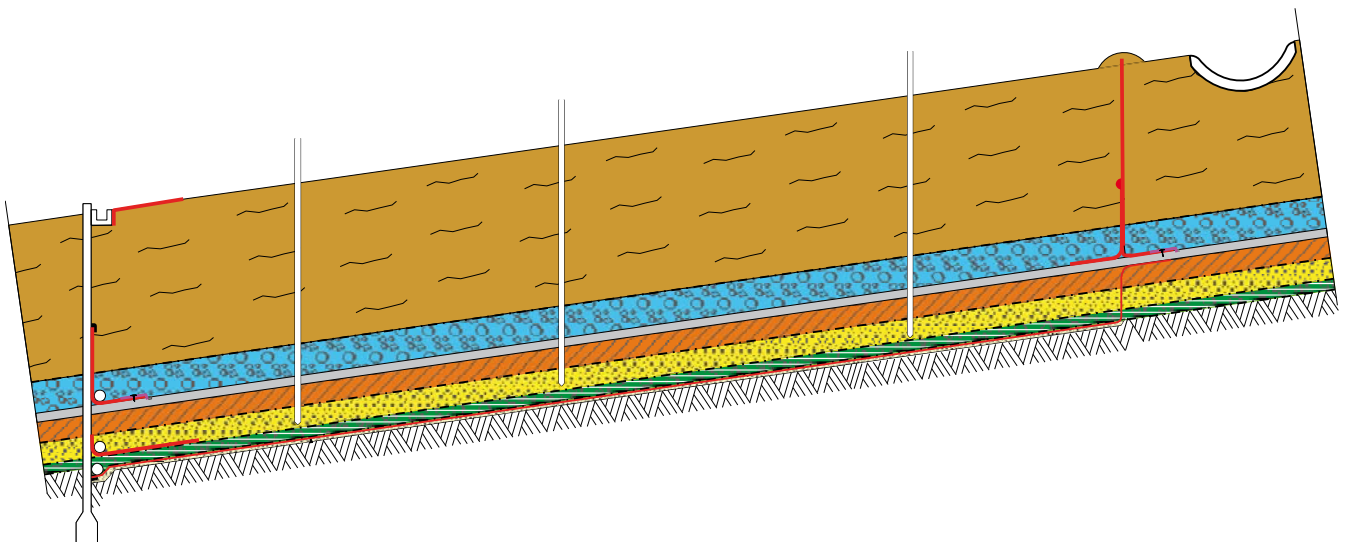


Stadt Pforzheim  
Hausmülldeponie Hohberg  
- Oberflächenabdichtung -  
LYSIMETER - TESTFELD

# Jahresabschlussbericht 2011

ZUR  
messtechnischen Bauwerksüberwachung mittels Lysimeter

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



<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>II</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>II</b>
<b>Anhangverzeichnis</b>	<b>III</b>

## Inhalt

<b>1 Einleitung und Aufgabenstellung</b>	<b>1</b>
<b>2 Beschreibung des Lysimeters</b>	<b>3</b>
2.1. Messprinzip.....	3
2.2. Lysimeteraufbau .....	3
<b>3 Lysimeterabflussverhalten für das Untersuchungsjahr 2011</b>	<b>6</b>
3.1. Messung meteorologischer Eingangsdaten.....	6
3.2. Niederschlag .....	7
3.3. Abflussregime .....	8
3.3.1. Oberflächenabfluss ( $Q_{\text{Surf}}$ ) .....	8
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
<b>4 Bewertung der Oberflächenabdichtung</b>	<b>13</b>
4.1. Lysimeter-Wasserhaushaltsbilanz für das Untersuchungsjahr 2011 .....	13
4.2. $k_f$ -Werte 2011 und Wirkungsgrad $W_{\text{ges}}$ des Gesamtsystems für den Untersuchungszeitraum 2003 – 2011 .....	14
<b>5 Neutronensondenmessung zur Bestimmung der Bodenfeuchte</b>	<b>17</b>
<b>6 Zusammenfassende Schlussfolgerungen</b>	<b>18</b>
<b>7 Literatur und bisherige Berichte</b>	<b>20</b>
<b>8 Anhang</b>	<b>22</b>

## Abbildungsverzeichnis (z.T. gekürzt)

Abb. 1:	Skizze des Lysimeters mit Verlegungsplan .....	4
Abb. 2:	Schematischer Querschnitt des Lysimeters mit Neutronensondenmessstellen.....	5
Abb. 3:	a) Niederschlagsmesser b) Wetterstation.....	6
Abb. 4:	Monatsniederschläge an der DWD-Station Ispringen. ....	7
Abb. 5:	Luftfeuchte und Temperatur an der DWD-Station Ispringen. ....	7
Abb. 6:	Oberflächenabflüsse der Jahre 2010/2011 des $Q_{\text{Surf}}$ und Niederschlag 2011. ....	8
Abb. 7:	Vergleich der Abflussregime des OKF für die Jahre 2010/2011.....	9
Abb. 8:	Korrektur des OKF-Abflusses durch das manuelle Setzen der Peaks und Minima.....	10
Abb. 9:	Abflussregime der Komponente „Kapillarschicht KS“ für die Messjahre 2010/2011.	11
Abb. 10:	Abflussregime der Komponente KBS für die Messjahre 2010 und 2011.....	11
Abb. 11:	Lysimeterbilanz 2011 der Schichtabflüsse als prozentualer Anteil am Jahresniederschlag 2011. ....	14
Abb. 12:	Vergleich der $k_f$ -Werte der Asphaltdichtungsschicht für die Jahre 2010/2011. ....	15
Abb. 13:	Grafik über die Wirkungsgrade aus dem Messungszeitraum 2003 - 2011.....	16
Abb. 14:	Darstellung der volumetrischen Bodenwassergehalte für $P_o$ , $P_m$ und $P_u$ .....	17

## Tabellenverzeichnis (z.T. gekürzt)

Tab. 1:	Monatswerte und Jahressummen (2003 – 2005) für die Evapotranspiration.....	12
Tab. 2:	Abfluss der Abdichtungskomponenten und Verhältnis zum Jahresniederschlag .....	13
Tab. 3:	Monatliche Abflüsse der KS, KBS und Gesamtabfluss (Ges) der KS, deren Jahressummen und die monatlichen $k_{f,As}$ -Werte der Asphaltschicht und der Jahresschnitt.....	14

## Anhänge (z.T. gekürzt)

Anhang 1: Darstellung der Wasserstände der Lysimeterabflüsse über das Messjahr 2011. ....	22
Anhang 2: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und der Bodenfeuchte und ET <sub>a</sub> 2003.....	23
Anhang 3: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und der Bodenfeuchte und ET <sub>a</sub> 2004.....	23
Anhang 4: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und der Bodenfeuchte und ET <sub>a</sub> 2005. ....	23
Anhang 5: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und der Bodenfeuchte + ET <sub>a</sub> 2006.....	23
Anhang 6: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und der Bodenfeuchte + ET <sub>a</sub> 2007.....	24
Anhang 7: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und der Bodenfeuchte + ET <sub>a</sub> 2008.....	24
Anhang 8: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und der Bodenfeuchte + ET <sub>a</sub> 2009.....	24
Anhang 9: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und der Bodenfeuchte + ET <sub>a</sub> 2010.....	24
Anhang 10: Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse und der Bodenfeuchte + ET <sub>a</sub> 2011.....	24
Anhang 11: Gesamtwirkungsgrad W <sub>ges</sub> der Oberflächenabdichtung für den Untersuchungszeitraum 2003 – 2011.....	25

## 1 Einleitung und Aufgabenstellung

Auf dem Hohberg nördlich der Stadt Pforzheim unterhält das Amt für Stadtentsorgung (Technische Dienste) der Stadt Pforzheim im Rahmen der Sicherung und Sanierung der Hausmülldeponie eine zur TA-Si alternative Oberflächenabdichtung. Der Standort der Deponie weist eine Höhendifferenz von 34 m auf (331 – 365 müNN). Die Lage des Eingangsbereichs ist in Gauß-Krüger-Koordinaten: R: <sup>34</sup>78359 H: <sup>54</sup>20780. Die Deponie hat eine Gesamtfläche (rekultivierter und noch aktiver Bereich) von ca. 16,12 ha, wobei 13,6 ha die genehmigte Deponiefläche einnehmen (Stand 2006). Im Süden liegen forstwirtschaftlich genutzte Flächen, sowie das Stadtgebiet Pforzheim. Nördlich befinden sich überwiegend landwirtschaftlich genutzte Bereiche, welche teilweise der Wasserschutzzone IIIB und IIIA (in letzterer liegt auch die Deponie) zugewiesen sind.

Das auf dem Deponiegelände anfallende Oberflächenwasser wird gemeinsam mit den Oberflächenabflüssen aus der benachbarten Erd- und Altdeponie sowie der Zufahrtsstraße, der nördlich gelegenen Fuchslochdoline zugeleitet (Roth & Partner, 2006). Zum Oberflächenwasser gehört das abgeführte Niederschlagswasser der rekultivierten Abschnitte und Straßen, Dachflächenwasser und Sickerwasser aus dem Oberen Kiesflächenfilter (OKF). Das Sickerwasser wird mit verschiedenen Dränagesystemen einem Sickerwasserspeicherbecken zugeführt. Von dort kommt es zur Reinigung in eine Sickerwasserbehandlungsanlage.

Zur Ausführung der Deponie-Oberflächenabdichtung im Bauabschnitt I wurde ein Abdichtungssystem, bestehend aus einer Asphaltabdichtung mit unterliegender Kapillarsperre realisiert. Auf Veranlassung des Regierungspräsidiums Karlsruhe, als zuständige 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.

Ziel der Untersuchungen mittels des Lysimeters ist eine Bauwerksüberwachung des Abdichtungssystems durch eine kontinuierliche und lückenlose Erfassung aller Abflüsse innerhalb der einzelnen Schichten der Abdichtung. Des Weiteren soll es möglich sein, durch Neutronensondenmessungen Bodenfeuchtevariationen zu bestimmen, um eine detaillierte Lysimeter-Wasserhaushaltsbilanz durchführen zu können. Durch jährlich abgeschlossene Messzyklen mit kontinuierlichen Untersuchungen, Auswertung und Jahresberichten sollen über das Langzeitmonitoring Aussagen über die Wirkungsgrade und eine Bewertung des hier eingesetzten, alternativen Oberflächenabdichtungssystems gemacht werden. Insbesondere im Hinblick auf die Asphaltabdichtung und der Langzeitsystemdichtigkeit, bzw. der Langzeitstabilität des alternativen Abdichtungssystems, sollen Erkenntnisse erhalten werden.

Dem Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe (ehem. Prof. Dr. Heinz Hötzl (i.R.), jetzt Karlsruher Institut für Technologie, KIT, Institut für Angewandte Geowissenschaften, AGW – Abteilung Hydrogeologie unter neuer Leitung von Herrn Prof. Dr. Nico 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 sich in unmittelbarer Nähe zum Lysimeter befindliche Klimastation. Der durch einen Blitzeinschlag im Juli 2006 beschädigte UGT-Datenlogger wurde seitens des Auftraggebers durch einen neuen Datenlogger der lokalen Firma LUFFT ersetzt. Die weitere meteorologische Datenerfassung erfolgte nach dem Umbau durch die Stadt Pforzheim. Die meteorologischen Kenndaten für den Bearbeitungszeitraum 2008 - 2011 wurden seitens des Auftraggebers zur Verfügung gestellt.

Durch den separaten Anschluss des UGT-Loggers wurde dieser durch den Ausfall zwar nicht beeinträchtigt. Da das AGW im Jahr 2007 jedoch nicht mit der Wartung und Pflege des Lysimetertestfeldes und der Messeinrichtung beauftragt war und 2008 nachbeauftragte wurde, konnte 2007 und zum Teil auch noch 2008 nur auf qualitativ weniger hochwertige Daten zurückgegriffen werden. Im Sommer 2008 wurde die Lysimeterstation wieder in Stand gesetzt. Nicht behobene Störungen im Messsystem bedurften einer Behandlung der Datenreihen mit umfangreichen Korrekturverfahren (Augenstein, 2009).

Zum Beispiel sind durch nicht gewartete Ventile, die Abflüsse nur zum Teil korrekt erhalten geblieben und die darauffolgenden Abflussspitzen sind als zu niedrig registriert worden. Zur Fehlerkorrektur wurde für 2007/2008 daher ein Korrekturmodul entwickelt, um mit dieser Methode als Fehleranalyse 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, addiert man mehr oder weniger Abfluss hinzu. Diese Abflussdifferenz wiederum kann als Fehler angesehen und eliminiert werden bzw. als Abfluss zu den Datenreihen addiert werden. Für die Daten 2008 wurde zusätzlich das Wasserbilanzmodell HELP<sup>®</sup> (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance; dt.: hydrologische Bewertung des Deponieverhaltens) angewandt. Dabei wurde anhand der korrekten [korrigierten] Abflüsse des OKF das Modell kalibriert und die fehlenden Daten durch Faktorenbestimmung ergänzt.

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 in derart nach hinten, dass die Rohre durchgebogen wurden und das anfallende Sickerwasser nicht mehr direkt in die Behälter abgeführt werden konnte. Erst wenn die entstandene Mulde (bzw. der Siphon) gefüllt und der Neigungswinkel ausgeglichen ist und überläuft, steigt der Wasserstand in den entsprechenden Behältern.

Trotz der Fehlerquellen und notwendigen Korrekturen, konnte eine für die Bewertung der messtechnischen Bauwerksüberwachung und des Dichtungssystems mit einer Lysimeter-Abflussbilanzierung im Messjahr 2008 eine gute Auswertung durchgeführt werden.

Im anschließenden Messzeitraum 2009 konnte bezüglich des Abflusses der Kapillarbrechenden Schicht wieder ein „normales“ Abflussverhalten verzeichnet werden. Erwartungsgemäß nahm der Abfluss im ersten Halbjahr verglichen mit dem des Vorjahres zu (da bereits ab Sommer 2008 normale Abflüsse beobachtet werden konnten). Die zweiten Jahreshälften 2008 und 2009 weisen dahingegen keine großen Abweichungen mehr auf, was darauf hindeutet, dass sich das Abflussverhalten in diesem Schema einpendeln wird.

Trotz verspäteter Beauftragung und der daraus resultierenden geringeren Betreuungs- und Instandhaltungsintensität, konnten auch im Jahr 2011 verhältnismäßig gute Daten gesammelt werden. Aufgrund einer technischen Störung zeichnete der Datenlogger des Lysimeters Anfang Dezember 2011 bis einschließlich Ende Januar 2012 nur noch im 15-Minuten-Takt Werte auf. Dadurch wurden, vor allem für den Behälter des OKF, die maximalen und minimalen Pegelstände nicht erfasst. Dies wurde bei der Auswertung mittels eines Peak- und Minimausgleichs berücksichtigt.

## 2 Beschreibung des Lysimeters

### 2.1. Messprinzip

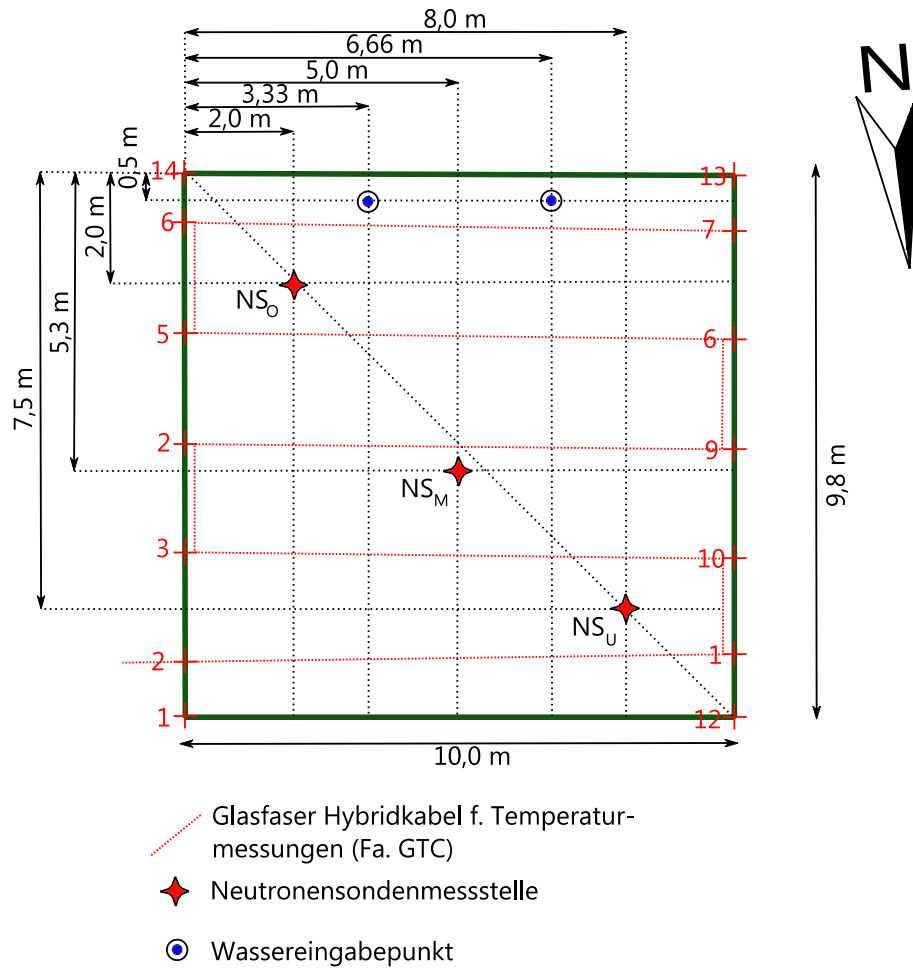
Das Großlysimeter befindet sich im nordwestlichen Bereich des Bauabschnitts I der Deponieoberflächenabdichtung. Das Lysimeter-Testfeld besitzt vier Abflusskomponenten, die jeweils getrennt gefasst, abgeleitet und in einem zentralen Messcontainer, Größe ca.  $2,4 \times 4$  m, kontinuierlich registriert werden. Für die detaillierte Bestimmung der einzelnen Schichtabflüsse wurde vom Lehrstuhl für Angewandte Geologie Karlsruhe ein Messsystem entwickelt, das die Firma UGT (Umweltgerätetechnik), Müncheberg, realisierte. Jede Abflusskomponente wird hierbei in einen eigenen Messzylinder geleitet und die Wasserstände werden durch Ultraschallsensoren kontinuierlich (15-minütig) sowie ereignisgesteuert (Wasserstandsänderungen 2 cm) gemessen. Die Aufzeichnung wird auf einem zentralen Datenlogger in digitaler Form inklusive Datum und Uhrzeit aufgezeichnet. Bei einer maximalen Füllstandshöhe werden die an der Basis der Messzylinder befindlichen 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 auf selbigen 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  $10 \times 10$  m ( $100 \text{ m}^2$ ) und besitzt eine Neigung von 1:6,9 ( $8,23^\circ$ ) (Abb. 1). Nach Berücksichtigung der Hangneigung beträgt die auf der Horizontalen projizierte Lysimeterfläche  $97 \text{ m}^2$ . 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 der Abbildung 2 ist der Aufbau der Oberflächenabdichtung schematisch dargestellt. Er besteht, von oben nach unten, aus den Lagen:

- 1,5 m Rekultivierungsschicht (Wurzelboden)
- 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 kapillARBrechende Schicht (KBS).



**Abb. 1:** Skizze des Lysimeters mit Verlegungsplan eines Glasfaserkabels, Neutronensondenmessstellen und Wassereingabepunkte für mögliche Flutungsversuche.



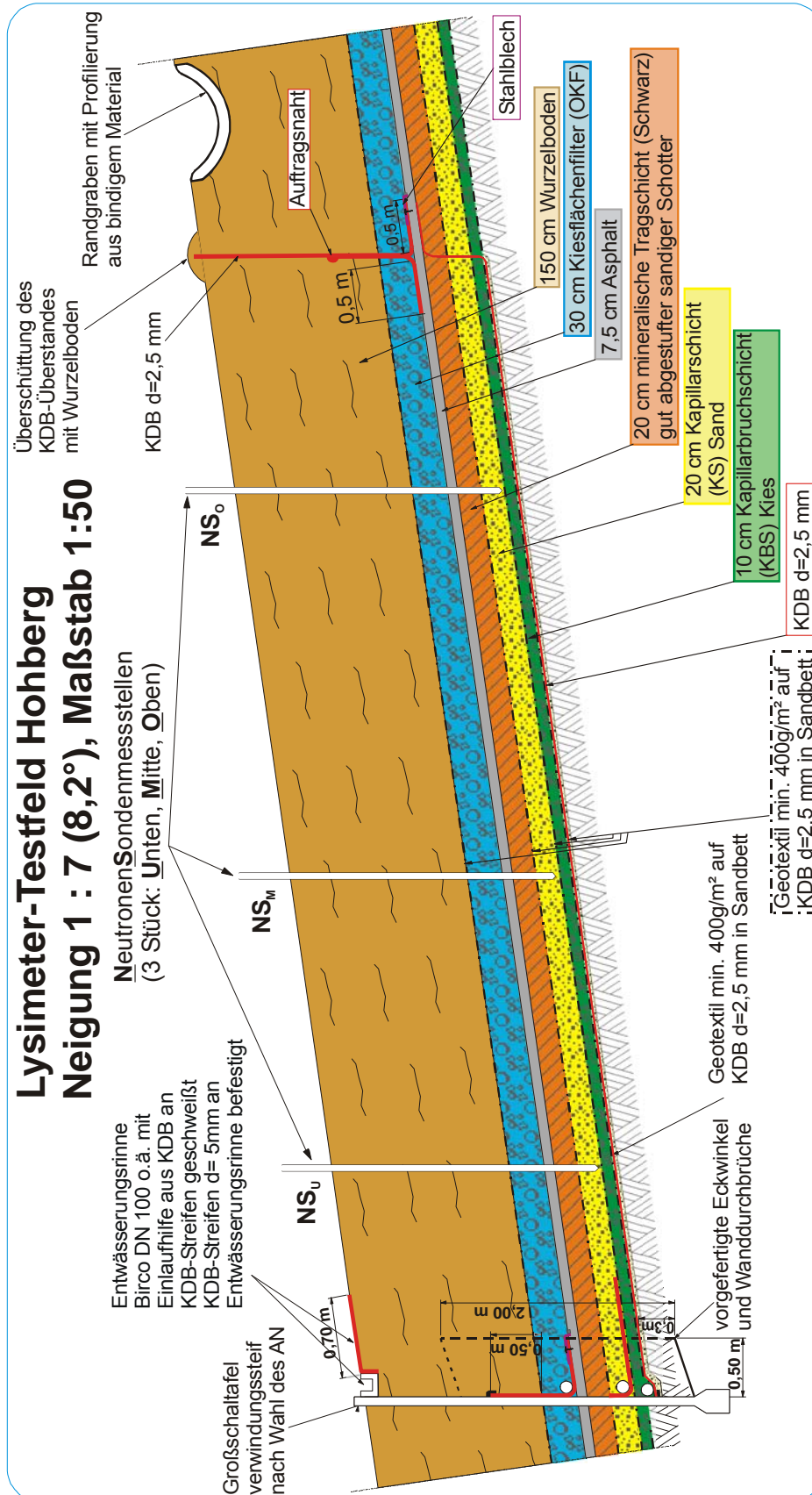


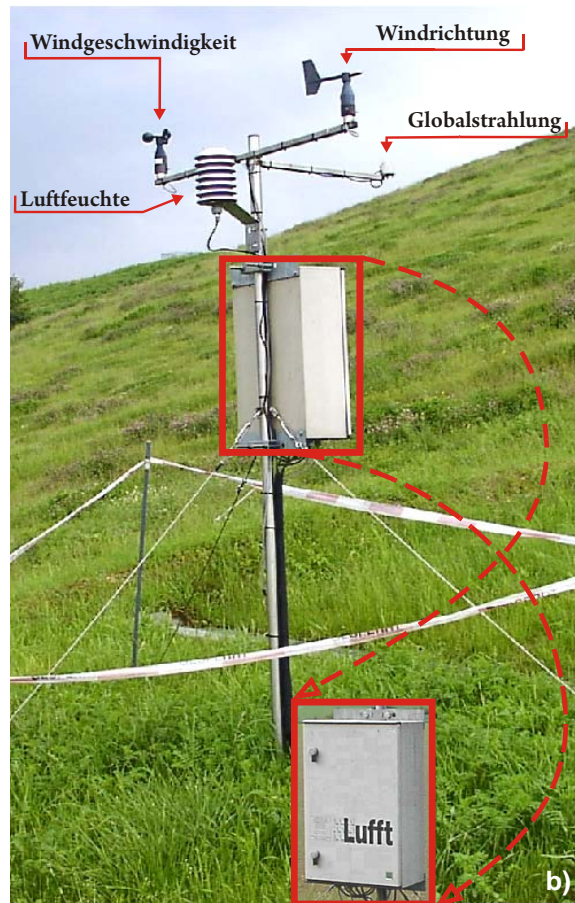
Abb. 2: Schematischer Querschnitt des Lysimeters mit Neutronensondenmessstellen.

## 3 Lysimeterabflussverhalten für das Untersuchungsjahr 2011

### 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. 3 a, b). Die folgenden kontinuierlich gemessenen Daten werden alle 15 Minuten im Datenlogger gespeichert und von der Stadt Pforzheim online abgerufen:

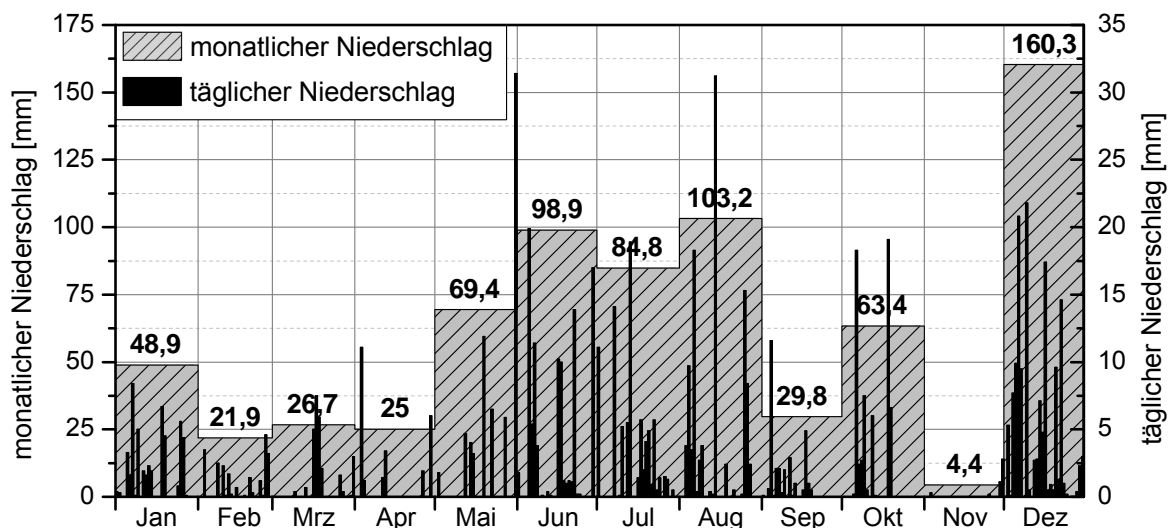
- Niederschlag
- Luftfeuchte
- Temperatur
- Globalstrahlung
- Windgeschwindigkeit
- Windrichtung



**Abb. 3:** a) Der Niederschlagsmesser des Lysimeters ist systembedingt direkt am Boden installiert. Die meteorologischen Daten b) werden mit den Niederschlägen an einen Datenlogger im Messcontainer gesendet und online abgerufen.

### 3.2. Niederschlag

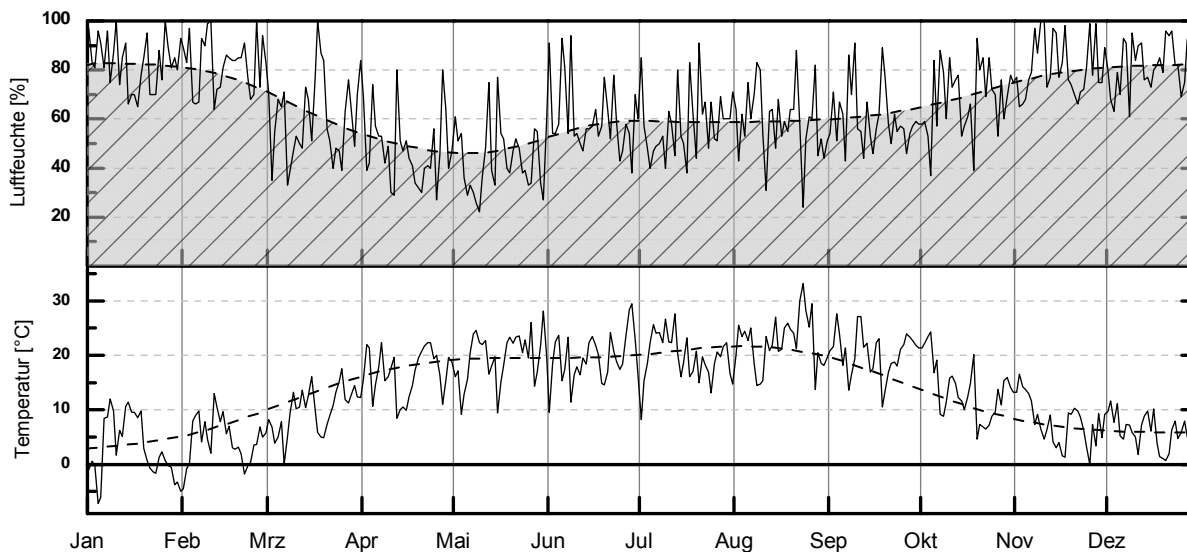
Für das Jahr 2011 wurde von der Wetterstation Hohberg nach Betreiberaussage nur unzureichende Daten gesammelt. Daher wurden von der Stadt Pforzheim die Wetterdaten der in einem Kilometer Entfernung befindlichen DWD-Station Ispringen zur Verfügung gestellt. Abbildung 4 zeigt die tägliche Niederschlagsmenge und die monatlichen Gesamtsummen dieser Station.



**Abb. 4:** Monatsniederschläge an der DWD-Station Ispringen. Die Jahresniederschlagssumme 2011 beläuft sich auf  $N_a = 736,7$  mm.

Die Summe der Niederschläge verläuft mehr oder weniger kurvenförmig mit einem Hoch im Sommer. Der Winter stellt mit 160,3 mm einen Ausreißer aus diesem Kurvenverlauf dar und ist gleichzeitig der niederschlagsreichste Monat des Jahres. Monate mit geringerem Niederschlag sind eher im ersten Halbjahr zu finden, wobei der November mit 4,4 mm den niederschlagsärmsten Monat darstellt. Insgesamt ist im Jahr 2011 deutlich weniger Niederschlag gefallen als im Vorjahr ( $N_{a,2010} = 883,4$  mm).

Abbildung 5 zeigt die Kurven der relativen Luftfeuchte und Temperatur gemessen um 12 Uhr MEZ.



**Abb. 5:** Verteilung der täglichen Luftfeuchte und Temperatur (durchgezogene Linien) mit Monatsdurchschnittskurven (gestrichelte Linien) der DWD-Station Ispringen.

### 3.3. Abflussregime

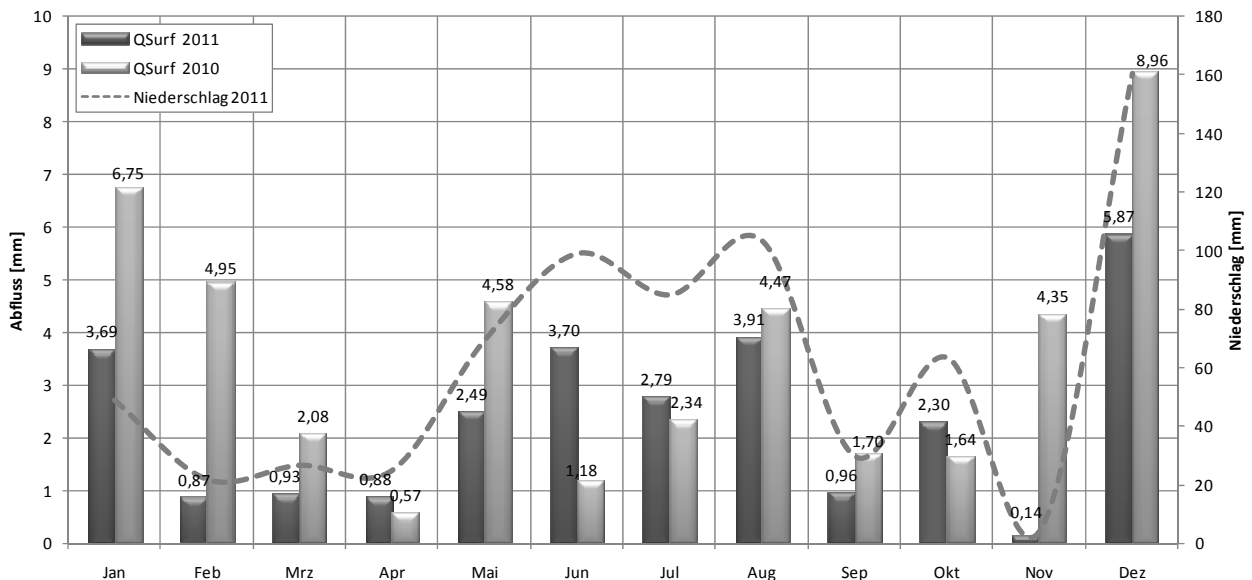
Um die Wirksamkeit der Dichtungskomponenten und des Gesamtsystems bewerten zu können, wurden die Abflüsse nach dem in Kapitel 2.1 beschriebenen Messprinzip einzeln erfasst und dokumentiert. Zur Bewertung der Langzeitdichtigkeit ist es sinnvoll das Abflussverhalten mit früheren Untersuchungen zu vergleichen. Aus diesem Grund werden hier die Einzelabflüsse des Vorjahres 2010 verglichen, bevor die Gesamtwasserbilanz 2011 erstellt wird.

Die 4 zur Bilanzierung herangezogenen Abflusskomponenten sind (vgl. Abb. 2):

- Oberflächenabfluss -  $Q_{\text{Surf}}$
- Abfluss des Oberen Kiesflächenfilters (OKF) -  $Q_{\text{OKF}}$
- Kapillarschichtabfluss (KS) -  $Q_{\text{KS}}$
- Abfluss aus der Kapillarbrechenden Schicht (KBS) -  $Q_{\text{KBS}}$

#### 3.3.1. Oberflächenabfluss ( $Q_{\text{Surf}}$ )

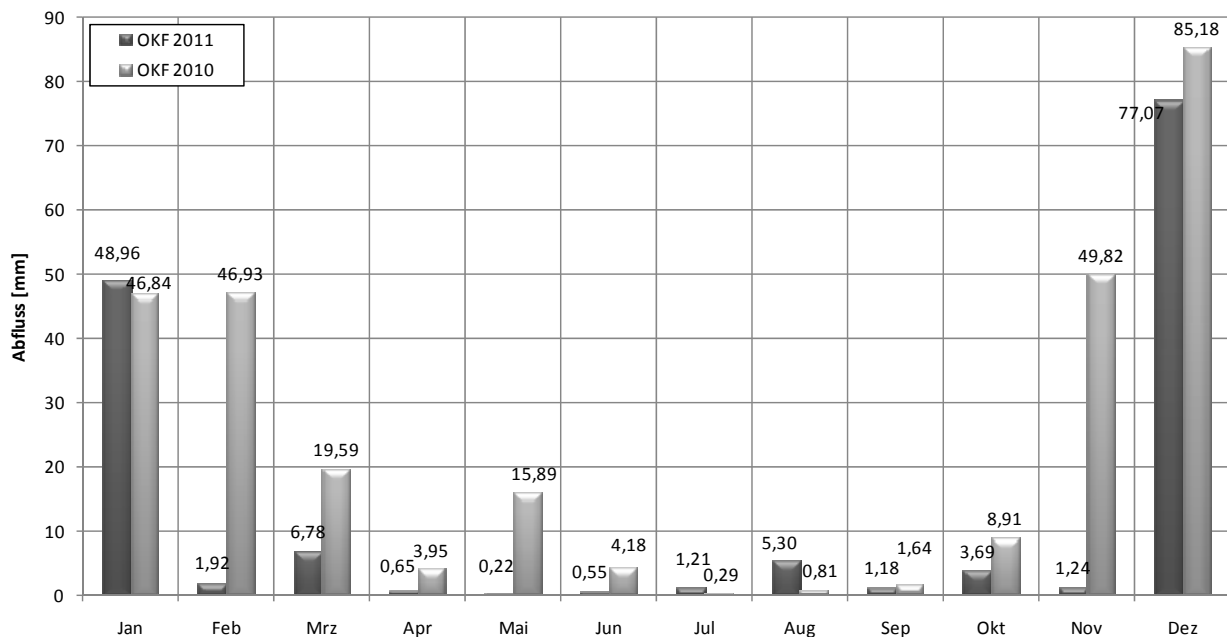
Der Oberflächenabfluss (Abb. 6) verzeichnet 2011 mit gut 28,5 mm/a eine Abnahme der Gesamtmenge im Vergleich zu 2010 (43,6 mm/a). Deutlich zu erkennen ist der direkte Zusammenhang zwischen Niederschlag und Oberflächenabfluss. Dies lässt sich vor allem gut an den Monaten November und Dezember erkennen. Nach einem sehr trockenen November mit gerade mal 4,4 mm Abfluss steigt der Abfluss niederschlagsbedingt im Dezember wieder stark an.



**Abb. 6:** Vergleich der Oberflächenabflüsse der Jahre 2010/2011 und Niederschlag 2011. Die Niederschlagsverteilung korreliert sehr gut mit dem Abflussverhalten des  $Q_{\text{Surf}}$ .

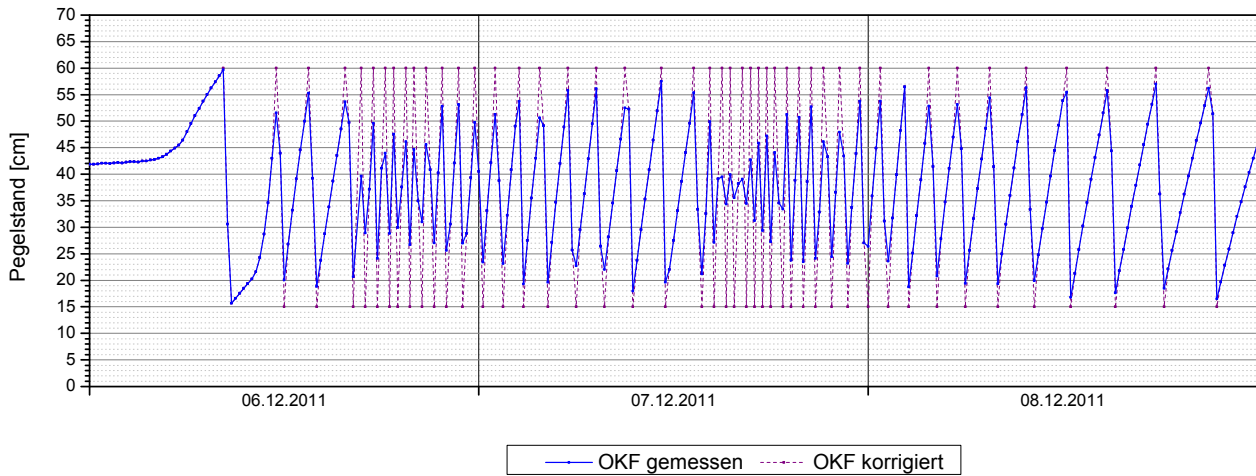
### 3.3.2. Oberer Kiesflächenfilter (OKF)

Der obere Kiesflächenfilter hat die Aufgabe als Flächendränage über der Asphaltabdichtungsschicht zu wirken. Damit sollte dieser systembedingt in der Regel die größten Mengen Sickerwasser abführen. Die Messwerte der Untersuchungsmonate von Februar 2003 bis Dezember 2011 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 2011 zeigt dieses erwartete Verhalten, liegt mit rund 149 mm Jahresabfluss deutlich unter dem Abflusswert von 2010 (284 mm) (Abb. 7). Dies liegt unter anderem an der Niederschlagsverteilung. Ein Großteil davon wurde in den Sommermonaten registriert, in denen die Verdunstungsrate höher ist. Anfang des Jahres kann, wie im Vorjahr auch, das Einsetzen des Tauvorgangs im Boden, und damit vermehrt mobilisiertes Restwasser beobachtet werden. Über die warmen Sommermonate ist der Abfluss dann rückläufig und kommt teilweise fast völlig zum Erliegen (April bis Juli, September, November). Am Jahresende und mit sinkenden Temperaturen nimmt der Abfluss dann wieder zu. Da somit die Verdunstungsrate im Spätjahr geringer ist, fällt auch der Abfluss, in Korrelation mit dem Niederschlag, im Dezember dementsprechend hoch aus. Am meisten wird, wie im Vorjahr, im Dezember mit gut 77 mm (2010: 85 mm) abgeführt. Am wenigsten wird im April (0,65 mm), Mai (0,22 mm) und Juni (0,55 mm) gemessen.



**Abb. 7:** Vergleich der Abflussregime des OKF für die Jahre 2010/2011.

Im Dezember gab es eine technisch bedingte Messstörung. Es wurden nur noch 15minütige Messungen durchgeführt. Damit wurden die meisten Spitzen der Pegelstände nicht erfasst (Schließen-Öffnen; siehe Anhang 1), daher wurde ein Korrekturverfahren angewandt: die Spitzen und die Minima der Befüllung wurden nach dem Ausloten der reellen Peaks manuell hinzugefügt. Abbildung 8 zeigt beispielhaft eine Korrektur des Abflusses im Zeitraum vom 6.12. – 8.12.2011. Aus den gemessenen Werten ließ sich zumindest ein Trend erkennen, ob der Pegel gerade sinkt, oder steigt. Da bekannt ist, bei welchem Pegelstand die Ventile geöffnet werden (60 cm) und wann sie wieder schließen (15 cm), lässt sich dieses Verfahren nahezu verlustfrei anwenden. Auf diese Weise wurde auch beim Oberflächenabfluss vereinzelt zurückgegriffen. Jedoch waren hier weit weniger Korrekturen nötig, da nicht so viele Entleerungen registriert wurden.



**Abb. 8:** Korrektur des OKF-Abflusses durch das manuelle Setzen der Peaks und Minima.

### 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 könnte und die Schichten unterhalb des Asphalts in einer wasserdichten Kunststoffdichtungsbahn (KDB) - Wanne eingebaut wurden, dürfte nach dem Versiegen auch zu einem späteren Zeitpunkt kein Wasser aus der KS abfließen ( $Q_{KS} = 0$ ).

Die im Laufe der 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. 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) kann

es sich sehr wahrscheinlich nicht um große Undichtigkeiten oder Randumläufigkeiten handeln. Vielmehr scheint Kondenswasserbildung den geringen Abfluss zu produzieren.

Im Jahr 2011 gab es überwiegend geringe Abflusswerte. Allerdings lässt sich ein deutlicher Mehrabfluss im Vergleich zum Vorjahr erkennen. Er ist mit 0,3 mm ca. 5 Mal höher als 2010 (0,06 mm). Dies liegt unter anderem an den Monaten Februar, April und vor allem Dezember (Abb. 9). In den ersten Monaten handelt es sich mehr um sprunghafte Anstiege des Wasserstands, also um eher punktuelle Einzelereignisse. Allerdings beginnt im Dezember der Wasserspiegel kontinuierlich zu steigen (vgl. Anhang 1).

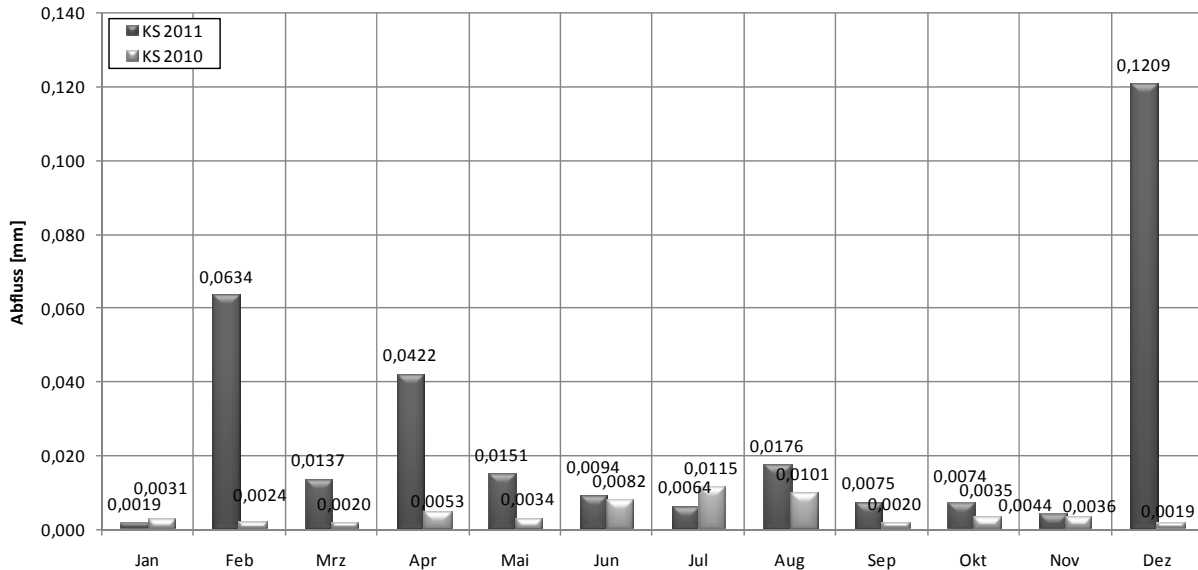


Abb. 9: Monatliches Abflussregime der Komponente „Kapillarschicht KS“ für die Messjahre 2010/2011.

### 3.3.4. Kapillarbrechende Schicht (KBS)

In Abbildung 10 sind die monatlichen Abflüsse der KBS von 2010 und 2011 verglichen. Das Abflussverhalten 2011 gleicht im Großen und Ganzen dem von 2010.

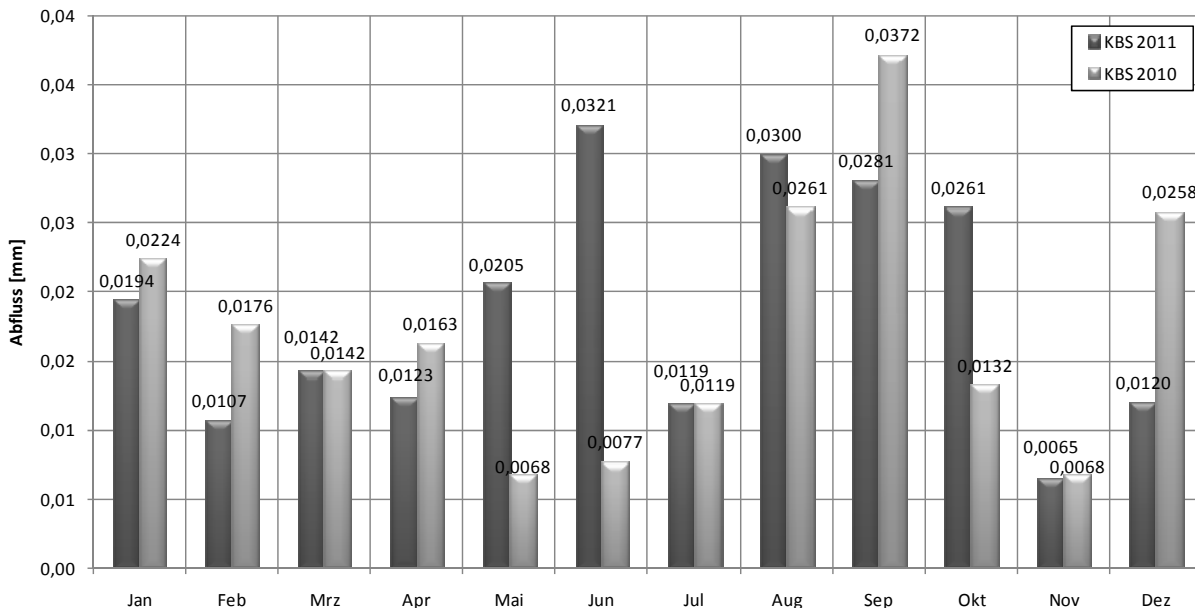


Abb. 10: Monatliches Abflussregime der Komponente KBS für die Messjahre 2010 und 2011.

### 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 der Berücksichtigung der im Boden zurückbleibenden Bilanzierungsgröße „Bodenfeuchteregeime“ berechnet werden. Das Bodenfeuchteregeime wurde für den Auftraggeber nur für die Beobachtungsjahre 2003 bis 2005 durch Neutronensondenmessungen bestimmt, jedoch für die Jahre 2006 - 2010 nicht in Auftrag gegeben. Im Jahr 2011 wurden zwar Bodenfeuchtemessungen durchgeführt, aber nur im monatlichen Zyklus und auch nicht von Beginn des Jahres an, wegen der verspäteten Beauftragung. Damit kann eine detaillierte Angabe der Evapotranspiration auch für 2011 nicht 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.

In der folgenden Tabelle 1 sind daher nur die Werte für den Untersuchungszeitraum Februar 2003 – Dezember 2005 aufgelistet, die aus dem Jahresbericht 2005 entnommen wurden. Die Evapotranspiration liegt für das Beobachtungsjahr 2011, zusammen mit der enthaltenen Bodenfeuchte, mit einem Anteil von 75,9 % am Jahresniederschlag um gut 7 Prozentpunkte über dem Vorjahr (62,9 %).

**Tab. 1:** Ermittelte Monatswerte in mm pro Monat und Jahressummen (2003 – 2005) in mm für die Evapotranspiration.

Jahr	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Summe
2003	-	5,1	12,9	33,4	63,6	66,6	91,5	54,1	17,5	20,4	1,9	2,6	369,5
2004	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
2005	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
2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	555,16



## 4 Bewertung der Oberflächenabdichtung

### 4.1. Lysimeter-Wasserhaushaltsbilanz für das Untersuchungsjahr 2011

Unter der Berücksichtigung aller gemessenen Bilanzkomponenten,  $Q_{\text{Surf}}$ ,  $Q_{\text{OKF}}$ ,  $Q_{\text{KS}}$ ,  $Q_{\text{KBS}}$  und  $ET_a + \text{Bodenfeuchte}$  im direkten Vergleich mit dem Niederschlag  $N$  ergibt sich eine Lysimeter-Wasserhaushaltsbilanz für die einzelnen Kompartimente des Lysimeters, die damit eine Bewertung des Oberflächenabdichtungssystems zulassen. Der gemessene Gesamtabfluss am Lysimeter beträgt 24,14 % des Jahresniederschlags 2011 während rund 76 % als Evapotranspiration und Bodenfeuchte in die Bilanz eingehen. Die monatlichen %-Anteile der einzelnen Komponenten der Wasserbilanz für den Untersuchungszeitraum 2011 sind detailliert in Tabelle 2 aufgelistet.

**Tab. 2:** Monatliche Abflusswerte der Abdichtungskomponenten in mm/Mon und im prozentualen Verhältnis zum Jahresniederschlag  $N_a$  2011.

Monat	$Q_{\text{Surf}}$ [mm]	% von N	OKF [mm]	% von N	KS [mm]	% von N	KBS [mm]	% von N	Niederschlag [mm]
Januar	3,69	7,54	48,96	100,11	0,002	0,004	0,019	0,040	48,9
Februar	0,87	3,96	1,92	8,76	0,063	0,290	0,011	0,049	21,9
März	0,93	3,47	6,78	25,41	0,014	0,051	0,014	0,053	26,7
April	0,88	3,54	0,65	2,61	0,042	0,169	0,012	0,049	25,0
Mai	2,49	3,59	0,22	0,32	0,015	0,022	0,021	0,030	69,4
Juni	3,70	3,74	0,55	0,56	0,009	0,010	0,032	0,032	98,9
Juli	2,79	3,29	1,21	1,43	0,006	0,008	0,012	0,028	84,8
August	3,91	3,79	5,30	5,14	0,018	0,017	0,030	0,029	103,2
September	0,96	3,24	1,18	3,96	0,008	0,025	0,028	0,094	29,8
Oktober	2,30	3,63	3,69	5,82	0,007	0,012	0,026	0,041	63,4
November	0,14	3,28	1,24	28,28	0,004	0,099	0,007	0,148	4,4
Dezember	5,87	3,66	77,07	48,08	0,121	0,075	0,012	0,008	160,3
<b>Gesamt- Abfluss</b>	<b>28,53</b>	<b>3,87</b>	<b>148,78</b>	<b>20,20</b>	<b>0,310</b>	<b>0,0421</b>	<b>0,224</b>	<b>0,0304</b>	<b>736,7</b>
<b><math>ET_a</math> &amp; Bodenfeuchte</b>	<b>558,85 mm</b>								<b>75,86 % von <math>N_a</math></b>

Zum Vergleich werden auch die Ergebnisse der Vorjahre herangezogen, deren monatliche Abflüsse und Bodenwasserbilanzen in Anhang 2 - 9 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).

Der Anteil des OKF am Niederschlag im Januar von über 100 % resultiert aus dem gespeicherten Wasser in der Rekultivierungsschicht, welches zwar dem Niederschlag im Dezember 2010 zugehörig ist, aber erst im Januar als Abfluss mobilisiert und somit registriert wurde. Die Evapotranspiration ist für diesen Monat dann mit 0 % anzugeben.

## Niederschlagsverteilung für das Jahr 2011 Gesamtniederschlag N = 736,7 mm

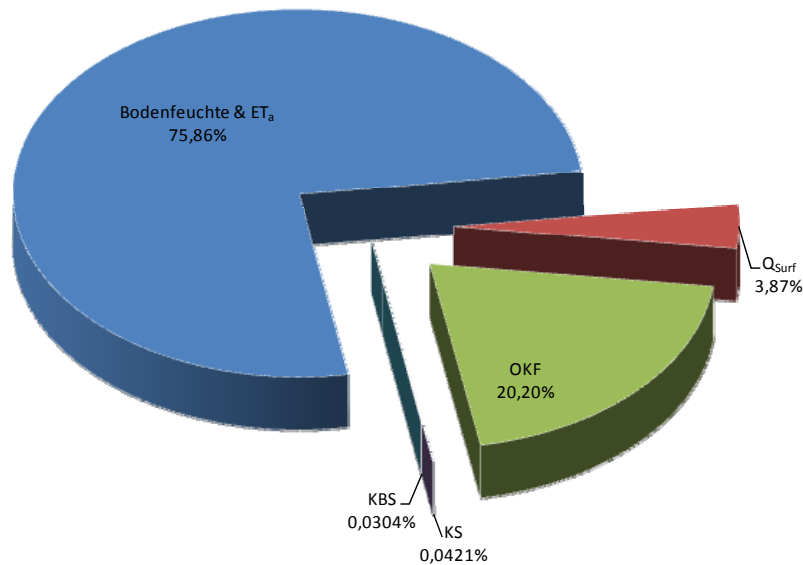


Abb. 11: Lysimeterbilanz 2011 der Schichtabflüsse als prozentualer Anteil am Jahresniederschlag 2011.

### 4.2. $k_f$ -Werte 2011 und Wirkungsgrad $W_{ges}$ des Gesamtsystems für den Untersuchungszeitraum 2003 – 2011

Aus den aufsummierten Abflüssen der Kapillarsperre lassen sich auf die einzelnen Monate und auf das Jahr Durchschnitts- $k_f$ -Werte für die Asphalt dichtungsschicht errechnen (Tab. 3). Dazu wird der mm-Abfluss in m umgeformt und von einem Jahr bzw. Monat auf eine Sekunde heruntergerechnet ( $k_f = [\text{Weg}/\text{Zeiteinheit}]$ ).

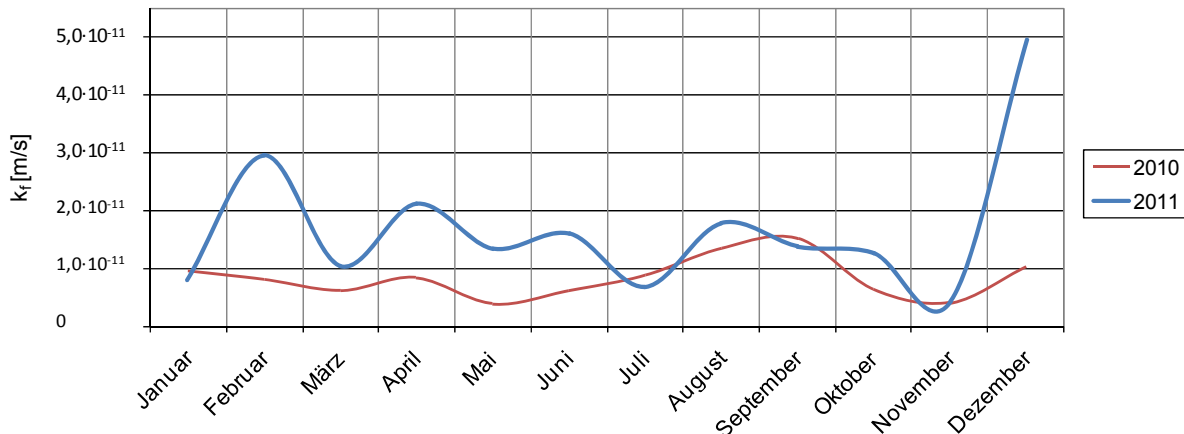
Tab. 3: Monatliche Abflüsse der KS, KBS und Gesamtabfluss (Ges) der Kapillarsperre sowie deren Jahressummen ( $\Sigma$ ) und die daraus resultierenden monatlichen  $k_{f,As}$ -Werte der Asphalt schicht und der Jahreschnitt ( $\emptyset$ ).

	KS	KBS [mm]	Ges	$k_{f,As}$ [m/s]		KS	KBS [mm]	Ges	$k_{f,As}$ [m/s]
Jan	0,0019	0,0194	0,0213	$7,96 \cdot 10^{-12}$	Aug	0,0075	0,0281	0,0356	$1,78 \cdot 10^{-11}$
Feb	0,0634	0,0107	0,0741	$2,96 \cdot 10^{-11}$	Sep	0,0074	0,0261	0,0336	$1,37 \cdot 10^{-11}$
Mrz	0,0137	0,0142	0,0279	$1,04 \cdot 10^{-11}$	Okt	0,0044	0,0065	0,0109	$1,25 \cdot 10^{-11}$
Apr	0,0422	0,0123	0,0545	$2,10 \cdot 10^{-11}$	Nov	0,1209	0,0120	0,1329	$4,20 \cdot 10^{-12}$
Mai	0,0151	0,0205	0,0357	$1,33 \cdot 10^{-11}$	Dez	0,3100	0,2239	0,5339	$4,96 \cdot 10^{-12}$
Jun	0,0094	0,0321	0,0415	$1,60 \cdot 10^{-11}$	$\Sigma/\emptyset$	0,0075	0,0281	0,0356	$1,69 \cdot 10^{-11}$
Jul	0,0064	0,0119	0,0183	$6,83 \cdot 10^{-12}$					

Bei einem Vergleich der  $k_f$ -Werte der letzten zwei Untersuchungs Jahre weist das Jahr 2010 z.T. etwas niedrigere Durchlässigkeitsbeiwerte auf (Abb. 11). Dabei nehmen die Monatsdurchschnittswerte einen überwiegen vergleichbaren Kurvenverlauf an.

Der durchschnittliche Wert für 2011 fällt mit  $1,69 \cdot 10^{-12}$  m/s schlechter aus als 2010 ( $8,31 \cdot 10^{-12}$  m/s). Dies liegt hauptsächlich an den erhöhten Abflusswerten der KS (vgl. Abb. 9).

### $k_f$ -Werte der Abdichtung 2010/2011



**Abb. 12:** Vergleich der  $k_f$ -Werte der Asphaltabdichtungsschicht für die Jahre 2010/2011.

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

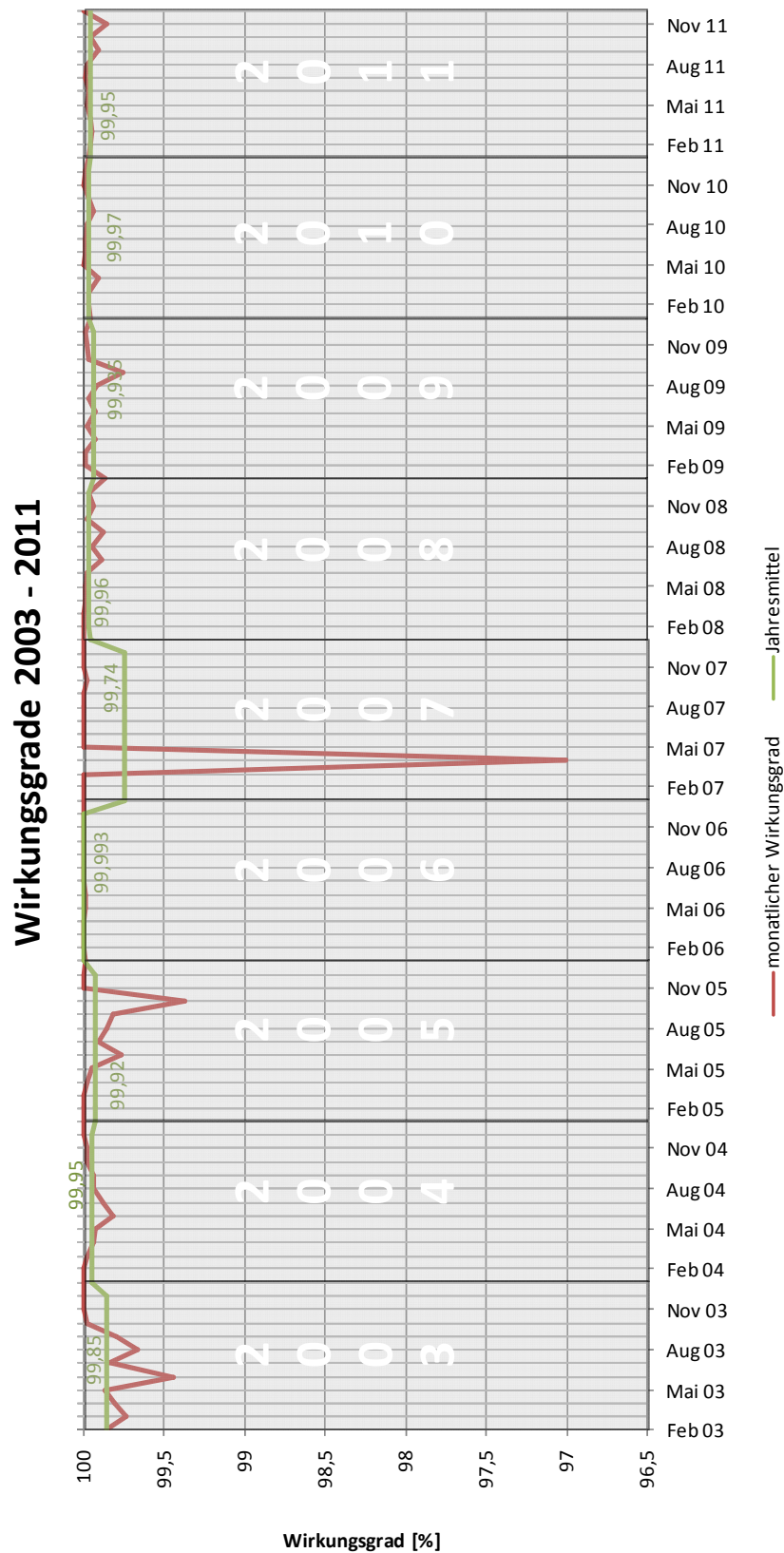
Damit gilt für einen Gesamtwirkungsgrad  $W_{ges}$ :

$$W_{ges} = \frac{(N - Q_{KBS})}{N \cdot 100} [\%] \quad (1)$$

Der Wirkungsgrad der Kapillarsperre ist im Vergleich zum Vorjahr leicht gesunken.

Im Jahr 2009 erreicht die Kapillarsperre einen Wirkungsgrad von ca. 99,935 % (Abb. 13, Anhang 9). Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse über die Schiefelage des Lysimetercontainers und der damit verbundenen geringen Abfuhr der KBS können die Messdaten nicht mit den direkten Vorjahren verglichen werden, sondern müssen auf die früheren Jahre (2003 – 2005) bezogen werden. Anhand dieses Vergleichs ist festzustellen, dass die Gesamtdichtigkeit über dem Durchschnitt dieser Jahre liegt. Eine tabellarische Darstellung aller berechneten Wirkungsgrade (inklusive 2011) findet sich in Anhang 9.

Der Wirkungsgrad wird hauptsächlich von 2 Ereignissen etwas verschlechtert. Da in den Monaten September und November relativ geringer bis sehr geringer Niederschlag gemessen wurde, fallen die Abflüsse der KBS prozentual gesehen mehr ins Gewicht und verschlechtern somit den Jahresgesamtwirkungsgrad (allerdings lediglich um 0,02 %-Punkte, Abb. 13).



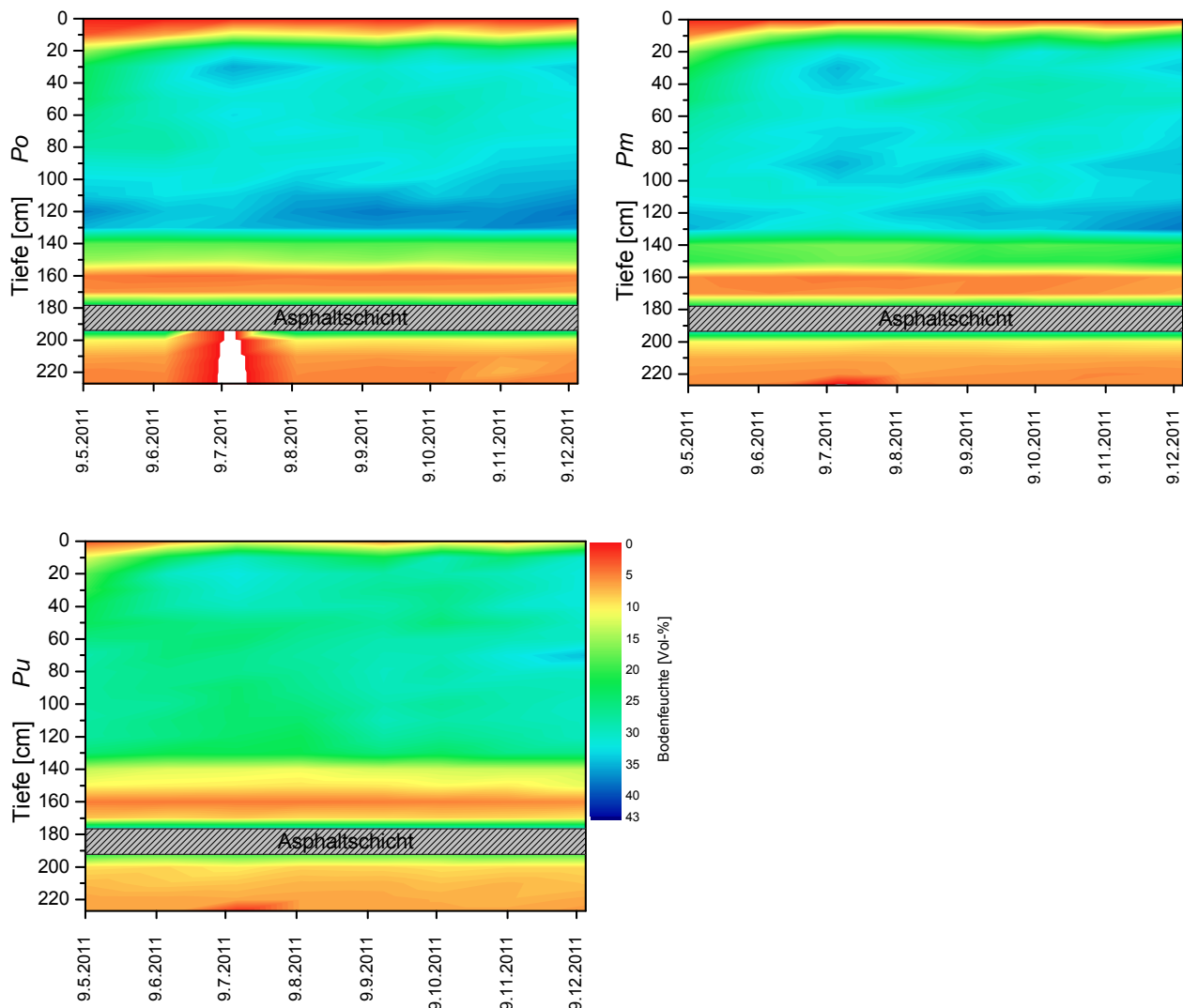
**Abb. 13:** Grafik über die Wirkungsgrade aus dem Messungszeitraum 2003 - 2011. Die rote Kurve stellt die Monatswerte und die grüne die Jahresmittel dar. Die Spitze im April 2007 resultiert aus dem damaligen Mangel an Niederschlag (0,04 mm).

## 5 Neutronensondenmessung zur Bestimmung der Bodenfeuchte

Im Jahr 2011 wurde in monatlichen Abständen die Bodenfeuchte des Lysimeterfeldes an den vorhandenen Messpunkten für Neutronensonden gemessen (siehe Abb. 1).

Aufgrund einer zeitlichen Verzögerung der Beauftragung, konnte im Jahr 2011 nur von Mai bis Dezember gemessen werden. Die Ergebnisse sollen im Folgenden vorgestellt werden.

Abbildung 11 zeigt die Bodenfeuchte der einzelnen Messstellen interpoliert über die Tiefe und die Zeit. Aufgrund der Abstände der einzelnen Messungen, ist die zeitliche Auflösung relativ schlecht und die Bodenfeuchte kann nur verzerrt dargestellt werden. Deutlich voneinander zu unterscheiden sind allerdings die einzelnen Tiefenabschnitte wie Rekultivierungsschicht, Dränschicht, Asphaltsschicht und Kapillarsperre. Bei Po gab es am 9.7.2011 eine Messlücke. Diese wurde bei der Interpolation nicht eliminiert, daher ist in diesem Bereich fälschlicherweise eine erhöhte „Trockenheit“ interpoliert.



**Abb. 14:** Darstellung der volumetrischen Bodenwassergehalte in Prozent für die Messstellen Po (oben links), Pm (oben rechts) und Pu (unten).

Was bei einem Vergleich der drei Messstellen besonders auffällt, ist der abnehmende Bodenfeuchtegehalt vom oberen zum unteren Bereich des Testfeldes (Po – Pm – Pu). Außerdem scheint auch in den tieferen Lagen der Rekultivierungsschicht generell mehr Feuchte gespeichert zu werden, als in den obo-

ren Lagen ( $P_o$  und  $P_m$ ). In  $P_u$  ist der Feuchtegehalt über die Messperiode eher diffus verteilt. Aufgrund der geringen Auflösung sind einzelne Starkregenereignisse sowie einsickernde Wasserfronten nicht zu identifizieren. Insgesamt kann jedoch gesagt werden, dass unterhalb der Asphaltsschicht eine sehr geringe Bodenfeuchte registriert wird, was aufgrund des Schichtaufbaus auch erwartet wird. Da die Dichtungskomponente aus Asphalt besteht, wird von der Neutronensonde aufgrund der hohen Anzahl an Wasserstoffatomen in der Dichtschicht ein scheinbar erhöhter Wassergehalt gemessen. Dies liegt aber, wie gesagt, an der Beschaffenheit der Asphaltsschicht und hat nichts mit dem realen Wassergehalt an dieser Stelle zu tun, der in und unter der Asphaltsschicht sehr gering sein sollte.

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

Das Großlysimeter befindet sich im nordwestlichen Bereich des Bauabschnitts I der Deponieoberflächenabdichtung. Der Aufbau des Lysimeterfeldes entspricht dem des Bauabschnittes und ist 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. Zur Abflussbilanzierung stehen die vier Abflusskomponenten Oberflächenabfluss ( $Q_{\text{Surf}}$ ), der Abfluss des Oberen Kiesflächenfilters ( $Q_{\text{OKF}}$ ), der Kapillarschichtabfluss ( $Q_{\text{KS}}$ ) und der Abfluss aus der Kapillarbrechenden Schicht ( $Q_{\text{KBS}}$ ) zur Verfügung. Die Messwerterfassung beinhaltet Daten aus dem Zeitraum April 2003 bis Dezember 2011.

Als begleitende Maßnahme zur Bauwerksüberwachung des Lysimeters betreute der Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe bis zum Messjahr 2006 die sich in unmittelbarer Nähe zum Lysimeter befindliche 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 2011 dem AGW zur Verfügung gestellt hat. Dies gilt auch für die verwendeten Daten der Wetterstation Pforzheim-Ispringen, da die Hohberg-Station das Jahr über keine plausiblen Daten gemessen hat.

Der Jahresniederschlag 2011 am Lysimeter wurde somit nach den Daten von Ispringen auf 883,4 mm festgelegt und liegt sowohl über der Niederschlagsmenge von 2009 (824,7 mm) als auch über dem langjährigen Mittel (782 mm).

Der Vergleich des Abflussverhaltens am Lysimeter mit den Niederschlagswerten zeigt eine sehr gute Korrelation mit dem Oberflächenabfluss  $Q_{\text{Surf}}$ . Erwartungsgemäß zeigt der obere Kiesflächenfilter OKF systembedingt die größten Mengen an Sickerwasser (~284 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 Werte der letzten zwei Jahre von maximal 0,009 mm/Monat deuten

zusammen mit den hohen Wirkungsgraden der KS auf Kondenswasserbildung hin, die den geringen Abfluss produzieren.

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 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) liegt.

Nach Abschluss der Messungen 2006, 2007 und 2008 kann die Hypothese bestätigt werden, die im Jahresbericht 2005 formuliert wurde. Damals wurde die Baumaßnahme als Verursacher des kurzfristig höheren Abflusses an der KBS Ende 2005 angenommen. Durch eine Neuverlegung der Verbindungsrohre im Oktober 2005 wurde die KBS - Zuleitung gehoben und das ganze Sickerwasser, das sich in tiefer gelegenen Rohrabschnitten gesammelt hatte, wurde innerhalb kürzester Zeit der Messvorrichtung zugeführt.

Im Jahr 2010 erreicht die Kapillarsperre einen Wirkungsgrad von ca. 99,97 %. Aufgrund der Befüllung der Mulde des KBS-Zuflusses können die Daten nur mit denjenigen vor der Umsetzung effektiv verglichen werden. Anhand dieses Vergleichs mit den früheren Jahren 2003 – 2005 ist festzustellen, dass sich die Gesamtdichtigkeit sogar noch leicht verbessert hat. Anhand der Bestimmung der Bodenfeuchte mittels Neutronensondenmessungen im Sommer 2009, konnte detektiert werden, dass es sich bei den gemessenen höheren Abflüssen seit 2008 tatsächlich um den postulierten bauwerksseitigen Einfluss und voraussichtlich nicht um etwaige Leckagen im Abdichtungssystem handelt.

Eine Befüllung der KS-Mulde fand im Spätjahr 2009 nach dem Vorbild der vollgelaufenen KBS-Mulde statt, um damit eine Normalisierung dieses Abflusses zu erreichen. Allerdings kann bis jetzt noch keine qualitative Aussage über das Verhalten des KS-Abflusses getroffen werden. Diesem sollte in den kommenden Messperioden besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Das Jahr 2011 weist eine im Schnitt gute Systemdichtigkeit auf. Trotz geringerer Niederschläge wurden schlechtere  $k_f$ -Werte und Wirkungsgrade erzielt. An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass die Werte mit einem Fehler in Bezug auf die Niederschlags- bzw. klimatischen Daten behaftet sind. Da die Daten von der Station Pforzheim-Ispringen, die eine gewisse Distanz zum Testfeld aufweist und Niederschlagsmessungen nach DWD-Norm durchführt (in 2 Metern Höhe und nicht direkt am Boden), stammen, ist der bodennahe Bezug und die geographische Lage nicht vollständig vergleichbar. Für detailliertere Berechnungen wären allerdings qualitative, testfeldnahe Niederschlagsdaten (die vor allem auch auf Testfeldhöhe gesammelt werden) wünschenswert. Es wird empfohlen, den lysimeter-eigenen Niederschlagsmesser regelmäßig zu warten und von Verunreinigungen zu säubern, um eine uneingeschränkte Funktionstüchtigkeit zu gewährleisten. Erfahrungsgemäß wurde am Lysimeter in den vergangenen Jahren im Vergleich weniger Niederschlag gemessen, als an der Station in Ispringen. Ausgehend von dieser Beobachtung würde sich der Wirkungsgrad etwas verschlechtern.

---

Dr. N. Göppert  
*Projektleitung*

---

Dipl.-Geol. M. Augenstein  
*Sachbearbeiter*

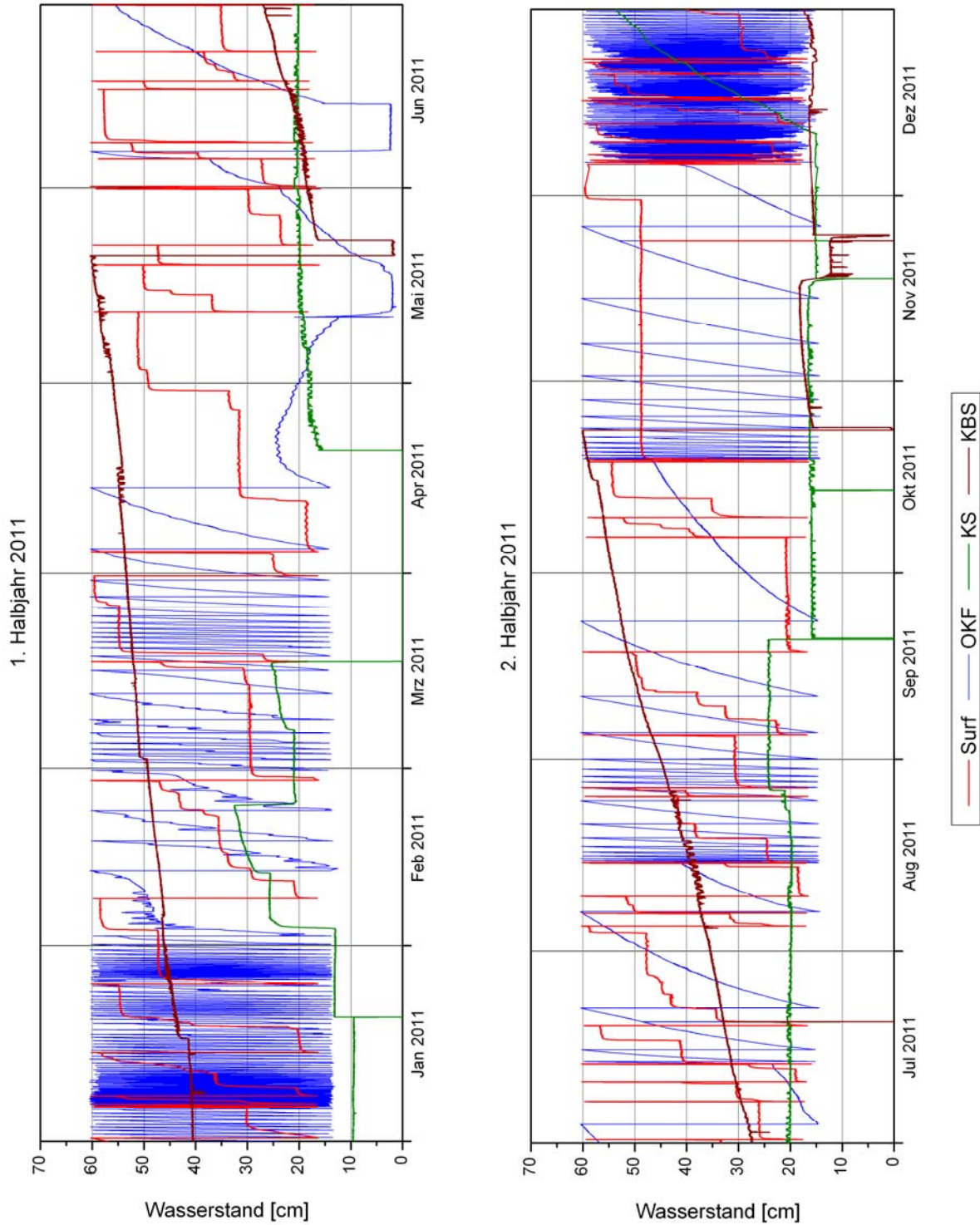
## 7 Literatur und bisherige Berichte

- 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).
- 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 [Juni 2010, 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]
- 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 2011.

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

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

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

2004	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	$\Sigma$	% N
N	192,2	35,5	25,4	27,7	50,5	38,4	72,8	94,0	49,0	77,3	42,6	37,9	743,30	
$Q_{Surf}$	40,65	2,99	0,88	1,50	1,41	1,49	5,06	10,19	2,51	4,33	2,36	1,93	75,30	10,1
$Q_{OKF}$	79,22	22,39	13,27	8,41	8,44	1,38	0,22	0,00	0,00	4,33	9,42	21,06	168,14	22,62
$Q_{KS}$	0,07	0,06	0,05	0,06	0,05	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00	0,42	0,06
$Q_{KBS}$	0,00	0,00	0,00	0,02	0,04	0,07	0,09	0,06	0,04	0,02	0,01	0,00	0,35	0,05
Diff	-28,03	5,35	-5,53	-15,58	-24,64	-96,21	-15,36	46,42	25,24	67,00	30,51	1,03	-9,8	-1,32
$ET_a$	100,3	4,7	16,7	33,3	65,2	131,6	82,8	37,3	21,2	1,6	0,3	13,9	508,9	68,46

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

2005	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	$\Sigma$	% N
N	58,6	124,8	51,9	73,4	72,3	18,9	96,2	62,6	45,0	33,1	49,5	80,1	766,4	
$Q_{Surf}$	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	$\Sigma$	% N
N	19,5	45,3	139,6	51,0	61,4	25,1	46,1	162,1	35,3	115,0	26,5	32,6	759,6	
$Q_{Surf}$	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<sub>a</sub> 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 <sub>Surf</sub>	4,61	3,73	4,61	0,04	5,26	2,34	2,52	2,3	2,17	0,04	3,05	2,2	32,85	4,37
Q <sub>OKF</sub>	30,52	39,88	34,54	9,83	1,01	0,43	0,02	0,31	0,51	0	11,09	27,61	155,74	20,69
Q <sub>Ks</sub>	0,0024	0,003	0,0019	0,0043	0,0052	0,0065	0,0027	0,0036	0,0036	0,0047	0,0027	0,002	0,0429	0,0057
Q <sub>KBS</sub>	0,0026	0,0016	0,0023	0,003	0,0057	0,0023	0,0041	0,001	0,0023	0,0026	0,0029	0,0024	0,0328	0,0044
Diff + ET <sub>a</sub>	564,03													74,93

**Anhang 7:** Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte + ET<sub>a</sub> 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 <sub>Surf</sub>	1,63	2,01	5,32	3,25	1,28	1,69	1,3	2,81	1,73	4,25	1,32	1,76	28,36	3,93
Q <sub>OKF</sub>	31,0	36,29	53,02	22,03	10,49	5,04	0,28	0,22	0,07	10,38	17,88	30,1	216,8	30,03
Q <sub>Ks</sub>	0,0027	0,0029	0,0032	0,0016	0,0038	0,0017	0,0011	0,002	0,0027	0,0012	0,0031	0,0055	0,0315	0,0044
Q <sub>KBS</sub>	0,0045	0,0042	0,005	0,0143	0,0079	0,0133	0,0486	0,0512	0,0286	0,027	0,0181	0,0129	0,0326	0,0326
Diff + ET <sub>a</sub>	476,4													66,0

**Anhang 8:** Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte + ET<sub>a</sub> 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 <sub>Surf</sub>	4,50	3,57	4,31	1,36	2,37	1,27	4,85	1,03	0,55	2,05	2,82	5,27	33,95	4,12
Q <sub>OKF</sub>	12,42	61,19	58,35	7,11	26,71	2,19	15,07	2,23	0,20	0,26	22,16	78,34	286,23	34,71
Q <sub>Ks</sub>	0,006	0,003	0,005	0,003	0,007	0,004	0,015	0,008	0,010	0,005	0,003	0,004	0,073	0,009
Q <sub>KBS</sub>	0,044	0,014	0,017	0,028	0,029	0,037	0,044	0,041	0,042	0,022	0,011	0,017	0,346	0,042
Diff + ET <sub>a</sub>	504,10													61,13

**Anhang 9:** Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte + ET<sub>a</sub> 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 <sub>Surf</sub>	6,75	4,95	2,08	0,57	4,58	1,18	2,34	4,47	1,70	1,64	4,35	8,96	43,57	4,93
Q <sub>OKF</sub>	46,84	48,93	19,59	3,95	15,89	4,18	0,29	0,81	1,64	8,91	49,82	85,18	284,04	32,15
Q <sub>Ks</sub>	0,003	0,002	0,002	0,005	0,003	0,008	0,011	0,010	0,002	0,003	0,004	0,002	0,057	0,0064
Q <sub>KBS</sub>	0,022	0,018	0,014	0,016	0,007	0,008	0,012	0,026	0,037	0,013	0,007	0,026	0,206	0,0233
Diff + ET <sub>a</sub>	555,53													62,89

**Anhang 10:** Tabelle zur Bodenwasserbilanz der monatlichen Abflüsse [mm] und Bodenfeuchte + ET<sub>a</sub> 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 <sub>Surf</sub>	3,69	0,87	0,93	0,88	2,49	3,70	2,79	3,91	0,96	2,30	0,14	5,87	28,53	3,87
Q <sub>OKF</sub>	48,96	1,92	6,78	0,65	0,22	0,55	1,21	5,30	1,18	3,69	1,24	77,07	148,78	20,20
Q <sub>Ks</sub>	0,00	0,06	0,01	0,04	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,12	0,31	0,04
Q <sub>KBS</sub>	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,01	0,03	0,03	0,03	0,01	0,01	0,22	0,03
Diff + ET <sub>a</sub>	558,85													75,9

**Anhang 11:** Gesamtwirkungsgrad  $W_{ges}$  der Oberflächenabdichtung für den Untersuchungszeitraum 2003 – 2011.

	<b>Niederschlag [mm]</b>	<b>Gesamtwirkungsgrad <math>W_{ges}</math> [%]</b>
Jan 2003	-	-
Feb 2003	24,2	99,85
Mrz 2003	25,5	99,73
Apr 2003	34,0	99,80
Mai 2003	50,7	99,86
Jun 2003	25,1	99,44
Jul 2003	65,0	99,83
Aug 2003	32,9	99,66
Sep 2003	36,8	99,79
Okt 2003	93,8	99,98
Nov 2003	43,1	100,00
Dez 2003	30,4	100,00
<b>Jahres-Wges 2003</b>	<b>461,5</b>	<b>99,85</b>
Jan 2004	192,2	100,00
Feb 2004	35,5	100,00
Mrz 2004	25,4	99,98
Apr 2004	27,7	99,93
Mai 2004	50,5	99,92
Jun 2004	38,4	99,81
Jul 2004	72,8	99,87
Aug 2004	94,0	99,94
Sep 2004	49,0	99,93
Okt 2004	77,3	99,98
Nov 2004	42,6	99,98
Dez 2004	37,9	100,00
<b>Jahres-Wges 2004</b>	<b>743,3</b>	<b>99,95</b>
Jan 2005	58,6	100,00
Feb 2005	124,8	100,00
Mrz 2005	51,9	100,00
Apr 2005	73,4	99,98
Mai 2005	72,3	99,95
Jun 2005	18,9	99,76
Jul 2005	96,2	99,90
Aug 2005	62,6	99,85
Sep 2005	45,0	99,81
Okt 2005	33,1	99,37
Nov 2005	49,5	100,00
Dez 2005	80,1	100,00
<b>Jahres-Wges 2005</b>	<b>766,6</b>	<b>99,92</b>
Jan 2006	19,5	99,9856
Feb 2006	45,3	99,9929
Mrz 2006	139,6	99,9986
Apr 2006	51,0	99,9973
Mai 2006	61,4	99,9831
Jun 2006	25,1	99,9904
Jul 2006	46,1	99,9974
Aug 2006	162,1	99,9987
Sep 2006	35,3	99,9946
Okt 2006	115,0	99,9970
Nov 2006	26,5	99,9906
Dez 2006	32,6	99,9914
<b>Jahres-Wges 2006</b>	<b>759,6</b>	<b>99,993</b>

Fortsetzung Anhang 11:

	Niederschlag [mm]	Gesamtwirkungsgrad $W_{ges}$ [%]
Jan 2007	54,1	99,9952
Feb 2007	74,4	99,9978
Mrz 2007	72,8	99,9968
Apr 2007	0,1	97,0000
Mai 2007	125,2	99,9954
Jun 2007	70,9	99,9968
Jul 2007	84,0	99,9951
Aug 2007	66,1	99,9985
Sep 2007	71,8	99,9968
Okt 2007	10,5	99,9752
Nov 2007	82,3	99,9960
Dez 2007	50,5	99,9952
<b>Jahres-Wges 2007</b>	<b>752,7</b>	<b>99,7449</b>
Jan 2008	49,2	99,9908
Feb 2008	56,5	99,9926
Mrz 2008	98,8	99,9949
Apr 2008	82,7	99,9827
Mai 2008	49,7	99,9840
Jun 2008	53,7	99,9752
Jul 2008	52,6	99,8859
Aug 2008	92,4	99,9446
Sep 2008	22,1	99,8706
Okt 2008	109,1	99,9752
Nov 2008	28,9	99,93752
Dez 2008	36,2	99,9644
<b>Jahres-Wges 2008</b>	<b>721,8</b>	<b>99,9582</b>
Jan 2009	31,9	99,8628
Feb 2009	87,9	99,9839
Mrz 2009	86,8	99,9809
Apr 2009	37,1	99,9237
Mai 2009	104,5	99,9720
Jun 2009	49,9	99,9264
Jul 2009	140,5	99,9687
Aug 2009	47,8	99,9151
Sep 2009	17,5	99,7573
Okt 2009	65,5	99,9664
Nov 2009	51,5	99,9779
Dez 2009	103,8	99,9838
<b>Jahres-Wges 2009</b>	<b>824,7</b>	<b>99,9349</b>
Jan 2010	52,80	99,9576
Feb 2010	47,40	99,9629
Mrz 2010	36,30	99,9609
Apr 2010	17,00	99,9041
Mai 2010	139,10	99,9951
Jun 2010	42,60	99,9819
Jul 2010	73,70	99,9839
Aug 2010	117,90	99,9778
Sep 2010	61,40	99,9395
Okt 2010	44,20	99,9700
Nov 2010	112,20	99,9940
Dez 2010	138,80	99,9814
<b>Jahres-Wges 2010</b>	<b>883,4</b>	<b>99,9576</b>

Fortsetzung Anhang 11:

	<b>Niederschlag [mm]</b>	<b>Gesamtwirkungsgrad <math>W_{ges}</math> [%]</b>
Jan 2011	48,9	99,9603
Feb 2011	21,9	99,9512
Mrz 2011	26,7	99,9468
Apr 2011	25	99,9508
Mai 2011	69,4	99,9704
Jun 2011	98,9	99,9675
Jul 2011	84,8	99,9860
Aug 2011	103,2	99,9710
Sep 2011	29,8	99,9058
Okt 2011	63,4	99,9588
Nov 2011	4,4	99,8517
Dez 2011	160,3	99,9925
<b>Jahres-Wges 2011</b>	<b>736,7</b>	<b>99,9511</b>

**Anhang 12: beigelegt als CD**

Datenablage  
Digitaler Bericht  
Auswertung