

Stadt Pforzheim
Hausmülldeponie Hohberg
- Oberflächenabdichtung -
LYSIMETER - TESTFELD

Messtechnische Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter

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

I Einleitung

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	III
Anhang	IV

Inhaltsverzeichnis

I Einleitung	1
I-1 Aufgabenstellung	1
I-1.1 Standort Hohberg	3
I-2 Beschreibung des Lysimeters.....	4
I-2.1 Messprinzip	4
I-2.2 Lysimeteraufbau.....	4
I-2.3 Abflussregime	6
I-2.4 Beschreibung der Abflusskomponenten	8
I-2.4.1 Rekultivierungsschicht	8
I-2.4.2 Dränschicht (OKF)	8
I-2.4.3 Kapillarschicht (KS).....	8
I-2.4.4 Kapillarbruchschicht (KBS)	9
I-2.5 Erfassung meteorologischer Eingangsdaten.....	9
I-2.6 Niederschlag.....	11
I-2.7 Evapotranspiration	11
I-2.8 Neuerungen	12
I-3 Berechnungen.....	12
I-3.1 Wirkungsgrad der Asphalttschicht	12
I-3.2 Wirkungsgrad des Gesamtsystems.....	12

II	Darstellung der Messergebnisse für das Jahr 2014	14
II-1	Messergebnisse des Jahres 2014.....	15
II-1.1	Niederschlag	15
II-1.2	Oberflächenabfluss (Q_{Surf})	16
II-1.3	Oberer Kiesflächenfilter (OKF).....	16
II-1.4	Kapillarschicht (KS)	17
II-1.5	Kapillarbrechende Schicht (KBS).....	18
II-1.6	Evapotranspiration ET_a	19
II-2	Bewertung der Oberflächenabdichtung für das Jahr 2014.....	20
II-2.1	Lysimeter-Wasserhaushaltsbilanz.....	20
II-2.2	Wirkungsgrad im Jahr 2014.....	21
II-2.2.1	Asphaltschicht.....	21
II-2.2.2	Gesamtsystem	22
II-3	Neutronensondenmessung zur Bestimmung der Bodenfeuchte im Jahr 2014.....	23
II-4	Zusammenfassung für das Jahr 2014	24
II-5	Literatur und bisherige Berichte.....	26
II-6	Anhang	29

Abbildungsverzeichnis (z.T. gekürzt)

Abb. 1:	Geographische Lage der HMD Hohberg.....	5
Abb. 2:	Skizze des Lysimeters	6
Abb. 3:	Schematischer Querschnitt des Lysimeters mit Neutronensondenmessstellen.	7
Abb. 4:	Wetterstation Hohberg.....	10
Abb. 5:	Lage der DWD Station-Ispringen auf dem Schafhof	11
Abb. 6:	Niederschlagsverteilung der Jahre 2003 - 2014	15
Abb. 7:	Vergleich der Oberflächenabflüsse und der Niederschläge der Jahre 2003 - 2014	16
Abb. 8:	Abflussregime des OKF für die Jahre 2003 - 2014	17
Abb. 9:	Abflussregime der KS für die Jahre 2003 - 2014	18
Abb. 10:	Abflussregime der KBS für die Jahre 2003 - 2014	19
Abb. 11:	Lysimeterbilanz 2014 der Schichtabflüsse	21
Abb. 12:	Wirkungsgrade der Asphaltsschicht aus dem Messzeitraum 2003 - 2014.....	22
Abb. 13:	Wirkungsgrade des Gesamtsystems aus dem Messzeitraum 2003 - 2014.	23
Abb. 14:	Darstellung der Bodenfeuchteprofile für die Messstellen P_o , P_m und P_u	24

Tabellenverzeichnis (z.T. gekürzt)

Tab. 1:	Übersicht über die Baumaßnahmen und Messungen am Lysimeter.....	3
Tab. 2:	Monatliche Abflusswerte der Abdichtungskomponenten in mm/Mon und im prozentualen Verhältnis zum Jahresniederschlag N_a 2014.	20

Anhang (z.T. gekürzt)

Anhang 1:	Darstellung der Wasserstände der einzelnen Lysimeterabflüsse 2014.....	29
Anhang 2:	Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und der Bodenfeuchte 2003.....	30
Anhang 3:	Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und der Bodenfeuchte 2004.....	30
Anhang 4:	Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und der Bodenfeuchte 2005.....	30
Anhang 5:	Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + ET_a 2006.....	31
Anhang 6:	Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + ET_a 2007.....	31
Anhang 7:	Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + ET_a 2008.....	31
Anhang 8:	Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + ET_a 2009.....	31
Anhang 9:	Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + ET_a 2010.....	32
Anhang 10:	Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + ET_a 2011.....	32
Anhang 11:	Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + ET_a 2012.....	32
Anhang 12:	Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + ET_a 2013.....	32
Anhang 13:	Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und Bodenfeuchte + ET_a 2014.....	33
Anhang 14:	Gesamtwirkungsgrad W_{ges} der Oberflächenabdichtung für den Untersuchungszeitraum 2003 – 2014.	33

I-1 Aufgabenstellung

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

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

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

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

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

Da der UGT Logger der Abflussregistrierung einen separaten Anschluss hat, wurde dieser durch den Ausfall nicht beeinträchtigt. Jedoch wurde das AGW im Jahr 2007 nicht mit der Wartung und Pflege des Lysimetertestfeldes und der Messeinrichtung beauftragt. Somit konnte, nach einer Nachbeauftragung 2008, im Jahr 2007 und zum Teil auch 2008, nur auf qualitativ weniger hochwertige Daten zurückgegriffen werden. Im Sommer 2008 wurde die Lysimeterstation wieder in Stand gesetzt. Die Datenreihen weisen z.T. Effekte aus nicht behobenen Störungen im Messsystem auf und mussten daher unter Anwendung von umfangreichen Korrekturverfahren angepasst werden (Augenstein, 2009).

Beispielsweise sind durch nicht gewartete Ventile die Abflüsse nur zum Teil korrekt aufgezeichnet worden und die folgenden Abflussspitzen sind als zu niedrig registriert worden. Zur Fehlerkorrektur wurde für 2007/2008 daher ein Korrekturmodul entwickelt, um die fehlenden Abflüsse zu ermitteln (Augenstein, 2009). Mit diesem Modul wird abgeschätzt, wie groß die Frequenz des Öffnens und Schließens des Ventils ist und dann die daraus entstehende Differenz des Abflusses summiert. Je nachdem wie man diese wählt, wird mehr oder weniger Abfluss dazu addiert. Dieser wiederum kann als Fehler angesehen und durch das beschriebene Verfahren eliminiert werden. Für die Daten 2008 wurde zusätzlich das Wasserbilanzmodell HELP[®] (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 2014 fand eine messtechnische Betreuung der Lysimeteranlage statt. Die Abflüsse der einzelnen Schichten wurden gesammelt, ausgelesen und ausgewertet. Zusätzlich fand an zwei Stichtagen eine Messung der Bodenfeuchte statt.

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

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

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

I-1.1 Standort Hohberg

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

I-2 Beschreibung des Lysimeters

I-2.1 Messprinzip

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

I-2.2 Lysimeteraufbau

Die Lysimeterfläche beträgt 10 × 10 m (100 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 Drainage (oberer Kiesflächenfilter, OKF)
- 0,075 m Asphaltabdichtung (realisiert wurden zwischen 7,5 und 15 cm)
- 0,2 m mineralische Tragschicht
- 0,2 m Kapillarschicht (KS)
- 0,1 m Kapillarbruchschicht (KBS).

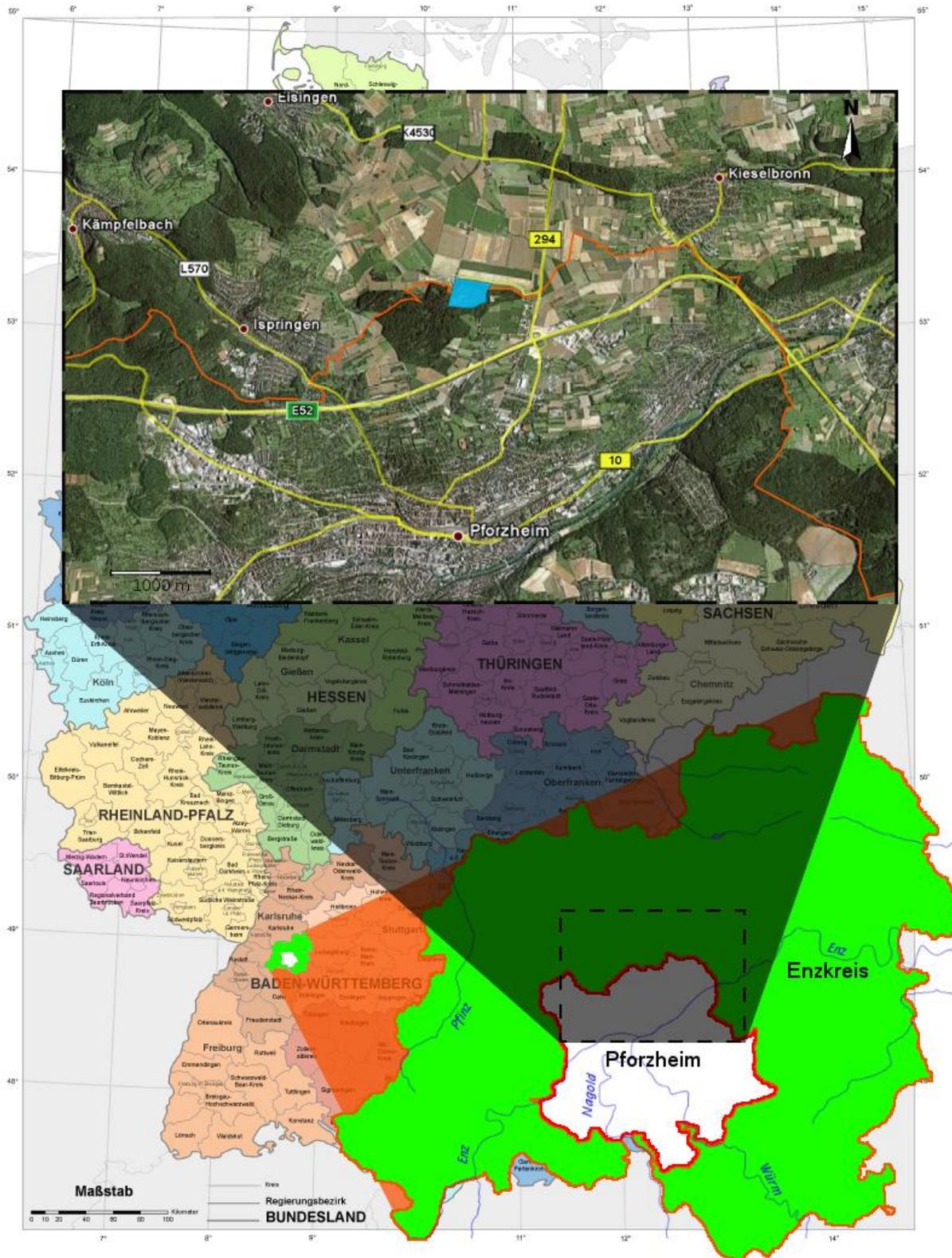


Abb. 1: Geographische Lage der HMD Hohberg (blaue Füllung in der Luftaufnahme). Die Grenze des Enzkreises (grüne Füllung) ist orange dargestellt, die Stadtgrenze von Pforzheim in rot (BKG: Verwaltungsgrenzen Deutschland (verändert), Google Earth: Luftbild Pforzheim Nord) (Augenstein, 2009).

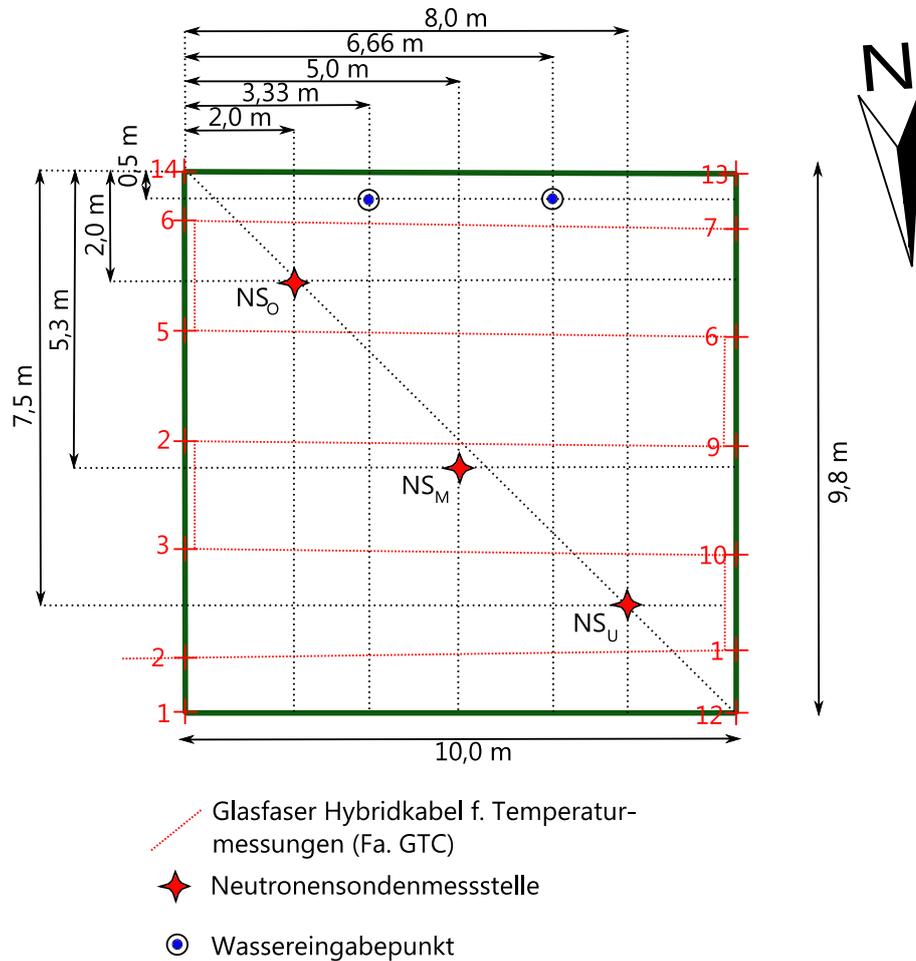


Abb. 2: Skizze des Lysimeters mit Verlegungsplan eines Glasfaserkabels, Neutronensondenmessstellen und Wassereingabepunkte für mögliche Flutungversuche.

I-2.3 Abflussregime

Um die Wirksamkeit der Dichtungskomponenten und des Gesamtsystems bewerten zu können, wurden die Abflüsse nach dem in Kapitel I-2.1 beschriebenen Messprinzip einzeln erfasst und dokumentiert. Zur Bewertung der Langzeitdichtigkeit ist es sinnvoll, das Abflussverhalten mit früheren Untersuchungen zu vergleichen. Aus diesem Grund wird das aktuelle Jahr an die chronologische Abflussreihe der vergangenen Messjahre angefügt.

Die 4 zur Bilanzierung herangezogenen Abflusskomponenten sind (vgl. Abb. 3):

- Oberflächenabfluss - Q_{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°)

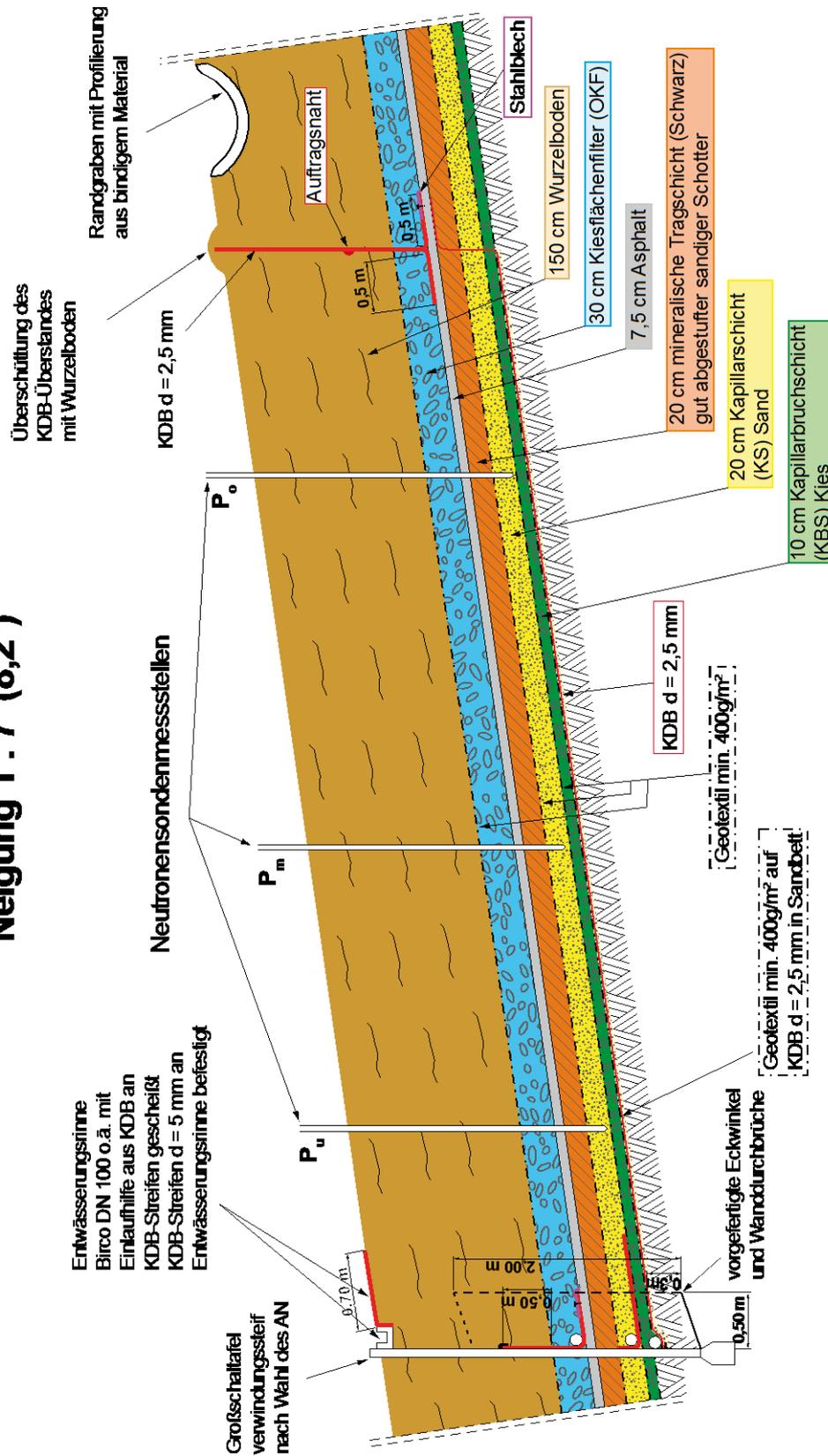


Abb. 3: Schematischer Querschnitt des Lysimeters mit Neutronensondenmessstellen.

I-2.4 Beschreibung der Abflusskomponenten

I-2.4.1 Rekultivierungsschicht

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

I-2.4.2 Dränschicht (OKF)

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

I-2.4.3 Kapillarschicht (KS)

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

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

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

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

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

I-2.4.4 Kapillarbruchschicht (KBS)

Die laterale Abflussmenge der kapillarbrechenden Schicht KBS spiegelt die Gesamtsystemdichtigkeit wider und entspricht der potentiellen Deponiesickerwasserneubildung. Die Analyse der KBS - Abflusswerte 2003 bis 2005 ergab sehr geringe Abflusswerte mit jeweils zunehmenden Tagesabflusshöhen in den Sommer- bis Herbstmonaten. Aufgrund der bautechnisch bedingten Umsetzung des Messcontainers Ende 2005 und der damit verbundenen Verkippung des Messhauses in den Jahren 2006 und 2007 sind fast keine nennenswerten Abflüsse registriert worden, da durch die Versetzung auch der Winkel der Zuflussrohre verstellt wurde. Die entstandene „Mulde“ hat sich (zumindest für den Zufluss der KBS) über einen Zeitraum von ca. 2 Jahren gefüllt und ausgeglichen. Seit dem Sommer 2008 wird wieder Abfluss gemessen, der mengenmäßig im Bereich der Vorjahre (vor Umsetzung des Containers 2005) liegt.

Meteorologische Kenndaten

I-2.5 Erfassung meteorologischer Eingangsdaten

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

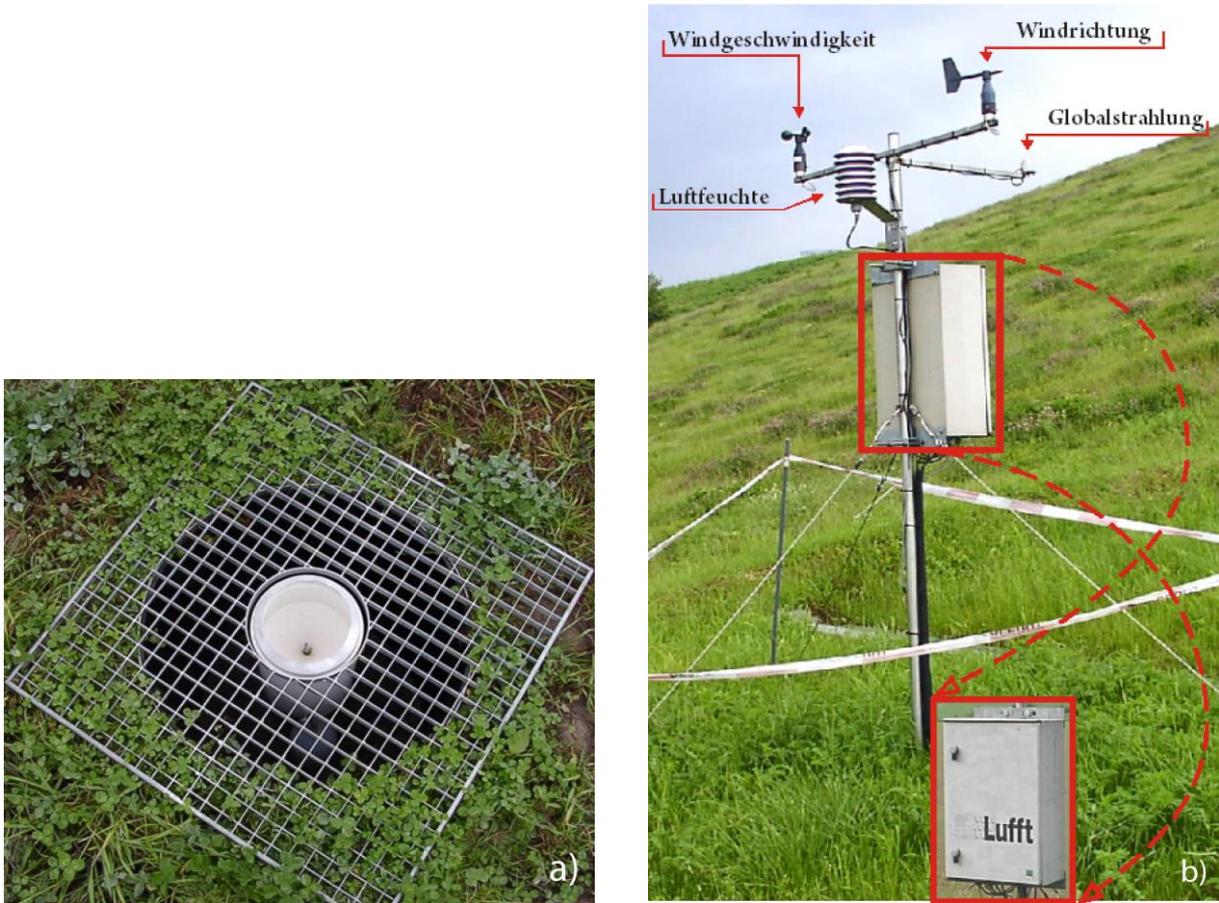


Abb. 4: a) Der Niederschlagsmesser des Lysimeters ist systembedingt direkt am Boden installiert. b) Die weiteren meteorologischen Daten werden mit den Niederschlägen an einen Datenlogger im Messcontainer gesendet und online abgerufen.

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

I-2.6 Niederschlag

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

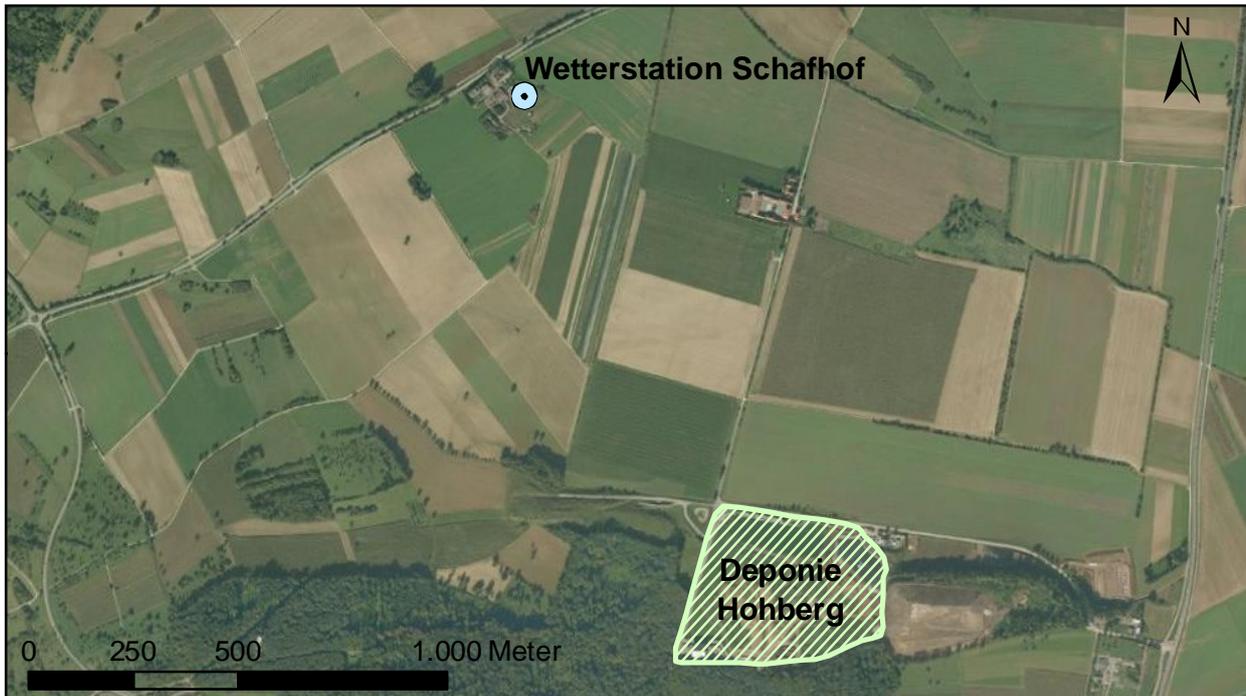


Abb. 5: Lage der DWD Station-Ispringen auf dem Schafhof und Lage der Deponie Hohberg.

I-2.7 Evapotranspiration

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

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

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

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

I-2.8 Neuerungen

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

I-3 Berechnungen

I-3.1 Wirkungsgrad der Asphalttschicht

Für den Wirkungsgrad der Asphalttschicht gilt:

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

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

I-3.2 Wirkungsgrad des Gesamtsystems

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

Da das Abflussverhalten der kapillarbrechenden Schicht (KBS) die Gesamtsystemdichtigkeit eines Systems widerspiegelt (vgl. Kapitel II-1.5) wird diese Komponente üblicherweise zur Berechnung des Wirkungsgrades eines Abdichtungssystems herangezogen.

Damit gilt für einen Gesamtwirkungsgrad W_{ges} :

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

Stadt Pforzheim
Hausmülldeponie Hohberg
- Oberflächenabdichtung -
LYSIMETER - TESTFELD

Messtechnische Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter

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

II Darstellung der Messergebnisse für das Jahr 2014

II-1 Messergebnisse des Jahres 2014

II-1.1 Niederschlag

Abb. 6 zeigt die Niederschlagsverteilung für den Zeitraum 2003 – 2014 (Abb. 6a) und für das aktuelle Jahr 2014 (Abb. 6b). Der meiste Niederschlag wurde mit 138,4 mm im Juli 2014 registriert. Aber auch im August (121,1 mm) und September (95,3 mm) wurden erhöhte Werte gemessen. Der geringste Niederschlag fand, wie im Vorjahr, im März mit knapp 9 mm statt. Der September hat mit insgesamt neun Regentagen eine verhältnismäßig große Niederschlagshöhe. Dies liegt hauptsächlich an zwei Starkregenereignissen am 12.9. und 21.9.14. Mit 761,8 mm war das Jahr 2014 wesentlich trockener als das Vorjahr ($N_{a, 2013} = 901,5 \text{ mm}$) und auf einem ähnlichen Niveau wie 2012 (781 mm). Dementsprechend geringer sind auch die Abflüsse der Oberfläche (Abb. 7).

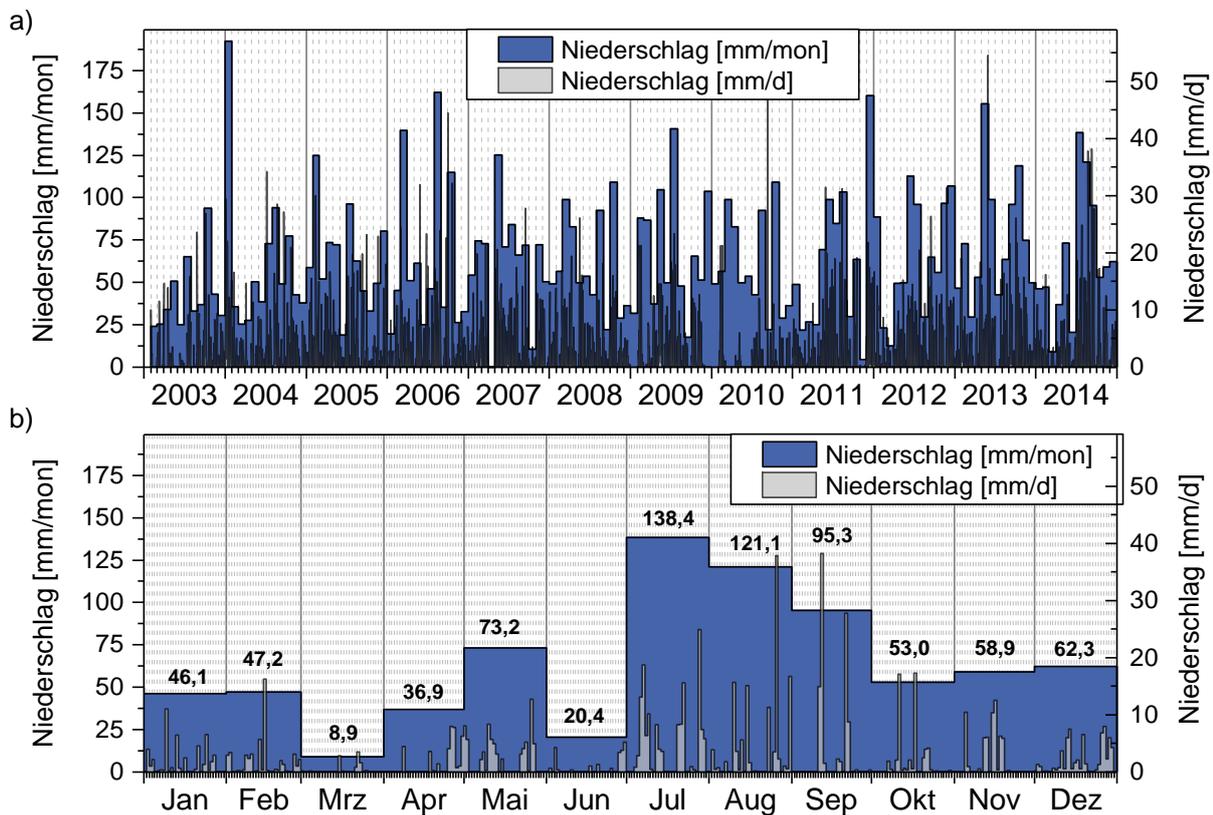


Abb. 6: a) Niederschlagsverteilung des Zeitraums 2003 bis 2014 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Niederschlagsverteilung für das Messjahr 2014 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate).

II-1.2 Oberflächenabfluss (Q_{Surf})

Aufgrund der recht geringen Niederschlagsmengen im Jahr 2014, ist auch der Oberflächenabfluss geringer als in den Vorjahren (24,6 mm/a, Abb. 7). Dieser Wert ist der bis dato niedrigste gemessene Jahresoberflächenabfluss in der gesamten Messperiode. 2003 hat zwar einen ähnlichen Wert (26 mm/a), hier wurde aber erst im Februar begonnen zu messen. Deutlich zu erkennen ist der direkte Zusammenhang zwischen Niederschlag und Oberflächenabfluss, vor allem in den niederschlagsreichen Monaten Juli und August.

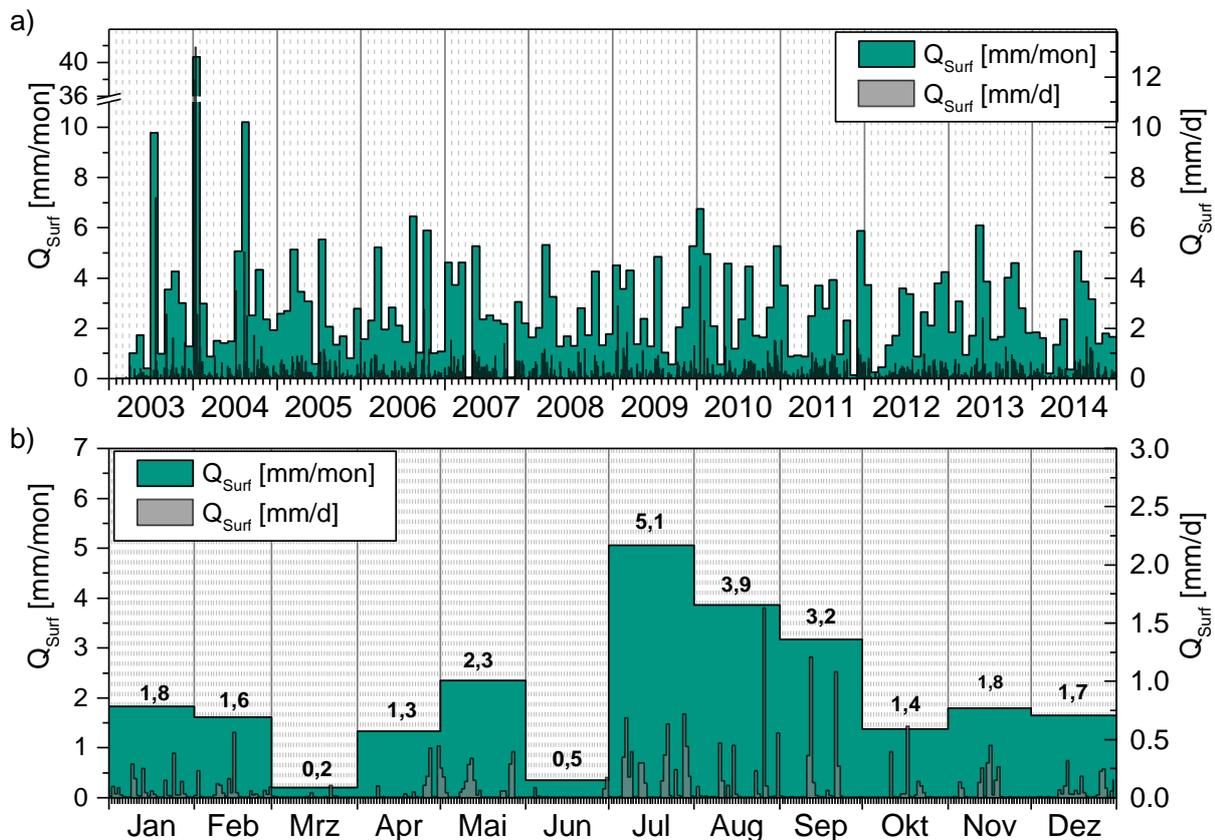


Abb. 7: a) Verteilung des Oberflächenabflusses für den Zeitraum 2003 bis 2014 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Verteilung des Oberflächenabflusses für das Messjahr 2014 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate).

II-1.3 Oberer Kiesflächenfilter (OKF)

Im Jahr 2014 ist ein deutlicher saisonaler Verlauf der Abflüsse zu beobachten (Abb. 8). Die Mengen nehmen mit fortschreitendem Jahr ab. In den Sommermonaten kommen die Abflüsse dann fast zum Erliegen, um zum Spätjahr hin wieder anzusteigen. Mit 173,4 mm liegt der Abfluss deutlich unter dem langjährigen Mittel von 2004-2014 (204 mm). Im September gab es zwei extreme Niederschlagsereignisse, die sich in relativ kurzer Zeit bis in den Kiesfilter durchgepaust haben (vgl. Kapitel II-1.1). Daher auch der erhöhte Abfluss in diesem Monat. Im November gab es augenscheinlich auch einen starken Anstieg der

Abflüsse, der hier zugrunde liegende Niederschlagsinput ist aber nur ein Bruchteil von denen des Septembers.

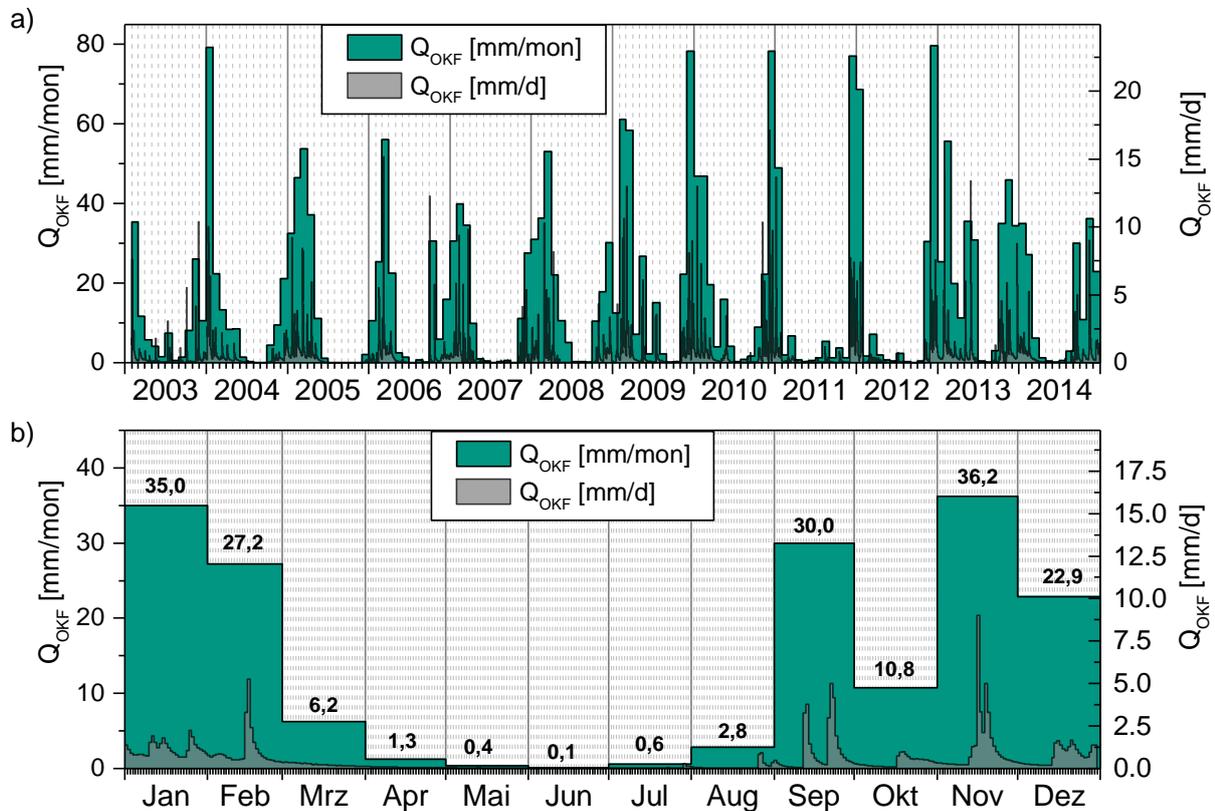


Abb. 8: a) Verteilung des Abflusses der Dränschicht für den Zeitraum 2003 bis 2014 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Verteilung des Abflusses der Dränschicht für das Messjahr 2014 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate).

II-1.4 Kapillarschicht (KS)

2013 sind die Abflüsse der KS leicht zurückgegangen (Abb. 9). Dies liegt vor allem an dem entsprechend geringeren Niederschlag. Auch im Jahr 2014 scheint das Abflussverhalten der KS stark an das Abflussverhalten des OKF gekoppelt zu sein: mehr Abfluss in den Winter- und Spätjahresmonaten und geringer Abfluss über den Frühling und Sommer.

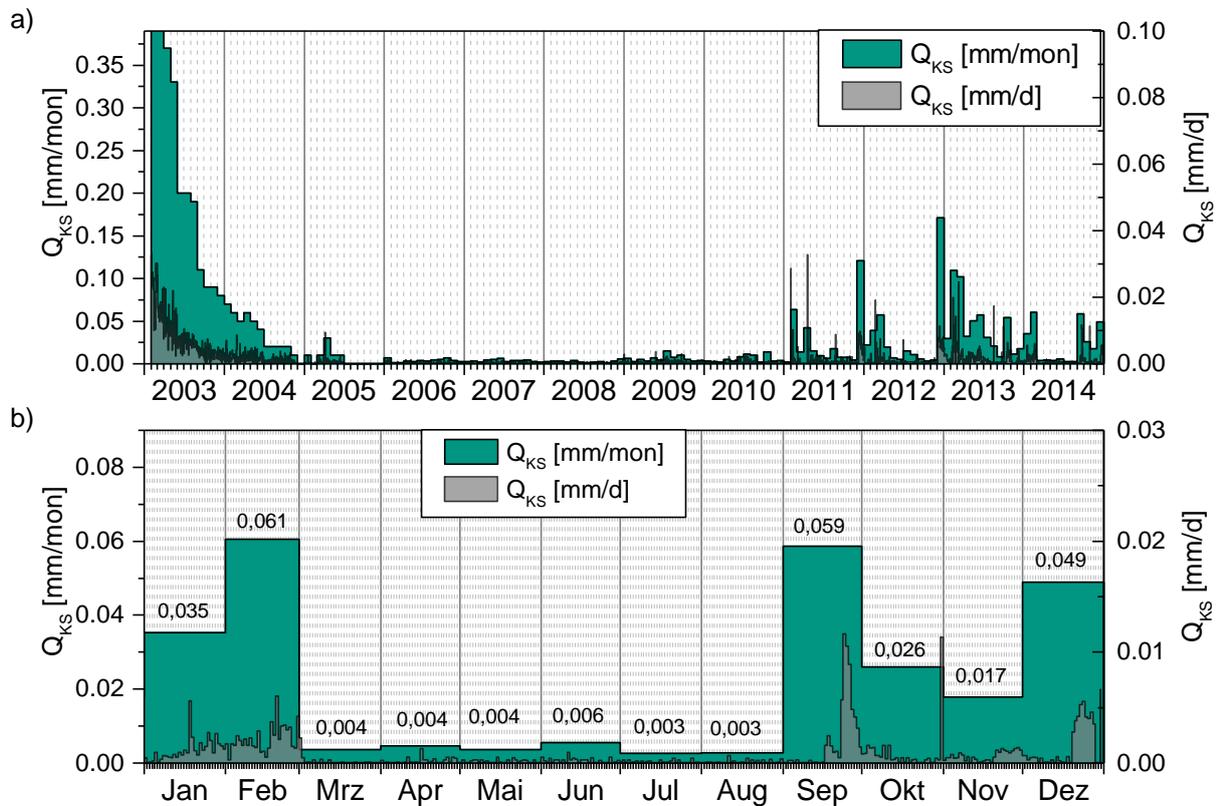


Abb. 9: a) Verteilung des Abflusses der Kapillarschicht für den Zeitraum 2003 bis 2014 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Verteilung des Abflusses der Kapillarschicht für das Messjahr 2014 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate).

II-1.5 Kapillarbrechende Schicht (KBS)

In Abb. 10 sind die monatlichen Abflüsse der KBS aufgetragen. Die Abflussmenge ist im Vergleich zum Vorjahr nahezu gleich geblieben (2013: 0.15 mm, 2014: 0.14 mm). Die Abflüsse sind dieses Jahr nicht so gleich verteilt, wie das im Vorjahr der Fall war. Durch die Konstruktion der Kapillarsperre, sollte durchsickerndes Wasser schichtparallel abgeführt werden. Überschreitet dies jedoch einen Grenzwert (der eine Abhängigkeit zur Hangneigung aufweist), so kommt es zum Versagen; die KBS führt das Wasser ab.

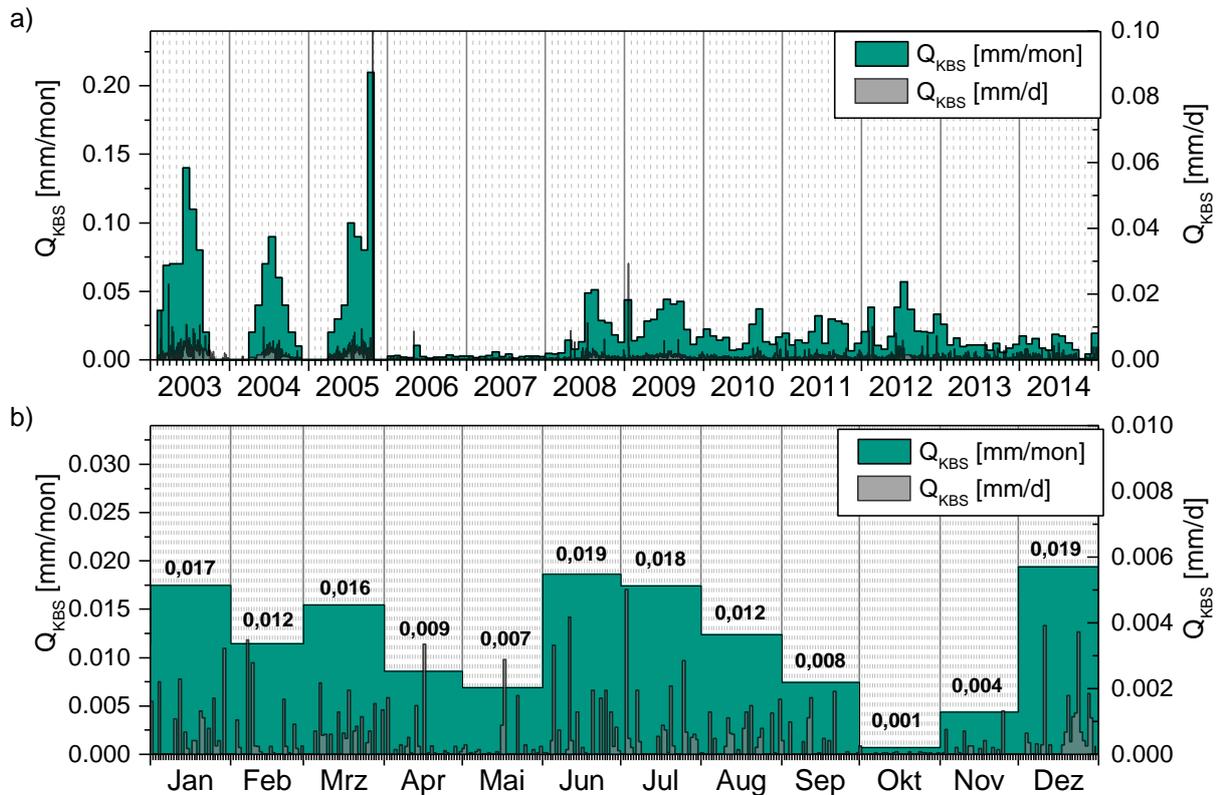


Abb. 10: a) Verteilung des Abflusses der Kapillarbruchschiicht für den Zeitraum 2003 bis 2014 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate). b) Verteilung des Abflusses der Kapillarbruchschiicht für das Messjahr 2014 in mm/Monat (linke Ordinate) und mm/Tag (rechte Ordinate).

II-1.6 Evapotranspiration ET_a

Auch im Jahr 2014 fanden zur Bestimmung der Evapotranspiration nicht genügend Bodenfeuchtemessungen statt. In der Gesamt-Lysimeterbilanz kann ET_a damit nicht berücksichtigt werden und wird stattdessen als gemeinsames Glied von ET_a + Bodenfeuchte als Anteil des Niederschlags angegeben. Die Bodenfeuchtemessungen werden in Kapitel 5 separat dargestellt.

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

II-2 Bewertung der Oberflächenabdichtung für das Jahr 2014

II-2.1 Lysimeter-Wasserhaushaltsbilanz

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 26,04% des Jahresniederschlags 2014, während rund 74% als Evapotranspiration und Bodenfeuchte in die Bilanz eingehen. Die monatlichen %-Anteile der einzelnen Komponenten der Wasserbilanz für den Untersuchungszeitraum 2014 sind detailliert in Tab. 2 aufgelistet.

Tab. 2: Monatliche Abflusswerte der Abdichtungskomponenten in mm/Mon und im prozentualen Verhältnis zum Jahresniederschlag N_a 2014.

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	3,97	34,96	75,81	0,035	0,077	0,017	0,038	46,1
Februar	1,61	3,41	27,21	57,65	0,061	0,128	0,011	0,024	47,2
März	0,20	2,23	6,23	69,68	0,004	0,041	0,015	0,173	8,9
April	1,34	3,62	1,27	3,43	0,005	0,013	0,009	0,023	36,9
Mai	2,34	3,20	0,38	0,52	0,004	0,005	0,007	0,009	73,2
Juni	0,35	1,71	0,10	0,49	0,005	0,027	0,019	0,011	20,4
Juli	5,06	3,65	0,55	0,40	0,003	0,002	0,017	0,028	138,4
August	3,86	3,19	2,84	2,34	0,003	0,002	0,012	0,010	121,1
September	3,17	3,33	30,00	31,48	0,059	0,062	0,007	0,008	95,3
Oktober	1,38	2,60	10,78	20,32	0,026	0,049	0,001	0,001	53,0
November	1,79	3,04	36,24	61,50	0,018	0,030	0,004	0,007	58,9
Dezember	1,65	2,65	22,85	36,68	0,049	0,079	0,019	0,031	62,3
Gesamt- Abfluss	24,58	3,23	173,40	22,76	0,270	0,0354	0,140	0,0184	761,8
ET_a & Bodenfeuchte	563,40 mm								73,96% 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. 11).

Niederschlagsverteilung für das Jahr 2014

Gesamtniederschlag $N = 761,8 \text{ mm}$

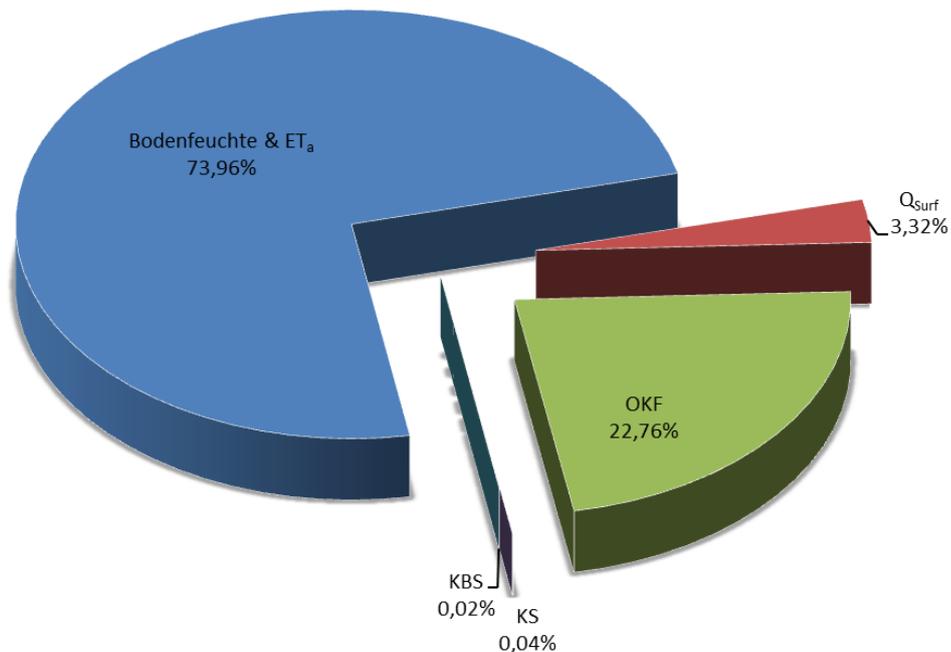


Abb. 11: Lysimeterbilanz 2014 der Schichtabflüsse als prozentualer Anteil am Jahresniederschlag 2014.

II-2.2 Wirkungsgrad im Jahr 2014

II-2.2.1 Asphalttschicht

Der Wirkungsgrad der Asphalttschicht hat sich in den vergangenen Jahren prozentual gesehen nur gering verändert, dennoch sind gewisse Zusammenhänge erkennbar (Abb. 12). 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. Nach einem Minimum 2012 steigt der Wirkungsgrad bis 2014 wieder leicht an.

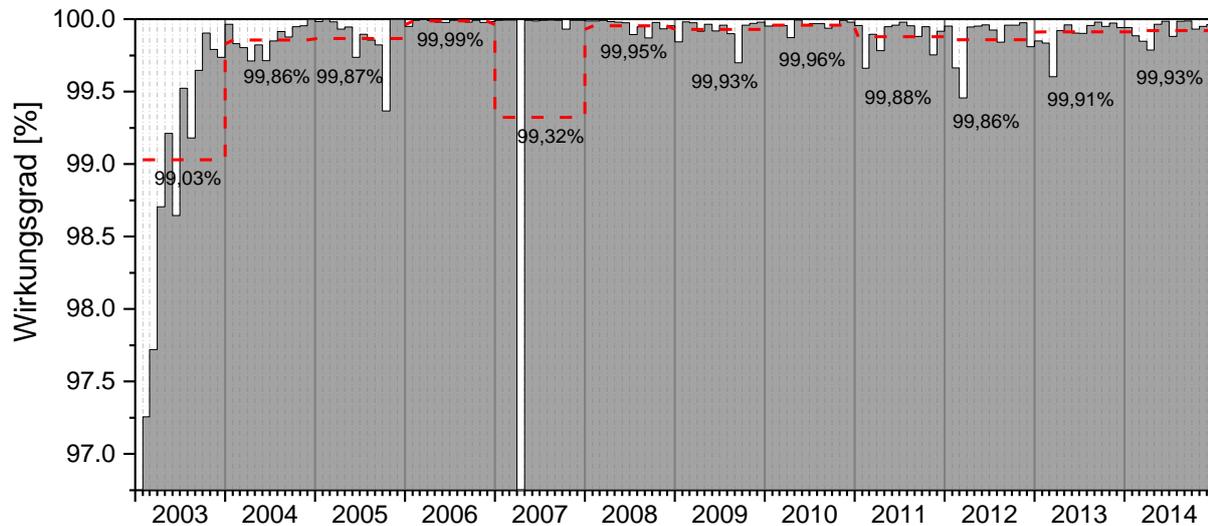


Abb. 12: Grafik über die Wirkungsgrade der Asphaltschicht aus dem Messzeitraum 2003 - 2014. Die rote Kurve stellt die Jahresmittel dar und der graue Bereich die Monatswerte. Der Einbruch des Wirkungsgrades im April 2007 auf 92,7% resultiert aus einer sehr geringen Menge an Niederschlag in diesem Monat (0,1 mm).

II-2.2.2 Gesamtsystem

Der Wirkungsgrad der Kapillarsperre hat sich im Vergleich zum Vorjahr nicht verändert (Abb. 13). Da der Wirkungsgrad komplett auf den Daten der Wetterstation Ispringen beruht, liegt auch hier ein gewisser nicht näher bestimmter 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 Werte seit ca. 2009 (d.h. in den Jahren nach dem Umsetzen des Messhauses 2005) einem einheitlichen Trend. Allerdings sollte, selbst wenn man den Fehler durch den Niederschlag berücksichtigt, der Wirkungsgrad bei immer noch über 99% liegen. Eine tabellarische Darstellung aller berechneten Wirkungsgrade (inklusive 2014) findet sich in Anhang 1.

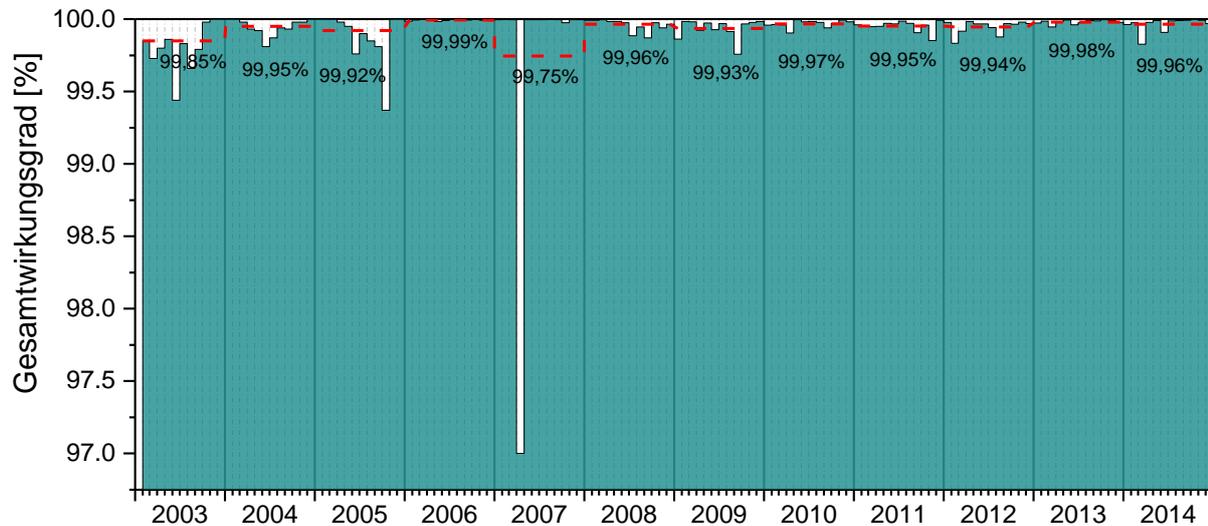


Abb. 13: Grafik über die Wirkungsgrade des Gesamtsystems aus dem Messzeitraum 2003 - 2014. Die rote Kurve stellt die Jahresmittel dar und der grüne Bereich die Monatswerte. Der Einbruch des Wirkungsgrades im April 2007 auf 97,0% resultiert aus einer sehr geringen Menge an Niederschlag in diesem Monat (0,1 mm).

II-3 Neutronensondenmessung zur Bestimmung der Bodenfeuchte im Jahr 2014

Im Jahr 2014 wurden zwei Stichtagsmessungen durchgeführt (Abb. 14). Die grün-gestrichelte Linie bei 30%-Bodenfeuchte erlaubt es, beide Messungen miteinander zu vergleichen. Sie soll verdeutlichen, in welchem Maß die weiter oben liegenden Messstellen höhere Bodenfeuchtenwerte erreichten (speziell im Bereich von 80 bis 130 cm Tiefe). P_u reicht mit beiden Messungen nur knapp an diese Linie heran, obwohl es saisonal bedingt wieder zu einem Anstieg der Bodenfeuchte in diesem Zeitraum gekommen ist. P_m und P_o überschreiten diesen Wert bei der zweiten Stichtagsmessung vom 31.10.2014. Allerdings hat sich in diesem Zeitraum bei diesen Messstellen in den Schichttiefen von 30 bis etwa 80 cm die Bodenfeuchte kaum verändert. In P_u findet eine größere Zunahme statt, allerdings liegt der Startwert der Feuchte auch unterhalb derer von P_o und P_m . Auch bei den Werten aus 2014 lässt sich ein unterschiedliches Speichervermögen in den einzelnen Teilen des Feldes vermuten (vgl. Bericht 2013, Kapitel II-3).

P_o ist aufgrund von Vernässung nicht bis in die letzten Schichttiefen befahrbar.

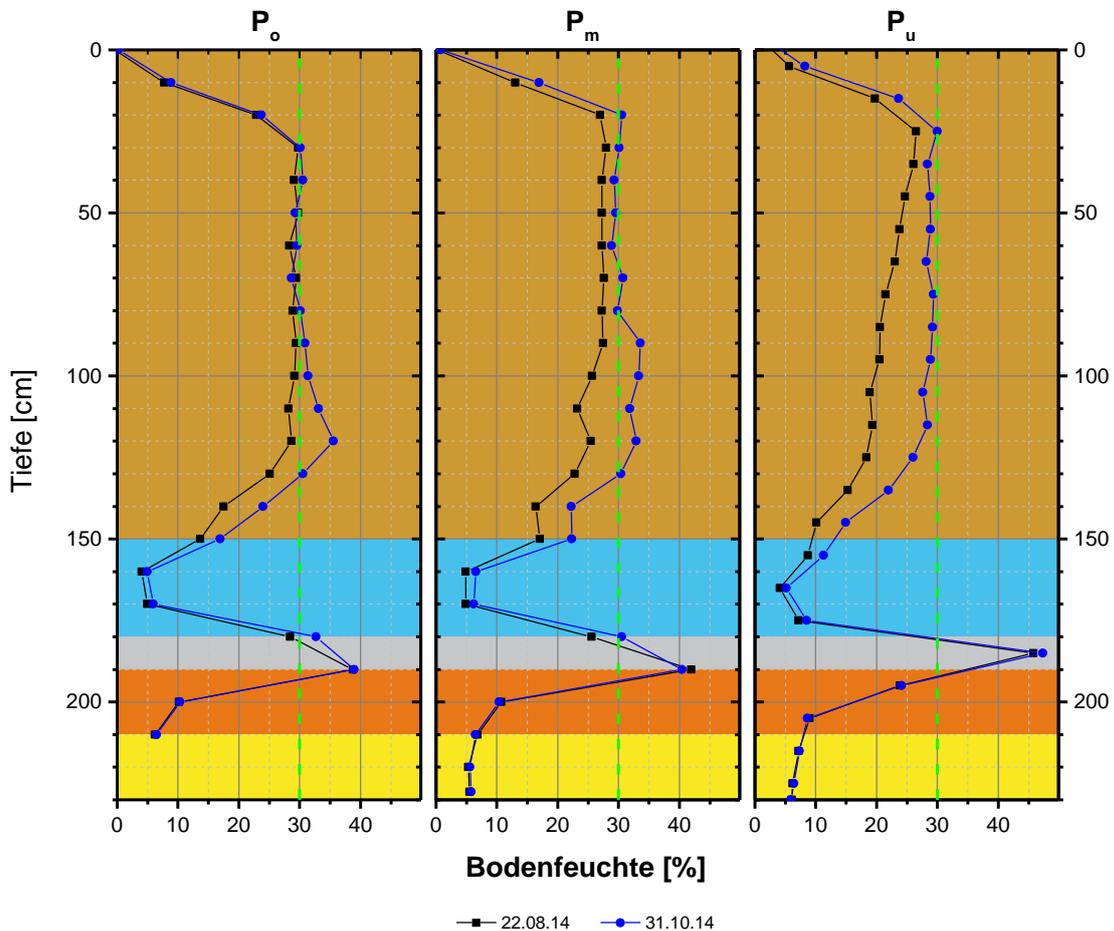


Abb. 14: Darstellung der Bodenfeuchteprofile für die Messstellen P_o (links), P_m (mitte) und P_u (rechts) zu den Zeitpunkten 22.08. (schwarze Linie) und 31.10.2014 (blaue Linie). Die grün gestrichelte Linie bei 30% Bodenfeuchte stellt einen Vergleichswert dar. (Die Farbgebung entspricht der ungefähren Tiefenlage der Schichten, siehe Abbildung 2 bzw. Abbildung 3).

II-4 Zusammenfassung für das Jahr 2014

Im Jahr 2014 erreicht die Kapillarsperre einen Wirkungsgrad von 99,96% und liegt damit leicht unter dem Vorjahreswert. Vergleicht man diesen Wert mit dem Zeitpunkt nach 2008, nachdem die KBS wieder ordentlich abführt, so scheint sich der Wirkungsgrad in diesem Bereich einzupendeln.

Die meteorologische Datenerfassung erfolgt durch die Stadt Pforzheim, welche die Daten für den Bearbeitungszeitraum 2014 zur Verfügung gestellt hat. Dies gilt für die verwendeten Daten der Wetterstation Pforzheim-Ispringen, da die Hohberg-Station auch im Jahr 2014 keine plausiblen Daten geliefert hat. Ein detaillierter Vergleich der Niederschläge im Bericht von 2012 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 (~297 mm), da er als Flächendränge über der Asphalt-dichtungsschicht 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 Asphalt-dichtungsschicht bildet die Kapillarschicht KS, die, bei einer absolut dichten Asphalt-schicht, nach Fertigstellung mit der Zeit immer weniger bis kein Wasser führen sollte.

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 Asphalt-schicht abgeführt wird.

Auffällig im Messjahr 2014 ist das stark korrelierende Abflussverhalten von OKF und KS. Dies lässt die Vermutung zu, dass hier ein direkter hydraulischer Zusammenhang besteht. Dieses Verhalten tritt im Messzeitraum 2014 zum ersten Mal in dieser Form auf. Daher sollte dies in der Zukunft weiter untersucht werden.

Mit einer Deponiesickerwasserneubildungsrate von knapp 0,04% des Niederschlages 2014 liegt diese im Bereich des Vorjahres, das Gesamtsystem ist nach wie vor als 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 Abfluss in der Rekultivierungsschicht statt. Der OKF reagiert insgesamt, wenn auch in gedämpfter und diffuser Form, schneller auf Niederschlagsereignisse als vergleichbare Systeme an steileren Hanglagen. Da die Konvektionssperre den Anspruch hat, zu 100% abzudichten, bleibt noch zu klären, wo die Ursachen für die 0,41 mm liegen, die trotzdem unterhalb der Asphalt-schicht gesammelt wurden. Der in der Vergangenheit postulierte Wassersack in den Rohren konnte durch eine Kamerabefahrung bestätigt, sowie Beschädigungen der Rohre (zumindest für diesen Bereich) ausgeschlossen werden. Im Frühjahr 2015 wird eine bauliche Ertüchtigung der Zulaufrohre zum Lysimetermesshaus durchgeführt (Tieferlegen des Messcontainers). Somit sollten nach Fertigstellung und ordnungsgemäßer Durchführung der Arbeiten, qualitativ hochwertigere Daten gewonnen werden.

Prof. Dr. N. Goldscheider

II-5 Literatur und bisherige Berichte

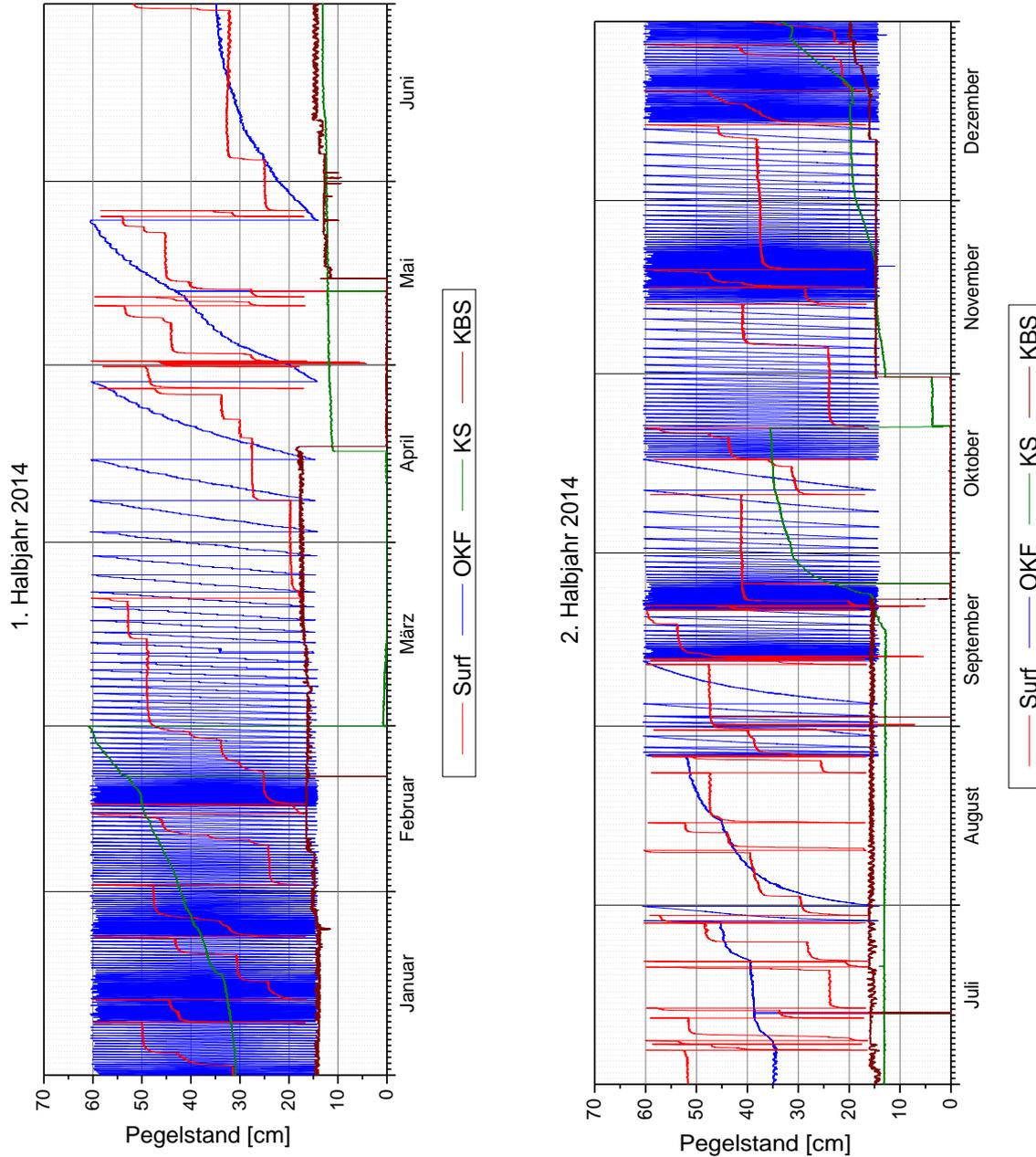
- AUGENSTEIN, M., (2009): Hydrogeologische Untersuchungen zum Wasserhaushalt der Deponie Pforzheim Hohberg mittels Lysimeter und numerischer Modellierung, Diplomarbeit 2009 am Institut für Angewandte Geologie, Universität Karlsruhe.
- BREH W., GIURGEA V. & HÖTZL H. (2002): Langzeitbeobachtung zum Verhalten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

- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2013): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld LYSIMETER – Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für den Messzeitraum Januar – Dezember 2012 [April 2013, unveröffentlichter Bericht, CD]
- INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, ABTEILUNG HYDROGEOLOGIE (2014): Stadt Pforzheim. Hausmülldeponie Pforzheim- Hohberg – Oberflächenabdichtung: Testfeld LYSIMETER – Jahresabschlussbericht zur messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter für den Messzeitraum Januar – Dezember 2013 [März 2014, unveröffentlichter Bericht, CD]
- 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.
- SCHAEFFER & SCHACHTSCHABEL (1992): Lehrbuch der Bodenkunde. - 491 S., 13. durchgesehene Auflage; Enke Verlag, Stuttgart.
- SCHRÖDER, P. & BERGER, K (2004): Das Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Modell – Benutzerhandbuch für die deutsche Version 3. 4., überarbeitete Auflage zur deutschen HELP-Version 3.80 D, 117 S., Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg, Hamburg
- TA SIEDLUNGSABFALL (1993): Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. - Bundesanzeiger: 117 S.; Köln.

II-6 Anhang

Anhang 1: Darstellung der Wasserstände der einzelnen Lysimeterabflüsse über das Messjahr 2014.



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.

2013	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: Gesamtwirkungsgrad W_{ges} der Oberflächenabdichtung für den Untersuchungszeitraum 2003 – 2014.

	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 14:

	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

Fortsetzung Anhang 14:

	Niederschlag [mm]	Gesamtwirkungsgrad W_{ges} [%]
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 14:

	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

Fortsetzung Anhang 14:

	Niederschlag [mm]	Gesamtwirkungsgrad W_{ges} [%]
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 14:

	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
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

Anhang 15: beigelegt als CD

Datenablage

Digitaler Bericht

Auswertung