

# Anlage 1

## Versuchsprogramm zur Ermittlung der rückstandsspezifischen Parameter

### Impressum

Fassung vom 15.05.2018

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. J. Baumeister

Telefon: 03931/689226

Fax: 03931/689299

e-Mail: [j.baumeister@upi-umweltprojekt.de](mailto:j.baumeister@upi-umweltprojekt.de)

Web: [www.upi-umweltprojekt.de](http://www.upi-umweltprojekt.de)



## Inhaltsverzeichnis

1 .....	Veranlassung .....	8
2 .....	Mineralische Wassereinbindung und -entbindung bzw. Speichervermögen des Rückstandes .....	8
2.1	Eigenschaften der im Rückstand enthaltenen Salze .....	8
2.1.1	Bestimmung der Deliqueszenzfeuchte am frischen Rückstand Hattorf .....	8
2.1.2	Deliqueszenzfeuchte von Salzgemischen .....	9
2.1.3	Auswertung der relativen Luftfeuchte .....	9
3 .....	Säulenversuche .....	11
3.1	Versuchsdurchführung .....	11
3.2	Versuchsergebnisse .....	12
3.2.1	Wassergehaltsbestimmung des eingebauten Rückstands .....	12
3.2.2	Versuchsergebnisse des ersten Säulenversuchs .....	12
3.2.3	Versuchsergebnisse des zweiten Säulenversuchs .....	17
3.2.4	Versuchsergebnisse des dritten Säulenversuchs .....	20
3.2.5	Versuchsergebnisse des vierten Säulenversuchs .....	22
3.2.6	Ergebnisauswertung des Säulenversuchs für den Standort Hattorf .....	24
4 .....	Lysimeterversuch .....	26
4.1.1	Versuchsdurchführung des Lysimeterversuchs in Müncheberg .....	26
4.1.2	Probennahme aus dem Salzkörper nach Abschluss des Versuchs .....	29
4.1.3	Untersuchungsprogramm und -ergebnisse .....	32
4.1.3.1	Wassergehaltsuntersuchungen des Rückstands beim Einbau in das Lysimeter .....	32
4.1.3.2	Wassergehaltsbestimmung des Rückstands am Ende der Versuchslaufzeit .....	32
4.1.3.3	Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwerts .....	33
4.1.3.4	Eigensetzung und Ablaugung der Rückstandsoberfläche .....	33
4.1.3.5	Untersuchungsergebnisse des Salzwasserabflusses .....	35
4.1.3.6	Tracerversuch .....	38
4.1.3.7	Ergebnisse des Tracerversuchs .....	41
4.1.3.8	Ergebnisse der mineralogischen Untersuchungen der Bohrproben .....	42

4.1.3.9	Niederschlagsdaten, Lysimetergewicht und Abflussmengen .....	44
4.1.4	Berechnung der Evaporation .....	44

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Untersuchungsergebnisse des Rückstands .....	8
Tabelle 2:	Freier Wassergehalt Probenmaterial Hattorf .....	12
Tabelle 3:	Ausgangsparemeter des Säulenversuchs .....	13
Tabelle 4:	Ausgangsparemeter des ersten Säulenversuchs, 2. Stufe .....	15
Tabelle 5:	Ausgangsparemeter des zweiten Säulenversuchs .....	18
Tabelle 6:	Ausgangsparemeter des dritten Säulenversuchs .....	20
Tabelle 7:	Ausgangsparemeter des vierten Säulenversuchs .....	23
Tabelle 8:	Vergleich der Ergebnisse der Säulenversuche.....	25
Tabelle 9:	Proben der 1. Bohrung.....	30
Tabelle 10:	Proben der 2. Bohrung.....	31
Tabelle 11:	Wassergehalt des Rückstandes beim Einbau in das Lysimeter .....	32
Tabelle 12:	Wassergehalte der Bohrproben am Ende der Versuchslaufzeit.....	32
Tabelle 13:	Dichte der beiden Abflüsse .....	38
Tabelle 14:	Berechnungsergebnisse der Evaporation.....	46

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Tagesmittelwerte der relativen Luftfeuchte an der Wetterstation Philippsthal.....	10
Abbildung 2:	Darstellung der Säulenversuche .....	11
Abbildung 3:	Ergebnisse des 1. Säulenversuchs vom 19.04.2010 bis 26.08.2010.....	14
Abbildung 4:	Oberflächenbeschaffenheit des 1. Säulenversuchs.....	15
Abbildung 5:	Ergebnisse des 1. Säulenversuchs, 2. Stufe, vom 18.10.2010 bis 16.05.2011 .....	16
Abbildung 6:	Oberflächenbeschaffenheit des 1. Säulenversuchs Stufe 2 .....	17
Abbildung 7:	Ergebnisse des 2. Säulenversuchs vom 04.07.2011 bis 25.03.2013.....	19
Abbildung 8:	Oberflächenbeschaffenheit des 2. Säulenversuchs.....	20
Abbildung 9:	Ergebnisse des 3. Säulenversuchs vom 04.07.2011 bis 04.05.2012.....	21
Abbildung 10:	Oberflächenbeschaffenheit des 3. Säulenversuchs.....	22
Abbildung 11:	Ergebnisse des 4. Säulenversuchs vom 07.05.2012 bis 16.10.2012.....	24
Abbildung 12:	Darstellung des wägbaren Lysimeters am Standort Müncheberg.....	26
Abbildung 13:	Lysimeterboden (segmentiert), Einbau Dränschicht .....	27
Abbildung 14:	Dränschicht (vollständig hergestellt).....	27
Abbildung 15:	Lysimeter nach Einbau des Rückstands.....	28
Abbildung 16:	Darstellung des wägbaren Lysimeters .....	28
Abbildung 17:	Lage der Bohrpunkte im Lysimeter.....	29
Abbildung 18:	Setzung der Lysimetersäule am Standort Müncheberg vom 09.08.2012 bis 31.07.2013.....	34
Abbildung 19:	Entwicklung der Oberfläche des Rückstands am 10.08.2012 und 12.08.2013 .....	35
Abbildung 20:	Konzentrationen von Kalium, Natrium, Magnesium, Calcium, Chlorid und Sulfat des Abflusses aus dem inneren Lysimetersegment vom 09.08.2012 bis 28.08.2013 .....	36
Abbildung 21:	Dichte, pH-Wert, Wasserhärte und Hydrogencarbonatanteil des Abflusses aus dem inneren Lysimetersegment vom 09.08.2012 bis 28.08.2013.....	37
Abbildung 22:	Aufgabe des Farbtacers auf die Rückstandsoberfläche .....	39

Abbildung 23:	Lysimeteroberfläche nach Aufgabe der 1. Charge .....	40
Abbildung 24:	Lysimeteroberfläche nach Aufgabe der 2. Charge .....	40
Abbildung 25:	Oberer Teil der Bohrkerne mit Tracer.....	41
Abbildung 26:	Oberer Teil der Bohrkerne mit Tracer.....	41
Abbildung 27:	Tracerspuren an der Oberfläche des Salzkörpers .....	42
Abbildung 28:	Chemische Zusammensetzung der Rückstandsproben aus der Bohrung 1 .....	43
Abbildung 29:	Chemische Zusammensetzung der Rückstandsproben aus der Bohrung 2 .....	43
Abbildung 30:	Darstellung der Massenteile.....	45
Abbildung 31:	Messergebnisse des Lysimeterversuchs Müncheberg vom 09.08.2012 bis 31.07.2013.....	47

## 1 Veranlassung

Im Rahmen der Erstellung der Haldenwasserbilanz und der Ermittlung der für diese relevanten Parameter wurden verschiedene Versuche durchgeführt. Zur Ermittlung der Deliqueszenzfeuchte wurden Exikatorversuche mit Rückstand vorgenommen. Zur Ermittlung der mineralischen Wassereinbindung und –entbindung bzw. des Speichervermögens wurden im Labormaßstab mehrere Säulenversuche durchgeführt. Weiterhin wurde auf dem Gelände der ugt in Müncheberg ein wägbares Lysimeter ebenfalls mit Rückstand gefüllt, um über den Zeitraum eines Jahres die Evaporation zu ermitteln. Die Versuchsdurchführung und die –ergebnisse sind in den nachfolgenden Kapiteln zusammengefasst.

## 2 Mineralische Wassereinbindung und -entbindung bzw. Speichervermögen des Rückstandes

### 2.1 Eigenschaften der im Rückstand enthaltenen Salze

#### 2.1.1 Bestimmung der Deliqueszenzfeuchte am frischen Rückstand Hattorf

Um diese Deliqueszenzfeuchte des Rückstands zu ermitteln, wurde der Rückstand im Labor untersucht. Als Referenzprobe wurde hierbei zunächst die Deliqueszenzfeuchte von reinem Natriumchlorid untersucht. Im Ergebnis der Untersuchungen wurde eine Deliqueszenzfeuchte von 75 % relativer Luftfeuchtigkeit bei einer Temperatur von ca. 20°C festgestellt, was den Lehrbuchangaben entspricht. Die Untersuchungsergebnisse liegen im Rahmen von Laborprotokollen bei der upi GmbH vor.

Analog hierzu wurde der frische Rückstand hinsichtlich der Deliqueszenzfeuchte bei einer Temperatur von ca. 19,5°C untersucht. Hierbei ergibt sich eine Deliqueszenzfeuchte von ca. 70 % relative Luftfeuchte.

In einem zweiten Versuchsschritt wurde dann überprüft, ob bei einer relativen Luftfeuchte von mehr als 70 % eine Wasseraufnahme durch das Rückstandssalz stattfindet.

Hierzu wurde der Rückstand in einen Exsikkator gegeben in dem die rel. Luftfeuchte während des Versuchszeitraums mit Hilfe einer NaCl-Lösung bei ca. 75 % konstant gehalten und in regelmäßigen Abständen geprüft wurde. Das Gewicht des frischen Rückstands zu Versuchsbeginn betrug 35,2 g (ungetrocknet, ca. 5 % Ausgangswassergehalt). In der nachfolgenden Abbildung sind die Versuchsergebnisse dargestellt.

**Tabelle 1: Untersuchungsergebnisse des Rückstands**

Datum, Uhrzeit	Temperatur [°C]	Probengewicht [g]
04.04.2013 16:00	19,1	35,2
05.04.2013 9:00	18,5	35,4

Datum, Uhrzeit	Temperatur [°C]	Probengewicht [g]
08.04.2013 8:00	18,6	38,7
10.04.2013 9:00	19,0	40,2
12.04.2013 10:30	21,4	42,1
30.04.2013 10:00	21,4	53,1

Nachdem der Nachweis der Wasseraufnahme erbracht werden konnte, wurde der Versuch nach 26 d beendet. Am Versuchsende betrug das Probengewicht 53,1 g. Bezogen auf das Ausgangsgewicht und die Oberfläche der Probe betrug die Feuchtesorption nach 26 d ca. 50 Masse-%. Dieser Versuch dient lediglich zum Nachweis der Deliqueszenzfeuchte. Eine Übertragung der Wasseraufnahmerate auf die Rückstandshalde ist jedoch nicht möglich, da die Wasseraufnahmerate stark von der Oberfläche und den vorherrschenden klimatischen Bedingungen abhängig ist.

### 2.1.2 Deliqueszenzfeuchte von Salzgemischen

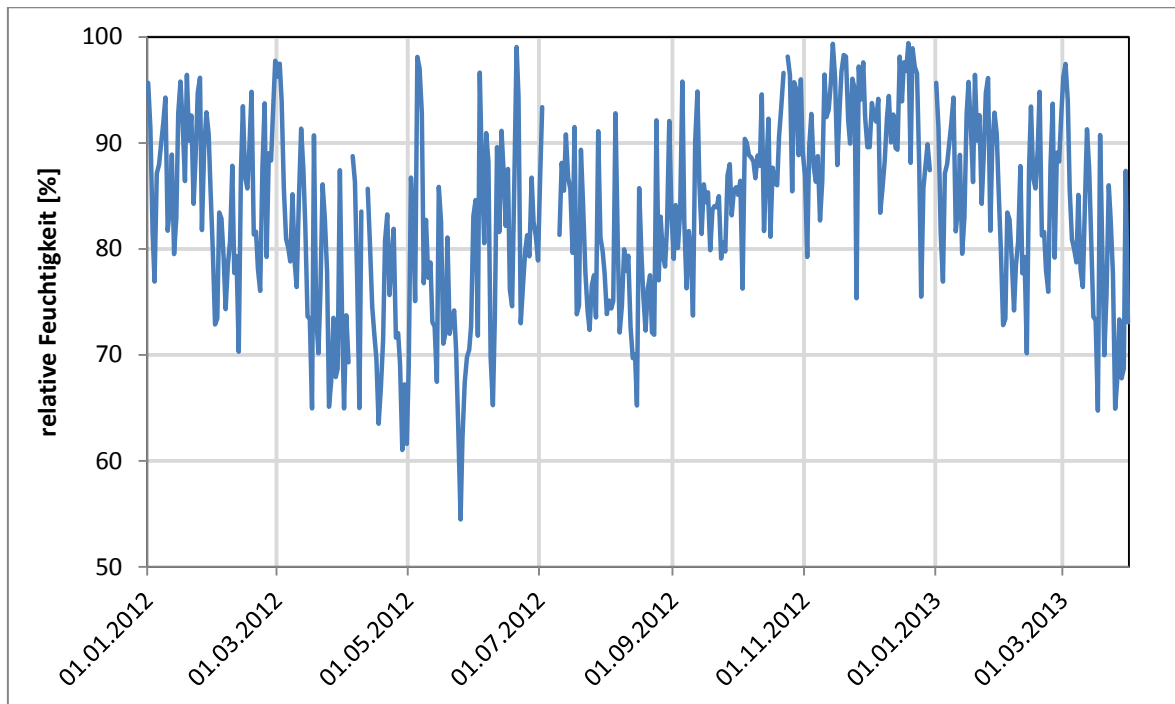
Bei der Betrachtung des Rückstandssalzes ist die Tatsache zu beachten, dass es sich um ein Salzgemisch bestehend aus mehreren Einzelsalzen handelt (siehe Kap. 3.2.3 des Bandes 1.3). Es reicht also nicht aus, die DRH der Einzelsalze zu kennen, da sie nicht zur Vorhersage des Verhaltens im Salzgemisch genutzt werden.

Nahezu alle chemischen und physikalischen Eigenschaften eines Salzes werden in Salzgemischen verändert. Als Faustregel gilt, dass durch gleichionische Zusätze die Löslichkeit eines Salzes abnimmt. Fremdionische Zusätze können die Löslichkeit hingegen erhöhen. Beide Vorgänge sind jedoch nicht generell zu beobachten.

Neben den reinen Phasen können in gemischten Systemen auch Doppelsalze (und Tripelsalze) auftreten, wodurch die Beschreibung solcher Systeme nicht möglich ist.

### 2.1.3 Auswertung der relativen Luftfeuchte

Wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, nimmt Salz oberhalb seiner Gleichgewichtsfeuchte Wasser auf. Aus diesem Grund wurde nachfolgend die relative Luftfeuchte an der Meteomedia-Wetterstation Philippsthal ausgewertet. Die Messdaten sind in der nachfolgenden Abbildung als Tagesmittelwerte für den Zeitraum 2012/2013 dargestellt.



**Abbildung 1: Tagesmittelwerte der relativen Luftfeuchte an der Wetterstation Philippsthal**

Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, schwanken die Tageswerte der relativen Feuchtigkeit zwischen 55 und 100%. Im Jahresmittel ergibt sich eine relative Feuchte von 83,4 %. Die Gleichgewichtsfeuchte liegt für den frischen Rückstand bei ca. 70 % relativer Luftfeuchte. Für die Ermittlung des Anteils am Gesamtjahr, in dem eine relative Feuchte von weniger als 70 % gemessen wurde, werden zur Erhöhung der Genauigkeit die Stundenwerte verwendet. Diese lassen sich aufgrund der Datenfülle in der oberen Abbildung jedoch nicht adäquat darstellen. Bei der Auswertung der Stundenwerte ergibt sich, dass lediglich in ca. 23 % der Zeit eine relative Feuchte von weniger als 70 % gemessen wurde.

Wie bereits oben erwähnt, handelt es sich bei der relativen Luftfeuchte lediglich um einen der Faktoren, die das Wasseraufnahmevermögen des Rückstands bestimmen. Weitere klimatische Faktoren wie Temperatur und Windgeschwindigkeit an der Haldenoberfläche haben ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf die Wasseraufnahme- bzw. Wasserabgaberate der Rückstandshalde.

Diese Kristallisations- und Lösungsprozesse werden mit den nachfolgend beschriebenen Säulenversuchen weiterführend untersucht, um eine Quantifizierung des Parameters Speichervermögen des Rückstandes vornehmen zu können.

### 3 Säulenversuche

#### 3.1 Versuchsdurchführung

Zur Bestimmung des mineralischen Wassereinbindung und –entbindung wurden insgesamt 4 Säulenversuche für das Rückstandssalz durchgeführt. Das Rückstandssalz wurde hierzu in eine Plexiglassäule mit einem Durchmesser von 19 cm eingebaut. Die Einbaudichte liegt bei den einzelnen Säulen zwischen ca. 1,3 und 1,5 g/cm<sup>3</sup>. Die Einfüllhöhen der einzelnen Säulen liegen bei 90 bzw. 60 cm. Zeitgleich mit dem Einbau des Rückstandes erfolgt die Bestimmung des freien Wassergehalts (s. Kapitel 3.2.5.1.1) anhand mehrerer Proben.

In einer ersten Versuchsanordnung werden die einzelnen Rückstandssäulen mit einem Jahresniederschlag berechnet. Bei einem Bemessungsniederschlag von 600 mm/a ergibt sich eine Wasserzugabe von ca. 150 ml Leitungswasser alle 2-3 Tage. Dies entspricht einer Wasserzugabe von ca. 5,2 mm.

Im Rahmen des 4. Säulenversuchs wurde das Auslaufverhalten des Haldenwassers aus der Rückstandssäule bei Aufgabe von 150 ml untersucht. Vor Aufgabe dieses einmaligen Regenereignisses wird der Rückstand in der Plexiglassäule 1 Woche beobachtet, um das eventuelle Austreten des freien Wassers im Rückstand zu ermitteln. Die Säule wird dabei zur Unterbindung der Evaporation abgedeckt. Nach der Wasseraufgabe wird die Säule wieder abgedeckt und die Abflussmengen bis zum vollständigen Auslaufen der aufgegebenen Wassermenge aufgefangen und ausgewertet.



**Abbildung 2: Darstellung der Säulenversuche**

## 3.2 Versuchsergebnisse

### 3.2.1 Wassergehaltsbestimmung des eingebauten Rückstands

Für den Rückstand am Standort Hattorf wurden im Rahmen der Laboruntersuchungen mehrere Bestimmungen des freien Wassergehaltes vorgenommen. Hierzu wurden die Proben, wie im Kapitel 4.2.3.1 des Bandes 1.3 beschrieben, bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die Ergebnisse der Versuche sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

**Tabelle 2: Freier Wassergehalt Probenmaterial Hattorf**

<b>Probennummer</b>	<b>Freier Wassergehalt [%]</b>
HA 1 (19.04.2010)	2,95
HA 2 (19.04.2010)	3,14
HA 1 (30.06.2011)	3,75
HA 2 (30.06.2011)	2,74
HA 3 (30.06.2011)	2,74
HA 4 (30.06.2011)	5,34
HA 5 (30.06.2011)	4,43
<b>Mittelwert</b>	<b>3,58</b>

Im Mittel wurde ein freier Wassergehalt von 3,58 % gemessen. Die Schwankungen der einzelnen Wassergehalte treten aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzungen des Rückstandsmaterials auf. Hierbei spielt insbesondere das unterschiedliche Probenahmedatum und die zu diesem Zeitpunkt eingesetzten Aufbereitungsverfahren eine entscheidende Rolle. Da der freie Wassergehalt durch die hohen Trocknungstemperaturen von 55° bis 60°C überschätzt wird, erfolgt eine Abrundung des errechneten Mittelwertes auf 3,5 % Wassergehalt.

Die Bestimmung des Kristallwassergehaltes erfolgte, wie beschrieben, durch Trocknung der Proben bei 550°C. Hierbei ergibt sich im Mittel ein Gesamtwassergehalt von 5,0 %.

Nach Abzug des freien Wassergehalts wird für die weiteren Berechnungen ein Kristallwassergehalt (schwach und stark gebunden) an der Gesamtrückstandsmenge von ca. 1,5 % angenommen.

Die Laborprotokolle für die Bestimmung der Wassergehalte sind der Anlage 5 zu entnehmen. Die Proben wurden jeweils aus dem Rückstand entnommen, welcher anschließend in die Säule eingebaut wurde.

### 3.2.2 Versuchsergebnisse des ersten Säulenversuchs

Der erste Säulenversuch wurde im Zeitraum vom 19.04. bis 26.08.2010 durchgeführt. Hierbei wurde der Rückstand der Halde Hattorf in eine Plexiglassäule eingebaut. Die Einbauparameter sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

**Tabelle 3: Ausgangsparameter des Säulenversuchs<sup>1</sup>**

Parameter (Abkürzung)	Versuchswert
Einbauhöhe	90 cm
Volumen	25.650 cm <sup>3</sup>
Einbaudichte	1,5 g/cm <sup>3</sup>
Wassergehalt bei 60 °C <sup>2</sup>	3,04 %
Berechnungsmenge (BM)	5.628,2 ml
Rückstandsbedingte Restfeuchte (RF)	917,1 ml
Entspr. Bemessungsereignis <sup>3</sup>	198,5 mm
Anteil am Jahresniederschlag	32,0 %
Wasserabgabe (W <sub>ab</sub> )	8.188,6 g (bzw. 6.539,1 ml) <sup>4</sup>
Dichte des Abflusses	1,25 g/cm <sup>3</sup>
Puffervermögen (PV)	6,2 ml (bzw. 0,09 %)

Das Puffervermögen in ml errechnet sich nach folgender Formel:

$$PV = (BM + RF) - W_{ab}$$

PV: Puffervermögen in ml

BM: Berechnungsmenge in ml

RF: Rückstandsbedingte Restfeuchte in ml

W<sub>ab</sub> : Wasserabgabe in ml

Das Puffervermögen in % errechnet sich nach folgender Formel:

$$PV_{\%} = PV / (BM+RF) * 100$$

PV<sub>%</sub>: Puffervermögen in %

PV: Puffervermögen in ml

BM: Berechnungsmenge in ml

---

<sup>1</sup> Die in der Tabelle angegebenen Berechnungsergebnisse wurden jeweils gerundet.

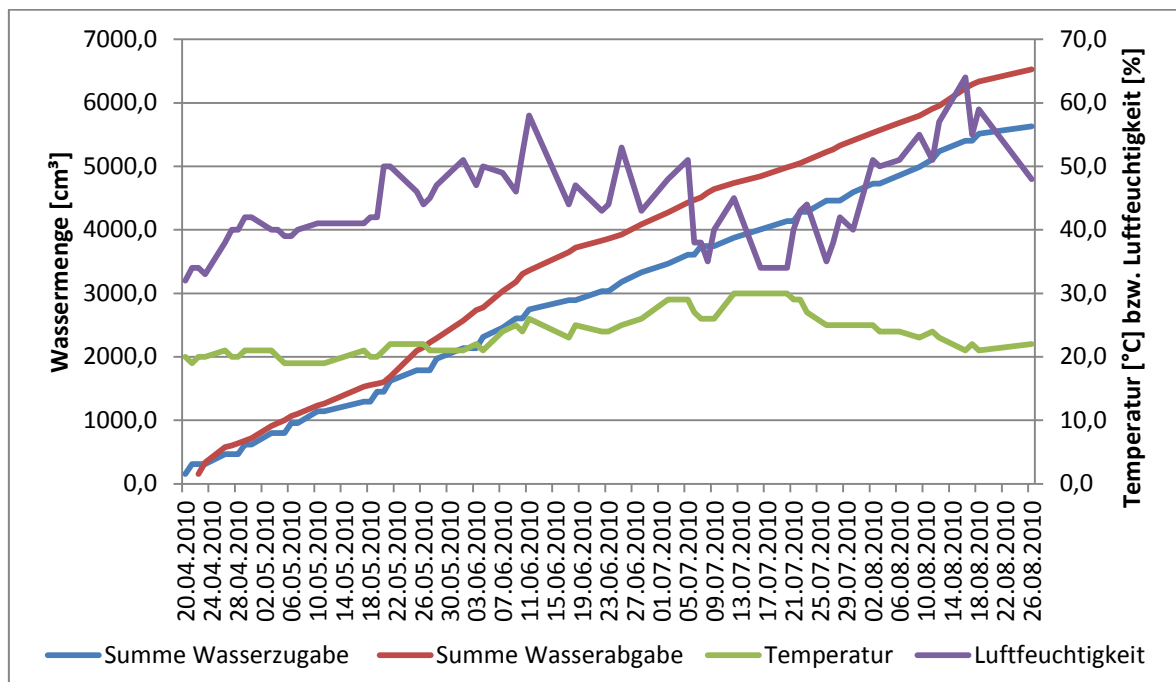
<sup>2</sup> Hierbei handelt es sich um den reinen Wassergehalt, der bei 60 ° C verdunstet.

<sup>3</sup> Der entsprechende Bemessungsregen (625 mm) errechnet sich aus der Berechnungsmenge geteilt durch die berechnete Säulenoberfläche.

<sup>4</sup> Hierbei handelt es sich um den reinen Wassergehalt. Die Aufsalzung wurde durch Einbeziehung der Dichte des Abflusses bei der Berechnung der Wasserabgabe in ml berücksichtigt.

RF: Rückstandsbedingte Restfeuchte in ml

Im Ergebnis der Untersuchungen ergab sich der in der nachfolgenden Abbildung dargestellte Verlauf der Wasserzugabe und –abgabe.



**Abbildung 3: Ergebnisse des 1. Säulenversuchs vom 19.04.2010 bis 26.08.2010**

Das Puffervermögen des Rückstands ergibt sich dann jeweils aus der Summe der Wasseraufgaben zuzüglich des freien Wassergehalts des Rückstands abzüglich der Wasserabgabe korrigiert um den Dichteeinfluss. Die Dichte des Abflusses wurde mit Hilfe eines Pyknometers kontinuierlich bestimmt und liegt zwischen 1,2 und 1,3 g/cm<sup>3</sup>. Für die Berechnungen wird daher ein Mittelwert von 1,25 g/cm<sup>3</sup> eingesetzt. Insgesamt ergibt sich eine Wasserabgabe von 8.188,6 g. Dies entspricht einer korrigierten Wasserabgabe von 6.539,1 ml. Hieraus ergibt sich ein Puffervermögen von 6,2 ml bzw. 0,09 %. Zu Beginn der Messreihe ist zu beobachten, dass eine zeitliche Verschiebung zwischen der ersten Wasseraufgabe und der ersten Wasserabgabe besteht. Im Fall dieses Versuchs erfolgte die Wasserabgabe zwei Tage nach Aufgabe des ersten Regenereignisses. Eine Pufferwirkung des Rückstandssalzes konnte somit nachgewiesen werden. Im Rahmen der weiteren Säulenversuche wurden diese Erkenntnisse weiter verifiziert.

Weiterhin wurden im Rahmen der Versuchsdurchführung die Ablaugungsverluste dokumentiert und Aufnahmen der Oberflächenbeschaffenheit erstellt. Nachfolgend ist die Oberfläche der Rückstandssalze vor Beginn der Bewässerung am 19.04.2010 (Abbildung 4, links) und am 16.07.2010 nach einer Wasserzugabe von 4.007,7 ml und einer Ablaugung von 12,2 cm (664,58 mm; Abbildung 4, rechts) dargestellt.



**Abbildung 4: Oberflächenbeschaffenheit des 1. Säulenversuchs**

In der Abbildung sind das Ablaugungsverhalten und die Ausbildung der charakteristischen Oberfläche von Rückstandshalden deutlich zu erkennen. Bei diesem Säulenversuch ergibt sich eine Ablaugung der Oberfläche von ca. 12,2 cm in einem Zeitraum von ca. 4 Monaten.

Im Zeitraum vom 18.10.2010 bis 16.05.2011 wurde der zuvor beschriebene Säulenversuch mit dem eingebauten Rückstandssalz in einer 2. Stufe fortgesetzt.

**Tabelle 4: Ausgangsparameter des ersten Säulenversuchs, 2. Stufe<sup>5</sup>**

Parameter	Versuchswert
Berechnungsmenge	8.625,4 ml
Rückstandsbedingte Restfeuchte	963,7 ml
Entspr. Bemessungsereignis <sup>6</sup>	304,2 mm
Anteil am Jahresniederschlag <sup>7</sup>	48,67 %

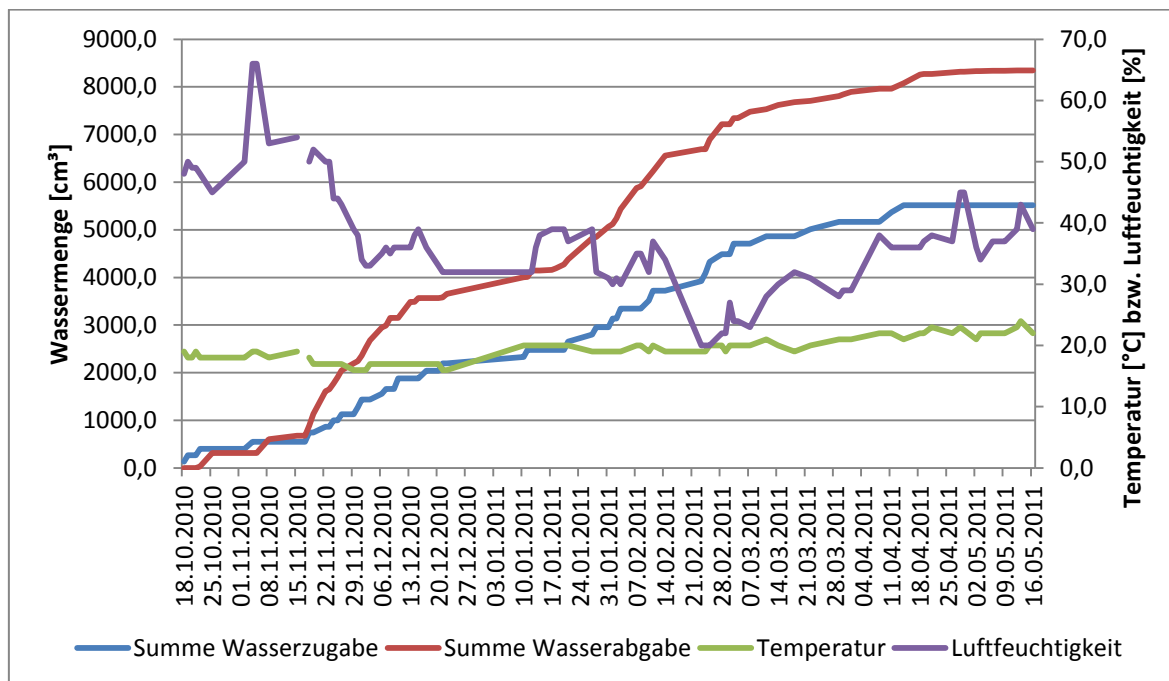
<sup>5</sup> Die in der Tabelle angegebenen Berechnungsergebnisse wurden jeweils gerundet.

<sup>6</sup> Der entsprechende Bemessungsregen errechnet sich aus der Berechnungsmenge geteilt durch die berechnete Säulenoberfläche.

<sup>7</sup> Bezogen auf ein durchschnittliches Jahresniederschlagsereignis von 625 mm.

Parameter	Versuchswert
Wasserabgabe	10,0 kg (bzw. 8.403,4 ml) <sup>8</sup>
Dichte des Abflusses	1,19 g/cm <sup>3</sup>
Puffervermögen	1.195,7 ml bzw. 12,5 %

Im Ergebnis der Untersuchungen ergibt sich der in der nachfolgenden Abbildung dargestellte Verlauf der Wasserzugabe und –abgabe.

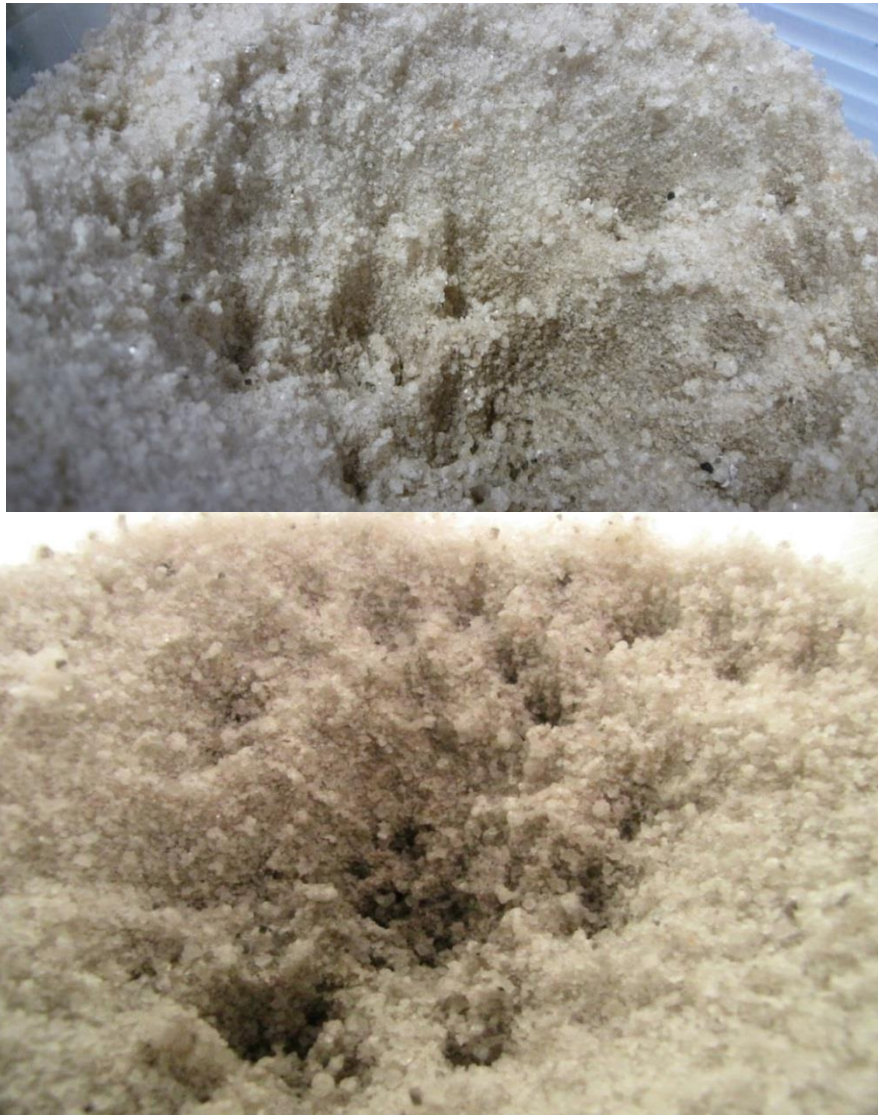


**Abbildung 5: Ergebnisse des 1. Säulenversuchs, 2. Stufe, vom 18.10.2010 bis 16.05.2011**

Das Puffervermögen des Rückstands ergibt sich dann jeweils aus der Summe der Wasseraufgaben zuzüglich des freien Wassergehalts des Rückstands abzüglich der Wasserabgabe korrigiert um den Dichteinfluss. Die Dichte des Abflusses wurde kontinuierlich bestimmt und liegt zwischen 1,18 und 1,20 g/cm<sup>3</sup>. Für die Berechnungen wurde daher ein Mittelwert von 1,19 g/cm<sup>3</sup> eingesetzt. Insgesamt ergibt sich eine Wasserabgabe von 10,0 kg. Dies entspricht einer korrigierten Wasserabgabe von 8.403,4 ml. Hieraus ergibt sich ein Puffervermögen von 1.195,7 ml bzw. 12,5 %. Die zeitliche Verschiebung zwischen der ersten Wasseraufgabe und der ersten Wasserabgabe liegt bei diesem Säulenversuch bei 4 Tagen nach Aufgabe des ersten Regenereignisses. Eine Pufferwirkung des Rückstandssalzes konnte somit nachgewiesen werden.

<sup>8</sup> Hierbei handelt es sich um den reinen Wassergehalt. Die Aufsalzung wurde durch Einbeziehung der Dichte des Abflusses bei der Berechnung der Wasserabgabe in ml berücksichtigt.

Weiterhin wurden im Rahmen der Versuchsdurchführung die Ablaugungsverluste dokumentiert und Aufnahmen der Oberflächenbeschaffenheit erstellt. Nachfolgend ist die Oberfläche des Rückstandssalzes vor Beginn der Bewässerung am 18.10.2010 (oben in der Abbildung) und am 16.05.2011 nach einer Wasserzugabe von 8.625,4 ml (304,2 mm; unten in der Abbildung) zu sehen.



**Abbildung 6: Oberflächenbeschaffenheit des 1. Säulenversuchs Stufe 2**

In der Abbildung ist die weitergehende Veränderung der Oberfläche zu erkennen. Hierbei ergibt sich eine Ablaugung der Oberfläche von 5,1 cm in einem Zeitraum von ca. 7 Monaten.

### 3.2.3 Versuchsergebnisse des zweiten Säulenversuchs

Der zweite Säulenversuch wurde zwischen dem 04.07.2011 und dem 25.03.2013 durchgeführt. Hierbei wurde der Rückstand der Halde Hattorf in eine Plexiglassäule eingebaut mit den nachfolgenden Ausgangsparametern.

**Tabelle 5: Ausgangsparameter des zweiten Säulenversuchs<sup>9</sup>**

Parameter	Versuchswert
Einbauhöhe	90 cm
Volumen	25.650 cm <sup>3</sup>
Einbaudichte	1,3 g/cm <sup>3</sup>
Wassergehalt bei 60 °C <sup>10</sup>	3,09 %
Berechnungsmenge	23.127,8 ml
Rückstandsbedingte Restfeuchte	831,6 ml
Entspr. Bemessungsereignis <sup>11</sup>	815,7 mm
Anteil am Jahresniederschlag <sup>12</sup>	130,5 %
Wasserabgabe	27,5 kg (bzw. 22,6 l) <sup>13</sup>
Dichte des Abflusses	1,2 g/cm <sup>3</sup>
Puffervermögen	1,39 l bzw. 5,78 %

Im Ergebnis der Untersuchungen ergab sich der in der nachfolgenden Abbildung dargestellte Verlauf der Wasserzugabe und –abgabe.

---

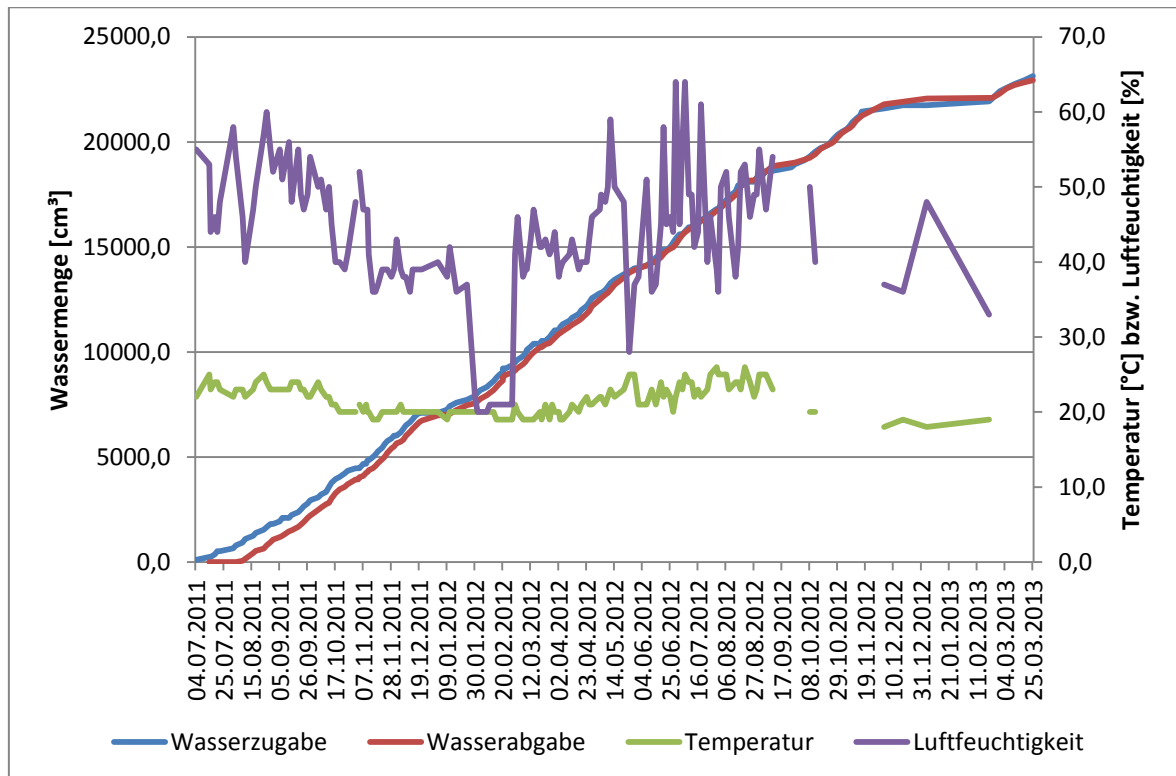
<sup>9</sup> Die in der Tabelle angegebenen Berechnungsergebnisse wurden jeweils gerundet.

<sup>10</sup> Hierbei handelt es sich um den reinen Wassergehalt, der bei 60 ° C verdunstet.

<sup>11</sup> Der entsprechende Bemessungsregen errechnet sich aus der Berechnungsmenge geteilt durch die berechnete Säulenoberfläche.

<sup>12</sup> Bezogen auf ein durchschnittliches Jahresniederschlagsereignis von 625 mm.

<sup>13</sup> Hierbei handelt es sich um den reinen Wassergehalt. Die Aufsalzung wurde durch Einbeziehung der Dichte des Abflusses bei der Berechnung der Wasserabgabe in ml berücksichtigt.



**Abbildung 7: Ergebnisse des 2. Säulenversuchs vom 04.07.2011 bis 25.03.2013**

Das Puffervermögen des Rückstands ergibt sich aus der Summe der Wasseraufgaben zuzüglich des freien Wassergehalts des Rückstands abzüglich der Wasserabgabe korrigiert um den Dichteeinfluss. Die Dichte des Abflusses wurde kontinuierlich bestimmt und liegt zwischen 1,1 und 1,3 g/cm<sup>3</sup>. Für die Berechnungen wurde daher ein Mittelwert von 1,2 g/cm<sup>3</sup> eingesetzt. Insgesamt ergibt sich eine Wasserabgabe von 27,5 kg. Dies entspricht einer korrigierten Wasserabgabe von 22,6 l. Hieraus ergibt sich ein Puffervermögen von 1,39 l bzw. 5,78 %. Zu Beginn der Messreihe ist zu beobachten, dass eine zeitliche Verschiebung zwischen der ersten Wasseraufgabe und der ersten Wasserabgabe besteht. Im Fall dieses Versuchs erfolgte die Wasserabgabe 35 Tage nach Aufgabe des ersten Regenereignisses. Eine Pufferwirkung des Rückstandssalzes konnte somit nachgewiesen werden.

Weiterhin wurden im Rahmen der Versuchsdurchführung die Ablaugungsverluste dokumentiert und Aufnahme der Oberflächenbeschaffenheit erstellt. Nachfolgend ist die Oberfläche der Rückstandssalz vor Beginn der Bewässerung am 04.07.2011 (links in der Abbildung) und am 28.03.2012 nach einer Wasserzugabe von 10,88 l (383,8 mm; rechts in der Abbildung) dargestellt.



**Abbildung 8: Oberflächenbeschaffenheit des 2. Säulenversuchs**

In der Abbildung 8 sind das Ablaugungsverhalten und die Ausbildung der charakteristischen Oberfläche von Rückstandshalden gut zu erkennen. Bei diesem Säulenversuch ergibt sich eine Ablaugung der Oberfläche von 17,5 cm in einem Zeitraum von ca. 7 Monaten. Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, ergeben sich im Bereich der Oberfläche der Rückstandssäule unterschiedliche Ablaugungsbereiche. Dies kann zum einen durch eine unterschiedliche Zusammensetzung des Rückstandssalzes und bevorzugte Ablaugungsbereiche und zum anderen durch mögliche Wandeffekte hervorgerufen werden. Diese lassen sich bei der Versuchsdurchführung nicht vollständig vermeiden, sondern lediglich durch eine möglichst gleichmäßige Wasseraufgabe minimieren.

### 3.2.4 Versuchsergebnisse des dritten Säulenversuchs

Der dritte Säulenversuch wurde im Zeitraum vom 04.07.2011 bis 04.05.2012 durchgeführt. Hierbei wurde der Rückstand der Halde Hattorf in eine Plexiglassäule eingebaut mit den nachfolgenden Ausgangsparametern.

**Tabelle 6: Ausgangsparameter des dritten Säulenversuchs<sup>14</sup>**

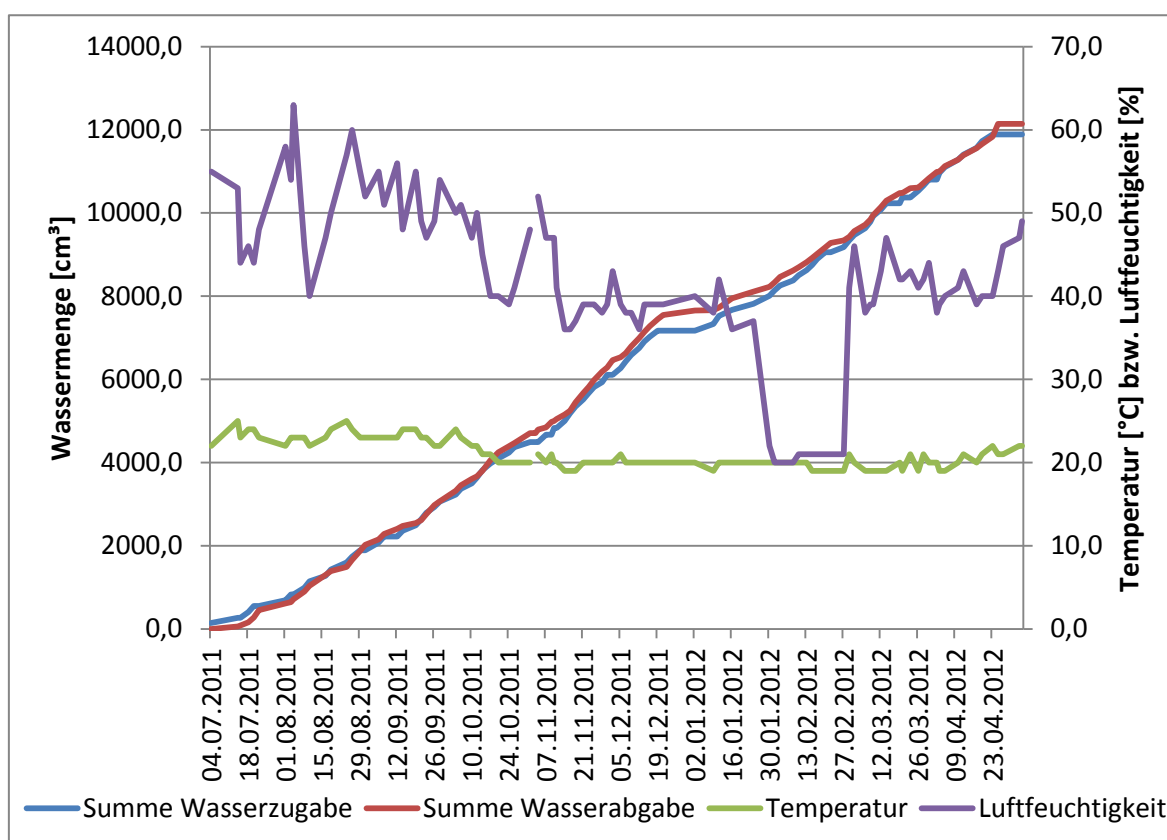
Parameter	Versuchswert
Einbauhöhe	60 cm
Volumen	17.100 cm <sup>3</sup>
Einbaudichte	1,375 g/cm <sup>3</sup>
Wassergehalt bei 60 °C <sup>15</sup>	4,53 %
Berechnungsmenge	11.891,9 ml

<sup>14</sup> Die in der Tabelle angegebenen Berechnungsergebnisse wurden jeweils gerundet.

<sup>15</sup> Hierbei handelt es sich um den reinen Wassergehalt, der bei 60 ° C verdunstet.

Parameter	Versuchswert
Rückstandsbedingte Restfeuchte	845,85 ml
Entspr. Bemessungsereignis <sup>16</sup>	419,42 mm
Anteil am Jahresniederschlag <sup>17</sup>	66,16 %
Wasserabgabe	15,1 kg (bzw. 12,1 l) <sup>18</sup>
Dichte des Abflusses	1,25 g/cm <sup>3</sup>
Puffervermögen	600,4 ml bzw. 4,71 %

Im Ergebnis der Untersuchungen ergab sich der in der nachfolgenden Abbildung dargestellte Verlauf der Wasserzugabe und –abgabe.



**Abbildung 9: Ergebnisse des 3. Säulenversuchs vom 04.07.2011 bis 04.05.2012**

<sup>16</sup> Der entsprechende Bemessungsregen errechnet sich aus der Beregnungsmenge geteilt durch die beregnete Säulenoberfläche.

<sup>17</sup> Bezogen auf ein durchschnittliches Jahresniederschlagsereignis von 625 mm.

<sup>18</sup> Hierbei handelt es sich um den reinen Wassergehalt. Die Aufsalzung wurde durch Einbeziehung der Dichte des Abflusses bei der Berechnung der Wasserabgabe in ml berücksichtigt.

Das Puffervermögen des Rückstands ergibt sich dann jeweils aus der Summe der Wasseraufgaben zuzüglich des freien Wassergehalts des Rückstands abzüglich der Wasserabgabe korrigiert um den Dichteinfluss. Die Dichte des Abflusses wurde kontinuierlich bestimmt und liegt zwischen 1,2 und 1,3 g/cm<sup>3</sup>. Für die Berechnungen wurde daher ein Mittelwert von 1,25 g/cm<sup>3</sup> eingesetzt. Insgesamt ergibt sich eine Wasserabgabe von 15,1 kg. Dies entspricht einer korrigierten Wasserabgabe von 12,1 l. Hieraus ergibt sich ein Puffervermögen von 600,4 ml bzw. 4,71 %. Zu Beginn der Messreihe ist zu beobachten, dass eine zeitliche Verschiebung zwischen der ersten Wasseraufgabe und der ersten Wasserabgabe besteht. Im Fall dieses Versuchs erfolgte die Wasserabgabe 10 Tage nach Aufgabe des ersten Regenereignisses. Eine Pufferwirkung des Rückstandssalzes konnte somit nachgewiesen werden.

Weiterhin wurden im Rahmen der Versuchsdurchführung die Ablaugungsverluste dokumentiert und Aufnahme der Oberflächenbeschaffenheit erstellt. Nachfolgend ist die Oberfläche der Rückstandssalz vor Beginn der Bewässerung am 04.07.2011 (Abbildung 10, links) und am 28.03.2012 nach einer Wasserzugabe von 10,66 l (375,9 mm; Abbildung 10, rechts).



**Abbildung 10: Oberflächenbeschaffenheit des 3. Säulenversuchs**

In der Abbildung sind das Ablaugungsverhalten und die Ausbildung der charakteristischen Oberfläche von Rückstandshalden gut zu erkennen. Bei diesem Säulenversuch ergibt sich eine Ablaugung der Oberfläche von 21,3 cm in einem Zeitraum von ca. 7 Monaten.

### **3.2.5 Versuchsergebnisse des vierten Säulenversuchs**

Der vierte Säulenversuch wurde als Auslaufversuch nach Aufgabe eines einmaligen Regenereignisses durchgeführt. Er wurde im Zeitraum vom 07.05.2012 bis 16.10.2012 durchgeführt. Hierbei wurde der Rückstand der Halde Hattorf in eine Plexiglassäule eingebaut mit den nachfolgenden Ausgangsparametern.

**Tabelle 7: Ausgangsparameter des vierten Säulenversuchs<sup>19</sup>**

Parameter	Versuchswert
Einbauhöhe	60 cm
Volumen	17.100 cm <sup>3</sup>
Einbaudichte	1,5 g/cm <sup>3</sup>
Wassergehalt bei 60 °C <sup>20</sup>	3,33 %
Berechnungsmenge	149,5 ml
Rückstandsbedingte Restfeuchte	467,82 ml
Entspr. Bemessungsereignis <sup>21</sup>	419,42 mm
Anteil am Jahresniederschlag <sup>22</sup>	5,27 %
Wasserabgabe	315,90 g (bzw. 263,25 ml) <sup>23</sup>
Dichte des Abflusses	1,20 g/cm <sup>3</sup>
Puffervermögen	354,07 ml bzw. 57,36 %

Im Ergebnis der Untersuchungen ergab sich der in der nachfolgenden Abbildung dargestellte Verlauf der Wasserzugabe und –abgabe.

---

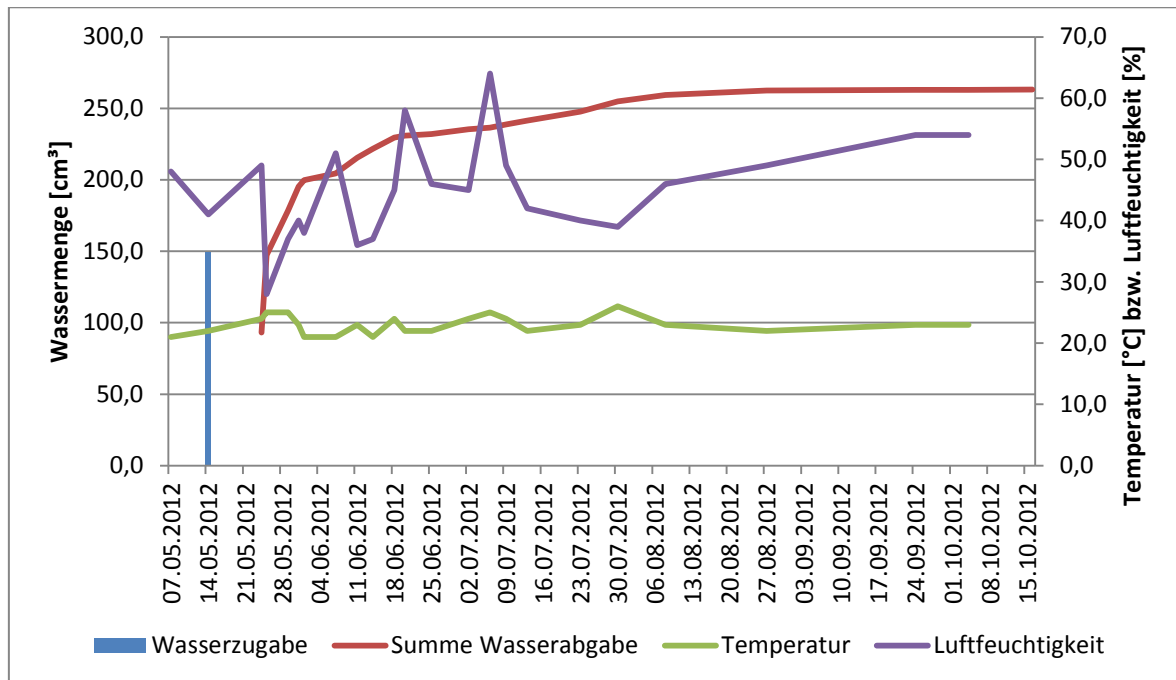
<sup>19</sup> Die in der Tabelle angegebenen Berechnungsergebnisse wurden jeweils gerundet.

<sup>20</sup> Hierbei handelt es sich um den reinen Wassergehalt, der bei 60 ° C verdunstet.

<sup>21</sup> Der entsprechende Bemessungsregen errechnet sich aus der Berechnungsmenge geteilt durch die berechnete Säulenoberfläche.

<sup>22</sup> Bezogen auf ein durchschnittliches Jahresniederschlagsereignis von 625 mm.

<sup>23</sup> Hierbei handelt es sich um den reinen Wassergehalt. Die Aufsalzung wurde durch Einbeziehung der Dichte des Abflusses bei der Berechnung der Wasserabgabe in ml berücksichtigt.



**Abbildung 11: Ergebnisse des 4. Säulenversuchs vom 07.05.2012 bis 16.10.2012**

Die erste Wasserabgabe erfolgt 10 Tage nach Wasseraufgabe. Bei der Betrachtung der Wasserabgabe über einen Messzeitraum von einem halben Jahr ergibt sich eine charakteristische Auslaufkurve. Etwa Zweidrittel der Wasseraufgabe wird nach Durchfluss durch die Rückstandssäule in etwa 7 Tagen wieder abgegeben. Die übrige, aufgegebene Wassermenge fließt im Anschluss daran langsamer ab. Die Ablaufmenge ist hierbei höher als die aufgegebene Wassermenge. Dies lässt darauf schließen, dass ein Teil des restfeuchtebedingte Wassers sowie bei Auflösung des Rückstandes auch ein geringer Anteil des Kristallwassers aus der Säule ausgetragen wird. Eine Speicherung im Rückstand ist über den Versuchszeitraum jedoch nicht nachweisbar.

### 3.2.6 Ergebnisauswertung des Säulenversuchs für den Standort Hattorf

In den vier durchgeführten Säulenversuchen ergeben sich jeweils vergleichbare Kurvenverläufe der Auslaufkurven. Jeweils nach Wasseraufgabe wird der größere Anteil aufgegebenen Wassers zeitversetzt wieder abgegeben. Ausgehend von dieser Tatsache ergibt sich ein gewisses Puffervermögen des Rückstands, welches bei den einzelnen Versuchen unterschiedlich hoch ist. Nachfolgend sind die Ergebnisse der einzelnen Säulenversuche gegenüber gestellt.

**Tabelle 8: Vergleich der Ergebnisse der Säulenversuche<sup>24</sup>**

<b>Säulen- versuch Nr.</b>	<b>Einbau- höhe [cm]</b>	<b>Versuchs- zeitraum [d]</b>	<b>Puffer- vermögen [%]</b>	<b>Zeitpunkt der Wasser- abgabe [d]</b>	<b>Durchfluss- geschwindigkeit [m/s]</b>
1	90	339	12,5	4	$2,6 \cdot 10^{-6}$
2	90	406	5,8	35	$2,6 \cdot 10^{-6}$
3	60	305	4,7 (7,1) <sup>25</sup>	10 (15) <sup>26</sup>	$6,9 \cdot 10^{-7}$
4	60	162	-	10 (15) <sup>25</sup>	$6,9 \cdot 10^{-7}$

Aus den Säulenversuchen ist zu erkennen, dass der Rückstand wie ein Puffer wirkt. Der Zeitpunkt der ersten Wasserabgabe lässt sich somit im Mittel bei 17,25 Tagen für eine Salzsäule von 90 cm Länge bei einer Lagerungsdichte von  $1,5 \text{ g/cm}^3$  bestimmen. Weiterhin wurde aus dem Zeitpunkt der ersten Wasserabgabe und der jeweiligen Höhe der Rückstandssäule die Durchflussgeschwindigkeit ermittelt. Hierbei ergibt sich bei einer Lagerungsdichte von  $1,5 \text{ g/cm}^3$  im Mittel eine Durchflussgeschwindigkeit von  $1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ .

Eine mineralische Wassereinbindung und –entbindung von Haldenwasser über einen längeren Zeitraum konnte innerhalb des Versuchszeitraums für den Rückstand des Standortes Hattorf nicht nachgewiesen werden.

Wie bereits im Kap. 3.2.4 des Bandes 1.3 beschrieben findet eine mineralogische Einbindung von Wassermolekülen unter definierten Bedingungen statt. Im Rahmen der Auswertung der Säulenversuche konnte aber keine längerfristige mineralische Wassereinbindung von Haldenwasser innerhalb des Versuchszeitraums nachgewiesen werden. Daher ist davon auszugehen, dass der Prozess der Wassereinbindung durch die Lösung der Hydrate überdeckt wird.

Bei Vergleich der einzelnen Säulenversuche ist zu erkennen, dass das Puffervermögen in Abhängigkeit von der Versuchsdauer, der Höhe der Säule, der Zusammensetzung des Rückstandssalzes und des Ablaugungsverhaltens (Bildung von bevorzugten Wegsamkeiten) innerhalb der Säule zwischen 5,8 % bis 12,5 % schwankt. Aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren ist eine direkte Übertragung des Puffervermögens auf die Rückstandshalde jedoch nicht möglich. In jedem Fall führt das Puffervermögen des Rückstands aber zu einer Vergleichmäßigung des Haldenwasseranfalls und somit zu einer Pufferung von erhöhten Niederschlagsereignissen.

Parallel zu den Säulenversuchen werden für die Bestimmung der mineralischen Wassereinbindung und –entbindung die Ergebnisse aus den Untersuchungen im

<sup>24</sup> Die in der Tabelle angegebenen Berechnungsergebnisse wurden jeweils gerundet.

<sup>25</sup> Die in der Tabelle angegebenen Berechnungsergebnisse wurden jeweils gerundet.

<sup>26</sup> Zeitpunkt der Wasserabgabe hochgerechnet auf eine Säulenhöhe von 90cm.

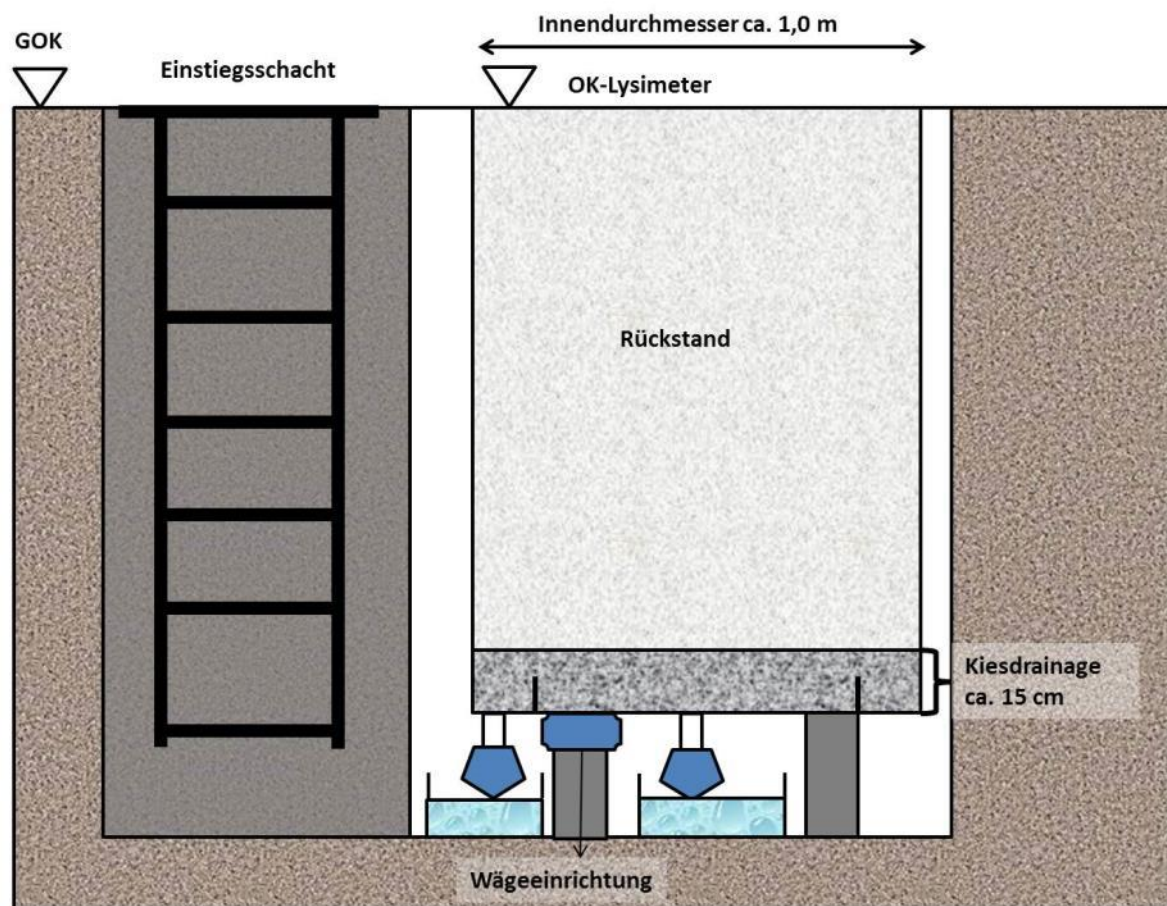
wägbaren Lysimeter (siehe Kap. 4) herangezogen, um die Einflussfaktoren Evaporation sowie mineralischen Wassereinbindung und –entbindung differenziert zu betrachten.

## 4 Lysimeterversuch

Für die Bestimmung der Evaporation wurde der Rückstand in ein wägbares Lysimeter eingebaut. Im Rahmen des Versuchs wird durch den Einsatz einer Wägeeinrichtung kontinuierlich die Gesamtmasse des Lysimeters aufgezeichnet.

### 4.1.1 Versuchsdurchführung des Lysimeterversuchs in Müncheberg

Zur Bestimmung der Evaporation wurde frischer Rückstand am 09.08.2012 auf dem Firmengelände der ugt Umweltgerätetechnik mit Sitz in Müncheberg lagenweise in das wägbare Lysimeter eingebaut. In der nachfolgenden Abbildung ist der schematische Aufbau des wägbaren Lysimeters dargestellt.



**Abbildung 12: Darstellung des wägbaren Lysimeters am Standort Müncheberg**

Das wägbare Lysimeter, bestehend aus PE-HD, weist eine Höhe von ca. 2,0 m und eine Bodenfläche von ca. 1 m<sup>2</sup> mit segmentiertem Boden auf. Durch die Segmentierung ist es möglich, den Abfluss im Randbereich separat zu fassen und mögliche Beeinträchtigungen durch Randeinflüsse auszuschließen.



**Abbildung 13: Lysimeterboden (segmentiert), Einbau Dränschicht**

Beim Einbau des Rückstands wurde am Boden zunächst eine 12 cm mächtige Drainageschicht aus Filterkies (Körnung 16/32) eingebaut.



**Abbildung 14: Dränschicht (vollständig hergestellt)**

Darüber wurde der Rückstand lagenweise in Schichtstärken von 7,5 bis 9,7 cm in das Lysimeter eingebaut. Der Rückstand wurde in Säcken zwischen 30 und 55 kg geliefert. Für jede Einbauschicht wurden drei Säcke des Rückstandssalzes verwendet. Somit ergab sich eine Einbaumasse zwischen 105 und 145 kg pro Einbauschicht. Nach dem Einbau des Rückstands wurde das Gesamtgewicht des Lysimeters bestimmt. Es lag bei 3.227 kg, bestehend aus 2.845 kg feuchtem Rückstand. Das Rückstandssalz besaß eine Mächtigkeit von 188 cm und eine mittlere Dichte von  $1,52 \text{ g/cm}^3$ .



**Abbildung 15: Lysimeter nach Einbau des Rückstands**

Während des Einbaus des Rückstands wurden aus der 4., 8. und 15. Schicht Rückstandsproben entnommen und der Wassergehalt im Labor bestimmt. Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit wurde eine weitere Probe des Rückstands entnommen. Die Fotodokumentation des Einbaus ist der Anlage 2 zu entnehmen.

Die Höhen, Massen und Dichten der einzelnen Schichten sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

Schicht		Schichtstärke [cm]	Masse [kg]	Dichte [g/cm³]
Probennahme	22	7,50	105,60	1,41
	21	8,20	124,30	1,52
	20	8,30	126,80	1,53
	19	8,00	130,40	1,63
	18	8,80	129,80	1,48
	17	8,70	137,50	1,58
	16	7,90	126,90	1,61
	15	9,00	129,70	1,44
	14	8,50	131,50	1,55
	13	8,80	138,50	1,57
Probennahme	12	9,50	144,90	1,53
	11	9,70	145,60	1,50
	10	9,50	140,90	1,48
	9	8,90	130,20	1,46
Probennahme	8	8,10	123,50	1,52
	7	7,70	117,10	1,52
	6	8,40	120,30	1,43
	5	8,80	130,60	1,48
Probennahme	4	8,20	124,10	1,51
	3	9,17	137,00	1,49
	2	7,83	125,20	1,60
Drainage	1	8,50	124,90	1,47
		12,00	381,80	—

**Abbildung 16: Darstellung des wägbaren Lysimeters**

Die Versuche wurden im Zeitraum vom 09.08.2012 bis 31.07.2013 durchgeführt. Die Ergebnisse aus den Untersuchungen des wägbaren Lysimeters werden im nachfolgenden Kapitel dargestellt.

Das Lysimeter war nach Einbau des Rückstandssalzes der natürlichen Bewetterung am Standort ausgesetzt. Die Wetterdaten wurden in der angrenzenden Wetterstation erfasst und für die Auswertung der Ergebnisse herangezogen.

#### **4.1.2 Probennahme aus dem Salzkörper nach Abschluss des Versuchs**

Nach Abschluss des Versuchszeitraums wurden am 23.10.2013, vor dem Ausbau des Rückstandskörpers, mit Hilfe zweier Kernbohrungen Proben aus dem Rückstandssalz entnommen, um die Zusammensetzung des Rückstands nach einem Jahr Bewässerung zu ermitteln. Die Bohrungen erfolgten im drehenden Verfahren mit Luftspülung nach DIN EN ISO 22475-1 mit einem Bohrdurchmesser größer 100 mm bis zu einer Teufe von ca. 185 cm. Die Bohrkern aus der Bohrmaßnahme wurden hierbei möglichst ungestört entnommen. In der nachfolgenden Abbildung ist die Lage der beiden Bohrpunkte dargestellt.



**Abbildung 17: Lage der Bohrpunkte im Lysimeter**

Die Entnahme vollständiger Kerne war aufgrund der Rückstandsbeschaffenheit nicht möglich. Dies hängt damit zusammen, dass bei ca. 1,8 m Höhe des Salzkörpers keine ausreichende Auflast für die Verfestigung des Salzkörpers vorhanden ist, wie sie an den

Rückstandshalden vorherrscht. Aus diesem Grund wurden die Kerne in mehreren Teilen entnommen. In den oberen Schichten war eine Entnahme von Teilkernen möglich. Im unteren Bereich der Bohrungen war nur noch die Entnahme von Bohrkern möglich. Dies hängt u.a. vermutlich mit dem Wassergehalt des Rückstandssalzes innerhalb des Lysimeters zusammen.

In der nachfolgenden Tabelle sind die einzelnen Proben sowie die Entnahmetiefen und der Untersuchungsumfang dargestellt.

**Tabelle 9: Proben der 1. Bohrung**

Proben-Nr.:	Entnahmetiefe:	Probenbeschaffenheit	Wassergehalt:	mineralog. Untersuchungen:
1	0 - 8,5 cm	Bohrkern, Tracer erkennbar	X	X
2		Bohrklein, Tracer erkennbar		
3	8,5 - 22 cm	Bohrkern, Tracer Auslaufzone		
4	22 - 40 cm	Bohrkern, einzelne Stellen vom Tracer zu erkennen		
5	40 - 62 cm	Bohrkern		
6	62 - 80 cm	Bohrkern		
7	80 - 90 cm	Bohrkern	X	X
8	90 - 110 cm	Bohrkern (12 cm) + Bohrklein		
9	110 - 130 cm	Bohrklein		
10	130 - 140 cm	Bohrklein		
11	140 - 156 cm	Bohrklein		
12	156 - 168 cm	Bohrklein	X	X

**Tabelle 10: Proben der 2. Bohrung**

Proben-Nr.:	Entnahmetiefe:	Probenbeschaffenheit	Wassergehalt:	mineralog. Untersuchungen:
1	0 - 11 cm	Bohrkern, Tracer erkennbar	X	X
2	11 - 23 cm	Bohrkern, Spuren von Tracer		
3	23 - 38 cm	Bohrkern		
4	38 - 47 cm	Bohrkern (2 Teile)		
5	47 - 60 cm	Bohrklein		
6	60 - 70 cm	Bohrklein		
7	70 - 83 cm	Bohrklein		
8	83 - 86 cm	Bohrklein	X	
9	86 -100 cm	Bohrkern		X
10	100 - 110 cm	Bohrklein		
11	110 -125 cm	Bohrklein		
12	125 - 130 cm	Bohrklein		
13	130 - 145 cm	Bohrklein		
14		Bohrklein		
15		Bohrklein		
16	145 - 153 cm	Bohrklein		
17	153 - 163 cm	Bohrklein		
18	163 - 168 cm	Bohrklein, bräunliche Verfärbung vermutlich durch hohen Wasseranteil	X	X

Bei der ersten Bohrung ließen sich etwa bis zu einer Tiefe von ca. 102 cm Bohrkern entnehmen; bei der zweiten Bohrung nur bis zu einer Tiefe von ca. 47 cm.

Die Fotodokumentation zu der Probennahme ist in der Anlage 3.1 und 3.2 dargestellt.

### 4.1.3 Untersuchungsprogramm und -ergebnisse

#### 4.1.3.1 Wassergehaltsuntersuchungen des Rückstands beim Einbau in das Lysimeter

Für die während des Einbaus entnommenen Proben wurde der gravimetrische Wassergehalt in Anlehnung an die DIN 18121-1 bestimmt. Die Trocknung der Proben erfolgte bei einer Temperatur von ca. 55 °C. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

**Tabelle 11: Wassergehalt des Rückstandes beim Einbau in das Lysimeter**

Bezeichnung	Wassergehalt [%]
4. Lage	5,0
8. Lage	7,3
15. Lage	4,9
<b>Mittelwert</b>	<b>5,8</b>

Das Versuchsprotokoll ist der Anlage 4 zu entnehmen.

Aus dem mittleren Wassergehalt des Rückstands ergibt sich ein restfeuchtebedingter Haldenwassergehalt von 126,4 l bei einem Rückstandsgewicht von 2.845,3 kg und einer mittleren Dichte des Salzwassers von 1,294 g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.1.3.2 Wassergehaltsbestimmung des Rückstands am Ende der Versuchslaufzeit

Für die am Ende der Versuchslaufzeit entnommenen Proben wurde der Wassergehalt in Anlehnung an die DIN 18121-1 bestimmt. Die Trocknung der Proben erfolgte bei einer Temperatur von ca. 55 °C. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

**Tabelle 12: Wassergehalte der Bohrproben am Ende der Versuchslaufzeit**

Probe - Nr.	Wassergehalt [%]
<b>Bohrung 1</b>	
1	2,2
7	4,0
12	13,2
<b>Mittelwert</b>	<b>6,5</b>

Probe - Nr.	Wassergehalt [%]
<b>Bohrung 2</b>	
1	2,5
8	3,1
18	16,1
<b>Mittelwert</b>	<b>7,2</b>

Wie aus den Untersuchungsergebnissen zu erkennen ist, nimmt der Wassergehalt nach unten hin zu. In der unteren Lage liegt er bei mehr als 10% und damit doppelt so hoch wie bei Einbau des Rückstandssalzes.

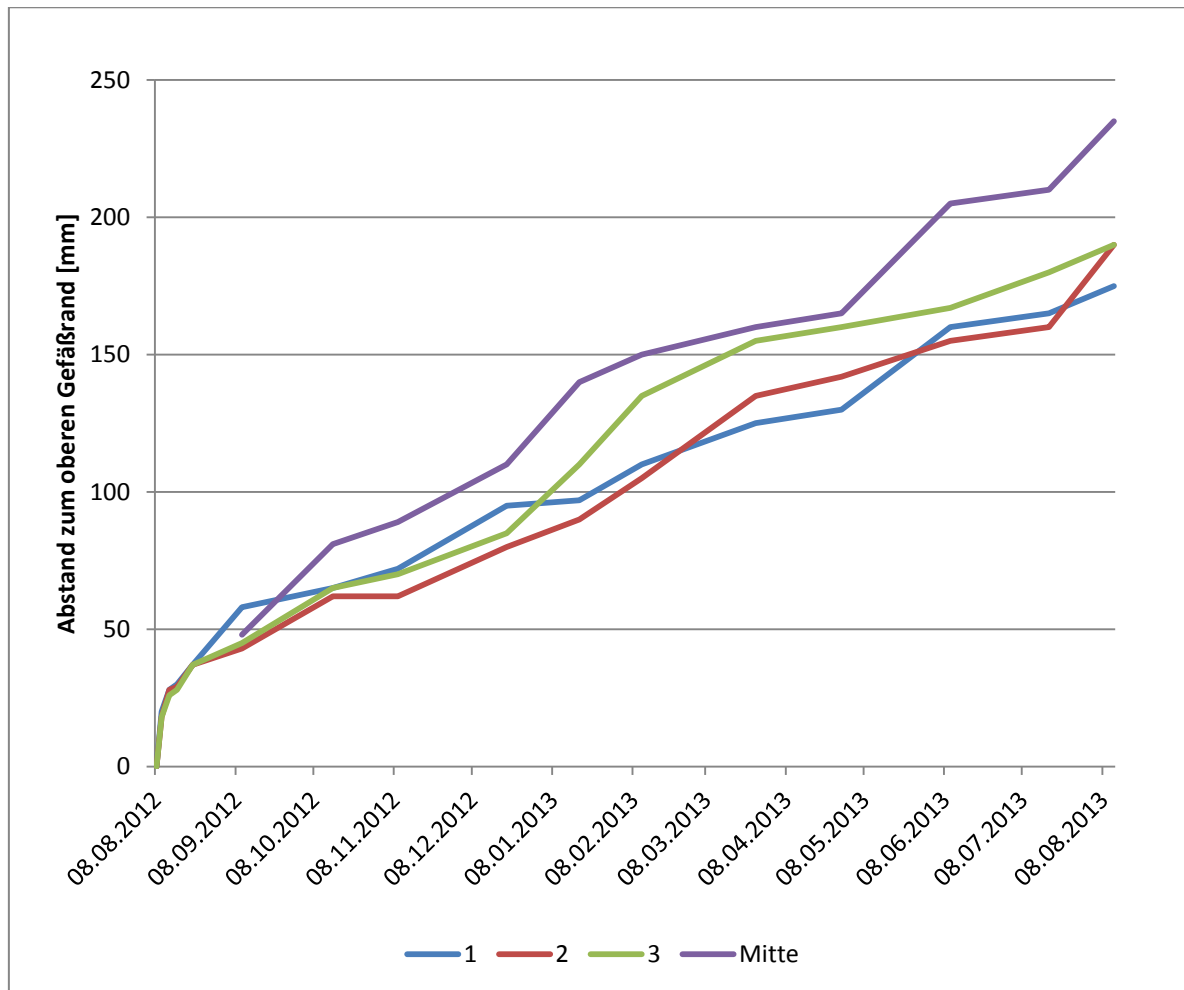
Das Versuchsprotokoll liegt dem Bericht als Anlage 4 bei.

#### 4.1.3.3 Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwerts

An der Probe der 8. Lage wurde der Durchlässigkeitsbeiwert nach DIN 18130-1 bestimmt. Das Rückstandssalz wurde hierbei mit einer Dichte von  $1,57 \text{ g/cm}^3$  in die Triaxialzelle eingebaut. Als Prüfflüssigkeit wurde Haldenwasser des Standortes Hattorf verwendet. Es ergab sich ein Durchlässigkeitsbeiwert von  $k_f = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ . Das Laborprotokoll ist der Anlage 6 zu entnehmen.

#### 4.1.3.4 Eigensetzung und Ablaugung der Rückstandsoberfläche

Zu Beginn des Lysimeterversuchs wurden die Eigensetzungen des Rückstands betrachtet. Hierzu wurden vier Punkte an dem Lysimeter markiert. Die Punkte 1 bis 3 liegen jeweils am Rand des Lysimeters etwa im gleichen Abstand zueinander. Zusätzlich wurde ein Messpunkt in der Mitte des Lysimeters betrachtet. Im weiteren Verlauf des Versuchs wurden jeweils monatlich die Ablaugungen des Rückstandssalzes ermittelt. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.



**Abbildung 18: Setzung der Lysimetersäule am Standort Müncheberg vom 09.08.2012 bis 31.07.2013**

Hierbei ergibt sich eine Rekompaktion der Rückstandssäulen von ca. 28 mm in den ersten vier Tagen. Danach überwiegt die niederschlagsbedingte Ablaugung des Rückstandssalzes. Wie aus der Abbildung zu erkennen ist, verläuft die Ablaugung quasi linear.

Parallel zu den Messungen wurden die Veränderungen an der Oberfläche des Rückstandssalzes photographisch festgehalten. In der nachfolgenden Abbildung sind die Fotos zu Beginn und am Ende des Versuchszeitraums dargestellt.

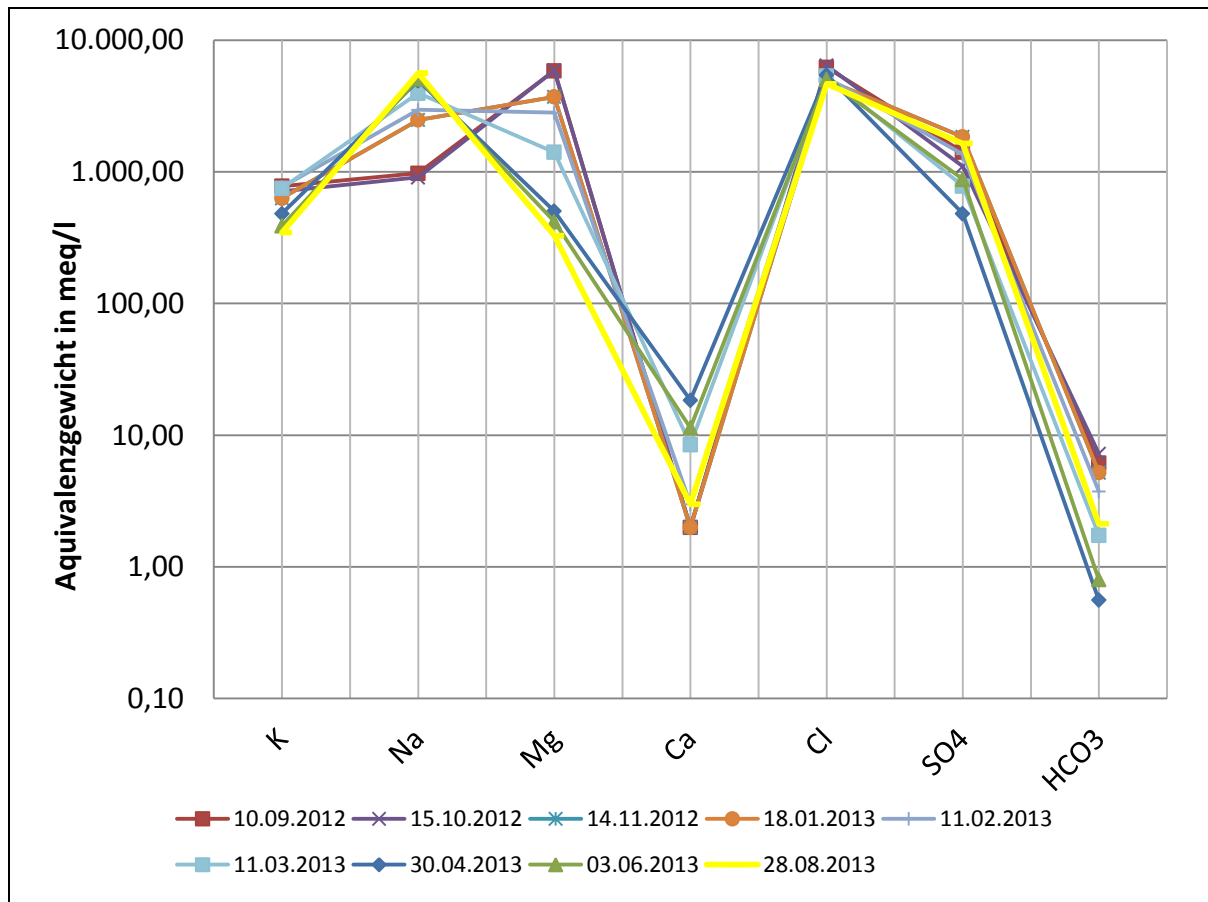


**Abbildung 19: Entwicklung der Oberfläche des Rückstands am 10.08.2012 und 12.08.2013**

Wie aus der Abbildung zu erkennen ist, bildet sich die für Rückstandshalden bekannte spezifische Oberflächenstruktur aus. Die vollständige Fotodokumentation ist der Anlage 7 zu entnehmen.

#### **4.1.3.5 Untersuchungsergebnisse des Salzwasserabflusses**

Das abfließende Salzwasser aus dem jeweiligen Segment des Lysimeters wurde wochenweise beprobt. Diese Proben wurden zu einer Monatsmischprobe zusammengefasst. Alle Monatsmischproben aus dem inneren Segment des Lysimeters wurden dann auf die rückstandsspezifischen Parameter Dichte, Nichtcarbonat-Härte, Gesamthärte und pH-Wert sowie auf Kalium-, Natrium-, Magnesium-, Calcium-, Chlorid-, Bromid-, Sulfat-, und Hydrogencarbonatgehalt untersucht. Die Ergebnisse der Analysen sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.



**Abbildung 20: Konzentrationen von Kalium, Natrium, Magnesium, Calcium, Chlorid und Sulfat des Abflusses aus dem inneren Lysimetersegment vom 09.08.2012 bis 28.08.2013**

Aus den Analysenergebnissen ist zu erkennen, dass der Magnesiumgehalt im Salzwasser über den Messzeitraum abnimmt. Hierbei nimmt der Magnesiumgehalt im ersten Halbjahr stärker ab, wohingegen im zweiten Halbjahr ein geringeres Absinken zu erkennen ist. Dies lässt darauf schließen, dass der Magnesiumgehalt im ersten Halbjahr durch den Austrag des Kieserits absinkt. Im zweiten Halbjahr wird der sinkende Magnesiumgehalt zusätzlich durch den Austrag von Carnallit verursacht.

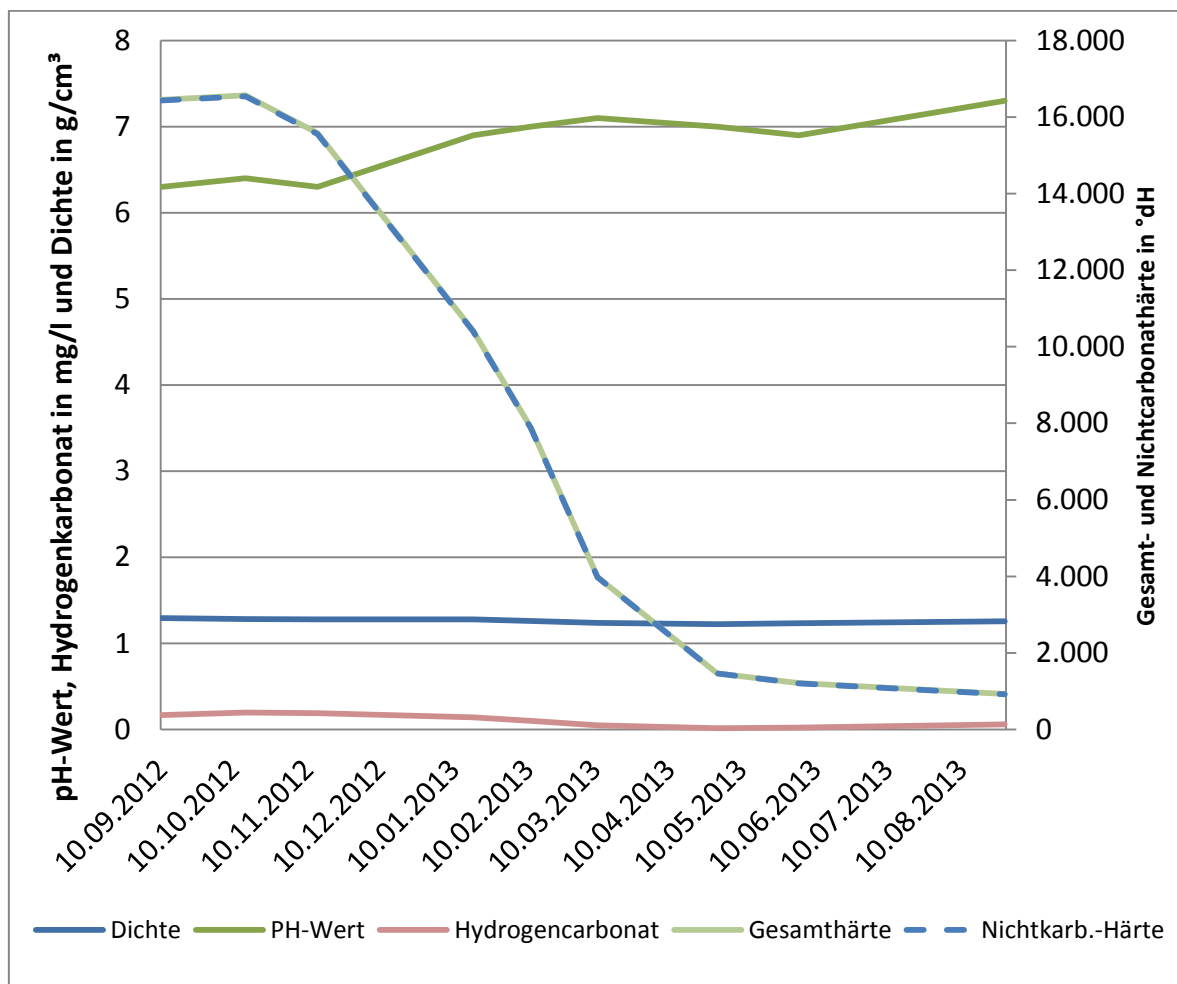
Der Kaliumgehalt schwankt leicht und fällt im zweiten Halbjahr des Messzeitraums leicht ab.

Der Chloridgehalt des Salzwassers nimmt über den Messzeitraum von ca. 4 Monaten von ca. 6.207 mmol(eq)/l auf 4.981 mmol(eq)/l ab, steigt dann innerhalb der nächsten ca. 3 Monate erneut auf 5.432 mmol(eq)/l an, um dann wieder auf 4.649 mmol(eq)/l abzusinken. Die Schwankungen sind vermutlich davon abhängig, welche Phasen in welchem Messzeitraum ausgetragen werden. Im ersten Messzeitraum werden Carnallit ( $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ ) und Sylvit ( $\text{KCl}$ ) gelöst und aus dem Rückstandskörper ausgetragen. Bei hohen Magnesiumchlorid-Konzentrationen ist die Löslichkeit für NaCl herabgesetzt. Im zweiten Abschnitt des Messzeitraums erfolgt dann zunehmend die Lösung von Halit ( $\text{NaCl}$ ).

Die Calciumkonzentration liegt innerhalb der ersten fünf Monate etwa im gleichen Bereich und steigt dann über einen Zeitraum von ca. 2 Monaten stark an. Im Anschluss daran erfolgt wiederum ein Absinken der Calciumkonzentration in den Bereich der Anfangskonzentration in einem Zeitraum von ca. 4 Monaten. Die Lösung des Gipses erfolgt somit im zweiten Teil des Messzeitraums. Zuvor erfolgt die Hydratisierung des Anhydrits. Das Vorhandensein von Gips wurde mittels Röntgendiffraktometrie nachgewiesen (siehe Kap. 4.1.3.8).

Der Natriumgehalt liegt bei den ersten drei Mischproben etwa im gleichen Bereich und steigt dann kontinuierlich bis zum Ende des Versuchszeitraums an. Die Löslichkeit des Halit steigt bei sinkenden Magnesiumchlorid-Gehalten der Lösungen.

Derzeit lassen die Analysenergebnisse erkennen, dass zunächst Magnesiumsalze aus dem Rückstand gelöst wurden und als Eluat im Abfluss zu finden waren. Nach ca. 2 Monaten nahm der Magnesiumgehalt ab und der Natriumgehalt zu.



**Abbildung 21: Dichte, pH-Wert, Wasserhärte und Hydrogencarbonatanteil des Abflusses aus dem inneren Lysimetersegment vom 09.08.2012 bis 28.08.2013**

Bei der Analyse der Abflussproben liegen die pH-Werte der Mischproben im Bereich zwischen 6 und 7 und die Dichte der Proben zwischen 1,22 und 1,29 g/cm³. Die leicht

erhöhten Hydrogencarbonatwerte zu Beginn des Lysimeterversuchs sind auf den eingebauten ungewaschenen Drainagekies zurückzuführen. Wie zu erkennen ist, wird das Hydrogencarbonat mit dem Abfluss ausgewaschen, so dass der Hydrogencarbonatgehalt über den Messzeitraum absinkt.

Die Höhe der Gesamt- und Nichtcarbonathärte sind nahezu identisch und weisen den gleichen Verlauf auf wie die Magnesiumkonzentration. Die Wasserhärte liegt zu Beginn der Messungen hoch und nimmt zum Ende des Messzeitraums immer weiter ab. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass Magnesiumchlorid als Härtebildner fungiert. Mit Auslösung des Magnesiumchlorids aus dem Rückstand sinkt die Wasserhärte dann ab.

Für die Monatsmischprobe des äußeren und inneren Bereichs erfolgte die Bestimmung der Dichte im Vergleich.

**Tabelle 13: Dichte der beiden Abflüsse**

Datum	Dichte innen	Dichte außen
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]
10.09.2012	1,294	1,288
15.10.2012	1,290	1,240
14.11.2012	1,285	1,250
14.01.2013	1,285	1,275
12.02.2013	1,269	1,271
11.03.2013	1,246	-
30.04.2013	1,228	1,220
03.06.2013	1,239	1,250
18.07.2013	1,255	1,170
28.08.2013	1,273	1,105
<b>Mittelwert</b>	<b>1,266</b>	<b>1,230</b>

#### 4.1.3.6 Tracerversuch

In einer weiteren Untersuchung wurde ein Versuch zur Markierung der bevorzugten Fließwege des Salzwassers innerhalb des Salzkörpers vorgenommen. Hierzu wurde nach Abschluss des Messzeitraums von einem Jahr ein geeigneter Tracer auf die Oberfläche des Lysimeters aufgegeben. Als Farbtracer wurde BRILLIANT BLAU R 250 (CAS-Nummer: 6104-59-2) verwendet. Der Farbtracer wurde in zwei Intervallen auf die

Lysimeteroberfläche aufgebracht. In einer ersten Charge wurden zunächst 10 g des BRILLIANT BLAU in 10 l Leitungswasser gelöst. Die Aufbringung des Farbtacers erfolgt mit Hilfe einer Gießkanne gleichmäßig auf die Rückstandsoberfläche.



**Abbildung 22: Aufgabe des Farbtacers auf die Rückstandsoberfläche**

Nach Aufgabe der ersten 10 l Tracerlösung ergab sich, wie aus der nachfolgenden Abbildung zu erkennen ist, eine schwach blaue Färbung des Salzes.



**Abbildung 23: Lysimeteroberfläche nach Aufgabe der 1. Charge**

Um eine ausreichende Farbintensität zu gewährleisten, wurde daher die 2. Charge des Farbtracers mit der doppelten Menge an BRILLIANT BLAU versehen. 20 g des Farbtracers wurden in 10 l Leistungswasser gelöst. In der nachfolgenden Abbildung ist der Verfärbungsgrad nach Aufgabe der 2. Charge zu sehen.



**Abbildung 24: Lysimeteroberfläche nach Aufgabe der 2. Charge**

#### 4.1.3.7 Ergebnisse des Tracerversuchs

Bei den durchgeführten Bohrungen wurde ersichtlich, dass der aufgegebene Tracer nur ca. 15 cm in den Salzkörper eingedrungen ist und den Salzkörper in diesem Bereich vollständig eingefärbt hat.



**Abbildung 25: Oberer Teil der Bohrkerne mit Tracer**

Beim Ausbau des Salzkörpers wurde die obere Einbauschicht mit einer Mächtigkeit von ca. 15 cm beim Kippen des Lysimetergefäßes abgetrennt, wodurch ein Einblick in den Salzkörper möglich war. Hierbei sind einzelne Durchflusskanäle zu erkennen.



**Abbildung 26: Oberer Teil der Bohrkerne mit Tracer**

Nach Ausbau des Salzkörpers konnten einige dieser Lösungskanäle, die im Randbereich des Salzkörpers austreten, durch Spuren des Tracers an der Außenseite des Salzkörpers markiert werden.

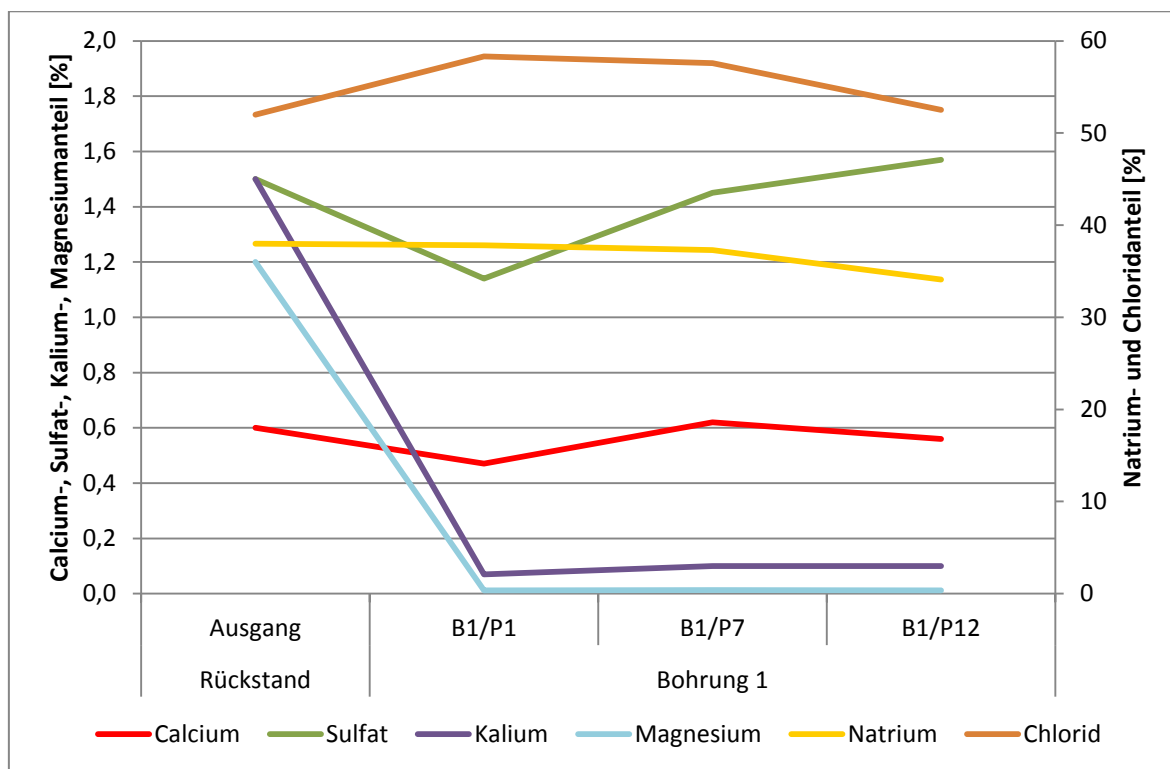


**Abbildung 27: Tracerspuren an der Oberfläche des Salzkörpers**

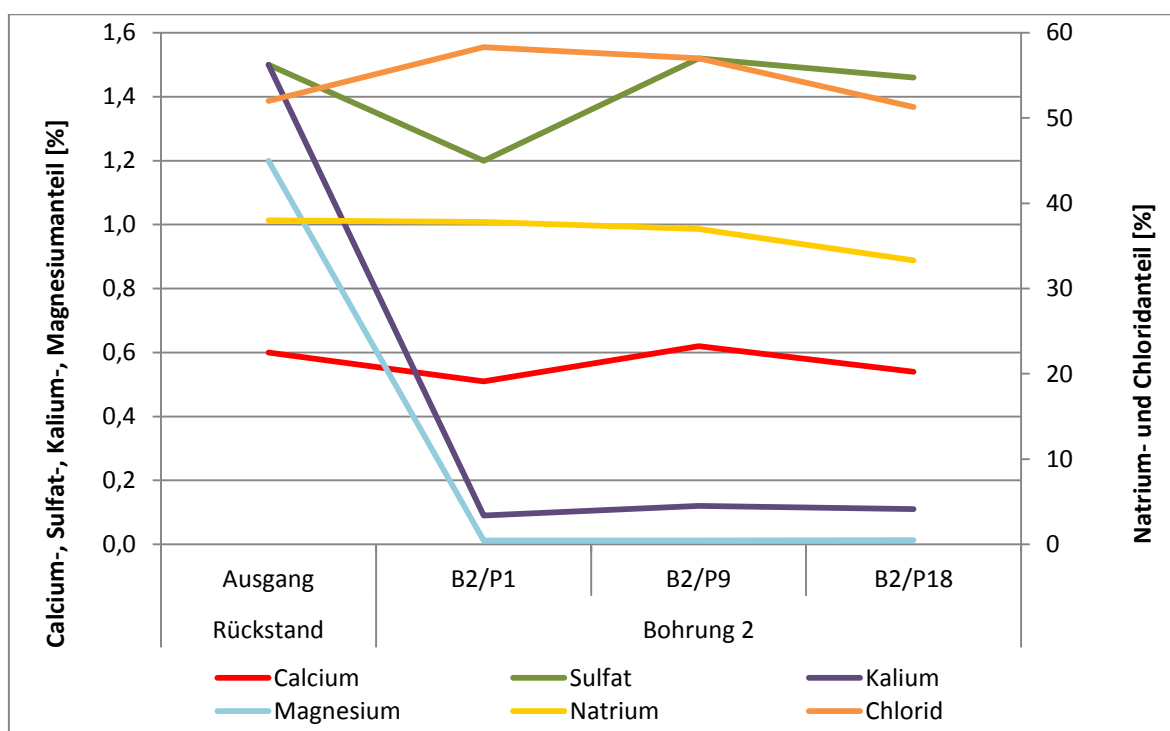
Aufgrund der Sorption des Tracers in den oberen ca. 15 cm sind bevorzugte Wegsamkeiten im unteren Bereich des Salzkörpers nicht markiert.

#### **4.1.3.8 Ergebnisse der mineralogischen Untersuchungen der Bohrproben**

Im Rahmen der durchgeführten Bohrungen wurden aus beiden Bohrungen jeweils drei Proben entnommen und die chemische und mineralogische Zusammensetzung der Einzelproben bestimmt. Die Ergebnisse der ersten Bohrung sind in der nachfolgenden Abbildung 21 und die Ergebnisse der zweiten Bohrung in der nachfolgenden Abbildung 22 dargestellt.



**Abbildung 28: Chemische Zusammensetzung der Rückstandsproben aus der Bohrung 1**



**Abbildung 29: Chemische Zusammensetzung der Rückstandsproben aus der Bohrung 2**

Bei der Betrachtung der Analysenergebnisse fällt auf, dass der Anteil an Magnesium und Kalium sehr stark zurückgegangen ist. Dies lässt darauf schließen, dass die Magnesium- und Kaliumsalze innerhalb des Messzeitraums nahezu vollständig ausgetragen werden. Dies bestätigt auch die in Kapitel 4.1.3.5 dargestellte Auswertung der Analysenergebnisse aus dem Lysimeterabfluss. Bei den Analysen der vorliegenden Einzelphasen in den Proben mit Hilfe der Röntgendiffraktometrie (RDA, Prüfverfahren K+S 0043.01) wurde als Hauptbestandteil die Phase Steinsalz ( $\text{NaCl}$ ) und als Nebenbestandteile die Phasen Anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ ) und Gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ) bestimmt.

#### **4.1.3.9 Niederschlagsdaten, Lysimetergewicht und Abflussmengen**

Nach Einbau des Rückstandes in das Lysimeter am 09.08.2012 wurde am 15.08.2013 mittags der erste Abflusswert von 15,95 kg ermittelt. Das erste Niederschlagsereignis wurde am 16.08.2013 17:00 gemessen. In den ersten sieben Tagen speist sich somit der Abfluss des Lysimeters ausschließlich aus der frei verfügbaren Restfeuchte des eingebauten Rückstands.

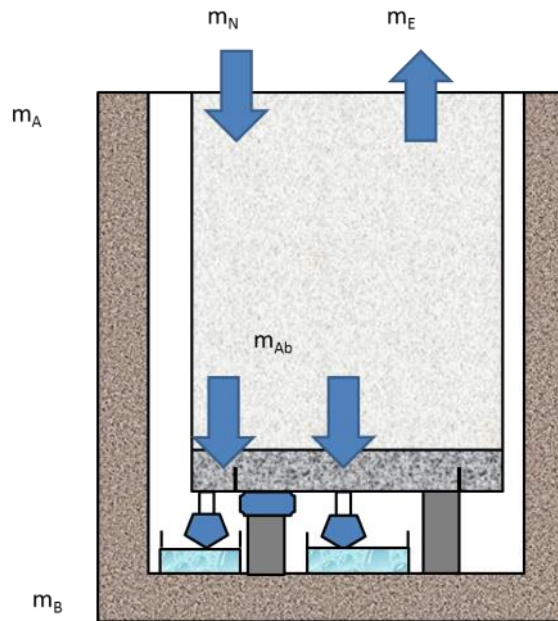
Der zu Beginn des Versuchs eingesetzte Kippzähler zur Ermittlung der Abflussraten musste aufgrund von Rekristallisationen im Bereich des Abflusses und des Kippzählers selbst entfernt und durch eine massenmäßige Abflusserfassung mit ereignisbezogener Entleerung ersetzt werden. Die Entleerung der Abflussgefäße erfolgte in der Regel alle 2-3 Tage.

In unmittelbarer Nähe zu dem wägbaren Lysimeter ist eine Wetterstation errichtet, die die Niederschlagsdaten über den Versuchszeitraum ermittelt. Im Messzeitraum vom 10. bis 14.01.2013 sowie zwischen dem 09. und dem 25.02.2013 konnten aufgrund der Temperaturen im Frostbereich keine Niederschlagswerte ermittelt werden.

Die Niederschlagssummen, das Lysimetergewicht und die Summe der Wasserabflüsse werden in der Abbildung 24 dargestellt.

#### **4.1.4 Berechnung der Evaporation**

Zur Berechnung der Evaporation sind die in der nachfolgenden Abbildung dargestellten Massenanteile zu berücksichtigen.



**Abbildung 30: Darstellung der Massenteile**

Die Massenbilanz zur Ermittlung der Evaporation wurde nach der folgenden Formel vorgenommen.

$$m_E = m_A - m_B + m_n - m_{Ab}$$

$m_E$  : Evaporation in kg

$m_A$  : Lysimetermasse zu Beginn des Messzeitraums in kg

$m_B$  : Lysimetermasse am Ende des Messzeitraums in kg

$m_n$  : Niederschlagssumme im Messezeitraum in kg

$m_{Ab}$  : Abflusssumme im Messzeitraum in kg

Im Messzeitraum vom 09.08.2012 bis 31.07.2013 ergeben sich aus den Messungen eine Anfangsmasse des Lysimeters von ca. 3227 kg und ein Endgewicht von ca. 2811 kg. An der Wetterstation wurde eine Niederschlagssumme von ca. 420 kg ermittelt. Der Gesamtabfluss beträgt ca. 793 kg.

$$m_E = 3227,05 \text{ kg} - 2811,37 \text{ kg} + 419,50 \text{ kg} - 792,54 \text{ kg}$$

$$m_E = 42,64 \text{ kg}$$

Bezogen auf den ermittelten Jahresniederschlag ergibt sich dann eine Evaporation von 10,2 %. Hierbei handelt es sich um einen Jahresmittelwert. Abhängig von den vorherrschenden Wetterverhältnissen (Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Temperatur, Niederschlagsanfall etc.) kann die Evaporation schwanken.

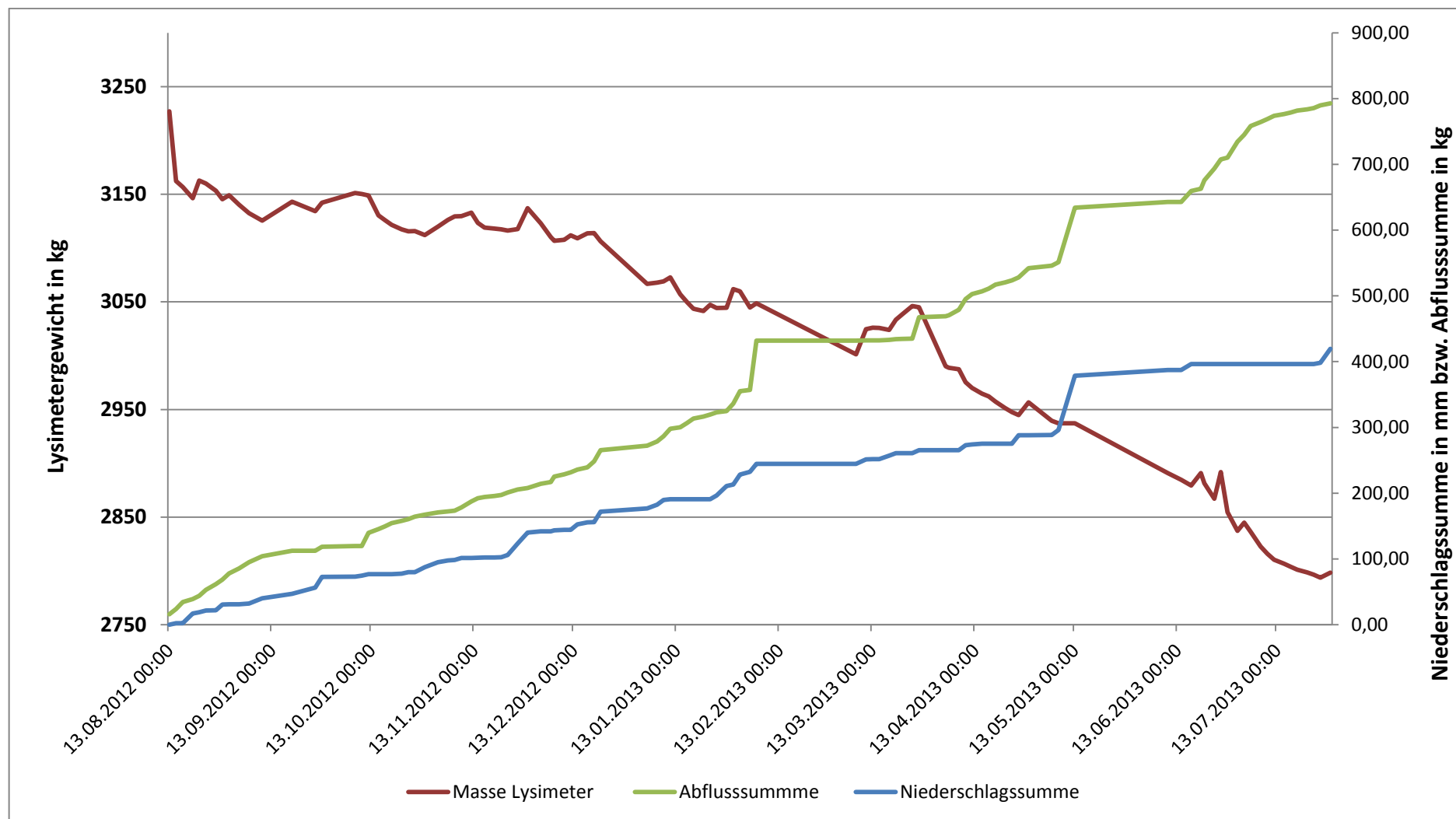
Aus diesem Grund wurden einige signifikante Messzeiträume zur Betrachtung der Schwankungen aus den ermittelten Messwerten ausgewählt und für diese Zeiträume ebenfalls die Evaporation ermittelt. Die Ergebnisse der Berechnung sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

**Tabelle 14: Berechnungsergebnisse der Evaporation**

Messzeitraum		Nieder- schlags- summe	Lysimetergewicht		Abfluss- summe	Evaporation	
von	bis		Beginn	Ende			
		[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[%]
10.08.2012 22:00	10.09.2012 08:45	46,3	3.212,5	3.134,4	112,6	11,8	25,5
26.09.2012 15:30	21.12.2012 11:25	109,3	3.134,4	3.106,2	135,6	1,9	1,7
21.12.2012 11:25	08.03.13 14:20	88,5	3.106,2	3.001,3	183,8	9,6	10,8
08.03.13 14:20	10.04.2013 11:50	20,8	3.001,3	2.975,3	46,8	0,0	0,0
13.05.2013 11:35	31.07.2013 09:50	123,3	2.938,8	2.811,4	246,7	4,0	3,2
<b>Mittelwert</b>							<b>8,2</b>

Im Mittel über die fünf in Tabelle 11 aufgeführten Messzeiträume ergibt sich eine durchschnittliche Evaporation von 8,2 %. Die durchschnittliche Evaporation wurde aus den in der Tabelle errechneten fünf Evaporationen für die einzelnen Messzeiträume als Mittelwert errechnet. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die fünf Messzeiträume nicht den gesamten Untersuchungszeitraum abdecken.

Für die weiteren Berechnungen wird die über dem Gesamtversuchszeitraum ermittelte Evaporation von 10,2 % angesetzt, um den jährlichen Haldenwasseranfall zu ermitteln.



**Abbildung 31: Messergebnisse des Lysimeterversuchs Müncheberg vom 09.08.2012 bis 31.07.2013**

Aus den zuvor dargestellten Messwerten sind der Massenverlauf, der Lysimeterabfluss und der Niederschlagsanfall über den Messzeitraum von ca. 1 Jahr ermittelt worden. Aus diesen Messwerten wird mit Hilfe einer Massenbilanz der Anteil der Evaporation für das Lysimeter ermittelt.