

Hausmülldeponie Hohberg

Lysimeter - Testfeld

28.03.2017

Messtechnische Bauwerksüberwachung
der Oberflächenabdichtung
mittels Lysimeter

M. Sc. M. Merk, Dr. N. Göppert, Prof. Dr. N. Goldscheider
Messperiode Januar bis Dezember 2016
Erstellt für die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz
Baden-Württemberg (LUBW), 76231 Karlsruhe

Inhalt

| | |
|--|------------|
| Inhalt | I |
| Abbildungsverzeichnis | II |
| Tabellenverzeichnis | II |
| Anhangsverzeichnis | III |
| I. Einleitung | 1 |
| 1 Aufgabenstellung | 1 |
| 2 Messtechnische Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter | 2 |
| 2.1 Standort Hohberg | 2 |
| 2.2 Beschreibung des Lysimeters | 3 |
| 2.2.1 Messprinzip | 3 |
| 2.2.2 Lysimeteraufbau | 3 |
| 2.2.3 Abflussregime | 5 |
| 2.2.4 Beschreibung der Abflusskomponenten | 7 |
| 2.3 Niederschlag | 8 |
| 2.4 Evapotranspiration | 8 |
| 3 Berechnungen | 9 |
| 3.1 Wirkungsgrad der Asphaltsschicht | 9 |
| 3.2 Wirkungsgrad des Gesamtsystems | 9 |
| II. Messergebnisse | 10 |
| 4 Messergebnisse des Jahres 2016 | 10 |
| 4.1 Niederschlag | 10 |
| 4.2 Oberflächenabfluss (Q_{Surf}) | 10 |
| 4.3 Oberer Kiesflächenfilter (OKF) | 11 |
| 4.4 Kapillarschicht (KS) | 12 |
| 4.5 KapillARBrechende Schicht (KBS) | 13 |
| 4.6 Evapotranspiration ET_a | 14 |
| 5 Bewertung der Oberflächenabdichtung für das Jahr 2016 | 14 |
| 5.1 Lysimeter-Wasserhaushaltsbilanz | 14 |
| 5.2 Asphaltsschicht | 15 |
| 5.3 Gesamtsystem | 16 |
| 6 Neutronensondenmessung zur Bestimmung der Bodenfeuchte im Jahr 2016 | 17 |
| 7 Zusammenfassung für das Jahr 2016 | 18 |
| Literatur und bisherige Berichte | 19 |
| Anhang | 22 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| 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). | 4 |
| Abb. 2: Skizze des Lysimeters mit Verlegungsplan eines Glasfaserkabels, Neutronensondenmessstellen und Wassereingabepunkte für mögliche Flutungsversuche. | 5 |
| Abb. 3: Schematischer Querschnitt des Lysimeters mit Neutronensondenmessstellen..... | 6 |
| Abb. 4: Lage der DWD-Station Ispringen auf dem Schafhof und Lage der Deponie Hohberg. | 8 |
| Abb. 5: a) Niederschlagsverteilung des Zeitraums 2003 bis 2016 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Niederschlagsverteilung für das Messjahr 2016 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst, Station Pforzheim-Ispringen..... | 10 |
| Abb. 7: a) Verteilung des Abflusses der Dränschicht für den Zeitraum 2003 bis 2016 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Verteilung des Abflusses der Dränschicht für das Messjahr 2016 in mm/Monat (linke Ordinate) | 12 |
| Abb. 8: a) Verteilung des Abflusses der Kapillarschicht für den Zeitraum 2003 bis 2016 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Verteilung des Abflusses der Kapillarschicht für das Messjahr 2016 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). | 13 |
| Abb. 9: a) Verteilung des Abflusses der Kapillarbruchsicht für den Zeitraum 2003 bis 2015 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Verteilung des Abflusses der Kapillarbruchsicht für das Messjahr 2015 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). n/a: keine auswertbaren Daten vorhanden. | 14 |
| Abb. 10: Grafik über die Wirkungsgrade der Asphalttschicht aus dem Messzeitraum 2003 - 2016. Die rote Kurve stellt die Jahresmittel dar, 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),..... | 16 |
| Abb. 11: Grafik über die Wirkungsgrade des Gesamtsystems aus dem Messzeitraum 2003 - 2016. Die rote Kurve stellt die Jahresmittel dar und der grüne Bereich die Monatswerte. Der Einbruch des Wirkungsgrades im April 2007 auf 97,0% resultiert aus einer sehr geringen Menge an Niederschlag in diesem Monat (0,1 mm). Für 2015 konnte aufgrund von Datenlücken kein Durchschnitt berechnet werden..... | 16 |
| Abb. 12: Darstellung der Bodenfeuchteprofile für die Messstellen P_o (links), P_m (mitte) und P_u (rechts) zu den Zeitpunkten 19.05. (schwarze Linie), 14.07. (blaue Linie), 16.09. (rote Linie) und 13.12.2016 (türkise Linie). (Die hinterlegte Farbgebung entspricht der ungefähren Tiefenlage der Schichten, vgl. Abb. 3)..... | 17 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tab. 1: Übersicht über die Baumaßnahmen und Messungen am Lysimeter | 2 |
| Tab. 2: Monatliche Abflusswerte der Abdichtungskomponenten in mm/Mon und im prozentualen Verhältnis zum Jahresniederschlag N_a 2016. | 15 |

Anhang

| | |
|---|----|
| Anhang 1: Darstellung der Wasserstände der einzelnen Lysimeterabflüsse über das Messjahr 2016. Daten im grau hinterlegten Bereich stammen aus der Auswertung der Webcam-Aufzeichnungen vom 09.01. bis zum 26.02.2016, mit einer Lücke vom 18.01. bis zum 30.01.2016..... | 22 |
| Anhang 2: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und der Bodenfeuchte 2003. N: Niederschlag, S: Sonderinput, Σ : Summe der Abflüsse, % N: prozentualer Anteil der Abflusssummen am Niederschlag, Diff: Bodenfeuchtedifferenz, ET_a : Evapotranspiration | 23 |
| Anhang 3: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] der Bodenfeuchte 2004. Zeichenerklärung siehe Anhang 2..... | 23 |
| Anhang 4: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] der Bodenfeuchte 2005. Zeichenerklärung siehe Anhang 2..... | 23 |
| Anhang 5: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte + ET_a 2006. Zeichenerklärung siehe Anhang 2. | 24 |
| Anhang 6: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte + ET_a 2007. Zeichenerklärung siehe Anhang 2. | 24 |
| Anhang 7: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte + ET_a 2008. Zeichenerklärung siehe Anhang 2. | 24 |
| Anhang 8: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte + ET_a 2009. Zeichenerklärung siehe Anhang 2. | 24 |
| Anhang 9: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte + ET_a 2010. Zeichenerklärung siehe Anhang 2. | 25 |
| Anhang 10: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte + ET_a 2011. Zeichenerklärung siehe Anhang 2. | 25 |
| Anhang 11: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte + ET_a 2012. Zeichenerklärung siehe Anhang 2. | 25 |
| Anhang 12: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte + ET_a 2013. Zeichenerklärung siehe Anhang 2. | 25 |
| Anhang 13: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte + ET_a 2014. Zeichenerklärung siehe Anhang 2. | 26 |
| Anhang 14: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte + ET_a 2015. Zeichenerklärung siehe Anhang 2. | 26 |
| Anhang 15: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte + ET_a 2016. Zeichenerklärung siehe Anhang 2. | 26 |
| Anhang 16: Gesamtwirkungsgrad W_{ges} der Oberflächenabdichtung für den Untersuchungszeitraum 2003 – 2015..... | 26 |

I. Einleitung

1 Aufgabenstellung

Das Amt für Stadtentsorgung (Technische Dienste) der Stadt Pforzheim unterhält auf dem Hohberg, nördlich der Stadt Pforzheim, im Rahmen der Sicherung und Sanierung der Hausmülldeponie eine zur TA-Si alternative Oberflächenabdichtung.

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

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

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

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

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

Auch im Jahr 2016 fand die messtechnische Betreuung der Lysimeteranlage durch das AGW statt. Die Abflüsse der einzelnen Schichten wurden gesammelt, ausgelesen und ausgewertet. Hierzu wurde die Anlage zu Wartungs- und Reinigungsarbeiten monatlich kontrolliert. Zusätzlich fand an vier Stichtagen eine Messung der Bodenfeuchte statt.

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

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

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

2 Messtechnische Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter

2.1 Standort Hohberg

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

wiegend 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 Fuchslochdolone zugeleitet. Dies beinhaltet das Oberflächenwasser der rekultivierten Abschnitte, Straßen, Dachflächenwasser und Sickerwasser des Oberen Kiesflächenfilters (OKF). Deponiesickerwasser wird über verschiedene Drainagesysteme einem Speicherbecken zugeführt und von dort in die Sickerwasserbehandlungsanlage vor Ort geleitet.

2.2 Beschreibung des Lysimeters

2.2.1 Messprinzip

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

2.2.2 Lysimeteraufbau

Die Lysimeterfläche beträgt 10 × 10 m (100 m²) und besitzt eine Neigung von 1:6,9 (8,23 °) (Abb. 2 und Abb. 3). Nach Berücksichtigung der Hangneigung beträgt die auf die horizontal projizierte Lysimeterfläche 97 m². Der Aufbau des Lysimeters entspricht dem genehmigten Regelaufbau der Deponieoberflächenabdichtung, wie er 2003 auf ca. 1,5 ha der Deponie im Bauabschnitt I realisiert wurde.

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

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

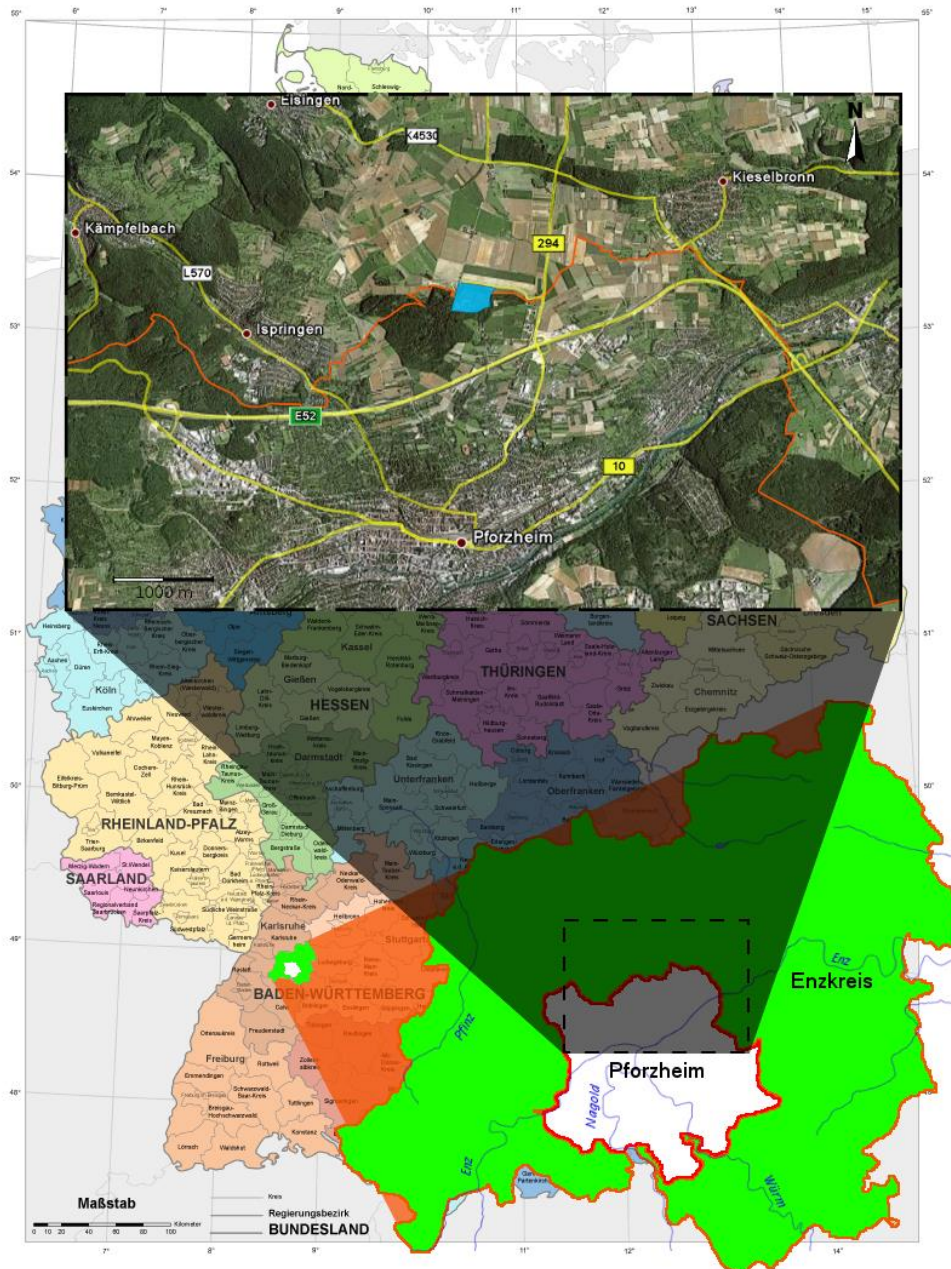


Abb. 1: Geographische Lage der HMD Hohberg (blaue Füllung in der Luftaufnahme). Die Grenze des Enzkreises (grüne Füllung) ist orange dargestellt, die Stadtgrenze von Pforzheim in rot (BKG: Verwaltungsgrenzen Deutschland (verändert), Google Earth: Luftbild Pforzheim Nord) (Augenstein, 2009).

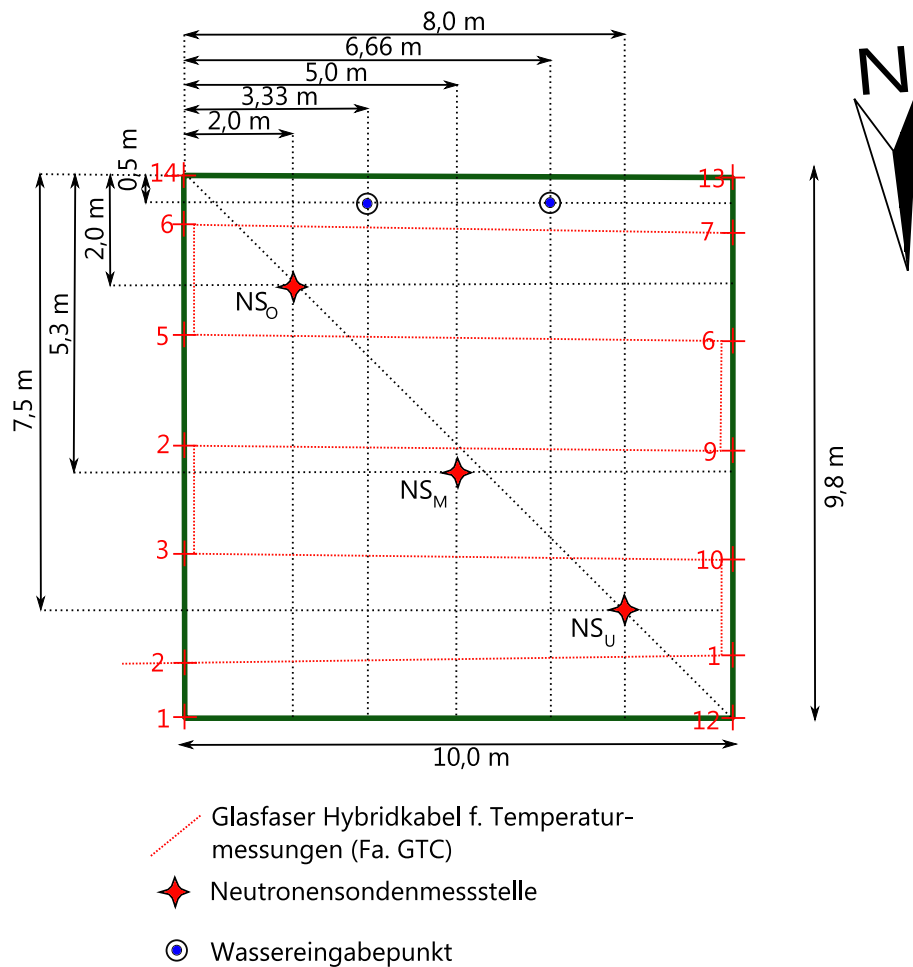


Abb. 2: Skizze des Lysimeters mit Verlegungsplan eines Glasfaserkabels, Neutronensondenmessstellen und Wassereingabepunkte für mögliche Flutungsversuche.

2.2.3 Abflussregime

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

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

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

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

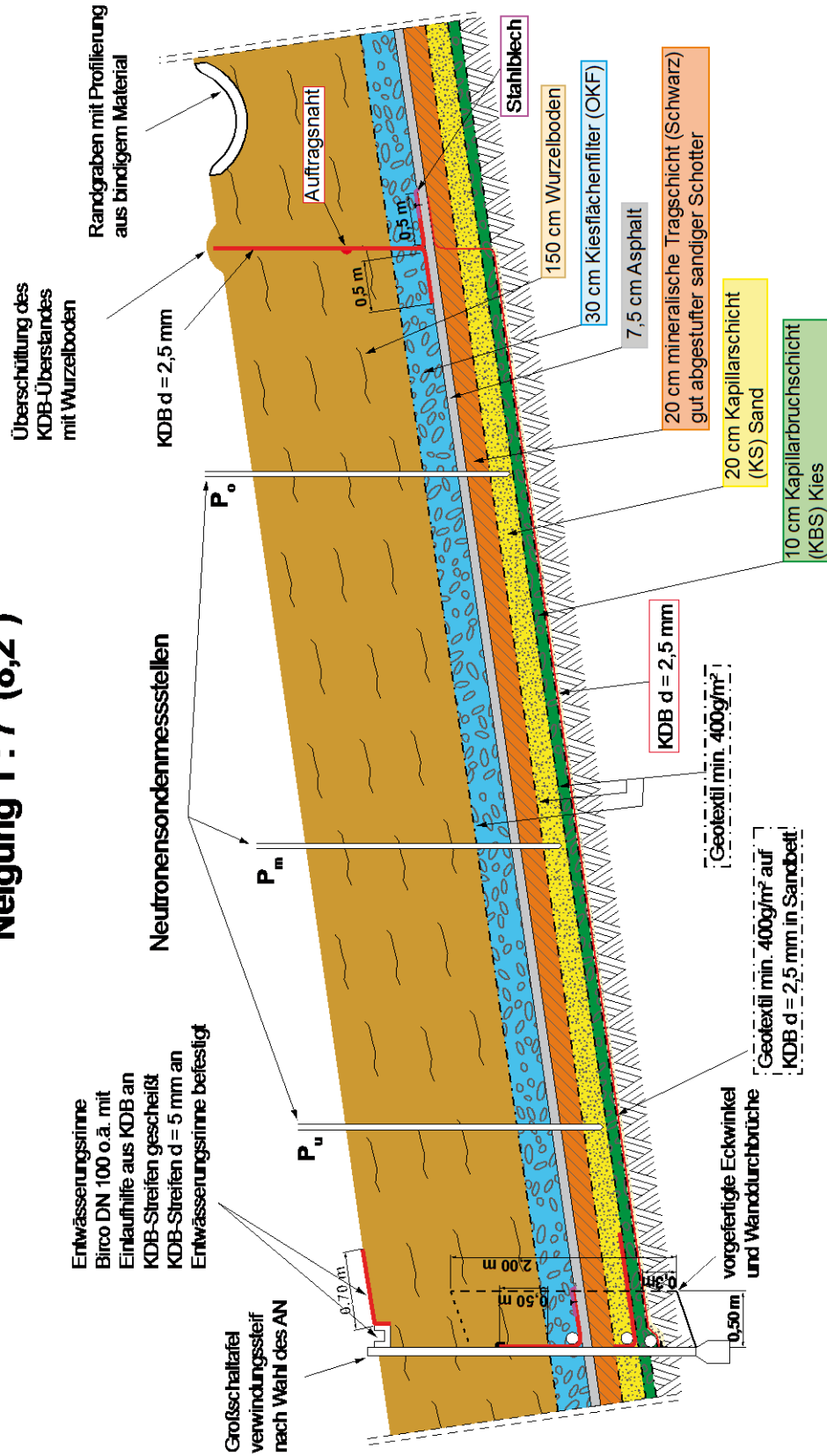


Abb. 3: Schematischer Querschnitt des Lysimeters mit Neutronensondenmessstellen.

2.2.4 Beschreibung der Abflusskomponenten

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

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

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

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

In den Messjahren 2006 und 2007 waren noch Abflüsse unterhalb der 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.

Die laterale Abflussmenge der **kapillarbrechenden Schicht (KBS)** spiegelt die Gesamtsystemdichtigkeit wider und entspricht der potentiellen Deponiesickerwasserneubildung. Die Analyse der KBS - Abflusswerte 2003 bis 2005 ergab sehr geringe Abflusswerte mit jeweils zunehmenden Tagesabflusshöhen in den Sommer- bis Herbstmonaten. Aufgrund der bautechnisch bedingten Umsetzung des Messcontainers Ende 2005 und der damit verbundenen Verkippung des Messhauses in den Jahren 2006 und 2007 sind

fast keine nennenswerten Abflüsse registriert worden, da durch die Versetzung auch der Winkel der Zuflussrohre verstellt wurde. Die entstandene „Mulde“ hat sich (zumindest für den Zufluss der KBS) über einen Zeitraum von ca. 2 Jahren gefüllt und ausgeglichen. Seit dem Sommer 2008 wird wieder Abfluss gemessen, der mengenmäßig im Bereich der Vorjahre (vor Umsetzung des Containers 2005) liegt.

2.3 Niederschlag

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

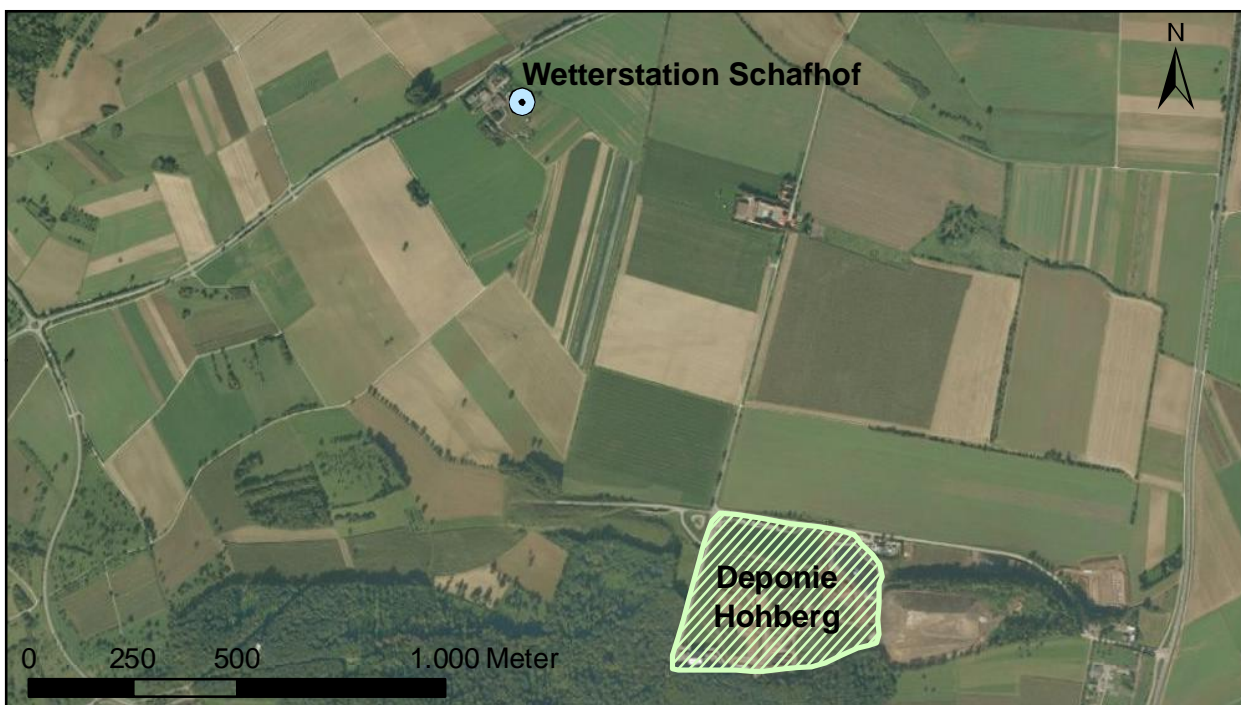


Abb. 4: Lage der DWD-Station Ispringen auf dem Schafhof und Lage der Deponie Hohberg.

2.4 Evapotranspiration

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

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

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

Das Bodenfeuchteregime wurde für den Auftraggeber nur für die Beobachtungsjahre 2003 bis 2005 durch Neutronensondenmessungen bestimmt, jedoch für die Jahre 2006 - 2010 nicht in Auftrag gegeben. Seit 2011 finden wieder Bodenfeuchtemessungen statt.

3 Berechnungen

3.1 Wirkungsgrad der Asphalttschicht

Für den Wirkungsgrad der Asphalttschicht gilt:

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

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

3.2 Wirkungsgrad des Gesamtsystems

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

Da das Abflussverhalten der kapillarbrechenden Schicht (KBS) die Gesamtsystemdichtigkeit eines Systems widerspiegelt (vgl. Kapitel 0) wird diese Komponente üblicherweise zur Berechnung des Wirkungsgrades eines Abdichtungssystems herangezogen.

Damit gilt für einen Gesamtwirkungsgrad W_{ges} :

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

II. Messergebnisse

4 Messergebnisse des Jahres 2016

4.1 Niederschlag

Abbildung 5 zeigt die Niederschlagsverteilung für den Zeitraum 2003 – 2016 (Abb. 5a) und für das aktuelle Jahr 2016 (Abb. 5b). Der meiste Niederschlag wurde mit 106,4 mm im Juli registriert, dicht gefolgt vom Mai mit 102,6 mm. Der geringste monatliche Niederschlag fiel im Dezember mit nur 7,0 mm. Auch die Monate Juli und August waren niederschlagsarm. Mit einem Gesamtniederschlag von 722,4 mm war das Jahr 2016 etwas feuchter als das Vorjahr ($N_{a, 2015} = 645,9$ mm) und etwas trockener als 2014 ($N_{a, 2014} = 761,8$ mm).

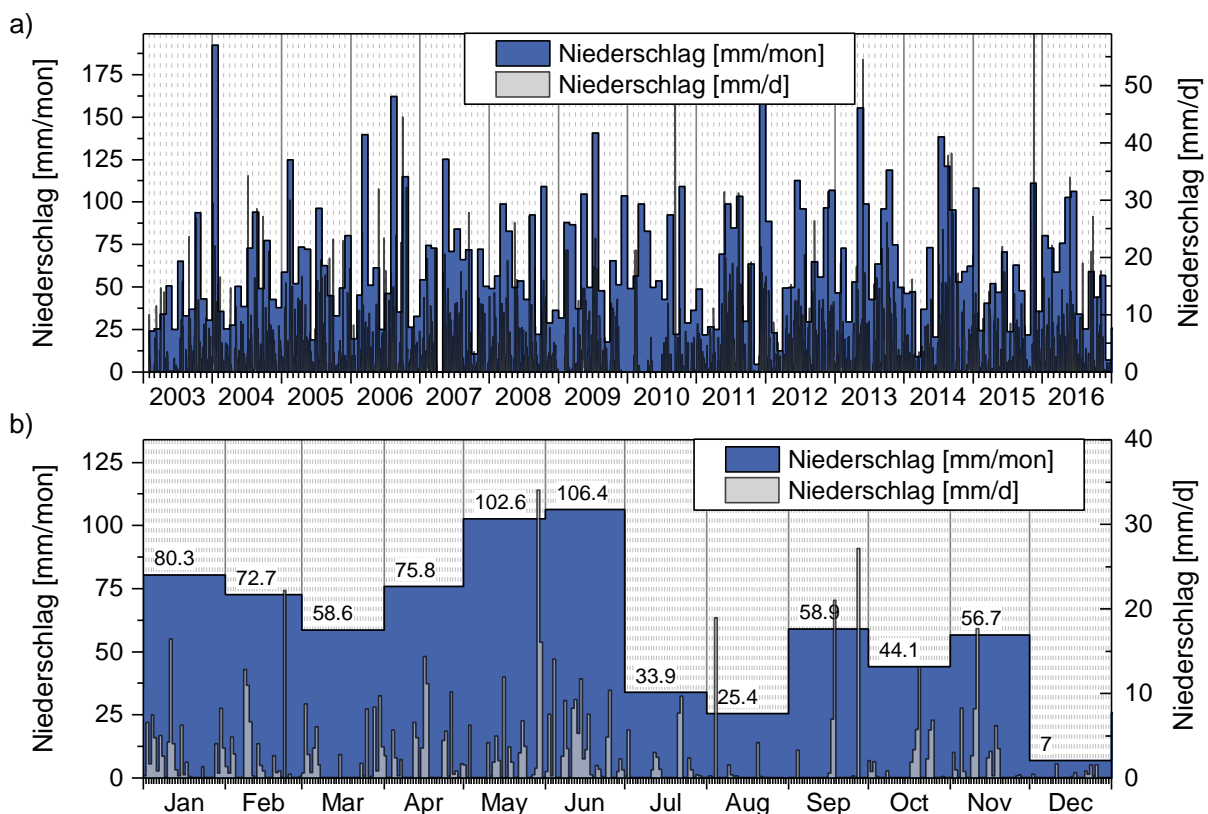


Abb. 5: a) Niederschlagsverteilung des Zeitraums 2003 bis 2016 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Niederschlagsverteilung für das Messjahr 2016 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst, Station Pforzheim-Ispringen.

4.2 Oberflächenabfluss (Q_{surf})

Der höchste monatliche Oberflächenabfluss im Jahr 2016 wurde mit 3,59 mm im Monat Juni gemessen. Der geringste monatliche Oberflächenabfluss mit nur 0,02 mm im niederschlagsarmen Dezember (Abb. 6). Insgesamt wurden 19,53 mm Oberflächenabfluss für das Jahr 2016 gemessen. Dies entspricht 2,7% des Jahresniederschlages.

Der monatlich summierte Oberflächenabfluss korreliert gut mit dem Niederschlag des jeweiligen Monats. Ausnahme bildet hier der Monat Januar, für den aufgrund des Loggerausfalls nicht der gesamte Abfluss erfasst werden konnte. Anhand der Abflüsse des restlichen Jahres sowie der Niederschlagsverteilung kann der nicht erfasste Abfluss im Januar auf ca. 1 bis 2 mm abgeschätzt werden. Die niederschlagsärmeren, zweite Jahreshälfte zeichnet sich durch geringere Oberflächenabflüsse aus.

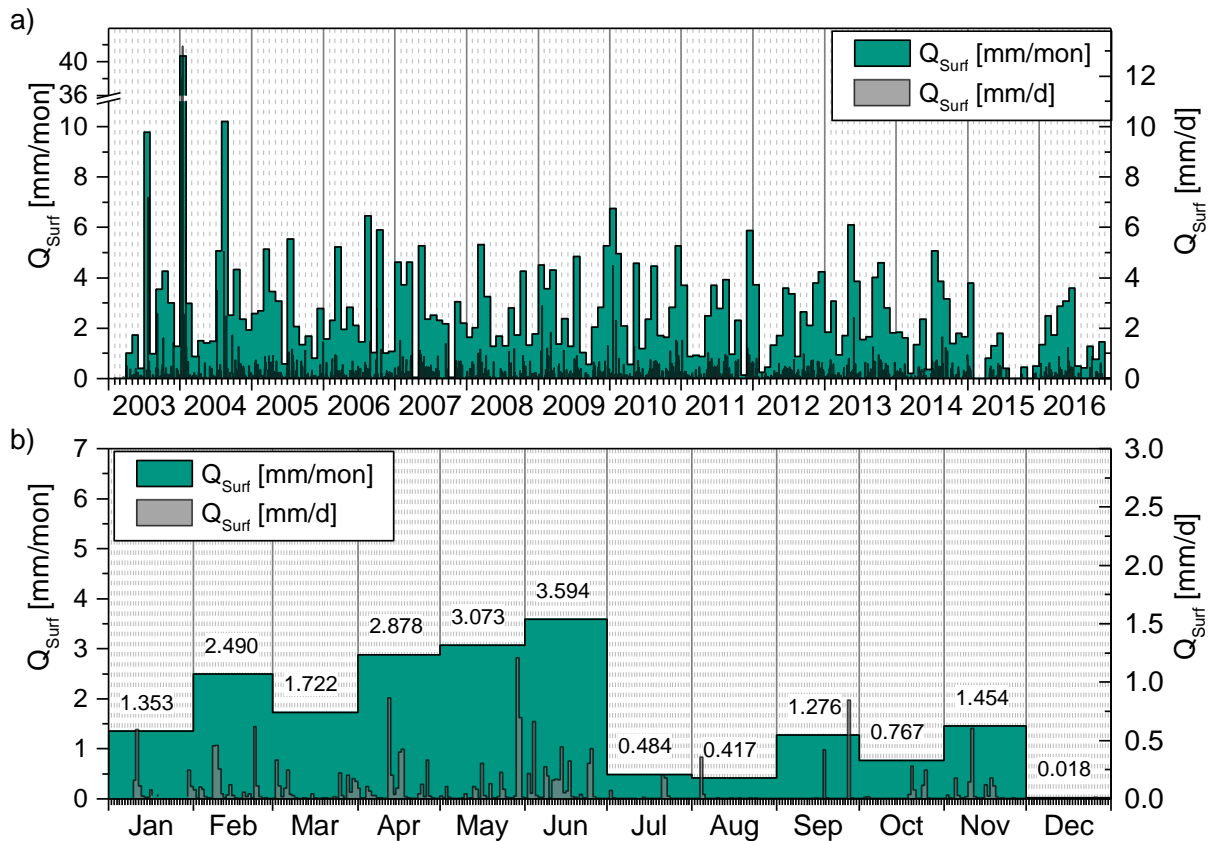


Abb. 6: a) Verteilung des Oberflächenabflusses (Q_{Surf}) für den Zeitraum 2003 bis 2016 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Verteilung des Oberflächenabflusses für das Messjahr 2016 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate).

4.3 Oberer Kiesflächenfilter (OKF)

Die aufgezeichneten Wasserstände im Lysimeterbehälter des OKF weisen für das Jahr 2016, besonders in der ersten Jahreshälfte, größere Lücken in der Datenreihe auf. Grund hierfür ist ein nicht vollständiges schließen der Ventile nach Entleerung. Anhand der vorhandenen Daten wurden die Abflussmengen für die Monate Januar bis Juli interpoliert. Für die zweite Jahreshälfte standen die Messdaten, mit Ausnahme des Dezembers, ohne größere Lücken zur Verfügung. Der Hauptabfluss des OKF fand demnach in der ersten Jahreshälfte statt, was in etwa dem Befund der vergangenen Jahre, sowie der Niederschlagsverteilung entspricht (Abb. 7). Errechnet wurde so für 2016 ein Gesamtjahresabfluss des OKF von 148,6 mm. Aufgrund der Datenlücken des Vorjahres und der mit der Interpolation verbundenen Unsicherheit ist ein Vergleich mit 2015 nicht möglich.

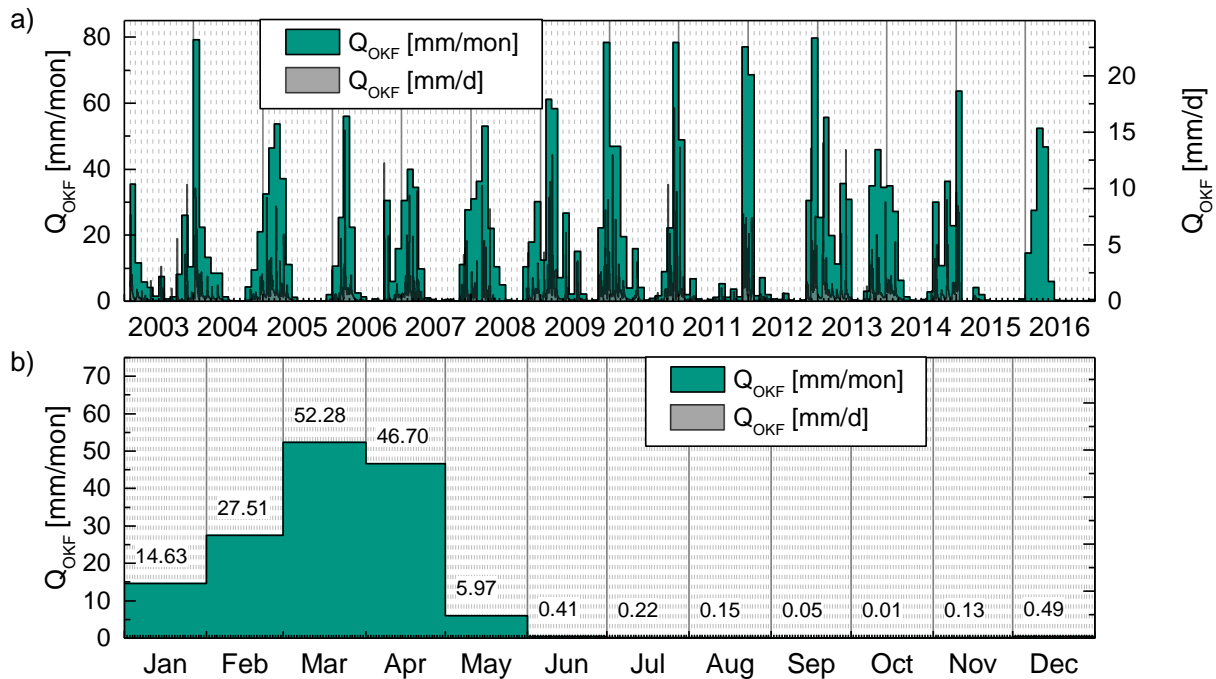


Abb. 7: a) Verteilung des Abflusses der Dränschicht für den Zeitraum 2003 bis 2016 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Verteilung des Abflusses der Dränschicht für das Messjahr 2016 in mm/Monat (linke Ordinate)

4.4 Kapillarschicht (KS)

Die monatlichen Abflüsse der Kapillarschicht sind in Abbildung 8 dargestellt. Insgesamt wurden im Jahr 2016 0,14 mm Abfluss aus dieser Schicht gemessen. Dies entspricht 0,02% des Jahresniederschlages. Ähnlich zu Niederschlag, Oberflächenabfluss und OKF fand ein Großteil des Abflusses in der ersten Jahreshälfte statt. Die geringen Abflusswerte für den Monat Januar resultieren aus fehlenden Daten infolge des Loggerausfalls. Insgesamt wird der Abfluss aus dieser Schicht wahrscheinlich etwas unterschätzt.

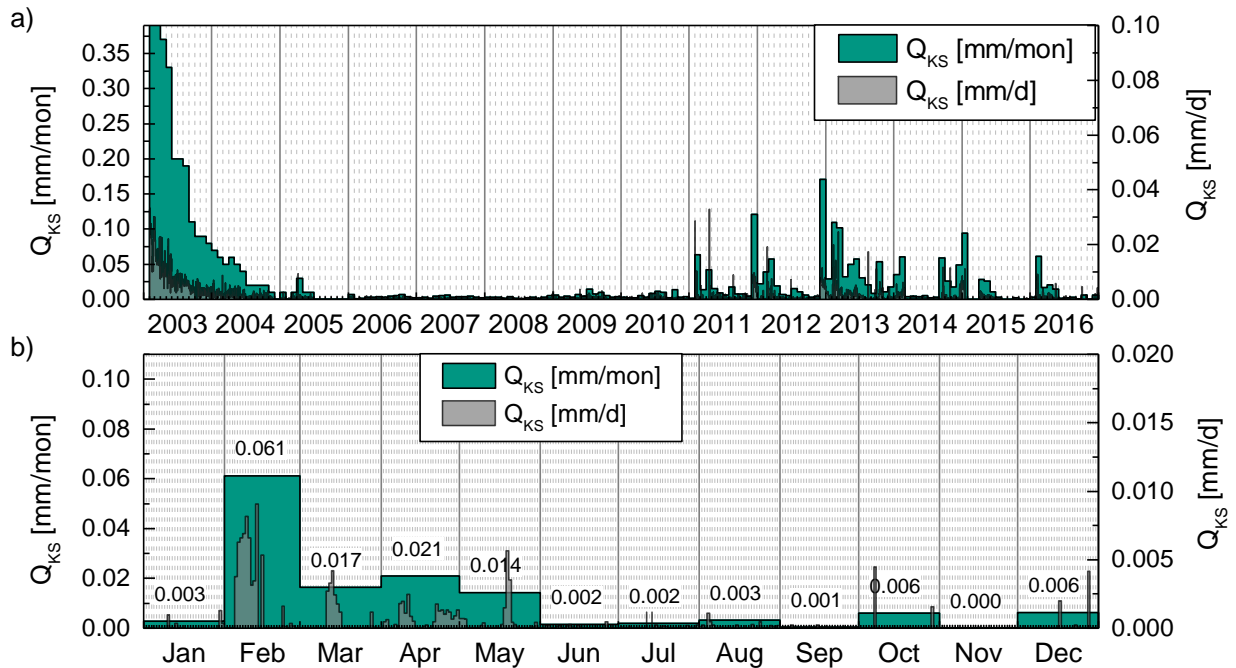


Abb. 8: a) Verteilung des Abflusses der Kapillarschicht für den Zeitraum 2003 bis 2016 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Verteilung des Abflusses der Kapillarschicht für das Messjahr 2016 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate).

4.5 Kapillarbrechende Schicht (KBS)

In 2016 wurden insgesamt 0,20 mm Abfluss aus dieser Schicht gemessen. Dies entspricht 0,03% des Jahresniederschlages. Der höchste monatliche Abfluss im Jahr 2016 fand mit 0,05 mm im Juli statt, was in etwa einem Viertel des Jahresabflusses aus dieser Schicht entspricht. Im Gegensatz zur KS findet bei der KBS auch in der zweiten Jahreshälfte noch Abfluss statt (Abb. 9).

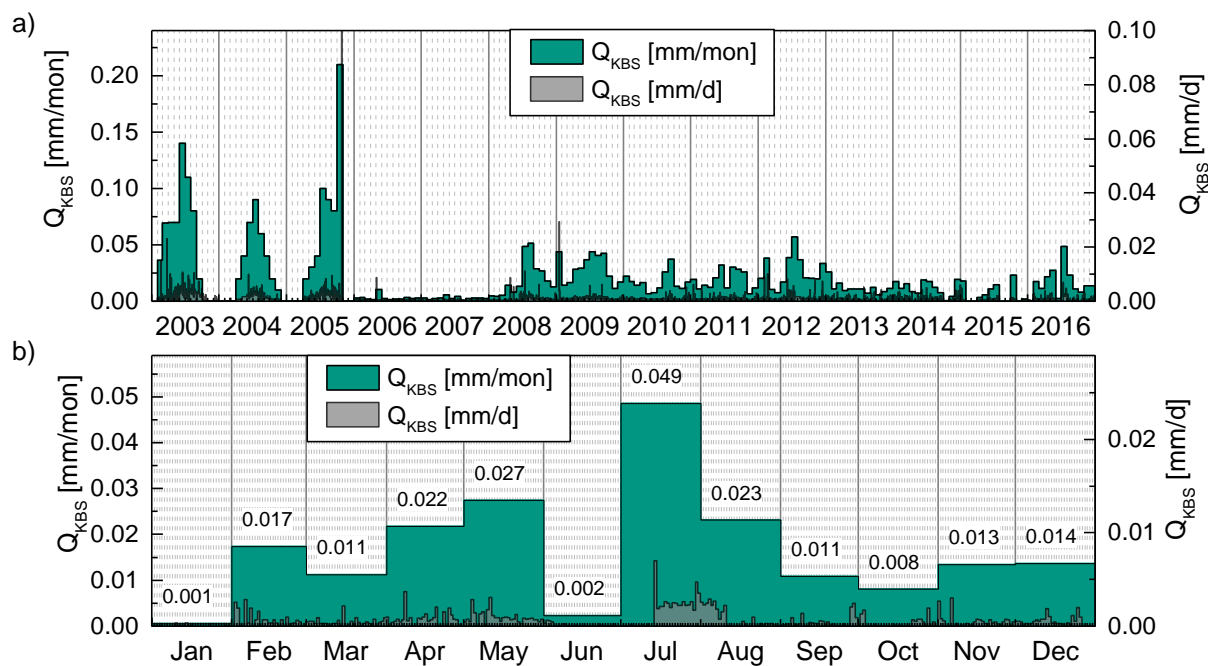


Abb. 9: a) Verteilung des Abflusses der Kapillarbruchschiicht für den Zeitraum 2003 bis 2015 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Verteilung des Abflusses der Kapillarbruchschiicht für das Messjahr 2015 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). n/a: keine auswertbaren Daten vorhanden.

4.6 Evapotranspiration ET_a

Auch im Jahr 2016 fanden zur Bestimmung der monatlichen 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 6 dargestellt.

Die Evapotranspiration beträgt für das Beobachtungsjahr 2016 zusammen mit der enthaltenen Bodenfeuchte 554 mm. Dies entspricht 76,7% des Jahresniederschlags. Sie liegt somit etwas höher als die Vergleichswerte der Vorjahre.

5 Bewertung der Oberflächenabdichtung für das Jahr 2016

5.1 Lysimeter-Wasserhaushaltsbilanz

Die monatlichen prozentualen Anteile der einzelnen Komponenten der Wasserbilanz für den Untersuchungszeitraum 2016 sind detailliert in Tab. 2 aufgelistet.

Tab. 2: Monatliche Abflusswerte der Abdichtungskomponenten in mm/Mon und im prozentualen Verhältnis zum Jahresniederschlag N_a 2016.

| Monat | Q_{Surf} [mm/Mon] | % von N | OKF [mm/Mon] | % von N | KS [mm/Mon] | % von N | KBS [mm/Mon] | % von N | Nieder- schlag [mm/Mon] |
|--|-------------------------------|--------------|-----------------|--------------|----------------|--------------|-----------------|--------------|-------------------------------|
| Januar | 1,35 | 1,68 | 14,63 | 18,22 | 0,003 | 0,003 | 0,001 | 0,001 | 80,3 |
| Februar | 2,49 | 3,42 | 27,51 | 37,85 | 0,061 | 0,084 | 0,017 | 0,024 | 72,7 |
| März | 1,72 | 2,94 | 52,28 | 89,22 | 0,017 | 0,028 | 0,011 | 0,019 | 58,6 |
| April | 2,88 | 3,80 | 46,70 | 61,61 | 0,021 | 0,028 | 0,022 | 0,029 | 75,8 |
| Mai | 3,07 | 3,00 | 5,97 | 5,82 | 0,014 | 0,014 | 0,027 | 0,027 | 102,6 |
| Juni | 3,59 | 3,38 | 0,41 | 0,39 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 106,4 |
| Juli | 0,48 | 1,43 | 0,22 | 0,64 | 0,002 | 0,006 | 0,049 | 0,143 | 33,9 |
| August | 0,42 | 1,64 | 0,15 | 0,60 | 0,003 | 0,013 | 0,023 | 0,091 | 25,4 |
| September | 1,28 | 2,17 | 0,05 | 0,09 | 0,001 | 0,001 | 0,011 | 0,018 | 58,9 |
| Oktober | 0,77 | 1,74 | 0,01 | 0,02 | 0,006 | 0,014 | 0,008 | 0,018 | 44,1 |
| November | 1,45 | 2,56 | 0,13 | 0,23 | 0,000 | 0,000 | 0,013 | 0,024 | 56,7 |
| Dezember | 0,02 | 0,26 | 0,49 | 7,05 | 0,006 | 0,090 | 0,014 | 0,196 | 7,0 |
| Gesamt- Abfluss | 19,53 | 2,70 | 148,57 | 20,57 | 0,135 | 0,019 | 0,199 | 0,027 | 722,4 |
| ET_a & Bodenfeuchte | 553,97 | | | | | | | | 76,68 |

5.2 Asphalttschicht

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

Für das Jahr 2016 wurde ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von 99,93% aus den Monatswerten errechnet. Dies entspricht dem Jahresdurchschnitt des Wirkungsgrades von 2014.

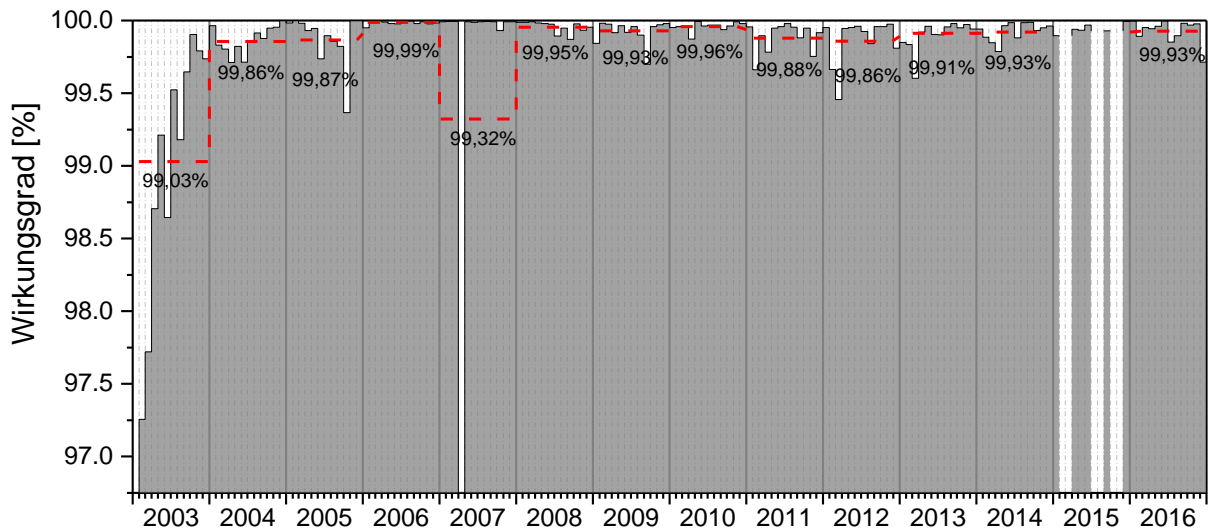


Abb. 10: Grafik über die Wirkungsgrade der Asphaltsschicht aus dem Messzeitraum 2003 - 2016. Die rote Kurve stellt die Jahresmittel dar, der graue Bereich die Monatswerte. Der Einbruch des Wirkungsgrades im April 2007 auf 92,7% resultiert aus einer sehr geringen Menge an Niederschlag in diesem Monat (0,1 mm). Berechnungsgrundlage: Formel (2),

5.3 Gesamtsystem

Analog zum Wirkungsgrad der Asphaltsschicht ist der Wirkungsgrad des Gesamtsystems in Abbildung 11 dargestellt. Auch hier sind im Prinzip keine Auffälligkeiten im Vergleich zu den Vorjahren zu erkennen. Eine tabellarische Darstellung aller berechneten Wirkungsgrade findet sich im Anhang.

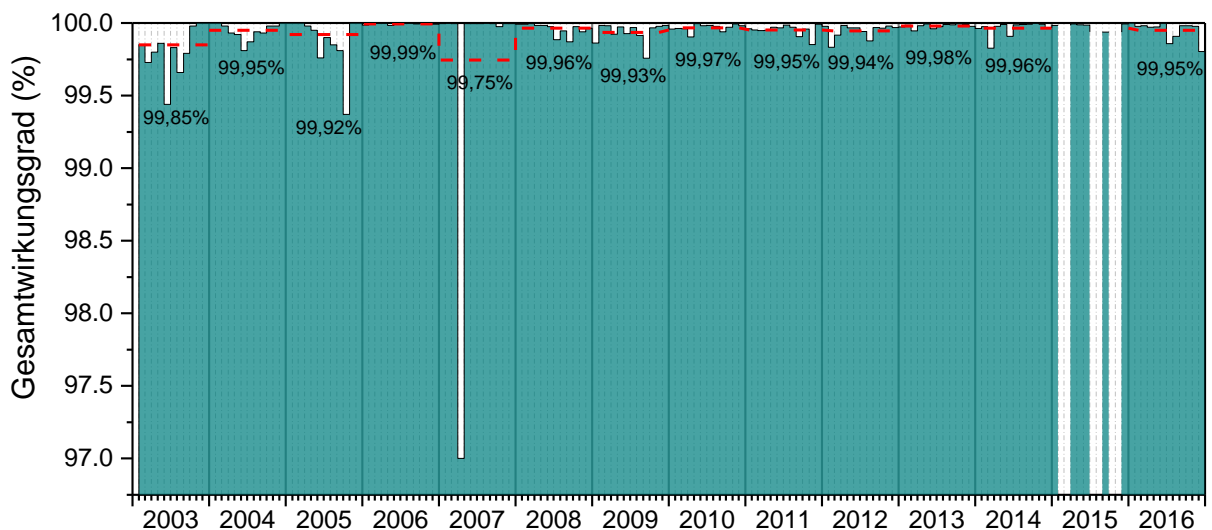


Abb. 11: Grafik über die Wirkungsgrade des Gesamtsystems aus dem Messzeitraum 2003 - 2016. Die rote Kurve stellt die Jahresmittel dar und der grüne Bereich die Monatswerte. Der Einbruch des Wirkungsgrades im April 2007 auf 97,0% resultiert aus einer sehr geringen Menge an Niederschlag in diesem Monat (0,1 mm). Für 2015 konnte aufgrund von Datenlücken kein Durchschnitt berechnet werden.

6 Neutronensondenmessung zur Bestimmung der Bodenfeuchte im Jahr 2016

Im Jahr 2016 wurden vier Stichtagsmessungen der Bodenfeuchte durchgeführt (Abb. 12 P_o und seit Mitte 2015 auch P_m sind aufgrund von Vernässung im Messrohr nicht bis in die letzten Schichttiefen befahrbar.

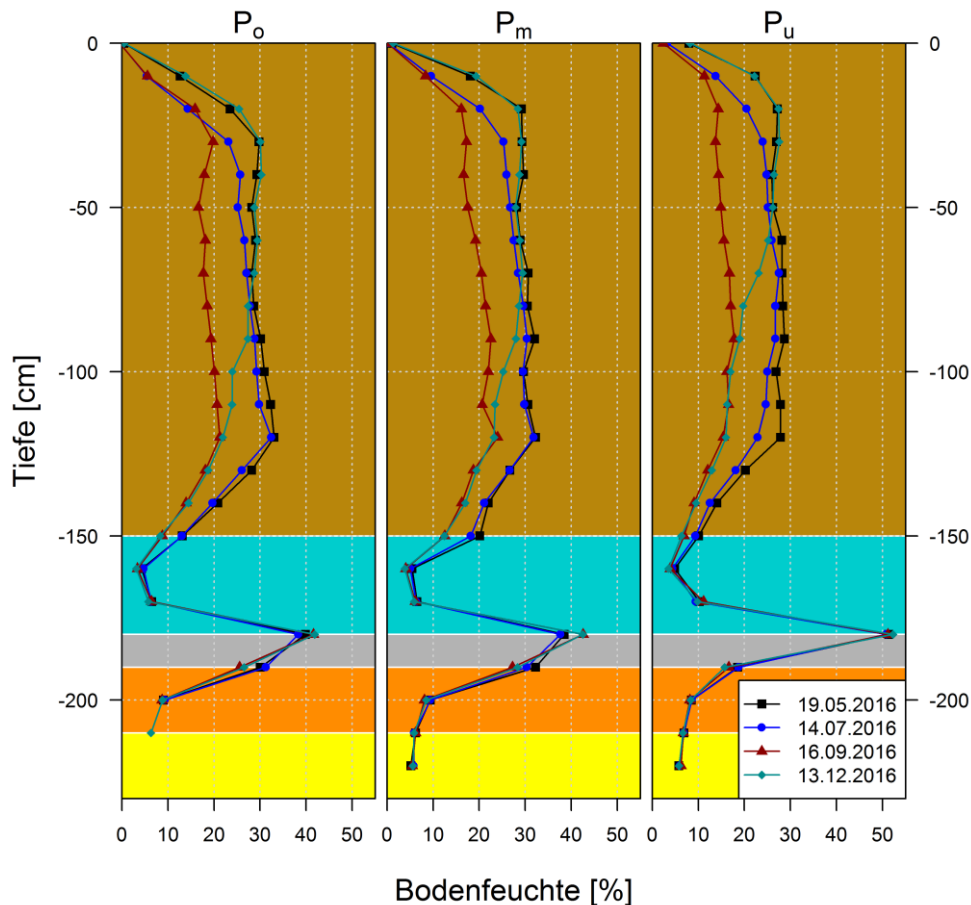


Abb. 12: Darstellung der Bodenfeuchteprofile für die Messstellen P_o (links), P_m (mitte) und P_u (rechts) zu den Zeitpunkten 19.05. (schwarze Linie), 14.07. (blaue Linie), 16.09. (rote Linie) und 13.12.2016 (türkise Linie). (Die hinterlegte Farbgebung entspricht der ungefähren Tiefenlage der Schichten, vgl. Abb. 3).

Die erste Messung für das Jahr 2016 fand am 19. Mai statt. Die ermittelten Bodenfeuchtegehalte erreichen ab einer Tiefe von 30 cm bereits den Wert von ca. 30%. Dieser bleibt bis in die Tiefe von 1,2 m relativ konstant. Ab dieser Tiefe findet eine Abnahme auf etwa 10% in der Tiefe von 1,5 m und somit der Grenze zwischen Wurzelboden und OKF statt. Im OKF nimmt der Bodenfeuchtegehalt noch weiter ab. In der Asphalttschicht werden, bedingt durch das Messprinzip, höhere Wassergehalte gemessen. Unterhalb der Asphalttschicht wurden ganzjährig Bodenfeuchtegehalte unter 10% gemessen.

Bei der zweiten Messung am 14. Juli ist eine Abnahme der Bodenfeuchtegehalte in der oberen Hälfte des Wurzelbodens im Vergleich zur ersten Messung erkennbar. Die Abnahme der Bodenfeuchte setzt sich bei der dritten Messung am 16. September weiter in die Tiefe, bis in den OKF hinein, fort. Bei der vierten

Messung am 13. Dezember ist wieder eine Zunahme der Bodenfeuchte im oberen Bereich des Wurzelbodens zu beobachten. Bis in eine Tiefe von 0,5 bis 0,9 m erreicht die Bodenfeuchte wieder in etwa die Werte der ersten Messung. Über das Jahr gesehen ist der gemessene Bodenfeuchtegehalt an P_U im Vergleich zu P_M und P_O etwas geringer.

7 Zusammenfassung für das Jahr 2016

Im Jahr 2016 erreichte die Kapillarsperre einen Wirkungsgrad von 99,95%. Die Wirkungsgrade der Asphaltschicht und des Gesamtsystems (respektive der Kapillarsperre) unterscheiden sich für das Jahr 2016 nicht grundlegend von den Vorjahren.

Die auf der Deponie installierte Wetterstation erfassten lediglich Niederschlagsintensitäten und keine Niederschlagshöhen. Diese konnten zur Bilanzierung nicht verwendet werden und es wurde, wie im Vorjahr, auf die Niederschlagsdaten der Wetterstation Pforzheim-Ispringen vom Deutschen Wetterdienst zurückgegriffen. Aufgrund der Entfernung zwischen Wetterstation und Lysimeter sind Abweichungen der Niederschlagsmenge möglich. Der Oberflächenabfluss korreliert gut mit dem Niederschlag, was die Verwendung dieser Niederschlagsdaten plausibel erscheinen lässt.

Auch für das Jahr 2016 war ein korrelierendes Verhalten von OKF und KS feststellbar. Besonders in der ersten Jahreshälfte waren Abflüsse aus beiden Schichten im Vergleich zur zweiten Jahreshälfte (sowie analog zum Niederschlag) erhöht. Mit Ausnahme des Monats Juni fanden Abflüsse der KBS hauptsächlich in Jahresmitte mit einem Abflussmaximum im Juli statt. Die im Jahresbericht 2015 getroffene Voraussage zum Abflussverhalten von OKF, KS und KBS wurden durch die Daten für das Jahr 2016 dahingehend bestätigt, dass der Abfluss der KS tatsächlich zeitlich mit dem Abfluss des OKF gestiegen und gefallen ist. Die KBS reagierte hierauf mit einer mehrmonatigen Verzögerung.

Mit einer Deponiesickerwasserneubildungsrate von knapp 0,05% des Niederschlages 2016 (0,33 mm von 722,4 mm Niederschlag) liegt diese im Bereich der Vorjahre. Das Gesamtsystem ist somit nach wie vor als positiv zu bewerten. Da die Konvektionssperre den Anspruch hat zu 100% abzudichten, bleibt noch zu klären, wo die Ursachen für diese Abflüsse liegen, die trotzdem unterhalb der Asphaltschicht gesammelt wurden. Zur Klärung dieser Frage wird für das Jahr 2017 ein Markierungsversuch geplant, der weitere Erkenntnisse liefern soll.

Literatur und bisherige Berichte

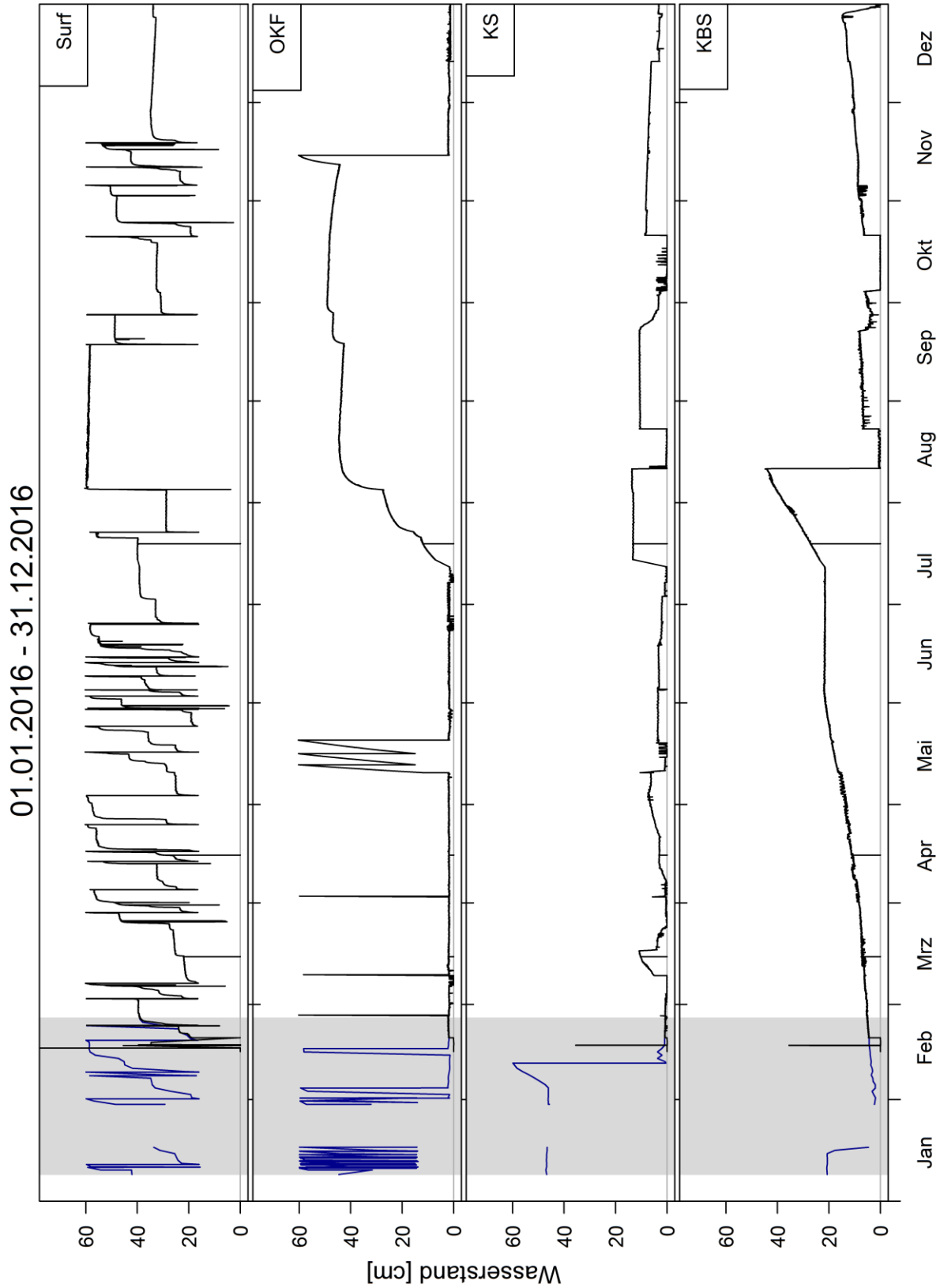
- AUGENSTEIN, M., (2009): Hydrogeologische Untersuchungen zum Wasserhaushalt der Deponie Pforzheim Hohberg mittels Lysimeter und numerischer Modellierung, Diplomarbeit 2009 am Institut für Angewandte Geologie, Universität Karlsruhe.
- BREH W., GIURGEA V. & HÖTZL H. (2002): Langzeitbeobachtung zum Verhalten einer verstärkten mineralischen Dichtungsschicht in einer kombinierten Oberflächenabdichtung. – In: Schriftenreihe Höxteraner Berichte zu angewandte Umweltwissenschaften der Abteilung Höxter der Fachhochschule Lippe und Höxter, 03, S.75-89, Höxter.
- GIURGEA V., HÖTZL H., BREH W. & GERLACH A. (2003): Neutronensondenmessungen der Bodenfeuchte zur Langzeitüberwachung von Deponieoberflächenabdichtungen. – Beitrag (Artikel und öffentlicher Vortrag) zum Workshop *Innovative Feuchtemessung in Forschung und Praxis*, 3.-4. Juli 2003, Karlsruhe, veröffentlicht in der Zeitschrift „Boden und Wasser“, Aedificatio Verlag, Freiburg (im Druck).
- HEERTEN G. & REUTER E. (2009): Oberflächenabdichtungen mit Bentonitmatten. – Beitrag (Artikel und öffentlicher Vortrag) zur 25. Fachtagung „Die sichere Deponie 2009 – Abdichtung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen“, SKZ - ConSem GmbH, Würzburg und AK GWS Arbeitskreis Grundwasserschutz e. V, Berlin
- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2009): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld LYSIMETER – Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für den Messzeitraum Januar – Dezember 2008 [Oktober 2009, unveröffentlichter Bericht, CD]
- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2010): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld LYSIMETER – Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für den Messzeitraum Januar – Dezember 2009 [September 2010, unveröffentlichter Bericht, CD]
- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2011): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld LYSIMETER – Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für den Messzeitraum Januar – Dezember 2010 [Juni 2011, unveröffentlichter Bericht, CD]
- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2012): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld LYSIMETER – Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für den Messzeitraum Januar – Dezember 2011 [April 2012, unveröffentlichter Bericht, CD]
- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2013): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld LYSIMETER – Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für den Messzeitraum Januar – Dezember 2012 [April 2013, unveröffentlichter Bericht, CD]

- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2014): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld LYSIMETER – Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für den Messzeitraum Januar – Dezember 2013 [März 2014, unveröffentlichter Bericht, CD]
- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2015a): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld LYSIMETER – Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für den Messzeitraum Januar – Dezember 2014 [März 2015, unveröffentlichter Bericht, CD]
- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2015b): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld LYSIMETER – Zwischenbericht zur Testphase nach Instandsetzung des Lysimetersystems [November 2015, unveröffentlichter Bericht]
- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2016): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld LYSIMETER – Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für den Messzeitraum Januar – Dezember 2015 [März 2016, unveröffentlichter Bericht, CD]
- 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.

Anhang

Anhang 1: Darstellung der Wasserstände der einzelnen Lysimeterabflüsse über das Messjahr 2016. Daten im grau hinterlegten Bereich stammen aus der Auswertung der Webcam-Aufzeichnungen vom 09.01. bis zum 26.02.2016, mit einer Lücke vom 18.01. bis zum 30.01.2016



Anhang 2: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und der Bodenfeuchte 2003. N: Niederschlag, S: Sonderinput¹, Σ : Summe der Abflüsse, % N: prozentualer Anteil der Abflusssummen am Niederschlag, Diff: Bodenfeuchtedifferenz, ET_a: Evapotranspiration

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

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

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

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

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

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

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 | Σ | % N |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| N | 49,17 | 56,51 | 98,81 | 82,66 | 49,72 | 53,67 | 42,57 | 92,39 | 22,11 | 109,08 | 28,9 | 36,24 | 721,83 | 100 |
| Q _{Surf} | 1,63 | 2,01 | 5,32 | 3,25 | 1,28 | 1,69 | 1,3 | 2,81 | 1,73 | 4,25 | 1,32 | 1,76 | 28,36 | 3,93 |
| Q _{OKF} | 31,0 | 36,29 | 53,02 | 22,03 | 10,49 | 5,04 | 0,28 | 0,22 | 0,07 | 10,38 | 17,88 | 30,1 | 216,8 | 30,03 |
| Q _{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 | Σ | % N |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| N | 31,9 | 87,9 | 86,8 | 37,1 | 104,5 | 49,9 | 140,5 | 47,8 | 17,5 | 65,5 | 51,5 | 103,8 | 824,7 | 100 |
| Q _{Surf} | 4,50 | 3,57 | 4,31 | 1,36 | 2,37 | 1,27 | 4,85 | 1,03 | 0,55 | 2,05 | 2,82 | 5,27 | 33,95 | 4,12 |
| Q _{OKF} | 12,42 | 61,19 | 58,35 | 7,11 | 26,71 | 2,19 | 15,07 | 2,23 | 0,20 | 0,26 | 22,16 | 78,34 | 286,23 | 34,71 |
| Q _{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 | Σ | % N |
|------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| N | 52,8 | 47,4 | 36,3 | 17,0 | 139,1 | 42,6 | 73,7 | 117,9 | 61,4 | 44,2 | 112,2 | 138,8 | 883,4 | 100 |
| Q _{Surf} | 6,75 | 4,95 | 2,08 | 0,57 | 4,58 | 1,18 | 2,34 | 4,47 | 1,70 | 1,64 | 4,35 | 8,96 | 43,57 | 4,93 |
| Q _{OKF} | 46,84 | 48,93 | 19,59 | 3,95 | 15,89 | 4,18 | 0,29 | 0,81 | 1,64 | 8,91 | 49,82 | 85,18 | 284,04 | 32,15 |
| Q _{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 | Σ | % N |
|------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|------|--------|--------|-------|
| N | 48,90 | 21,90 | 26,70 | 25,00 | 69,40 | 98,90 | 84,80 | 103,20 | 29,80 | 63,40 | 4,40 | 160,30 | 736,70 | 100 |
| Q _{Surf} | 3,69 | 0,87 | 0,93 | 0,88 | 2,49 | 3,70 | 2,79 | 3,91 | 0,96 | 2,30 | 0,14 | 5,87 | 28,53 | 3,87 |
| Q _{OKF} | 48,96 | 1,92 | 6,78 | 0,65 | 0,22 | 0,55 | 1,21 | 5,30 | 1,18 | 3,69 | 1,24 | 77,07 | 148,78 | 20,20 |
| Q _{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 | Σ | % N |
|------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|
| N | 88,70 | 23,00 | 12,40 | 49,30 | 49,70 | 112,80 | 96,10 | 29,60 | 64,80 | 55,80 | 96,70 | 106,90 | 88,70 | 100 |
| Q _{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 | Σ | % N |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|
| N | 46,43 | 72,76 | 29,58 | 52,97 | 155,26 | 98,96 | 42,61 | 63,55 | 95,86 | 118,79 | 74,86 | 49,84 | 901,47 | 100 |
| Q _{Surf} | 1,83 | 3,06 | 0,94 | 1,70 | 6,09 | 3,85 | 1,55 | 1,66 | 4,01 | 4,60 | 2,80 | 1,82 | 33,91 | 3,76 |
| Q _{OKF} | 25,30 | 55,62 | 19,88 | 11,19 | 35,54 | 30,85 | 0,38 | 0,09 | 3,01 | 34,92 | 45,96 | 34,47 | 297,22 | 32,97 |
| Q _{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 | Σ | % N |
|------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| N | 46.1 | 47.2 | 8.9 | 36.9 | 73.2 | 20.4 | 138.4 | 121.1 | 95.3 | 53.0 | 58.9 | 62.3 | 761.8 | 100 |
| Q _{Surf} | 1,83 | 1,61 | 0,20 | 1,34 | 2,34 | 0,35 | 5,06 | 3,86 | 3,17 | 1,38 | 1,79 | 1,65 | 24,58 | 3,23 |
| Q _{OKF} | 34,96 | 27,21 | 6,23 | 1,27 | 0,38 | 0,10 | 0,55 | 2,84 | 30,00 | 10,78 | 36,24 | 22,85 | 173,40 | 22,76 |
| Q _{Ks} | 0,035 | 0,061 | 0,004 | 0,005 | 0,004 | 0,005 | 0,003 | 0,003 | 0,059 | 0,026 | 0,018 | 0,049 | 0,270 | 0,0354 |
| Q _{KBS} | 0,017 | 0,011 | 0,015 | 0,009 | 0,007 | 0,019 | 0,017 | 0,012 | 0,007 | 0,001 | 0,004 | 0,019 | 0,1403 | 0,0184 |
| Diff + ET _a | 563,40 | | | | | | | | | | | | 73,96 | |

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

Anhang 15: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte + ET_a 2016. Zeichenerklärung siehe Anhang 2.

| 2016 | Jan | Feb | Mrz | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Σ | % N |
|------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| N | 80.3 | 72.7 | 58.6 | 75.8 | 102.6 | 106.4 | 33.9 | 25.4 | 58.9 | 44.1 | 56.7 | 7.0 | 722.4 | 100 |
| Q _{Surf} | 1.35 | 2.49 | 1.72 | 2.88 | 3.07 | 3.59 | 0.48 | 0.42 | 1.28 | 0.77 | 1.45 | 0.02 | 19.53 | 2.70 |
| Q _{OKF} | 14.63 | 27.51 | 52.28 | 46.70 | 5.97 | 0.41 | 0.22 | 0.15 | 0.05 | 0.01 | 0.13 | 0.49 | 148.57 | 20.57 |
| Q _{Ks} | 0.003 | 0.061 | 0.017 | 0.021 | 0.014 | 0.002 | 0.002 | 0.003 | 0.001 | 0.006 | 0.000 | 0.006 | 0.135 | 0.019 |
| Q _{KBS} | 0.001 | 0.017 | 0.011 | 0.022 | 0.027 | 0.002 | 0.049 | 0.023 | 0.011 | 0.008 | 0.013 | 0.014 | 0.199 | 0.027 |
| Diff + ET _a | 553.97 | | | | | | | | | | | | 76.68 | |

Anhang 16: 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 |
| Jahres-W_{ges} 2003 | 461,5 | 99,85 |

Fortsetzung Anhang 16:

| | 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 |
| Jahres-W_{ges} 2004 | 743,3 | 99,95 |
| 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 |
| Jahres-W_{ges} 2005 | 766,6 | 99,92 |

Fortsetzung Anhang 16:

| | 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 |
| Jahres-W_{ges} 2006 | 759,6 | 99,99 |
| 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 |
| Jahres-W_{ges} 2007 | 752,7 | 99,75 |

Fortsetzung Anhang 16:

| | 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 |
| Jahres-W_{ges} 2008 | 721,8 | 99,96 |
| 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 |
| Jahres-W_{ges} 2009 | 824,7 | 99,94 |

Fortsetzung Anhang 16:

| | 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 |
| Jahres-W_{ges} 2010 | 883,4 | 99,96 |
| 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 |
| Jahres-W_{ges} 2011 | 736,7 | 99,95 |

Fortsetzung Anhang 16:

| | 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 |
| Jahres-W_{ges} 2012 | 785,8 | 99,95 |
| 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 |
| Jahres-W_{ges} 2013 | 901,5 | 99,98 |

Fortsetzung Anhang 16:

| | 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 |
| Jahres-W_{ges} 2014 | 761,8 | 99,96 |
| 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 |
| Jahres-W_{ges} 2015 | 645,9 | - |

Fortsetzung Anhang 16:

| | Niederschlag [mm] | Gesamtwirkungsgrad W_{ges} [%] |
|----------|--------------------------|--|
| Jan 2016 | 80,3 | 100,00 |
| Feb 2016 | 72,7 | 99,98 |
| Mrz 2016 | 58,6 | 99,98 |
| Apr 2016 | 75,8 | 99,97 |
| Mai 2016 | 102,6 | 99,97 |
| Jun 2016 | 106,4 | 100,00 |
| Jul 2016 | 33,9 | 99,86 |
| Aug 2016 | 25,4 | 99,91 |
| Sep 2016 | 58,9 | 99,98 |
| Okt 2016 | 44,1 | 99,98 |
| Nov 2016 | 56,7 | 99,98 |
| Dez 2016 | 7,0 | 99,80 |

Anhang 17: beigelegt als CD

Datenablage

Digitaler Bericht

Auswertung