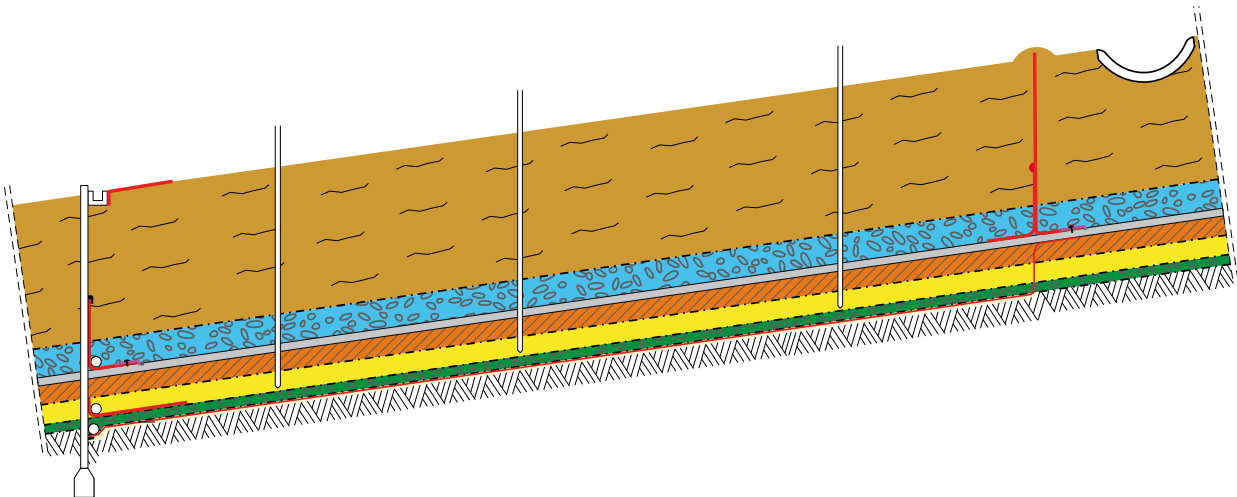


Stadt Pforzheim
Hausmülldeponie Hohberg
- Oberflächenabdichtung -
LYSIMETER - TESTFELD

Jahresabschlussbericht 2013

ZUR
messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter

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



Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	II
Anhangverzeichnis	III

Inhalt

1 Einleitung und Aufgabenstellung	1
1.1. Standort Hohberg.....	2
2 Beschreibung des Lysimeters	4
2.1. Messprinzip.....	4
2.2. Lysimeteraufbau	4
3 Lysimeterabflussverhalten für das Untersuchungsjahr 2013	7
3.1. Messung meteorologischer Eingangsdaten.....	7
3.2. Niederschlag	8
3.3. Abflussregime.....	8
3.3.1. Oberflächenabfluss (Q_{surf})	9
3.3.2. Oberer Kiesflächenfilter (OKF).....	9
3.3.3. Kapillarschicht (KS)	10
3.3.4. KapillARBrechende Schicht (KBS).....	11
3.3.5. Evapotranspiration ET_a	12
4 Bewertung der Oberflächenabdichtung	13
4.1. Lysimeter-Wasserhaushaltsbilanz für das Untersuchungsjahr 2013	13
4.2. Wirkungsgrad.....	14
5 Neutronensondenmessung zur Bestimmung der Bodenfeuchte	15
6 Zusammenfassende Schlussfolgerungen	18
7 Literatur und bisherige Berichte	21
8 Anhang	24

Abbildungsverzeichnis (z.T. gekürzt)

Abb. 1: Geographische Lage der HMD Hohberg	3
Abb. 2: Skizze des Lysimeters	5
Abb. 3: Schematischer Querschnitt des Lysimeters mit Neutronensondenmessstellen.....	6
Abb. 4: Wetterstation Hohberg	7
Abb. 5: Lage der DWD Station-Ispringen auf dem Schafhof.....	8
Abb. 6: Vergleich der Oberflächenabflüsse und der Niederschläge der Jahre 2003-2013.	9
Abb. 7: Abflussregime des OKF für die Jahre 2003 - 2013.	10
Abb. 8: Abflussregime der KS für die Messjahre 2003 bis 2013.	11
Abb. 9: Abflussregime der KBS für die Messjahre 2003 bis 2013.....	12
Abb. 10: Lysimeterbilanz 2013 der Schichtabflüsse	14
Abb. 11: Grafik über die Wirkungsgrade aus dem Messungszeitraum 2003 - 2013.....	15
Abb. 12: Darstellung der Bodenfeuchteprofile für die Messstellen P_o , P_m und P_u	16
Abb. 13: Abbildung der Bodenfeuchtedifferenzen von drei aufeinanderfolgenden Messungen..	17

Tabellenverzeichnis (z.T. gekürzt)

Tab. 1: Monatliche Abflusswerte der Abdichtungskomponenten und im prozentualen Verhältnis zum Jahresniederschlag N_a 2013.....	13
--	----

Anhang (z.T. gekürzt)

Anhang 1: Wasserstände der einzelnen Lysimeterabflüsse über das Messjahr 2013.	24
Anhang 2: Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und der Bodenfeuchte 2003.....	25
Anhang 3: Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und der Bodenfeuchte 2004.....	25
Anhang 4: Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und der Bodenfeuchte 2005.....	25
Anhang 5: Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + ET_a 2006.	25
Anhang 6: Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + ET_a 2007.	26
Anhang 7: Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + ET_a 2008.	26
Anhang 8: Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + ET_a 2009.	26
Anhang 9: Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + ET_a 2010.	26
Anhang 10: Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + ET_a 2011.	26
Anhang 11: Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + ET_a 2012.	27
Anhang 12: Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + ET_a 2013.	27

1 Einleitung und 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 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. Heinz 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. 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[®] (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 2013 konnte, trotz einiger Messlücken durch vorzeitig entleerte Behälter aufgrund defekter Ventile und alternativen meteorologischen Daten, eine ordentliche Auswertung der Daten durchgeführt werden. Die Ergebnisse sollen im Folgenden vorgestellt werden.

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: ³⁴78359 H: ⁵⁴20780. Die Deponie hat eine Gesamtfläche (rekultivierter und noch aktiver Bereich) von ca. 16,12 ha, wobei 13,6 ha die genehmigte Deponiefläche einnehmen (Stand 2006). Im Süden liegen forstwirtschaftlich genutzte Flächen, sowie das Stadtgebiet von Pforzheim. Nördlich befinden sich überwiegend landwirtschaftlich genutzte Bereiche, welche teilweise der Wasserschutzzone IIIB und IIIA (in letzterer liegt auch die Deponie) zugewiesen sind.

Morphologisch betrachtet liegt die Deponie am Südrand der Katharinentalerhof Senke, die mit bis zu 30 m mächtigem Lösslehm gefüllt ist. Unmittelbar darunter befindet sich die Einheit des Oberen Muschelkalks. Hierbei handelt es sich um einen Karstgrundwasserleiter, der in der näheren Umgebung durch typische Karsterscheinungen wie Senken und Dolinen charakterisiert ist (z.B. Eisinger Loch). Über die Mächtigkeit der Lösslehmschicht direkt unterhalb der Deponie, kann keine eindeutige Aussage getroffen werden.

Das anfallende Oberflächenwasser der Deponie, der angrenzenden Erd- und Altdeponie, sowie der Zufahrtsstraße 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.

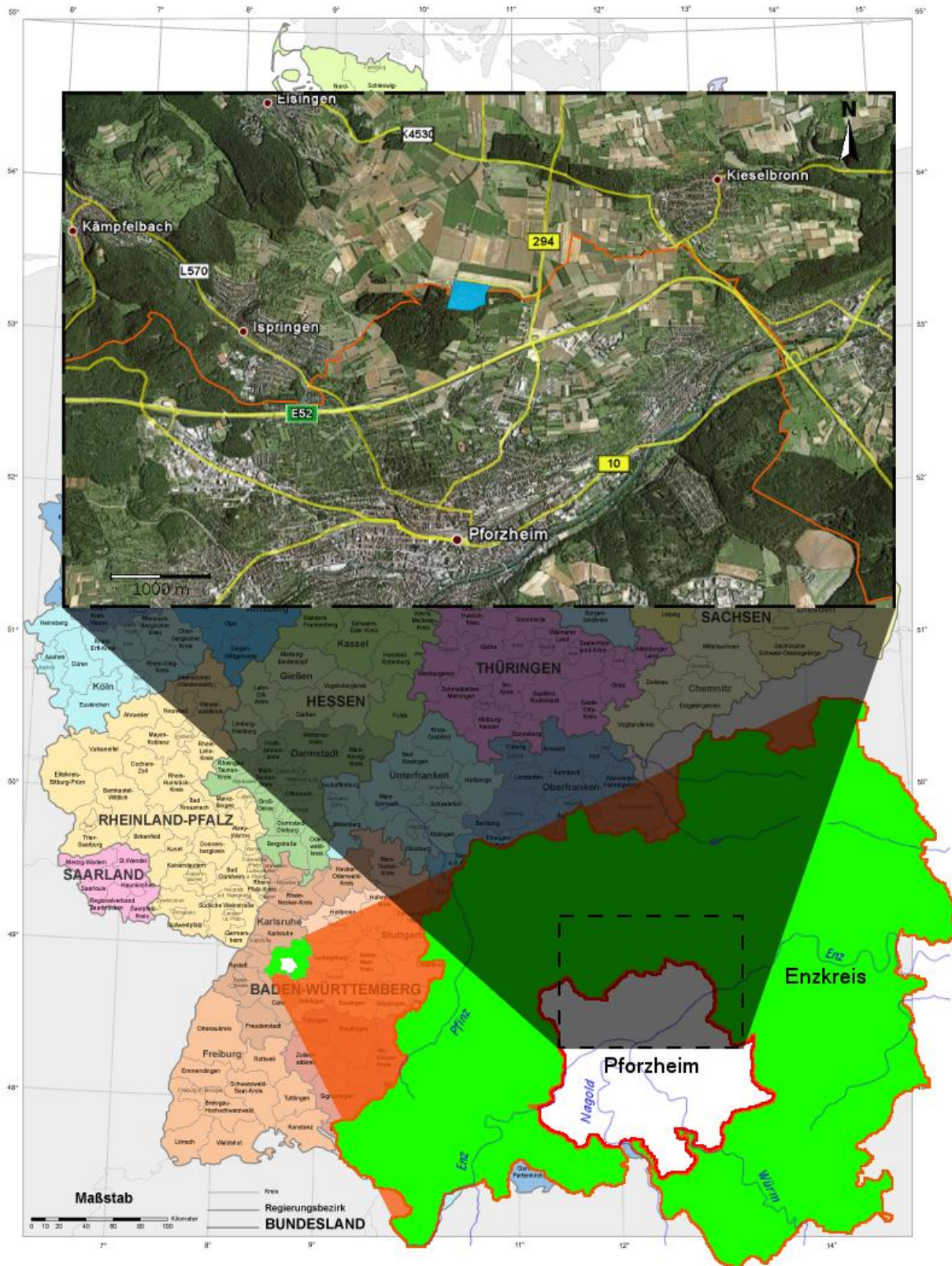


Abb. 1: Geographische Lage der HMD Hohberg (blaue Füllung in der Luftaufnahme). Die Grenze des Enzkreises (grüne Füllung) ist orange dargestellt, die Stadtgrenze von Pforzheim in rot (BKG: Verwaltungsgrenzen Deutschland (verändert), Google Earth: Luftbild Pforzheim Nord) (Augenstein, 2009).

2 Beschreibung des Lysimeters

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.

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 Horizontale 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 den folgenden Lagen:

- 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).

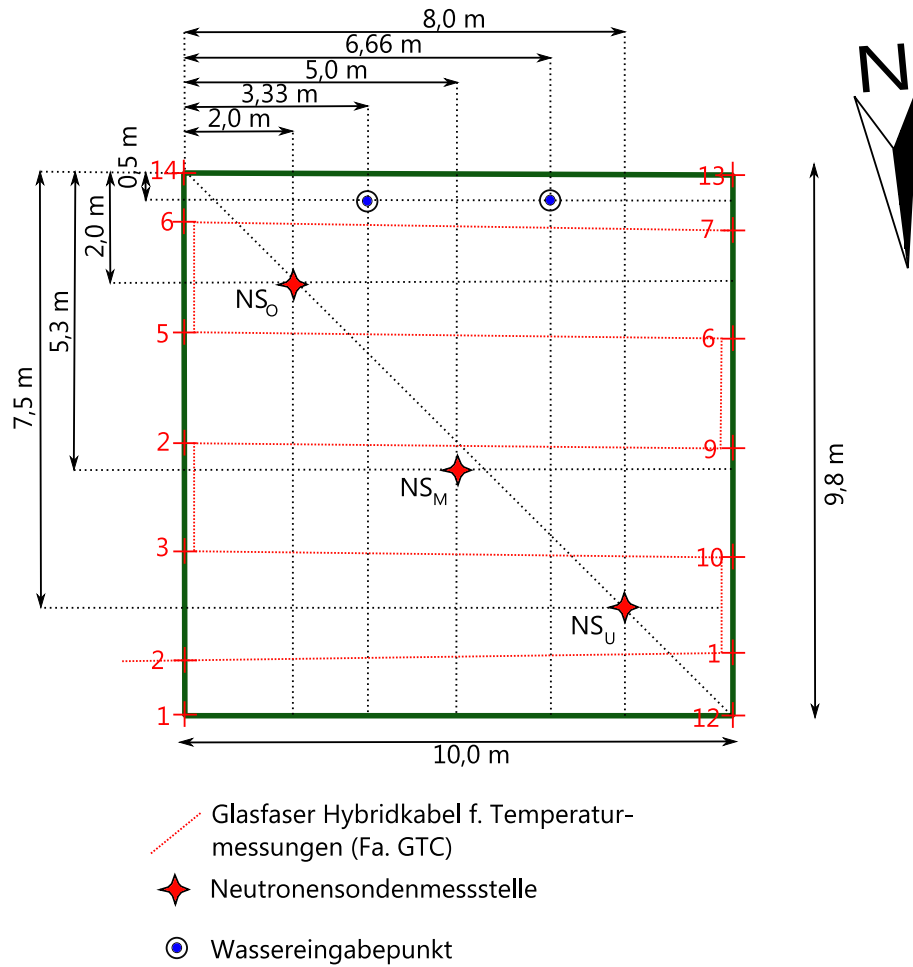


Abb. 2: Skizze des Lysimeters mit Verlegungsplan eines Glasfaserkabels, Neutronensondenmessstellen und Wassereingabepunkte für mögliche Flutungsversuche.

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

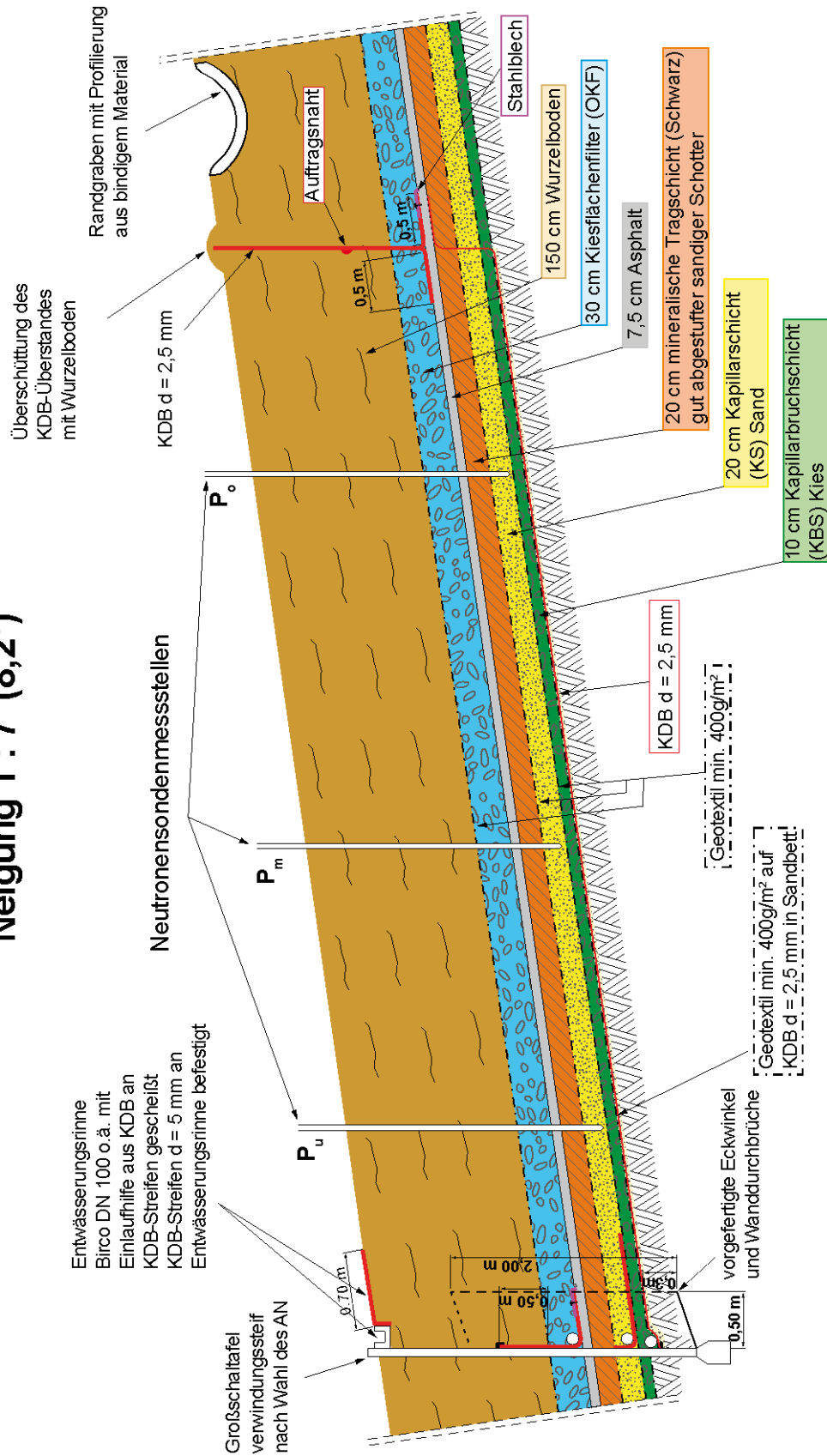


Abb. 3: Schematischer Querschnitt des Lysimeters mit Neutronensondenmessstellen.

3 Lysimeterabflussverhalten für das Untersuchungsjahr 2013

3.1. Messung meteorologischer Eingangsdaten

In 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*

(*Nachtrag: Nach Aussage des Betreibers werden die Windparameter nicht aufgezeichnet)

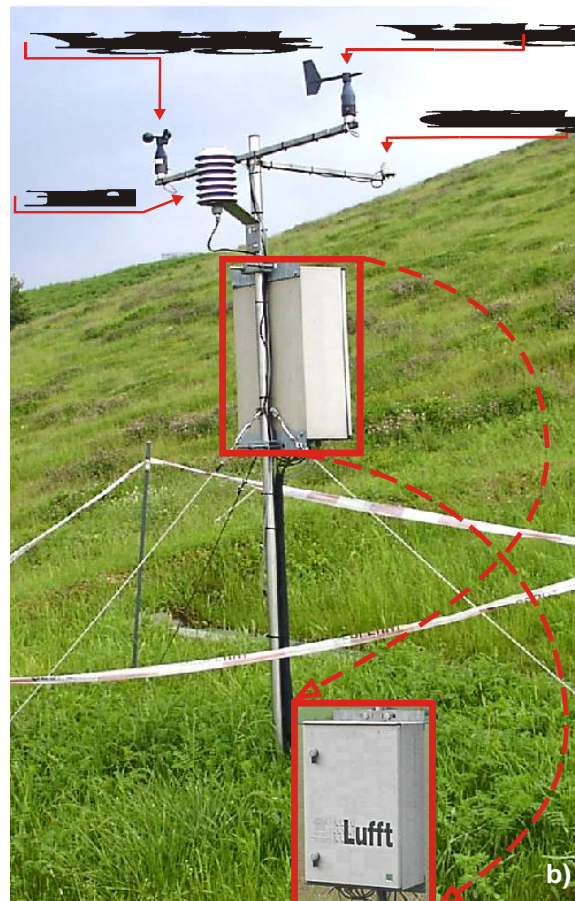


Abb. 4: a) Der Niederschlagsmesser des Lysimeters ist systembedingt direkt am Boden installiert. b) Die weiteren meteorologischen Daten werden mit den Niederschlägen an einen Datenlogger im Messcontainer gesendet und online abgerufen.

3.2. Niederschlag

Im Jahr 2013 standen lediglich die Niederschlagsdaten der DWD-Station Ispringen zur Verfügung (bereitgestellt durch die Technischen Dienste der Stadt Pforzheim). Die Station befindet sich in ca. 1 km Entfernung zum Standort (Abb. 5).

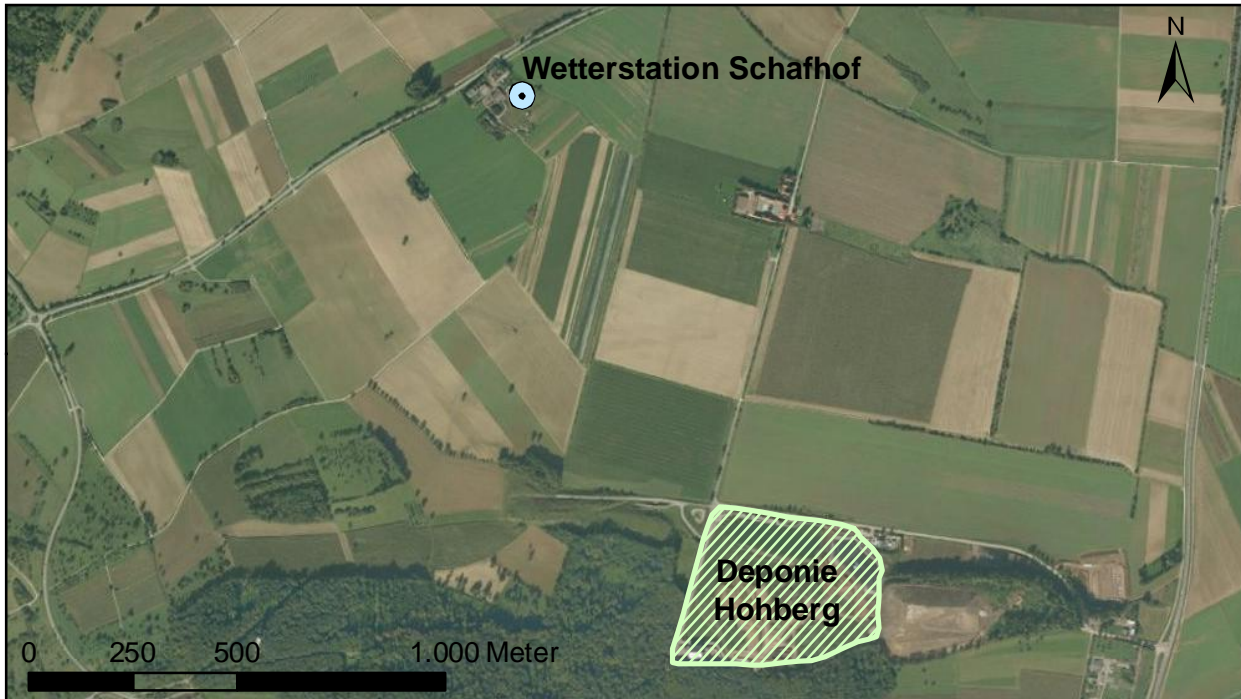


Abb. 5: Lage der DWD Station-Ispringen auf dem Schafhof und Lage der Deponie Hohberg.

Der meiste Niederschlag wurde mit 155,3 mm im Mai 2013 registriert. Aber auch im Oktober (118,8 mm), Juni (99 mm) und September (95,9 mm) wurden erhöhte Werte gemessen. Der geringste Niederschlag fand im März mit knapp 30 mm statt. Am 31. Mai (54,6 mm/d) und am 01. Juni (48 mm/d) gab es jeweils ein Starkregenereignis, bei dem gut 1/3 des Mainiederschlages bzw. fast die Hälfte des Juniniederschlages verzeichnet wurden. Das Jahr 2013 war mit 901,5 mm wesentlich feuchter als das Vorjahr ($N_{a, 2012} = 785,7$ mm). Dies wird Auswirkungen auf vereinzelte Abflusskomponenten haben. Die Niederschlagsdaten sind im nächsten Abschnitt mit den Daten des Oberflächenabflusses aufgetragen (Abb. 6).

3.3. Abflussregime

Um die Wirksamkeit der Dichtungskomponenten und des Gesamtsystems bewerten zu können, wurden die Abflüsse nach dem in Kapitel 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, bevor die Gesamtwasserbilanz 2013 erstellt wird.

Die 4 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}

3.3.1. Oberflächenabfluss (Q_{Surf})

Da die Niederschlagsmengen 2013 deutlich höher als 2012 sind, steigt auch der der Oberflächenabfluss (Abb. 6) auf 33,1 mm/a im Vergleich zum Vorjahr (28,1 mm/a). Deutlich zu erkennen ist selbstverständlich der direkte Zusammenhang zwischen Niederschlag und Oberflächenabfluss. Die Starkregenereignisse tragen hauptsächlich zu den im Juni registrierten Abflüssen bei bzw. nehmen einen großen Teil der Maiabflüsse ein.

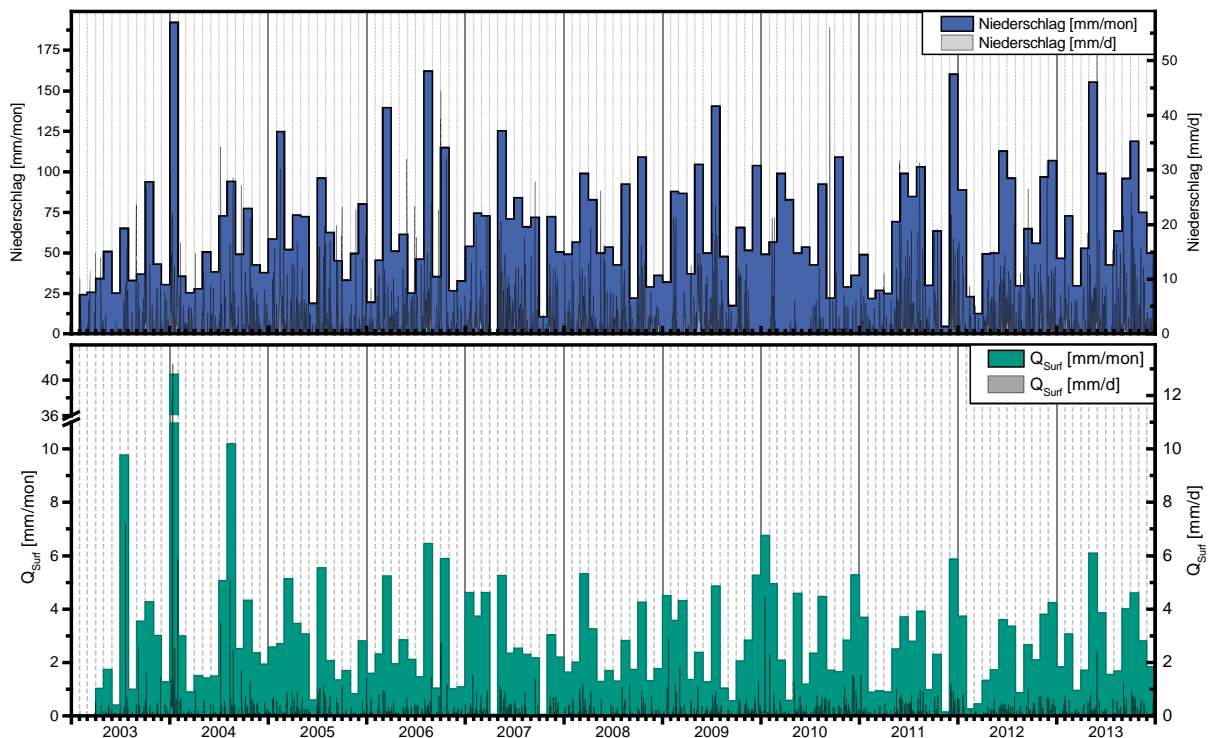


Abb. 6: Vergleich der Oberflächenabflüsse und der Niederschläge der Jahre 2003-2013. Die Niederschlagsverteilung korreliert sehr gut mit dem Abflussverhalten des Q_{Surf} . In Grün (Q_{Surf}) bzw. Blau (Niederschlag) sind die monatlichen (linke Ordinaten), in Grau die täglichen Abflüsse (rechte Ordinaten) aufgetragen.

3.3.2. Oberer Kiesflächenfilter (OKF)

Der Obere Kiesflächenfilter hat die Aufgabe als Flächendränage über der Asphaltdeckungsschicht zu wirken. Damit sollte dieser systembedingt in der Regel die größten Mengen Sickerwasser abführen. Die Messwerte der Untersuchungsmonate von Februar 2003 bis Dezember 2013 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. Auch das Messjahr 2013 zeigt dieses erwartete Verhalten, und liegt mit rund 297 mm Jahresabfluss deutlich über dem Abflusswert von 2012 (195 mm) (Abb. 7). Zwar sind im Jahr 2013 die Maximalabflüsse nicht so hoch wie im Vorjahr (ca. 80 mm im Dezember), anders als in den Vorjahren, ist das erste Halbjahr aber durchweg sehr abflussreich, ebenso wie das letzte Quartal des Jahres. Lediglich im 3. Quartal sind die Abflüsse rückläufig. Dass die Korrelation nicht größer ist liegt wohl zum einen an einem leichten Versatz, um den der Q_{OKF} gegen den Q_{Surf} nach hinten verschoben ist und zum anderen an der über das Jahr unterschiedlich ausgeprägten Evapotranspiration. Am meisten wird im Februar (55,6 mm) und im November (46 mm) abgeführt. Die Monate mit den geringsten Abflüssen 2013 sind der Juli mit 0,4 mm und der August mit 0,1 mm. An dieser Stelle kann diskutiert werden, ob sich das Niederschlagsverhalten in den kommenden Jahren auf-

grund sich verändernder klimatischer Bedingungen in dieser Form einpendeln wird und somit eine höhere hydraulische Belastung für die Dränschicht zu erwarten ist.

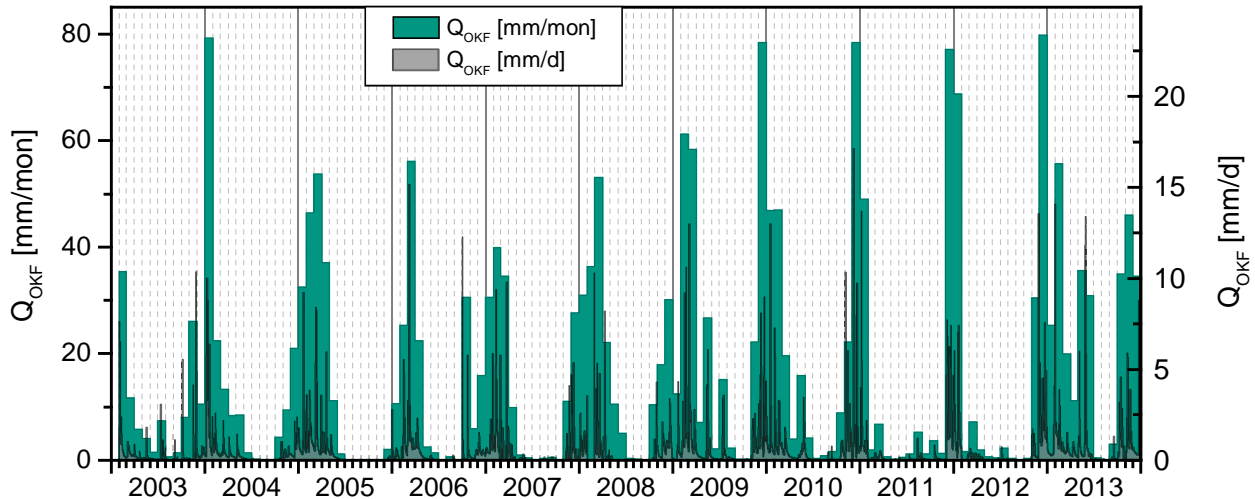


Abb. 7: Abflussregime des OKF für die Jahre 2003 - 2013. In Grün sind die monatlichen (linke Ordinate), in Grau die täglichen Abflüsse (rechte Ordinate) aufgetragen.

3.3.3. Kapillarschicht (KS)

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 Asphalt 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 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). 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. Durch die doch eher niedrigen Werte und die hohen Wirkungsgrade der KS (siehe Kapitel 4.1) handelt es sich sehr wahrscheinlich nicht um große Undichtigkeiten oder Randumläufigkeiten.

Der Trend zunehmender Abflüsse setzt sich auch im Jahr 2013 ganz deutlich weiter fort (Abb. 8). Lag der Gesamtabfluss im Jahr 2012 bei etwa 0,36 mm, so liegt er mit 0,55 mm 2013 höher. Generell spiegelt sich das Abflussverhalten des OKF beim KS wider. Der in den beiden Vorjahren beobachtete Peak im Dezember lässt sich 2013 nicht erneut beobachten. Der übrige Verlauf der Abflüsse ist aber mit denen des Vorjahres vergleichbar, wobei er z.T. stärker ausgeprägt ist.

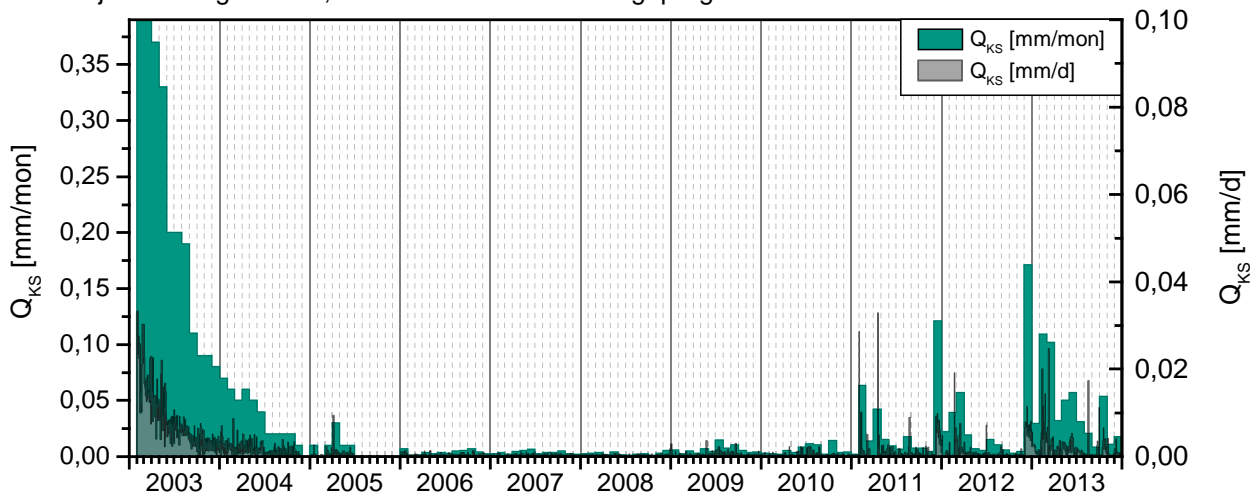


Abb. 8: Abflussregime der Komponente „Kapillarschicht KS“ für die Messjahre 2003 bis 2013. In Grün sind die monatlichen Abflüsse (linke Ordinate) und in Grau die täglichen Abflüsse (rechte Ordinate) aufgetragen.

3.3.4. Kapillarbrechende Schicht (KBS)

In Abb. 9 sind die monatlichen Abflüsse der KBS aufgetragen. Die Abflüsse 2013 sind trotz erhöhter Niederschläge und erhöhter Abflüsse im OKF und in der KS rückläufig. Dabei sind die monatlichen Abflussraten nahezu gleich verteilt über das Jahr. Die Differenz zwischen maximalem und minimalem Abfluss beträgt lediglich 0,02 mm (2012: 0,05 mm). Ohne den Januar läge die Differenz sogar bei 0,01 mm.

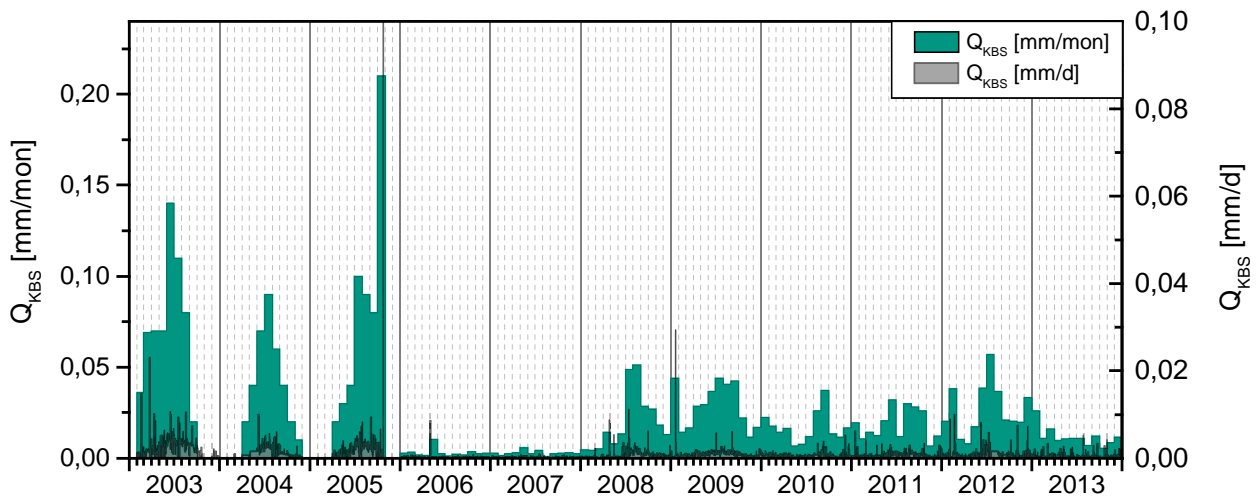


Abb. 9: Abflussregime der Komponente KBS für die Messjahre 2003 bis 2013. In Grün sind die monatlichen Abflüsse (linke Ordinate), in Grau die täglichen Abflüsse (rechte Ordinate) dargestellt.

3.3.5. Evapotranspiration ET_a

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“ berechnet werden. Das Bodenfeuchteregime wurde für den Auftraggeber nur für die Beobachtungsjahre 2003 bis 2005 durch Neutronensondennmessungen bestimmt, jedoch für die Jahre 2006 - 2010 nicht in Auftrag gegeben. Im Jahr 2013 fanden zwischen dem 29.07. und 01.08.2013 drei aufeinanderfolgende Messungen statt. Jedoch kann hiermit für 2013 keine detaillierte Angabe über die monatlichen oder jährlichen Bodenfeuchteänderungen und über die somit ermittelte Evapotranspiration gemacht werden. 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%).

4 Bewertung der Oberflächenabdichtung

4.1. Lysimeter-Wasserhaushaltsbilanz für das Untersuchungsjahr 2013

Unter Berücksichtigung aller gemessenen Bilanzkomponenten, Q_{Surf} , Q_{OKF} , Q_{KS} , Q_{KBS} und ET_a + Bodenfeuchte im direkten Vergleich mit dem Niederschlag N ergibt sich eine Lysimeter-Wasserhaushaltsbilanz für die einzelnen Kompartimente, die damit eine Bewertung des Oberflächenabdichtungssystems erlaubt. Der gemessene Gesamtabfluss am Lysimeter beträgt 36,9% des Jahresniederschlags 2013 während rund 63% als Evapotranspiration und Bodenfeuchte in die Bilanz eingehen. Die monatlichen %-Anteile der einzelnen Komponenten der Wasserbilanz für den Untersuchungszeitraum 2013 sind detailliert in Tab. 1 aufgelistet.

Tab. 1: Monatliche Abflusswerte der Abdichtungskomponenten in mm/Mon und im prozentualen Verhältnis zum Jahresniederschlag N_a 2013.

Monat	Q_{Surf} [mm/mon]	% von N	OKF [mm/mon]	% von N	KS [mm/mon]	% von N	KBS [mm/mon]	% von N	Niederschlag [mm/mon]
Januar	1,83	3,94	25,30	54,50	0,058	0,124	0,013	0,027	46,43
Februar	3,06	4,21	55,62	76,45	0,109	0,150	0,011	0,015	72,76
März	0,94	3,19	19,88	67,22	0,102	0,344	0,016	0,054	29,58
April	1,70	3,22	11,19	21,13	0,032	0,060	0,010	0,018	52,97
Mai	6,09	3,93	35,54	22,89	0,050	0,032	0,011	0,007	155,26
Juni	3,85	3,89	30,85	31,18	0,057	0,058	0,038	0,011	98,96
Juli	1,55	3,63	0,38	0,89	0,031	0,072	0,011	0,028	42,61
August	1,66	2,62	0,09	0,14	0,021	0,033	0,007	0,011	63,55
September	4,01	4,19	3,01	3,14	0,008	0,009	0,012	0,013	95,86
Oktober	4,60	3,87	34,92	29,40	0,054	0,045	0,006	0,005	118,79
November	2,80	3,74	45,96	61,39	0,011	0,015	0,009	0,011	74,86
Dezember	1,82	3,65	34,47	69,15	0,018	0,035	0,011	0,023	49,84
Gesamt- Abfluss	33,91	3,76	297,22	32,97	0,550	0,061	0,154	0,017	901,47
ET_a & Bodenfeuchte	569,64 mm								63,12% von N_a

Zum Vergleich werden auch die Ergebnisse der Vorjahre herangezogen, deren monatliche Abflüsse und Bodenwasserbilanzen im Anhang 2 - 12 eingesehen werden können. Für die Betrachtung der Gesamtbilanzierung des Abdichtungssystems wurde die jeweilige Jahressumme aus den Monatswerten ermittelt und mit dem Gesamtniederschlag in ein prozentuales Verhältnis gesetzt (Abb. 10).

Niederschlagsverteilung für das Jahr 2013

Gesamtniederschlag $N = 901,5 \text{ mm}$

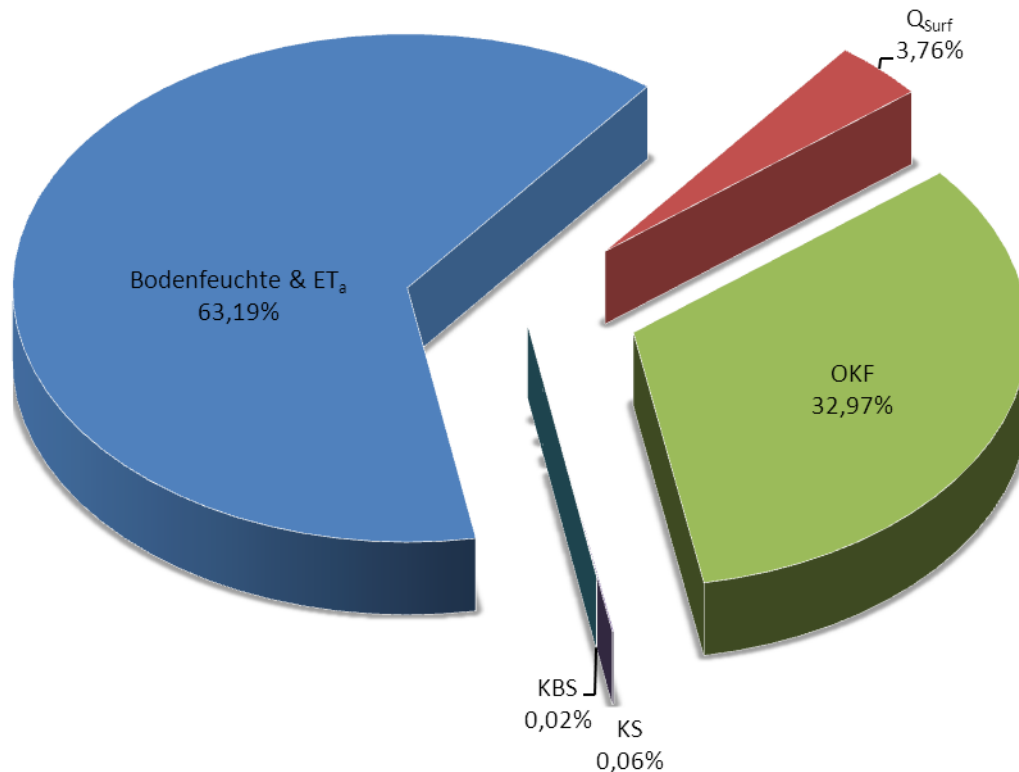


Abb. 10: Lysimeterbilanz 2013 der Schichtabflüsse als prozentualer Anteil am Jahresniederschlag 2013.

4.2. Wirkungsgrad

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 (Kapitel 3.3.4) wird diese Komponente üblicherweise zur Berechnung des Wirkungsgrades eines Abdichtungssystems herangezogen.

Damit gilt für einen Gesamtwirkungsgrad W_{ges} :

$$W_{ges} = \frac{N - Q_{KBS}}{N \cdot 100} \% \quad (2)$$

Der Wirkungsgrad der Kapillarsperre hat sich im Vergleich zum Vorjahr leicht verbessert (Abb. 11). Da der Wirkungsgrad komplett auf den Daten der Wetterstation Ispringen beruht, liegt auch hier ein gewisser nicht näher bestimmbarer Fehler beim Wirkungsgrad vor. Bei einem Vergleich der Niederschlagsdaten der Station Hohberg und Ispringen, fielen letztere Werte tendenziell höher aus (siehe Jahresbericht

2012). Somit sollte der reelle Wirkungsgrad etwas schlechter angesetzt werden. Dies gilt auch für das Jahr 2011, in dem die Berechnungen ebenfalls auf dem gesamten Niederschlag von Ispringen beruhen.

Insgesamt unterliegen die Jahre nach dem Umsetzen des Messhauses (ab ca. 2009) einem einheitlichen Trend. Allerdings sollte, selbst wenn man den Fehler durch den Niederschlag berücksichtigt, der Wirkungsgrad bei immer noch über 99% resultieren. Eine tabellarische Darstellung aller berechneten Wirkungsgrade (inklusive 2013) findet sich in Anhang 1.

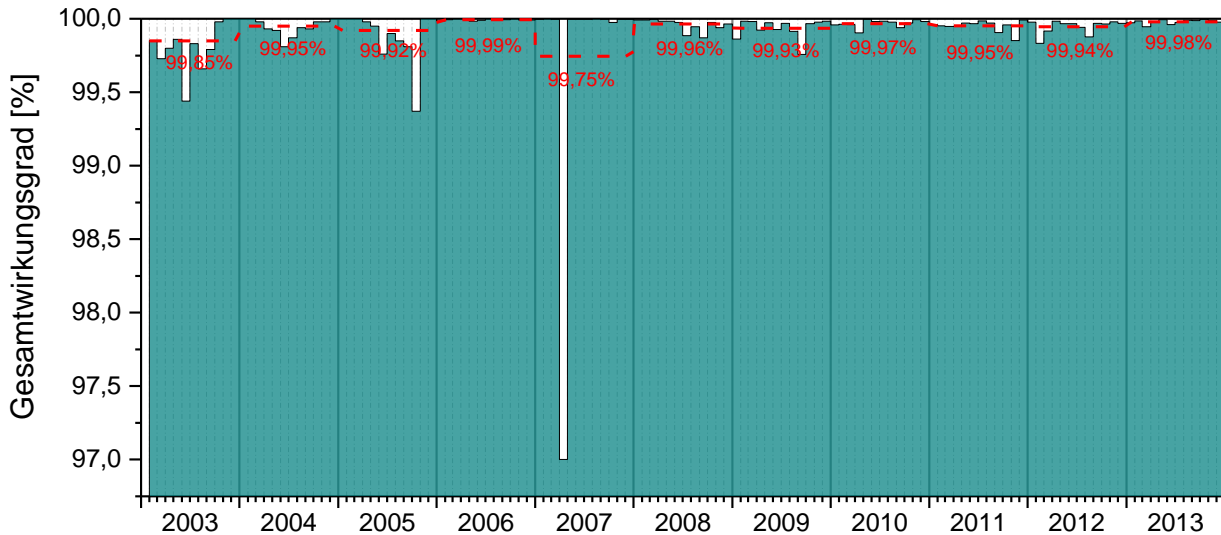


Abb. 11: Grafik über die Wirkungsgrade aus dem Messungszeitraum 2003 - 2013. Die rote Kurve stellt die Monatswerte und die grüne die Jahresmittel dar. Die Spitze im April 2007 resultiert aus dem damaligen Mangel an Niederschlag (0,04 mm).

5 Neutronensondenmessung zur Bestimmung der Bodenfeuchte

Im Jahr 2013 wurden in einem Zeitraum von 4 Tagen drei Messungen durchgeführt, um eine Feuchtefront nach einem Regenereignis zu erfassen. Dies verdeutlicht Abb. 12.

Es fällt auf, dass die Bodenfeuchtekurven von P_o zu P_u ab einer Tiefe von ca. 100 cm beginnen zu divergieren. So entsteht zwischen 110 und 130 cm zunehmend ein Peak in der Bodenfeuchtekurve, der bei P_o deutlicher ausgeprägt ist als bei P_m . In Feuchtefließrichtung betrachtet (= hangabwärts), wird der Boden in dieser Tiefe Richtung Fuß des Feldes offensichtlich immer trockener.

Dieses Phänomen deckt sich auch mit den Beobachtungen der letzten Jahre: In den betreffenden Schichten der oberen Messstelle scheint die Feuchte in einem höheren Maß gespeichert zu werden, als in den hangabwärts liegenden Messpunkten (vgl. Jahresbericht 2011, Kapitel 5). Veranschaulichen lässt sich dies auch an der Gesamtausdehnung der Kurven der einzelnen Messstellen in einer Messtiefe von 20 bis 130 cm. Während P_u noch deutlich unterhalb der 30%-Linie liegt, dehnen sich die Kurven bei P_m schon bis an diese Linie aus (bei 120 cm sogar darüber). P_o hingegen reicht bei 110 und 120 cm sogar deutlich darüber hinaus (vgl. grüne gestrichelte Linien in Abb. 12). Über die Ursache kann an dieser Stelle nur spekuliert werden. Möglicherweise liegt dies an einem unterschiedlichen Verdichtungsgrad beim Einbau der Rekultivierungsschicht oder an unterschiedlich ausgeprägten Setzungserscheinungen. Dies könnte in einem höheren Porenvolumen im oberen Bereich resultieren und damit eine erhöhte Speicherkapazität zur Folge haben. Zu den Messzeitpunkten konnte P_o nicht bis ganz unten befahren werden, da sich in dem Rohr (vermutlich durch die nicht ganz dichte reparierte Stelle an der Geländeoberkante) Wasser gesammelt hatte.

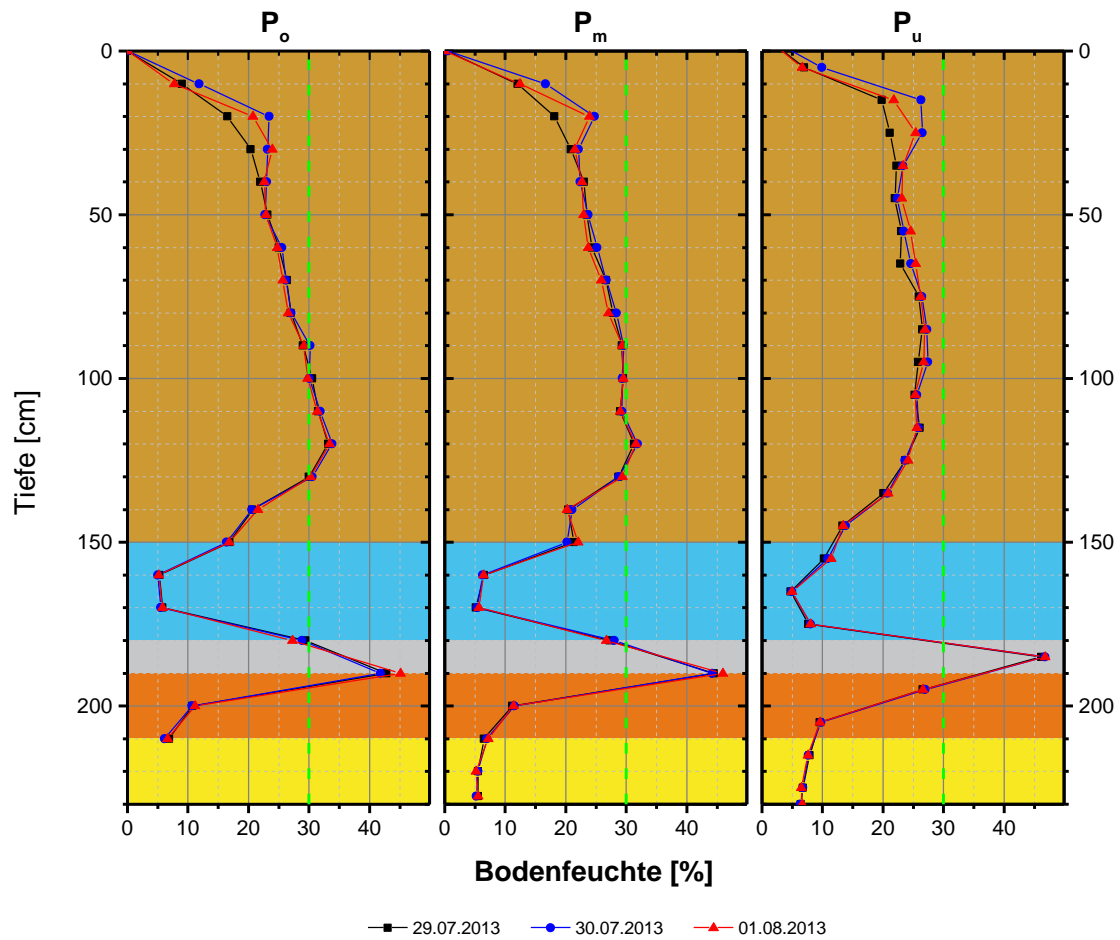


Abb. 12: Darstellung der Bodenfeuchteprofile für die Messstellen P_o (links), P_m (mitte) und P_u (rechts). Die grüne gestrichelte Linie bezeichnet einen Vergleichsbereich von unterschiedlich ausgeprägten Bodenfeuchten der einzelnen Messstellen in einer Tiefe von 110 – 130 cm. (Farbige Bereiche entsprechen der ungefähren Lage der Schichten; Farbgebung und Lage der Messstellen siehe Abbildung 2 bzw. Abbildung 3)

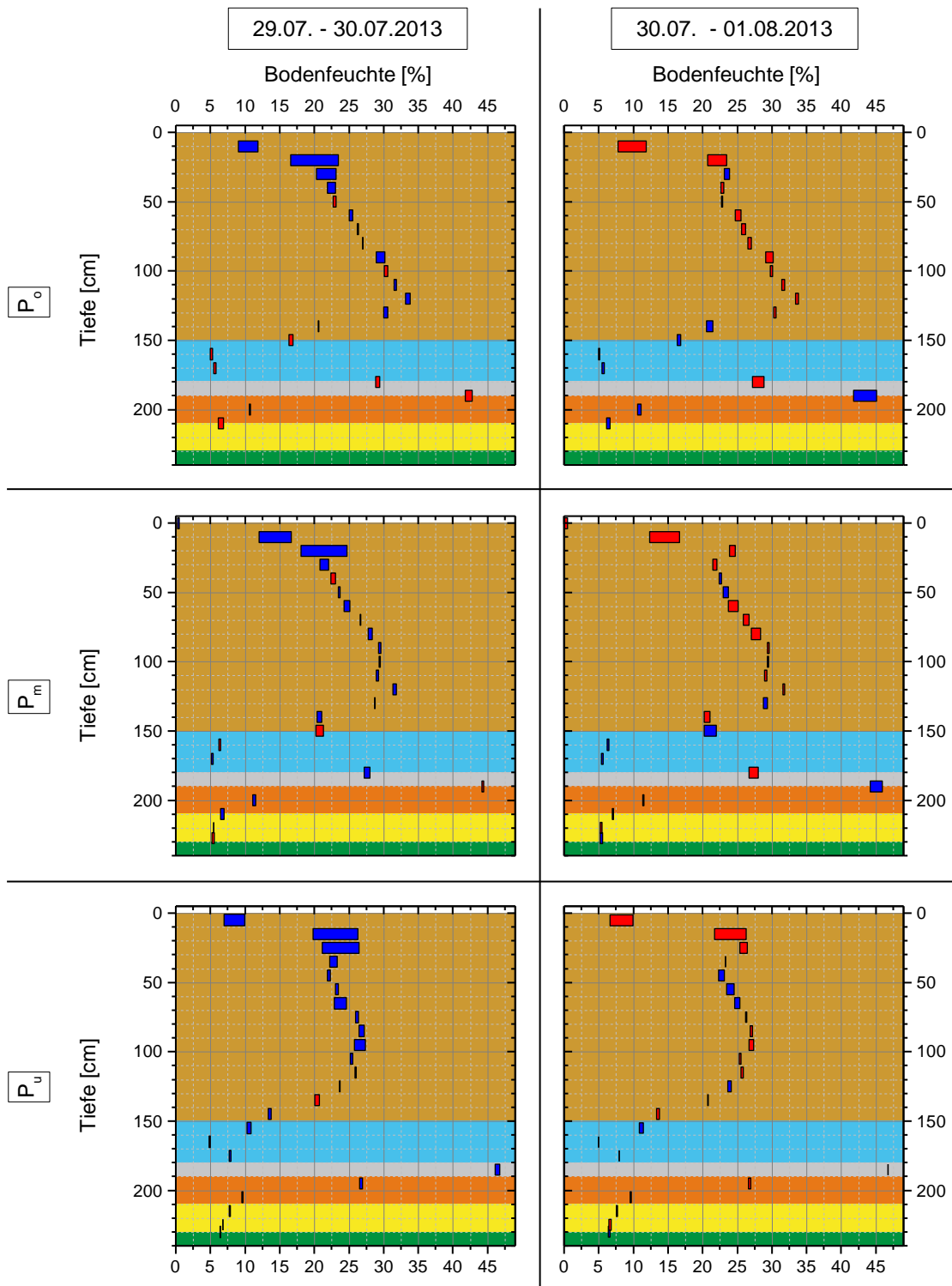


Abb. 13: Kombinierte Abbildung der Bodenfeuchtedifferenzen von drei aufeinanderfolgenden Messungen. In den Spalten sind die Feuchteänderungen zwischen jeweils zwei Messzeitpunkten, in den Zeilen sind die zugehörigen Messstellen dargestellt. Die Länge eines Balkens entspricht der Bodenfeuchteänderung in % bei gegebenem Maßstab. Die blaue Farbe signalisiert eine Zunahme, die rote eine Abnahme in dem jeweiligen Zeitraum (Schichten und Farbgebung siehe Abb. 3).

Abb. 13 zeigt die Bodenfeuchtedifferenzen der drei Messzeitpunkte und die jeweiligen Messstellen. Die Balken stellen die Änderung der Feuchte dar. Wenn ein Balken z.B. von 15 bis 17% reicht, so bedeutet dies, dass in dem Zeitraum eine Differenz von 2% stattgefunden hat. Ist der Balken blau, so ergab die erste Messung z.B. 15% und die zweite Messung 17% (also eine Feuchtezunahme), ist der Balken rot, ist es umgekehrt (Feuchteabnahme um 2%). Um die Feuchteentwicklung einer Messstelle zu betrachten, wird die Abbildung von links nach rechts gelesen.

Bei P_o erkennt man zwischen den ersten beiden Messungen in den Messtiefen 10 bis 40 cm eine leichte bis deutliche Zunahme der Bodenfeuchte. Die zweite Messperiode zeigt, dass die Tiefen 10 und 20 cm wieder deutlich an Feuchte verloren haben. Im Fall des 10 cm Messschrittes liegt die Endfeuchte sogar unter der zu Beginn der Kampagne gemessenen Feuchte. Vergleicht man die Änderungen insgesamt, so erkennt man, dass die größte Dynamik in den oberen Messpunkten stattfindet, wie es aufgrund der Nähe zur Oberfläche und den damit verbundenen atmosphärischen Einflüssen zu erwarten ist (Temperatur in diesem Zeitraum zwischen 15 und 33 °C). Bei einer einsickernden Feuchtefront sollte eigentlich die Zunahme der oberen Punkte bei der zweiten Messperiode nach unten gewandert sein und dort eine Zunahme erkennen lassen. Dies ist aber nur in P_u in sehr abgeschwächter Form zu erkennen.

Dahingehend ist eine doch deutliche Änderung der Feuchte im Bereich der Asphalttschicht bei P_o und P_m zu beobachten. Da die Asphalttschicht nicht sehr mächtig ist und die Messauflösung der Neutronensonde wahrscheinlich über diese Mächtigkeit hinausgeht, lässt sich nicht eindeutig sagen, ob die Änderungen den Ursprung oberhalb oder unterhalb der Asphalttschicht haben (wenn man von potentiellen Rissen in der Schicht selbst einmal absieht). Dass es sich aber vermutlich um eine recht punktuelle Änderung direkt an den Schichtgrenzen handelt, die nicht nur im peripheren Wirkungsbereich der Neutronensonde liegen, zeigt Messstelle P_u , deren Messschritte um ca. 5 cm verschoben sind. Hier sind keine vergleichbaren Veränderungen erkennbar, weder in der Asphalttschicht, noch in der mineralischen Tragschicht.

Betrachtet man P_u etwas genauer, so fällt auf, dass hier in tieferen Bereichen auch noch signifikante Bodenfeuchteänderungen stattfinden, allerdings nicht unbedingt bei zusammenhängenden Messstufen. Der Tiefenabschnitt zwischen 60 und 70 cm z.B. erfährt eine weitaus höhere positive Feuchteänderung, als der Bereich zwischen 40 und 60 cm. Dies könnte bedeuten, dass letzterer Bereich durch eine Art Bypass umflossen wird, also auf präferenziellen Fließwegen das Wasser schneller in die entsprechende Tiefenlage transportiert wurde.

In Abb. 13 sind zudem noch Bereiche mit erhöhtem Retentionsvermögen erkennbar. Betrachtet man den Bereich zwischen 20 und 30 cm bei P_u , so erkennt man, dass die Bodenfeuchte hier bei der zweiten Messperiode deutlich weniger abgenommen hat, als vergleichsweise einen Messschritt darüber (10 – 20 cm).

Um aber eine eindeutige Feuchtefront zu erfassen, sind entweder längere Messzeitreihen nötig, oder die Messung muss zu einer anderen Jahreszeit stattfinden (etwa im Früh- oder Spätjahr, wo die Temperaturen niedrig genug sind, dass nicht das meiste aus dem oberflächennahen Bereich wieder wegverdunstet).

Die scheinbar erhöhten Werte im Bereich der Asphalttschicht in einer Tiefe von 180 bis 200 cm, liegen an der Messmethode. Da die Neutronensonde auf dem Prinzip der elastischen Streuung von Neutronen an Atomen gleicher Masse beruht, wird im Bereich der Asphalttschicht durch die erhöhte Anzahl an Wasserstoffatomen der Schicht selbst, eine erhöhte scheinbare Feuchte registriert. Der reale Wert dürfte eher im Bereich der Messtiefen von 160/170 und 210/220 cm liegen.

6 Zusammenfassende Schlussfolgerungen

Das Amt für Stadtentsorgung (Technische Dienste) der Stadt Pforzheim unterhält im Rahmen der Sicherung und Sanierung der Hausmülldeponie Pforzheim Hohberg eine zur TAsi alternative Oberflächenabdichtung. Um die Wirksamkeit der Dichtungskomponenten und des Gesamtsystems bewerten zu können wird eine Bauwerksüberwachung mittels eines Großlysimeters durchgeführt. Ziel der Untersuchungen unter Zuhilfenahme des Lysimeters ist eine kontinuierliche und lückenlose Erfassung aller Abflüsse innerhalb der einzelnen Schichten der Abdichtung mit einer anschließenden Bewertung des hier zum Einsatz gekommenen alternativen Oberflächenabdichtungssystems und einer Erstellung von Wirkungsgra-

den, insbesondere im Hinblick auf das hydraulische Verhalten der Asphaltabdichtung und der Langzeitsystemdichtigkeit.

Das Großlysimeter befindet sich im nordwestlichen Bereich des Bauabschnitts I der Deponieoberflächenabdichtung, dessen Aufbau dem des Bauabschnittes entspricht und durch eine 1,5 m Rekultivierungsschicht mit unterlagernder Drainage (oberer Kiesflächenfilter, 0,3 m), einer Asphaltabdichtung (7,5 – 15 cm) und einer 0,3 m mächtigen Kapillarsperre gekennzeichnet ist. Zur Abflussbilanzierung stehen die vier Abflusskomponenten Oberflächenabfluss (Q_{Surf}), der Abfluss des oberen Kiesflächenfilters (Q_{OKF}), der Kapillarschichtabfluss (Q_{KS}) und der Abfluss aus der Kapillarbruchschicht (Q_{KBS}) zur Verfügung. Die Messwerterfassung beinhaltet Daten aus dem Zeitraum April 2003 bis Dezember 2013.

Als begleitende Maßnahme zur Bauwerksüberwachung des Lysimeters betreute der Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe bis zum Messjahr 2006 die Klimastation, welche durch einen Blitzeinschlag im Juli 2006 beschädigt wurde. Seitdem erfolgt die meteorologische Datenerfassung durch die Stadt Pforzheim, welche die Daten für den Bearbeitungszeitraum 2013 des AGW zur Verfügung gestellt hat. Dies gilt für die verwendeten Daten der Wetterstation Pforzheim-Ispringen, da die Hohberg-Station auch im Jahr 2013 keine plausiblen Daten geliefert hat. Ein detaillierter Vergleich der Niederschläge im Vorjahresbericht ergab allerdings nicht unerhebliche Abweichungen der beiden Standorte. Im Monatsmittel sind diese Unterschiede weniger gravierend, so dass die Niederschläge in erster Näherung für die Bilanzierung verwendet werden können. Jedoch lässt sich ein detaillierter Vergleich von Abflüssen und Niederschlägen nur unzureichend durchführen.

Der Vergleich des Abflussverhaltens am Lysimeter mit den Niederschlagswerten zeigt eine gute Korrelation mit dem Oberflächenabfluss Q_{Surf} . Erwartungsgemäß zeigt der obere Kiesflächenfilter OKF systembedingt die größten Mengen an Sickerwasser (~194 mm), da er als Flächendrainage über der Asphaltabdichtungsschicht wirkt. 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, die, bei einer absolut dichten Asphaltsschicht, nach Fertigstellung mit der Zeit immer weniger bis kein Wasser führen sollte. Die im Laufe der ersten Monate registrierten KS – Abflusshöhen können durch gravitativ abgeführtes Einbauwasser erklärt werden. Das Messjahr 2005 zeigte dann einen weiteren Rückgang des Kapillarschichtabflusses und 2006 – 2008 wurden nur noch geringe Abflussmengen unterhalb der Asphaltsschicht gemessen.

Die laterale Abflussmenge der kapillarbrechenden Schicht KBS spiegelt die Gesamtsystemdichtigkeit wider und entspricht letztendlich 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 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 Zufussrohre 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) liegt.

Im Jahr 2013 erreicht die Kapillarsperre einen Wirkungsgrad von ca. 99,98% und liegt damit leicht über den Werten der beiden Vorjahre. Vergleicht man diesen Wert mit dem Zeitpunkt nach 2008, nachdem die KBS wieder ordentlich abführt, so scheint sich der Wirkungsgrad in diesem Bereich einzupendeln.

Eine Befüllung der KS-Mulde fand im Spätjahr 2009 nach dem Vorbild der vollgelaufenen KBS-Mulde statt, um damit eine erhoffte Normalisierung dieses Abflusses zu erreichen. Zwischen 2009 und 2010 steigen die Abflüsse zwar leicht an, aber erst ab Februar 2011 wird verhältnismäßig viel Abfluss registriert. Dieser steigt seit 2011 auch kontinuierlich an. Zwar ist es systembedingt korrekt, dass die KS mehr abführt als die KBS, allerdings bleibt die Frage zu klären, warum überhaupt Wasser unterhalb der als dicht angenommenen Asphaltsschicht abgeführt wird.

Mit einer Deponiesickerwasserneubildungsrate von knapp 0,02% des Niederschlages 2013 liegt diese noch etwas unter dem Wert des Vorjahres, das Gesamtsystem und ist nach wie vor als sehr positiv zu

bewerten. Die Dimensionierung der einzelnen Schichten hat sich über den Messzeitraum bewährt. Durch die relativ flache Lage des Testfeldes, findet nur ein geringer hangparalleler Fluss in der Rekultivierungsschicht statt. Niederschlag versickert dadurch schneller vertikal und wird weniger verdunstet. Dies resultiert in einer sehr hohen Abflussrate des OKF, welcher insgesamt, wenn auch in gedämpfter und diffuser Form, schneller auf Niederschlagsereignisse reagiert, als vergleichbare Systeme an steileren Hanglagen. Da die Konvektionssperre den Anspruch hat, zu 100% abzudichten, bleibt noch zu klären, wo die Ursachen für die 0,7 mm liegen, die trotzdem unterhalb der Asphaltsschicht gesammelt werden. Der in der Vergangenheit postulierte Wassersack in den Rohren konnte durch eine Kamerabefahrung bestätigt, sowie Beschädigungen der Rohre (zumindest für diesen Bereich) ausgeschlossen werden. Eine bauliche Ertüchtigung der Zuläufe und damit verbunden auch der Sammelstelle, sollte in Zukunft qualitativ hochwertigere Werte der Abflüsse liefern und auch die Aussagekraft weiterführender Untersuchungen drastisch verbessern.

Dr. N. Göppert
Projektleitung

Dipl.-Geol. M. Augenstein
Sachbearbeiter

7 Literatur und bisherige Berichte

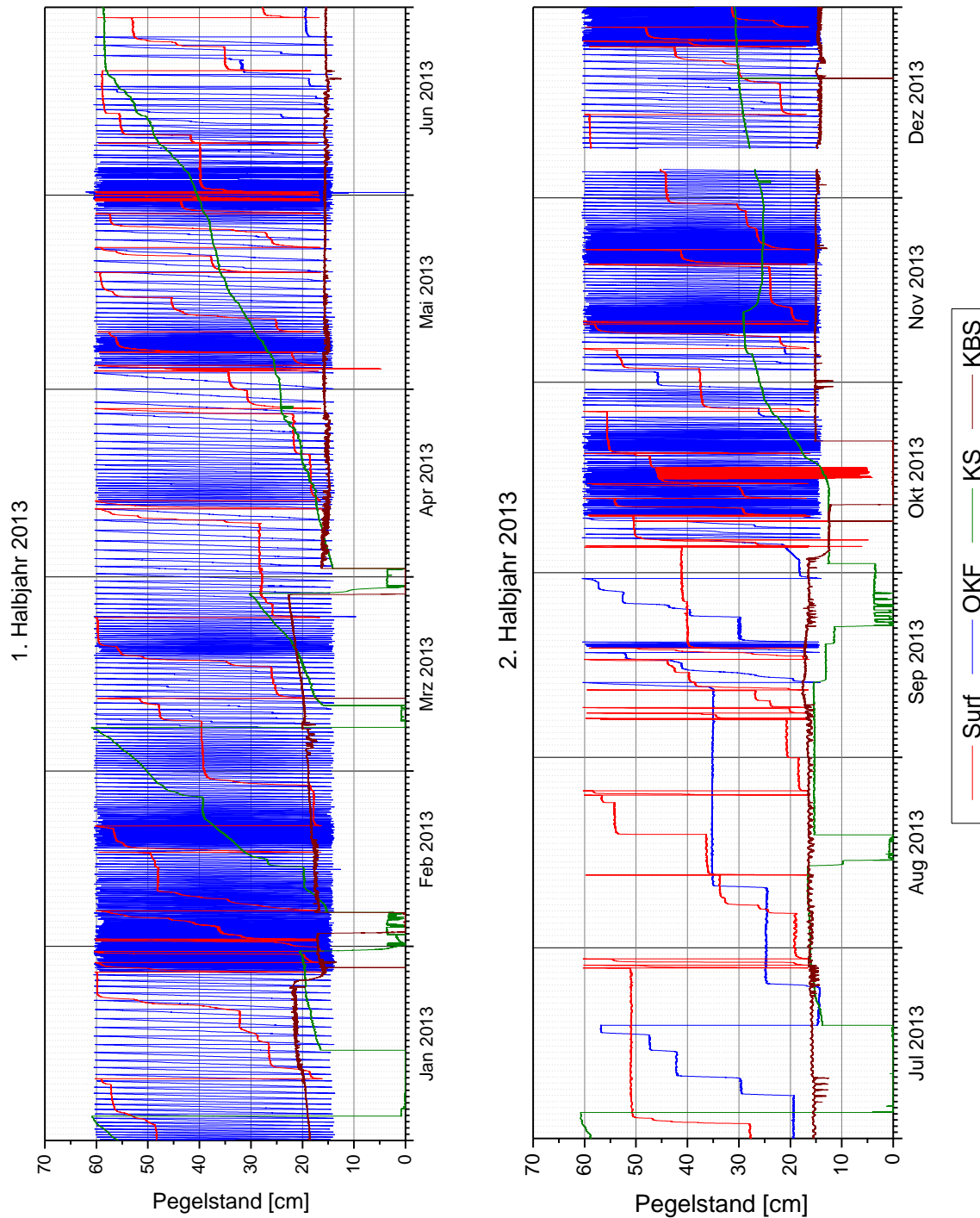
- AUGENSTEIN, M., (2009): Hydrogeologische Untersuchungen zum Wasserhaushalt der Deponie Pforzheim Hohberg mittels Lysimeter und numerischer Modellierung, Diplomarbeit 2009 am Institut für Angewandte Geologie, Universität Karlsruhe.
- BREH W., GIURGEA V. & HÖTZL H. (2002): Langzeitbeobachtung zum Verhalten 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, FACHBEREICH 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, FACHBEREICH 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, FACHBEREICH 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, FACHBEREICH 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, FACHBEREICH 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]

- 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, unveröffentlicher Bericht, CD].
- LEHRSTUHL FÜR ANGEWANDTE GEOLOGIE (2008b): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld_LYSIMETER – Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für den Messzeitraum Januar – Dezember 2007 [Dezember 2008, nachbeauftragter, unveröffentlicher Bericht, CD]
- LEHRSTUHL FÜR ANGEWANDTE GEOLOGIE (2010): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim-Hohberg – Erfassung und Dokumentation der Messdaten des Lysimeters und der Klimastation für das Messjahr 2009, [September 2010, unveröffentlicht, Bericht, CD].

- LINERT, U. (1995): Verhalten von Pflanzenwurzeln in Oberflächenabdichtungssystemen.- in EGLOFFSTEIN, TH. & BURKHARDT, G. (Hrsg.) (1995): Oberflächenabdichtungen für Deponien und Altlasten-Abdichtung oder –Abdeckung -Schr. Angew. Geologie Karlsruhe, 37: 15-1 bis 15-13; Karlsruhe.
- MATTHEß, G. & UBELL, K. (1983): Allgemeine Hydrogeologie - Grundwasserhaushalt. - Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 1: 438 S.; Borntraeger Verlag, Berlin, Stuttgart.
- SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1992): Lehrbuch der Bodenkunde. - 491 S., 13. durchgesehene Auflage; Enke Verlag, Stuttgart.
- SCHRÖDER, P. & BERGER, K (2004): Das Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Modell – Benutzerhandbuch für die deutsche Version 3. 4., überarbeitete Auflage zur deutschen HELP-Version 3.80 D, 117 S., Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg, Hamburg
- TA SIEDLUNGSABFALL (1993): Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. - Bundesanzeiger: 117 S.; Köln.

8 Anhang

Anhang 1: Darstellung der Wasserstände der einzelnen Lysimeterabflüsse über das Messjahr 2013.



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

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	
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	
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	
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

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	
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	
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	
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	
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	
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: Gesamtwirkungsgrad W_{ges} der Oberflächenabdichtung für den Untersuchungszeitraum 2003 – 2013.

	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
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

Fortsetzung Anhang 13:

	Niederschlag [mm]	Gesamtwirkungsgrad W_{ges} [%]
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
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
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

Fortsetzung Anhang 13:

	Niederschlag [mm]	Gesamtwirkungsgrad W_{ges} [%]
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
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
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

Fortsetzung Anhang 13:

	Niederschlag [mm]	Gesamtwirkungsgrad W_{ges} [%]
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

Anhang 14: beigelegt als CD

Datenablage
Digitaler Bericht
Auswertung