

# **Hausmülldeponie Hohberg**

## **Lysimeter - Testfeld**

04.02.2019

Messtechnische Bauwerksüberwachung  
der Oberflächenabdichtung  
mittels Lysimeter

Messjahr 2018

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

<b>Inhalt</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>II</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>II</b>
<b>Anhang</b>	<b>II</b>
<b>I. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>1 Aufgabenstellung</b>	<b>1</b>
<b>2 Messtechnische Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter</b>	<b>2</b>
2.1 Standort Hohberg .....	2
2.2 Beschreibung des Lysimeters .....	3
2.2.1 Messprinzip .....	3
2.2.2 Lysimeteraufbau .....	4
2.2.3 Abflussregime .....	5
2.2.4 Beschreibung der Abflusskomponenten .....	7
2.3 Niederschlag .....	8
2.4 Evapotranspiration .....	8
<b>3 Berechnungen</b>	<b>9</b>
3.1 Wirkungsgrad der Asphaltsschicht .....	9
3.2 Wirkungsgrad des Gesamtsystems .....	9
<b>II. Messergebnisse</b>	<b>10</b>
<b>4 Messergebnisse des Jahres 2018</b>	<b>10</b>
4.1 Niederschlag .....	10
4.2 Oberflächenabfluss ( $Q_{\text{Surf}}$ ) .....	10
4.3 Oberer Kiesflächenfilter (OKF) .....	11
4.4 Kapillarschicht (KS) .....	12
4.5 KapillARBrechende Schicht (KBS) .....	13
4.6 Evapotranspiration $ET_a$ .....	14
<b>5 Bewertung der Oberflächenabdichtung für das Jahr 2018</b>	<b>14</b>
5.1 Lysimeter-Wasserhaushaltsbilanz .....	14
5.2 Asphaltsschicht .....	15
5.3 Gesamtsystem .....	16
<b>6 Neutronensondenmessung zur Bestimmung der Bodenfeuchte im Jahr 2018</b>	<b>16</b>
<b>7 Zusammenfassung für das Jahr 2018</b>	<b>18</b>
<b>Literatur und bisherige Berichte</b>	<b>19</b>
<b>Anhang</b>	<b>23</b>

## **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 1: Geographische Lage der Hausmülldeponie Pforzheim-Hohberg. ....	4
Abb. 2: Skizze des Lysimeters .....	5
Abb. 3: Schematischer Querschnitt des Lysimeters mit Neutronensondenmessstellen.....	6
Abb. 4: Lage der DWD-Station Ispringen auf dem Schafhof und Lage der Deponie Hohberg. ....	8
Abb. 5: Niederschlagsverteilung des Zeitraums 2003 bis 2018 .....	10
Abb. 6: Verteilung des Oberflächenabflusses für den Zeitraum 2003 bis 2018 .....	11
Abb. 7: Verteilung des Abflusses der Dränschicht für den Zeitraum 2003 bis 2018 .....	12
Abb. 8: Verteilung des Abflusses der Kapillarschicht für den Zeitraum 2003 bis 2018 .....	13
Abb. 9: Verteilung des Abflusses der Kapillarbruchschicht für den Zeitraum 2003 bis 2018.....	13
Abb. 10: Wirkungsgrade der Asphaltsschicht aus dem Messzeitraum 2003 - 2018 .....	15
Abb. 11: Wirkungsgrade des Gesamtsystems aus dem Messzeitraum 2003 - 2018.....	16
Abb. 12: Bodenfeuchteprofile am 08.02., 13.02., 07.05. und 04.09.2018.....	17

## **Tabellenverzeichnis**

Tab. 1: Übersicht über die Baumaßnahmen und Messungen am Lysimeter .....	2
Tab. 2: Monatliche Abflusswerte der Abdichtungskomponenten 2018. ....	14

## **Anhang**

Anhang 1: Wasserstände der Lysimeterabflussbehälter 2018 .....	23
Anhang 2: Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse 2003 - 2018 .....	24
Anhang 3: Gesamtwirkungsgrad der Oberflächenabdichtung 2003 - 2018.....	27

# I. Einleitung

## 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 TA-Si 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 Hohberg errichtet.

Die derzeitigen Untersuchungen umfassen eine Bauwerksüberwachung des Abdichtungssystems durch die kontinuierliche und lückenlose Erfassung aller Abflüsse innerhalb der einzelnen Schichten der Abdichtung. Des Weiteren wird 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.

Dem Lehrstuhl für Angewandte Geologie (AGK) der Universität Karlsruhe (Prof. Dr. H. Hötzl (i.R.), jetzt: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW) – Abteilung Hydrogeologie unter Leitung von Herrn Prof. Dr. N. Goldscheider), kam während der Planung und des Bauablaufes eine beratende und gutachterliche Tätigkeit zu. Das AGW wurde seitens der Stadt Pforzheim mit der messtechnischen Lysimeterbetreuung und der Auswertung der am Lysimeter gewonnenen Daten zur Erstellung von Bodenwasserbilanzen und zur Berechnung von Wirkungsgraden beauftragt.

Als begleitende Maßnahme zur Bauwerksüberwachung des Lysimeters betreute das AGW bis zum Messjahr 2006 die Klimastation, die sich in unmittelbarer Nähe zum Lysimeter befindet. Der durch einen Blitzeinschlag im Juli 2006 beschädigte UGT-Datenlogger wurde vom Auftraggeber durch einen neuen Datenlogger der Firma LUFFT ersetzt. Die weitere meteorologische Datenerfassung erfolgte nach dem Umbau durch die Stadt Pforzheim. Die meteorologischen Kenndaten für den Bearbeitungszeitraum 2008 - 2013 wurden vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt.

Da der UGT Logger der Abflussregistrierung einen separaten Anschluss hat, wurde dieser durch den Ausfall nicht beeinträchtigt. Jedoch wurde das AGW im Jahr 2007 nicht mit der Wartung und Pflege des Lysimeterstestfeldes und der Messeinrichtung beauftragt. Im Sommer 2008 wurde daraufhin die Lysimeterstation wieder in Stand gesetzt. Im anschließenden Messzeitraum 2009 konnte ein normales Abflussverhalten der kapillarbrechenden Schicht beobachtet werden. Erwartungsgemäß nahm der Abfluss im ersten Halbjahr verglichen mit dem des Vorjahres zu. Die zweite Jahreshälfte wies hingegen keine großen Abweichungen mehr auf.

Auch im Jahr 2018 fand die messtechnische Betreuung der Lysimeteranlage durch das AGW im Auftrag der LUBW statt. Der aktuelle Beauftragungszeitraum umfasst die Jahre 2017 und 2018.

Die Abflüsse der einzelnen Schichten wurden gesammelt, ausgelesen und ausgewertet. Hierzu wurden die Daten per Fernauslesung abgerufen und die Notwendigkeit einer Wartung vor Ort geprüft. Bei Bedarf wurde die Anlage zu Wartungs- und Reinigungsarbeiten angefahren. Zusätzlich fanden an vier Stichtagen Messungen der Bodenfeuchte statt.

Eine Übersicht der einzelnen Bauabschnitte und Messungen am Lysimeter ist in Tabelle 1 dargestellt.

**Tab. 1:** Übersicht über die Baumaßnahmen und Messungen am Lysimeter

<b>Datum</b>	
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, Begradigung 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 KBS

## **2 Messtechnische Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter**

### **2.1 Standort Hohberg**

Die Deponie der Klasse DK II befindet sich am nördlichen Rand des Stadtgebietes von Pforzheim und liegt teilweise im anschließenden Enzkreis (Abb. 1). Der Standort der Deponie weist eine Höhendifferenz von 34 m auf (331 – 365 müNN). Die Lage des Eingangsbereichs ist in Gauß-Krüger-Koordinaten:

R: <sup>34</sup>78359 H: <sup>54</sup>20780. 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 und das Niederschlagswasser des Einzugsgebiets Katharinentalerhof Senke, 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.

## **2.2 Beschreibung des Lysimeters**

### **2.2.1 Messprinzip**

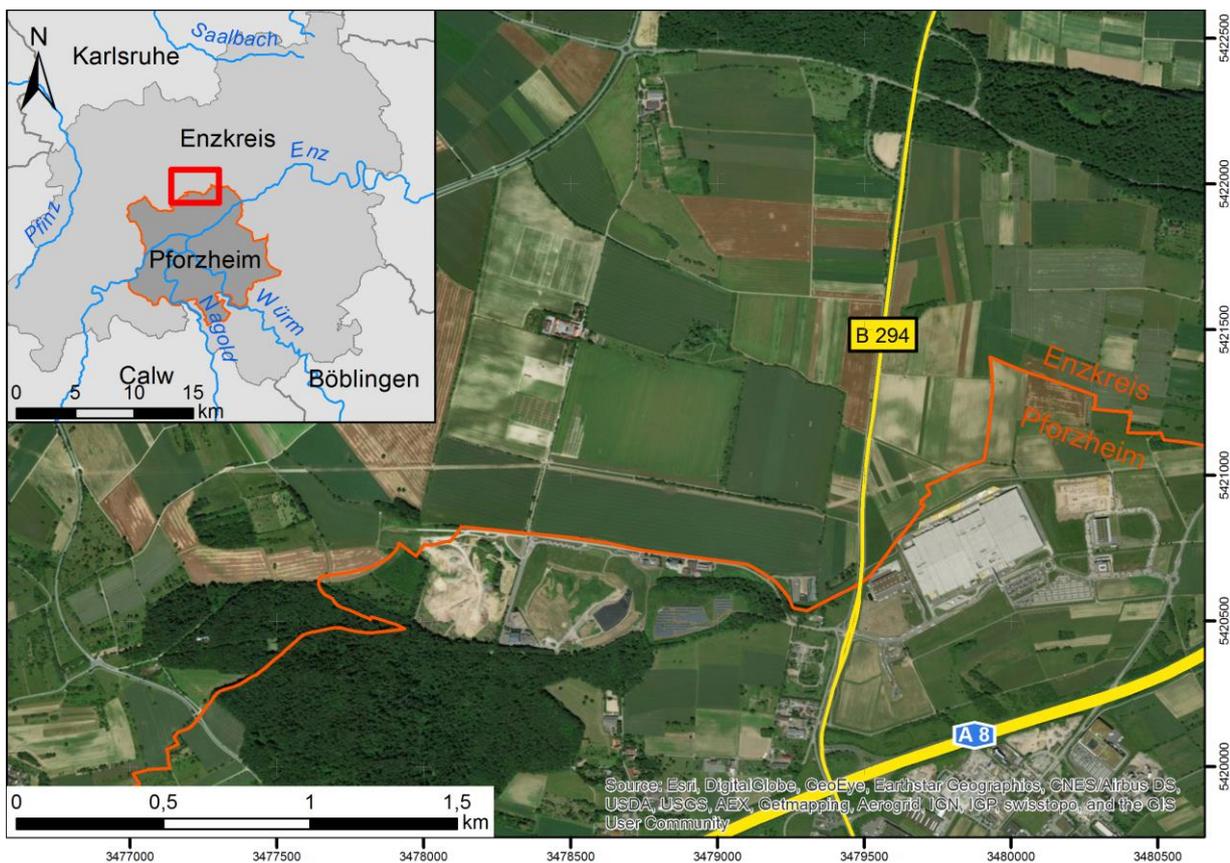
Das Großlysimeter befindet sich im nordwestlichen Bereich des Bauabschnitts I der Deponieoberflächenabdichtung. Das Lysimeter-Testfeld besitzt vier Abflusskomponenten, die jeweils getrennt gefasst, abgeleitet und in einem zentralen Messcontainer, Größe ca. 2,4 x 4 m, kontinuierlich registriert werden. Für die detaillierte Bestimmung der einzelnen Schichtabflüsse wurde vom Lehrstuhl für Angewandte Geologie Karlsruhe ein Messsystem entwickelt, das die Firma UGT (Umweltgerätetechnik), 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.

## 2.2.2 Lysimeteraufbau

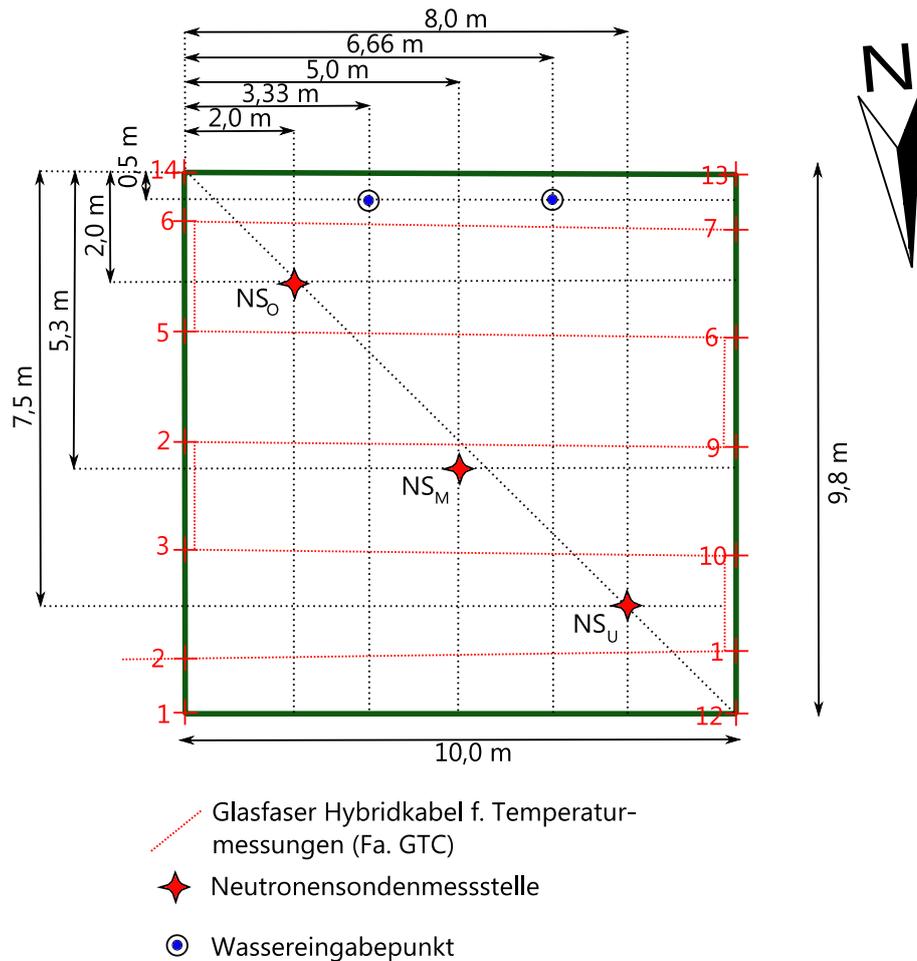
Die Lysimeterfläche beträgt  $10 \times 10 \text{ m}$  ( $100 \text{ m}^2$ ) und besitzt eine Neigung von 1:6,9 ( $8,23^\circ$ ) (Abb. 2 und Abb. 3). Nach Berücksichtigung der Hangneigung beträgt die auf die horizontal projizierte Lysimeterfläche  $97 \text{ m}^2$ . Der Aufbau des Lysimeters entspricht dem genehmigten Regelaufbau der Deponieoberflächenabdichtung, wie er 2003 auf ca. 1,5 ha der Deponie im Bauabschnitt I realisiert wurde.

In Abb. 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 Drainage (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).



**Abb. 1:** Geographische Lage der Hausmülldeponie Pforzheim-Hohberg. Die Grenze des Landkreises 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).



**Abb. 2:** Skizze des Lysimeters mit Verlegungsplan eines Glasfaserkabels, Neutronensondenmessstellen und Wassereingabepunkte für mögliche Flutungsversuche.

### 2.2.3 Abflussregime

Um die Wirksamkeit der Dichtungskomponenten und des Gesamtsystems bewerten zu können, wurden die Abflüsse nach dem in Absatz 2.2.1 beschriebenen Messprinzip einzeln erfasst und dokumentiert. Zur Bewertung der Langzeitdichtigkeit ist es sinnvoll, das Abflussverhalten mit früheren Untersuchungen zu vergleichen. Aus diesem Grund wurde das aktuelle Jahr an die chronologische Abflussreihe der vergangenen Messjahre angefügt.

Die vier zur Bilanzierung herangezogenen Abflusskomponenten sind (vgl. Abb. 3):

- Oberflächenabfluss -  $Q_{\text{Surf}}$
- Abfluss des oberen Kiesflächenfilters (OKF) -  $Q_{\text{OKF}}$
- Kapillarschichtabfluss (KS) -  $Q_{\text{KS}}$
- Abfluss aus der kapillARBrechenden Schicht (KBS) -  $Q_{\text{KBS}}$

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

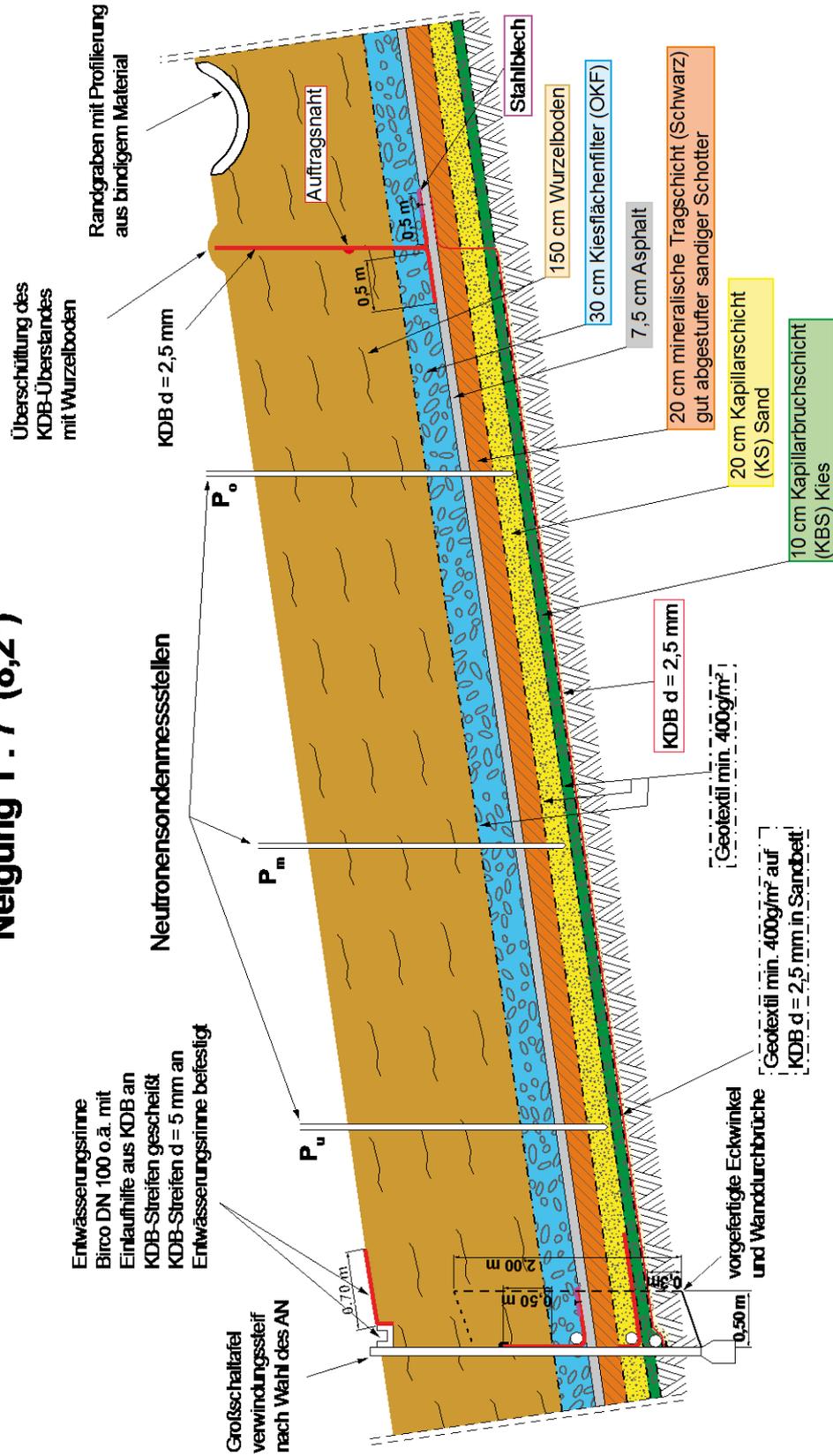


Abb. 3: Schematischer Querschnitt des Lysimeters mit Neutronensondenmessstellen.

## 2.2.4 Beschreibung der Abflusskomponenten

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 Flächendränge über der Asphaltichtungsschicht. Damit sollte dieser systembedingt in der Regel die größten Mengen an Sickerwasser abführen. Die Messwerte der Untersuchungsmonate von Februar 2003 bis Dezember 2014 bestätigen in vollem Umfang diese Annahme. Der Flächenfilter wurde mit einer Mächtigkeit von 30 cm eingebaut, was sich bis jetzt aus hydraulischer Sicht als gut dimensioniert erwiesen hat.

Die erste erfasste Abflusskomponente unterhalb der Asphaltichtungsschicht bildet die **Kapillarschicht (KS)**. 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 Asphalt in einer wasserdichten Kunststoffdichtungsbahn (KDB) - Wanne eingebaut wurden, dürfte nach dem Versiegen auch zu einem späteren Zeitpunkt kein Wasser aus der KS abfließen ( $Q_{KS} = 0$ ).

Die im Laufe der ersten 35 Monate ab Messbeginn 2003 registrierten KS-Abflusshöhen bestätigen nur teilweise die o.g. Erwartungen. So nimmt zwar der  $Q_{KS}$  während den Monaten Februar – Juni 2003 stetig ab. Die Abnahmerate verringert sich dann aber immer mehr und wird im Juni 2004 minimal. Erst im Dezember 2004 geht der  $Q_{KS}$  zum ersten Mal bis auf annähernd „0“ zurück (vgl. Jahresbericht 2004). Im Laufe des Jahres 2005 stieg der KS-Abfluss wieder leicht an, um dann in den letzten 6 Monaten erneut zurück zu gehen. Allgemein zeigte das Messjahr 2005 einen weiteren Rückgang des Kapillarschichtabflusses, jedoch ist dieser eindeutig noch nicht versiegt. Für weitere Informationen sei auf die Diskussion des Abflussverhaltens der ersten Beobachtungsjahre in den Jahresberichten 2003 – 2006 verwiesen.

In den Messjahren 2006 und 2007 waren noch Abflüsse unterhalb der Asphaltichtung zu erkennen (vgl. AGK-Jahresbericht 2006/2007). Das darauffolgende Jahr 2008 lag in der Summe leicht unterhalb der beiden Vorjahre (ca. 0,032 mm). Im Messjahr 2009 war eine leichte Zunahme der Abflüsse festzustellen. Dies lag hauptsächlich an den Monaten Juli bis September, die einen überdurchschnittlich hohen Abfluss zu verzeichnen hatten.

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.

### 2.3 Niederschlag

Zugangsdaten zur Anzeige der Wetterdaten der Station Hohberg über die Internetseite glaette24.de wurden zur Verfügung gestellt. Allerdings wird hier nicht der zur Bilanzierung der Messdaten erforderliche Niederschlag aufgeführt, sondern lediglich eine Niederschlagsintensität. Diese müssen für jeden Tag einzeln ausgewählt und heruntergeladen werden. Eine Konvertierung in eine Niederschlagshöhe ist nicht ohne weiteres möglich. Daher wurde auf die frei verfügbaren Niederschlagsdaten der vom Deutschen Wetterdienst (DWD) betriebenen Station Ispringen zurückgegriffen. Die Station befindet sich in ca. 1 km Entfernung zum Standort (Abb. 4).

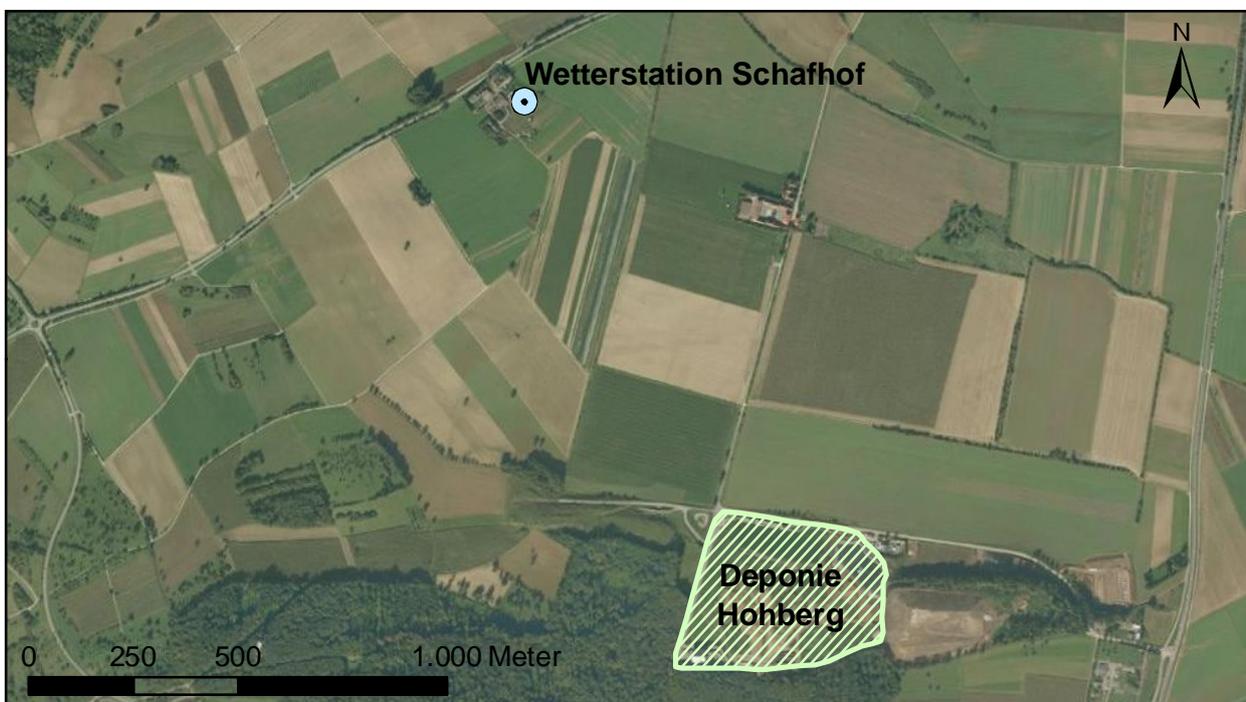


Abb. 4: Lage der DWD-Station Ispringen auf dem Schafhof und Lage der Deponie Hohberg.

### 2.4 Evapotranspiration

Die 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. Seit 2011 finden wieder Bodenfeuchtemessungen statt.

### 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 Gesamtsystemdichtigkeit eines Systems widerspiegelt (vgl. Kapitel 0) wird diese Komponente üblicherweise zur Berechnung des Wirkungsgrades eines Abdichtungssystems herangezogen.

Damit gilt für einen Gesamtwirkungsgrad  $W_{ges}$ :

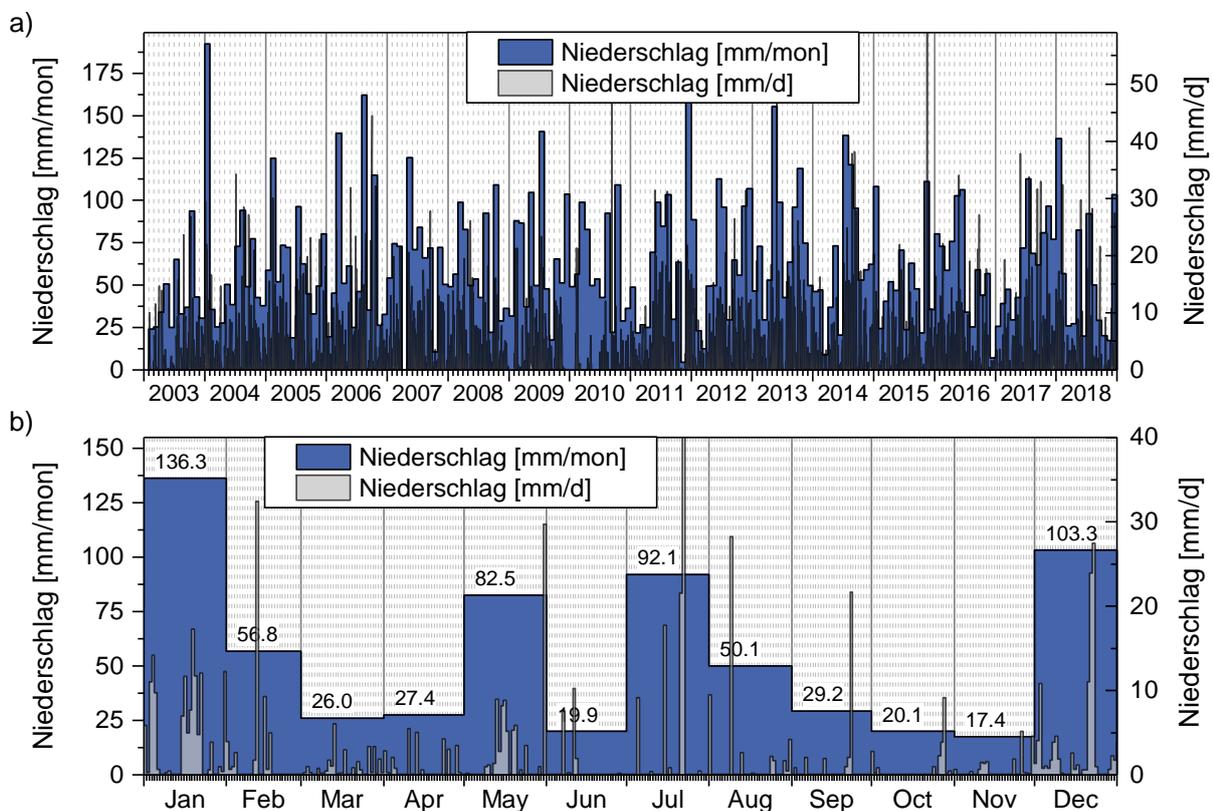
$$W_{ges} = \frac{(N - Q_{KBS})}{N} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

## II. Messergebnisse

### 4 Messergebnisse des Jahres 2018

#### 4.1 Niederschlag

Abbildung 5 zeigt die Niederschlagsverteilung für den Zeitraum 2003 – 2018 (Abb. 5a) und für das aktuelle Jahr 2018 (Abb. 5b). Der meiste Niederschlag wurde mit 136,3 mm im Januar registriert, gefolgt vom Dezember mit 103,3 mm. Der geringste monatliche Niederschlag fiel im November mit nur 17,4 mm. Auch die Monate Juni und Oktober waren niederschlagsarm. Mit einem gemessenen Gesamtniederschlag von 629,5 mm war das Jahr 2018 trockener als die Vorjahre ( $N_{a, 2017} = 754,6\text{mm}$ ,  $N_{a, 2016} = 722,4\text{ mm}$ ). Für die Bilanz kamen im Februar ( $N_{a, \text{Feb. } 2018} = 25,2\text{ mm}$ ) noch 31,6 mm durch die künstliche Beregnung während des Markierungsversuches auf dem Lysimeterfeld hinzu.



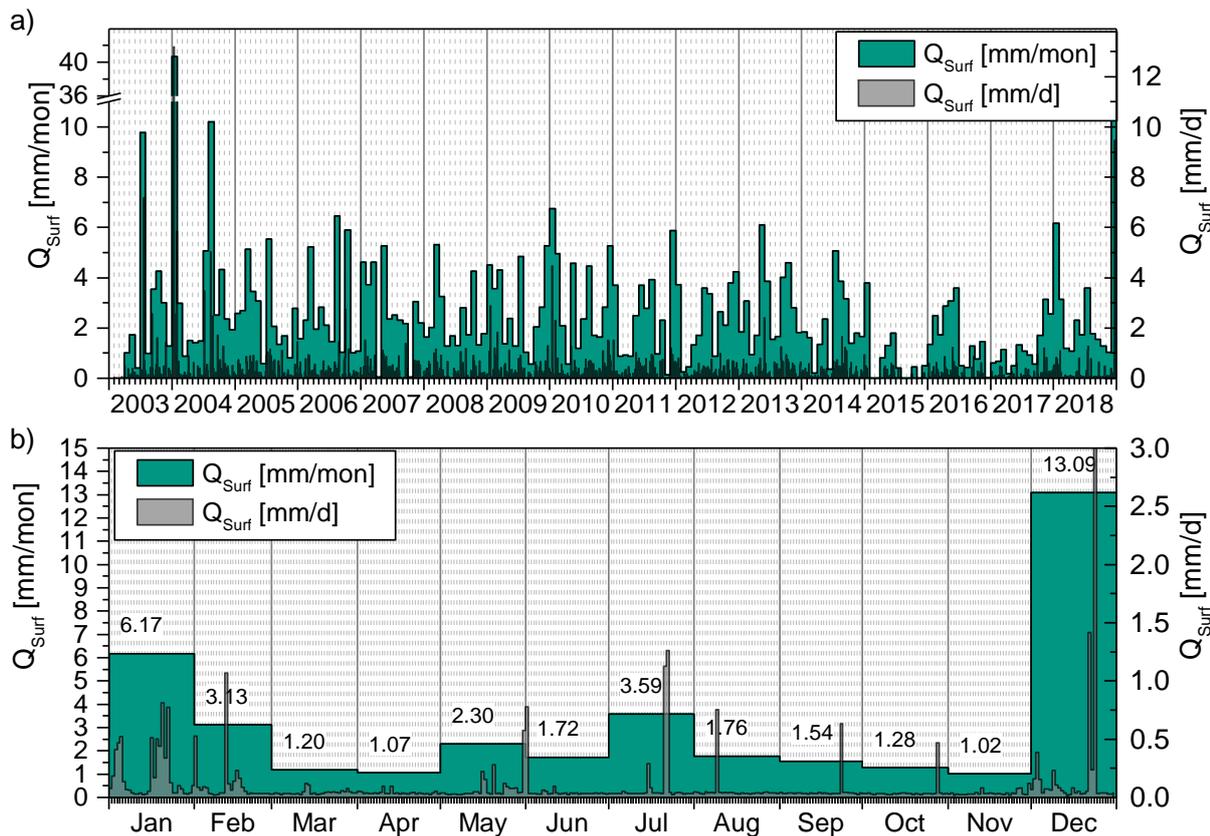
**Abb. 5:** a) Niederschlagsverteilung des Zeitraums 2003 bis 2018 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Niederschlagsverteilung für das Messjahr 2018 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst, Station 3925, Pforzheim-Ispringen.

#### 4.2 Oberflächenabfluss ( $Q_{\text{surf}}$ )

Der höchste monatliche Oberflächenabfluss im Jahr 2018 wurde mit 13,1 mm im Monat Dezember gemessen, gefolgt vom Januar mit 6,17 mm. Der geringste monatliche Oberflächenabfluss mit nur 1,02 mm wurde im November (Abb. 6) gemessen. Insgesamt wurden 37,87 mm Oberflächenabfluss für das Jahr

2018 registriert. Dies entspricht 5,7% des Jahresniederschlages. Der prozentuale Oberflächenabfluss ist somit im Vergleich zum Vorjahr etwas höher (1,9%).

Der monatlich summierte Oberflächenabfluss korreliert gut mit dem Niederschlag des jeweiligen Monats. Aufgrund der höheren Temperaturen in den Sommermonaten und den daraus resultierenden geringeren Bodenfeuchtegehalten fällt der Anteil des Oberflächenabflusses am Niederschlag für diese Monate geringer aus.



**Abb. 6:** a) Verteilung des Oberflächenabflusses ( $Q_{\text{Surf}}$ ) für den Zeitraum 2003 bis 2018 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Verteilung des Oberflächenabflusses für das Messjahr 2018 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate).

### 4.3 Oberer Kiesflächenfilter (OKF)

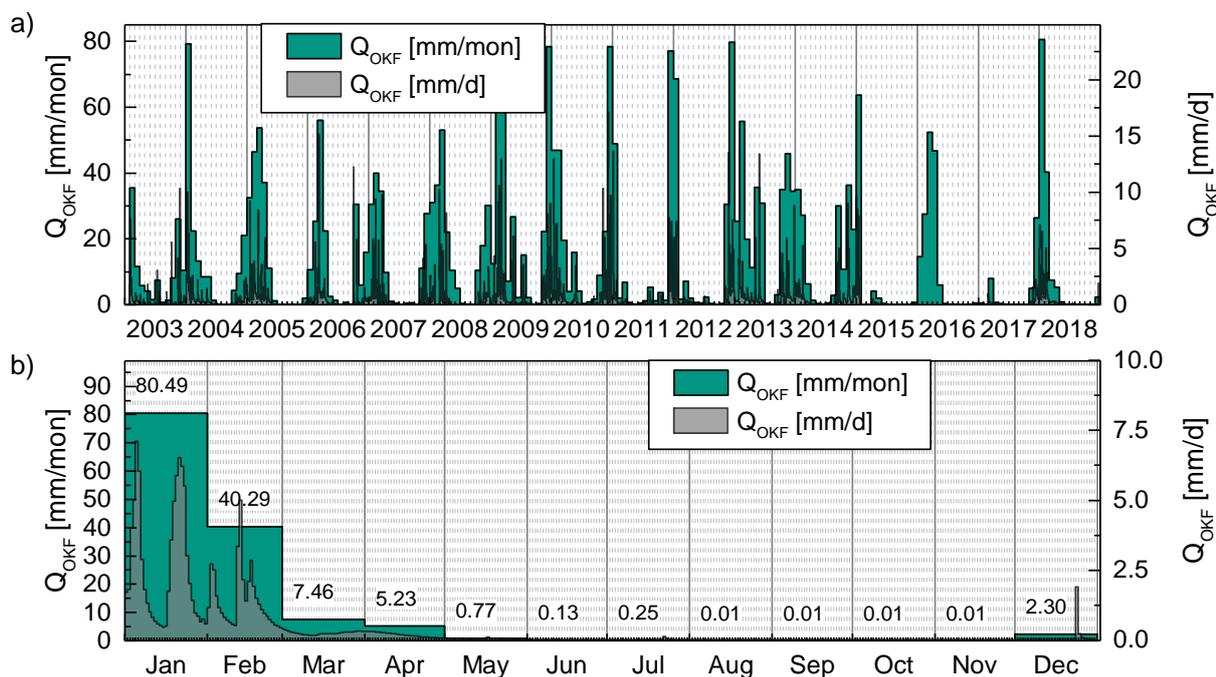
Die aufgezeichneten Wasserstände im Lysimeterbehälter des OKF weisen für das Jahr 2018 im Januar und Februar erneut einige kurze Lücken in der Datenreihe auf. Grund hierfür ist ein nicht vollständiges schließen der Ventile nach Entleerung. Durch die Möglichkeit zur Datenfernauslesung konnte die Anzahl der Datenlücken im Vergleich zum Vorjahr weiter reduziert werden. Dennoch vorhandene Datenlücken und fehlende Abflussmengen wurden anhand der vorhandenen Daten interpoliert. Ab Anfang Februar standen die Messdaten ohne Lücken zur Verfügung.

Der Hauptabfluss des OKF fand demnach im Januar statt. Abflussreichere Monate waren zusätzlich Februar und März (Abb. 7). Fast 95% des Abflusses wurde in diesen drei Monaten erfasst. Wie in den vergangenen Jahren fand der Hauptabfluss in den Wintermonaten während des Jahreswechsels statt. Ein Anstieg der Abflussrate zum Ende des Jahres 2019 wurde nicht beobachtet und wird für das erste Quar-

tal 2020 erwartet. Während eines Regenereignisses am 24.12.2018 kam es zu einem starken Oberflächenabfluss und mit einem Zeitversatz von wenigen Stunden auch zu einem starken Abfluss aus dem OKF. Dieses Ereignis war aber nicht ausreichend, um die Abflüsse aus dem OKF länger als einige Stunden zu erhöhen.

Von Mai bis Mitte November fand kein nennenswerter Abfluss aus dem OKF statt. Der Anteil der Abflüsse während dieser Zeit beträgt weniger als 1% des Gesamtjahresabflusses aus dem OKF.

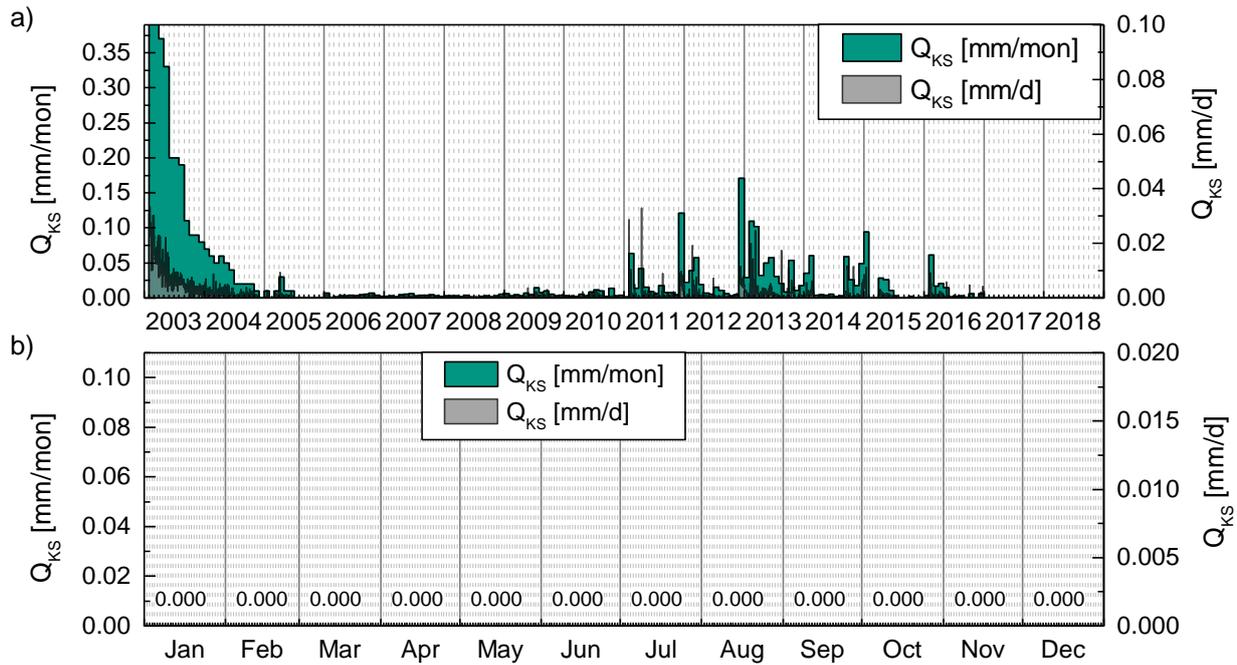
Errechnet wurde für 2018 ein Gesamtjahresabfluss aus dem OKF von 136,95 mm, was einem Anteil von 20,7% des Niederschlages entspricht. Dieser Anteil ist vergleichbar mit den Jahren 2016 (2016: 148,6 mm / 20,6%) und 2014 (2014: 173,4 mm / 22,8%).



**Abb. 7:** a) Verteilung des Abflusses der Dränschicht für den Zeitraum 2003 bis 2018 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Verteilung des Abflusses der Dränschicht für das Messjahr 2018 in mm/Monat (linke Ordinate)

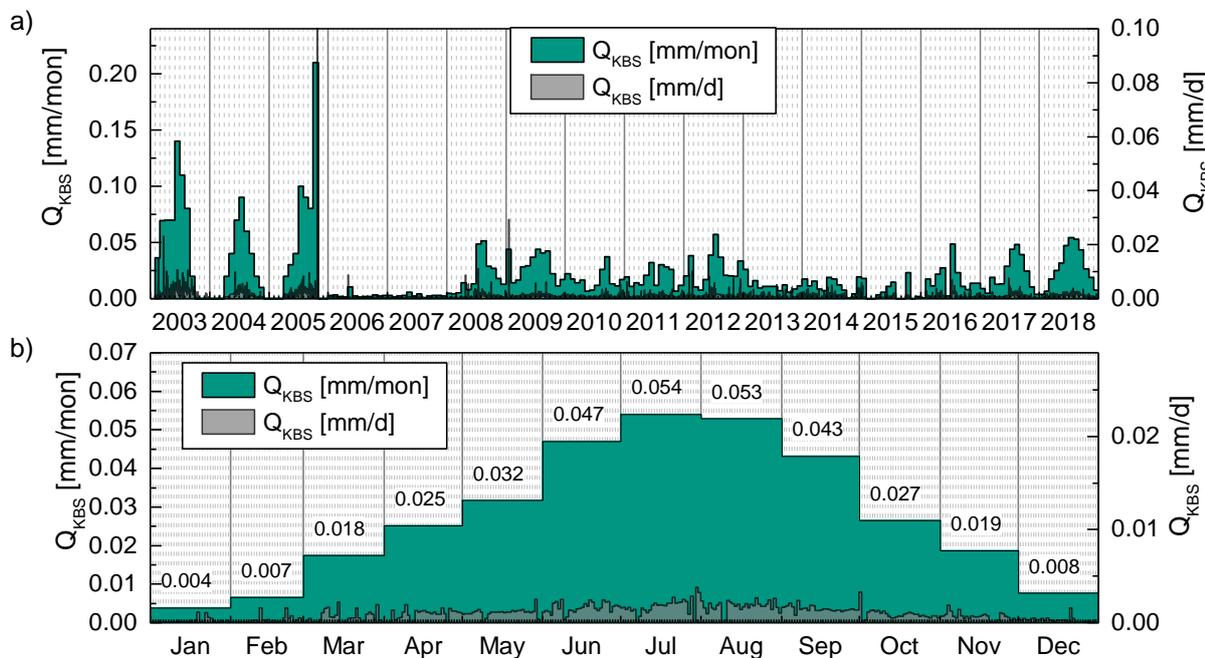
#### 4.4 Kapillarschicht (KS)

Die monatlichen Abflüsse der Kapillarschicht sind in Abbildung 8 dargestellt. Insgesamt wurde im Jahr 2018 erneut kein Abfluss aus dieser Schicht gemessen. Der Wasserstand im Lysimeterbehälter nimmt im Jahresverlauf, durch Verdunstung des darin enthaltenen Wassers, geringfügig ab. Zusätzlich war der Zulauf am Lysimeterbehälter bei allen Wartungsterminen vor Ort trocken. Möglich ist, dass dennoch eine sehr geringe Menge an Abfluss stattfand. Diese ist mit dem installierten Messsystem nicht erfassbar und hat keinen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis der Bilanzierung und Berechnung der Wirkungsgrade.



**Abb. 8:** a) Verteilung des Abflusses der Kapillarschicht für den Zeitraum 2003 bis 2018 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Verteilung des Abflusses der Kapillarschicht für das Messjahr 2018 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate).

### 4.5 Kapillarbrechende Schicht (KBS)



**Abb. 9:** a) Verteilung des Abflusses der Kapillarbruchschicht für den Zeitraum 2003 bis 2018 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Verteilung des Abflusses der Kapillarbruchschicht für das Messjahr 2018 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate).

In 2018 wurden insgesamt 0,34 mm Abfluss aus dieser Schicht gemessen. Dieser entspricht 0,05% des Jahresniederschlags und war somit leicht höher als im Vorjahr ( $Q_{KBS}$  2017: 0,26 mm / 0,034%). Der Hauptabfluss fand während der Sommermonate im Zeitraum von Juni bis September statt. Der höchste monatliche Abfluss wurde mit 0,05 mm für den Juli ermittelt (Abb. 9).

Der Anteil des Abflusses aus der KBS am Niederschlag sowie der jahreszeitliche Verlauf bewegen sich im für diese Schicht typischen Bereich.

## 4.6 Evapotranspiration $ET_a$

Auch im Jahr 2018 fanden zur Bestimmung der monatlichen Evapotranspiration nicht genügend Bodenfeuchtemessungen statt. In der Gesamt-Lysimeterbilanz kann  $ET_a$  damit nicht berücksichtigt werden. Sie wird stattdessen wieder als gemeinsames Glied von  $ET_a$  + Bodenfeuchte als Anteil des Gesamtjahresniederschlags angegeben. Die Bodenfeuchtemessungen werden in Kapitel 6 dargestellt.

Die Evapotranspiration beträgt für das Beobachtungsjahr 2018 zusammen mit der enthaltenen Bodenfeuchte 486 mm. Dies entspricht 73,5% des Jahresniederschlags. Sie ist somit ähnlich hoch wie die Vergleichswerte der Vorjahre.

# 5 Bewertung der Oberflächenabdichtung für das Jahr 2018

## 5.1 Lysimeter-Wasserhaushaltsbilanz

Die monatlichen prozentualen Anteile der einzelnen Komponenten der Wasserbilanz für den Untersuchungszeitraum 2018 sind detailliert in Tabelle 2 aufgelistet.

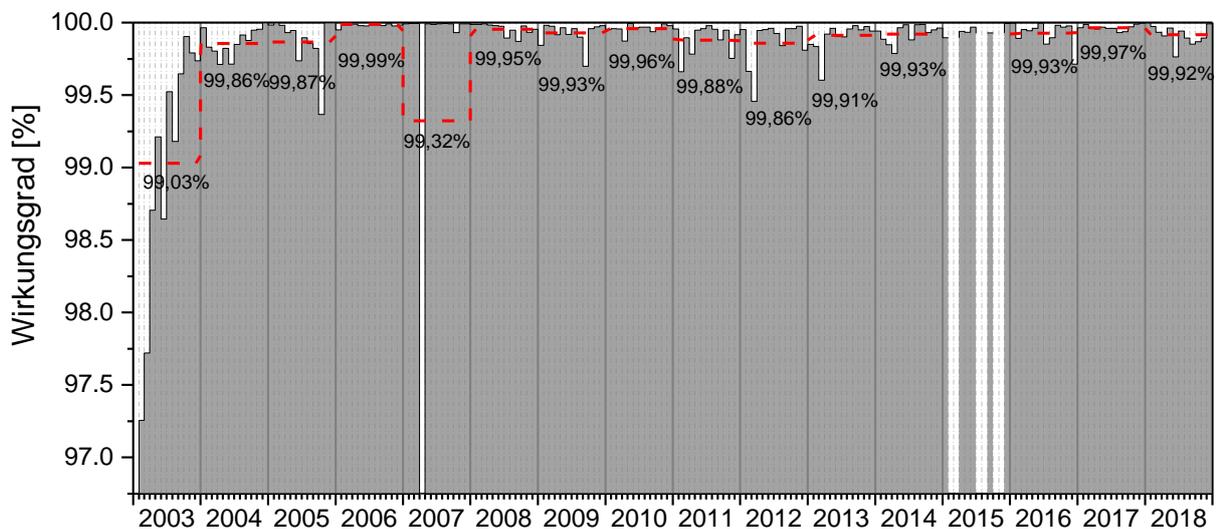
**Tab. 2:** Monatliche Abflusswerte der Abdichtungskomponenten in mm/Mon und im prozentualen Verhältnis zum Jahresniederschlag  $N_a$  2018.

Monat	$Q_{Surf}$		OKF		KS		KBS		Niederschlag
	mm/Mon	% von $N$	mm/Mon	% von $N$	mm/Mon	% von $N$	mm/Mon	% von $N$	mm/Mon
Januar	6,17	4,52	80,49	59,05	0,000	0,000	0,004	0,003	136,3
Februar	3,13	5,51	40,29	70,94	0,000	0,000	0,007	0,012	56,8
März	1,20	4,60	7,46	28,69	0,000	0,000	0,018	0,067	26,0
April	1,07	3,91	5,23	19,09	0,000	0,000	0,025	0,092	27,4
Mai	2,03	2,79	0,77	0,94	0,000	0,000	0,032	0,039	82,5
Juni	1,72	8,67	0,13	0,66	0,000	0,000	0,047	0,237	19,9
Juli	3,59	3,90	0,25	0,27	0,000	0,000	0,054	0,059	92,1
August	1,76	3,51	0,01	0,02	0,000	0,000	0,053	0,106	50,1
September	1,54	5,28	0,01	0,02	0,000	0,000	0,043	0,148	29,2
Oktober	1,28	6,37	0,01	0,03	0,000	0,000	0,027	0,132	20,1
November	1,02	5,86	0,01	0,04	0,000	0,000	0,019	0,108	17,4
Dezember	13,09	12,67	2,30	2,23	0,000	0,000	0,008	0,007	103,3
<b>Gesamt-Abfluss</b>	<b>37,87</b>	<b>5,73</b>	<b>136,95</b>	<b>20,72</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,335</b>	<b>0,051</b>	<b>661,1</b>
<b><math>ET_a</math> &amp; Bodenfeuchte</b>	<b>485,94</b>								<b>73,51</b>

## 5.2 Asphalttschicht

Der Wirkungsgrad der Asphalttschicht hat sich in den vergangenen Jahren prozentual gesehen nur gering verändert, dennoch sind gewisse Zusammenhänge erkennbar (Abb. 10). Direkt nach Umsetzen des Messcontainers im Spätjahr 2005 sind die Wirkungsgrade sehr hoch (auch 2007, wenn man den sehr niederschlagsarmen April vernachlässigt, Mittelwert November 2005 bis Juni 2008: 99,99%). In der zweiten Jahreshälfte 2008 sinkt dann der Wirkungsgrad. Dieser pendelt sich in den Jahren danach auf einem leicht niedrigeren Niveau ein, verglichen mit dem Zeitraum von November 2005 bis Juni 2008 (Mittelwert Juli 2008 bis Dezember 2014: 99,91%). Die Entwicklung der Wirkungsgrade lässt sich gut mit der Mulde in den Abflussrohren korrelieren, die höchstwahrscheinlich im Zeitraum direkt nach dem Umsetzen des Messcontainers Ende 2005 entstanden ist. Die Mulde wurde am 03.11.2013 durch eine Kamerabefahrung bestätigt. Es hat bis ca. 2008 gedauert bis sich die Mulde mit den geringen Abflüssen der Kapillarsperre gefüllt hatte. Ab diesem Zeitpunkt wird, über das Jahr gemittelt, regelmäßig abgeführt. Das Niveau der durchschnittlichen jährlichen Wirkungsgrade ist nach 2008 erkennbar gesunken. Durch die Datenlücken 2015 lässt sich kein Jahresdurchschnitt ermitteln. Die Wirkungsgrade der Monate, die bestimmbar waren, haben z. T. einen gewissen Fehler. Zwar konnten nicht immer die Abflüsse des gesamten Monats berücksichtigt werden, aber sie liegen in einem mit den Vorjahren vergleichbaren Bereich.

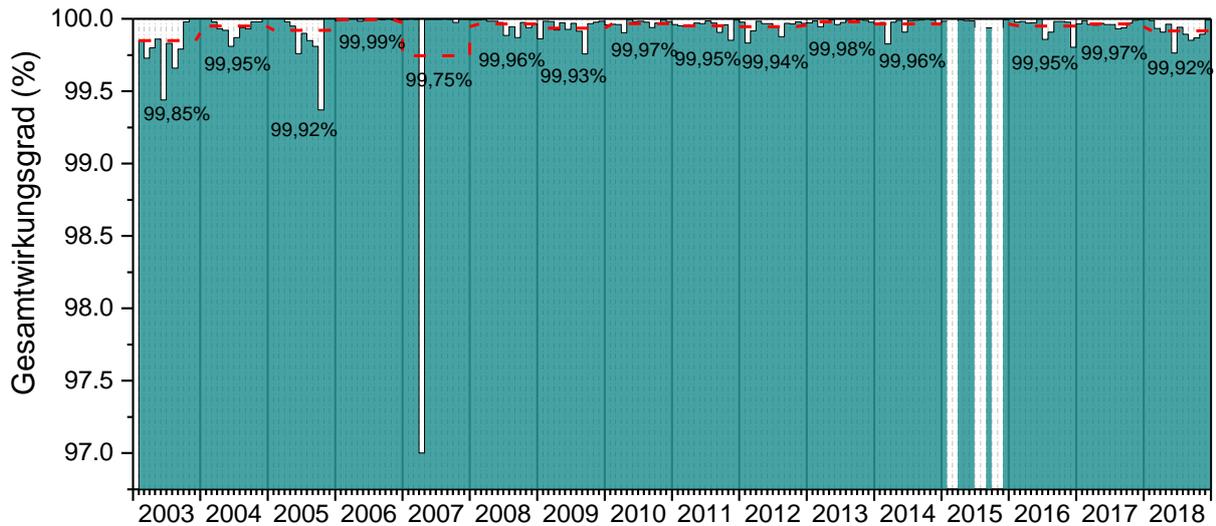
Für das Jahr 2018 wurde ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von 99,92% ermittelt. Dieser Wert ist geringfügig niedriger als der des Vorjahres.



**Abb. 10:** Grafik über die Wirkungsgrade der Asphalttschicht aus dem Messzeitraum 2003 - 2018. Die rote Kurve stellt die Mittel der Monatswerte (grauer Bereich) dar. Der Einbruch des Wirkungsgrades im April 2007 auf 92,7% resultiert aus einer sehr geringen Menge an Niederschlag in diesem Monat (0,1 mm). Berechnungsgrundlage: Formel (2).

### 5.3 Gesamtsystem

Analog zum Wirkungsgrad der Asphaltsschicht ist der Wirkungsgrad des Gesamtsystems in Abbildung 11 dargestellt. Auch hier sind im Prinzip keine Auffälligkeiten im Vergleich zu den Vorjahren zu erkennen. Da im Jahr 2017 und 2018 kein Abfluss aus der KS stattfand, entspricht der Wirkungsgrad des Gesamtsystems dem Wirkungsgrad der Asphaltsschicht (vgl. Formel 2 und 3 in Abschnitt 3). Eine tabellarische Darstellung aller berechneten Wirkungsgrade findet sich in Anhang 3.



**Abb. 11:** Grafik über die Wirkungsgrade des Gesamtsystems aus dem Messzeitraum 2003 - 2018. Die rote Kurve stellt die Jahresmittel dar und der grüne Bereich die Monatswerte. Der Einbruch des Wirkungsgrades im April 2007 auf 97,0% resultiert aus einer sehr geringen Menge an Niederschlag in diesem Monat (0,1 mm). Für 2015 konnte aufgrund von Datenlücken kein Durchschnitt berechnet werden.

## 6 Neutronensondenmessung zur Bestimmung der Bodenfeuchte im Jahr 2018

Im Jahr 2018 wurden vier Stichtagsmessungen der Bodenfeuchte durchgeführt (Abb. 12).  $P_o$  und seit Mitte 2015 auch  $P_m$  sind aufgrund von Vernässung im Messrohr nicht bis in die letzten Schichttiefen befahrbar.

Die ersten zwei Messungen für das Jahr 2018 fanden im Zusammenhang mit dem im Februar durchgeführten Markierungsversuch statt. Eine Messung fand am 8. Februar einige Tage vor dem Versuch statt. Die zweite am Tag nach der Eingabe der Markierungsstoffe. Beide Messungen zeigen im Vergleich einen ähnlichen Verlauf der Bodenfeuchte mit der Tiefe. Eine, wenn auch nur geringe, Zunahme der Wassergehalte durch die künstliche Beregnung während des Versuchs konnte ebenfalls beobachtet werden.

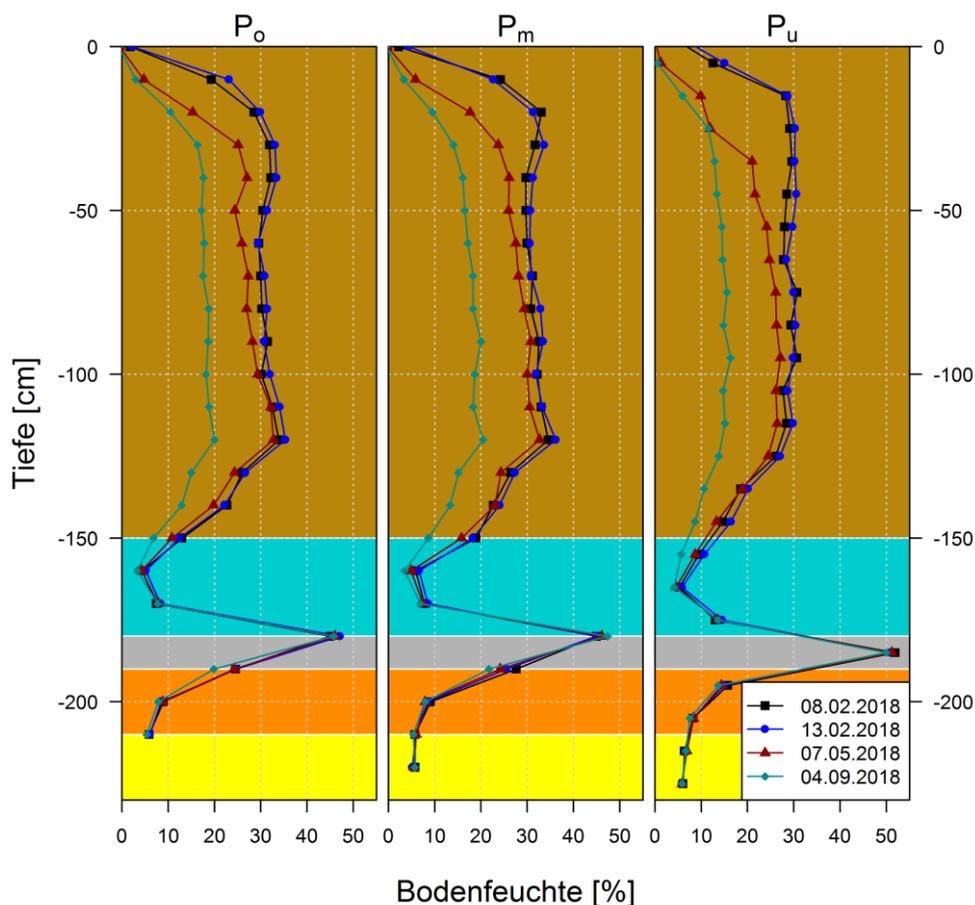
An  $P_o$  und  $P_m$  erreicht die Bodenfeuchte in der Tiefe von 30 cm einen Wert von etwa 30% und bleibt bis in die Tiefe von 120 cm relativ konstant. An  $P_o$  und  $P_m$  ist hierbei eine leichte Zunahme um wenige Prozentpunkte zu beobachten. Besonders deutlich ist dies in der Tiefe zwischen 100 cm und 120 cm. An  $P_u$  sinkt die Bodenfeuchte in diesem Tiefenbereich eher etwas ab.

Ab der Tiefe von 120 cm findet eine Abnahme der Bodenfeuchte um 15% - 20% in der Tiefe von 150 cm und somit der Grenze zwischen Wurzelboden und OKF statt (~18% an  $P_m$ ).

Im darunterliegenden OKF nimmt der Bodenfeuchtegehalt noch weiter ab. In der Asphalttschicht werden, bedingt durch das Messprinzip, höhere Wassergehalte gemessen. Unterhalb der Asphalttschicht wurden ganzjährig Bodenfeuchtegehalte unter 10% gemessen. In diesem Bereich sind kaum Jahreszeitliche Schwankungen zu beobachten.

Während des Sommers fand eine Austrocknung der Rekultivierungsschicht und OKF statt, was auch durch das Versiegen des Abfluss aus dem OKF belegt wird. Bei der dritten Messung am 7. Mai ist der sinkende Bodenfeuchtegehalt in den oberen 30 bis 50 cm der Rekultivierungsschicht deutlich erkennbar. Hier lagen die Bodenfeuchtegehalte unter denen der ersten beiden Messungen.

Bei der vierten Bodenfeuchtemessung am 4. September hatte der Bodenfeuchtegehalt im OKF weiter abgenommen. Zu dieser Zeit fand auch kein messbarer Abfluss aus dem OKF mehr statt. Insgesamt lagen die Wassergehalte in der Rekultivierungsschicht bei weniger als 20%.



**Abb. 12:** Darstellung der Bodenfeuchteprofile für die Messstellen  $P_o$  (links),  $P_m$  (mitte) und  $P_u$  (rechts) zu den Zeitpunkten 08.02. (schwarze Linie), 13.02. (blaue Linie), 07.05. (rote Linie) und 04.09.2018 (türkise Linie). (Die hinterlegte Farbgebung entspricht der ungefähren Tiefenlage der Schichten, vgl. Abb. 3).

## 7 Zusammenfassung für das Jahr 2018

Im Jahr 2018 erreichte die Kapillarsperre einen Wirkungsgrad von 99,92%. Die Wirkungsgrade der Asphaltschicht und des Gesamtsystems (respektive der Kapillarsperre) unterscheiden sich für das Jahr 2018 nicht grundlegend von den Vorjahren. Aufgrund der im Jahr 2018 erneut ausgebliebenen Abflüsse aus der Kapillarschicht sind der Wirkungsgrad der Asphaltschicht und des Gesamtsystems gleich.

Wie in den Vorjahren wurde zur Bilanzierung auf die Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes für die Wetterstation Pforzheim-Ispringen zurückgegriffen. Aufgrund der Entfernung zwischen Wetterstation und Lysimeter sind Abweichungen der Niederschlagsmenge zwischen den beiden Standorten nicht auszuschließen. Die gute Korrelation von Oberflächenabfluss am Lysimeter und gemessener Niederschläge lässt die Verwendung dieser Daten plausibel erscheinen.

Für das Jahr 2018 war kein korrelierendes Verhalten von OKF und KS feststellbar. Aus KS fand ganzjährig kein Abfluss statt. Die Abflüsse aus der KBS fanden hauptsächlich während der Sommermonate mit einem Abflussmaximum im Juli statt. Sie finden somit wie in den vergangenen Jahren mehrere Monate zeitversetzt zum Abfluss aus dem OKF statt.

Mit einer Deponiesickerwasserneubildungsrate von 0,05% des Niederschlages 2018 (0,34 mm von 661,1 mm Niederschlag) liegt diese im Bereich der Vorjahre. Das Gesamtsystem ist somit nach wie vor als positiv zu bewerten.

---

Prof. Dr. N. Goldscheider

## Literatur und bisherige Berichte

- 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.
- GIURGEA V., HÖTZL H., BREH W. & GERLACH A. (2003): Neutronensondenmessungen der Bodenfeuchte zur Langzeitüberwachung von Deponieoberflächenabdichtungen. – Beitrag (Artikel und öffentlicher Vortrag) zum Workshop *Innovative Feuchtemessung in Forschung und Praxis*, 3.-4. Juli 2003, Karlsruhe, veröffentlicht in der Zeitschrift „Boden und Wasser“, Aedificatio Verlag, Freiburg (im Druck).
- HEERTEN G. & REUTER E. (2009): Oberflächenabdichtungen mit Bentonitmatten. – Beitrag (Artikel und öffentlicher Vortrag) zur 25. Fachtagung „Die sichere Deponie 2009 – Abdichtung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen“, SKZ - ConSem GmbH, Würzburg und AK GWS Arbeitskreis Grundwasserschutz e. V, Berlin
- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2009): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld LYSIMETER – Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für den Messzeitraum Januar – Dezember 2008 [Oktober 2009, unveröffentlichter Bericht, CD]
- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2010): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld LYSIMETER – Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für den Messzeitraum Januar – Dezember 2009 [September 2010, unveröffentlichter Bericht, CD]
- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2011): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld LYSIMETER – Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für den Messzeitraum Januar – Dezember 2010 [Juni 2011, unveröffentlichter Bericht, CD]
- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2012): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld LYSIMETER – Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für den Messzeitraum Januar – Dezember 2011 [April 2012, unveröffentlichter Bericht, CD]
- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2013): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld LYSIMETER – Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für den Messzeitraum Januar – Dezember 2012 [April 2013, unveröffentlichter Bericht, CD]

- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2014): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld LYSIMETER – Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für den Messzeitraum Januar – Dezember 2013 [März 2014, unveröffentlichter Bericht, CD]
- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2015a): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld LYSIMETER – Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für den Messzeitraum Januar – Dezember 2014 [März 2015, unveröffentlichter Bericht, CD]
- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2015b): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld LYSIMETER – Zwischenbericht zur Testphase nach Instandsetzung des Lysimetersystems [November 2015, unveröffentlichter Bericht]
- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2016): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld LYSIMETER – Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für den Messzeitraum Januar – Dezember 2015 [März 2016, unveröffentlichter Bericht, CD]
- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2017): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Hohberg – Lysimeter-Testfeld, Messtechnische Bauwerksüberwachung der Oberflächenabdichtung mittels Lysimeter, Messzeitraum Januar – Dezember 2016 [März 2017, unveröffentlichter Bericht, CD]
- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2018): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Hohberg – Lysimeter-Testfeld, Messtechnische Bauwerksüberwachung der Oberflächenabdichtung mittels Lysimeter, Messzeitraum Januar – Dezember 2017 [März 2018, unveröffentlichter Bericht, CD]
- LEHRSTUHL FÜR ANGEWANDTE GEOLOGIE (2002): Hausmülldeponie Pforzheim – Hohberg, Lysimeter Testfelder, Anforderungsprofil.– 8 S. [April 2002, unveröffentlicht].
- LEHRSTUHL FÜR ANGEWANDTE GEOLOGIE (2002): Hausmülldeponie Pforzheim – Hohberg, Lysimeter Testfelder, Fachtechnische Begleitung und Überprüfung der Bauplanung.– 5 S., 3 Abb., [April 2002, unveröffentlicht].
- LEHRSTUHL FÜR ANGEWANDTE GEOLOGIE (2004a): Hausmülldeponie Pforzheim – Hohberg, Fachliche Begleitung der Bauphase des Lysimeter - Testfeldes, September 2002 – Dezember 2003, Bericht und Fotodokumentation.– II + 177 S., 436 Abb., [Februar 2004, unveröffentlicht].
- LEHRSTUHL FÜR ANGEWANDTE GEOLOGIE (2004b): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Hohberg – Oberflächenabdichtung. Testfeld-LYSIMETER. Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für die Messperiode Februar bis Dezember 2003. – III + 23 S., 12 Abb., [April 2004, unveröffentlicht, Bericht].
- LEHRSTUHL FÜR ANGEWANDTE GEOLOGIE (2004c): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Hohberg – Oberflächenabdichtung. Testfeld-LYSIMETER. Jahreszwischenbericht zur messtechnischen Bau-

werksüberwachung mittels Lysimeter für den Untersuchungszeitraum Januar bis Juni 2004. – III + 24 S., 10 Abb., [Juli 2004, unveröffentlicht, Bericht].

LEHRSTUHL FÜR ANGEWANDTE GEOLOGIE (2005): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Hohberg – Oberflächenabdichtung. Testfeld-LYSIMETER. Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für den Messzeitraum Januar bis Dezember 2004. – III + 22 S., 9 Abb., [April 2005, unveröffentlicht, Bericht].

LEHRSTUHL FÜR ANGEWANDTE GEOLOGIE (2006a): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Hohberg – Oberflächenabdichtung. Erfassung und Dokumentation der Messdaten der Klimastation. – Messzeitraum: Januar-Dezember 2005, [April 2006, unveröffentlicht, Bericht].

LEHRSTUHL FÜR ANGEWANDTE GEOLOGIE (2006b): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Hohberg – Messzeitraum: Januar-Dezember 2005, [April 2006, unveröffentlicht, Bericht].

LEHRSTUHL FÜR ANGEWANDTE GEOLOGIE (2007): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim-Hohberg – Erfassung und Dokumentation der Messdaten des Lysimeters und der Klimastation für das Messjahr 2006, [Juni 2007, unveröffentlicht, Bericht, CD].

LEHRSTUHL FÜR ANGEWANDTE GEOLOGIE (2008a): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim-Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld-LYSIMETER - Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für den Messzeitraum Januar - Dezember 2006 [November 2008, nachbeauftragter, unveröffentlicher Bericht, CD].

LEHRSTUHL FÜR ANGEWANDTE GEOLOGIE (2008b): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld\_LYSIMETER – Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für den Messzeitraum Januar – Dezember 2007 [Dezember 2008, nachbeauftragter, unveröffentlicher Bericht, CD]

LEHRSTUHL FÜR ANGEWANDTE GEOLOGIE (2010): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim-Hohberg – Erfassung und Dokumentation der Messdaten des Lysimeters und der Klimastation für das Messjahr 2009, [September 2010, unveröffentlicht, Bericht, CD].

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.

MATTHEß, G. & UBELL, K. (1983): Allgemeine Hydrogeologie - Grundwasserhaushalt. - Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 1: 438 S.; Borntraeger Verlag, Berlin, Stuttgart.

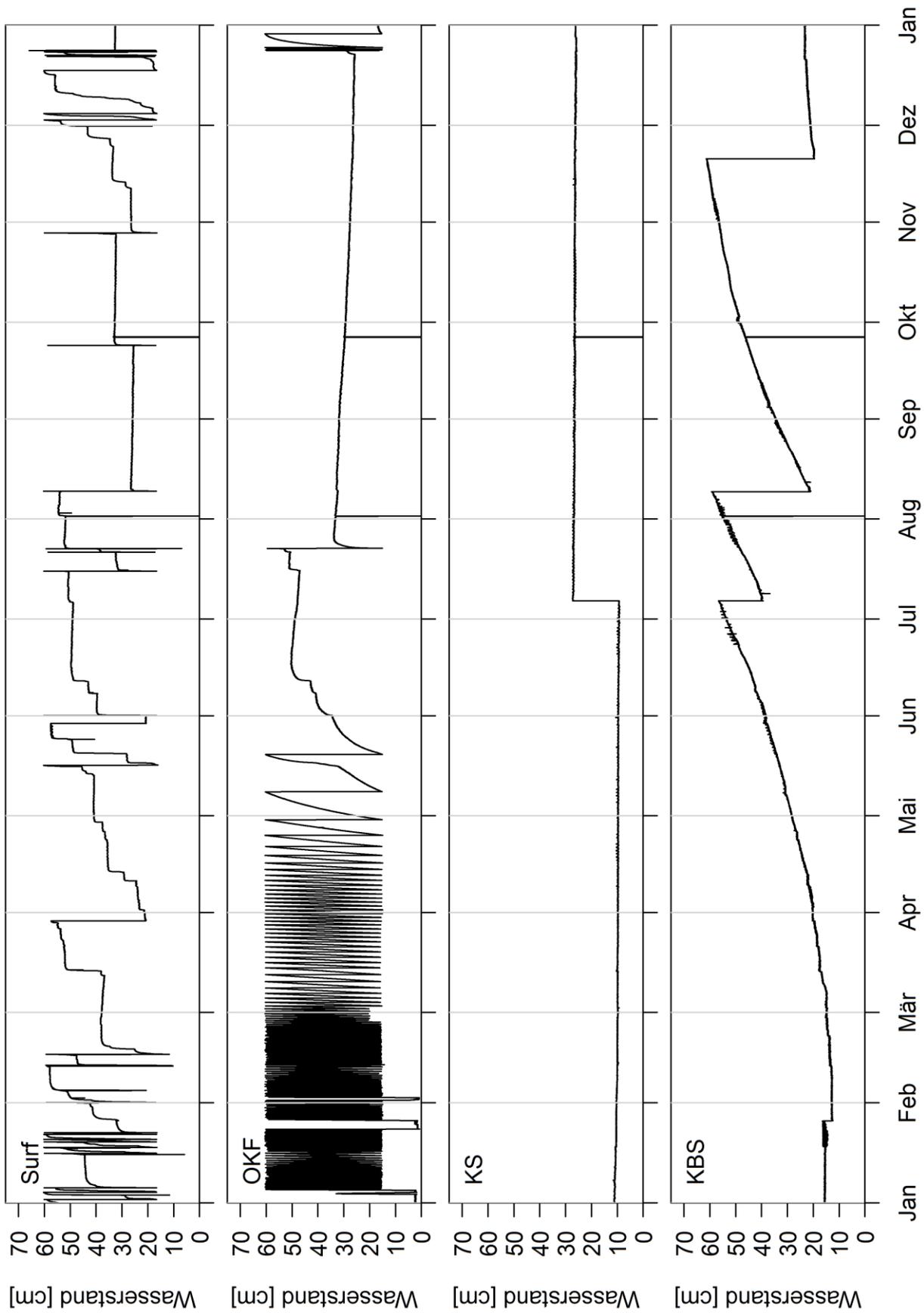
SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1992): Lehrbuch der Bodenkunde. - 491 S., 13. durchgesehene Auflage; Enke Verlag, Stuttgart.

SCHRÖDER, P. & BERGER, K (2004): Das Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Modell – Benutzerhandbuch für die deutsche Version 3. 4., überarbeitete Auflage zur deutschen HELP-Version 3.80 D, 117 S., Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg, Hamburg

TA SIEDLUNGSABFALL (1993): Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. - Bundesanzeiger: 117 S.; Köln.

# Anhang

Anhang 1: Darstellung der Wasserstände der einzelnen Lysimeterabflüsse über das Messjahr 2018



**Anhang 2:** Tabellen zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und der Bodenfeuchte 2003-2018.

N: Niederschlag, S: Sonderinput<sup>1</sup>,  $\Sigma$ : Summe der Abflüsse, % N: prozentualer Anteil der Abflusssummen am Niederschlag, Diff: Bodenfeuchtedifferenz, ET<sub>a</sub>: Evapotranspiration

2003	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	$\Sigma$	% 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 <sub>Surf</sub>				1,01	1,72	0,40	9,78	0,99	3,54	4,27	3,01	1,27	25,99	5,6
Q <sub>OKF</sub>		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 <sub>KS</sub>		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 <sub>kBS</sub>		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 <sub>a</sub>		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	$\Sigma$	% 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 <sub>Surf</sub>	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 <sub>OKF</sub>	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 <sub>KS</sub>	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 <sub>kBS</sub>	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 <sub>a</sub>	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	$\Sigma$	% 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 <sub>Surf</sub>	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 <sub>OKF</sub>	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 <sub>KS</sub>	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 <sub>kBS</sub>	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 <sub>a</sub>	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	$\Sigma$	% 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 <sub>Surf</sub>	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 <sub>OKF</sub>	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 <sub>KS</sub>	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 <sub>kBS</sub>	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 <sub>a</sub>								555,16						73,09

2007	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	$\Sigma$	% 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 <sub>Surf</sub>	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 <sub>OKF</sub>	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 <sub>KS</sub>	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 <sub>kBS</sub>	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 <sub>a</sub>								564,03						74,93

<sup>1</sup> 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 <sub>Surf</sub>	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 <sub>OKF</sub>	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 <sub>KKS</sub>	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 <sub>KBS</sub>	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 <sub>a</sub>	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 <sub>Surf</sub>	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 <sub>OKF</sub>	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 <sub>KKS</sub>	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 <sub>KBS</sub>	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 <sub>a</sub>	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 <sub>Surf</sub>	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 <sub>OKF</sub>	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 <sub>KKS</sub>	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 <sub>KBS</sub>	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 <sub>a</sub>	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 <sub>Surf</sub>	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 <sub>OKF</sub>	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 <sub>KKS</sub>	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 <sub>KBS</sub>	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 <sub>a</sub>	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	88,70	100
Q <sub>Surf</sub>	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 <sub>OKF</sub>	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 <sub>KKS</sub>	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 <sub>KBS</sub>	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 <sub>a</sub>	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 <sub>Surf</sub>	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 <sub>OKF</sub>	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 <sub>KKS</sub>	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 <sub>KBS</sub>	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 <sub>a</sub>	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 <sub>Surf</sub>	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 <sub>OKF</sub>	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 <sub>Ks</sub>	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 <sub>kBS</sub>	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 <sub>a</sub>	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 <sub>Surf</sub>	3,78	-	-	0,81	1,31	1,80	0,40	-	-	0,44	-	0,50	9,05	1,40
Q <sub>OKF</sub>	63,66	-	-	4,08	1,96	0,28	0,01	-	-	0,00	-	0,73	70,72	10,95
Q <sub>Ks</sub>	0,094	-	-	0,028	0,026	0,011	0,003	-	-	0,002	-	0,001	0,165	0,026
Q <sub>kBS</sub>	0,018	-	-	0,003	0,005	0,011	0,015	-	-	0,014	-	0,002	0,068	0,010
Diff + ET <sub>a</sub>	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 <sub>Surf</sub>	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 <sub>OKF</sub>	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 <sub>Ks</sub>	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 <sub>kBS</sub>	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 <sub>a</sub>	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 <sub>Surf</sub>	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 <sub>OKF</sub>	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 <sub>Ks</sub>	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 <sub>kBS</sub>	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 <sub>a</sub>	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 <sub>Surf</sub>	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 <sub>OKF</sub>	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 <sub>Ks</sub>	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 <sub>kBS</sub>	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 <sub>a</sub>	485,9												73,51	

**Anhang 3:** Gesamtwirkungsgrad  $W_{ges}$  (%) der Oberflächenabdichtung und Niederschlagsmengen (mm) für den Untersuchungszeitraum 2003 – 2018.

<b><math>W_{ges}</math> (Niederschlag)</b>								
<b>Jahr</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>
	% (mm)							
<b>Jan</b>	--- (---)	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)
<b>Feb</b>	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)
<b>Mrz</b>	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)
<b>Apr</b>	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)
<b>Mai</b>	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)
<b>Jun</b>	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)
<b>Jul</b>	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)
<b>Aug</b>	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)
<b>Sept</b>	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)
<b>Okt</b>	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)
<b>Nov</b>	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)
<b>Dez</b>	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)
<b>Jahr</b>	<b>99,85 (461,5)</b>	<b>99,95 (743,3)</b>	<b>99,92 (766,6)</b>	<b>99,99 (759,6)</b>	<b>99,75 (752,7)</b>	<b>99,96 (721,8)</b>	<b>99,94 (824,7)</b>	<b>99,96 (883,4)</b>

<b><math>W_{ges}</math> (Niederschlag)</b>								
<b>Jahr</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>
	% (mm)	% (mm)	% (mm)	% (mm)	% (mm)	% (mm)	% (mm)	% (mm)
<b>Jan</b>	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)
<b>Feb</b>	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)
<b>Mrz</b>	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)
<b>Apr</b>	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)
<b>Mai</b>	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)
<b>Jun</b>	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)
<b>Jul</b>	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)
<b>Aug</b>	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)
<b>Sept</b>	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)
<b>Okt</b>	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)
<b>Nov</b>	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)
<b>Dez</b>	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)
<b>Jahr</b>	<b>99,95 (736,7)</b>	<b>99,95 (785,8)</b>	<b>99,98 (901,5)</b>	<b>99,96 (761,8)</b>	<b>--- (645,9)</b>	<b>99,95 (722,4)</b>	<b>99,97 (754,6)</b>	<b>99,91 (661,1)</b>

**Anhang 4:** beigelegt als CD  
 Datenablage  
 Digitaler Bericht  
 Auswertung