

Deponie Pforzheim-Hohberg

Lysimeter-Testfeld

04.12.2019

Zusammenfassender
Gesamtprojektabschlussbericht
der Lysimeteruntersuchungen

2011 - 2018

Bearbeiter: M. Sc. M. Merk, Dr. N. Göppert, Prof. Dr. N. Goldscheider
Abteilung Hydrogeologie, Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)
Erstellt für die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz
Baden-Württemberg (LUBW), 76231 Karlsruhe

Inhalt

Inhalt	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	II
Anhang	II
1 Einführung und Aufgabenstellung	1
2 Lysimeteranlage Deponie Pforzheim-Hohberg	2
2.1 Beschreibung des Lysimeters	4
2.1.1 Messprinzip.....	4
2.1.2 Lysimeteraufbau.....	4
2.1.3 Beschreibung der Abflusskomponenten	6
2.2 Niederschlag	7
2.3 Evapotranspiration	7
3 Berechnungen	8
3.1 Wirkungsgrad der Asphaltschicht.....	8
3.2 Wirkungsgrad des Gesamtsystems	8
4 Messergebnisse 2011 - 2018	8
4.1 Abflussverhalten	8
4.2 Evapotranspiration ET_a	10
4.3 Bodenfeuchte	10
4.4 Wirkungsgrade.....	12
5 Markierungsversuch	13
6 Zusammenfassung für die Jahre 2011 bis 2018	15
Literatur und bisherige Berichte	17
Anhang	18

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Geographische Lage der Hausmülldeponie Pforzheim-Hohberg	3
Abbildung 2: Auffangbehälter der vier Abflusskomponenten im Lysimeterhaus	4
Abbildung 3: Schematischer Querschnitt des Lysimeters mit Neutronensondenmessstellen.	5
Abbildung 4: Skizze des Lysimeters	6
Abbildung 5: Niederschlag Abfluss Surf, OKF, KS und KBS.	9
Abbildung 6: Zeitreihe der jährlichen Niederschläge Evapotranspiration.....	10
Abbildung 7: Zeitreihe der mittleren nutzbaren Feldkapazität	11
Abbildung 8: Zeitreihe der gemessenen Bodenfeuchte	11
Abbildung 9: Zeitreihen der Wirkungsgrade	12
Abbildung 10: Mögliche Herkunft des Wassers unterhalb der Asphaltsschicht.	13
Abbildung 11: Verteilung der Tracer auf der Lysimeteroberfläche und dem Baggerschurf	14
Abbildung 12: : Durchgangskurven.....	15

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Baumaßnahmen und Messungen am Lysimeter.....	2
--	---

Anhang

Anhang 1: Tabellen zur Bodenwasserbilanz.....	18
Anhang 2: Gesamtwirkungsgrad W_{ges} (%) und Niederschlagsmengen (mm) 2003 – 2018	21

1 Einführung und Aufgabenstellung

Bereits im Jahr 1998 wurden Teile der Oberfläche der Deponie Hohberg mit einem alternativen Oberflächenabdichtungssystem versehen. Aufgrund nicht vorhandener Erfahrungen mit dem System aus Asphaltabdichtung und Kapillarsperre wurde im Zuge der Zulassung die Installation eines Großlysimeters gefordert, um den Nachweis der Gleichwertigkeit zu der seinerzeit standardisierten Abdichtung nach TA Siedlungsabfall zu erbringen.

Das Lysimeter als auch die technischen Einrichtungen zur Messung der in den jeweiligen Sperrschichten anfallenden Wassermengen sind vorhanden. Die seinerzeit gewählte Abdichtung mit einer einlagigen Asphaltsschicht ist seit der Novellierung der Deponieverordnung im Jahr 2009 hoch aktuell, da sie als konvektionsdicht gilt und somit den Betrieb eines Kontrollfeldes bis zum Ende der Nachsorgephase erspart. Die Ausführung von Asphaltsschichten in einlagiger Bauweise war bis 2017 noch kein allgemein anerkannter Stand der Technik, macht diese Bauweise aber konkurrenzfähig.

Die bislang positiven Ergebnisse aus dem Betrieb des Lysimeters in Hohberg legen nahe, dass das System den gestellten Anforderungen entspricht. Um die hohe Qualität dieses Dichtungssystems belegen zu können, sollten die Sickerwassermessungen und ggfs. die Messung der Bodenfeuchte der Rekultivierungsschicht (um die Belastung der Dichtungsschicht darstellen zu können und das Verhalten der Bodenschicht auf die sich ändernden Klimabedingungen mit längeren Trockenperioden und Starkregenereignissen zu erkennen) fortgesetzt werden. Dies diene auch dazu, belastbarere Aussagen zur Langzeitsicherheit dieses Dichtungssystems treffen und entsprechende Empfehlungen für die Vollzugsbehörden abgeben zu können.

Eine Übersicht der einzelnen Bauabschnitte und Messungen am Lysimeter ist in Tabelle 1 dargestellt. Nachdem der Betrieb und die Untersuchungen am Lysimeter durch die Stadt Pforzheim nur bis 2010 veranlasst werden konnte, wurde vor dem Hintergrund des allgemeinen wissenschaftlichen Interesses des Verhaltens einlagiger Asphaltsschichten im Jahre 2010 die Messungen und Kontrollen durch die LUBW Landesanstalt für Umwelt beauftragt.

Die Untersuchungen umfassten eine Bauwerksüberwachung des Abdichtungssystems durch kontinuierliche und lückenlose Erfassung aller Abflüsse aus den einzelnen Schichten der Abdichtung. Des Weiteren wurde mittels Neutronensondenmessungen an einzelnen Stichtagen die Bodenfeuchte bestimmt. Jährlich abgeschlossene Messzyklen mit kontinuierlichen Untersuchungen und fortlaufende Auswertungen und Jahresberichte ermöglichen es, belastbare Aussagen über die Wirkungsgrade und eine Bewertung des hier eingesetzten alternativen Oberflächenabdichtungssystems zu gewinnen.

Die erste erfasste Abflusskomponente unterhalb der Asphaltsschicht bildet die Kapillarschicht (KS). Systembedingt sollte sie, bei einer 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 Asphaltes in einer Wanne aus einer wasserdichten Kunststoffdichtungsbahn (KDB) eingebaut wurden, dürfte nach dem Versiegen auch zu keinem späteren Zeitpunkt Wasser aus der KS abfließen. Trotzdem wurde weiterhin ein geringer aber messbarer Abfluss erfasst.

Tabelle 1: Übersicht über die Baumaßnahmen und Messungen am Lysimeter.

Datum	
Sep. bis Dez. 2002	Bau des Lysimeterfeldes
01.02.2003	Beginn des Messbetriebes
01.04.2003	Endgültige Fertigstellung des Lysimeters
04.11.2003	Fertiger Aufbau der Wetterstation
01.12.2003	Ausbaggern des Grabens oberhalb des Lysimeterfeldes
02.12.2003	Randaufschüttung und Erhöhung des Wurzelbodens um 20 cm
26.10.2005	Neuverlegung der Verbindungsrohre zwischen Lysimeterfeld und Messcontainer
22.11.2005	Umsetzen des Messcontainers, aufgrund der planmäßigen Erstellung von Bauabschnitt 2 der Oberflächenabdichtung.
Jul. 2006	Defekt des Datenloggers der Wetterstation in Folge eines Blitzschlags, nach Reparatur von der Stadt Pforzheim betreut
Jul. 2008	Instandsetzung und Wartung der Lysimeteranlage
05.11.2013	Kamerabefahrung der Rohre vom Messcontainer aus
Feb./Mrz. 2015	Tieferlegen des Messcontainers auf vorher erstelltes Fundament, Begrädigung der Zulaufrohre
Dez. 2016 bis Feb. 2017	Ausfall des Datenloggers, Datenaufzeichnung mittels Webcam
16.02.2016	Fortsetzung der Datenaufzeichnung mit neuem Logger
12.02.2018	Eingabe von Markierungsstoffen auf der Lysimeterfläche zur Aufklärung des Abflusses aus der KS und KBS

Um Fragestellungen der Systemwirksamkeit aus den jährlichen Messauswertungen seit 2005 beantworten zu können, wurde von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) zusätzlich ein Markierungsversuch in Auftrag gegeben. Bei einem Markierungsversuch werden künstliche Tracer (üblicherweise Fluoreszenzfarbstoffe) ins Wasser eingegeben, um so die unbekanntes Fließwege des Wassers zu erkunden. Geklärt werden sollte die grundsätzliche Herkunft des Wassers und Hinweise auf die ungefähre Lage und Art der Undichtigkeiten gefunden werden.

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse der vergangenen Jahre (2011-2018) zusammengefasst und durch die im Markierungsversuch zusätzlich gewonnenen Erkenntnisse eine abschließende Bewertung des Abdichtungssystems vorgenommen 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 rekultivierten 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.

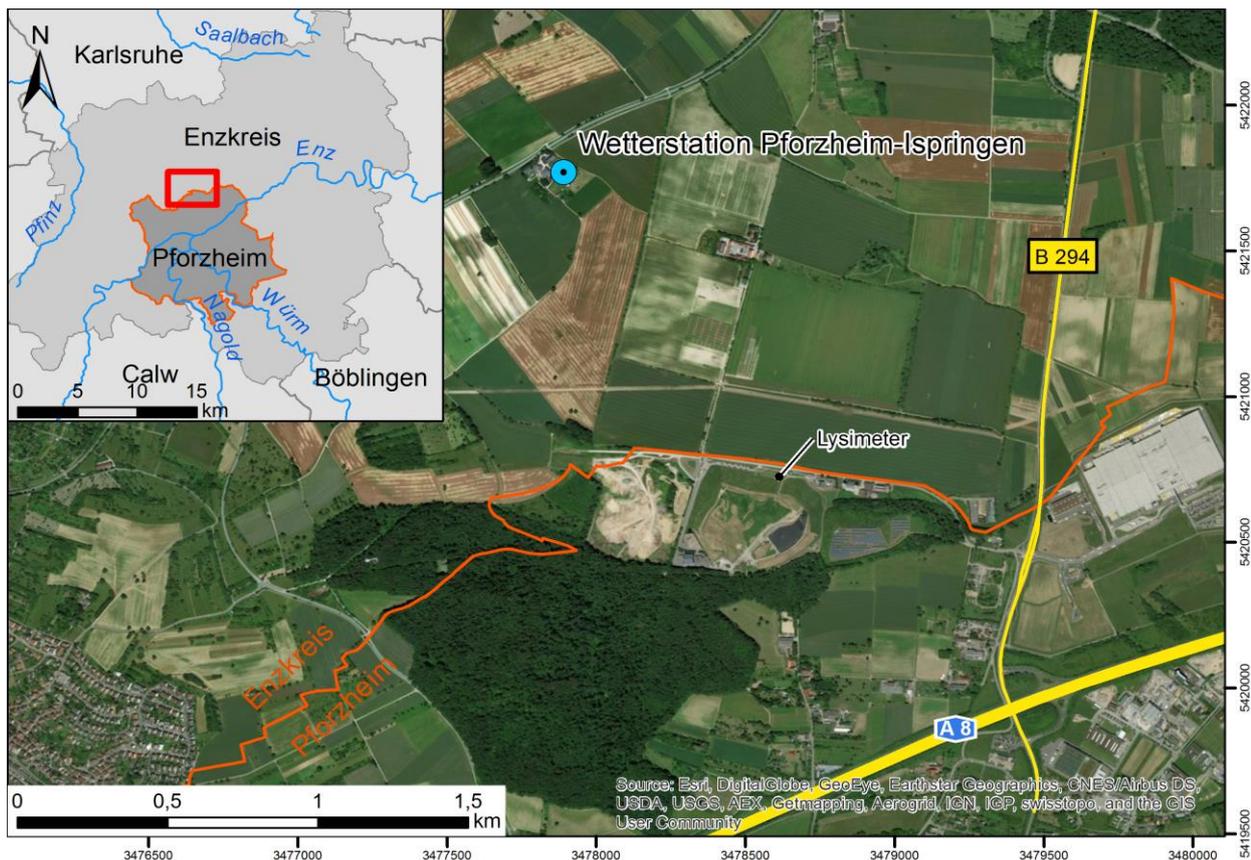


Abbildung 1: Geographische Lage der Hausmülldeponie Pforzheim-Hohberg. Die Grenze des Landkreis Pforzheim ist in der Übersicht dunkelgrau mit oranger Umrandung dargestellt. Der Ausschnitt des Luftbildes ist in der Übersicht rot markiert. (Quellen: WaBoA: Kreisgrenzen, Fließgewässer; ESRI: Luftbild; OSM: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

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 x 4 m, kontinuierlich registriert werden. Für die detaillierte Bestimmung der einzelnen Schichtabflüsse wurde vom ehemaligen Lehrstuhl für Angewandte Geologie Karlsruhe (AGK), heute Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW), Abteilung Hydrogeologie, ein Messsystem entwickelt, das die Firma UGT (Umweltgerätetechnik), Müncheberg, realisierte. Jede Abflusskomponente wird hierbei in einen eigenen Messzylinder 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 Füllstandshöhe 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 geschlossen und der Messzyklus beginnt von neuem. Die Messwerte werden mit Hilfe einer speziellen Software am Computer vor Ort ausgelesen und gespeichert.



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 x 10 m (100 m²) und besitzt eine Neigung von 1:7 (8,2°) (Abbildung 3 und Abbildung 4). Nach Berücksichtigung der Hangneigung beträgt die auf die horizontal 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 3 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).

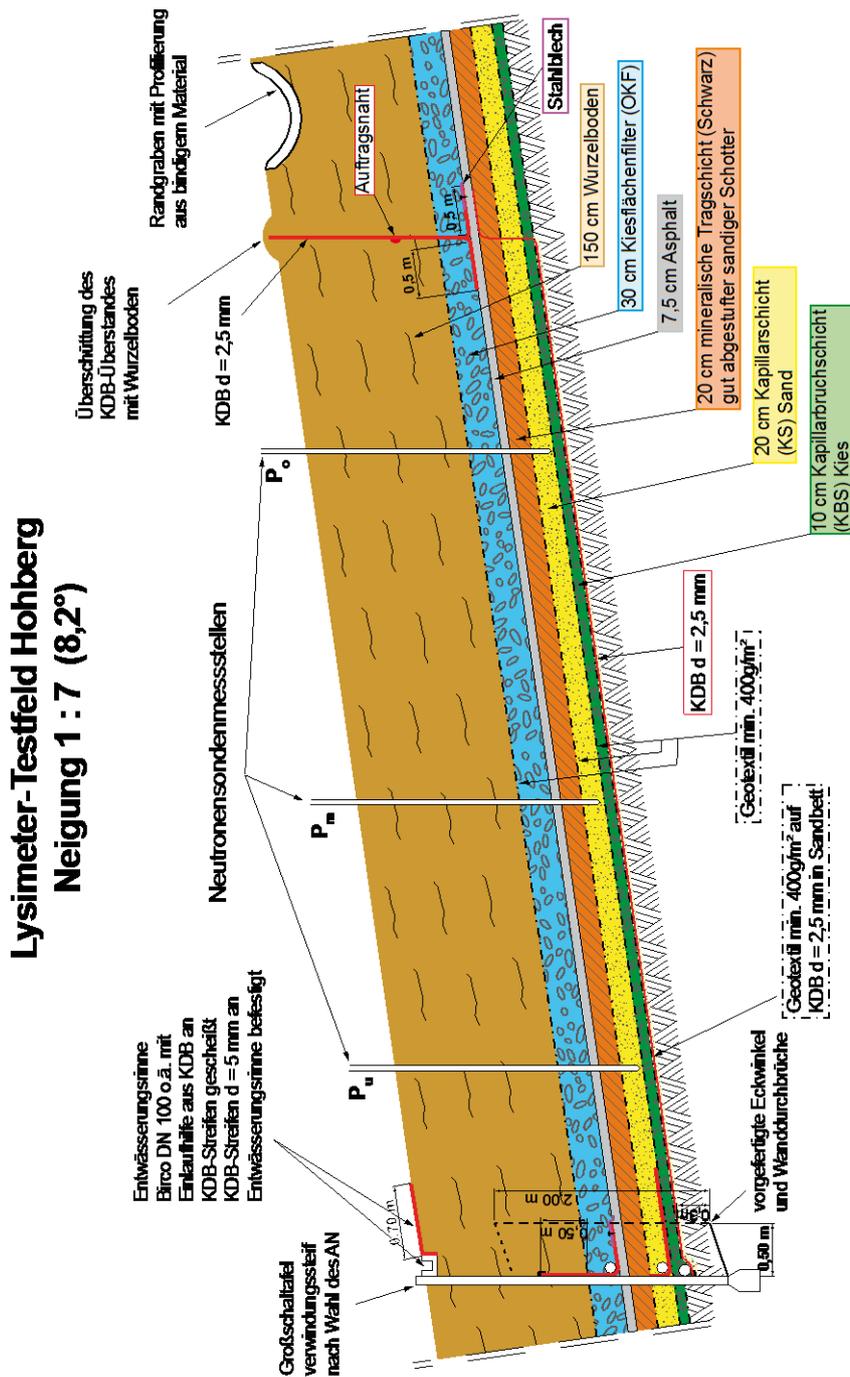


Abbildung 3: Schematischer Querschnitt des Lysimeters mit Neutronensondenmessstellen.

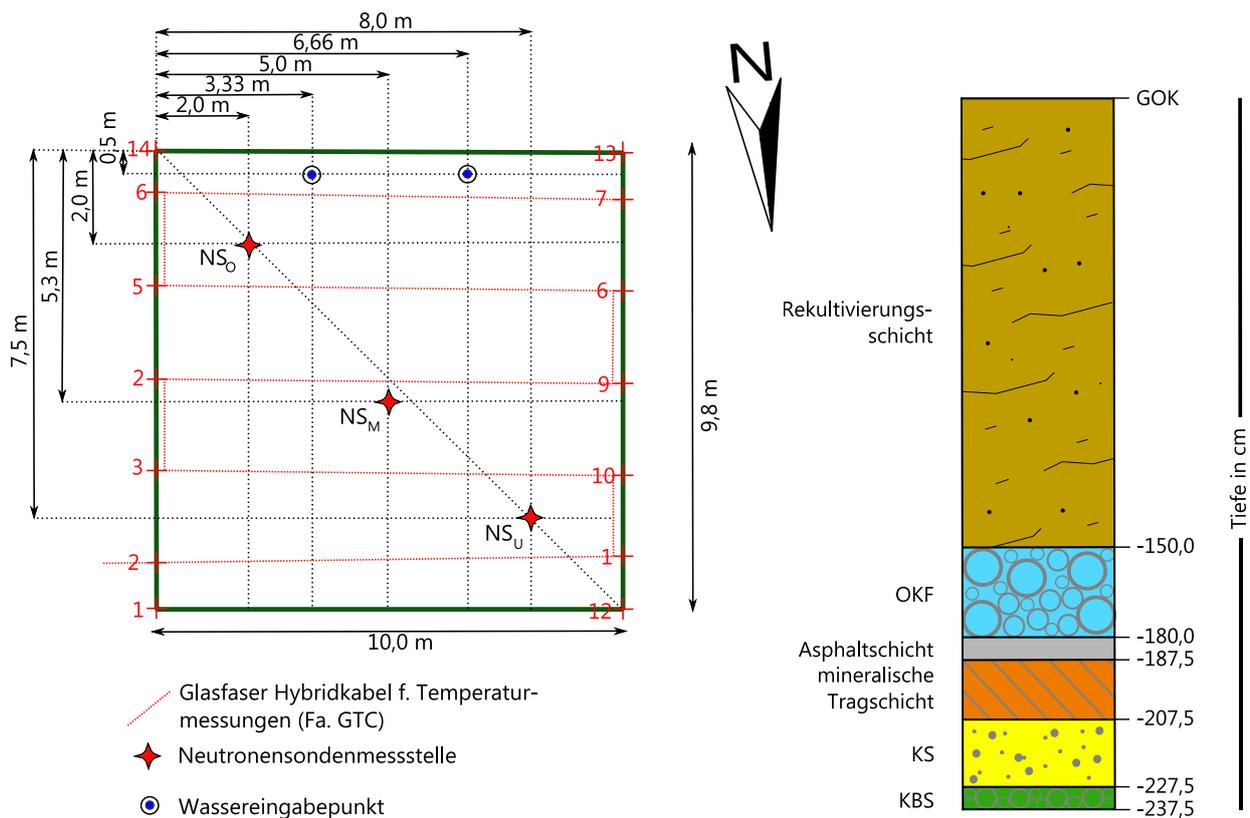


Abbildung 4: Skizze des Lysimeters mit Verlegungsplan eines Glasfaserkabels, Neutronensondenmessstellen und Wassereingabepunkte für mögliche Flutungsversuche.

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 Bewertung der Langzeitdichtigkeit erfolgt auf Grundlage der so gewonnenen Daten.

Die vier zur Bilanzierung herangezogenen 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** übernimmt wasserhaushaltsrelevante Funktionen. Sie speichert einen Großteil des anfallenden Niederschlages in Form von Bodenfeuchte. Das gespeicherte Wasser steht dann der Vegetation zur Evapotranspiration bereit. Diese Schicht ist also maßgeblich dafür verantwortlich, wie viel Wasser in der unterliegenden Dränschicht ankommt. Bei starken Niederschlagsereignissen unter ansonsten trockenen Bedingungen 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. Nach BQS 7-1 (Ad-HOC-AG, 2016) ist die Rekultivierungsschicht immer im Zusammenwirken mit dem Bewuchs zu sehen, der die Oberfläche frühzeitig vor Erosion schützen und langfristig zu einer hohen Evapotranspiration führen soll. Die Rekultivierungsschicht im Testfeld 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 Asphaltichtungsschicht. Damit sollte dieser systembedingt in der Regel die größten Mengen an Sickerwasser abführen. Die Messwerte der bisherigen Untersuchungen bestätigen in vollem Umfang diese Annahme. Der Flächenfilter wurde mit einer Mächtigkeit von 30 cm eingebaut, was sich aus hydraulischer Sicht als gut dimensioniert erwiesen hat.

Die **Kapillarschicht (KS)** bildet die erste erfasste Abflusskomponente unterhalb der Asphaltichtungsschicht. Systembedingt sollte sie, bei einer angenommenen absolut dichten Asphalttschicht, mit der Zeit immer weniger Wasser führen und schließlich, nachdem die mineralische Tragschicht und die KS leergelaufen wären, versiegen ($Q_{KS} = 0$).

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

Nach dem Bau des Lysimeters wurde in dessen unmittelbarer Nähe eine Wetterstation errichtet. Diese wurde 2006 durch Blitzschlag beschädigt und anschließend an die Reparatur von der Stadt Pforzheim betrieben. Ab 2011 wurde zur Bilanzierung 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).

Für die Bilanz kamen im Februar 2018 noch 31,6 mm durch die künstliche Beregnung während des durchgeführten Markierungsversuches auf dem Lysimeterfeld hinzu.

2.3 Evapotranspiration

Die aktuelle Evapotranspiration (ET_a) ist die Summe der Verdunstungsgrößen Interzeption, Bodenverdunstung (Evaporation) und Pflanzenverdunstung (Transpiration) (DIN 4049, 1994). Diese kann unter Berücksichtigung der im Boden zurückbleibenden Bilanzierungsgröße Bodenfeuchteregime ($\pm\Delta S$) berechnet werden:

$$ET_a = N - Q_{ges} - \Delta S, \quad (1)$$

wobei Q_{ges} die Summe der vier am Lysimeter gemessenen Teilabflüsse ist.

Das Bodenfeuchteregime wurde für den Auftraggeber nur für die Beobachtungsjahre 2003 bis 2005 durch Neutronensondenmessungen bestimmt, jedoch für die Jahre 2006 - 2010 nicht in Auftrag gegeben. In den Jahren von 2011 bis 2018 fanden vereinzelt Stichtagsmessungen der Bodenfeuchte statt. Diese

wurden aufgrund der zu geringen zeitlichen Auflösung nicht zur Ermittlung der monatlichen Speicheränderung und der monatlichen Bilanz berücksichtigt.

3 Berechnungen

3.1 Wirkungsgrad der Asphalttschicht

Für den Wirkungsgrad der Asphalttschicht gilt:

$$W_{Asphalt} = \frac{(N - Q_{KS} - Q_{KBS})}{N} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

Da für die Berechnung des Wirkungsgrades der Asphalttschicht sowohl die Abflüsse der KS als auch der KBS einfließen, fällt der Wirkungsgrad generell schlechter aus, als der Wirkungsgrad des Gesamtsystems, zu dessen Berechnung nur der Abfluss der KBS einfließt.

3.2 Wirkungsgrad des Gesamtsystems

Über die Berechnung des monatlichen und jährlichen Gesamtwirkungsgrades des alternativen Oberflächenabdichtungssystems kann eine Bewertung der Langzeitentwicklung der Gesamtdichtigkeit durchgeführt werden.

Da das Abflussverhalten der kapillarbrechenden Schicht (KBS) die Gesamtdichtigkeit des Systems widerspiegelt, wird diese Komponente üblicherweise zur Berechnung des Wirkungsgrades des Abdichtungssystems herangezogen. Damit gilt für den Gesamtwirkungsgrad W_{ges} :

$$W_{ges} = \frac{(N - Q_{KBS})}{N} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

4 Messergebnisse 2011 - 2018

4.1 Abflussverhalten

Abbildung 5 zeigt die Niederschlagsverteilung und die Abflüsse der einzelnen Schichten für den Zeitraum 2003 – 2018 als Monatssummen. Durch die Baumaßnahmen am Messhaus im Jahr 2015 weisen die Abflüsse an Surf und OKF Messlücken auf.

Niederschlagsreich waren vor allem die Jahre 2009, 2010 und 2013. Niederschlagsarm waren neben dem Jahr 2003 die Jahre 2015 und 2018 (vgl. Abbildung 6). Die Menge des Oberflächenabfluss korreliert mit der Menge des gefallen Niederschlags. Starke Niederschläge und längere niederschlagsreiche Zeiten führen zu erhöhtem Oberflächenabfluss. Bei Starkregen ist die Sickereschwindigkeit kleiner als die mit dem Regen zugeführte Wassermenge und es kommt zu Oberflächenabfluss. Erhöhte Wassersättigung durch länger anhaltenden Regen kann die Sickereschwindigkeit reduzieren und ebenfalls zu Oberflächenabfluss führen.

Der Abfluss aus dem OKF zeigt einen ausgeprägten Jahrgang. Abflussreich sind besonders die Wintermonate, während der Abfluss in den Sommermonaten zeitweise vollständig versiegen kann. Monatswerte für die Evapotranspiration stehen aufgrund nicht ausreichender Bodenfeuchtemessungen nicht zur

Verfügung. Modellrechnungen haben aber gezeigt, dass die reale Evapotranspiration in den Sommermonaten ihr Maximum erreicht.

Aus Kapillarschicht und Kapillarbruchschticht fand ein, wenngleich sehr geringer, Abfluss statt. Aus der KS fand in den Jahren 2017 und 2018 kein messbarer Abfluss statt. Der Abfluss der KBS zeigt in den Jahren seit 2016 einen ausgeprägten Jahresgang. Der Hauptabfluss findet demnach in den Sommermonaten etwa ein halbes Jahr zeitversetzt zum Hauptabfluss aus dem OKF statt.

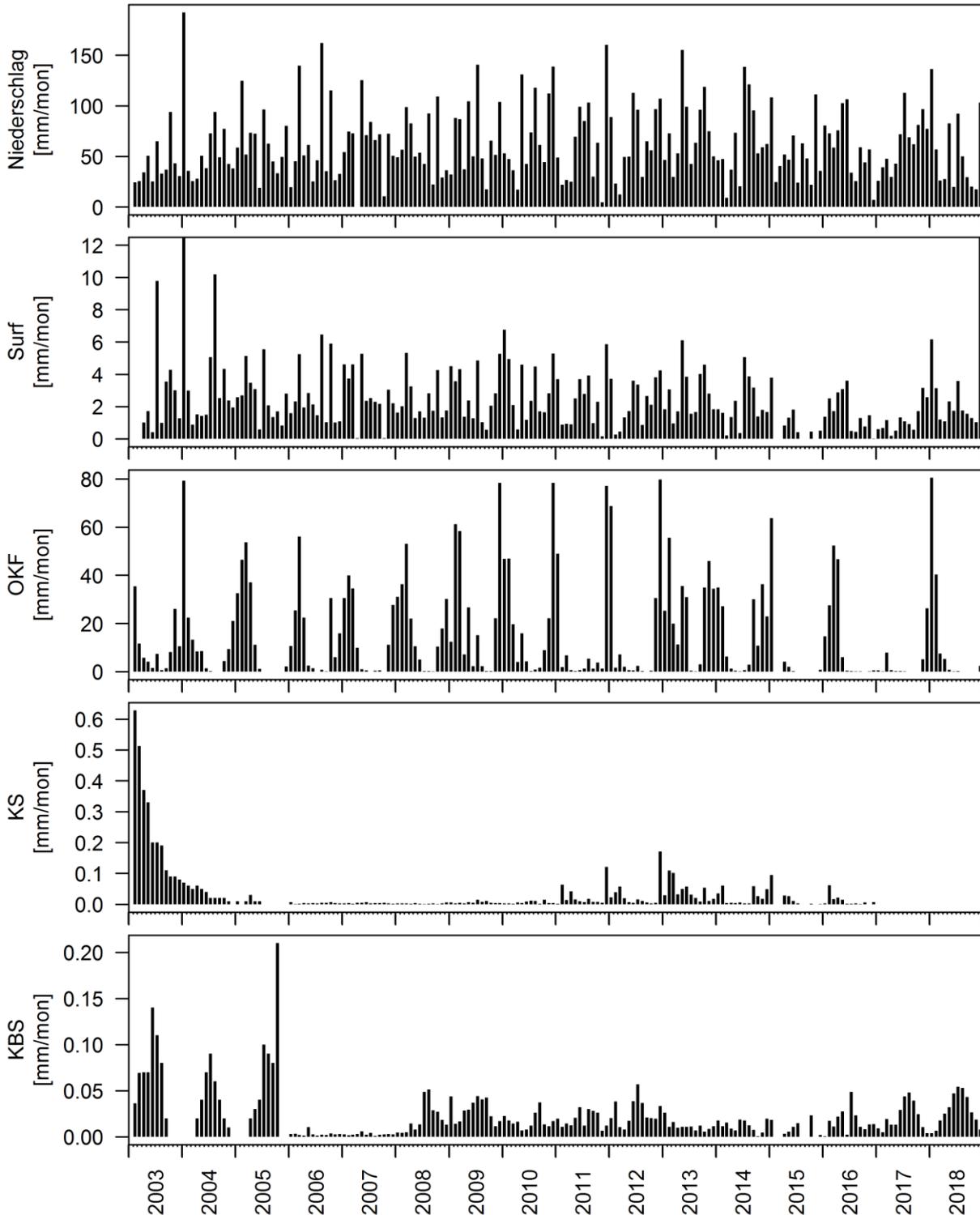


Abbildung 5: Zur Bilanzierung verwendete monatliche Niederschläge sowie ermittelte Monatswerte der Abflüsse der Oberfläche (Surf), aus dem OKF, KS und KBS.

4.2 Evapotranspiration ET_a

In Abbildung 6 sind die jährlichen Niederschläge sowie die aus der Bilanz errechneten jährlichen Evapotranspirationswerte dargestellt. Die über die Jahreswechsel hinweg gespeicherte Bodenfeuchtigkeit, insbesondere die jährliche Speicheränderung, wurde bei der Bilanzierung der Jahre 2011 bis 2018 nicht berücksichtigt.

Zu Beginn der Messreihe im Jahr 2003 sind der geringe Niederschlag von 462 mm und die Evapotranspiration von 370 mm zu erkennen. In den nachfolgenden Jahren fiel mehr Niederschlag. Während der Niederschlag in den Jahren 2004 bis 2018 $761 \text{ mm} \pm 67 \text{ mm}$ betrug, schwankte die Evapotranspiration mit $553 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$ deutlich weniger.

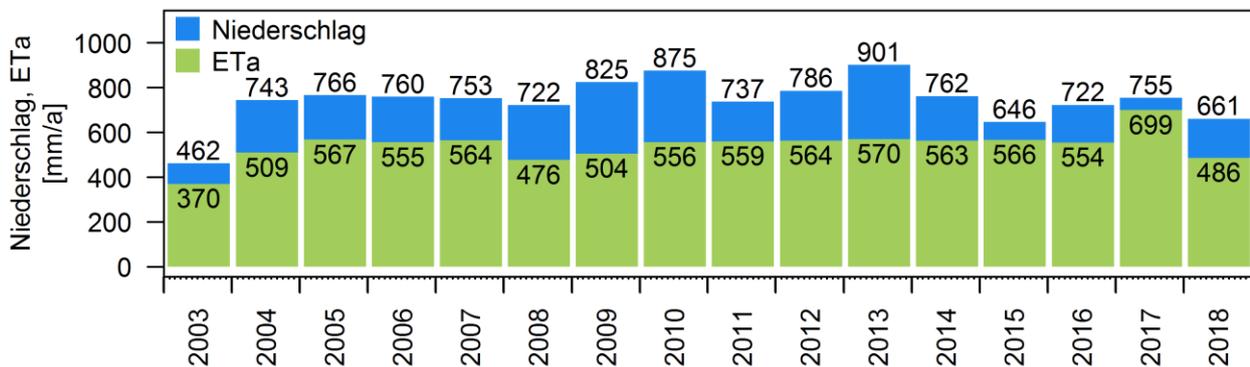


Abbildung 6: Zeitreihe der jährlichen Niederschläge und der Jahreswerte der Evapotranspiration.

4.3 Bodenfeuchte

In Abbildung 7 ist die nutzbare Feldkapazität (nFK) an der Wetterstation Pforzheim-Ispringen dargestellt (DWD Climate Data Center, 2019). Die Werte wurden anhand vorhandener Wetterdaten und dem Modell AMBAV (Löpmeier, 2014) berechnet und vom Deutschen Wetterdienst als Tagesdaten veröffentlicht. Bei einer nutzbaren Feldkapazität von über 100% ist der Boden übersättigt und es findet im Modell ein Abfluss statt, da das Wasser nicht mehr durch die Kapillarkraft gegen die Gravitationskraft gehalten werden kann. Die über die Tiefe gemittelten Werte zeigen im dargestellten Zeitraum eine Abnahme der Minimalwerte der nutzbaren Feldkapazität. Gleichzeitig ist eine Zunahme der Austrocknungstiefe im Boden erkennbar.

Die zum Jahreswechsel 2011/12 nur kurzzeitige Überschreitung der nutzbaren Feldkapazität von 100% ist auch am Abfluss des OKF durch einen verkürzten Abflusszeitraum sichtbar. Zum Jahreswechsel 2016/17 wird die nutzbare Feldkapazität von 100% nur geringfügig überschritten. Der Abfluss aus dem OKF in diesem Zeitraum ist sehr gering.

In Abbildung 8 ist die Bodenfeuchte in einigen ausgewählten Tiefen dargestellt. Die Bodenfeuchte in der Rekultivierungsschicht unterliegt einem ausgeprägten Jahresverlauf ähnlich dem der nutzbaren Feldkapazität (Abbildung 7). Allerdings in geringerer zeitlicher Auflösung. Die dargestellten Messwerte in 160 cm und 170 cm Tiefe entsprechen der Bodenfeuchte im OKF. Aufgrund der höheren Durchlässigkeit und der Abführung des Wassers sind die gemessenen Bodenfeuchtegehalte geringer. Die dargestellten Messwerte in 210 cm Tiefe entsprechen der Bodenfeuchte der KS unterhalb der Asphaltsschicht. Sie sind konstant niedrig.

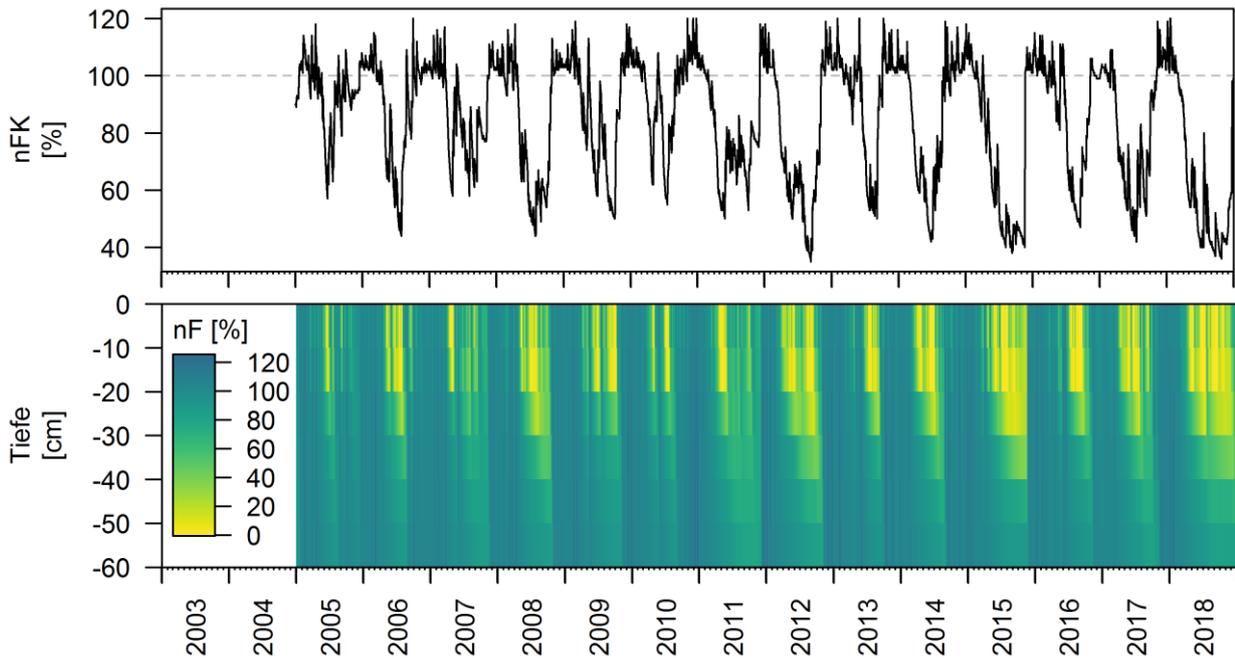


Abbildung 7: Zeitreihe der mittleren nutzbaren Feldkapazität an der Station Pforzheim-Ispringen bis in 60 cm Bodentiefe (oben) und der Verlauf mit der Tiefe (unten). Bei einer nutzbaren Feldkapazität von über 100% findet Abfluss statt. Datenquelle: DWD.

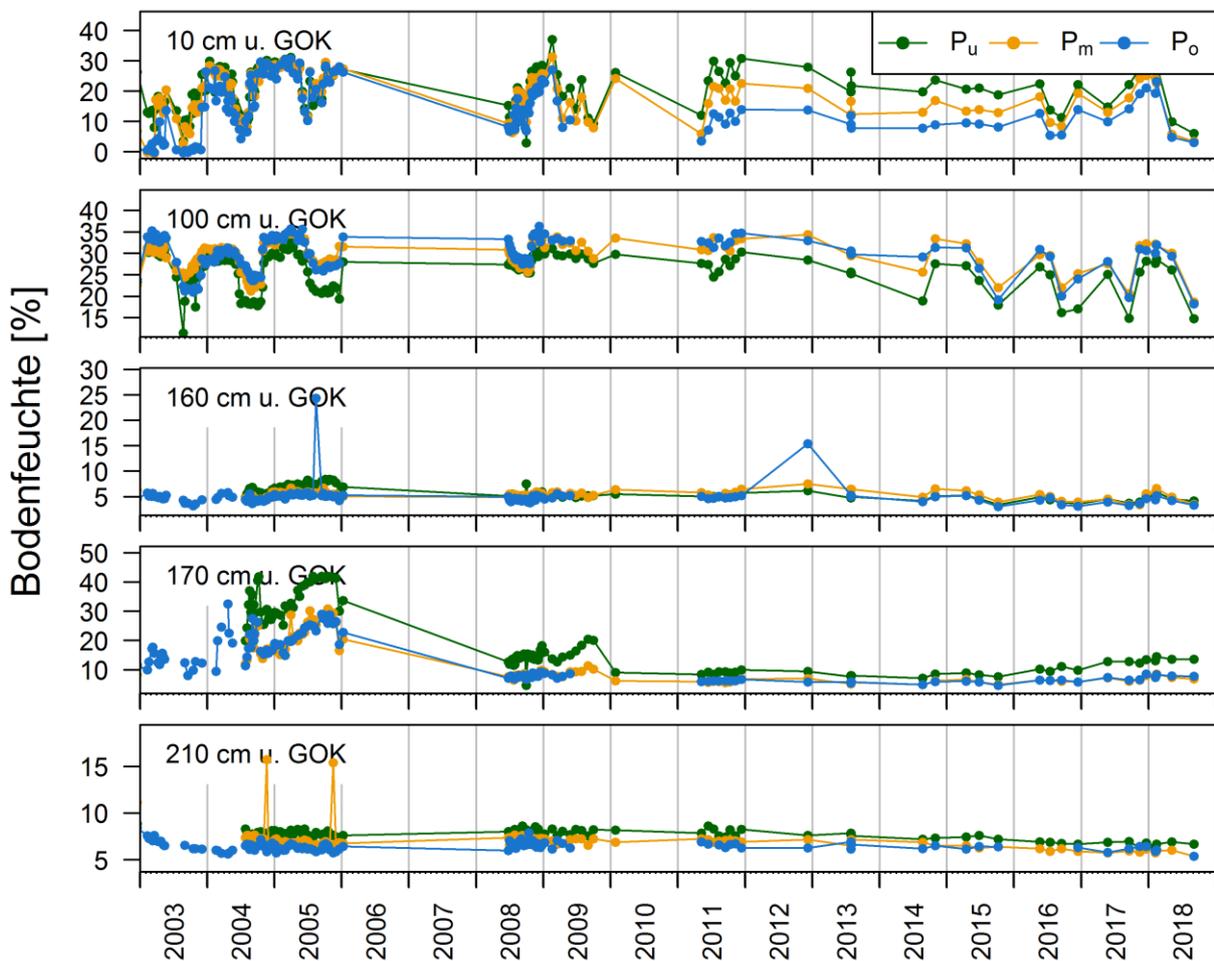


Abbildung 8: Zeitreihe der gemessenen Bodenfeuchte in ausgewählten Tiefen im Lysimeterfeld.

4.4 Wirkungsgrade

In Abbildung 9 sind die Monats- und Jahreswerte der Wirkungsgrade des Gesamtsystems (Gleichung 3, Kapitel 3) und der Asphaltabdichtung (Gleichung 2, Kapitel 3) dargestellt. Insgesamt erreicht die Abdichtungskomponente der Asphaltabdichtung in den Jahresdurchschnitten der Jahre 2011 bis 2018 durchweg einen Wirkungsgrad größer 99,9%. Die Wirkungsgrade des Gesamtsystems sind geringfügig höher als die der Asphaltabdichtung. Da die Abflüsse der Kapillarsperre nicht unmittelbar auf Niederschläge oder deren Ausbleiben reagieren, kann in Monaten mit sehr geringen Niederschlägen ein geringerer Monatswert für den Wirkungsgrad resultieren. Die über das gesamte Jahr berechneten Wirkungsgrade stellen somit repräsentativere Werte dar. Trotz der sehr hohen Wirkungsgrade wurde der erwartete Wirkungsgrad für die Konvektionsabdichtung von 100% nicht erreicht. Die Abklärung der Wasserherkunft war die Veranlassung für den in Kapitel 5 beschriebenen Markierungsversuch.

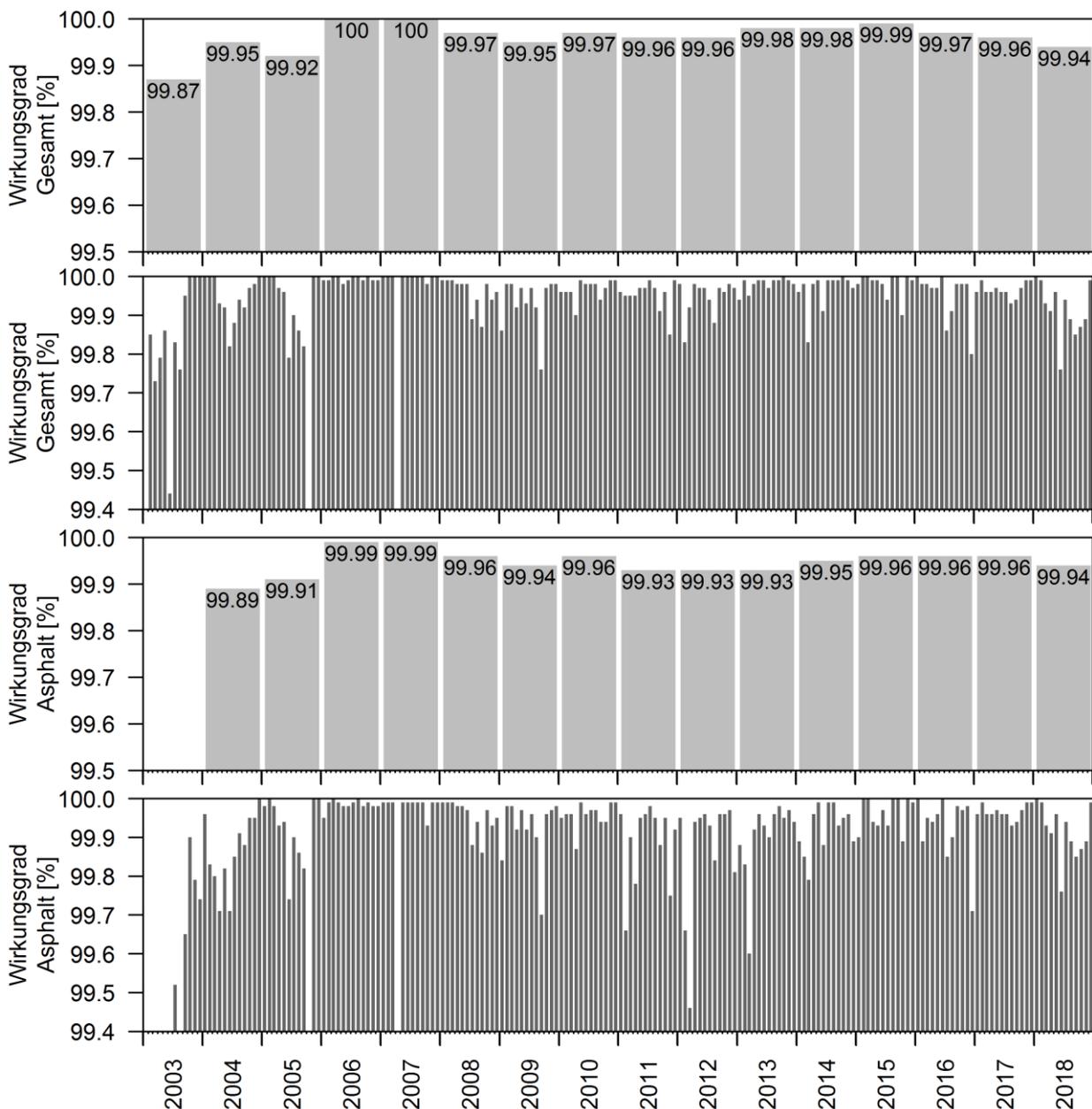


Abbildung 9: Zeitreihen der Wirkungsgrade des Gesamtsystems und der Asphaltabdichtung als Monats- und Jahreswerte.

5 Markierungsversuch

Bei einer als absolut dicht angenommenen Asphaltdeckung sollte der Abfluss aus den Schichten unterhalb dieser nach initialem Leerlaufen vollständig versiegen. Dies ist jedoch nicht der Fall. Der nach Baubeginn initial hohe Abfluss nahm in den Folgejahren zwar 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 Asphaltdeckung wurde daher im Auftrag der LUBW ein Markierungsversuch auf der Lysimeterfläche durchgeführt. Ziel war eine Abgrenzung der Wasserherkunft und eine Bewertung des gesamten Abdichtungssystems (vgl. Bericht zum Markierungsversuch, 2019).

Der Abfluss kann einerseits durch den Aufbau und die Funktion des Lysimeters selbst bedingt sein. Möglich wären präferentielle Fließwege um die eingebauten Messstellen herum (c.) sowie Randumläufigkeiten und Undichtigkeiten in der Lysimeteinfassung (a.). Andererseits wäre ein diffuses und flächenhaftes Durchsickern auf der gesamten Asphaltdeckung möglich (b.).

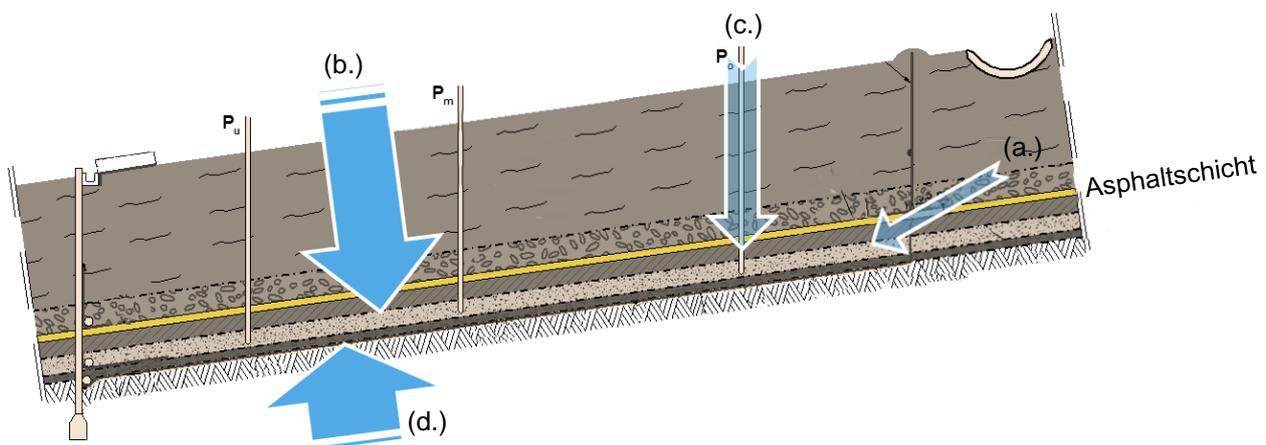


Abbildung 10: Mögliche Herkunft des Wassers unterhalb der Asphaltdeckungsfläche.

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 Asphaltdeckungsfläche zu überprüfen. Die Verteilung der Tracer ist in Abbildung 11 dargestellt. 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.

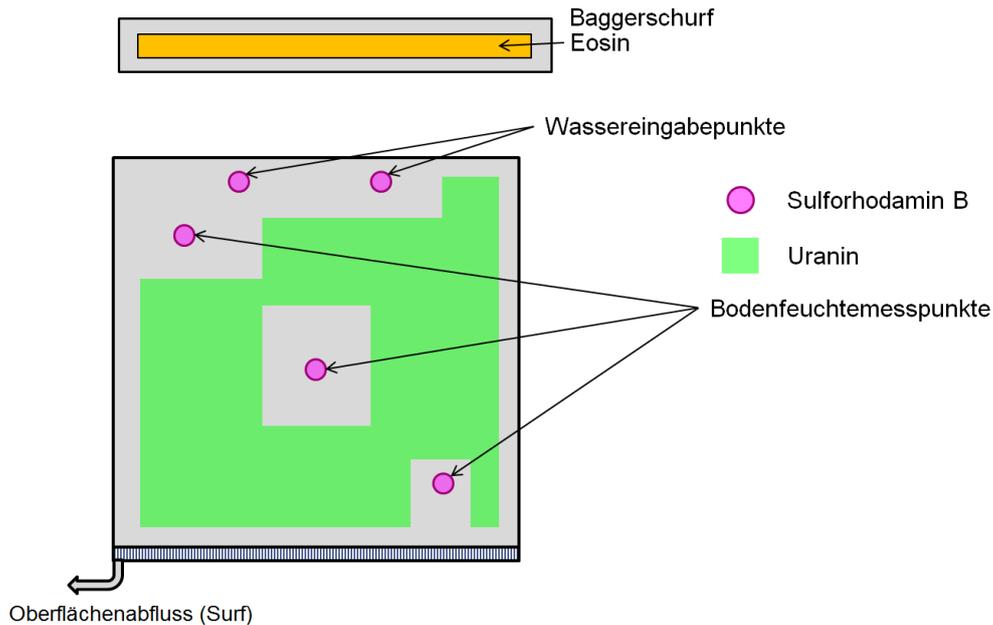


Abbildung 11: Verteilung der Tracer auf der Lysimeteroberfläche und dem Baggerschurf. Maßstab und Nordpfeil siehe Abbildung 4.

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 (Abbildung 12). Der Tracer hat die Asphaltsschicht 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. Insgesamt ist der Widererhalt 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 Asphaltsschicht im OKF und zeitlich ausreichend aufgelöster Probennahme, wurden keine Hinweise auf Undichtigkeiten der Asphaltabdichtung gefunden. Als mögliche Ursache der gemessenen Wassermengen unterhalb der Asphaltabdichtung könnten kapillare oder kondensative Effekte aus dem unterhalb der Asphaltabdichtung vorhandenen System in Frage kommen. Eine verifizierte Aussage dieser möglichen Ursachen kann mit den bisher durchgeführten Untersuchungen nicht erfolgen.

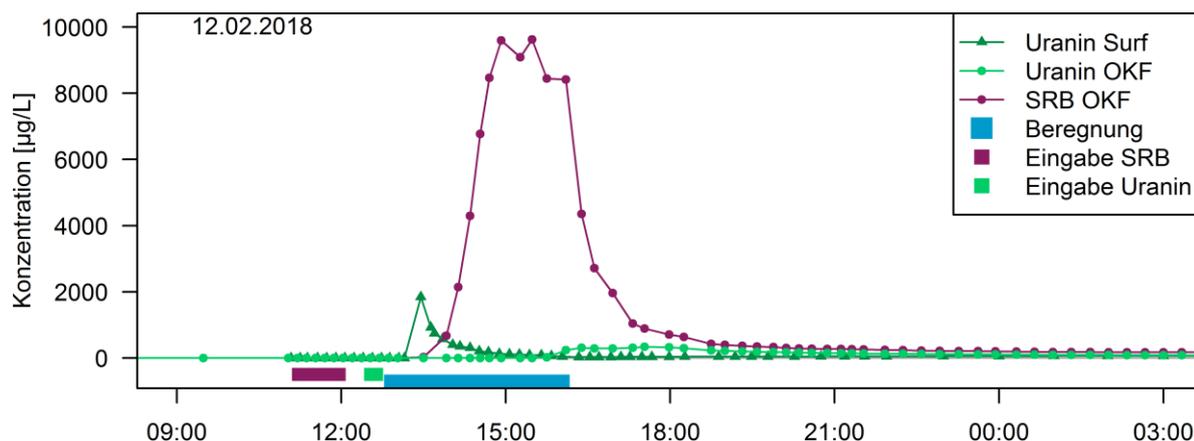


Abbildung 12: : Durchgangskurven von Uranin und Sulforhodamin B im OKF sowie die Durchgangskurve von Uranin im Oberflächenabfluss (Surf) während des Tracerversuchs am 12.02.2018.

6 Zusammenfassung für die Jahre 2011 bis 2018

Im vorliegenden Bericht wurden die am Lysimeter gewonnen Messdaten der Jahre 2011 bis 2018, sowie die Ergebnisse des Markierungsversuches aus dem Jahr 2018 zusammenfassend ausgewertet, um zu einer abschließenden Bewertung des verwendeten Abdichtungssystems zu kommen.

Trotz der Konvektionssperre aus Asphalt wurde ein sehr geringer Abfluss unterhalb der Asphaltsschicht aus Kapillarschicht und Kapillarbruchschicht von durchschnittlich 0,44 mm/a erfasst. Dies entspricht im Mittel 0,06% des Jahresniederschlages.

Die Abflüsse aus der Kapillarbruchschicht fanden hauptsächlich während der Sommermonate statt, mit einem Abflussmaximum im Juli, also mehrere Monate zeitversetzt zum Abfluss aus dem Oberen Kiesflächenfilter. Aufgrund des ausgeprägten Jahregangs des Abflusses unterhalb der Asphaltsschicht führt ein geringer monatlicher Niederschlag zu einem reduzierten Wert für den rechnerisch ermittelten Wirkungsgrad in diesem Monat. Die Jahreswerte der Wirkungsgrade stellen daher eine aussagekräftigere Vergleichsgröße dar. Sie liegen in den Jahren 2004 bis 2018 stets über 99,9%.

Die Wirkungsgrade der Asphaltsschicht und des Gesamtsystems (respektive der Kapillarsperre) unterscheiden sich für den untersuchten Zeitraum nicht grundlegend voneinander. Aufgrund der in den Jahren 2017 und 2018 ausgebliebenen Abflüsse aus der Kapillarschicht sind der Wirkungsgrad der Asphaltsschicht und des Gesamtsystems in diesen Jahren jeweils gleich.

Die bisher am Lysimeter durchgeführten Untersuchungen geben keine Hinweise, dass die Asphaltabdichtungskomponente in ihrer Funktionsfähigkeit als konvektionsdichte Abdichtungskomponente im dem hier vorliegenden Aufbau Einschränkungen hat. Die zusätzlich durchgeführten Traceruntersuchungen zeigen, dass die sich aus den Bilanzierungen und Messungen ergebenden jährlichen Wirkungsgrade mit ca. 99,9% eine Bewertung der hier vorliegenden Asphaltabdichtung als im Sinne der DepV konvektionsdichte Komponente ableiten lassen.

Eine Veränderung dieser Wirkungsgrade wurde in dem gesamten Messzeitraum von 2003 bis 2018 nicht verzeichnet, sodass sich auch hieraus eine entsprechende Systemstabilität (langzeitliche Bewertung) einschätzen lässt.

Um eine Langzeitbeständigkeit im Sinne der DepV verifiziert belegen zu können, müssten fortlaufende Messungen analog der zurückliegenden Abflussmessungen durchgeführt werden.

Prof. Dr. N. Goldscheider

M. Merk (Bearbeiter)

Literatur und bisherige Berichte

- LAGA AD-HOC-AG. (2016) „Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 7-1 ‚Rekultivierungsschichten in Deponieoberflächenabdichtungssystemen‘“. „Deponietechnik“. www.laga-online.de/documents/bqs-7-1-reku-13-04-16_1507195527.pdf.
- AUGENSTEIN, M., (2009): Hydrogeologische Untersuchungen zum Wasserhaushalt der Deponie Pforzheim Hohberg mittels Lysimeter und numerischer Modellierung, Diplomarbeit 2009 am Institut für Angewandte Geologie, Universität Karlsruhe.
- BREH W., GIURGEA V. & HÖTZL H. (2002): Langzeitbeobachtung zum Verhalten einer verstärkten mineralischen Dichtungsschicht in einer kombinierten Oberflächenabdichtung. – In: Schriftenreihe Höxteraner Berichte zu angewandte Umweltwissenschaften der Abteilung Höxter der Fachhochschule Lippe und Höxter, 03, S.75-89, Höxter.
- DEPV: Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert worden ist.
- GDA E 2-30: Modellierung des Wasserhaushalts der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien, Empfehlungen des AK 6.1 (Geotechnik der Deponiebauwerke) der Fachsektion 6 der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. DGGT [www.gdaonline.de/empfehlungen].
- GDA E 2-31: Rekultivierungsschichten, Empfehlungen des AK 6.1 (Geotechnik der Deponiebauwerke) der Fachsektion 6 der DGGT [www.gdaonline.de/empfehlungen].
- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2009-2019): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld LYSIMETER – Jahresabschlussberichte 2009-2018 zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter [www.lubw.baden-wuerttemberg.de/abfall-und-kreislaufwirtschaft/abfallforschung].
- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2019): Hausmülldeponie Hohberg, Lysimeter-Testfeld – Markierungsversuch zur Klärung der Wasserherkunft unterhalb der Asphaltabdichtung.
- LEHRSTUHL FÜR ANGEWANDTE GEOLOGIE (2002): Hausmülldeponie Pforzheim – Hohberg, Lysimeter Testfelder, Anforderungsprofil.– 8 S. [unveröffentlicht].
- LEHRSTUHL FÜR ANGEWANDTE GEOLOGIE (2002): Hausmülldeponie Pforzheim – Hohberg, Lysimeter Testfelder, Fachtechnische Begleitung und Überprüfung der Bauplanung.– 5 S., 3 Abb., [unveröffentlicht].
- LEHRSTUHL FÜR ANGEWANDTE GEOLOGIE (2004): Hausmülldeponie Pforzheim – Hohberg, Fachliche Begleitung der Bauphase des Lysimeter - Testfeldes, September 2002 – Dezember 2003, Bericht und Fotodokumentation.– II + 177 S., 436 Abb., [unveröffentlicht].
- LEHRSTUHL FÜR ANGEWANDTE GEOLOGIE (2004-2010): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim-Hohberg – Erfassung und Dokumentation der Messdaten des Lysimeters und der Klimastation. Jahresabschlussberichte für die Jahre 2004 bis 2009, [unveröffentlicht].
- LINERT, U. (1995): Verhalten von Pflanzenwurzeln in Oberflächenabdichtungssystemen.- in EGLOFFSTEIN, TH. & BURKHARDT, G. (Hrsg.) (1995): Oberflächenabdichtungen für Deponien und Altlasten-Abdichtung oder –Abdeckung -Schr. Angew. Geologie Karlsruhe, 37: 15-1 bis 15-13; Karlsruhe.
- LÖPMEIER, F (2014): Agrarmeteorologisches Modell zur Berechnung der aktuellen Verdunstung (AMBAV), DWD, ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/derived_germany/soil/daily/historical.
- TA SIEDLUNGSABFALL (1993): Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. - Bundesanzeiger: 117 S.; Köln.

Anhang

Anhang 1: Tabellen zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und der Bodenfeuchte 2003-2018.

N: Niederschlag, S: Sonderinput¹, Σ: Summe der Abflüsse, % N: prozentualer Anteil der Abflusssummen am Niederschlag, Diff: Bodenfeuchtedifferenz, ET_a: Evapotranspiration

2003	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Σ	% N
N	-	24,2	25,5	34,0	50,7	25,1	65,0	32,9	36,8	93,8	43,1	30,4	461,50	100
S											20,0	10,0	30,00	
Q _{Surf}				1,01	1,72	0,40	9,78	0,99	3,54	4,27	3,01	1,27	25,99	5,6
Q _{OKF}		35,39	11,65	5,79	5,10	1,45	7,39	0,60	1,34	8,08	26,04	10,51	113,34	24,56
Q _{KS}		0,63	0,51	0,37	0,33	0,20	0,20	0,19	0,11	0,09	0,09	0,08	2,79	0,60
Q _{KBS}		0,04	0,07	0,07	0,07	0,14	0,11	0,08	0,02	0,00	0,00	0,00	0,60	0,13
Diff		-16,94	0,40	-6,62	-20,09	-43,68	-43,94	-23,10	14,30	60,91	32,06	25,95	-20,8	-4,50
ET _a		5,1	12,9	33,4	63,6	66,6	91,5	54,1	17,5	20,4	1,9	2,6	369,5	80,08

2004	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Σ	% N
N	192,2	35,5	25,4	27,7	50,5	38,4	72,8	94,0	49,0	77,3	42,6	37,9	743,30	100
Q _{Surf}	40,65	2,99	0,88	1,50	1,41	1,49	5,06	10,19	2,51	4,33	2,36	1,93	75,30	10,1
Q _{OKF}	79,22	22,39	13,27	8,41	8,44	1,38	0,22	0,00	0,00	4,33	9,42	21,06	168,14	22,62
Q _{KS}	0,07	0,06	0,05	0,06	0,05	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00	0,42	0,06
Q _{KBS}	0,00	0,00	0,00	0,02	0,04	0,07	0,09	0,06	0,04	0,02	0,01	0,00	0,35	0,05
Diff	-28,03	5,35	-5,53	-15,58	-24,64	-96,21	-15,36	46,42	25,24	67,00	30,51	1,03	-9,8	-1,32
ET _a	100,3	4,7	16,7	33,3	65,2	131,6	82,8	37,3	21,2	1,6	0,3	13,9	508,9	68,46

2005	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Σ	% N
N	58,6	124,8	51,9	73,4	72,3	18,9	96,2	62,6	45,0	33,1	49,5	80,1	766,4	100
Q _{Surf}	2,57	2,96	5,14	3,46	3,07	0,58	5,54	2,07	1,34	1,69	0,81	2,79	32,02	4,2
Q _{OKF}	32,50	46,43	53,71	37,09	11,13	1,16	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	2,05	184,08	24,02
Q _{KS}	0,01	0,00	0,01	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,01
Q _{KBS}	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03	0,04	0,10	0,09	0,08	0,21	0,00	0,00	0,58	0,08
Diff	3,08	34,60	-14,00	-32,71	-46,79	-72,31	-0,95	1,17	33,81	-1,69	12,69	65,49	-17,6	-2,30
ET _a	20,5	40,8	7,0	65,5	104,8	89,4	91,5	59,3	9,8	32,9	36,0	9,8	567,3	74,02

2006	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Σ	% N
N	19,5	45,3	139,6	51,0	61,4	25,1	46,1	162,1	35,3	115,0	26,5	32,6	759,6	100
Q _{Surf}	1,58	2,3	5,23	1,94	2,84	2,11	1,46	6,45	1,03	5,89	0,99	1,09	32,92	4,33
Q _{OKF}	10,61	25,35	56,06	22,44	2,46	1,39	0,004	0,68	0,08	30,54	5,94	15,86	117,41	22,57
Q _{KS}	0,0068	0,001	0,0013	0,0034	0,0027	0,0036	0,003	0,0047	0,0052	0,0067	0,0038	0,0024	0,0446	0,0059
Q _{KBS}	0,0028	0,0032	0,0019	0,0014	0,0104	0,0024	0,0012	0,0021	0,0019	0,0035	0,0025	0,0028	0,0361	0,0048
Diff + ET _a								555,16						73,09

2007	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Σ	% N
N	54,1	74,4	72,8	0,1	125,2	70,9	84,0	66,1	71,8	10,5	72,3	50,5	752,7	100
Q _{Surf}	4,61	3,73	4,61	0,04	5,26	2,34	2,52	2,3	2,17	0,04	3,05	2,2	32,85	4,37
Q _{OKF}	30,52	39,88	34,54	9,83	1,01	0,43	0,02	0,31	0,51	0	11,09	27,61	155,74	20,69
Q _{KS}	0,0024	0,003	0,0019	0,0043	0,0052	0,0065	0,0027	0,0036	0,0036	0,0047	0,0027	0,002	0,0429	0,0057
Q _{KBS}	0,0026	0,0016	0,0023	0,003	0,0057	0,0023	0,0041	0,001	0,0023	0,0026	0,0029	0,0024	0,0328	0,0044
Diff + ET _a								564,03						74,93

¹ Aufgrund der Baumaßnahme im Dezember 2003, bei der sehr feuchter Humusboden aufgetragen wurde, ergab sich die Notwendigkeit einen zusätzlichen Input abzuschätzen (vgl. Jahresbericht 2003).

2008	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Σ	% N
N	49,17	56,51	98,81	82,66	49,72	53,67	42,57	92,39	22,11	109,08	28,9	36,24	721,83	100
Q _{Surf}	1,63	2,01	5,32	3,25	1,28	1,69	1,3	2,81	1,73	4,25	1,32	1,76	28,36	3,93
Q _{OKF}	31,0	36,29	53,02	22,03	10,49	5,04	0,28	0,22	0,07	10,38	17,88	30,1	216,8	30,03
Q _{KKS}	0,0027	0,0029	0,0032	0,0016	0,0038	0,0017	0,0011	0,002	0,0027	0,0012	0,0031	0,0055	0,0315	0,0044
Q _{KBS}	0,0045	0,0042	0,005	0,0143	0,0079	0,0133	0,0486	0,0512	0,0286	0,027	0,0181	0,0129	0,0326	0,0326
Diff + ET _a	476,4												66,0	

2009	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Σ	% N
N	31,9	87,9	86,8	37,1	104,5	49,9	140,5	47,8	17,5	65,5	51,5	103,8	824,7	100
Q _{Surf}	4,50	3,57	4,31	1,36	2,37	1,27	4,85	1,03	0,55	2,05	2,82	5,27	33,95	4,12
Q _{OKF}	12,42	61,19	58,35	7,11	26,71	2,19	15,07	2,23	0,20	0,26	22,16	78,34	286,23	34,71
Q _{KKS}	0,006	0,003	0,005	0,003	0,007	0,004	0,015	0,008	0,010	0,005	0,003	0,004	0,073	0,009
Q _{KBS}	0,044	0,014	0,017	0,028	0,029	0,037	0,044	0,041	0,042	0,022	0,011	0,017	0,346	0,042
Diff + ET _a	504,10												61,13	

2010	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Σ	% N
N	52,8	47,4	36,3	17,0	139,1	42,6	73,7	117,9	61,4	44,2	112,2	138,8	883,4	100
Q _{Surf}	6,75	4,95	2,08	0,57	4,58	1,18	2,34	4,47	1,70	1,64	4,35	8,96	43,57	4,93
Q _{OKF}	46,84	48,93	19,59	3,95	15,89	4,18	0,29	0,81	1,64	8,91	49,82	85,18	284,04	32,15
Q _{KKS}	0,003	0,002	0,002	0,005	0,003	0,008	0,011	0,010	0,002	0,003	0,004	0,002	0,057	0,0064
Q _{KBS}	0,022	0,018	0,014	0,016	0,007	0,008	0,012	0,026	0,037	0,013	0,007	0,026	0,206	0,0233
Diff + ET _a	555,53												62,89	

2011	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Σ	% N
N	48,90	21,90	26,70	25,00	69,40	98,90	84,80	103,20	29,80	63,40	4,40	160,30	736,70	100
Q _{Surf}	3,69	0,87	0,93	0,88	2,49	3,70	2,79	3,91	0,96	2,30	0,14	5,87	28,53	3,87
Q _{OKF}	48,96	1,92	6,78	0,65	0,22	0,55	1,21	5,30	1,18	3,69	1,24	77,07	148,78	20,20
Q _{KKS}	0,00	0,06	0,01	0,04	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,12	0,31	0,04
Q _{KBS}	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,01	0,03	0,03	0,03	0,01	0,01	0,22	0,03
Diff + ET _a	558,85												75,9	

2012	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Σ	% N
N	88,70	23,00	12,40	49,30	49,70	112,80	96,10	29,60	64,80	55,80	96,70	106,90	785,8	100
Q _{Surf}	3,72	0,25	0,44	1,33	1,71	3,59	3,36	0,86	2,65	2,10	3,80	4,24	28,05	3,57
Q _{OKF}	68,67	1,58	7,13	1,92	0,65	0,43	2,30	0,28	0,01	0,35	30,48	79,72	193,52	24,63
Q _{KKS}	0,022	0,039	0,057	0,019	0,007	0,005	0,015	0,010	0,006	0,003	0,005	0,171	0,360	0,05
Q _{KBS}	0,020	0,038	0,010	0,008	0,017	0,038	0,057	0,037	0,021	0,020	0,020	0,033	0,320	0,04
Diff + ET _a	563,55												71,72	

2013	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Σ	% N
N	46,43	72,76	29,58	52,97	155,26	98,96	42,61	63,55	95,86	118,79	74,86	49,84	901,47	100
Q _{Surf}	1,83	3,06	0,94	1,70	6,09	3,85	1,55	1,66	4,01	4,60	2,80	1,82	33,91	3,76
Q _{OKF}	25,30	55,62	19,88	11,19	35,54	30,85	0,38	0,09	3,01	34,92	45,96	34,47	297,22	32,97
Q _{KKS}	0,058	0,109	0,102	0,032	0,050	0,057	0,031	0,021	0,008	0,054	0,011	0,018	0,550	0,06
Q _{KBS}	0,013	0,011	0,016	0,010	0,011	0,038	0,011	0,007	0,012	0,006	0,009	0,011	0,154	0,02
Diff + ET _a	569,6												63,2	

2014	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Σ	% N
N	46.1	47.2	8.9	36.9	73.2	20.4	138.4	121.1	95.3	53.0	58.9	62.3	761.8	100
Q _{Surf}	1,83	1,61	0,20	1,34	2,34	0,35	5,06	3,86	3,17	1,38	1,79	1,65	24,58	3,23
Q _{OKF}	34,96	27,21	6,23	1,27	0,38	0,10	0,55	2,84	30,00	10,78	36,24	22,85	173,40	22,76
Q _{Ks}	0,035	0,061	0,004	0,005	0,004	0,005	0,003	0,003	0,059	0,026	0,018	0,049	0,270	0,0354
Q _{kBS}	0,017	0,011	0,015	0,009	0,007	0,019	0,017	0,012	0,007	0,001	0,004	0,019	0,1403	0,0184
Diff + ET _a	563,40												73,96	

2015	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Σ	% N
N	108,3	24,5	40,5	51,9	46,8	70,7	23,8	62,9	47,9	22,0	111,1	35,7	645,9	100
Q _{Surf}	3,78	-	-	0,81	1,31	1,80	0,40	-	-	0,44	-	0,50	9,05	1,40
Q _{OKF}	63,66	-	-	4,08	1,96	0,28	0,01	-	-	0,00	-	0,73	70,72	10,95
Q _{Ks}	0,094	-	-	0,028	0,026	0,011	0,003	-	-	0,002	-	0,001	0,165	0,026
Q _{kBS}	0,018	-	-	0,003	0,005	0,011	0,015	-	-	0,014	-	0,002	0,068	0,010
Diff + ET _a	565,92												87,61	

2016	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Σ	% N
N	80,3	72,7	58,6	75,8	102,6	106,4	33,9	25,4	58,9	44,1	56,7	7,0	722,4	100
Q _{Surf}	1,35	2,49	1,72	2,88	3,07	3,59	0,48	0,42	1,28	0,77	1,45	0,02	19,53	2,70
Q _{OKF}	14,63	27,51	52,28	46,70	5,97	0,41	0,22	0,15	0,05	0,01	0,13	0,49	148,57	20,57
Q _{Ks}	0,003	0,061	0,017	0,021	0,014	0,002	0,002	0,003	0,001	0,006	0,000	0,006	0,135	0,019
Q _{kBS}	0,001	0,017	0,011	0,022	0,027	0,002	0,049	0,023	0,011	0,008	0,013	0,014	0,199	0,027
Diff + ET _a	553,97												76,68	

2017	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Σ	% N
N	25,7	39,3	47,6	29,6	42,7	71,8	112,7	68,8	61,8	81,0	96,5	77,1	754,6	100
Q _{Surf}	0,60	0,68	1,15	0,19	0,49	1,32	1,09	0,91	0,56	1,71	3,15	2,57	14,40	1,91
Q _{OKF}	0,52	0,16	7,92	0,67	0,25	0,18	0,06	0,02	0,02	0,00	5,05	26,30	41,14	5,45
Q _{Ks}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Q _{kBS}	0,009	0,005	0,019	0,013	0,013	0,029	0,044	0,048	0,039	0,024	0,010	0,004	0,257	0,034
Diff + ET _a	698,8												92,60	

2018	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Σ	% N
N	136,3	56,8	26,0	27,4	82,5	19,9	92,1	50,1	29,2	20,1	17,4	103,3	661,1	100
Q _{Surf}	6,17	3,13	1,20	1,07	2,30	1,72	3,59	1,76	1,54	1,28	1,02	13,09	37,87	5,73
Q _{OKF}	80,49	40,29	7,46	5,23	0,77	0,13	0,25	0,01	0,01	0,01	0,01	2,30	137,0	20,72
Q _{Ks}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Q _{kBS}	0,004	0,007	0,018	0,025	0,032	0,047	0,054	0,053	0,043	0,027	0,019	0,008	0,335	0,051
Diff + ET _a	485,9												73,51	

Anhang 2: Gesamtwirkungsgrad W_{ges} (%) der Oberflächenabdichtung und Niederschlagsmengen (mm) für den Untersuchungszeitraum 2003 – 2018 als Monatswerte. Jahreswerte berechnet als Durchschnitt der Monatswerte.

W_{ges} (Niederschlag)								
Jahr	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
	% (mm)							
Jan	--- (---)	100,00 (192,2)	100,00 (58,6)	99,99 (19,5)	100,00 (54,1)	99,99 (49,2)	99,86 (31,9)	99,96 (52,8)
Feb	99,85 (24,2)	100,00 (35,5)	100,00 (124,8)	99,99 (45,3)	100,00 (74,4)	99,99 (56,5)	99,98 (87,9)	99,96 (47,4)
Mrz	99,73 (25,5)	99,98 (25,4)	100,00 (51,9)	100,00 (139,6)	100,00 (72,8)	99,99 (98,8)	99,98 (86,8)	99,96 (36,3)
Apr	99,80 (34,0)	99,93 (27,7)	99,98 (73,4)	100,00 (51,0)	97,00 (0,1)	99,98 (82,7)	99,92 (37,1)	99,90 (17,0)
Mai	99,86 (50,7)	99,92 (50,5)	99,95 (72,3)	99,98 (61,4)	100,00 (125,2)	99,98 (49,7)	99,97 (104,5)	100,00 (139,1)
Jun	99,44 (25,1)	99,81 (38,4)	99,76 (18,9)	99,99 (25,1)	100,00 (70,9)	99,98 (53,7)	99,93 (49,9)	99,98 (42,6)
Jul	99,83 (65,0)	99,87 (72,8)	99,90 (96,2)	100,00 (46,1)	100,00 (84,0)	99,89 (52,6)	99,97 (140,5)	99,98 (73,7)
Aug	99,66 (32,9)	99,94 (94,0)	99,85 (62,6)	100,00 (162,1)	100,00 (66,1)	99,94 (92,4)	99,92 (47,8)	99,98 (117,9)
Sept	99,79 (36,8)	99,93 (49,0)	99,81 (45,0)	99,99 (35,3)	100,00 (71,8)	99,87 (22,1)	99,76 (17,5)	99,94 (61,4)
Okt	99,98 (93,8)	99,98 (77,3)	99,37 (33,1)	100,00 (115,0)	99,98 (10,5)	99,98 (109,1)	99,97 (65,5)	99,97 (44,2)
Nov	100,00 (43,1)	99,98 (42,6)	100,00 (49,5)	99,99 (26,5)	100,00 (82,3)	99,94 (28,9)	99,98 (51,5)	99,99 (112,2)
Dez	100,00 (30,4)	100,00 (37,9)	100,00 (80,1)	99,99 (32,6)	100,00 (50,5)	99,96 (36,2)	99,98 (103,8)	99,98 (138,8)
Jahr	99,85 (461,5)	99,95 (743,3)	99,92 (766,6)	99,99 (759,6)	99,75 (752,7)	99,96 (721,8)	99,94 (824,7)	99,96 (883,4)

W_{ges} (Niederschlag)								
Jahr	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
	% (mm)	% (mm)	% (mm)	% (mm)	% (mm)	% (mm)	% (mm)	% (mm)
Jan	99,96 (48,9)	99,98 (88,7)	99,97 (46,4)	99,96 (46,1)	99,98 (108,3)	100,00 (80,3)	99,96 (25,7)	100,00 (136,3)
Feb	99,95 (21,9)	99,83 (23,0)	99,99 (72,8)	99,98 (47,2)	--- (24,5)	99,98 (72,7)	99,99 (39,3)	99,99 (56,8)
Mrz	99,95 (26,7)	99,92 (12,4)	99,95 (29,6)	99,83 (8,9)	--- (40,5)	99,98 (58,6)	99,96 (47,6)	99,93 (26,0)
Apr	99,95 (25,0)	99,98 (49,3)	99,98 (53,0)	99,98 (36,9)	99,99 (51,9)	99,97 (75,8)	99,96 (29,6)	99,91 (27,4)
Mai	99,97 (69,4)	99,97 (49,7)	99,99 (155,3)	99,99 (73,2)	99,99 (46,8)	99,97 (102,6)	99,97 (42,7)	99,96 (82,5)
Jun	99,97 (98,9)	99,97 (112,8)	99,96 (99,0)	99,91 (20,4)	99,98 (70,7)	100,00 (106,4)	99,96 (71,8)	99,76 (19,9)
Jul	99,99 (84,8)	99,94 (96,1)	99,97 (42,6)	99,99 (138,4)	99,94 (23,8)	99,86 (33,9)	99,96 (112,7)	99,94 (92,1)
Aug	99,97 (103,2)	99,88 (29,6)	99,99 (63,6)	99,99 (121,1)	--- (62,9)	99,91 (25,4)	99,93 (68,8)	99,89 (50,1)
Sept	99,91 (29,8)	99,97 (64,8)	99,99 (95,9)	99,99 (95,3)	--- (47,9)	99,98 (58,9)	99,94 (61,8)	99,85 (29,2)
Okt	99,96 (63,4)	99,96 (55,8)	100,00 (118,8)	100,00 (53,0)	99,94 (22,0)	99,98 (44,1)	99,97 (81,0)	99,87 (20,1)
Nov	99,85 (4,4)	99,98 (96,7)	99,99 (74,9)	99,99 (58,9)	--- (111,1)	99,98 (56,7)	99,99 (96,5)	99,89 (17,4)
Dez	99,99 (160,3)	99,97 (106,9)	99,98 (49,8)	99,97 (62,3)	99,99 (35,7)	99,80 (7,0)	99,99 (77,1)	99,99 (103,3)
Jahr	99,95 (736,7)	99,95 (785,8)	99,98 (901,5)	99,96 (761,8)	--- (645,9)	99,95 (722,4)	99,97 (754,6)	99,91 (661,1)