbefeuchtet werden. Dadurch wird die Adsorption der Tracer in immobilen Bereichen der Bodenmatrix verringert und der Widererhalt gesteigert.

Um 10:32 Uhr wurde dann mit der Vorbefeuchtung des Baggerschurfes mit einer Fließrate von 25 L/min begonnen. Das Eosin wurde vor der Eingabe gelöst und um 10:45 Uhr mit einer Gießkanne gleichmäßig über die gesamte Länge des Baggerschurfes verteilt (Abbildung 8). Die Bewässerung lief noch bis 10:48 Uhr weiter. Insgesamt wurden 423 L Wasser in den Graben eingegeben (Abbildung 9).

Zur Eingabe des Sulforhodamin B (SRB) um die Messstellen (Abbildung 10), wurde um diese die oberste Grasschicht entfernt und so Trichter geschaffen, in die die Tracerlösung eingegeben werden konnte (Abbildung 11). Der Tracer (50 g SRB) wurde in 100 L Wasser vorgelöst und die Lösung an allen fünf Punkten eingegeben. Begonnen wurde um 11:06 Uhr. Aufgrund der geringen Versickerungsgeschwindigkeit wurden die Trichter um die Messstellen nachfolgend immer wieder mit Tracerlösung aufgefüllt bis die gesamte Menge verbraucht war. Die Eingabe von SRB endete um 12:05 Uhr.

Um 12:25 Uhr wurde mit der flächenhaften Verteilung des Uranin begonnen. Zuvor wurden die gesamten 50 g Uranin in 2,5 L Wasser vorgelöst. Jeweils ein Drittel dieser Lösung wurde in einer Gießkanne auf 20 L Wasser aufgefüllt und anschließend gleichmäßig auf der Lysimeterfläche verteilt. Um 12:46 Uhr war die Verteilung abgeschlossen.

Um 12:47 Uhr wurde mit der künstlichen Beregnung bis 16:10 Uhr fortgesetzt. Die gesamte zur Beregnung verwendete Wassermenge betrug 3160 L. Die Verteilung der Tracer ist in Abbildung 16 dargestellt.

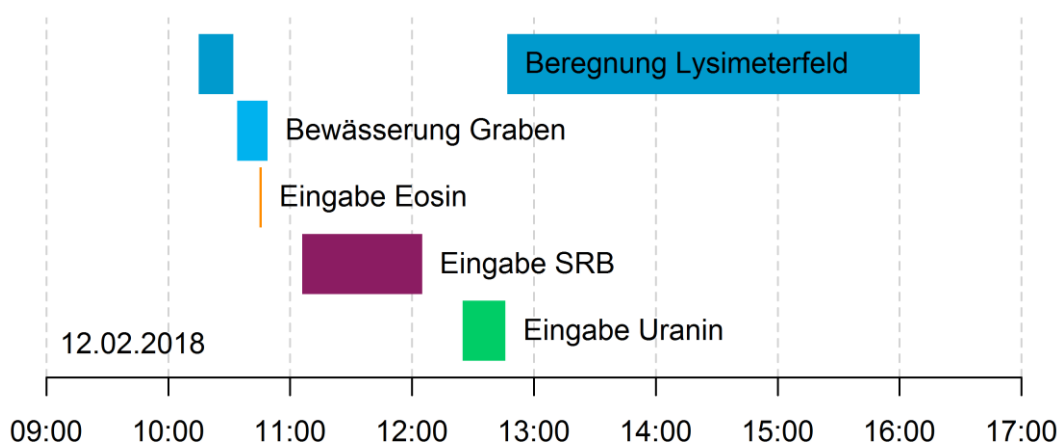


Abbildung 7: Zeitlicher Ablauf der Tracereingabe am 12.02.2018.



Abbildung 8: Eingabe von 50 g Eosin in den Baggerschurf oberhalb des Lysimeterfeldes. Der Graben wurde zuvor mit 270 L Wasser vorbefeuchtet.



Abbildung 9: Eosin im Baggerschurf oberhalb des Lysimeterfeldes nach der Eingabe. Insgesamt wurden zur Eingabe 408 L Wasser in den Graben gefüllt.



Abbildung 10: Lysimeterfeld mit Lage der Neutronensondenmessstellen und Wassereingabepunkte.



Abbildung 11: Eingabe von Sulforhodamin B an WP links.



Abbildung 12: WP links nach Eingabe des Sulforhodamin B.



Abbildung 13: Verteilung von Uranin mit einer Gießkanne auf der Lysimeterfläche.



Abbildung 14: Uranin auf der Lysimeterfläche nach Abschluss der Verteilung.



Abbildung 15: Beregnung des Lysimeterfeldes mit einem Gartensprinkler.

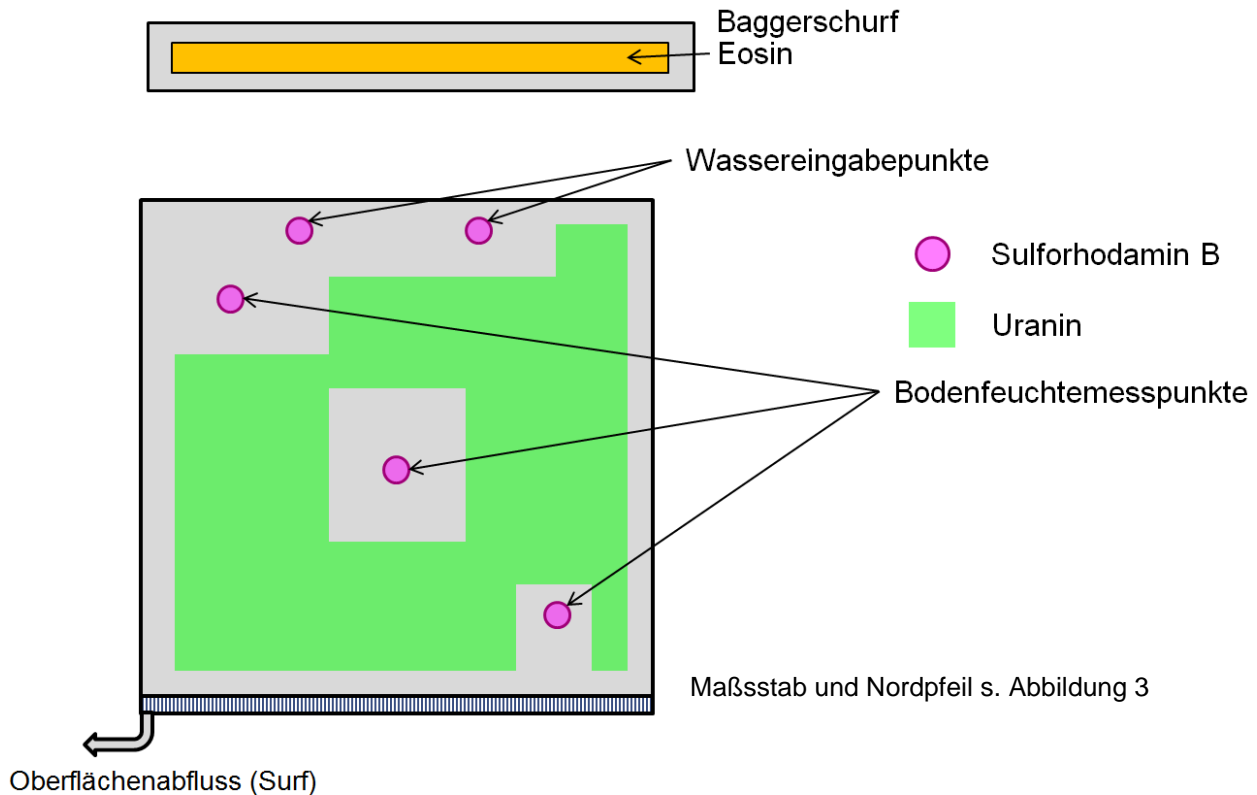


Abbildung 16: Verteilung der Tracer auf der Lysimeteroberfläche und dem Baggerschurf.

3.2 Probennahme

Bei der Probennahme wurden die vier Abflusskomponenten des Lysimeters berücksichtigt. Die Auslaufrohre der einzelnen Schichten wurden im Lysimeterhaus temporär mit Schlauchanschlussnippeln ausgestattet, sodass eine einfache Probennahme möglich war. Am Abfluss des OKF wurde zusätzlich ein Durchflussfluorimeter installiert. Dieses zeichnete kontinuierlich die Uranin und SRB-Konzentrationen auf. Mit der Probennahme wurde bereits während der Eingabe der Tracer begonnen. Der Ersteinsatz der Tracer wurde durch die Probennahme gut erfasst.

Proben wurden in 50 ml Braunglasflaschen abgefüllt und bis zu Analyse in einer Styroporbox unter Lichtausschluss aufbewahrt.

Kurze Zeit nach Beregnungsbeginn war der Oberflächenabfluss deutlich sichtbar grün verfärbt (Abbildung 17). Ein Teil des aufgegebenen Tracers wurde wie erwartet vom Wasser der künstlichen Beregnung mit dem Oberflächenabfluss abgeführt. Zur Bilanzierung und für den Wiedererhalt wurde diese Menge später berücksichtigt.

Aus der KS fand während des gesamten Versuchszeitraumes kein Abfluss statt, sodass aus dieser Schicht keine Proben genommen werden konnten.



Abbildung 17: Deutlich grüne Verfärbung des Oberflächenabflusses bereits kurze Zeit nach der Eingabe. Zeit der Aufnahme ca. 15 Uhr am Tag der Eingabe.



Abbildung 18: Deutlich violette Verfärbung des Abflusses aus dem OKF um 16 Uhr am Tag der Eingabe.



Abbildung 19: Grüne Verfärbung des Oberflächenabfluss und violette Verfärbung des OKF-Abflusses um ca. 17 Uhr am Tag der Eingabe.



Abbildung 20: Orangene Verfärbung des Abflusses aus dem OKF als Mischfarbe von Uranin und Sulforhodamin B um 19 Uhr am Tag der Eingabe.

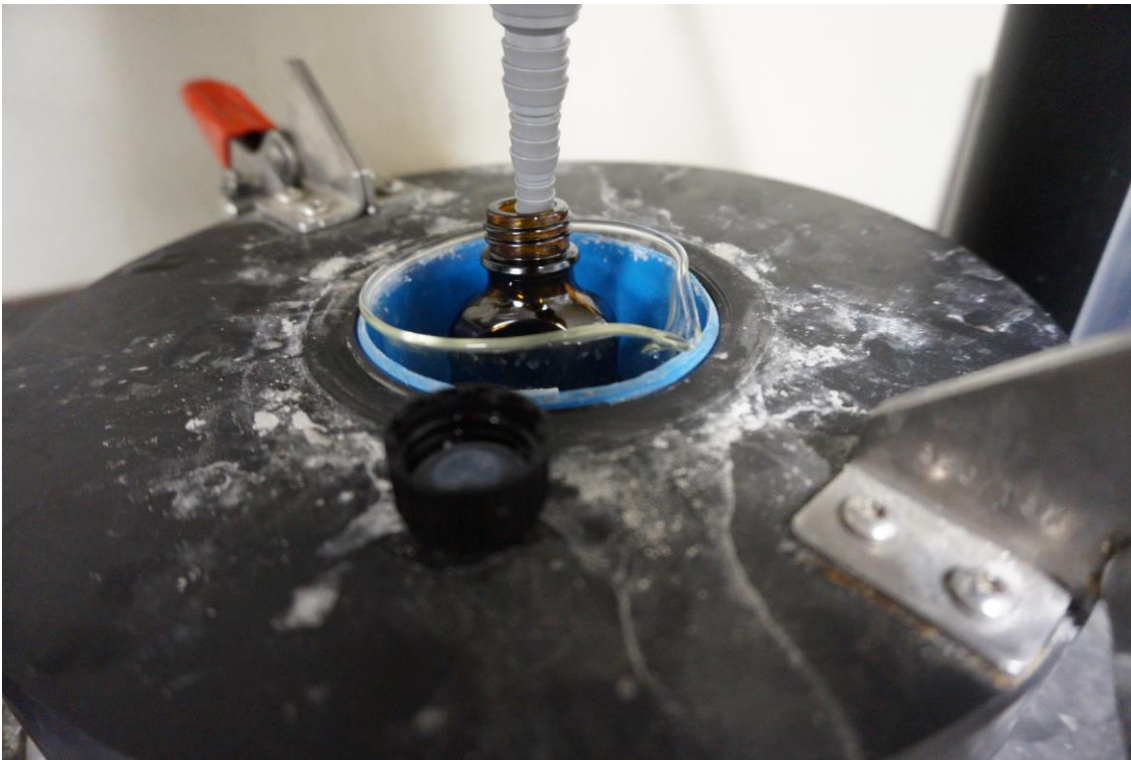


Abbildung 21: Aus der KBS findet nur sehr geringer Abfluss statt. Dieser wird jeweils direkt in einer Braunglasflasche gesammelt und später analysiert.

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Auswertung des Abflussverhaltens

In Abbildung 22 ist der Oberflächenabfluss sowie der Abfluss aus dem OKF dargestellt. Kurze Zeit nach Beginn der künstlichen Beregnung (blauer Balken unten) ist ein starker Anstieg des Oberflächenabflusses zu beobachten. Zusätzlich zur künstlichen Beregnung gefallener Niederschlag hat zu einer zweiten Erhöhung des Oberflächenabflusses geführt. Etwa zwei Stunden nach Beginn der Beregnung steigt auch der Abfluss aus dem OKF stark an. Unter natürlichen Bedingungen kann die vollständige Durchfeuchtung des Bodens mehrere Wochen bis Monate in Anspruch nehmen (Augenstein et al., 2015). Die Niederschlagsereignisse vom 15. bis 17. Februar führen ebenfalls zu einem Oberflächenabfluss. Nach dem Niederschlagsereignis vom 15. Februar ist ein Anstieg des Abflusses aus dem OKF zu beobachten. Bei dem kleineren Niederschlagsereignis zwei Tage später ist dies nicht der Fall. (vgl. Jahresbericht Deponie Hohberg 2018)

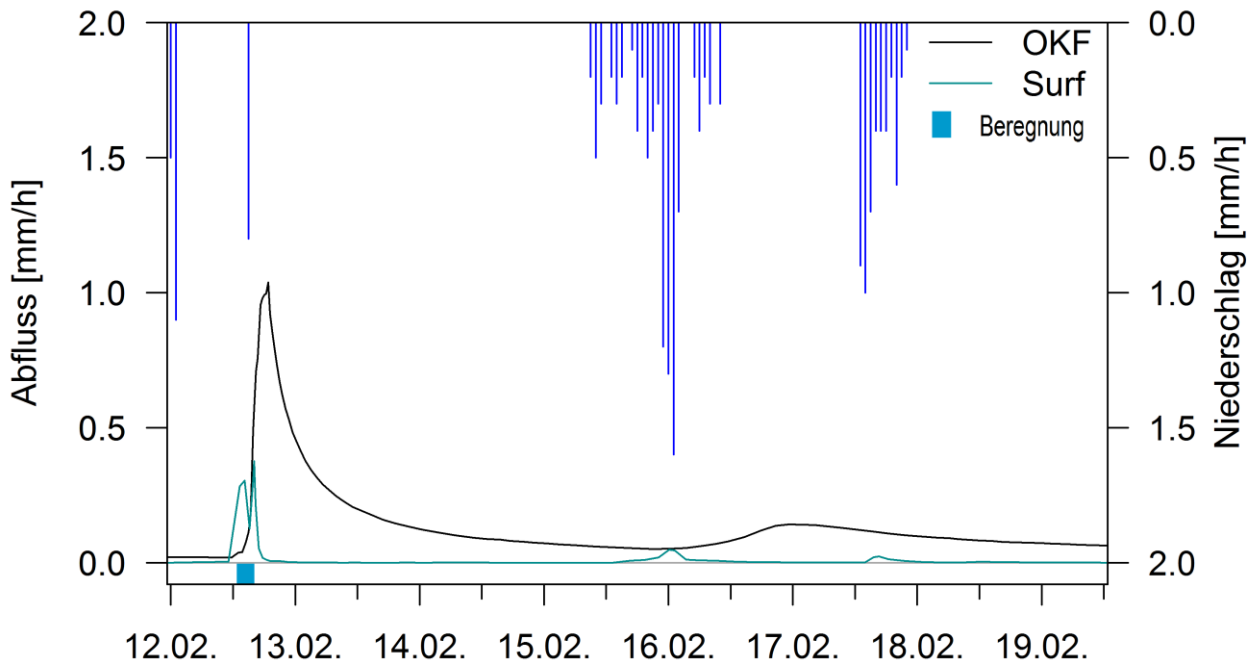


Abbildung 22: Abflüsse an OKF und Oberflächenabfluss (Surf) während und nach der Tracereingabe/Beregnung.

3.3.2 Durchgangskurven Oberflächenabfluss

Wie erwartet wurde ein Teil des flächenhaft aufgegebenen Uranins mit dem Wasser der künstlichen Beregnung im Oberflächenabfluss abgeführt. Die Menge konnte anhand des Abflusses und der gemessenen Konzentrationen quantifiziert werden. Die initial sehr hohe Konzentration an Uranin nahm sehr rasch wieder ab (Abbildung 24). Die anderen beiden Tracer SRB und Eosin konnten in den Proben des Oberflächenabflusses nicht nachgewiesen werden. Der ermittelte Wiedererhalt bis zum 13.02. um 3:00 Uhr betrug 31 mg. Dies entspricht einem Anteil von 0,1% der Eingabemenge. Aufgrund des immer geringer werdenden Oberflächenabflusses fand anschließend kein signifikanter Traceraustrag mit dem Oberflächenabfluss mehr statt.

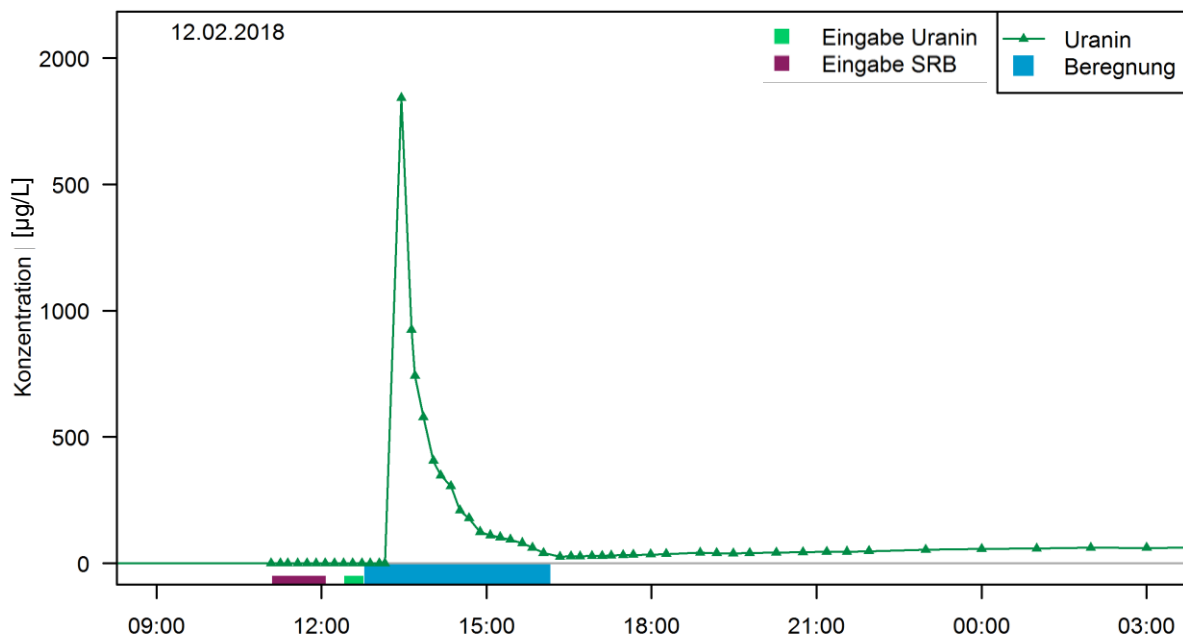


Abbildung 23: Durchgangskurve von Uranin im Oberflächenabfluss.

3.3.3 Durchgangskurven OKF

In Abbildung 24 sind die Durchgangskurven von Uranin und Sulforhodamin B am OKF dargestellt. Kurze Zeit nach Beginn der künstlichen Beregnung ist ein starker Anstieg der SRB-Konzentration zu beobachten. Etwa zwei Stunden später steigt auch die Konzentration von Uranin stark an. Dieses Ergebnis bestätigt die rein qualitative Beobachtung der Verfärbung des Abflusses (vgl. Abbildungen 18 bis 20).

Aufgrund der unterschiedlichen Verteilung der Tracer bei der Eingabe, unterschiedlicher Eingabezeitpunkte und instationärer Abflussbedingungen sind die Zeiten des ersten Tracernachweises nur begrenzt miteinander vergleichbar. Der Ersteinsatz von SRB erfolgte etwa zweieinhalb Stunden nach Beginn der Eingabe. Der Ersteinsatz des Uranins erfolgte etwa drei Stunden nach Beginn der Beregnung. Durch das flächenhafte Aufbringen des Uranins verblieb dieses an der Oberfläche, bis es durch die künstliche Beregnung mobilisiert wurde. Das punkthaft eingegebene SRB versickerte teilweise schon während der Eingabe. Die zeitweise sehr hohe Konzentration an Sulforhodamin B im Abfluss des OKF geht mit einer erhöhten Nachweisgrenze für Eosin einher.

Nur ein geringer Anteil des aufgegebenen Tracers wurde mit dem Abfluss abgeführt und registriert. Ein Teil des Tracers verbleibt auch nach Versuchsende im Lysimeter. Im Vergleich der beiden Eingabemethoden ist bei flächenhafter Verteilung das durchsickerte Bodenvolumen viel größer als bei punkthafter Eingabe. Somit ist auch die Adsorption im Boden größer und der Wiedererhalt des Uranin im Vergleich mit dem Sulforhodamin B geringer.

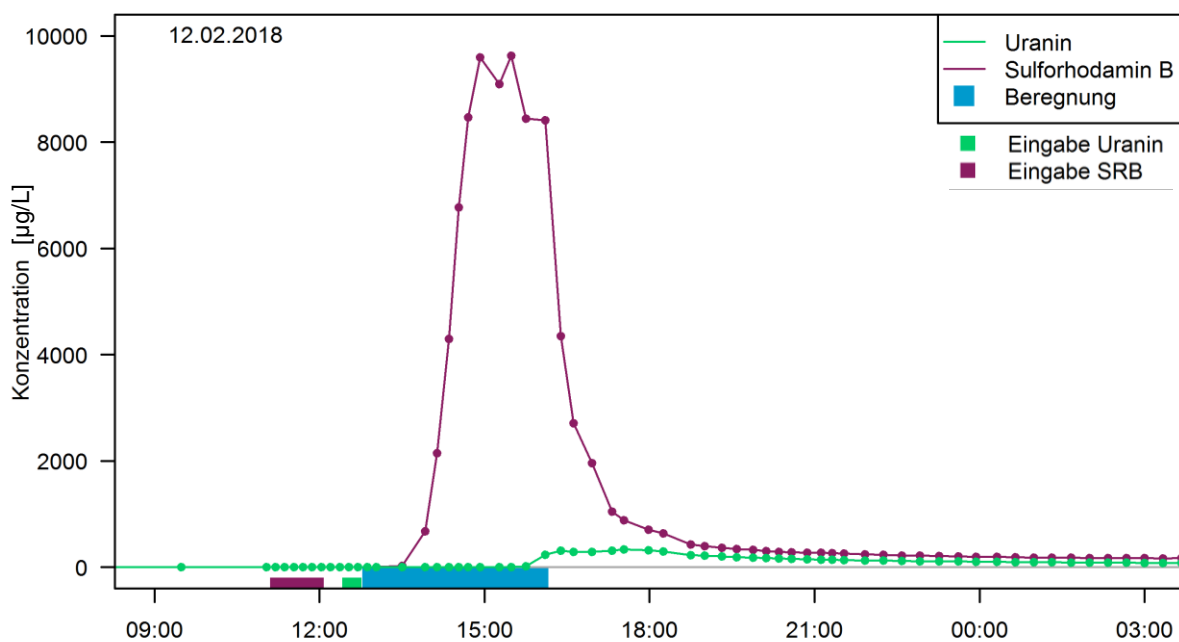


Abbildung 24: Durchgangskurven von Uranin und Sulforhodamin B im OKF

3.3.4 Durchgangskurven KS und KBS

Während der gesamten Versuchszeit konnte trotz zahlreicher Proben aus dem KBS kein Tracer nachgewiesen werden. Es gibt keinen Hinweis auf eine Undichtigkeit der Asphaltdecke. Hohe mittlere Verweilzeiten und geringe Sickerdichten innerhalb der KS und KBS aufgrund der sehr geringen Abflüsse könnten zu einer Verzögerung in der Durchgangskurve führen. Ein zukünftiger positiver Nachweis kann derzeit nicht ausgeschlossen werden. Aus der KS fand im Jahr 2018 kein Abfluss statt.

3.4 Modellierung der Durchgangskurven

Zur Modellierung wurde die Software CXTFIT von Stanmod in der Version 2.07 (Toride and Leij, 1995) verwendet. Die Durchgangskurven von Uranin und Sulforhodamin B am OKF wurde mit einem einfachen Advektions-Dispersions-Modell (ADM) und einem Two-Region-Non-Equilibrium Modell (2RNE) (Toride et al., 1993) angepasst. Die Modellfunktionen sind für den stationären Zustand und unter gesättigten Bedingungen gültig. Diese beiden Voraussetzungen treffen auf den Versuch am Lysimeter nicht zu. Dennoch konnte eine gute Anpassung der Messwerte durch die Modellfunktionen erreicht werden und qualitative Aussagen zum Transport gemacht werden. Unter ungesättigten Bedingungen besteht ein Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Dispersivität (Kanzari et al., 2015). Die Modellfunktion für das ADM ist gegeben durch:

$$c(x, t) = \frac{M}{Q \cdot t_0 \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot P_D \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^3}} \exp \left[-\frac{\left(1 - \frac{t}{t_0}\right)^2}{4 \cdot P_D \cdot \frac{t}{t_0}} \right]$$

Dabei ist M die Masse an Tracer, Q der volumetrische Abfluss und t_0 beschreibt die mittlere Verweilzeit. Der Dispersionsparameter P_D kann aus dem Dispersionskoeffizienten D, dem Abstand x und der mittleren Fließgeschwindigkeit v berechnet werden:

$$P_D = \frac{D}{x \cdot v}$$

Beim 2RNE ist die Modellfunktion der Konzentration in der mobilen Phase (Toride et al., 1993) gegeben durch:

$$\beta \frac{\partial C_1}{\partial T} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 C_1}{\partial Z^2} - \frac{\partial C_1}{\partial Z} - \omega(C_1 - C_2)$$

Das 2RNE geht davon aus, dass der Stofftransport von einem mobilen und einem immobilen Fluidbereich beeinflusst wird, zwischen denen ein Austausch stattfindet, der den Transport verzögert, was zu einem Tailing führt. Bei konservativem Transport benötigt das Modell vier Anpassungsparameter: mittlere Abstandsgeschwindigkeit v und Dispersionskoeffizient D, Verteilungskoeffizient β ($0 < \beta < 1$, hohe Werte stehen für einen hohen Anteil mobilen Wassers), und Transferkoeffizient ω ($\omega > 0$, hohe Werte bedeuten intensiven Austausch). (Goldscheider et al., 2008)

In Abbildung 25 und Abbildung 26 sind die modellierten Durchgangskurven nach dem jeweiligen Modell dargestellt. Die Werte wurden vor der Modellierung mit dem jeweiligen Durchfluss multipliziert, um die Stoffflüsse zu erhalten. Als Zeitpunkt Null wurden die in Abschnitt 3.1 beschriebenen Zeiten verwendet. Für SRB wurde als die Zeit der ersten Eingabe 11:06 Uhr verwendet. Bei Uranin wurde als Zeitpunkt Null der Beginn der künstlichen Beregnung um 12:47 Uhr verwendet, da erst ab diesem Zeitpunkt die Mobilisierung und Versickerung des Tracers begann.

Die Länge der Fließstrecke ist abhängig von der Mächtigkeit der Lysimeterschichten und der Position auf dem Lysimeterfeld. Am unteren Rand des Lysimeters entspricht die Fließstrecke der vertikalen Durchsickerung der Rekultivierungsschicht und dem OKF. Weiter oben kommt noch die laterale Entfernung zum

Abflussrohr hinzu. Für die Berechnungen der maximalen und mittleren Geschwindigkeiten wurde eine mittlere Entfernung von 5 m angenommen.

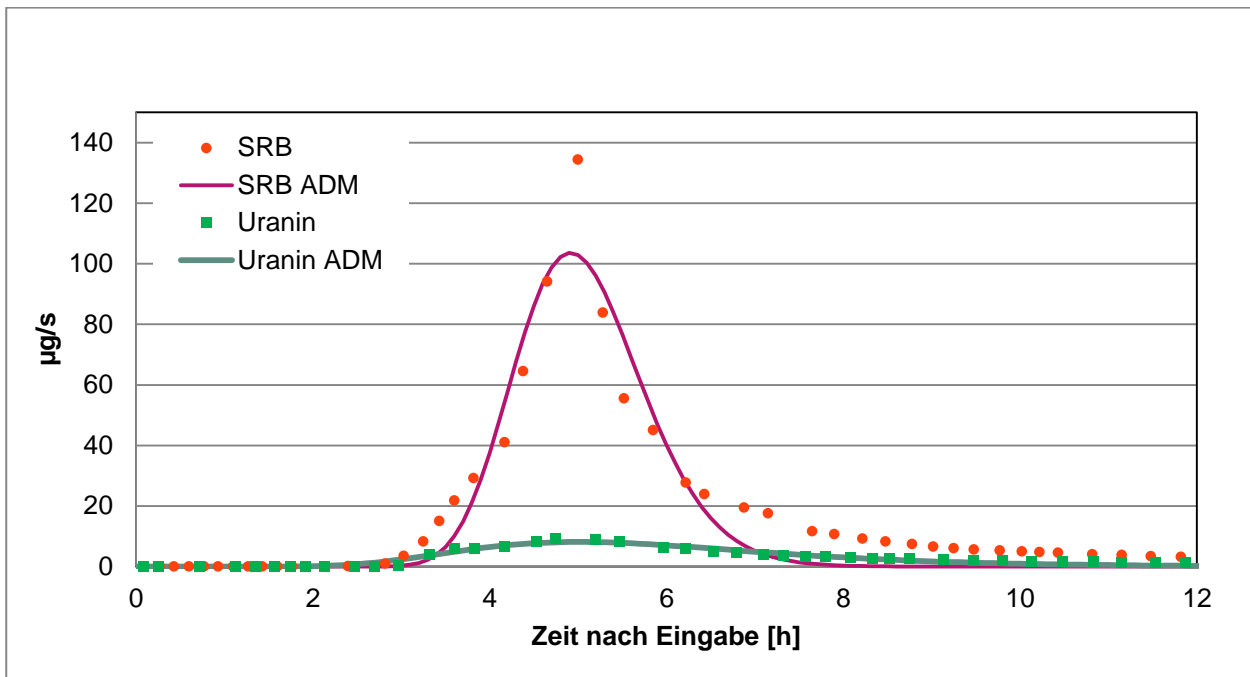


Abbildung 25: Mit dem ADM modellierte Durchgangskurven von Uranin und Sulforhodamin B am OKF

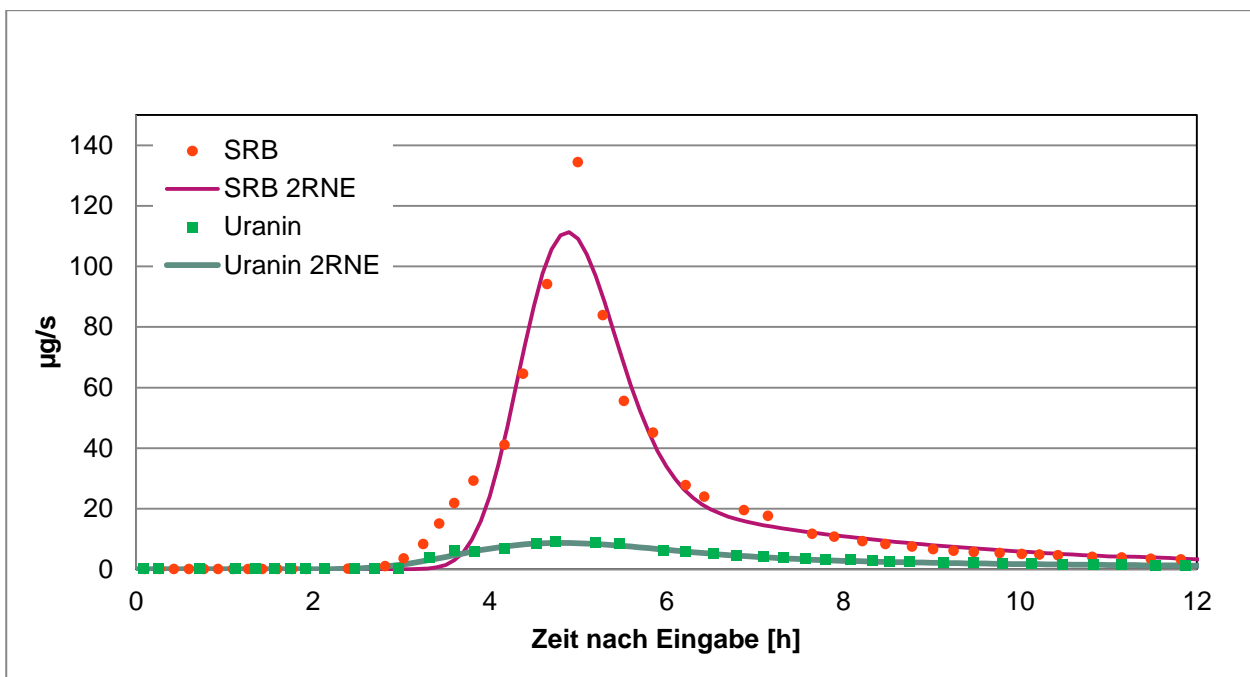


Abbildung 26: Mit dem 2RNE modellierte Durchgangskurven von Uranin und Sulforhodamin B am OKF

Die Ergebnisse der Modellierung sind in Tabelle 1 dargestellt. Alle vier durchgeführten Modellrechnungen bilden die Zeiten der maximalen Konzentrationen der Durchgangskurven nach etwa fünf Stunden sehr gut ab. Dabei werden die Konzentrationen unterschätzt. Die mittleren Abstandsgeschwindigkeiten betragen beim ADM bei 1,0 m/h. Beim 2RNE sind diese etwas geringer mit 0,8 m/h für Sulforhodamin B und 0,6 m/h für Uranin. Die für Uranin im Vergleich mit Sulforhodamin B größeren Dispersionskoeffizienten ist durch die verschiedenen Eingabemethoden zu erklären.

Im Vergleich zum ADM stehen bei der Verwendung des 2RNE mehr Parameter zur Anpassung der Modellkurve an die Messwerte zur Verfügung. Dadurch ist generell eine bessere Anpassung der Modellkurve möglich. Insbesondere wird das Tailing unter Verwendung des 2RNE besser abgebildet.

Die hohen Verteilungskoeffizienten (Uranin 0,80; SRB 0,67) deuten auf einen hohen Anteil an mobilem Wasser hin. Der Transferkoeffizient bei Uranin scheint im Vergleich zum SRB etwas höher. Im vom Uranin durchströmten Bodenvolumen scheint also insgesamt der Anteil an mobilem Wasser geringer zu sein als beim SRB, dafür findet aber ein größerer Austausch zwischen mobilem und immobilem Bereich statt. Der ermittelte Dispersionskoeffizient ist sowohl beim ADM als auch beim 2RNE für Uranin etwa vier bis fünf Mal größer als beim SRB. Dies kann auf die unterschiedlichen Eingabemethoden zurückgeführt werden.

Tabelle 1: Parameter der Modellierung der Durchgangskurven am OKF

Parameter	Symbol	Messung		ADM		2RNE		Einheit
		SRB	Uranin	SRB	Uranin	SRB	Uranin	
Entfernung zur Eingabestelle	L	5	5	5	5	5	5	m
Zeit Ersteinsatz	t_1	2,40	2,97	1,6	0,6	2,40	1,4	h
Zeit Maximum (Peak)	t_p	5,00	4,75	4,9	5,0	4,9	4,8	h
Maximalkonzentration	c_{max}	134,2	9,1	103,6	8,1	111,4	8,6	$\mu\text{g/s}$
maximale Abstandsgeschwindigkeit	v_{max}	2,1	1,7	3,1	8,3	2,1	3,6	m/h
Abstandsgeschwindigkeit Peak	v_p	1,0	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	m/h
mittlere Abstandsgeschwindigkeit	v_m	---	---	0,9	0,3	0,8	0,6	m/h
Wiedererhalt	R	0,94	0,19	---	---	---	---	g
Wiedererhalt	R	1,88	0,37	---	---	---	---	%
Dispersionskoeffizient	D	---	---	0,052	0,238	0,025	0,098	m^2/h
Verteilungskoeffizient	β	---	---	---	---	0,800	0,669	-
Transferkoeffizient	ω	---	---	---	---	0,494	0,681	-
Bestimmtheitskoeffizient	R^2	---	---	0,923	0,937	0,953	0,987	-

4 Fazit

Die Oberflächenabdichtung auf der Deponie Pforzheim Hohberg besteht aus einer Asphaltabdichtung mit unterliegender Kapillarsperre. Zum Nachweis der Dichtigkeit wurde mit dem Bau der Oberflächenabdichtung ein Lysimeterfeld in dieser eingebaut. Nach Leerlaufen der Kapillarsperre sollte, bei der als absolut dicht angenommenen Asphaltenschicht, kein Abfluss mehr aus den Schichten unterhalb der Abdichtung stattfinden.

Dies ist leider nicht der Fall. Der nach Baubeginn initial hohe Abfluss nahm in den Folgejahren stark ab und versiegte in der Folge zeitweise auch vollständig. Nach wenigen Jahren wurde jedoch wieder eine Zunahme des Abflusses beobachtet, der zuletzt einen ausgeprägten Jahresgang mit einem Maximum während der Sommermonate zeigte. Zur Klärung der prinzipiellen Wasserherkunft unterhalb der Asphaltabdichtung wurde daher im Auftrag der LUBW ein Markierungsversuch auf der Lysimeterfläche durchgeführt. Ziel war eine Abgrenzung der Wasserherkunft und eine Bewertung des gesamten Abdichtungssystems.

Der Abfluss kann einerseits durch den Aufbau und die Funktion des Lysimeters selbst bedingt sein. Möglich wären präferentielle Fließwege um die eingebauten Messstellen herum sowie

Randumläufigkeiten und Undichtigkeiten in der Lysimeteereinfassung. Andererseits wäre ein diffuses und flächenhaftes Durchsickern auf der gesamten Asphaltabdichtung möglich.

Eingesetzt wurden die drei Markierungsstoffe Eosin, Uranin und Sulforhodamin B. Eosin wurde in einem Baggerschurf wenige Meter oberhalb des Lysimeters eingegeben, um die Dichtigkeit der oberen Lysimeterstützwand überprüfen zu können. Um die Messstellen herum wurde Sulforhodamin B eingegeben, um die präferentiellen Fließwege zu erfassen, die in diesem Bereich vermutet wurden. Uranin wurde flächenhaft aufgegeben und anschließend künstlich beregnet, um den möglichen diffusen Durchfluss durch die Asphaltabdichtung zu überprüfen. Daraufhin wurden in größer werdenden Zeitschritten Wasserproben der einzelnen Abflusskomponenten genommen und auf die eingesetzten Markierungsstoffe hin untersucht.

Wie erwartet, wurde ein Teil des oberflächlich aufgetragenen Uranin mit dem Wasser der künstlichen Beregnung im Oberflächenabfluss abgeführt und entsprechend erfasst, sowie bei der Bilanzierung berücksichtigt.

Der Durchgang von Uranin und Sulforhodamin B im OKF fand bereits wenige Stunden nach dem Beginn der künstlichen Beregnung und in sehr hoher Konzentration statt. Der Tracer hat die Asphaltabdichtung also sehr schnell und für den Versuch in ausreichend hoher Konzentration erreicht. Diese Durchgangskurve wurde nach einem einfachen Advektions-Dispersions-Modell und einem Two-region-non-equilibrium Modell angepasst. Die Verwendung des 2RNE lieferte dabei, auf Kosten einer höheren Anzahl an Fit-Parametern, die bessere Anpassung. Insgesamt ist der Wiedererhalt der beiden Tracer jedoch sehr gering. Ein Großteil des eingesetzten Tracers verbleibt somit auch nach Versuchsende im Lysimeter. Der oberhalb des Lysimeterfeldes eingegebene Tracer konnte in keiner Wasserprobe positiv nachgewiesen werden. Dies spricht für die Dichtigkeit der oberen Lysimeterstützwand.

Aus den Schichten unterhalb der Asphaltabdichtung konnten aufgrund des geringen Abflusses nur in größeren zeitlichen Abständen Wasserproben genommen werden. Aus der Kapillarschicht fand während des Versuchszeitraumes kein Abfluss statt. Hier konnte keine Probe genommen werden.

Im Abfluss der KBS konnte keiner der drei eingesetzten Tracer positiv nachgewiesen werden. Der fehlende positive Nachweis von Sulforhodamin B spricht dafür, dass keine präferentiellen Fließwege um die Messstellen durch die Asphaltabdichtung hindurch existieren. Der fehlende positive Nachweis von Eosin spricht für die Dichtigkeit der oberen Lysimeterstützwand unterhalb der Asphaltabdichtung.

Der fehlende positive Nachweis von Uranin spricht für die Dichtigkeit der Asphaltabdichtung gegen flächenhaftes Durchsickern. Trotz Erreichen einer sehr hohen Tracerkonzentration direkt oberhalb der Asphaltabdichtung im OKF und zeitlich ausreichend aufgelöster Probenahme, wurden keine Hinweise auf Undichtigkeiten der Asphaltabdichtung gefunden.

Die mögliche Herkunft des Wassers aus aufsteigender und kondensierender Feuchtigkeit kann mit den durchgeführten Versuchen nicht überprüft werden.

Literatur

- Augenstein, M., Goeppert, N., Goldscheider, N., 2015. Characterizing soil water dynamics on steep hillslopes from long-term lysimeter data. *J. Hydrol.* 529, 795–804. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.053>
- Goldscheider, N., Milnes, E., Fries, W., Joppen, M., 2008. Markierungsversuche und Modellierung zur Bewertung der Gefährdung eines Trinkwasserbrunnens. *Grundwasser* 13, 220–230. <https://doi.org/10.1007/s00767-008-0086-5>
- Kanzari, S., Hachicha, M., Bouhlila, R., 2015. Laboratory Method for Estimating Solute Transport Parameters of Unsaturated Soils. *Am. J. Geophys. Geochem. Geosystems* 1, 149–154.
- Käß, W., 2004. Geohydrologische Markierungstechnik.
- Leibundgut, C., Maloszewski, P., Külls, C., 2009. Tracers in hydrology. Wiley-Blackwell, Chichester, UK ; Hoboken, NJ.
- Merk, M., Goeppert, N., Goldscheider, N., 2019. Jahresbericht Deponie Hohberg 2018, Messtechnische Bauwerksüberwachung der Oberflächenabdichtung mittels Lysimeter, Messzeitraum Januar – Dezember 2018 (unveröffentlichter Bericht). KIT, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Abteilung Hydrogeologie.
- Toride, N., Leij, F.J., 1995. The CXTFIT Code for Estimating Transport Parameters from Laboratory or Field Tracer Experiments 131.
- Toride, N., Leij, F.J., van Genuchten, M.T., 1993. A comprehensive set of analytical solutions for nonequilibrium solute transport with first-order decay and zero-order production. *Water Resour. Res.* 29, 2167–2182. <https://doi.org/10.1029/93WR00496>

Anhang

Oberflächenabfluss, Messwerte Uranin

Probe Nr.	Datum	Uhrzeit	Zeit [h]	Konzentration [µg/l]	Wiedererhalt [g]	Wiedererhalt [%]	Schüttung [l/s]	Stofffluss [µg/s]
1	26.01.2018	12:00	-408	0.0	0.000	0.000	0.00000	0.00
2	12.02.2018	11:05	-1.70	0.0	0.000	0.000	0.00009	0.00
3	12.02.2018	11:15	-1.53	0.0	0.000	0.000	0.00046	0.00
4	12.02.2018	11:23	-1.40	0.0	0.000	0.000	0.00094	0.00
5	12.02.2018	11:34	-1.22	0.0	0.000	0.000	0.00161	0.00
6	12.02.2018	11:44	-1.05	0.0	0.000	0.000	0.00221	0.00
7	12.02.2018	11:54	-0.88	0.0	0.000	0.000	0.00281	0.00
8	12.02.2018	12:04	-0.72	0.0	0.000	0.000	0.00342	0.00
9	12.02.2018	12:14	-0.55	0.0	0.000	0.000	0.00402	0.00
10	12.02.2018	12:24	-0.38	0.0	0.000	0.000	0.00463	0.00
11	12.02.2018	12:34	-0.22	0.0	0.000	0.000	0.00523	0.00
12	12.02.2018	12:44	-0.05	0.0	0.000	0.000	0.00584	0.00
13	12.02.2018	12:53	0.10	0.0	0.000	0.000	0.00638	0.00
14	12.02.2018	13:03	0.27	0.1	0.000	0.000	0.00699	0.00
15	12.02.2018	13:09	0.37	0.0	0.000	0.000	0.00735	0.00
16	12.02.2018	13:27	0.67	1841.7	0.008	0.016	0.00795	14.65
17	12.02.2018	13:38	0.85	924.0	0.015	0.031	0.00806	7.45
18	12.02.2018	13:42	0.92	742.8	0.017	0.034	0.00810	6.02
19	12.02.2018	13:51	1.07	578.5	0.020	0.040	0.00819	4.74
20	12.02.2018	14:02	1.25	405.7	0.023	0.045	0.00830	3.37
21	12.02.2018	14:10	1.38	348.2	0.024	0.048	0.00838	2.92
22	12.02.2018	14:21	1.57	305.3	0.026	0.051	0.00798	2.44
23	12.02.2018	14:31	1.73	209.0	0.027	0.054	0.00708	1.48
24	12.02.2018	14:41	1.90	178.0	0.028	0.055	0.00617	1.10
25	12.02.2018	14:53	2.10	124.1	0.028	0.056	0.00509	0.63
26	12.02.2018	15:04	2.28	111.1	0.028	0.057	0.00409	0.45
27	12.02.2018	15:15	2.47	103.0	0.029	0.057	0.00405	0.42
28	12.02.2018	15:26	2.65	93.6	0.029	0.058	0.00539	0.50
29	12.02.2018	15:39	2.87	80.2	0.030	0.059	0.00697	0.56
30	12.02.2018	15:50	3.05	62.2	0.030	0.060	0.00832	0.52
31	12.02.2018	16:02	3.25	40.2	0.030	0.061	0.00985	0.40
32	12.02.2018	16:20	3.55	26.4	0.031	0.061	0.00669	0.18
33	12.02.2018	16:32	3.75	27.8	0.031	0.061	0.00427	0.12
34	12.02.2018	16:42	3.92	27.6	0.031	0.061	0.00245	0.07
35	12.02.2018	16:55	4.13	29.0	0.031	0.061	0.00177	0.05
36	12.02.2018	17:06	4.32	29.7	0.031	0.061	0.00119	0.04
37	12.02.2018	17:16	4.48	30.8	0.031	0.061	0.00097	0.03
38	12.02.2018	17:29	4.70	32.5	0.031	0.061	0.00074	0.02
39	12.02.2018	17:40	4.88	33.2	0.031	0.062	0.00056	0.02
40	12.02.2018	17:59	5.20	35.1	0.031	0.062	0.00042	0.01
41	12.02.2018	18:16	5.48	36.9	0.031	0.062	0.00035	0.01
42	12.02.2018	18:53	6.10	42.3	0.031	0.062	0.00023	0.01
43	12.02.2018	19:11	6.40	39.8	0.031	0.062	0.00018	0.01
44	12.02.2018	19:29	6.70	38.9	0.031	0.062	0.00017	0.01
45	12.02.2018	19:47	7.00	40.5	0.031	0.062	0.00016	0.01
46	12.02.2018	20:16	7.48	42.7	0.031	0.062	0.00016	0.01
47	12.02.2018	20:45	7.97	44.3	0.031	0.062	0.00016	0.01
48	12.02.2018	21:11	8.40	45.5	0.031	0.062	0.00015	0.01
49	12.02.2018	21:33	8.77	46.1	0.031	0.062	0.00013	0.01
50	12.02.2018	21:57	9.17	48.3	0.031	0.062	0.00012	0.01
51	12.02.2018	22:59	10.20	53.2	0.031	0.062	0.00006	0.00
52	13.02.2018	0:00	11.22	57.2	0.031	0.062	0.00006	0.00
53	13.02.2018	1:00	12.22	58.8	0.031	0.062	0.00004	0.00
54	13.02.2018	1:59	13.20	61.5	0.031	0.062	0.00002	0.00
55	13.02.2018	3:00	14.22	61.2	0.031	0.062	0.00001	0.00
56	13.02.2018	4:00	15.22	62.1	0.031	0.062	0.00001	0.00
57	13.02.2018	5:00	16.22	61.6	0.031	0.062	0.00002	0.00
58	16.02.2018	8:55	92.13	43.0	0.034	0.068	0.00021	0.01

OKF, Messwerte Uranin

Probe Nr.	Datum	Uhrzeit	Zeit [h]	Konzentration [µg/l]	Wiedererhalt [g]	Wiedererhalt [%]	Schüttung [l/s]	Stofffluss [µg/s]
1	26.01.2018	0:00	-420	0.0	0.000	0.000	0.00213	0.00
2	02.02.2018	13:50	-238	0.0	0.000	0.000	0.00593	0.00
3	09.02.2018	10:25	-74.3	0.0	0.000	0.000	0.00072	0.00
4	12.02.2018	9:29	-3.30	0.0	0.000	0.000	0.00051	0.00
5	12.02.2018	11:02	-1.75	0.0	0.000	0.000	0.00053	0.00
6	12.02.2018	11:12	-1.58	0.0	0.000	0.000	0.00053	0.00
7	12.02.2018	11:22	-1.42	0.0	0.000	0.000	0.00053	0.00
8	12.02.2018	11:32	-1.25	0.0	0.000	0.000	0.00053	0.00
9	12.02.2018	11:42	-1.08	0.0	0.000	0.000	0.00053	0.00
10	12.02.2018	11:52	-0.92	0.0	0.000	0.000	0.00058	0.00
11	12.02.2018	12:02	-0.75	0.0	0.000	0.000	0.00065	0.00
12	12.02.2018	12:12	-0.58	0.0	0.000	0.000	0.00071	0.00
13	12.02.2018	12:22	-0.42	0.0	0.000	0.000	0.00078	0.00
14	12.02.2018	12:32	-0.25	0.0	0.000	0.000	0.00085	0.00
15	12.02.2018	12:42	-0.08	0.0	0.000	0.000	0.00092	0.00
16	12.02.2018	12:52	0.08	0.0	0.000	0.000	0.00098	0.00
17	12.02.2018	13:02	0.25	0.0	0.000	0.000	0.00104	0.00
18	12.02.2018	13:30	0.72	0.0	0.000	0.000	0.00106	0.00
19	12.02.2018	13:55	1.13	0.0	0.000	0.000	0.00130	0.00
20	12.02.2018	14:08	1.35	0.0	0.000	0.000	0.00160	0.00
21	12.02.2018	14:21	1.57	0.0	0.000	0.000	0.00190	0.00
22	12.02.2018	14:32	1.75	0.0	0.000	0.000	0.00221	0.00
23	12.02.2018	14:42	1.92	0.0	0.000	0.000	0.00257	0.00
24	12.02.2018	14:55	2.13	0.0	0.000	0.000	0.00304	0.00
25	12.02.2018	15:16	2.48	0.0	0.000	0.000	0.00451	0.00
26	12.02.2018	15:29	2.70	0.0	0.000	0.000	0.00670	0.00
27	12.02.2018	15:45	2.97	18.9	0.000	0.000	0.01114	0.21
28	12.02.2018	16:06	3.32	233.2	0.003	0.005	0.01596	3.72
29	12.02.2018	16:23	3.60	310.4	0.008	0.016	0.01926	5.98
30	12.02.2018	16:37	3.83	287.7	0.013	0.026	0.02046	5.89
31	12.02.2018	16:57	4.17	286.9	0.021	0.042	0.02294	6.58
32	12.02.2018	17:19	4.53	308.0	0.031	0.063	0.02653	8.17
33	12.02.2018	17:32	4.75	337.2	0.038	0.076	0.02693	9.08
34	12.02.2018	17:59	5.20	322.5	0.053	0.106	0.02751	8.87
35	12.02.2018	18:15	5.47	296.6	0.061	0.122	0.02761	8.19
36	12.02.2018	18:45	5.97	226.9	0.074	0.148	0.02727	6.19
37	12.02.2018	19:00	6.22	216.3	0.079	0.159	0.02693	5.83
38	12.02.2018	19:19	6.53	199.7	0.085	0.170	0.02486	4.96
39	12.02.2018	19:35	6.80	188.3	0.090	0.179	0.02374	4.47
40	12.02.2018	19:53	7.10	176.6	0.094	0.188	0.02248	3.97
41	12.02.2018	20:07	7.33	168.3	0.097	0.194	0.02156	3.63
42	12.02.2018	20:21	7.57	163.6	0.100	0.200	0.02070	3.39
43	12.02.2018	20:35	7.80	156.5	0.103	0.206	0.01991	3.12
44	12.02.2018	20:52	8.08	150.5	0.106	0.211	0.01904	2.87
45	12.02.2018	21:07	8.33	144.6	0.108	0.216	0.01833	2.65
46	12.02.2018	21:19	8.53	140.3	0.110	0.220	0.01781	2.50
47	12.02.2018	21:32	8.75	135.7	0.112	0.224	0.01725	2.34
48	12.02.2018	21:55	9.13	128.4	0.115	0.230	0.01639	2.10
49	12.02.2018	22:15	9.47	124.7	0.117	0.234	0.01568	1.96
50	12.02.2018	22:35	9.8	118.2	0.119	0.239	0.01506	1.78
51	12.02.2018	22:55	10.1	113.7	0.121	0.243	0.01445	1.64
52	12.02.2018	23:16	10.5	109.7	0.123	0.247	0.01384	1.52
53	12.02.2018	23:37	10.8	106.5	0.125	0.250	0.01327	1.41
54	12.02.2018	23:56	11.2	102.5	0.127	0.253	0.01285	1.32
55	13.02.2018	0:19	11.5	99.3	0.128	0.257	0.01236	1.23
56	13.02.2018	0:39	11.9	96.1	0.130	0.260	0.01197	1.15
57	13.02.2018	0:59	12.2	93.3	0.131	0.262	0.01158	1.08
58	13.02.2018	1:19	12.5	91.7	0.132	0.265	0.01121	1.03
59	13.02.2018	1:40	12.9	90.2	0.134	0.267	0.01083	0.98
60	13.02.2018	2:00	13.2	87.3	0.135	0.270	0.01047	0.91

OKF, Messwerte Uranin (Fortsetzung)

Probe Nr.	Datum	Uhrzeit	Zeit [h]	Konzentration [µg/l]	Wiedererhalt [g]	Wiedererhalt [%]	Schüttung [l/s]	Stofffluss [µg/s]
61	13.02.2018	2:20	13.5	85.5	0.136	0.272	0.01017	0.87
62	13.02.2018	2:40	13.9	83.7	0.137	0.274	0.00988	0.83
63	13.02.2018	3:00	14.2	81.2	0.138	0.276	0.00958	0.78
64	13.02.2018	3:20	14.6	80.0	0.139	0.277	0.00934	0.75
65	13.02.2018	3:40	14.9	78.3	0.140	0.279	0.00910	0.71
66	13.02.2018	4:00	15.2	76.7	0.140	0.281	0.00886	0.68
67	13.02.2018	4:20	15.6	75.4	0.141	0.282	0.00864	0.65
68	13.02.2018	4:40	15.9	74.8	0.142	0.284	0.00843	0.63
69	13.02.2018	5:00	16.2	73.1	0.143	0.285	0.00822	0.60
70	13.02.2018	5:20	16.5	72.2	0.143	0.287	0.00802	0.58
71	13.02.2018	5:40	16.9	71.3	0.144	0.288	0.00787	0.56
72	13.02.2018	6:00	17.2	70.1	0.145	0.289	0.00771	0.54
73	13.02.2018	8:53	20.1	62.1	0.149	0.298	0.00649	0.40
74	13.02.2018	10:26	21.7	59.2	0.151	0.302	0.00596	0.35
75	13.02.2018	16:42	27.9	48.6	0.157	0.313	0.00448	0.22
76	13.02.2018	21:11	32.4	44.9	0.159	0.319	0.00379	0.17
77	14.02.2018	9:31	44.7	36.9	0.164	0.328	0.00264	0.10
78	14.02.2018	14:15	49.5	36.6	0.166	0.331	0.00239	0.09
79	14.02.2018	20:07	55.3	34.3	0.167	0.335	0.00214	0.07
80	15.02.2018	9:40	68.9	29.6	0.170	0.340	0.00168	0.05
81	15.02.2018	18:15	77.5	27.6	0.171	0.343	0.00147	0.04
82	16.02.2018	8:53	92.1	26.2	0.174	0.348	0.00191	0.05
83	18.02.2018	18:40	150	14.9	0.183	0.366	0.00210	0.03
84	21.02.2018	16:51	220	10.8	0.187	0.374	0.00124	0.01
85	23.02.2018	12:56	264	8.7	0.189	0.377	0.00099	0.01
86	27.02.2018	10:28	358	5.4	0.190	0.380	0.00057	0.00
87	02.03.2018	9:40	429	3.7	0.190	0.381	0.00044	0.00
88	07.03.2018	13:42	553	1.8	0.191	0.381	0.00024	0.00
89	13.03.2018	13:46	697	0.9	0.191	0.382	0.00018	0.00
90	21.03.2018	11:00	886	0.7	0.191	0.382	0.00025	0.00
91	29.03.2018	9:24	1077	0.5	0.191	0.382	0.00037	0.00
92	09.04.2018	10:06	1341	0.3	0.191	0.382	0.00028	0.00
93	23.04.2018	13:51	1681	0.2	0.191	0.382	0.00011	0.00
94	07.05.2018	14:00	2017	0.3	0.191	0.382	0.00003	0.00
95	29.05.2018	14:38	2546	0.4	0.191	0.383	0.00001	0.00
96	08.06.2018	10:49	2782	0.2	0.191	0.383	0.00001	0.00
97	06.03.2019	13:59	9289	0.2	0.191	0.383	0.00001	0.00
98	14.03.2019	14:20	9482	0.2	0.191	0.383	0.00001	0.00
99	11.04.2019	10:02	10149	0.2	0.191	0.383	0.00001	0.00

OKF, Messwerte Sulforhodamin B

Probe Nr.	Datum	Uhrzeit	Zeit [h]	Konzentration [µg/l]	Wiedererhalt [g]	Wiedererhalt [%]	Schüttung [l/s]	Stofffluss [µg/s]
1	26.01.2018	0:00	-131	0.0	0.000	0.000	0.00127	0.00
2	02.02.2018	13:50	-237	0.0	0.000	0.000	0.00316	0.00
3	09.02.2018	10:25	-72.68	0.0	0.000	0.000	0.00072	0.00
4	12.02.2018	9:29	-1.62	0.0	0.000	0.000	0.00051	0.00
5	12.02.2018	11:02	-0.07	0.0	0.000	0.000	0.00053	0.00
6	12.02.2018	11:12	0.10	0.0	0.000	0.000	0.00053	0.00
7	12.02.2018	11:22	0.27	0.0	0.000	0.000	0.00053	0.00
8	12.02.2018	11:32	0.43	0.0	0.000	0.000	0.00053	0.00
9	12.02.2018	11:42	0.60	0.0	0.000	0.000	0.00053	0.00
10	12.02.2018	11:52	0.77	0.0	0.000	0.000	0.00058	0.00
11	12.02.2018	12:02	0.93	0.0	0.000	0.000	0.00065	0.00
12	12.02.2018	12:12	1.10	0.0	0.000	0.000	0.00071	0.00
13	12.02.2018	12:22	1.27	0.0	0.000	0.000	0.00078	0.00
14	12.02.2018	12:32	1.43	0.0	0.000	0.000	0.00085	0.00
15	12.02.2018	12:42	1.60	0.0	0.000	0.000	0.00092	0.00
16	12.02.2018	12:52	1.77	0.0	0.000	0.000	0.00098	0.00
17	12.02.2018	13:02	1.93	0.0	0.000	0.000	0.00104	0.00
18	12.02.2018	13:30	2.40	25.3	0.000	0.000	0.00106	0.03
19	12.02.2018	13:55	2.82	673.8	0.001	0.001	0.00130	0.88
20	12.02.2018	14:08	3.03	2142.5	0.002	0.005	0.00160	3.43
21	12.02.2018	14:21	3.25	4292.5	0.007	0.014	0.00190	8.16
22	12.02.2018	14:32	3.43	6770.3	0.015	0.031	0.00221	14.95
23	12.02.2018	14:42	3.60	8467.1	0.027	0.054	0.00257	21.75
24	12.02.2018	14:55	3.82	9595.0	0.048	0.097	0.00304	29.14
25	12.02.2018	15:16	4.17	9090.8	0.101	0.203	0.00451	40.98
26	12.02.2018	15:29	4.38	9625.0	0.150	0.301	0.00670	64.50
27	12.02.2018	15:45	4.65	8441.9	0.247	0.494	0.01114	94.01
28	12.02.2018	16:06	5.00	8414.4	0.416	0.833	0.01596	134.28
29	12.02.2018	16:23	5.28	4353.1	0.542	1.084	0.01926	83.82
30	12.02.2018	16:37	5.52	2711.5	0.603	1.205	0.02046	55.48
31	12.02.2018	16:57	5.85	1959.6	0.667	1.334	0.02294	44.95
32	12.02.2018	17:19	6.22	1042.9	0.719	1.439	0.02653	27.66
33	12.02.2018	17:32	6.43	886.8	0.740	1.479	0.02693	23.88
34	12.02.2018	17:59	6.88	705.4	0.775	1.550	0.02751	19.40
35	12.02.2018	18:15	7.15	634.2	0.793	1.586	0.02761	17.51
36	12.02.2018	18:45	7.65	426.4	0.819	1.638	0.02727	11.63
37	12.02.2018	19:00	7.90	395.3	0.829	1.658	0.02693	10.65
38	12.02.2018	19:19	8.22	368.6	0.840	1.679	0.02486	9.16
39	12.02.2018	19:35	8.48	345.0	0.848	1.696	0.02374	8.19
40	12.02.2018	19:53	8.78	327.7	0.856	1.712	0.02248	7.36
41	12.02.2018	20:07	9.02	302.2	0.862	1.723	0.02156	6.51
42	12.02.2018	20:21	9.25	286.9	0.867	1.734	0.02070	5.94
43	12.02.2018	20:35	9.48	277.9	0.872	1.743	0.01991	5.53
44	12.02.2018	20:52	9.77	274.6	0.877	1.754	0.01904	5.23
45	12.02.2018	21:07	10.02	269.3	0.881	1.763	0.01833	4.94
46	12.02.2018	21:19	10.22	264.4	0.885	1.770	0.01781	4.71
47	12.02.2018	21:32	10.43	260.1	0.888	1.777	0.01725	4.49
48	12.02.2018	21:55	10.82	243.4	0.894	1.788	0.01639	3.99
49	12.02.2018	22:15	11.15	236.8	0.899	1.797	0.01568	3.71
50	12.02.2018	22:35	11.5	220.7	0.903	1.805	0.01506	3.32
51	12.02.2018	22:55	11.8	215.8	0.906	1.813	0.01445	3.12
52	12.02.2018	23:16	12.2	208.5	0.910	1.820	0.01384	2.88
53	12.02.2018	23:37	12.5	203.7	0.914	1.827	0.01327	2.70
54	12.02.2018	23:56	12.8	196.4	0.917	1.833	0.01285	2.52
55	13.02.2018	0:19	13.2	191.6	0.920	1.840	0.01236	2.37
56	13.02.2018	0:39	13.5	183.7	0.923	1.845	0.01197	2.20
57	13.02.2018	0:59	13.9	181.4	0.925	1.850	0.01158	2.10
58	13.02.2018	1:19	14.2	179.8	0.928	1.855	0.01121	2.02
59	13.02.2018	1:40	14.6	180.0	0.930	1.860	0.01083	1.95
60	13.02.2018	2:00	14.9	172.4	0.932	1.864	0.01047	1.81

OKF, Messwerte Sulforhodamin B (Fortsetzung)

Probe Nr.	Datum	Uhrzeit	Zeit [h]	Konzentration [µg/l]	Wiedererhalt [g]	Wiedererhalt [%]	Schüttung [l/s]	Stofffluss [µg/s]
61	13.02.2018	2:20	15.2	172.2	0.934	1.869	0.01017	1.75
62	13.02.2018	2:40	15.6	170.6	0.936	1.873	0.00988	1.69
63	13.02.2018	3:00	15.9	168.6	0.938	1.877	0.00958	1.62
64	13.02.2018	3:20	16.2	167.0	0.940	1.880	0.00934	1.56
65	13.02.2018	3:40	16.6	168.0	0.942	1.884	0.00910	1.53
66	13.02.2018	4:00	16.9	162.5	0.944	1.887	0.00886	1.44
67	13.02.2018	4:20	17.2	157.1	0.945	1.891	0.00864	1.36
68	13.02.2018	4:40	17.6	176.2	0.947	1.894	0.00843	1.49
69	13.02.2018	5:00	17.9	151.8	0.949	1.897	0.00822	1.25
70	13.02.2018	5:20	18.2	150.5	0.950	1.900	0.00802	1.21
71	13.02.2018	5:40	18.6	149.5	0.952	1.903	0.00787	1.18
72	13.02.2018	6:00	18.9	143.9	0.953	1.906	0.00771	1.11
73	13.02.2018	8:53	21.8	126.6	0.962	1.924	0.00649	0.82
74	13.02.2018	10:26	23.3	120.5	0.966	1.932	0.00596	0.72
75	13.02.2018	16:42	29.6	95.0	0.977	1.954	0.00448	0.43
76	13.02.2018	21:11	34.1	88.0	0.983	1.965	0.00379	0.33
77	14.02.2018	9:31	46.4	70.7	0.992	1.984	0.00264	0.19
78	14.02.2018	14:15	51.1	70.5	0.995	1.990	0.00239	0.17
79	14.02.2018	20:07	57.0	64.2	0.998	1.996	0.00214	0.14
80	15.02.2018	9:40	70.6	55.9	1.003	2.006	0.00168	0.09
81	15.02.2018	18:15	79.1	51.2	1.005	2.010	0.00147	0.08
82	16.02.2018	8:53	93.8	39.6	1.010	2.020	0.00191	0.08
83	18.02.2018	18:40	152	19.9	1.023	2.046	0.00210	0.04
84	21.02.2018	16:51	222	17.4	1.029	2.057	0.00124	0.02
85	23.02.2018	12:56	266	16.7	1.031	2.063	0.00099	0.02
86	27.02.2018	10:28	359	16.2	1.035	2.069	0.00057	0.01
87	02.03.2018	9:40	431	17.7	1.036	2.073	0.00044	0.01
88	07.03.2018	13:42	555	13.1	1.038	2.076	0.00024	0.00
89	13.03.2018	13:46	699	11.5	1.039	2.078	0.00018	0.00
90	21.03.2018	11:00	888	7.1	1.041	2.082	0.00025	0.00
91	29.03.2018	9:24	1078	6.0	1.042	2.085	0.00037	0.00
92	09.04.2018	10:06	1343	5.7	1.044	2.088	0.00028	0.00
93	23.04.2018	13:51	1683	5.1	1.045	2.090	0.00011	0.00
94	07.05.2018	14:00	2019	3.7	1.045	2.090	0.00003	0.00
95	29.05.2018	14:38	2548	2.8	1.045	2.090	0.00001	0.00
96	08.06.2018	10:49	2784	1.9	1.045	2.090	0.00001	0.00
97	06.03.2019	13:59	9291	0.5	1.045	2.091	0.00001	0.00
98	14.03.2019	14:20	9483	1.6	1.045	2.091	0.00001	0.00
99	11.04.2019	10:02	10151	1.2	1.045	2.091	0.00001	0.00

KBS, Messwerte Uranin, SRB und Eosin

<NWG: kleiner Nachweisgrenze

Probe Nr.	Datum	Uhrzeit	Uranin [µg/l]	SRB [µg/l]	Eosin [µg/l]
1	26.01.2018	00:00	0.0	0.0	0.0
2	09.02.2018	10:30	0.0	0.0	0.0
3	09.02.2018	09:56	0.0	0.0	0.0
4	12.02.2018	09:58	0.0	0.0	0.0
5	12.02.2018	18:33	0.0	0.0	0.0
6	13.02.2018	04:03	0.0	0.0	0.0
7	13.02.2018	16:47	0.0	0.0	0.0
8	13.02.2018	21:22	0.0	0.0	0.0
9	14.02.2018	09:35	0.0	0.0	0.0
10	14.02.2018	14:21	0.0	0.0	0.0
11	14.02.2018	20:09	0.0	0.0	0.0
12	15.02.2018	09:45	0.0	0.0	0.0
13	15.02.2018	18:18	0.0	0.0	0.0
14	16.02.2018	08:57	0.0	0.0	0.0
15	18.02.2018	19:42	0.0	0.0	0.0
16	21.02.2018	16:57	0.0	0.0	0.0
17	23.02.2018	13:03	0.0	0.0	0.0
18	27.02.2018	10:27	0.0	0.0	0.0
19	02.03.2018	09:34	0.0	0.0	0.0
20	07.03.2018	13:40	0.0	0.0	0.0
21	13.03.2018	13:50	0.0	0.0	0.0
22	21.03.2018	10:58	0.0	0.0	0.0
23	29.03.2018	09:23	0.0	0.0	0.0
24	09.04.2018	10:02	0.0	0.0	0.0
25	23.04.2018	13:49	0.0	0.0	0.0
26	07.05.2018	13:57	0.0	0.0	0.0
27	28.05.2018	14:28	0.0	0.0	0.0
28	06.06.2018	11:25	0.0	0.0	0.0
29	06.06.2018	11:26	0.0	0.0	0.0
30	06.07.2018	15:22	0.0	0.0	0.0
31	09.08.2018	09:55	0.0	0.0	0.0
32	04.09.2018	15:34	0.0	0.0	0.0
33	30.09.2018	15:24	0.0	0.0	0.0
34	20.11.2018	14:14	0.0	0.0	0.0
35	21.12.2018	10:40	0.0	0.0	0.0
36	06.03.2019	13:55	0.0	0.0	0.0
37	14.03.2019	14:50	0.0	0.0	0.0
38	11.04.2019	09:57	0.0	0.0	0.0