

Stadt Pforzheim  
Hausmülldeponie Hohberg  
- Oberflächenabdichtung -  
LYSIMETER - TESTFELD

Messtechnische Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter

erstellt für die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)  
76231 Karlsruhe

# I Einleitung

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| <b>Inhaltsverzeichnis</b>    | <b>I</b>   |
| <b>Abbildungsverzeichnis</b> | <b>III</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>   | <b>III</b> |
| <b>Anhang</b>                | <b>IV</b>  |

## **Inhaltsverzeichnis**

|  |          |
|--|----------|
| <b>I Einleitung</b>                                      | <b>1</b> |
| I-1 Aufgabenstellung .....                               | 1        |
| I-1.1 Standort Hohberg .....                             | 3        |
| I-2 Beschreibung des Lysimeters.....                     | 4        |
| I-2.1 Messprinzip .....                                  | 4        |
| I-2.2 Lysimeteraufbau.....                               | 4        |
| I-2.3 Abflussregime .....                                | 6        |
| I-2.4 Beschreibung der Abflusskomponenten .....          | 8        |
| I-2.4.1 Rekultivierungsschicht .....                     | 8        |
| I-2.4.2 Dränschicht (OKF) .....                          | 8        |
| I-2.4.3 Kapillarschicht (KS).....                        | 8        |
| I-2.4.4 Kapillarbruchschicht (KBS) .....                 | 9        |
| I-2.5 Erfassung meteorologischer Eingangsdaten.....      | 9        |
| I-2.6 Niederschlag.....                                  | 11       |
| I-2.7 Evapotranspiration .....                           | 11       |
| I-2.8 Neuerungen 2015 .....                              | 12       |
| I-2.8.1 Wetterstation .....                              | 12       |
| I-2.8.2 Bauwerksertüchtigung der Lysimeterzuflüsse ..... | 12       |
| I-2.8.3 Datenlogger .....                                | 12       |
| I-3 Berechnungen.....                                    | 14       |
| I-3.1 Wirkungsgrad der Asphaltsschicht .....             | 14       |
| I-3.2 Wirkungsgrad des Gesamtsystems.....                | 14       |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| <b>II</b> | <b>Darstellung der Messergebnisse für das Jahr 2015</b>                  | <b>16</b> |
| II-1      | Messergebnisse des Jahres 2015 .....                                     | 17        |
| II-1.1    | Niederschlag .....   | 17        |
| II-1.2    | Oberflächenabfluss ( $Q_{\text{Surf}}$ ) .....                           | 18        |
| II-1.3    | Oberer Kiesflächenfilter (OKF) .....                                     | 18        |
| II-1.4    | Kapillarschicht (KS) .....   | 19        |
| II-1.5    | Kapillarbrechende Schicht (KBS).....                                     | 20        |
| II-1.6    | Evapotranspiration $ET_a$ .....  | 21        |
| II-2      | Bewertung der Oberflächenabdichtung für das Jahr 2015.....               | 22        |
| II-2.1    | Lysimeter-Wasserhaushaltsbilanz.....                                     | 22        |
| II-2.1.1  | Asphaltschicht.....  | 23        |
| II-2.1.2  | Gesamtsystem .....   | 23        |
| II-3      | Neutronensondenmessung zur Bestimmung der Bodenfeuchte im Jahr 2015..... | 24        |
| II-4      | Zusammenfassung für das Jahr 2015 .....                                  | 25        |
| II-5      | Literatur und bisherige Berichte.....                                    | 27        |
| II-6      | Anhang .....   | 30        |

## Abbildungsverzeichnis (z.T. gekürzt)

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Abb. 1:  | Geographische Lage der HMD Hohberg.....   | 5  |
| Abb. 2:  | Skizze des Lysimeters .....   | 6  |
| Abb. 3:  | Schematischer Querschnitt des Lysimeters.....   | 7  |
| Abb. 4:  | Alte Wetterstation Hohberg.....   | 10 |
| Abb. 5:  | Lage der DWD Station-Ispringen.....   | 11 |
| Abb. 6:  | Bilder Systemerneuerung Frühjahr 2016.....  | 12 |
| Abb. 7:  | Aufzeichnung der Webcam von den Pegelständen .....                                    | 13 |
| Abb. 8:  | Niederschlagsverteilung der Jahre 2003 bis 2015 .....                                 | 17 |
| Abb. 9:  | Abflussregime des Oberflächenabflusses für die Jahre 2003 – 2015.....                 | 18 |
| Abb. 10: | Abflussregime des OKF für die Jahre 2003 – 2015 .....                                 | 19 |
| Abb. 11: | Abflussregime der KS für die Jahre 2003 – 2015 .....                                  | 20 |
| Abb. 12: | Abflussregime der KBS für die Jahre 2003 – 2015.....                                  | 21 |
| Abb. 13: | Wirkungsgrade der Asphaltsschicht aus dem Messzeitraum 2003 - 2015.....               | 23 |
| Abb. 14: | Wirkungsgrade des Gesamtsystems aus dem Messzeitraum 2003 - 2015.....                 | 24 |
| Abb. 15: | Darstellung der Bodenfeuchteprofile für die Messstellen $P_o$ , $P_m$ und $P_u$ ..... | 25 |

## Tabellenverzeichnis (z.T. gekürzt)

|         |  |    |
|---------|--|----|
| Tab. 1: | Übersicht über die Baumaßnahmen und Messungen am Lysimeter.....  | 3  |
| Tab. 2: | Monatliche Abflusswerte der Abdichtungskomponenten in mm/Mon und im<br>prozentualen Verhältnis zum Jahresniederschlag $N_a$ 2015. .... | 22 |

## Anhang (z.T. gekürzt)

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Anhang 1:  | Wasserstände der einzelnen Lysimeterabflüsse über das Messjahr 2015.....                                  | 30 |
| Anhang 2:  | Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte 2003. ....                                    | 31 |
| Anhang 3:  | Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte 2004. ....                                    | 31 |
| Anhang 4:  | Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte 2005.....                                     | 31 |
| Anhang 5:  | Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + $ET_a$ 2006.....                            | 32 |
| Anhang 6:  | Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + $ET_a$ 2007.....                            | 32 |
| Anhang 7:  | Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + $ET_a$ 2008.....                            | 32 |
| Anhang 8:  | Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + $ET_a$ 2009.....                            | 32 |
| Anhang 9:  | Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + $ET_a$ 2010.....                            | 33 |
| Anhang 10: | Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + $ET_a$ 2011.....                            | 33 |
| Anhang 11: | Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + $ET_a$ 2012.....                            | 33 |
| Anhang 12: | Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + $ET_a$ 2013.....                            | 33 |
| Anhang 13: | Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + $ET_a$ 2014.....                            | 34 |
| Anhang 14: | Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + $ET_a$ 2015.....                            | 34 |
| Anhang 15: | Gesamtwirkungsgrad $W_{ges}$ der Oberflächenabdichtung für den<br>Untersuchungszeitraum 2003 – 2015. .... | 34 |

## I-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 Asphaltichtung 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 Lysimetertestfeldes und der Messeinrichtung beauftragt. Somit konnte, nach einer Nachbeauftragung 2008, im Jahr 2007 und zum Teil auch 2008, nur auf qualitativ weniger hochwertige Daten zurückgegriffen werden. Im Sommer 2008 wurde die Lysimeterstation wieder in Stand gesetzt. Die Datenreihen weisen z.T. Effekte aus nicht behobenen Störungen im Messsystem auf und mussten daher unter Anwendung von umfangreichen Korrekturverfahren angepasst werden (Augenstein, 2009).

Beispielsweise sind durch nicht gewartete Ventile die Abflüsse nur zum Teil korrekt aufgezeichnet worden und die folgenden Abflussspitzen sind als zu niedrig registriert worden. Zur Fehlerkorrektur wurde für 2007/2008 daher ein Korrekturmodul entwickelt, um die fehlenden Abflüsse zu ermitteln (Augenstein, 2009). Mit diesem Modul wird abgeschätzt, wie groß die Frequenz des Öffnens und Schließens des Ventils ist und dann die daraus entstehende Differenz des Abflusses summiert. Je nachdem wie man diese wählt, wird mehr oder weniger Abfluss dazu addiert. Dieser wiederum kann als Fehler angesehen und durch das beschriebene Verfahren eliminiert werden. Für die Daten 2008 wurde zusätzlich das Wasserbilanzmodell HELP<sup>®</sup> (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance; dt.: hydrologische Bewertung des Deponieverhaltens) angewandt. Dabei wurde anhand der korrekten Abflüsse des OKF das Modell kalibriert und die fehlenden Daten durch Faktorenbestimmung ermittelt.

Nach der Sichtung und Überprüfung der Daten für 2008 wurde festgestellt, dass etwa ab Juli 2008 wieder signifikanter Abfluss im Behälter der kapillARBrechenden Schicht registriert wurde. Dabei liegt die Vermutung nahe, dass es sich dabei nicht um eine Leckage im Abdichtungssystem handelt, sondern um eine bauwerksseitige Ursache. Durch ungleiche Setzungserscheinungen neigte sich das Haus mit den angeschlossenen Abfluss-Messrohren derart nach hinten, dass die Rohre durch die resultierende Biegung das Wasser nicht mehr direkt in die Behälter abführen konnten. Erst wenn die entstandene Mulde gefüllt und der Neigungswinkel ausgeglichen ist und überläuft, steigt der Wasserstand in den entsprechenden Behältern. Diese Hypothese konnte durch eine Kamerabefahrung im November 2013 bestätigt werden. Hierbei wurde festgestellt, dass ein erheblicher Teil der Zulaufrohre (z.T. komplett) unter Wasser steht.

Trotz der oben beschriebenen Fehlerquellen und notwendigen Korrekturen konnte im Messjahr 2008 eine plausible Auswertung durchgeführt werden. Diese wiederum ließ eine Bewertung des Dichtsystems anhand einer Lysimeter-Abflussbilanzierung zu.

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, da die Normalisierung des Abflusses im Sommer stattfand. Die zweiten Jahreshälften weisen dahingegen keine großen Abweichungen mehr auf, was darauf schließen lässt, dass sich das Abflussverhalten in diesem Schema einpendeln wird.

Auch im Jahr 2015 fand eine messtechnische Betreuung der Lysimeteranlage statt. Die Abflüsse der einzelnen Schichten wurden gesammelt, ausgelesen und ausgewertet. Zusätzlich fand an zwei Stichtagen eine Messung der Bodenfeuchte statt.

Zur besseren Übersicht sind in Tab. 1 die einzelnen Bauabschnitte am Lysimeter aufgelistet.

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

| Datum              |  |
|--------------------|--|
| Sep. bis Dez. 2002 | Bau des Lysimeterfeldes  |
| 01.02.2003         | Beginn des Messbetriebes   |
| 01.04.2003         | Endgültige Fertigstellung des Lysimeters   |
| 04.11.2003         | Fertiger Aufbau der Wetterstation  |
| 01.12.2003         | Ausbaggern des Grabens oberhalb des Lysimeterfeldes  |
| 02.12.2003         | Randaufschüttung und Erhöhung des Wurzelbodens um 20 cm  |
| 26.10.2005         | Neuverlegung der Verbindungsrohre zwischen Lysimeterfeld und Messcontainer                                     |
| 22.11.2005         | Umsetzen des Messcontainers, aufgrund der planmäßigen Erstellung von Bauabschnitt 2 der Oberflächenabdichtung. |
| 05.11.2013         | Kamerabefahrung der Rohre vom Messcontainer aus  |
| Feb./Mrz. 2015     | Tieferlegen des Messcontainers auf vorher erstelltes Fundament, Begradigung der Zulaufrohre                    |

### I-1.1 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 Dränagesysteme einem Speicherbecken zugeführt und von dort in die Sickerwasserbehandlungsanlage vor Ort geleitet.

## I-2 Beschreibung des Lysimeters

### I-2.1 Messprinzip

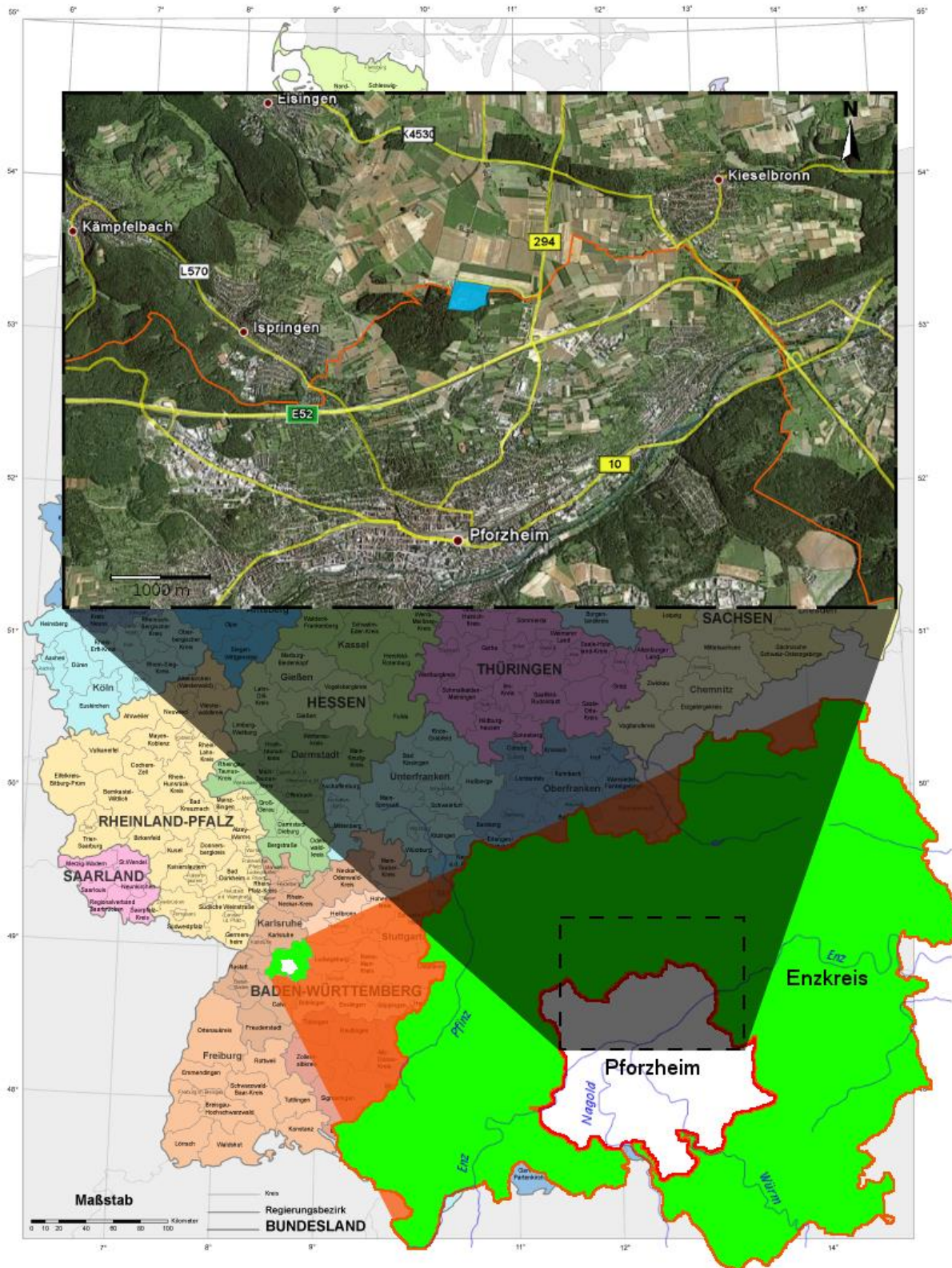
Das Großlysimeter befindet sich im nordwestlichen Bereich des Bauabschnitts I der Deponieoberflächenabdichtung. Das Lysimeter-Testfeld besitzt vier Abflusskomponenten, die jeweils getrennt gefasst, abgeleitet und in einem zentralen Messcontainer, Größe ca. 2,4 × 4 m, kontinuierlich registriert werden. 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 (d.h. 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 mit einem Computer ausgelesen und gespeichert. Die Messwerte auf dem Rechner können direkt über Datenfernübertragung (DFÜ) abgerufen und mit einem speziell entwickelten Verfahren ausgewertet werden.

### I-2.2 Lysimeteraufbau

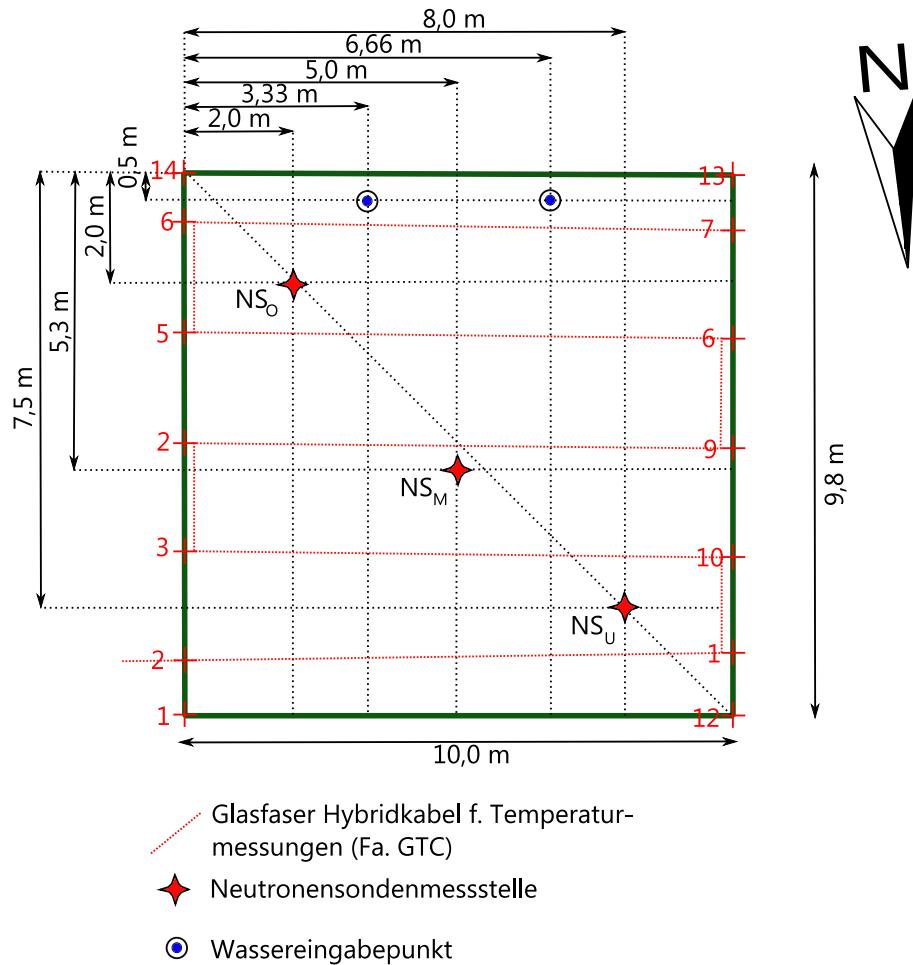
Die Lysimeterfläche beträgt 10 × 10 m (100 m<sup>2</sup>) und besitzt eine Neigung von 1:6,9 (8,23 °) (Abb. 2 und Abb. 3). Nach Berücksichtigung der Hangneigung beträgt die auf die Horizontale projizierte Lysimeterfläche 97 m<sup>2</sup>. Der Aufbau des Lysimeters entspricht dem genehmigten Regelaufbau 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 den folgenden Lagen:

- 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.

### I-2.3 Abflussregime

Um die Wirksamkeit der Dichtungskomponenten und des Gesamtsystems bewerten zu können, wurden die Abflüsse nach dem in Kapitel I-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 wird das aktuelle Jahr an die chronologische Abflussreihe der vergangenen Messjahre angefügt.

Die 4 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) -  $Q_{\text{KBS}}$



## I-2.4 Beschreibung der Abflusskomponenten

### I-2.4.1 Rekultivierungsschicht

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.

### I-2.4.2 Dränschicht (OKF)

Der Obere Kiesflächenfilter 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.

### I-2.4.3 Kapillarschicht (KS)

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 Asphaltes in einer wasserdichten Kunststoffdichtungsbahn (KDB) - Wanne eingebaut wurden, dürfte nach der Versiegung 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.

Nachdem im Jahr 2008 durch Augenstein (2009) festgestellt wurde, dass der Abfluss der KBS nach Umsetzung des Messcontainers 2005 aufgrund einer Muldenbildung versiegt und mittlerweile, nach kontinuierlichem Befüllen und Überlaufen der Mulde, wieder ordnungsgemäß abgeführt wird, wurde versucht,

den gleichen Effekt im Zuflussrohr des KS zu erzielen. Dazu wurde am 12.10.2009 in Anlehnung an die KBS (Jahresbericht 2008 / Augenstein 2009) das Abflussrohr mit einem Wasserschlauch befahren und geflutet. Der dadurch entstandene Mehrabfluss wurde in einem separaten Behältnis aufgefangen, wobei darauf geachtet wurde, dass nichts in den KS-Auffangbehälter gelangte. Ob diese Aktion einen merklichen Einfluss auf das Abflussverhalten hat, wird sich mit der Zeit und mit Vergleichen zu den Vorjahren herausstellen (vor allem mit Werten von vor der Umsetzung des Messcontainers 2005). Bis jetzt konnte jedoch kein wesentlicher Unterschied festgestellt werden.

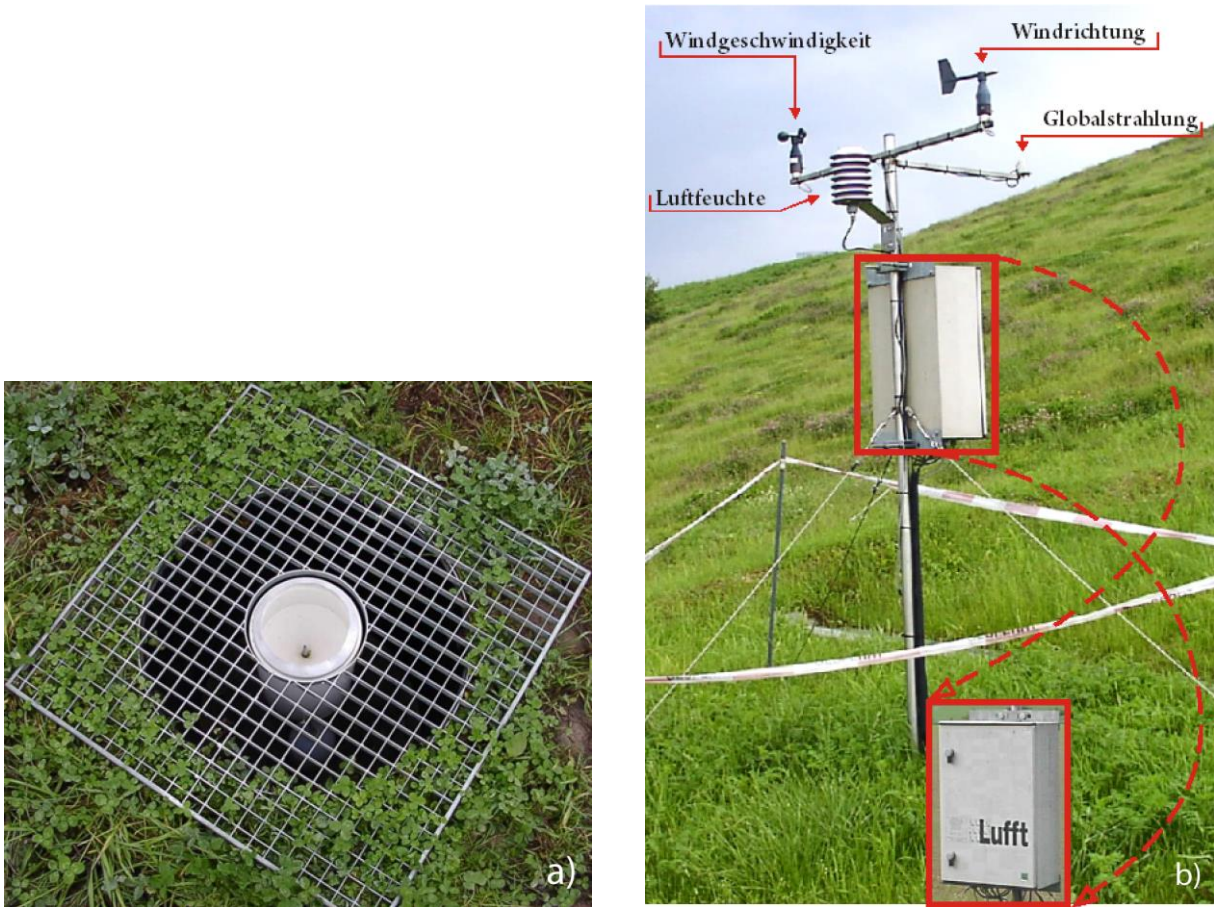
In den Messjahren 2006 und 2007 waren noch Abflüsse unterhalb der Asphaltabdichtung zu erkennen (vgl. AGK-Jahresbericht 2006/2007). Das darauffolgende Jahr 2008 lag in der Summe leicht unterhalb der beiden Vorjahre (ca. 0,032 mm). Im Messjahr 2009 war eine leichte Zunahme der Abflüsse festzustellen. Dies lag hauptsächlich an den Monaten Juli bis September, die einen überdurchschnittlich hohen Abfluss zu verzeichnen hatten. Zwar wurde, wie oben erwähnt, in Analogie zur KBS 2008 das Abflussrohr der KS geflutet, jedoch geschah dies nur an einem Tag und dieser konnte als Fehlerquelle ausgeschlossen werden.

#### I-2.4.4 Kapillarbruchschicht (KBS)

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.

#### I-2.5 Erfassung meteorologischer Eingangsdaten

Im Jahr 2003 wurde in unmittelbarer Nähe des Lysimeters (nur wenige Meter nördlich der Lysimeterstützwand) von der Firma UGT (Umweltgerätetechnik, Müncheberg) eine Klimastation errichtet und an die Datenerfassungseinheit im Messcontainer angeschlossen. Die aktuell messende Station wurde von der Firma LUFFT installiert (Abb. 4 a, b). Die folgenden kontinuierlich gemessenen Daten werden alle 15 Minuten im Datenlogger gespeichert und von der Stadt Pforzheim online abgerufen: Niederschlag, Luftfeuchte, Temperatur, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit, Windrichtung. Nach Aussage des Betreibers werden die Windparameter nicht aufgezeichnet.



**Abb. 4:** a) Der Niederschlagsmesser des Lysimeters ist systembedingt direkt am Boden installiert. b) Die weiteren meteorologischen Daten werden mit den Niederschlägen an einen Datenlogger im Messcontainer gesendet und online abgerufen.

Da die Daten Wetterstation auf dem Hohberg in den letzten Jahren in zunehmendem Maße mit Fehlern behaftet waren, konnten diese nicht zu einer Bilanzierung herangezogen werden. Somit stehen, mit Ausnahme des Niederschlags (siehe nächstes Kapitel), keine weiteren meteorologischen Kenndaten zur Auswertung bereit

## I-2.6 Niederschlag

Aus oben genannten Gründen wird vermehrt auf die Niederschlagsdaten der DWD-Station Ispringen zurückgegriffen. Diese werden in der Regel durch die Technischen Dienste der Stadt Pforzheim organisiert und zur Verfügung gestellt. Die Station befindet sich in ca. 1 km Entfernung zum Standort (Abb. 5).

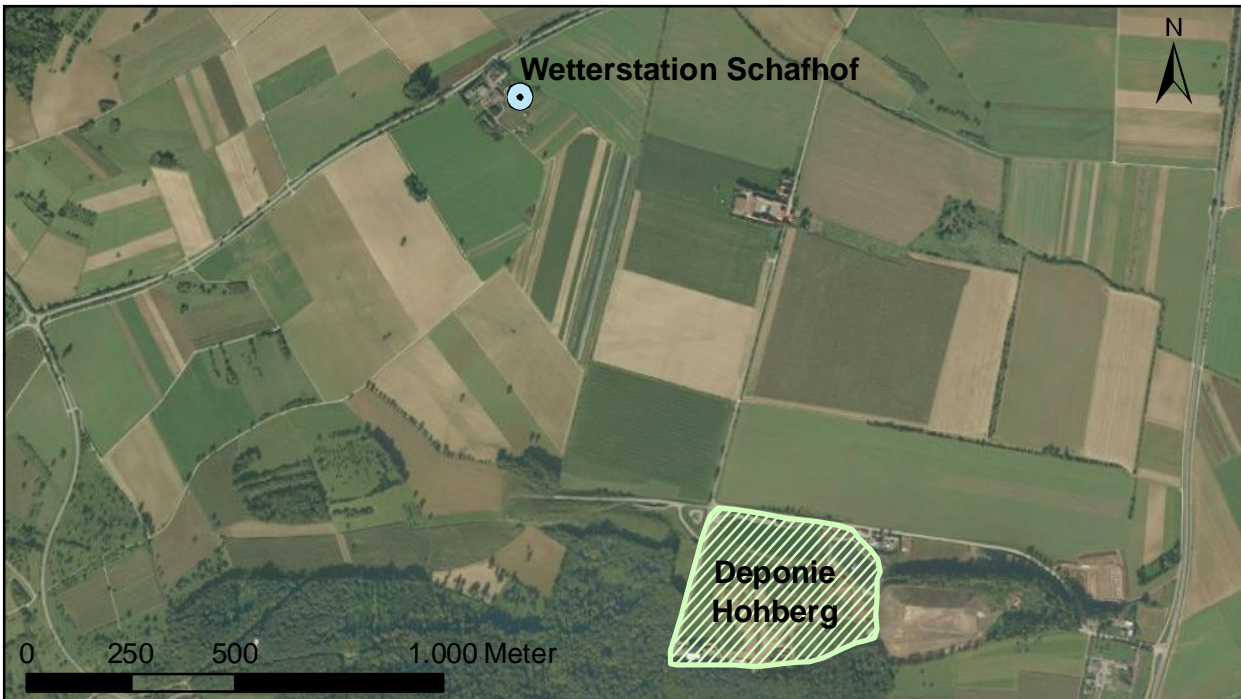


Abb. 5: Lage der DWD Station-Ispringen auf dem Schafhof und Lage der Deponie Hohberg.

## I-2.7 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:

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

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.



## I-2.8 Neuerungen 2015

### I-2.8.1 Wetterstation

Seit Anfang 2015 finden die Messungen der meteorologischen Kenngrößen an einer neuen Wetterstation des Deponiebetreibers statt. Sie wurde an eine Garage in der Nähe des Lysimeters (ca. 110 m Luftlinie) montiert. Nach aktuellem Stand liegen noch keine Wetterdaten vor, und die technischen Details der Station stehen ebenfalls noch nicht zur Verfügung.

### I-2.8.2 Bauwerksertüchtigung der Lysimeterzuflüsse

In den Monaten Februar – Mitte April 2015 fanden am Lysimetersystem Reparaturarbeiten an den Abflussrohren des Feldes statt. Durch eine Setzung des Hangs hatten diese sich der Art abgesenkt, dass eine Mulde entstand und sich dementsprechend Wassersäcke in den Rohren ausbildeten. Daher wurden die Rohre freigelegt und in ein neues, tiefergelegenes Bett eingebracht. Dadurch wiesen die Anschlüsse zum Messcontainer einen vertikalen Versatz auf. Das Messhaus wurde temporär versetzt, um ein tiefergelegenes Fundament erstellen zu können. Nach dessen Fertigstellung konnte der Container wieder an seinen ursprünglichen Platz zurück gestellt und die Abflussrohre ordnungsgemäß angeschlossen werden. Abb. 6 zeigt zwei Bilder von unterschiedlichen Bauabschnitten. Eine detailliertere Beschreibung ist dem Zwischenbericht vom 04.11.2015 zu entnehmen.



**Abb. 6:** a) Zulaufrohre mit Durchbiegung im Hangbereich, b) Fertiggestelltes System, ohne Isolierung.

### I-2.8.3 Datenlogger

Im Zuge der Erneuerung des Lysimeterhauses wurde die Stromzufuhr für den entsprechenden Zeitraum abgestellt. Somit konnte die Datenerfassung ohne externe Stromzufuhr und nur über Akkubetrieb nur für eine kurze Zeit aufrecht erhalten werden. Durch die Umbauphase und die damit verbundene, unterbrochene Stromzufuhr wurde der Datenlogger geschädigt. Nachdem ein Angebot zur Reparatur beim Hersteller ugt eingeholt wurde, wurde seitens der LUBW signalisiert, die Kosten zu übernehmen. Nach der Beauftragung von ugt mit der Reparatur durch die Stadt Pforzheim, wurde der Logger ausgebaut und

befindet sich aktuell bei ugt zur Reparatur. Seit Anfang Dezember 2015 ist behelfsmäßig eine Webcam installiert, die in regelmäßigen Abständen Bilder der Pegelanzeigen macht (Abb. 7). Da die Bilder aber von recht geringer Qualität sind, gestaltet sich eine Auswertung als ausgesprochen schwierig und langwierig. Zudem hatte sich der Computer anfangs ausgeschaltet oder nicht mehr reagiert. Dies lag vermutlich am Standby Modus und an der systembedingten Abschaltung des Bildschirms. Seit diese Optionen ausgeschaltet sind, läuft das System relativ stabil.



**Abb. 7:** Aufzeichnung der Webcam von den Pegelständen der Abflussbehälter. Aufgrund der groben Pixel ist eine Auswertung äußerst mühsam.

## I-3 Berechnungen

### I-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.

### I-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 II-1.5) wird diese Komponente üblicherweise zur Berechnung des Wirkungsgrades eines Abdichtungssystems herangezogen.

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

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



Stadt Pforzheim  
Hausmülldeponie Hohberg  
- Oberflächenabdichtung -  
LYSIMETER - TESTFELD

Messtechnische Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter

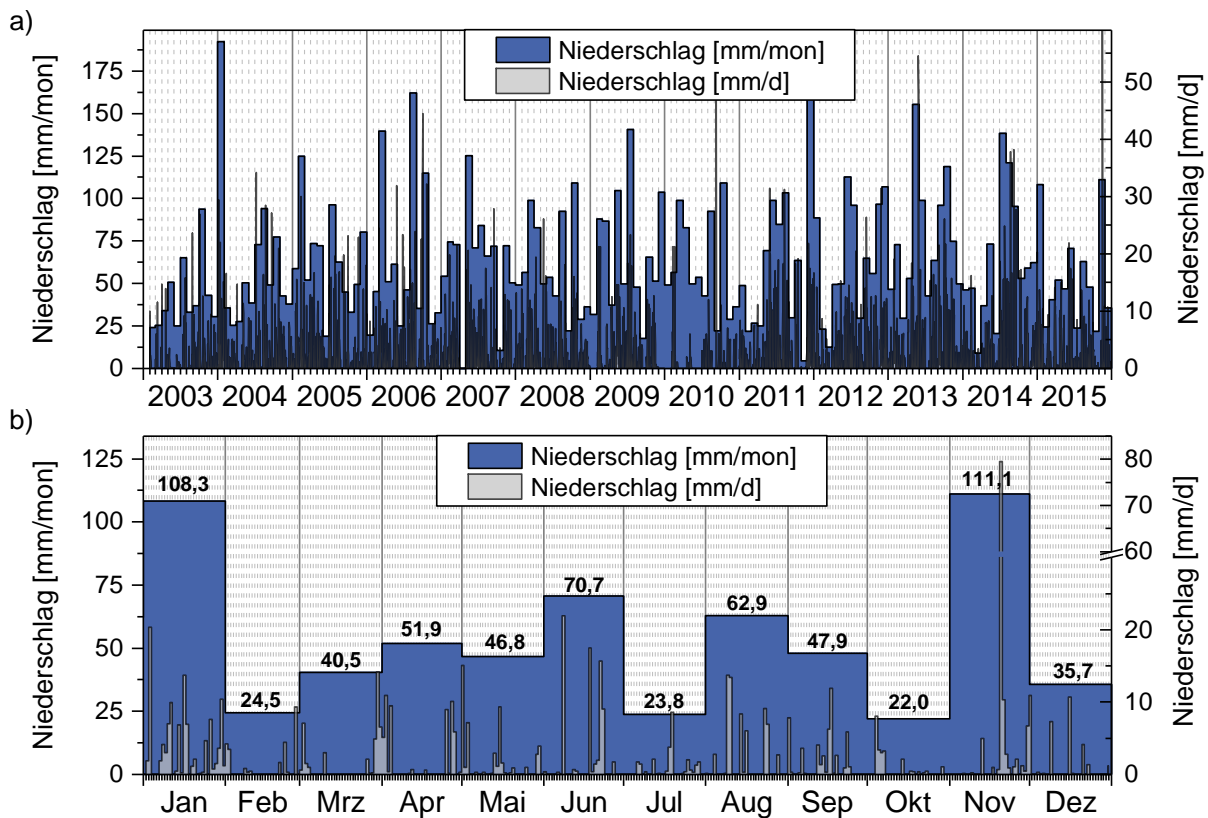
erstellt für die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)  
76231 Karlsruhe

## II Darstellung der Messergebnisse für das Jahr 2015

## II-1 Messergebnisse des Jahres 2015

### II-1.1 Niederschlag

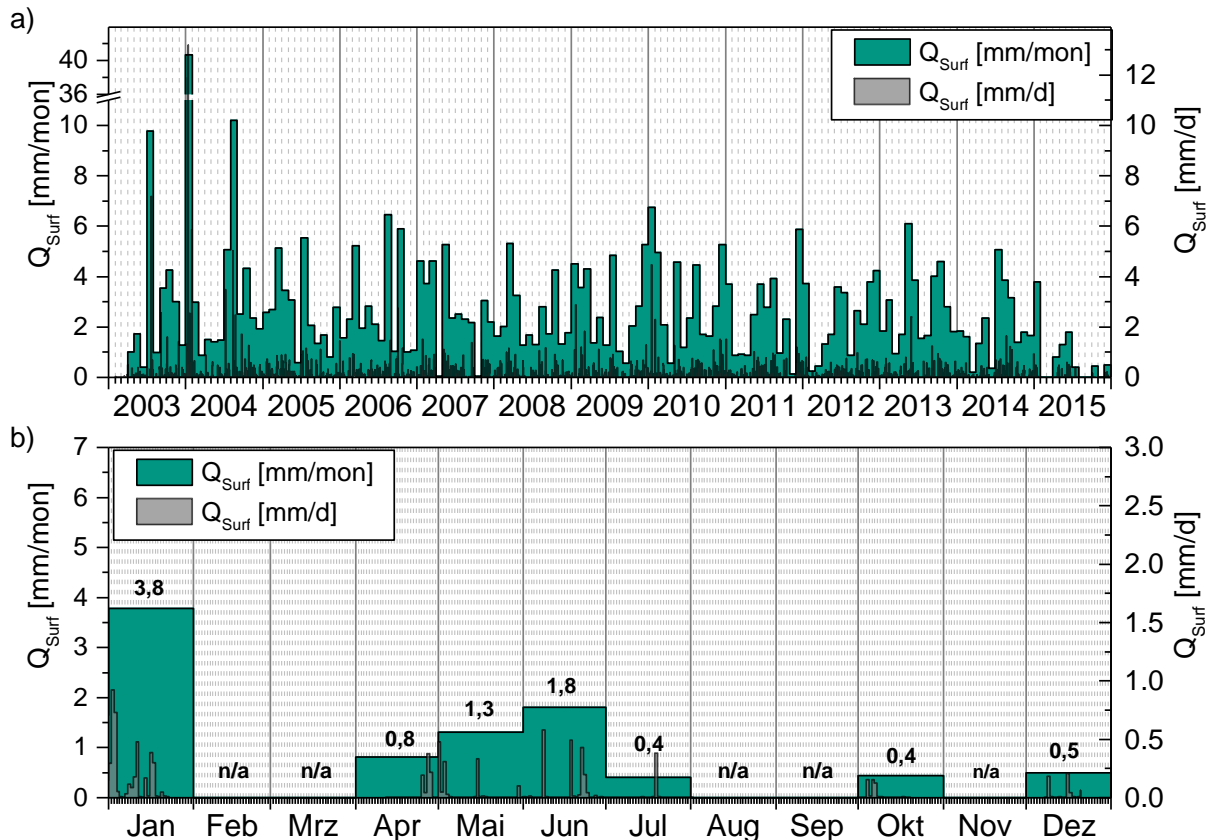
Abb. 8 zeigt die Niederschlagsverteilung für den Zeitraum 2003 – 2015 (Abb. 8a) und für das aktuelle Jahr 2015 (Abb. 8b). Der meiste Niederschlag wurde mit 111,1 mm im November registriert, dicht gefolgt vom Januar mit 108,3 mm. Der November-Niederschlag ist insofern besonders, als dass über 70% der monatlichen Summe an einem Tag (20.11.2015) gefallen sind. Die übrigen Monate weisen geringeren, bis erheblich geringeren Niederschlag auf. Der geringste monatliche Niederschlag fand im Oktober mit 22 mm statt. Aber auch Juli, Februar und Dezember waren niederschlagsarme Monate. Mit einem Gesamtniederschlag von 645,9 mm war das Jahr 2015 noch einmal wesentlich trockener als das Vorjahr ( $N_{a, 2014} = 761,8$  mm). Dementsprechend geringer sind auch die Oberflächenabflüsse (Abb. 9).



**Abb. 8:** a) Niederschlagsverteilung des Zeitraums 2003 bis 2015 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Niederschlagsverteilung für das Messjahr 2015 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate).

## II-1.2 Oberflächenabfluss ( $Q_{\text{Surf}}$ )

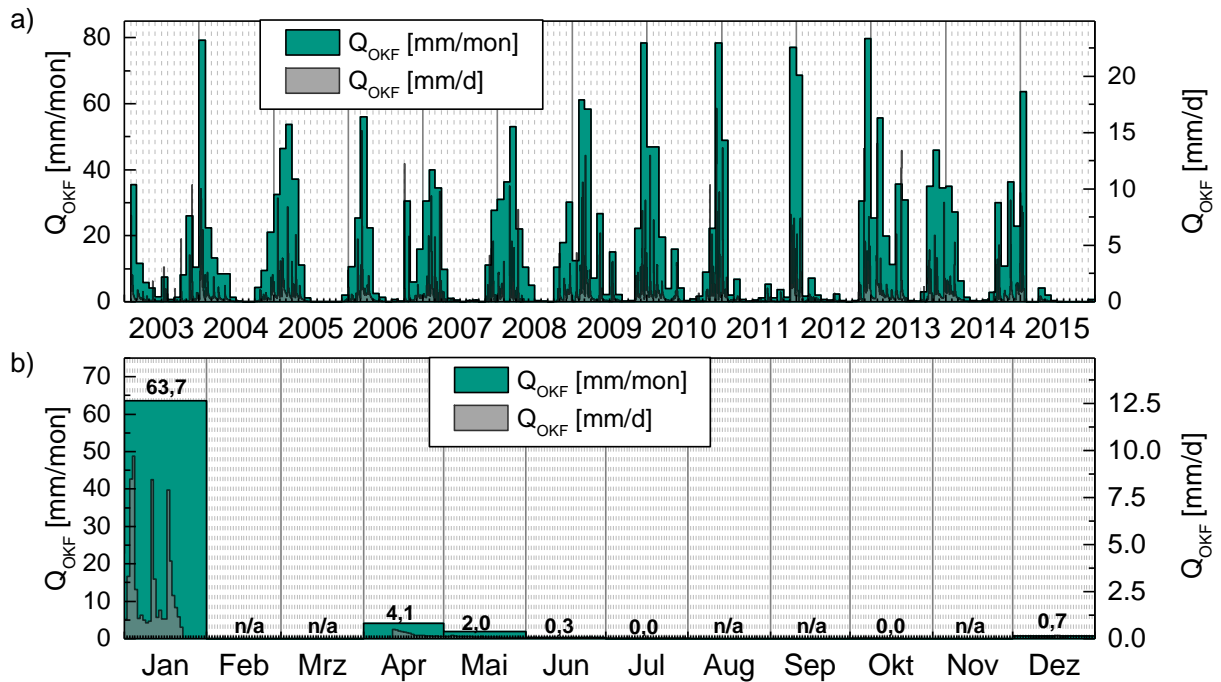
Die Datenlage lässt aufgrund des Umbaus (Kapitel. I-2.8.2) und des Datenverlusts durch Loggerausfall (Kapitel. I-2.8.3) keine Beurteilung des Abflussverhaltens zu. In den Monaten Januar und Mai – Juli fand verhältnismäßig normaler Abfluss statt, der auch mit dem Niederschlag in diesen Monaten korreliert. (Abb. 9).



**Abb. 9:** a) Verteilung des Oberflächenabflusses ( $Q_{\text{Surf}}$ ) für den Zeitraum 2003 bis 2015 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Verteilung des Oberflächenabflusses für das Messjahr 2015 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). n/a: keine auswertbaren Daten vorhanden.

## II-1.3 Oberer Kiesflächenfilter (OKF)

Mit Ausnahme des Januars 2015 wurde durch die Umbaumaßnahme der Hauptteil der saisonal bedingten Abflüsse nicht erfasst (Abb. 10). Die übrigen Monate dürften sich mengenmäßig nur unwesentlich vom Juli unterscheiden, mit Ausnahme ein paar weniger extremer Ereignisse (z. B. Starkregen vom 20.11.2015). Da im Dezember die Abflussfrequenz leicht ansteigt, wird hier der Monatsgesamtabfluss wahrscheinlich unterschätzt.

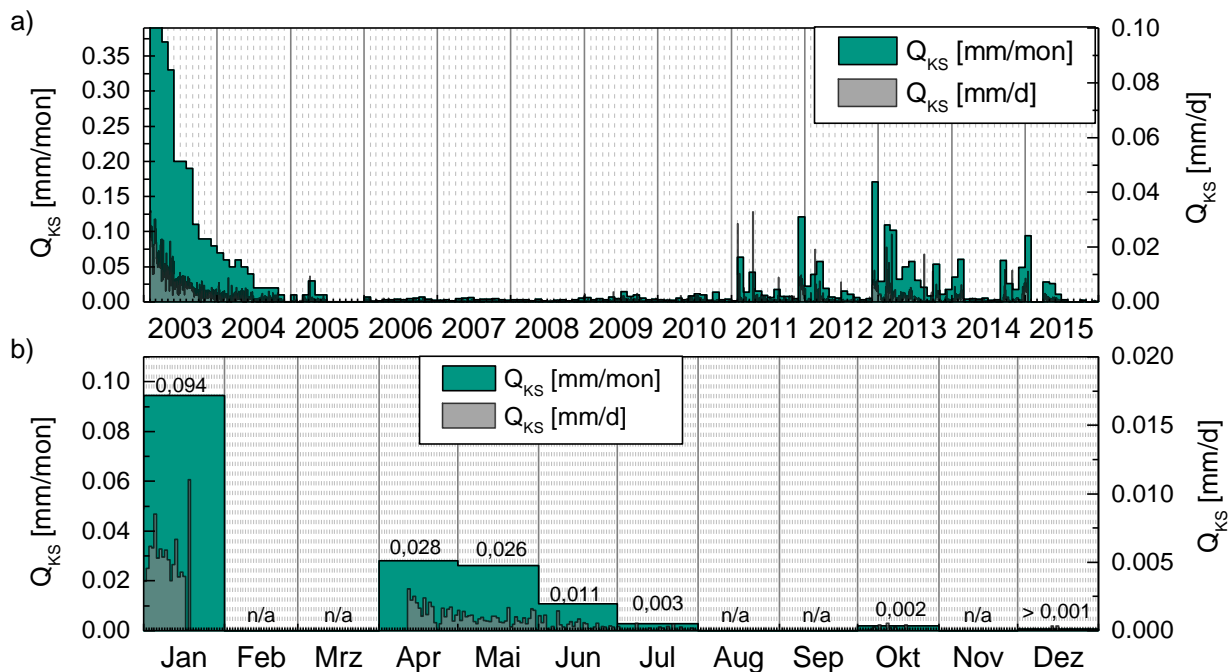


**Abb. 10:** a) Verteilung des Abflusses der Dränschicht für den Zeitraum 2003 bis 2015 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Verteilung des Abflusses der Dränschicht für das Messjahr 2015 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). n/a: keine auswertbaren Daten vorhanden.

## II-1.4 Kapillarschicht (KS)

Ähnlich wie beim OKF, wird ein Großteil der Abflussmengen durch den Umbau im Frühjahr nicht erfasst (Abb. 11). Ansonsten findet ein eher typisches Nachlassen der Abflüsse über den Sommer statt. Im Winter gab es bis zur letzten Aufzeichnung keinen signifikanten Anstieg der Pegel.

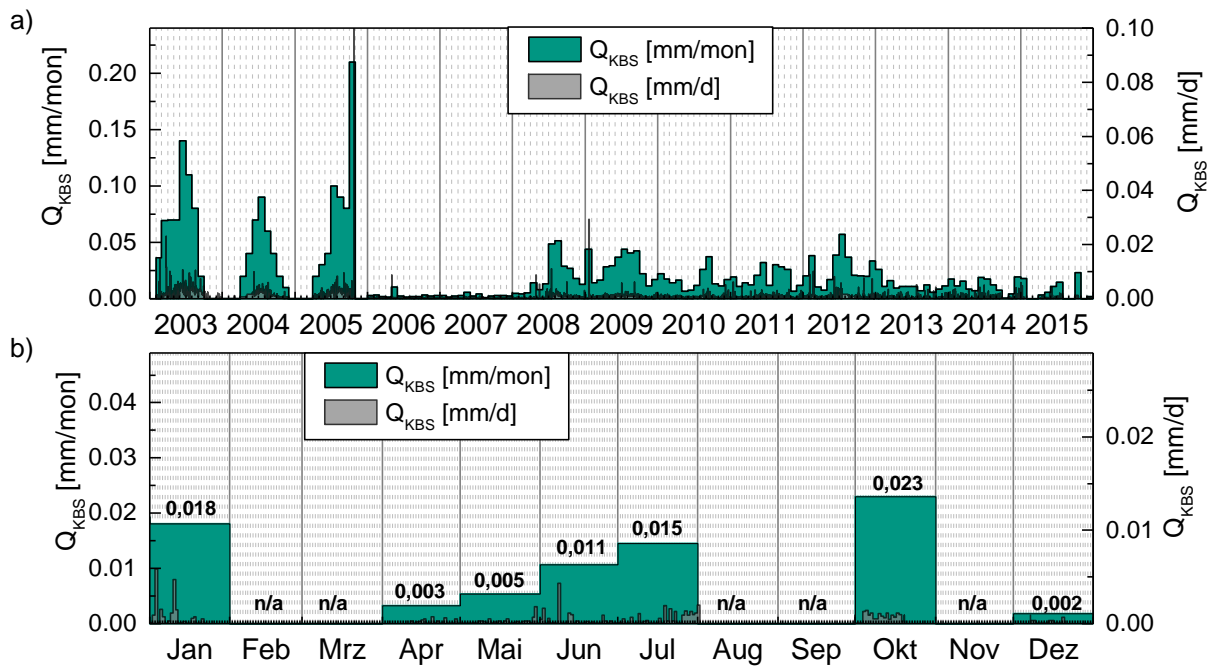




**Abb. 11:** a) Verteilung des Abflusses der Kapillarschicht für den Zeitraum 2003 bis 2015 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Verteilung des Abflusses der Kapillarschicht für das Messjahr 2015 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). n/a: keine auswertbaren Daten vorhanden.

## II-1.5 KapillARBRECHENDE SCHICHT (KBS)

In Abb. 12 sind die monatlichen Abflüsse der KBS aufgetragen. Da hier ein offensichtlicher Anstieg in den Monaten August bis September stattfindet (Anhang 1), kann man durch lineare Interpolation eine Pegeländerung von etwa 15 cm bzw. 14 cm im Monat herleiten. Dies entspricht einer zusätzlichen Abflussmenge von 4,7 L bzw. 0,047 mm im August und 4,4 L bzw. 0,044 mm im September. Da der Oktober auch nicht komplett erfasst ist, ist hier auch eine geringe Unterschätzung des monatlichen Abflusses anzunehmen. Allerdings scheint hier der Pegelanstieg deutlich nachzulassen. Wenn man aber den Zeitraum der Datenlücke am Anfang und am Ende des Monats Oktober berücksichtigt, so lässt sich ein Defizit von etwa einem Liter bestimmen. Im Dezember ist der Pegelstand der KBS bei 21 cm. Somit muss im Laufe des Novembers eine Entleerung und ein geringer Wiederanstieg stattgefunden haben. Anhand der Anfangs- und Endstände und unter Berücksichtigung einer Entleerung lässt sich ein Defizit von etwa 2 Litern bestimmen. Im Februar 2015 gab es sicherlich auch noch ein Nachtropfen, welches aber bei gegebener Datenlage nicht näher abgeschätzt werden kann. Somit erhöht sich der Gesamtjahresabfluss der KBS von 0,075 mm (7,5 L) auf etwa 0,19 mm (~19 L).



**Abb. 12:** a) Verteilung des Abflusses der Kapillarbruchschiicht für den Zeitraum 2003 bis 2015 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Verteilung des Abflusses der Kapillarbruchschiicht für das Messjahr 2015 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). n/a: keine auswertbaren Daten vorhanden.

## II-1.6 Evapotranspiration $ET_a$

Auch im Jahr 2015 fanden zur Bestimmung der Evapotranspiration nicht genügend Bodenfeuchtemessungen statt. In der Gesamt-Lysimeterbilanz kann  $ET_a$  damit nicht berücksichtigt werden und wird stattdessen als gemeinsames Glied von  $ET_a$  + Bodenfeuchte als Anteil des Niederschlags angegeben. Die Bodenfeuchtemessungen werden in Kapitel 5 separat dargestellt.

Die Evapotranspiration liegt für das Beobachtungsjahr 2013, zusammen mit der enthaltenen Bodenfeuchte, mit einem Anteil von 62,2% am Jahresniederschlag etwas unter dem Vorjahreswert (71,7%).

## II-2 Bewertung der Oberflächenabdichtung für das Jahr 2015

### II-2.1 Lysimeter-Wasserhaushaltsbilanz

Eine allgemeine Wasserbilanz lässt sich 2015 aufgrund der umfangreichen Umbaumaßnahmen und den damit verbundenen Datenlücken in der Hauptabflussperiode nicht aufstellen. Teilweise gleichen aber die Abflusswerte denen aus dem Vorjahr (für KS und KBS in manchen Monaten). Unter Berücksichtigung der meteorologischen Verhältnisse 2015 lässt sich somit ein Abflussverhalten vermuten, das dem vor Umbau entspricht.

Die monatlichen %-Anteile der einzelnen Komponenten der Wasserbilanz für den Untersuchungszeitraum 2015 sind detailliert in Tab. 2 aufgelistet.

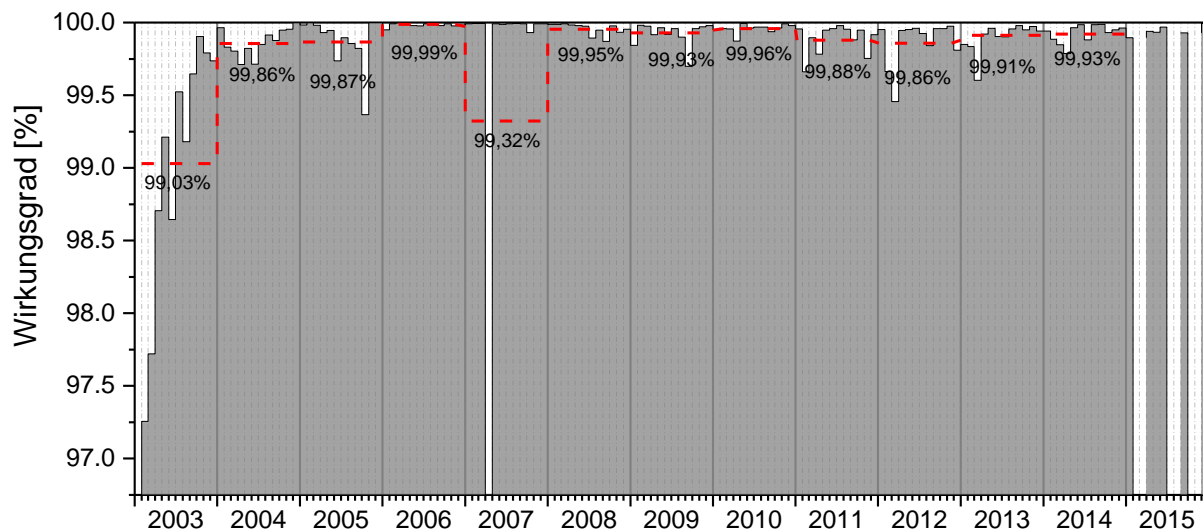
**Tab. 2:** Monatliche Abflusswerte der Abdichtungskomponenten in mm/Mon und im prozentualen Verhältnis zum Jahresniederschlag  $N_a$  2015.

| Monat                                    | $Q_{\text{Surf}}$<br>[mm/mon] | % von<br>$N$ | OKF<br>[mm/mon] | % von<br>$N$ | KS<br>[mm/mon] | % von<br>$N$ | KBS<br>[mm/mon] | % von<br>$N$ | Nieder-<br>schlag<br>[mm/mon] |
|--|-------------------------------|--------------|-----------------|--------------|----------------|--------------|-----------------|--------------|-------------------------------|
| Januar                                   | 3,78                          | 3,49         | 63,66           | 58,77        | 0,094          | 0,087        | 0,018           | 0,017        | 108,3                         |
| Februar                                  | -                             | -            | -               | -            | -              | -            | -               | -            | 24,5                          |
| März                                     | -                             | -            | -               | -            | -              | -            | -               | -            | 40,5                          |
| April                                    | 0,81                          | 1,57         | 4,08            | 7,86         | 0,028          | 0,054        | 0,003           | 0,006        | 51,9                          |
| Mai                                      | 1,31                          | 2,80         | 1,96            | 4,19         | 0,026          | 0,056        | 0,005           | 0,012        | 46,8                          |
| Juni                                     | 1,80                          | 2,55         | 0,28            | 0,40         | 0,011          | 0,015        | 0,011           | 0,011        | 70,7                          |
| Juli                                     | 0,40                          | 1,68         | 0,01            | 0,03         | 0,003          | 0,012        | 0,015           | 0,028        | 23,8                          |
| August                                   | -                             | -            | -               | -            | -              | -            | -               | -            | 62,9                          |
| September                                | -                             | -            | -               | -            | -              | -            | -               | -            | 47,9                          |
| Oktober                                  | 0,44                          | 2,02         | 0,00            | 0,01         | 0,002          | 0,009        | 0,014           | 0,063        | 22,0                          |
| November                                 | -                             | -            | -               | -            | -              | -            | -               | -            | 111,1                         |
| Dezember                                 | 0,5                           | 1,40         | 0,73            | 2,06         | 0,001          | 0,002        | 0,002           | 0,005        | 35,7                          |
| <b>Gesamt-<br/>Abfluss</b>               | <b>9,05</b>                   | -            | <b>70,72</b>    | -            | <b>0,165</b>   | -            | <b>0,068</b>    | -            | <b>645,9</b>                  |
| <b>ET<sub>a</sub> &amp; Bodenfeuchte</b> | -                             |              |                 |              |                |              |                 |              | -                             |

Zum Vergleich werden auch die Ergebnisse der Vorjahre herangezogen, deren monatliche Abflüsse und Bodenwasserbilanzen im Anhang 2 - 12 eingesehen werden können.

### II-2.1.1 Asphalttschicht

Der Wirkungsgrad der Asphalttschicht hat sich in den vergangenen Jahren prozentual gesehen nur gering verändert, dennoch sind gewisse Zusammenhänge erkennbar (Abb. 13). 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.

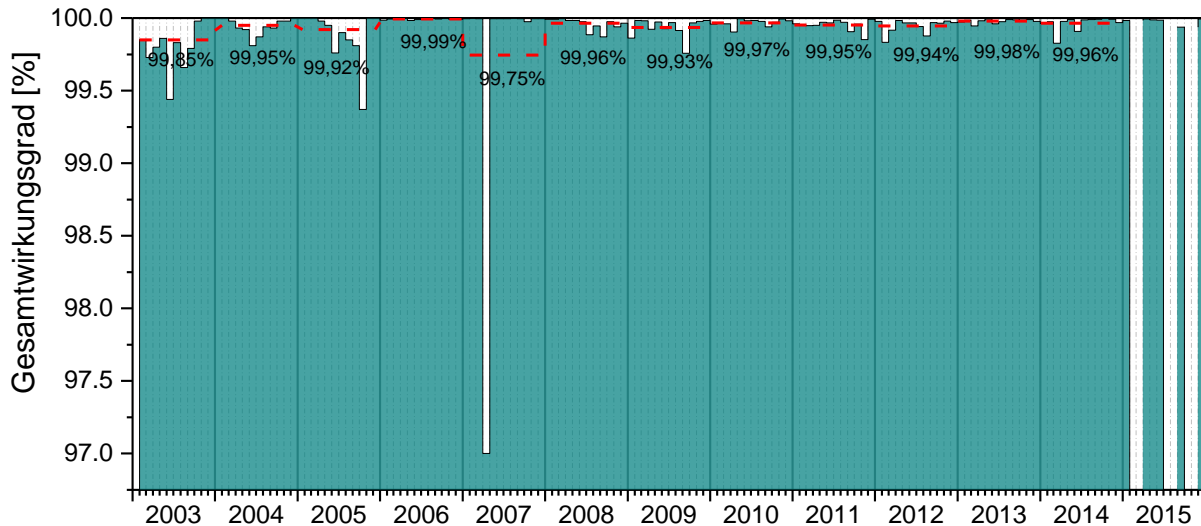


**Abb. 13:** Grafik über die Wirkungsgrade der Asphalttschicht aus dem Messzeitraum 2003 - 2015. Die rote Kurve stellt die Jahresmittel dar und der graue Bereich die Monatswerte. Der Einbruch des Wirkungsgrades im April 2007 auf 92,7% resultiert aus einer sehr geringen Menge an Niederschlag in diesem Monat (0,1 mm). Berechnungsgrundlage: Formel (2), Kapitel I-3.1.

### II-2.1.2 Gesamtsystem

Analog zum Wirkungsgrad der Asphalttschicht sind nur die bestimmbar Monate für das Gesamtsystem abgebildet (Abb. 14). Auch hier sind im Prinzip keine Auffälligkeiten im Vergleich zu den Vorjahren zu

erkennen. Eine tabellarische Darstellung aller berechneten Wirkungsgrade findet sich in (Berechnungsgrundlage: Formel (3), Kapitel I-3.2).

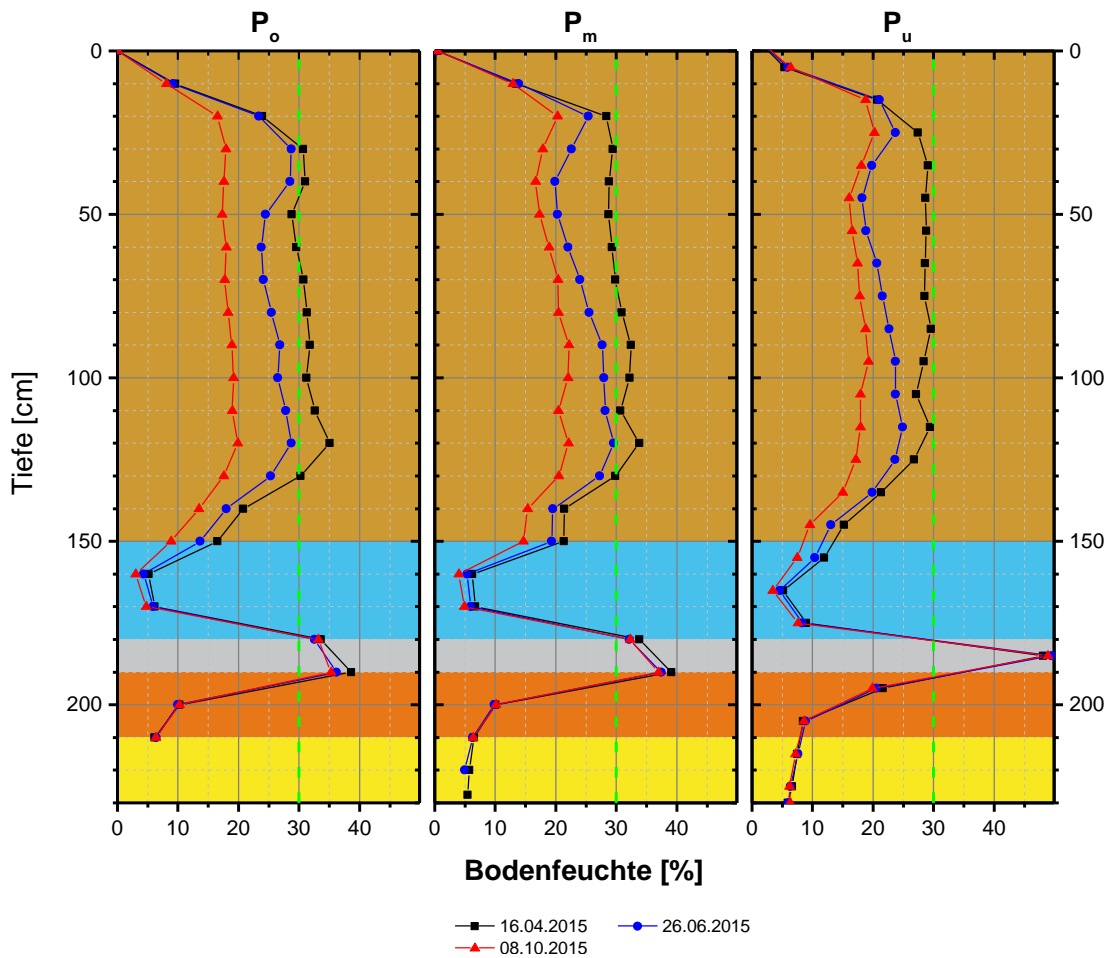


**Abb. 14:** Grafik über die Wirkungsgrade des Gesamtsystems aus dem Messzeitraum 2003 - 2015. Die rote Kurve stellt die Jahresmittel dar und der grüne Bereich die Monatswerte. Der Einbruch des Wirkungsgrades im April 2007 auf 97,0% resultiert aus einer sehr geringen Menge an Niederschlag in diesem Monat (0,1 mm).

## II-3 Neutronensondenmessung zur Bestimmung der Bodenfeuchte im Jahr 2015

Im Jahr 2015 wurden drei Stichtagsmessungen durchgeführt (Abb. 15). Die grün-gestrichelte Linie bei 30%-Bodenfeuchte erlaubt es, beide Messungen miteinander zu vergleichen. Sie soll verdeutlichen, in welchem Maß die weiter oben liegenden Messstellen höhere Bodenfeuchtenwerte erreichten (speziell im Bereich von 80 bis 130 cm Tiefe).  $P_u$  reicht mit den durchgeführten Messungen nur knapp an diese Linie heran.  $P_m$  und  $P_o$  überschreiten diesen Wert bei der ersten Stichtagsmessung vom 16.04.2015. Die Abnahme der Bodenfeuchte bis zum 08.10.2015 spiegelt das saisonal bedingte klimatische Verhalten wider.  $P_m$  nimmt dabei am wenigsten ab, besonders in einem Bereich von 60 – 130 cm. Auch bei den Werten aus 2015 lässt sich ein unterschiedliches Speichervermögen in den einzelnen Teilen des Feldes vermuten (vgl. Bericht 2013, Kapitel II-3).

$P_o$  und seit Mitte 2015 auch  $P_m$  sind aufgrund von Vernässung nicht bis in die letzten Schichttiefen befahrbar.



**Abb. 15:** Darstellung der Bodenfeuchteprofile für die Messstellen  $P_o$  (links),  $P_m$  (mitte) und  $P_u$  (rechts) zu den Zeitpunkten 16.04. (schwarze Linie), 26.06. (blaue Linie) und 08.10.2015 (rote Linie). Die grün gestrichelte Linie bei 30% Bodenfeuchte stellt einen Vergleichswert dar. (Die Farbgebung entspricht der ungefähren Tiefenlage der Schichten, siehe Abbildung 2 bzw. Abbildung 3).

## II-4 Zusammenfassung für das Jahr 2015

Durch die Instandsetzung des Systems und die zunehmende Unzuverlässigkeit des Datenloggers gab es im Verlauf des Jahres 2015 leider sehr große Datenlücken. Somit lässt sich die Leistungsfähigkeit des Systems nicht abschließend bewerten. Die Instandsetzung selbst ist nach der ersten Testphase und nach aktuellem Kenntnisstand als erfolgreich einzustufen (vgl. Zwischenbericht vom 04.11.2015). Da das Jahr 2015 verhältnismäßig trocken war, ist anzunehmen, dass auch die Gesamtabflüsse weitaus geringer waren als in den vergangenen Jahren. Über die Verteilung über die einzelnen Schichten lässt sich keine adäquate Aussage treffen. Ebenso scheinen die Wirkungsgrade der Asphaltsschicht und des Gesamtsystems (respektive KBS), sich nicht grundlegend von den Vorjahren zu unterscheiden. Allerdings sollte nun durch das erneuerte System, eine genauere tägliche Aufzeichnung der Daten möglich sein. Dies wird besonders interessant unter dem Aspekt, ob die Kapillarsperre auf saisonale Einflüsse reagiert und/oder von der Dränschicht beeinflusst wird. Anhand der vorhandenen Daten lässt sich das nur für die KS (wie

auch schon in den Vorjahren) vermuten. Hier scheint ein schichtparalleles Abfließen zum OKF stattzufinden. Die KBS hingegen reagiert etwas träger und gedämpfter. Hier beginnt offensichtlich im 2. Quartal ein langsamer Anstieg, der im Oktober seinen Höhepunkt hat und im November wieder drastisch nachzulassen scheint. Diese Annahmen lassen sich aus den Daten konstruieren, sind aber bei aufgrund der großen Datenlücken nicht gesichert. Es lässt sich aber ableiten, dass im Jahr 2016 der Abfluss der KS parallel zum Abfluss des OKF steigen und fallen wird. Die KBS reagiert dann in etwa mit einem halben Jahr Verzögerung auf die Hauptabflussperiode.

Seit dem 09.01.2016 sind fast durchgängig Bilder der Pegelstände vorhanden. Der Datenlogger ist fertiggestellt und kann Ende Februar 2016 eingebaut werden (Stand 18.02.2016), so dass die Datenlücke 2016 minimal sein wird. Somit sollte sich (bei erfolgreichem Loggereinbau und –inbetriebnahme) die Datenlage 2016 deutlich gegenüber 2015 verbessern.

---

Prof. Dr. N. Goldscheider

## II-5 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]

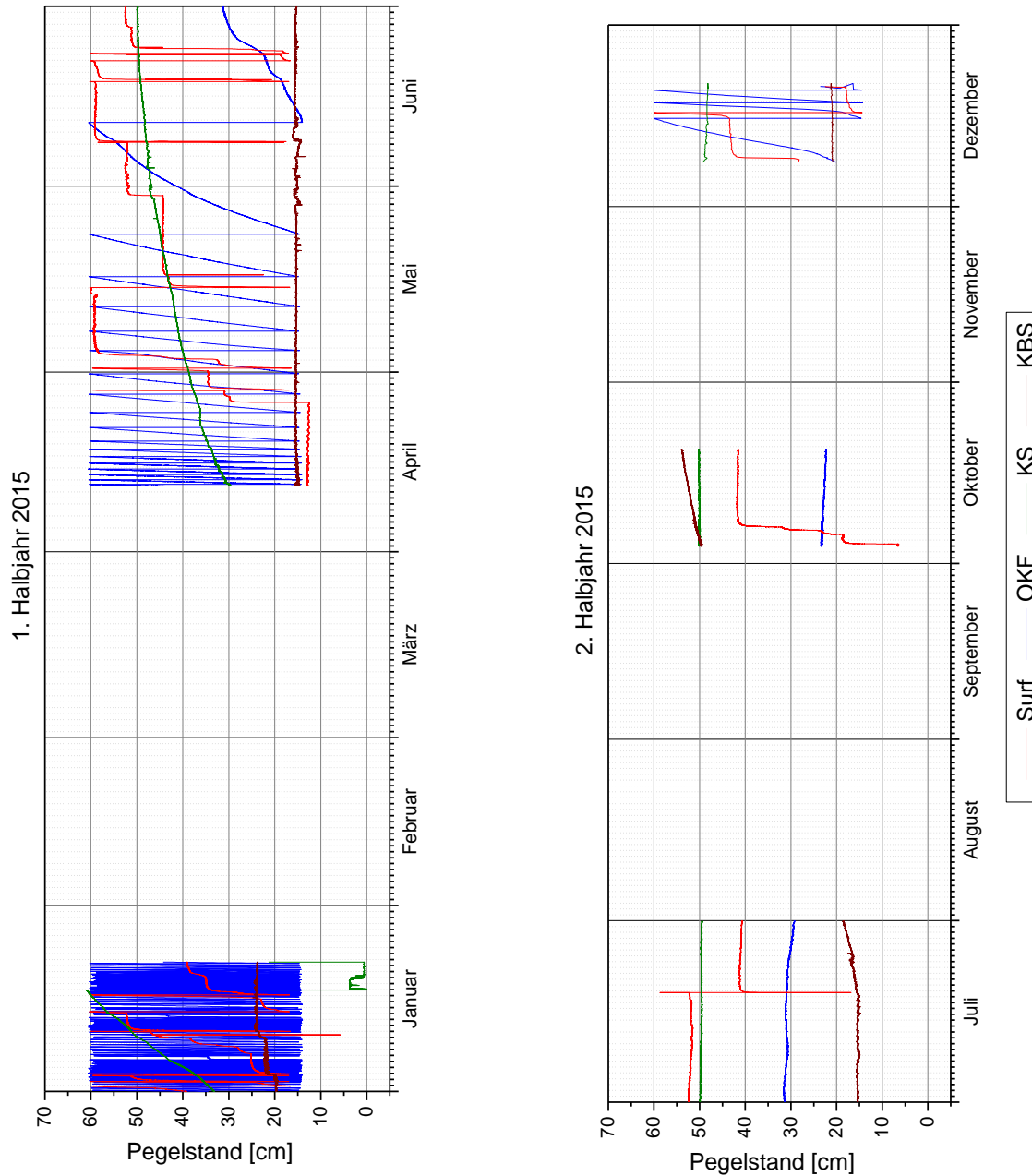


- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2013): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld LYSIMETER – Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für den Messzeitraum Januar – Dezember 2012 [April 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]
- 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 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, unveröffentlichter 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, unveröffentlichter 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.

## II-6 Anhang

Anhang 1: Darstellung der Wasserstände der einzelnen Lysimeterabflüsse über das Messjahr 2015.



**Anhang 2:** Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und der Bodenfeuchte 2003. N: Niederschlag, S: Sonderinput<sup>1</sup>,  $\Sigma$ : Summe der Abflüsse, % N: prozentualer Anteil der Abflusssummen am Niederschlag, Diff: Bodenfeuchtedifferenz,  $ET_a$ : Evapotranspiration

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

**Anhang 3:** Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] der Bodenfeuchte 2004. Zeichenerklärung siehe Anhang 2.

| 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   |
| $Q_{Surf}$ | 40,65  | 2,99  | 0,88  | 1,50   | 1,41   | 1,49   | 5,06   | 10,19 | 2,51  | 4,33  | 2,36  | 1,93  | 75,30    | 10,1  |
| $Q_{OKF}$  | 79,22  | 22,39 | 13,27 | 8,41   | 8,44   | 1,38   | 0,22   | 0,00  | 0,00  | 4,33  | 9,42  | 21,06 | 168,14   | 22,62 |
| $Q_{KS}$   | 0,07   | 0,06  | 0,05  | 0,06   | 0,05   | 0,04   | 0,02   | 0,02  | 0,02  | 0,02  | 0,01  | 0,00  | 0,42     | 0,06  |
| $Q_{KBS}$  | 0,00   | 0,00  | 0,00  | 0,02   | 0,04   | 0,07   | 0,09   | 0,06  | 0,04  | 0,02  | 0,01  | 0,00  | 0,35     | 0,05  |
| Diff       | -28,03 | 5,35  | -5,53 | -15,58 | -24,64 | -96,21 | -15,36 | 46,42 | 25,24 | 67,00 | 30,51 | 1,03  | -9,8     | -1,32 |
| $ET_a$     | 100,3  | 4,7   | 16,7  | 33,3   | 65,2   | 131,6  | 82,8   | 37,3  | 21,2  | 1,6   | 0,3   | 13,9  | 508,9    | 68,46 |

**Anhang 4:** Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] der Bodenfeuchte 2005. Zeichenerklärung siehe Anhang 2.

| 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   |
| $Q_{Surf}$ | 2,57  | 2,96  | 5,14   | 3,46   | 3,07   | 0,58   | 5,54  | 2,07 | 1,34  | 1,69  | 0,81  | 2,79  | 32,02    | 4,2   |
| $Q_{OKF}$  | 32,50 | 46,43 | 53,71  | 37,09  | 11,13  | 1,16   | 0,04  | 0,00 | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 2,05  | 184,08   | 24,02 |
| $Q_{KS}$   | 0,01  | 0,00  | 0,01   | 0,03   | 0,01   | 0,01   | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,06     | 0,01  |
| $Q_{KBS}$  | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,02   | 0,03   | 0,04   | 0,10  | 0,09 | 0,08  | 0,21  | 0,00  | 0,00  | 0,58     | 0,08  |
| Diff       | 3,08  | 34,60 | -14,00 | -32,71 | -46,79 | -72,31 | -0,95 | 1,17 | 33,81 | -1,69 | 12,69 | 65,49 | -17,6    | -2,30 |
| $ET_a$     | 20,5  | 40,8  | 7,0    | 65,5   | 104,8  | 89,4   | 91,5  | 59,3 | 9,8   | 32,9  | 36,0  | 9,8   | 567,3    | 74,02 |

<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).

**Anhang 5:** Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte +  $ET_a$  2006. Zeichenerklärung siehe Anhang 2.

| 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    |
| $Q_{Surf}$    | 1,58   | 2,3    | 5,23   | 1,94   | 2,84   | 2,11   | 1,46   | 6,45   | 1,03   | 5,89   | 0,99   | 1,09   | 32,92    | 4,33   |
| $Q_{OKF}$     | 10,61  | 25,35  | 56,06  | 22,44  | 2,46   | 1,39   | 0,004  | 0,68   | 0,08   | 30,54  | 5,94   | 15,86  | 117,41   | 22,57  |
| $Q_{KS}$      | 0,0068 | 0,001  | 0,0013 | 0,0034 | 0,0027 | 0,0036 | 0,003  | 0,0047 | 0,0052 | 0,0067 | 0,0038 | 0,0024 | 0,0446   | 0,0059 |
| $Q_{KBS}$     | 0,0028 | 0,0032 | 0,0019 | 0,0014 | 0,0104 | 0,0024 | 0,0012 | 0,0021 | 0,0019 | 0,0035 | 0,0025 | 0,0028 | 0,0361   | 0,0048 |
| Diff + $ET_a$ | 555,16 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | 73,09    |        |

**Anhang 6:** Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte +  $ET_a$  2007. Zeichenerklärung siehe Anhang 2.

| 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    |
| $Q_{Surf}$    | 4,61   | 3,73   | 4,61   | 0,04   | 5,26   | 2,34   | 2,52   | 2,3    | 2,17   | 0,04   | 3,05   | 2,2    | 32,85    | 4,37   |
| $Q_{OKF}$     | 30,52  | 39,88  | 34,54  | 9,83   | 1,01   | 0,43   | 0,02   | 0,31   | 0,51   | 0      | 11,09  | 27,61  | 155,74   | 20,69  |
| $Q_{KS}$      | 0,0024 | 0,003  | 0,0019 | 0,0043 | 0,0052 | 0,0065 | 0,0027 | 0,0036 | 0,0036 | 0,0047 | 0,0027 | 0,002  | 0,0429   | 0,0057 |
| $Q_{KBS}$     | 0,0026 | 0,0016 | 0,0023 | 0,003  | 0,0057 | 0,0023 | 0,0041 | 0,001  | 0,0023 | 0,0026 | 0,0029 | 0,0024 | 0,0328   | 0,0044 |
| Diff + $ET_a$ | 564,03 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | 74,93    |        |

**Anhang 7:** Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte +  $ET_a$  2008. Zeichenerklärung siehe Anhang 2.

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

**Anhang 8:** Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte +  $ET_a$  2009. Zeichenerklärung siehe Anhang 2.

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

**Anhang 9:** Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte +  $ET_a$  2010. Zeichenerklärung siehe Anhang 2.

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

**Anhang 10:** Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte +  $ET_a$  2011. Zeichenerklärung siehe Anhang 2.

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

**Anhang 11:** Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte +  $ET_a$  2012. Zeichenerklärung siehe Anhang 2.

| 2012          | Jan    | Feb   | Mrz   | Apr   | Mai   | Jun    | Jul   | Aug   | Sep   | Okt   | Nov   | Dez    | $\Sigma$ | % 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   |
| $Q_{Surf}$    | 3,72   | 0,25  | 0,44  | 1,33  | 1,71  | 3,59   | 3,36  | 0,86  | 2,65  | 2,10  | 3,80  | 4,24   | 28,05    | 3,57  |
| $Q_{OKF}$     | 68,67  | 1,58  | 7,13  | 1,92  | 0,65  | 0,43   | 2,30  | 0,28  | 0,01  | 0,35  | 30,48 | 79,72  | 193,52   | 24,63 |
| $Q_{KS}$      | 0,022  | 0,039 | 0,057 | 0,019 | 0,007 | 0,005  | 0,015 | 0,010 | 0,006 | 0,003 | 0,005 | 0,171  | 0,360    | 0,05  |
| $Q_{KBS}$     | 0,020  | 0,038 | 0,010 | 0,008 | 0,017 | 0,038  | 0,057 | 0,037 | 0,021 | 0,020 | 0,020 | 0,033  | 0,320    | 0,04  |
| Diff + $ET_a$ | 563,55 |       |       |       |       |        |       |       |       |       |       |        |          | 71,72 |

**Anhang 12:** Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte +  $ET_a$  2013. Zeichenerklärung siehe Anhang 2.

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

**Anhang 13:** Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte +  $ET_a$  2014. Zeichenerklärung siehe Anhang 2.

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

**Anhang 14:** Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte +  $ET_a$  2015. Zeichenerklärung siehe Anhang 2.

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

**Anhang 15:** Gesamtwirkungsgrad  $W_{ges}$  der Oberflächenabdichtung für den Untersuchungszeitraum 2003 – 2015.

|   | Niederschlag [mm] | Gesamtwirkungsgrad $W_{ges}$ [%] |
|---|-------------------|----------------------------------|
| Jan 2003                                | -                 | -                                |
| Feb 2003                                | 24,2              | 99,85                            |
| Mrz 2003                                | 25,5              | 99,73                            |
| Apr 2003                                | 34,0              | 99,80                            |
| Mai 2003                                | 50,7              | 99,86                            |
| Jun 2003                                | 25,1              | 99,44                            |
| Jul 2003                                | 65,0              | 99,83                            |
| Aug 2003                                | 32,9              | 99,66                            |
| Sep 2003                                | 36,8              | 99,79                            |
| Okt 2003                                | 93,8              | 99,98                            |
| Nov 2003                                | 43,1              | 100,00                           |
| Dez 2003                                | 30,4              | 100,00                           |
| <b>Jahres-<math>W_{ges}</math> 2003</b> | <b>461,5</b>      | <b>99,85</b>                     |

Fortsetzung Anhang 15:

|   | Niederschlag [mm] | Gesamtwirkungsgrad $W_{ges}$ [%] |
|---|-------------------|----------------------------------|
| Jan 2004                                | 192,2             | 100,00                           |
| Feb 2004                                | 35,5              | 100,00                           |
| Mrz 2004                                | 25,4              | 99,98                            |
| Apr 2004                                | 27,7              | 99,93                            |
| Mai 2004                                | 50,5              | 99,92                            |
| Jun 2004                                | 38,4              | 99,81                            |
| Jul 2004                                | 72,8              | 99,87                            |
| Aug 2004                                | 94,0              | 99,94                            |
| Sep 2004                                | 49,0              | 99,93                            |
| Okt 2004                                | 77,3              | 99,98                            |
| Nov 2004                                | 42,6              | 99,98                            |
| Dez 2004                                | 37,9              | 100,00                           |
| <b>Jahres-<math>W_{ges}</math> 2004</b> | <b>743,3</b>      | <b>99,95</b>                     |
| Jan 2005                                | 58,6              | 100,00                           |
| Feb 2005                                | 124,8             | 100,00                           |
| Mrz 2005                                | 51,9              | 100,00                           |
| Apr 2005                                | 73,4              | 99,98                            |
| Mai 2005                                | 72,3              | 99,95                            |
| Jun 2005                                | 18,9              | 99,76                            |
| Jul 2005                                | 96,2              | 99,90                            |
| Aug 2005                                | 62,6              | 99,85                            |
| Sep 2005                                | 45,0              | 99,81                            |
| Okt 2005                                | 33,1              | 99,37                            |
| Nov 2005                                | 49,5              | 100,00                           |
| Dez 2005                                | 80,1              | 100,00                           |
| <b>Jahres-<math>W_{ges}</math> 2005</b> | <b>766,6</b>      | <b>99,92</b>                     |



Fortsetzung Anhang 15:

|   | Niederschlag [mm] | Gesamtwirkungsgrad $W_{ges}$ [%] |
|---|-------------------|----------------------------------|
| Jan 2006                                | 19,5              | 99,99                            |
| Feb 2006                                | 45,3              | 99,99                            |
| Mrz 2006                                | 139,6             | 100,00                           |
| Apr 2006                                | 51,0              | 100,00                           |
| Mai 2006                                | 61,4              | 99,98                            |
| Jun 2006                                | 25,1              | 99,99                            |
| Jul 2006                                | 46,1              | 100,00                           |
| Aug 2006                                | 162,1             | 100,00                           |
| Sep 2006                                | 35,3              | 99,99                            |
| Okt 2006                                | 115,0             | 100,00                           |
| Nov 2006                                | 26,5              | 99,99                            |
| Dez 2006                                | 32,6              | 99,99                            |
| <b>Jahres-<math>W_{ges}</math> 2006</b> | <b>759,6</b>      | <b>99,99</b>                     |
| Jan 2007                                | 54,1              | 100,00                           |
| Feb 2007                                | 74,4              | 100,00                           |
| Mrz 2007                                | 72,8              | 100,00                           |
| Apr 2007                                | 0,1               | 97,00                            |
| Mai 2007                                | 125,2             | 100,00                           |
| Jun 2007                                | 70,9              | 100,00                           |
| Jul 2007                                | 84,0              | 100,00                           |
| Aug 2007                                | 66,1              | 100,00                           |
| Sep 2007                                | 71,8              | 100,00                           |
| Okt 2007                                | 10,5              | 99,98                            |
| Nov 2007                                | 82,3              | 100,00                           |
| Dez 2007                                | 50,5              | 100,00                           |
| <b>Jahres-<math>W_{ges}</math> 2007</b> | <b>752,7</b>      | <b>99,75</b>                     |

Fortsetzung Anhang 15:

|   | Niederschlag [mm] | Gesamtwirkungsgrad $W_{ges}$ [%] |
|---|-------------------|----------------------------------|
| Jan 2008                                | 49,2              | 99,99                            |
| Feb 2008                                | 56,5              | 99,99                            |
| Mrz 2008                                | 98,8              | 99,99                            |
| Apr 2008                                | 82,7              | 99,98                            |
| Mai 2008                                | 49,7              | 99,98                            |
| Jun 2008                                | 53,7              | 99,98                            |
| Jul 2008                                | 52,6              | 99,89                            |
| Aug 2008                                | 92,4              | 99,94                            |
| Sep 2008                                | 22,1              | 99,87                            |
| Okt 2008                                | 109,1             | 99,98                            |
| Nov 2008                                | 28,9              | 99,94                            |
| Dez 2008                                | 36,2              | 99,96                            |
| <b>Jahres-<math>W_{ges}</math> 2008</b> | <b>721,8</b>      | <b>99,96</b>                     |
| Jan 2009                                | 31,9              | 99,86                            |
| Feb 2009                                | 87,9              | 99,98                            |
| Mrz 2009                                | 86,8              | 99,98                            |
| Apr 2009                                | 37,1              | 99,92                            |
| Mai 2009                                | 104,5             | 99,97                            |
| Jun 2009                                | 49,9              | 99,93                            |
| Jul 2009                                | 140,5             | 99,97                            |
| Aug 2009                                | 47,8              | 99,92                            |
| Sep 2009                                | 17,5              | 99,76                            |
| Okt 2009                                | 65,5              | 99,97                            |
| Nov 2009                                | 51,5              | 99,98                            |
| Dez 2009                                | 103,8             | 99,98                            |
| <b>Jahres-<math>W_{ges}</math> 2009</b> | <b>824,7</b>      | <b>99,94</b>                     |

Fortsetzung Anhang 15:

|   | Niederschlag [mm] | Gesamtwirkungsgrad $W_{ges}$ [%] |
|---|-------------------|----------------------------------|
| Jan 2010                                | 52,8              | 99,96                            |
| Feb 2010                                | 47,4              | 99,96                            |
| Mrz 2010                                | 36,3              | 99,96                            |
| Apr 2010                                | 17,0              | 99,90                            |
| Mai 2010                                | 139,1             | 100,00                           |
| Jun 2010                                | 42,6              | 99,98                            |
| Jul 2010                                | 73,7              | 99,98                            |
| Aug 2010                                | 117,9             | 99,98                            |
| Sep 2010                                | 61,4              | 99,94                            |
| Okt 2010                                | 44,2              | 99,97                            |
| Nov 2010                                | 112,2             | 99,99                            |
| Dez 2010                                | 138,8             | 99,98                            |
| <b>Jahres-<math>W_{ges}</math> 2010</b> | <b>883,4</b>      | <b>99,96</b>                     |
| Jan 2011                                | 48,9              | 99,96                            |
| Feb 2011                                | 21,9              | 99,95                            |
| Mrz 2011                                | 26,7              | 99,95                            |
| Apr 2011                                | 25                | 99,95                            |
| Mai 2011                                | 69,4              | 99,97                            |
| Jun 2011                                | 98,9              | 99,97                            |
| Jul 2011                                | 84,8              | 99,99                            |
| Aug 2011                                | 103,2             | 99,97                            |
| Sep 2011                                | 29,8              | 99,91                            |
| Okt 2011                                | 63,4              | 99,96                            |
| Nov 2011                                | 4,4               | 99,85                            |
| Dez 2011                                | 160,3             | 99,99                            |
| <b>Jahres-<math>W_{ges}</math> 2011</b> | <b>736,7</b>      | <b>99,95</b>                     |

Fortsetzung Anhang 15:

|   | Niederschlag [mm] | Gesamtwirkungsgrad $W_{ges}$ [%] |
|---|-------------------|----------------------------------|
| Jan 2012                                | 88,7              | 99,98                            |
| Feb 2012                                | 23,0              | 99,83                            |
| Mrz 2012                                | 12,4              | 99,92                            |
| Apr 2012                                | 49,3              | 99,98                            |
| Mai 2012                                | 49,7              | 99,97                            |
| Jun 2012                                | 112,8             | 99,97                            |
| Jul 2012                                | 96,1              | 99,94                            |
| Aug 2012                                | 29,6              | 99,88                            |
| Sep 2012                                | 64,8              | 99,97                            |
| Okt 2012                                | 55,8              | 99,96                            |
| Nov 2012                                | 96,7              | 99,98                            |
| Dez 2012                                | 106,9             | 99,97                            |
| <b>Jahres-<math>W_{ges}</math> 2012</b> | <b>785,8</b>      | <b>99,95</b>                     |
| Jan 2013                                | 46,4              | 99,97                            |
| Feb 2013                                | 72,8              | 99,99                            |
| Mrz 2013                                | 29,6              | 99,95                            |
| Apr 2013                                | 53,0              | 99,98                            |
| Mai 2013                                | 155,3             | 99,99                            |
| Jun 2013                                | 99,0              | 99,96                            |
| Jul 2013                                | 42,6              | 99,97                            |
| Aug 2013                                | 63,6              | 99,99                            |
| Sep 2013                                | 95,9              | 99,99                            |
| Okt 2013                                | 118,8             | 100,00                           |
| Nov 2013                                | 74,9              | 99,99                            |
| Dez 2013                                | 49,8              | 99,98                            |
| <b>Jahres-<math>W_{ges}</math> 2013</b> | <b>901,5</b>      | <b>99,98</b>                     |

Fortsetzung Anhang 15:

|   | Niederschlag [mm] | Gesamtwirkungsgrad $W_{ges}$ [%] |
|---|-------------------|----------------------------------|
| Jan 2014                                | 46,1              | 99,96                            |
| Feb 2014                                | 47,2              | 99,98                            |
| Mrz 2014                                | 8,9               | 99,83                            |
| Apr 2014                                | 36,9              | 99,98                            |
| Mai 2014                                | 73,2              | 99,99                            |
| Jun 2014                                | 20,4              | 99,91                            |
| Jul 2014                                | 138,4             | 99,99                            |
| Aug 2014                                | 121,1             | 99,99                            |
| Sep 2014                                | 95,3              | 99,99                            |
| Okt 2014                                | 53,0              | 100,00                           |
| Nov 2014                                | 58,9              | 99,99                            |
| Dez 2014                                | 62,3              | 99,97                            |
| <b>Jahres-<math>W_{ges}</math> 2014</b> | <b>761,8</b>      | <b>99,96</b>                     |
| Jan 2015                                | 108,3             | 99,98                            |
| Feb 2015                                | 24,5              | -                                |
| Mrz 2015                                | 40,5              | -                                |
| Apr 2015                                | 51,9              | 99,99                            |
| Mai 2015                                | 46,8              | 99,99                            |
| Jun 2015                                | 70,7              | 99,98                            |
| Jul 2015                                | 23,8              | 99,94                            |
| Aug 2015                                | 62,9              | -                                |
| Sep 2015                                | 47,9              | -                                |
| Okt 2015                                | 22,0              | 99,94                            |
| Nov 2015                                | 111,1             | -                                |
| Dez 2015                                | 35,7              | 99,99                            |
| <b>Jahres-<math>W_{ges}</math> 2015</b> | <b>645,9</b>      | <b>-</b>                         |

Anhang 15: beigelegt als CD

Datenablage

Digitaler Bericht

Auswertung