

# **Hausmülldeponie Hohberg**

## **Lysimeter - Testfeld**

22.03.2018

Messtechnische Bauwerksüberwachung  
der Oberflächenabdichtung  
mittels Lysimeter

Messjahr 2017

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>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>II</b>
<b>Tabellenverzeichnis</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 .....	3
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 2017</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 2017</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 2017</b>	<b>16</b>
<b>7 Zusammenfassung für das Jahr 2017</b>	<b>18</b>
<b>Literatur</b>	<b>19</b>
<b>Anhang</b>	<b>22</b>

## **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 1: Geographische Lage der HMD 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 2017.....	10
Abb. 6: Verteilung des Oberflächenabflusses für den Zeitraum 2003 bis 2017	
Abb. 7: Verteilung des Abflusses der Dränschicht für den Zeitraum 2003 bis 2017 .....	12
Abb. 8: Verteilung des Abflusses der Kapillarschicht für den Zeitraum 2003 bis 2017.....	13
Abb. 9: Verteilung des Abflusses der Kapillarbruchsicht für den Zeitraum 2003 bis 2017.....	13
Abb. 10: Wirkungsgrade der Asphalttschicht 2003 - 2017.....	15
Abb. 11: Wirkungsgrade des Gesamtsystems 2003 - 2017 .....	16
Abb. 12: Bodenfeuchteprofile am 23.05., 18.09., 13.11. und 19.12.2017.....	17

## **Tabellenverzeichnis**

Tab. 1: Übersicht über die Baumaßnahmen und Messungen am Lysimeter .....	2
Tab. 2: Monatliche Abflusswerte der Abdichtungskomponenten 2017. ....	14

## **Anhang**

Anhang 1: Wasserstände der Lysimeterabflussbehälter 2017 .....	22
Anhang 2: Bodenwasserbilanzen der monatlichen Abflüsse (2003 – 2017) .....	23
Anhang 3: Gesamtwirkungsgrad der Oberflächenabdichtung (2003 – 2017). ....	26
Anhang 4: Elektronischer Anhang .....	CD

# 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 2017 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

## **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**

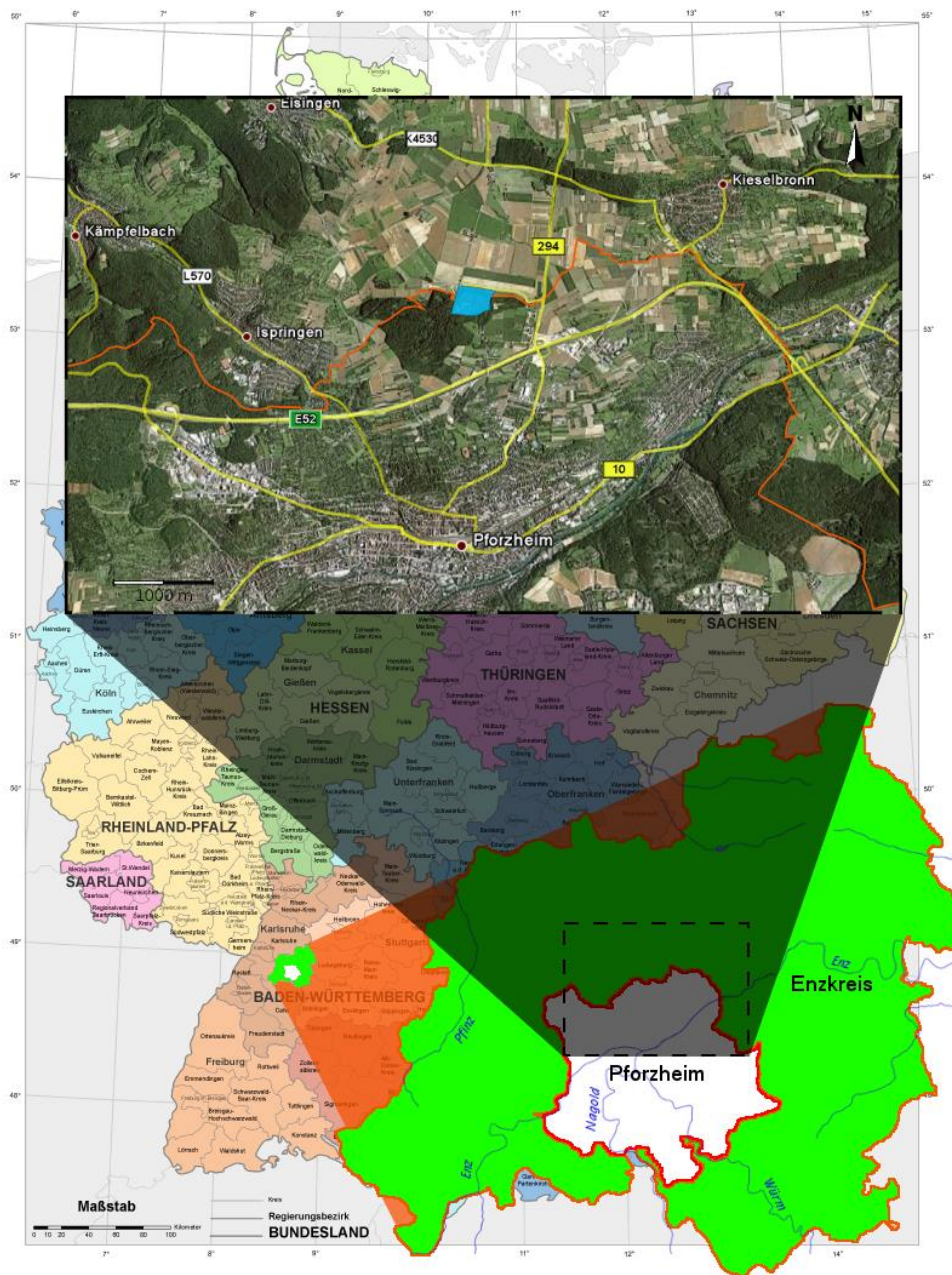
Das Großlysimeter befindet sich im nordwestlichen Bereich des Bauabschnitts I der Deponieoberflächenabdichtung. Das Lysimeter-Testfeld besitzt vier Abflusskomponenten, die jeweils getrennt gefasst, abgeleitet und in einem zentralen Messcontainer, Größe ca. 2,4 × 4 m, kontinuierlich registriert werden. 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 × 10 m (100 m<sup>2</sup>) und besitzt eine Neigung von 1:6,9 (8,23 °) (Abb. 2 und Abb. 3). Nach Berücksichtigung der Hangneigung beträgt die auf die horizontal projizierte Lysimeterfläche 97 m<sup>2</sup>. 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.

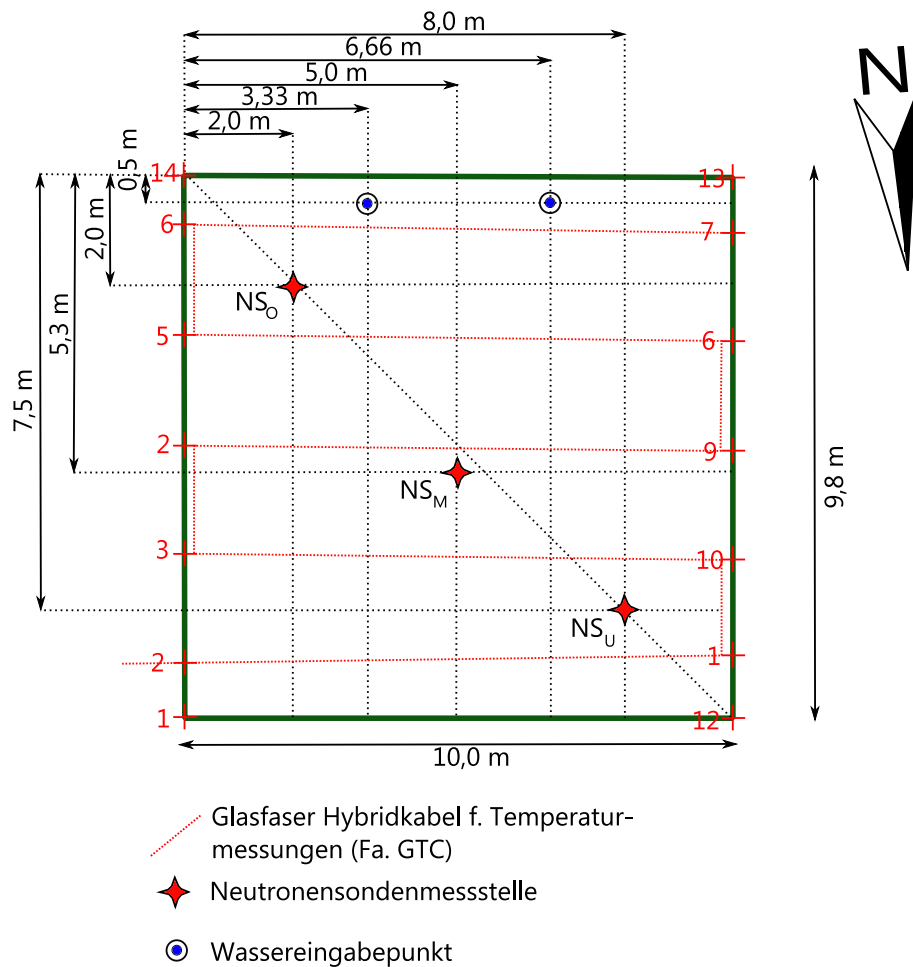
In Abb. 3 ist der Aufbau der Oberflächenabdichtung schematisch dargestellt. Diese besteht von oben nach unten aus folgenden Schichten:

- 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 HMD Hohberg (blaue Füllung in der Luftaufnahme). Die Grenze des Enzkreises (grüne Füllung) ist orange dargestellt, die Stadtgrenze von Pforzheim in rot (BKG: Verwaltungsgrenzen Deutschland (verändert), Google Earth: Luftbild Pforzheim Nord) (Augenstein, 2009).





**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°)

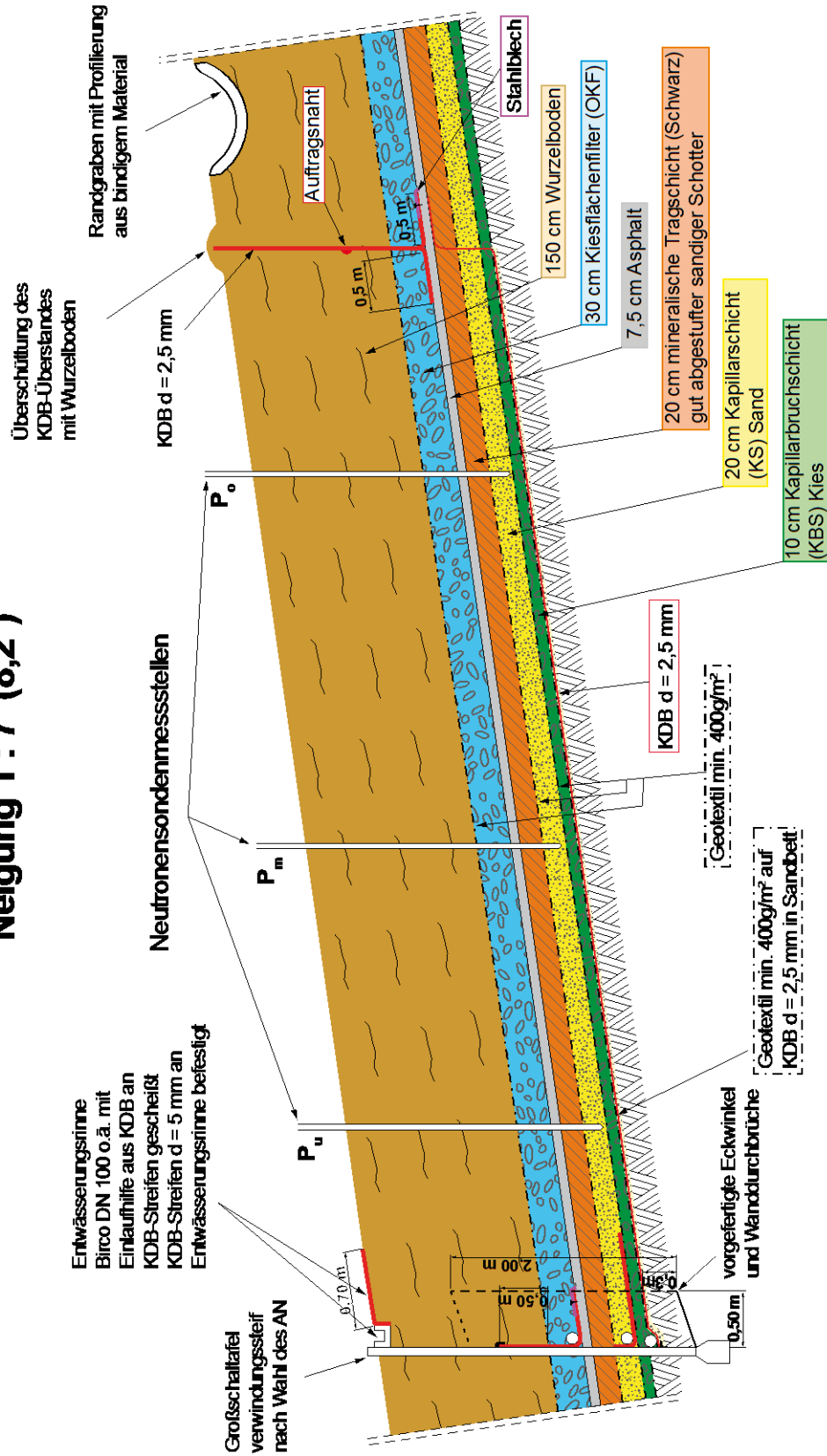


Abb. 3: Schematischer Querschnitt des Lysimeters mit Neutronensondenmessstellen.

## 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 Flächendränage 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 Asphaltenschicht, mit der Zeit immer weniger Wasser führen und schließlich, nachdem die mineralische Tragschicht und die KS leergelaufen wären, versiegen. Da durch den als absolut dicht angenommenen Asphalt kein Wasser von oben einsickern kann und die Schichten unterhalb des Asphalttes in einer wasserdichten 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).

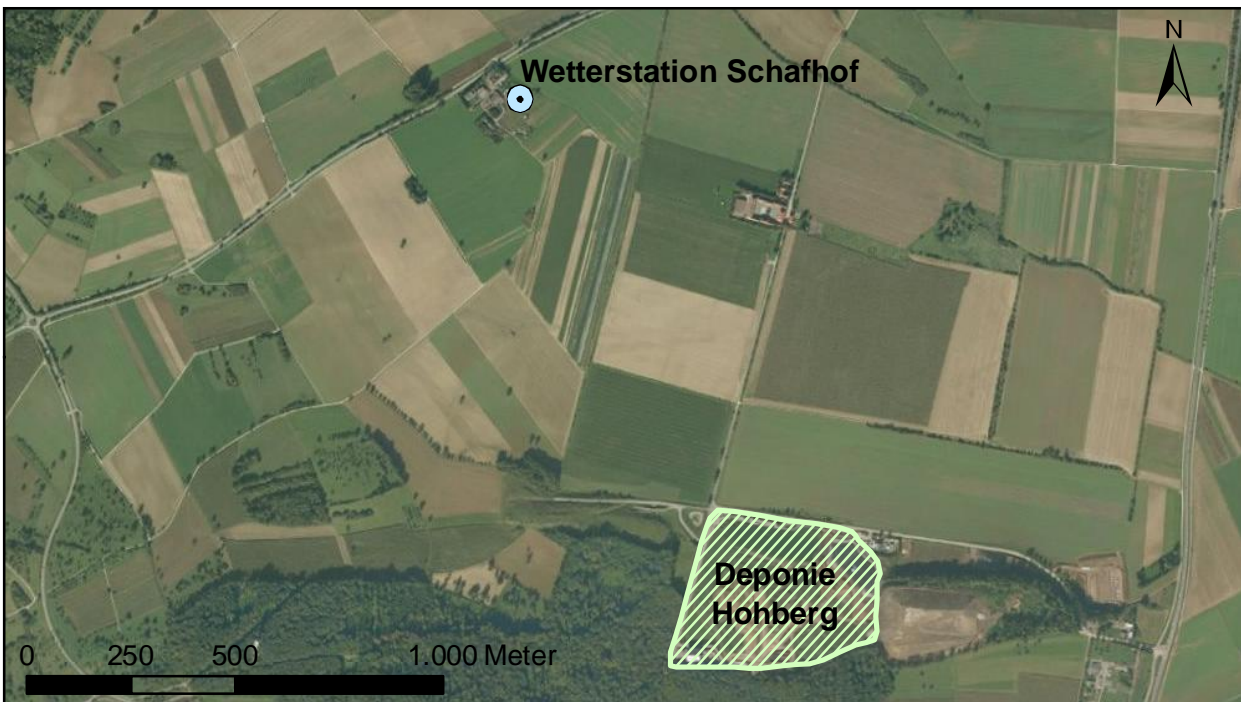


Abb. 4: Lage der DWD-Station Ispringen auf dem Schafhof und Lage der Deponie Hohberg.

### 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  $W_{ges}$ :

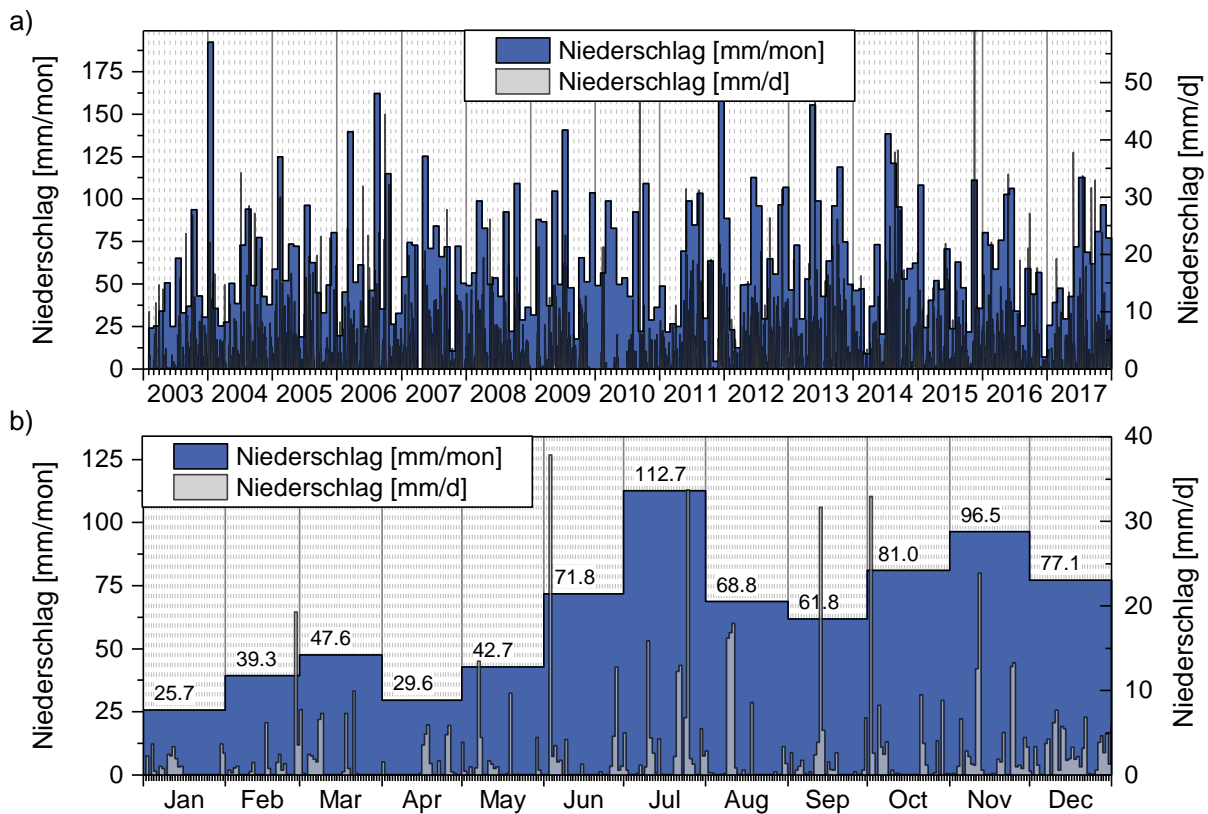
$$W_{ges} = \frac{(N - Q_{KBS})}{N} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

## II. Messergebnisse

### 4 Messergebnisse des Jahres 2017

#### 4.1 Niederschlag

Abbildung 5 zeigt die Niederschlagsverteilung für den Zeitraum 2003 – 2017 (Abb. 5a) und für das aktuelle Jahr 2017 (Abb. 5b). Der meiste Niederschlag wurde mit 112,7 mm im Juli registriert, gefolgt vom November mit 96,5 mm. Der geringste monatliche Niederschlag fiel im Januar mit nur 25,7 mm. Auch der Monate April war niederschlagsarm. Mit einem Gesamtniederschlag von 754,6 mm war das Jahr 2017 etwas feuchter als die beiden Vorjahre ( $N_{a, 2015} = 645,9$  mm,  $N_{a, 2016} = 722,4$  mm) und geringfügig trockener als 2014 ( $N_{a, 2014} = 761,8$  mm).



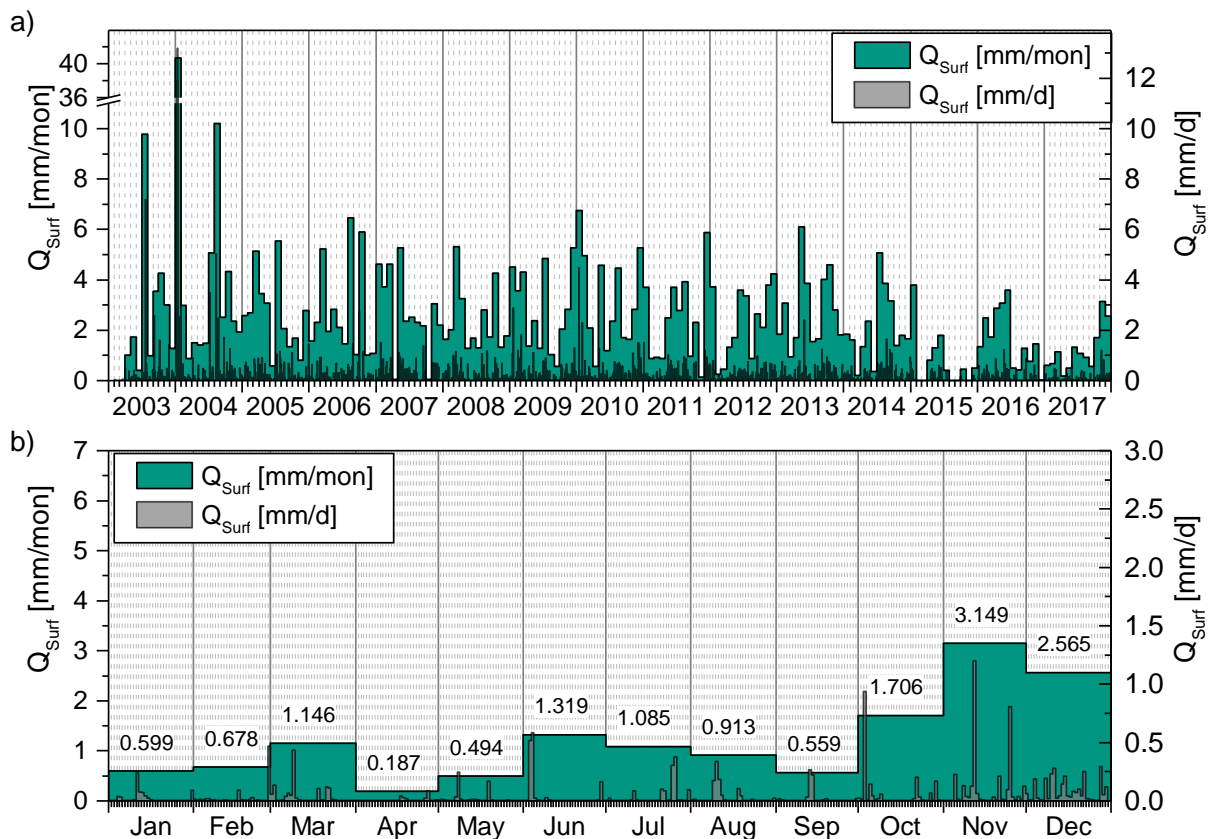
**Abb. 5:** a) Niederschlagsverteilung des Zeitraums 2003 bis 2017 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Niederschlagsverteilung für das Messjahr 2017 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst, Station Pforzheim-Ispringen.

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

Der höchste monatliche Oberflächenabfluss im Jahr 2017 wurde mit 3,15 mm im Monat November gemessen, gefolgt vom Dezember mit 2,57 mm. Der geringste monatliche Oberflächenabfluss mit nur 0,19 mm im April (Abb. 6) gemessen. Insgesamt wurden 14,40 mm Oberflächenabfluss für das Jahr 2017

registriert. Dies entspricht 1,9% des Jahresniederschlags. Der prozentuale Oberflächenabfluss ist somit im Vergleich zum Vorjahr etwas geringer (2,7%).

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.

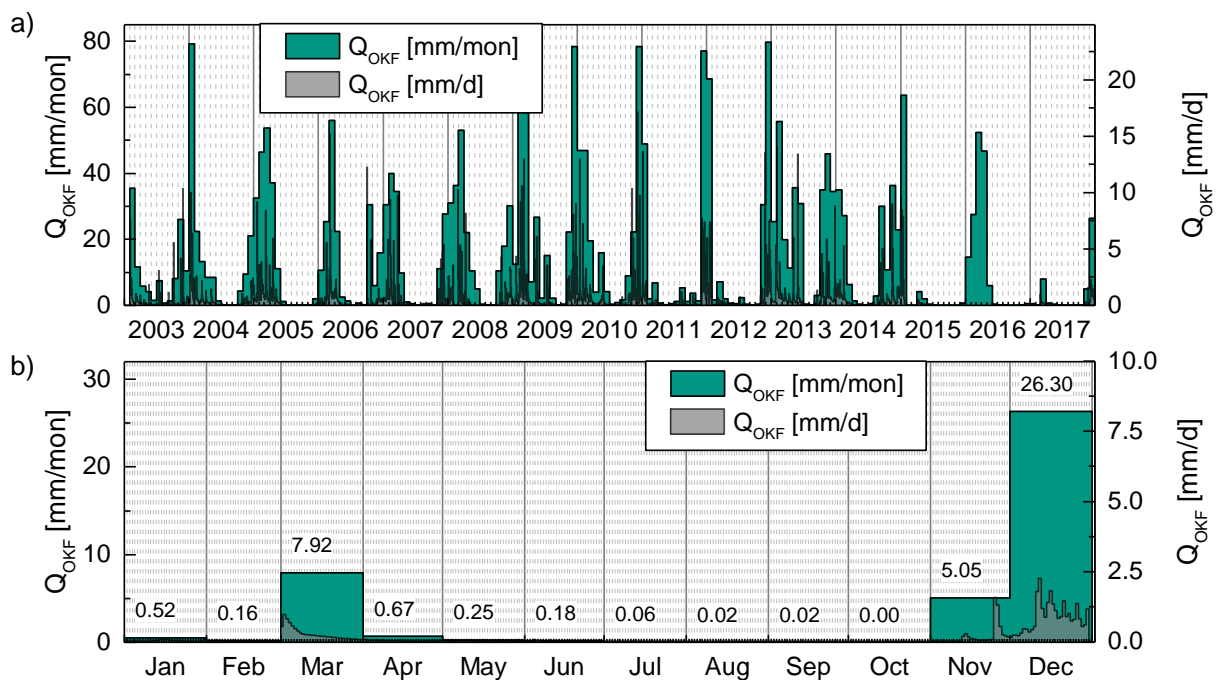


**Abb. 6:** a) Verteilung des Oberflächenabflusses ( $Q_{\text{Surf}}$ ) für den Zeitraum 2003 bis 2017 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Verteilung des Oberflächenabflusses für das Messjahr 2017 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate).

### 4.3 Oberer Kiesflächenfilter (OKF)

Die aufgezeichneten Wasserstände im Lysimeterbehälter des OKF weisen für das Jahr 2017 im Februar und März erneut einige Lücken in der Datenreihe auf. Grund hierfür ist ein nicht vollständiges schließen der Ventile nach Entleerung. Nach Wartung der Ventile und einer intensiven Grundreinigung der Lysimeterbehälter konnte die Zuverlässigkeit der Ventilschließungen deutlich verbessert werden. Durch Installation einer Möglichkeit zur Datenfernauslesung konnte die Anzahl der Datenlücken im Vergleich zum Vorjahr reduziert werden. Dennoch vorhandene Datenlücken und fehlenden Abflussmengen wurden anhand der vorhandenen Daten interpoliert. Ab April standen die Messdaten ohne größere Lücken zur Verfügung. Der Hauptabfluss des OKF fand demnach im Dezember statt. Abflussreichere Monate waren zusätzlich März und November (Abb. 7). Über 95% des Abflusses wurde in diesen drei Monaten erfasst. Wie in den

vergangenen Jahren fand der Hauptabfluss in den Wintermonaten zum Jahreswechsel hin statt. Die im Vergleich zum Vorjahr niederschlagsärmere erste Jahreshälfte führte zu geringeren Abflüssen im OKF während dieser Zeit. Von Mai bis Mitte November fand kein nennenswerter Abfluss aus dem OKF statt. Errechnet wurde so für 2017 ein Gesamtjahresabfluss des OKF von 41,1 mm, was einem Anteil von 5,5% des Niederschlages entspricht. Im Vergleich zum Abfluss der Vorjahre (2016: 148,6 mm / 20,6%) ist dies ein sehr geringer Wert. Dies ist eine Folge des fehlenden Abflusses während der Sommermonate trotz gefallenem Niederschlag. 2017 war ein überdurchschnittlich warmes Jahr, was eine erhöhte Evapotranspirationsrate im Vergleich mit den Vorjahren plausibel erscheinen lässt.

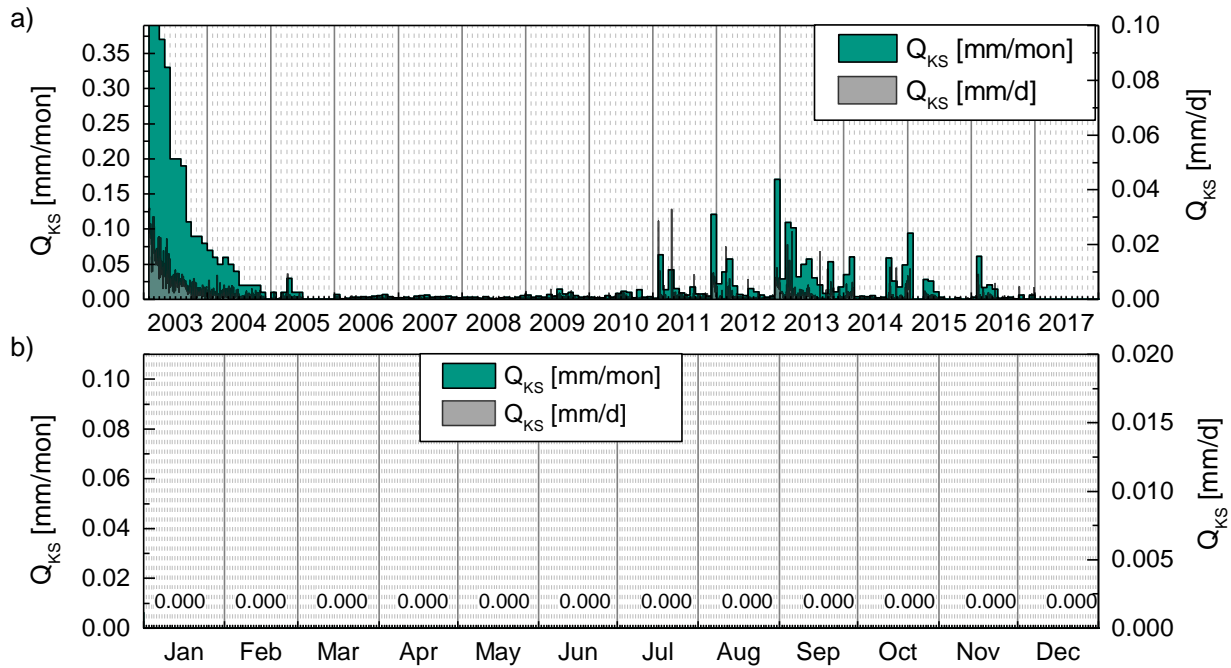


**Abb. 7:** a) Verteilung des Abflusses der Dränschicht für den Zeitraum 2003 bis 2017 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Verteilung des Abflusses der Dränschicht für das Messjahr 2017 in mm/Monat (linke Ordinate)

#### 4.4 Kapillarschicht (KS)

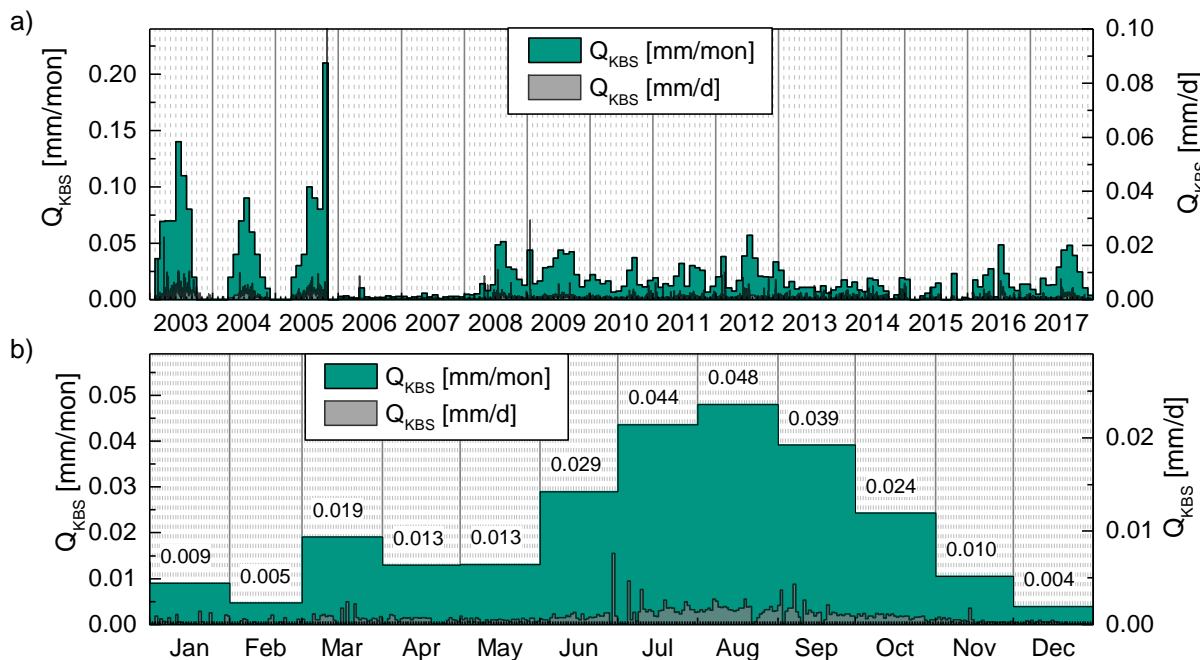
Die monatlichen Abflüsse der Kapillarschicht sind in Abbildung 8 dargestellt. Insgesamt wurde im Jahr 2017 kein Abfluss aus dieser Schicht gemessen. Der Wasserstand im Lysimeterbehälter nimmt im Jahresverlauf, durch Verdunstung des darin enthaltenen Wassers, geringfügig ab. Zusätzlich war der Zulauf 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 2017 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Verteilung des Abflusses der Kapillarschicht für das Messjahr 2017 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 2017 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Verteilung des Abflusses der Kapillarbruchschicht für das Messjahr 2017 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate).

In 2017 wurden insgesamt 0,26 mm Abfluss aus dieser Schicht gemessen. Dies entspricht wie im Vorjahr (2016) 0,03% des Jahresniederschlags. Der Hauptabfluss fand während der Sommermonate im Zeitraum von Juni bis Oktober statt. Der höchste monatliche Abfluss wurde mit 0,05 mm für den August 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 2017 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 2017 zusammen mit der enthaltenen Bodenfeuchte 699 mm. Dies entspricht 92,6% des Jahresniederschlags. Sie liegt somit deutlich höher als die Vergleichswerte der Vorjahre.

## 5 Bewertung der Oberflächenabdichtung für das Jahr 2017

### 5.1 Lysimeter-Wasserhaushaltsbilanz

Die monatlichen prozentualen Anteile der einzelnen Komponenten der Wasserbilanz für den Untersuchungszeitraum 2017 sind detailliert in Tabelle 2 aufgelistet.

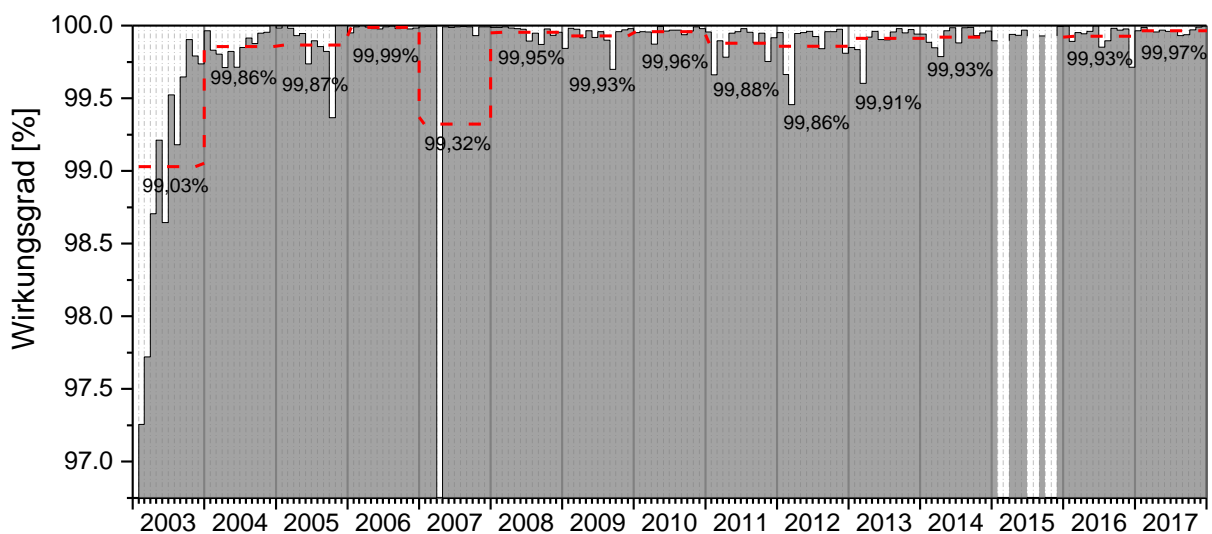
**Tab. 2:** Monatliche Abflusswerte der Abdichtungskomponenten in mm/Mon und im prozentualen Verhältnis zum Jahresniederschlag  $N_a$  2017.

Monat	$Q_{\text{Surf}}$		OKF		KS		KBS		Niederschlag
	mm/Mon	% von $N$	mm/Mon	% von $N$	mm/Mon	% von $N$	mm/Mon	% von $N$	mm/Mon
Januar	0,60	2,33	0,52	2,02	0,000	0,000	0,009	0,035	25,7
Februar	0,68	1,73	0,16	0,41	0,000	0,000	0,005	0,012	39,3
März	1,15	2,41	7,92	16,65	0,000	0,000	0,019	0,040	47,6
April	0,19	0,63	0,67	2,25	0,000	0,000	0,013	0,044	29,6
Mai	0,49	1,16	0,25	0,59	0,000	0,000	0,013	0,031	42,7
Juni	1,32	1,84	0,18	0,25	0,000	0,000	0,029	0,040	71,8
Juli	1,09	0,96	0,06	0,05	0,000	0,000	0,044	0,039	112,7
August	0,91	1,33	0,02	0,03	0,000	0,000	0,048	0,070	68,8
September	0,56	0,90	0,02	0,02	0,000	0,000	0,039	0,063	61,8
Oktober	1,71	2,11	0,00	0,00	0,000	0,000	0,024	0,030	81,0
November	3,15	3,26	5,05	5,23	0,000	0,000	0,010	0,011	96,5
Dezember	2,57	3,33	26,30	34,11	0,000	0,000	0,004	0,005	77,1
<b>Gesamt-Abfluss</b>	<b>14,40</b>	<b>1,91</b>	<b>41,14</b>	<b>5,45</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,257</b>	<b>0,034</b>	<b>Σ 754,6</b>
<b><math>ET_a</math> &amp; Bodenfeuchte</b>	<b>698,80 mm</b>								<b>92,60%</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.

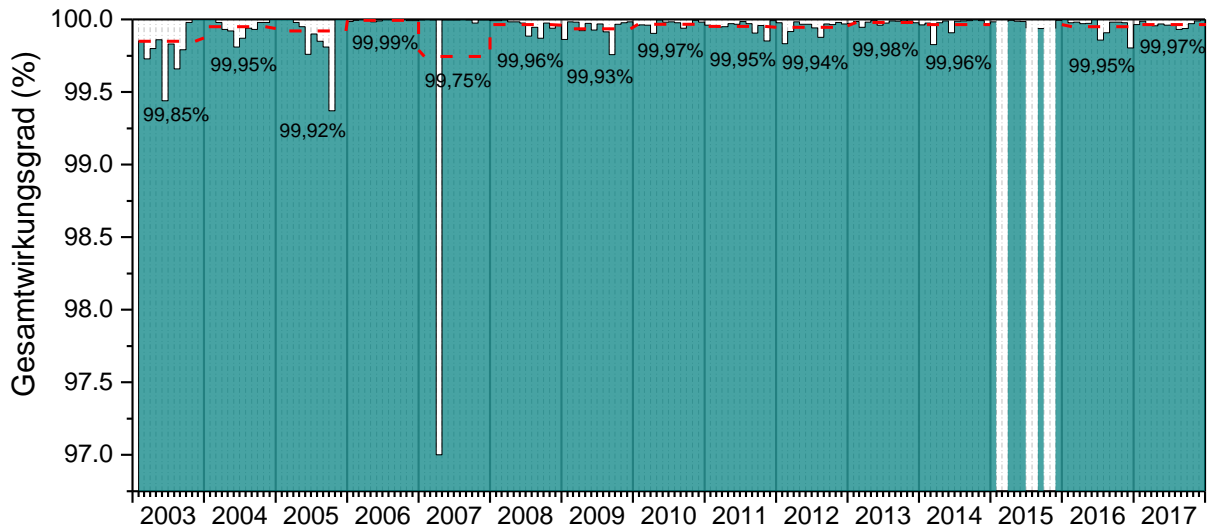
Für das Jahr 2017 wurde ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von 99,97% ermittelt. Dieser Wert ist geringfügig höherer der des Vorjahres.



**Abb. 10:** Grafik über die Wirkungsgrade der Asphalttschicht aus dem Messzeitraum 2003 - 2017. 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 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 - 2017. 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 2017

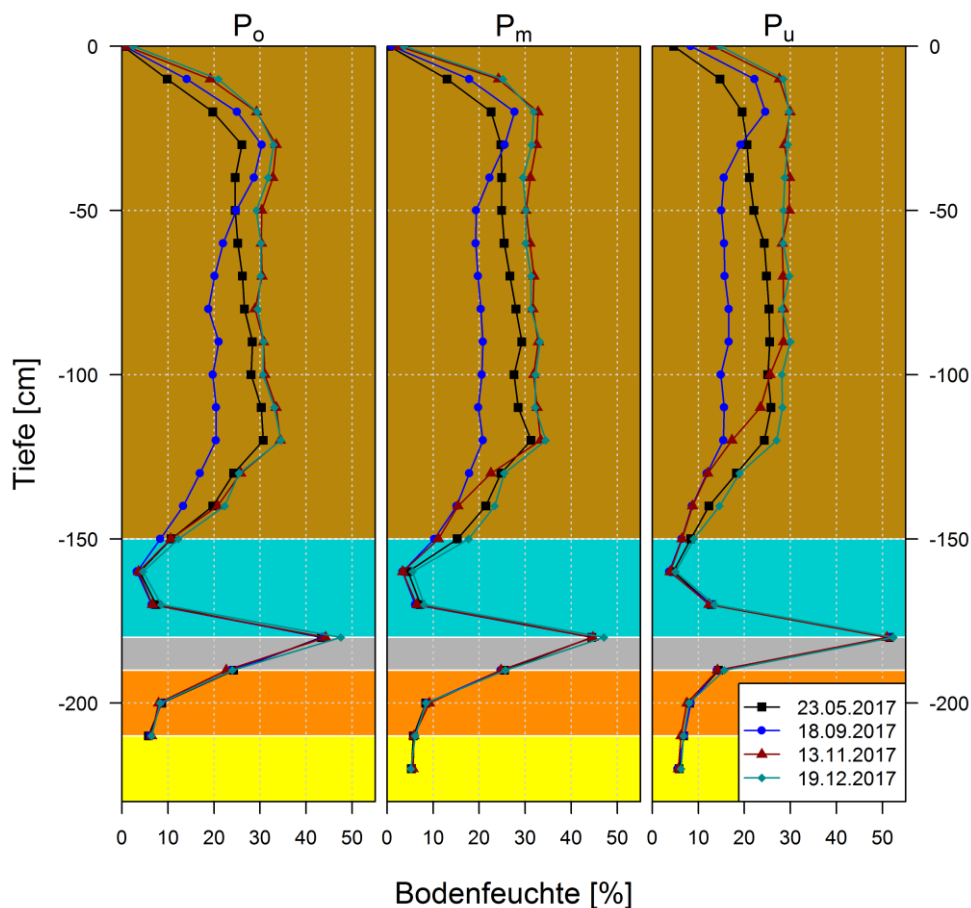
Im Jahr 2017 wurden vier Stichtagsmessungen der Bodenfeuchte durchgeführt (Abb. 12).  $P_o$  und seit Mitte 2015 auch  $P_m$  sind aufgrund von Vernässung im Messrohr nicht bis in die letzten Schichttiefen befahrbar.

Die erste Messung für das Jahr 2017 fand am 23. Mai statt. An  $P_o$  und  $P_m$  erreicht die Bodenfeuchte in der Tiefe von 30 cm einen Wert von etwa 25% und nimmt bis in die Tiefe von 120 cm auf etwas über 30% zu. An  $P_u$  liegt die Bodenfeuchte in diesem Tiefenbereich insgesamt um etwa 5% niedriger. Ab dieser Tiefe findet eine Abnahme der Bodenfeuchte auf etwa 10% in der Tiefe von 150 cm und somit der Grenze zwischen Wurzelboden und OKF statt (15% an  $P_m$ ). Im darunterliegenden OKF nimmt der Bodenfeuchtegehalt noch weiter ab. In der Asphaltsschicht werden, bedingt durch das Messprinzip, höhere Wassergehalte gemessen. Unterhalb der Asphaltsschicht wurden ganzjährig Bodenfeuchtegehalte unter 10% gemessen.

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 zweiten Messung am 18. September ist der Bodenfeuchtegehaltsanstieg in den oberen 30 bis 50 cm der Rekultivierungsschicht erkennbar. Hier lagen die Bodenfeuchtegehalte über denen der ersten Messung. Im Vergleich mit den Messungen der Bodenfeuchte im September des Vorjahres liegen die Wassergehalte für die untere Hälfte des Wurzelbodens in einem ähnlichen Bereich.

Bei der dritten Bodenfeuchtemessung am 13.11.2017 hatte sich diese Bodenfeuchtefront in der Rekultivierungsschicht weiter nach unten verlagert. Insgesamt liegen die Wassergehalte in der Rekultivierungsschicht höher als bei der zweiten Messung. Aus dem OKF findet wieder Abfluss statt.

Die am 19.12.2017 gemessenen Bodenfeuchtegehalte sind weitestgehend gleich denen der dritten Messung. An  $P_u$  fand die Verlagerung der Feuchtefront mit der Tiefe langsamer statt als an den Stellen  $P_o$  und  $P_m$ . An  $P_u$  in der Tiefe von 120 cm waren die Wassergehalte im Vergleich zur dritten Messung etwa 10% höher.



**Abb. 12:** Darstellung der Bodenfeuchteprofile für die Messstellen  $P_o$  (links),  $P_m$  (mitte) und  $P_u$  (rechts) zu den Zeitpunkten 23.05. (schwarze Linie), 18.09. (blaue Linie), 13.11. (rote Linie) und 19.12.2017 (türkise Linie). (Die hinterlegte Farbgebung entspricht der ungefähren Tiefenlage der Schichten, vgl. Abb. 3).

## 7 Zusammenfassung für das Jahr 2017

Im Jahr 2017 erreichte die Kapillarsperre einen Wirkungsgrad von 99,97%. Die Wirkungsgrade der Asphalttschicht und des Gesamtsystems (respektive der Kapillarsperre) unterscheiden sich für das Jahr 2017 nicht grundlegend von den Vorjahren. Aufgrund der im Jahr 2017 ausgebliebenen Abflüsse aus der Kapillarschicht sind der Wirkungsgrad der Asphalttschicht 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 2017 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 August statt. Sie finden somit wie in den vergangenen Jahren mehrere Monate zeitversetzt zum Abfluss aus dem OKF statt.

Mit einer Deponiesickerwasserneubildungsrate von 0,034% des Niederschlages 2017 (0,26 mm von 754,6 mm Niederschlag) liegt diese im Bereich der Vorjahre. Das Gesamtsystem ist somit nach wie vor als positiv zu bewerten. Da die Konvektionssperre den Anspruch hat, zu 100% abzudichten, bleibt noch zu klären, wo die Ursachen für diese Abflüsse liegen, die trotzdem unterhalb der Asphalttschicht gesammelt wurden. Zur Klärung dieser Frage wurde ein Markierungsversuch in Auftrag gegeben, der weitere Erkenntnisse liefern soll.

---

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]
- 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 Bauwerksüberwachung 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 Bau-



werksüberwachung 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.

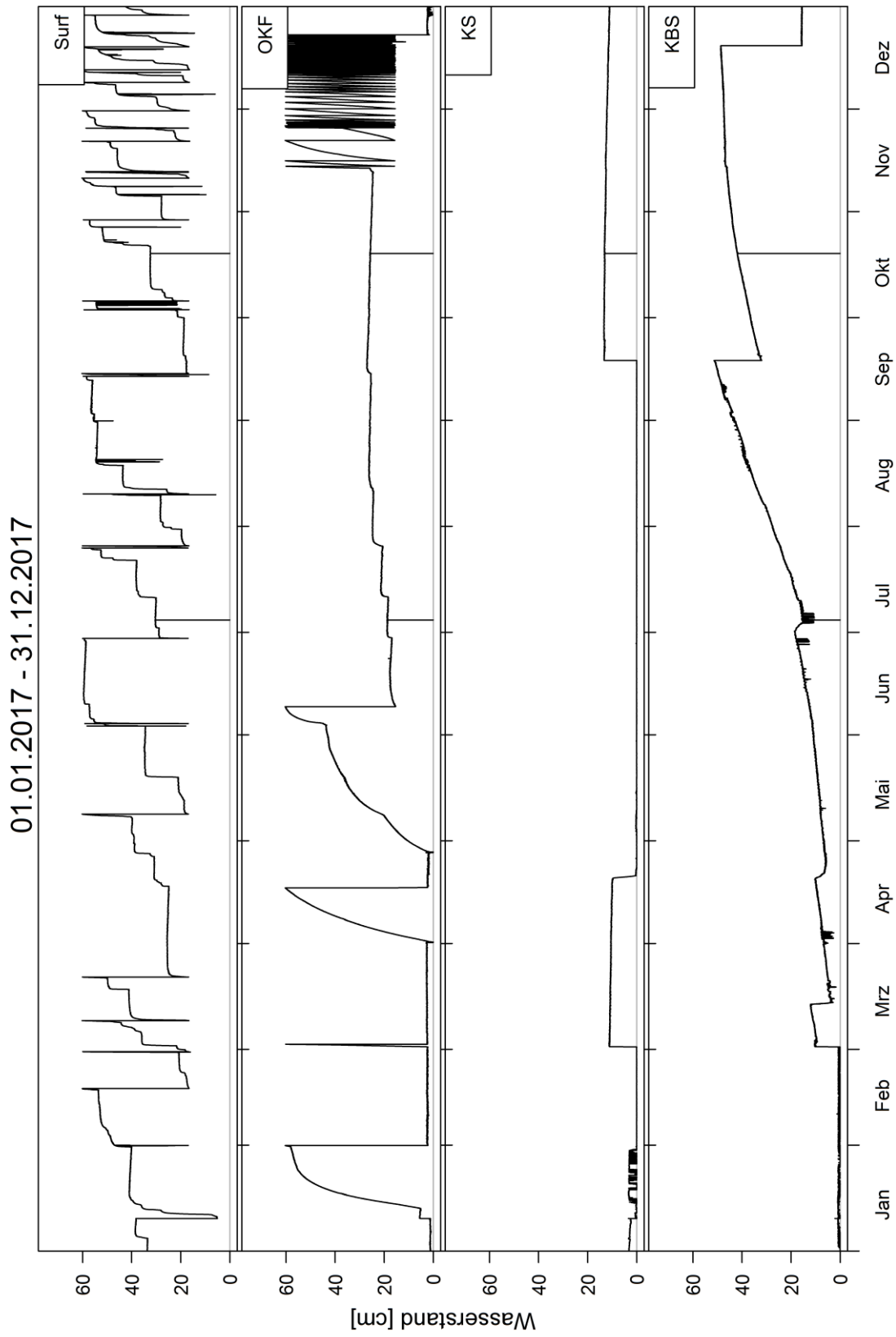
SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1992): Lehrbuch der Bodenkunde. - 491 S., 13. durchgesehene Auflage; Enke Verlag, Stuttgart.

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 2017



**Anhang 2:** Tabellen zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und der Bodenfeuchte 2003-2017.

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	

**Anhang 3:** Gesamtwirkungsgrad  $W_{ges}$  (%) der Oberflächenabdichtung und Niederschlagsmengen (mm) für den Untersuchungszeitraum 2003 – 2017.

<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)	% (mm)	% (mm)	% (mm)	% (mm)	% (mm)	% (mm)	% (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>
	% (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)
<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)
<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)
<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)
<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)
<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)
<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)
<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)
<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)
<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)
<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)
<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)
<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>

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