

Anlage 3

**Begrünungskonzept für Kalirückstandshalden
im Werragebiet**

**Stufe II Feldversuch auf der Halde IV in
Heringen**

Abschlussbericht Rückstandslysimeter

Begrünungskonzept für Kalirückstandshalden im Werragebiet

Stufe II

Feldversuch auf der Halde IV in Heringen

Abschlussbericht

- Rückstandslysimeter -

Prof. Dr. Oliver Hensel

Agrartechnik, Universität Kassel

Umweltsicherung Schmeisky

Witzenhausen, November 2017

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	4
1. Einleitung	5
2. Material und Methoden	5
2.1. Niederschlag.....	5
2.2. Rückstandslysimeter	6
2.2.1 Sickerwasseruntersuchungen.....	6
2.2.2 Wasserbilanz.....	9
2.2.3 Versuchsverlauf.....	10
3. Ergebnisse und Diskussion.....	12
3.1. Niederschlag.....	12
3.2. Rückstandslysimeter	14
3.2.1. Wasserbilanz und Fehlerbetrachtung	14
3.2.2. Sickerwasserqualität.....	19
4. Fazit	25
5. Zusammenfassung.....	26
Literatur	27

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Jährliche Niederschlassummen (mm) gemessen an der Wetterstation Thies, eben- erdig und auf einem Meter Höhe.....	12
Tabelle 2. Wasserbilanz des Rückstandslysimeters.....	14
Tabelle 3. pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit (mS/cm) des Sickerwassers angefallen im Rückstandslysimeter.....	19

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. (a) Ombrometer von ThiesClima, (b) Regenmessgerät auf Bodenlevel sowie (c) Regenmessgerät in 1 m Höhe.....	6
Abbildung 2. (a) Rückstandslysimeter – ausgehobene und mit Plane ausgelegte Grube, am Rand mit Konstruktionsholz verstärkt und stabilisiert. Foto des Umweltberatungsbüros Schmeisky; (b) Bereits mit Rückständen aus der Kaligewinnung gefülltes Rückstandslysimeter; (c) IBC-Tanks zum Auffangen des Sickerwassers (Fassungsvermögen von jeweils 1.200 Litern; (d) Ablassen des Sickerwassers; (e) Fasspumpe zum Entleeren der Tanks; (f) Entleeren der Tanks mit Hilfe der Fasspumpe.....	8
Abbildung 3. Wöchentlicher Niederschlag (mm / Woche) gemessen 08.08.2013 - 29.12.2016	13
Abbildung 4. Kaliumkonzentration (g/l) im Sickerwasser des Rückstandslysimeters zwischen dem 02.10.2014 und dem 15.12.2016.....	20
Abbildung 5. Natriumkonzentration (g/l) im Sickerwasser des Rückstandslysimeters zwischen dem 02.10.2014 und dem 15.12.2016.....	21
Abbildung 6. Calciumkonzentration (g/l) im Sickerwasser des Rückstandslysimeters zwischen dem 02.10.2014 und dem 15.12.2016	21
Abbildung 7. Magnesiumkonzentration (g/l) im Sickerwasser des Rückstandslysimeters zwischen dem 02.10.2014 und dem 15.12.2016	22
Abbildung 8. Sulfatkonzentration (g/l) im Sickerwasser des Rückstandslysimeters zwischen dem 02.10.2014 und dem 15.12.2016.....	22
Abbildung 9. Hydrogencarbonatkonzentration (mg/l) im Sickerwasser des Rückstandslysimeters zwischen dem 02.10.2014 und dem 15.12.2016	23
Abbildung 10. Gesamtkonzentration an gelösten Feststoffen (g/l) im Sickerwasser des Rückstandslysimeters zwischen dem 02.10.2014 und dem 15.12.2016.....	23
Abbildung 11. Bromidkonzentration (mg/l) im Sickerwasser des Rückstandslysimeters zwischen dem 02.10.2014 und dem 15.12.2016.....	24
Abbildung 12. Chloridkonzentration (g/l) im Sickerwasser des Rückstandslysimeters zwischen dem 02.10.2014 und dem 15.12.2016.....	24

1. Einleitung

Da eine Einschätzung des Verdunstungsverhaltens von Rückstandshalden der Kaliindustrie sehr schwierig ist, sollte im Rahmen dieses Versuchs die Evaporation von einer Haldenoberfläche versuchstechnisch ermittelt werden. Hierbei wurde ein Flächenlysimeter mit Rückständen aus dem Kalisalzbergbau in Heringen angelegt und das gesamte anfallende Sickerwasser aufgefangen. Die relativ groß gewählte Lysimeterfläche war dem besonders leicht löslichen Rückstandsmaterial geschuldet, um die stark beeinflussenden Randeffekte zu minimieren. Das Sickerwasser wurde über drei Kalenderjahre hinweg sowohl quantitativ als auch qualitativ untersucht. Die Arbeit mit dem Rückstandsmaterial stellte sich als große Herausforderung heraus.

2. Material und Methoden

2.1. Niederschlag

Die Wetterstation (ThiesClima) misst den Niederschlag mit Hilfe eines vollautomatischen Ombrometers mit einer Niederschlagssammelfläche von 200 cm². Zusätzlich wurden die Niederschläge mit vier Regensammlern auf Bodenlevel sowie mit fünf Regensammlern in einem Meter Höhe bestimmt (Abbildung 1). Diese Regenmess- und Sammelgeräte wiesen jeweils eine Sammeloberfläche von 100 cm² und eine Speicherkapazität von 500 ml auf. Einmal wöchentlich wurden die Regenmessgeräte abgelesen, die Regensammler wurden dazu ausgelitert und somit die Jahresniederschlags-summe einer Woche ermittelt. Die Messungen fanden auf einem Begrünungsversuch (Lysimeterfeld) in direkter räumlicher Nähe zum Rückstandslysimeter statt.



Abbildung 1. (a) Ombrometer von ThiesClima, (b) Regenmessgerät auf Bodenlevel sowie (c) Regenmessgerät in 1 m Höhe

2.2. Rückstandslysimeter

Für den Versuch wurde ein Rückstandslysimeter (Abbildung 2b) konstruiert, indem ein Becken aus Rückstandssalz an der Südwestböschung der Halde angelegt wurde. Der Boden des Rückstandslysimeters wurde mit einer HDPE-Folie ausgelegt (Abbildung 2a). Am tiefst gelegenen Ende des so entstandenen Beckens wurde ein Auslass installiert. Dieser Auslass wurde mit 1.200 Liter fassenden Tanks (IBC-Tanks, insgesamt 3 Stück; Abbildung 2c) verbunden, aus denen das aufgefangene Sickerwasser entnommen werden konnte. Schließlich erfolgte die Stabilisierung des Lysimeterrandes mit Konstruktionsholz. Am 18.07.2013 wurde das so vorbereitete Lysimeterbecken mit Rückstand aufgefüllt. Die Oberfläche wurde mit 82,2 m² angegeben. Eine spätere Vermessung des Lysimeters in 2014 ergab eine maximale, niederschlagsrelevante Fläche von ca. 86 m² (= Außenmaße, inkl. Holzumrandung; Innenmaße = 81,7 m²).

2.2.1 Sickerwasseruntersuchungen

Die Menge des perkolierten Sickerwasseraufkommens wurde seit dem 08.08.2013 wöchentlich aufgezeichnet. Verschiedene Methoden fanden Anwendung, um das Volumen des herausickernden Wassers zu ermitteln. Bis zum 12.09.2013 erfolgte die Bestimmung des Sickerwasservolumens, sobald die IBC-Tanks vollständig mit Dränwasser gefüllt waren (Abbildung 2d). Nach dem 19.09.2013 bestimmten Mitarbeiter der

Universität Kassel und der K+S KALI GmbH in geregelten Abständen die angefallene Sickerwassermenge mit einem in die Tanks eingeführten Metermaß.

Am 12.12.2013 wurde schließlich eine Fasspumpe (PP 41, Lutz Pumpen GmbH), zu sehen in Abbildung 4e und 4f, eingesetzt, um das Wasser abzupumpen – bis 20 cm über dem Grund, um Sedimentpartikel nicht mit anzusaugen. Die Menge an abgepumptem Wasser konnte mittels einer Wasseruhr mit einer Genauigkeit von 0,001 m³ abgelesen werden. Das zunächst eingebaute Messgerät wurde am 27.03.2014 einmalig ausgewechselt und gegen eine neue, zuvor kalibrierte Ausleseeinheit mit einem verbesserten Zählwerk ausgetauscht.

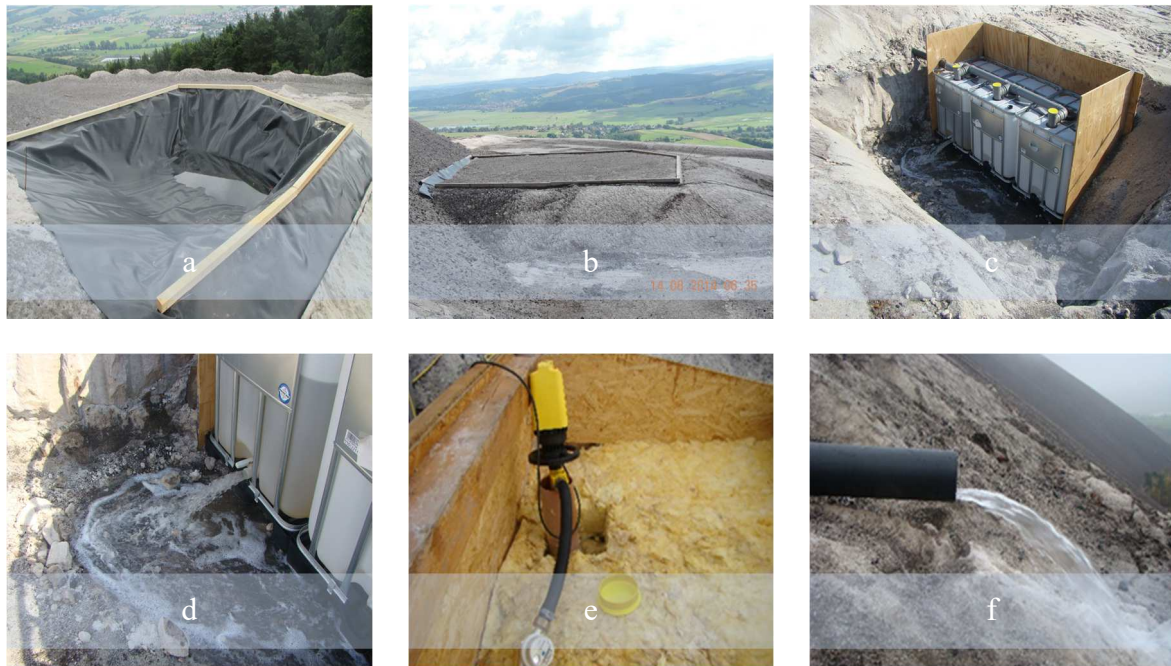


Abbildung 2. (a) Rückstandslysimeter – ausgehobene und mit Plane ausgelegte Grube, am Rand mit Konstruktionsholz verstärkt und stabilisiert. Foto der Umweltsicherung Schmeisky; (b) Bereits mit Rückständen aus der Kaligewinnung gefülltes Rückstandslysimeter; (c) IBC-Tanks zum Auffangen des Sickerwassers (Fassungsvermögen von jeweils 1.200 Litern; (d) Ablassen des Sickerwassers; (e) Fasspumpe zum Entleeren der Tanks; (f) Entleeren der Tanks mit Hilfe der Fasspumpe.

Zu jedem Begutachtungstermin und Auslassen des Sickerwassers erfolgte zudem stets eine Probennahme (circa 0,6 Liter) um anhand dieser den pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit zu bestimmen.

Des Weiteren wurden monatlich chemische Analysen aus den entnommenen Wasserproben (Stichproben) vom Analytik- und Forschungszentrum (AFZ) der K+S KALI GmbH durchgeführt, um die Konzentrationen an Calcium, Kalium, Magnesium, Natrium, Sulfaten, Chloriden, gesamten gelösten Feststoffen, Bromide und Hydrogencarbonaten zu ermitteln.

Am 06.05.2014 berechnete das Analytik- und Forschungszentrum (AFZ) der K+S KALI GmbH einen Volumen-Korrekturfaktor durch die im Sickerwasser gelösten Salzmen-gen. Zur Bestimmung des Korrekturfaktors wurde die Dichte des Sickerwassers be-stimmt, wobei der ermittelte Wert bei 1,210 g/l lag. Damit ergab sich ein Korrekturfaktor von 1,14.

2.2.2 Wasserbilanz

Um die Wasserbilanz des Rückstandslysimeters zu berechnen, wurde der Nieder-schlag (bodennah gemessen) als die Eingangswassermenge angenommen und das anfallende Sickerwasser als Abfluss. Die Bestimmung der Evaporation erfolgte über eine vereinfachte Wasserhaushaltsgleichung (Aboukhaled et al., 1982; Abtew und Melesse, 2013):

$$E = P - D \quad (1)$$

Wobei: P = Niederschlag (mm) und D = Abfluss (mm), E = Evaporation (mm).

Der Abfluss (in mm) wurde berechnet auf der Basis der niederschlagswirksamen Flä-che des Lysimeters und des gesamten volumetrischen Sickerwasseraufkommens, welches wöchentlich aus den Tanks gepumpt wurde. Im Laufe des Experiments ver-größerte sich (bedingt durch die Lösungserscheinungen des Substrats) von den Rän-dern ausgehend die salzfreie Fläche des Lysimeters. An diesen salzfreien Flächen wurde die zu unterst liegende Folie sichtbar. Diese Randeffekte verfälschen die Was-serbilanz und müssen bei der Berechnung berücksichtigt werden.

2.2.3 Versuchsverlauf

Die folgenden Bilder (Umweltsicherung Schmeisky) illustrieren die fortschreitende Erosion des Rückstandmaterials.

2014:



Bild 1: 28.10.2014

2015:



Bild 2: 06.05.2015



Bild 3: 09.07.2015



Bild 4: 03.12.2015



Bild 5: 03.12.2015

2016:



Bild 6: 03.03.2016



Bild 7: 03.03.2016



Bild 8: 01.06.2016



Bild 9: 23.08.2016



Bild 10: 23.08.2016

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1. Niederschlag

Der Niederschlagsverlauf der Jahre, 2014, 2015 und 2016 ist in Abbildung 3 und Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1 Jährliche Niederschlagsummen (mm) gemessen an der Wetterstation Thies und an den Regensammlern ebenerdig und auf einem Meter Höhe

Regensammler	2014	2015	2016
bodennah (n=4)	753,3 ± 57,6	576,5 ± 59,5	654,1 ± 42,3
1 m Höhe (n=5)	687,4 ± 17,4	511,1 ± 10,4	583,5 ± 20,4
ThiesClima (n=1)	734,5	536,2	

± Standardabweichung

Aufgrund eines technischen Defekts konnten die Daten der Thies Wetterstation in 2016 nicht vollständig erfasst und ausgewertet werden.

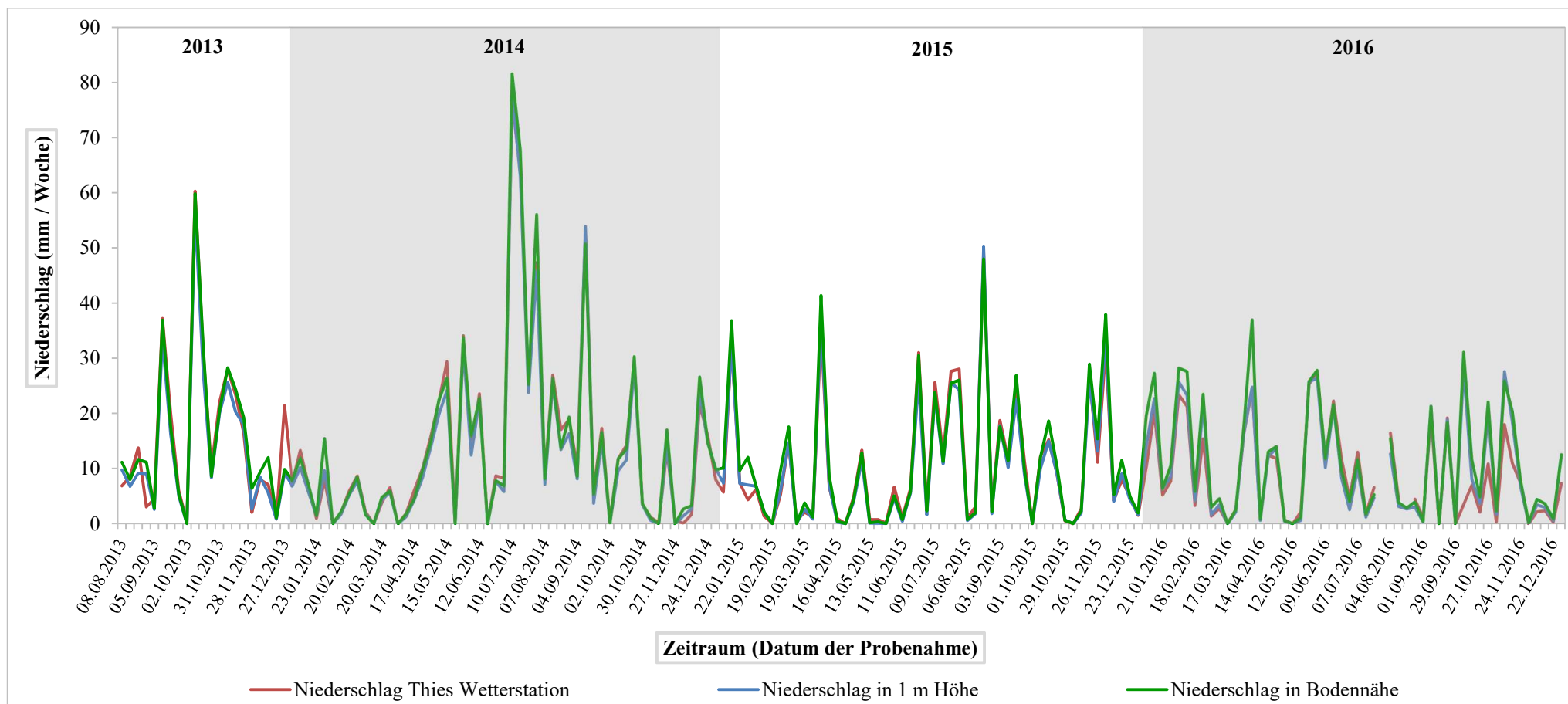


Abbildung 3. Wöchentlicher Niederschlag (mm / Woche) gemessen 08.08.2013 - 29.12.2016

3.2. Rückstandslysimeter

Die in dieser Studie untersuchten Parameter umfassten die Sickerwassermenge sowie die Sickerwasserqualität. Als Hauptergebnis werden die Erkenntnisse zur Sickerwasserqualität angesehen, und die Betrachtung der Wasserbilanz aufgrund der Schwierigkeiten im Versuchsaufbau nur als Annäherung gewertet.

3.2.1. Wasserbilanz und Fehlerbetrachtung

Die Erhebung der wöchentlichen Sickerwassermenge war eine Voraussetzung für die Bestimmung der Wasserbilanz des untersuchten Rückstands. Zusammen mit den Daten aus bodenebenen Niederschlagssammlern (n=4) ergab sich die Grundlage zur Berechnung der Wasserbilanz. Dafür musste der Niederschlag (mm) auf die Flächengröße des Lysimeters (m²) bezogen werden, um die Verdunstung (Evaporation) als Differenz zwischen Niederschlagsmenge und Sickerwassermenge zu errechnen. In Tabelle 2 sind der Niederschlag (bodennah gemessen) sowie die Entwässerung (Menge erfasstes Sickerwasser bzw. salzfreies Sickerwasser) dargestellt.

Tabelle 2 Rohdaten zur Wasserbilanz des Rückstandslysimeters

Ergebnisse	Sickerwassermenge (l)			Niederschlag (l/m²)
	Rohdaten	gesamt	Faktor	
2014	76.472*	1,14	67.081	753,3
2015	57.389	1,14	50.341	576,5
2016	61.869*	1,14	54.271	654,1

* je 1 fehlerhafter Datensatz pro Jahr

Bei einer Berechnung der Gesamtniederschlagsmenge innerhalb des Lysimeters (Annahme maximale Flächengröße 86,4 m²) ergeben sich für 2014 und 2015 höhere Si-

ckerwasser- als Niederschlagsmengen. Offensichtlich sind diese Mehrmengen auf Anhub nicht zu erklären. Möglicherweise gab es zusätzliche Einträge z.B. durch Verwirbelungen an den gesamten Böschungen der Halde, die z.T. zusätzliche Niederschläge in das Lysimeter eingebracht haben. Sie könnten u.U. auch durch die Hygroskopie des Salzes hervorgerufen sein.

Aufgrund des Versuchsaufbaus, der sich durch die Verwendung von Rückstandsmaterial mit aufliegender Folie ergab, und die Betrachtung der natürlichen Alterung des Rückstandsmaterials und Veränderung der Sickerwasserzusammensetzung, die ein Auffüllen mit frischem Rückstand ausschloss, stellte sich die Bestimmung der Flächengröße als problematisch heraus. Die folgende Auflistung/Diskussion gibt einen **Überblick über die Fehlerquellen bei der Betrachtung der Wasserbilanz:**

Form des Lysimeterfeldes

Bedingt durch die Starrheit (Dicke) der Folie war es nicht möglich, einen eckigen Quader zu formen, der eine genaue Berechnung des Volumens ermöglicht hätte. Zudem diente das Rückstandsmaterial als „Baustoff“. Dessen relativ mobilen Fließeigenschaften erschwerte eine exakte Modellierung eines geometrischen Beckens. Dadurch ergab sich eine Vergrößerung des Lysimeters von ursprünglich ca. 25 m² (Grundfläche) auf über 80 m² Oberfläche.

Zusätzlich ergaben sich keine „scharfen“ geradlinigen Abgrenzungen, sondern ein Biegen der Folie um die Salzaufschüttungen an den oberen Rändern (Aufschüttung von Wällen). Aufliegende Balken an den Rändern stellten keine festen „Außenmaße“ dar, sondern wurden entsprechend der Höhe des Rückstandsmaterials angepasst.

Eine unterschiedliche Steigung der Folie, insbesondere in den Randbereichen, führte an den Rändern möglicherweise zu anderen Effekten als im Zentralbereich. Hierbei spielen z.B. Tunnelerosion und direkte Ableitung des Niederschlages in die unteren Schichten sowie kapillare Effekte, Lösungseffekte, Versickerung und variierende Verdunstung eine Rolle.

Verringerung des Salzkörpers (Volumen) durch Niederschlagsereignisse

Die Abnahme der Rückstandsoberfläche erfolgte ungleichmäßig (siehe Bilder 1-10). Dies führte zu verdunstungsrelevanten Unterschieden zwischen der Auffangfläche des Niederschlages (Folienfläche + Salzfläche) und der Rückstandsfläche (nur Salzfläche), die für eine realitätsnahe Korrektur der gemessenen Daten nicht ausreichend beobachtet werden konnten. Eine Beobachtung der Abnahmegeschwindigkeit sowie der Mächtigkeit der Rückstandsschicht wären hierfür nötig gewesen.

Da nach einer gewissen Verwitterungszeit kein Anschluss des Rückstandsmaterials an die umgebende Fläche mehr gegeben war, bzw. eine Wiederauffüllung der gelösten Salze nicht erfolgte, stellten die freiliegenden Flächen bzw. aufragenden Balken einen zusätzlichen Eintrittspunkt von Wasser dar. Auch führte dies zu einer Veränderung der Kleinklimatik (Windschutz).

Ein weiterer Effekt der Alterung des Salzkörpers ist, dass mit der Zeit weniger Wasser im Salz gebunden werden kann („gesättigt“), und vorher gebundenes Wasser mit ausgewaschen wird.

Weitere Veränderungen der Oberfläche des Lysimeterfelds

Balkenschräglagen bzw. zwischenzeitliche bauliche Veränderung durch „Verrutschen“ der Folie (v.a. an der südlichen Seite nach Tunnelerosion an der Haldenflanke) führten zu unterschiedlich großen Eintragsflächen des Niederschlages im Versuchsverlauf.

Die Auflösung des Salzkörpers hatte eine Freilegung der Folie ausgehend von den Rändern zur Folge. Eine Abschätzung der Verdunstung auf den Balkenflächen und der Folie ist nicht möglich.

Bei großen Wassermengen fließt der Niederschlag direkt in tiefere Schichten des Lysimeters ab und steht damit kaum für Verdunstungsprozesse zur Verfügung, was wiederum zu einer Fehleinschätzung des Verdunstungsverhaltens der Oberfläche führt.

Eine Verschiebung der Folie bzw. eine Veränderung der Form bedingt einen eventuell zusätzlichen Niederschlagseintrag von den äußeren Folienbereichen oder einen Verlust durch Auslaufen (z.B. obere östliche Ecke 2016).

Die Alterung des Salzkörpers, also die Änderung der Oberflächenstruktur und der damit verbundenen Farbänderung (Verdunkelung), führt möglicherweise zu einem anderen Albedo und damit veränderten Verdunstungsraten.

Neben den o.g. Fehlerquellen bezüglich des Versuchsaufbaus kommen, wie in jedem anderen Versuch auch, **technische Fehler** hinzu:

- Ablesefehler und Messungenauigkeiten (Niederschlags- und Sickerwassermengen sowie Flächengrößen)
- Ausfälle und Ungenauigkeiten des Wasserzählers
- Überlaufen der Sickerwasser-Container bei Starkregen

Vorgehen bei der Erstellung der Wasserbilanz (Annäherung)

Erst im Laufe des Jahres 2015 kam es zu ergänzenden Messungen der Flächengrößen des Lysimeters und des Rückstands, gefolgt von drei weiteren Messungen bis Ende 2016. **Die mit Rückstand bedeckte Fläche innerhalb des Lysimeters nahm von Versuchsaufbau (Sommer 2013) bis Versuchsende (Dezember 2016) um ca. 40% ab.** Mit Hilfe dieser Messungen wurde nun versucht, durch unterschiedliche Kombinationen der gemessenen Werte eine mittlere Rückstandsfläche für das jeweilige Kalenderjahr zu ermitteln.

Da der Versuch erst in der zweiten Hälfte des Jahres 2013 begann, erfolgte nur eine Betrachtung der ganzen Kalenderjahre 2014 bis 2016.

Bei den gemessenen Rohdaten für die Sickerwassermenge, die auf der gesamten Lysimeteroberfläche aufgefangen wurde, gab es für 2014 aufgrund einer defekten Pumpeinrichtung an 1 von 53 wöchentlichen Datenerhebungen/Jahr und 2016 wegen eines Starkregenereignisses mit Überlaufen der Auffangbehälter an 1 von 52 wöchentlichen Datenerhebungen/Jahr keinen Wert (siehe Tabelle 2). Diese beiden fehlenden Werte wurden über eine Berechnung der zugehörigen Niederschlagsmengen überschlägig ergänzt.

Unter der Annahme, dass auf der unbedeckten, teils stark geneigten Lysimeterfläche (Folie und Balken) nur eine unbedeutende Verdunstung stattfindet, wurde die dort gefallene Niederschlagsmenge von der Gesamtsickerwassermenge (korrigiert um den

Aufsalzungsfaktor) abgezogen, um die theoretische Sickerwassermenge der Rückstandsfläche zu erhalten. Erst danach erfolgte die Berechnung der Differenz zwischen Niederschlagsmenge (Jahresniederschlag x Rückstandsfläche) und „entsalzter“ Sickerwassermenge. Diese wurde dann für die Evaporationsrate anteilig an der Niederschlagsmenge in Prozent ausgedrückt.

Geschätzte Verdunstungsrate

Die Berechnung der Wasserbilanz für die Jahre 2014 bis 2016 auf Basis unterschiedlicher mittlerer Flächengrößen und einer Korrektur der Sickerwassermenge mit dem Aufsalzungsfaktor 1,14 ergab Evaporationsraten zwischen -1,1 und 12,0 Prozent.

Es stand nur ein Lysimeter für den Versuch zur Verfügung, daher konnten diese Werte nicht verifiziert werden. Da die o.g. Fehlergrößen bezüglich einer Wasserbilanz nicht quantifiziert werden können, ist ihr Einfluss nicht in Zahlen auszudrücken, sie hatten sicherlich aber einen sehr relevanten Einfluss auf die Ergebnisse.

Allerdings muss davon ausgegangen werden, dass der größte Teil des Niederschlags sofort auf der Oberfläche versickert und in das Innere der Rückstandskörpers gelangt.

Zusätzlich zeigt das hohe Entwässerungsvolumen aus dem Flächenlysimeter, dass die Kali-Rückstände eine niedrige Wasserrückhaltekapazität aufweisen. Dies wird erwartet, da innerhalb der Kali-Rückstände eine geringere Menge an mineralischen Partikeln wie Ton, Schluff oder Sand vorkommt. Daher ist anzunehmen, dass die Wasserbewegung der Kali-Rückstände hauptsächlich auf das Gravitationspotential zurückzuführen ist.

Man sollte auch bedenken, dass die inhomogene Tiefe des Flächenlysimeters (flach an den Rändern) auch die Sickerwassergeschwindigkeit zu Beginn des Experiments (in 2014) erhöht haben könnte, wenn man berücksichtigt, dass das Niederschlagswasser ein geringeres, zu verteilendes und gespeichertes Substratvolumen aufwies. Schließlich können sekundäre Poren, wie Risse und Kanäle, die als Folge der Salzauslaugung gebildet wurden, einen bevorzugten Fluss erzeugt und auch die Sickerwassergeschwindigkeit erhöht haben.

Die Evaporationsrate eines Kalenderjahres hängt zusätzlich sehr stark von den tatsächlich gefallen Niederschlagsmengen und deren Verteilung sowie von den sonstigen mikroklimatischen Bedingungen ab. Gerade bei relativ geringen jährlichen Evaporationsraten sollten daher mehr als drei Einzeljahre für eine generelle Größenordnung betrachtet werden. Folgende, zusätzlich mögliche Einfluss-Faktoren sollen an dieser Stelle in Bezug zum untersuchten spezifischen Rückstandsmaterial angeführt werden:

- Temperaturschwankungen
 - veränderte Löslichkeit (Änderungen im Aufsalzungsfaktor)
 - veränderte Wasserhaltefähigkeit im Salzkörper
- Hygroskopie des Salzkörpers
 - Wassergehalt abhängig von Luftfeuchtigkeit
 - Sickerwasseranfall durch Feuchtigkeits-Aufnahme aus der Luft möglich?

3.2.2. Sickerwasserqualität

Über die Wasserbilanz hinaus wurde die Sickerwasserqualität untersucht. In diesem Zusammenhang wurden auch der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit gemessen (Tabelle 3). Der mittlere pH-Wert lag in 2014 bei 5,67, in 2015 bei 6,86, und in 2016 bei 6,82. Darüber hinaus wurde in 2014 eine mittlere elektrische Leitfähigkeit von 239,6 mS/cm, in 2015 von 246,2 mS/cm, und in 2016 von 247,4 mS/cm gemessen.

Tabelle 3 pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit (mS/cm) des Sickerwassers angefallen im Rückstandslysimeter

Parameter	Versuchsjahr			
	2013 ¹	2014	2015	2016
pH	6,87 ± 0,18	5,67 ± 0,78	6,86 ± 0,12	6,82 ± 0,12
EC (mS/cm)	201,2 ± 23,1	239,6 ± 11,1	246,2 ± 2,6	247,4 ± 3,2

¹ Untersuchungszeitraum 29.08.2013 - 27.12.2013

± Standardabweichung zwischen den wöchentlichen Messungen

Die Hauptbestandteile des Rückstandsmaterials sind neben Natrium und Chlorid Kalium, Calcium, Magnesium, Sulfat, und Bromid, weshalb die monatliche Konzentration

und Fracht dieser Parameter im Sickerwasser des Rückstandslysimeters untersucht wurden.

Die Konzentration von Kalium, Magnesium, Sulfat, Hydrogencarbonat und Bromid zeigten eine Abnahmeentwicklung, während Calcium im Sickerwasser über die Dauer des Experimentes zunahm. Dies hängt mit der schweren Löslichkeit von Calcium zusammen.

Die Auswaschraten von Natrium, der Gesamtmenge an gelösten Feststoffen und Chlorid waren über die Zeit konstant. Eine detaillierte Darstellung findet sich in den folgenden Abbildungen.

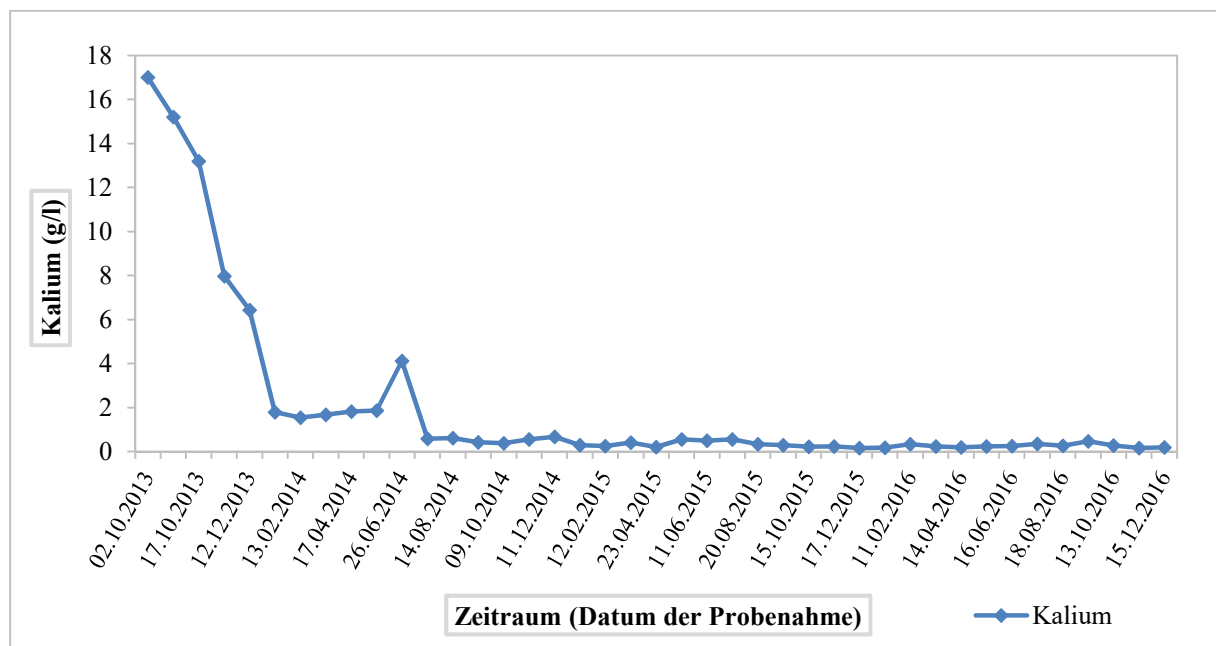


Abbildung 4. Kaliumkonzentration (g/l) im Sickerwasser des Rückstandslysimeters zwischen dem 02.10.2014 und dem 15.12.2016

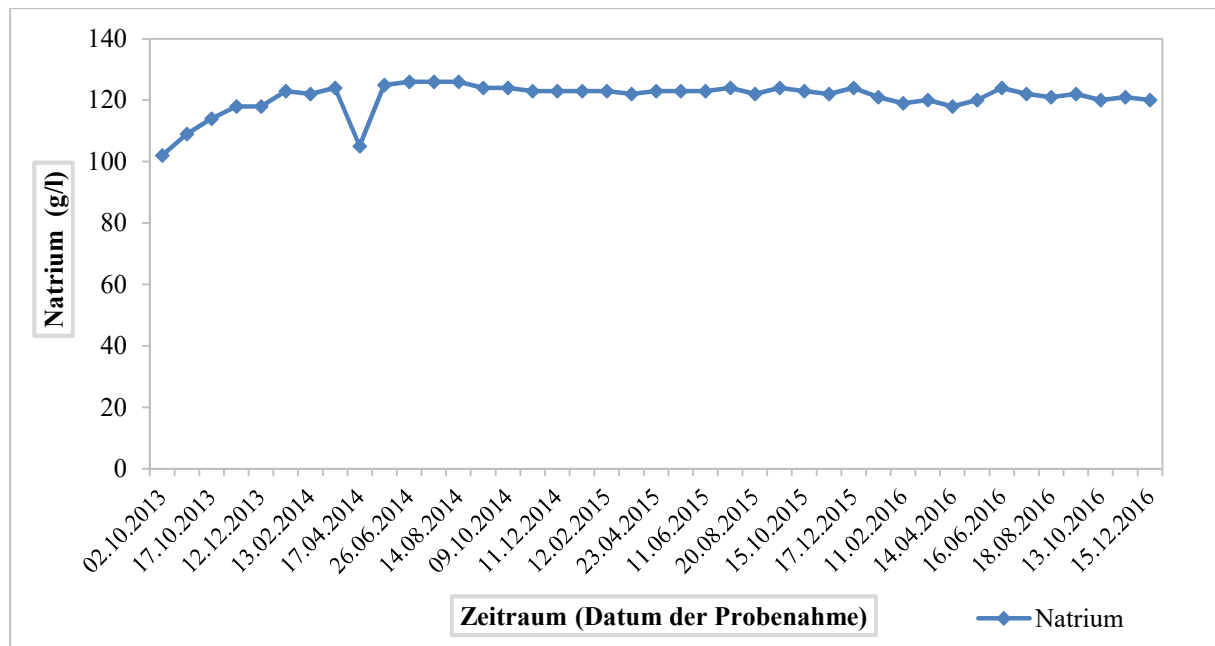


Abbildung 5. Natriumkonzentration (g/l) im Sickerwasser des Rückstandslysimeters zwischen dem 02.10.2014 und dem 15.12.2016

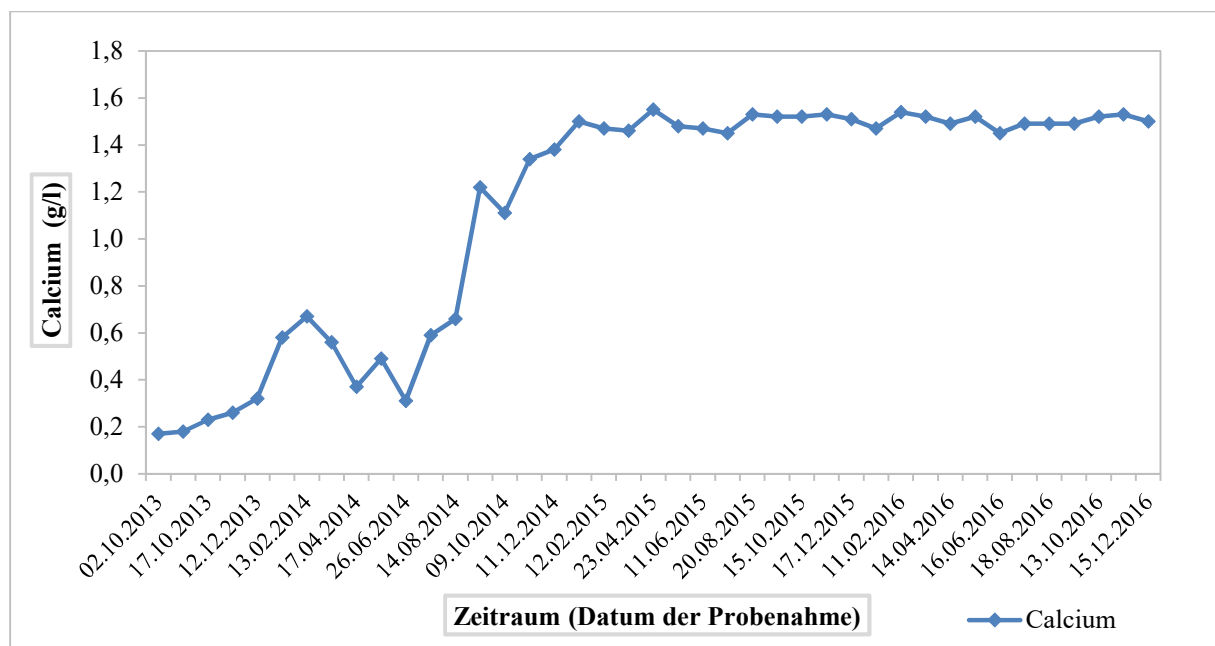


Abbildung 6. Calciumkonzentration (g/l) im Sickerwasser des Rückstandslysimeters zwischen dem 02.10.2014 und dem 15.12.2016

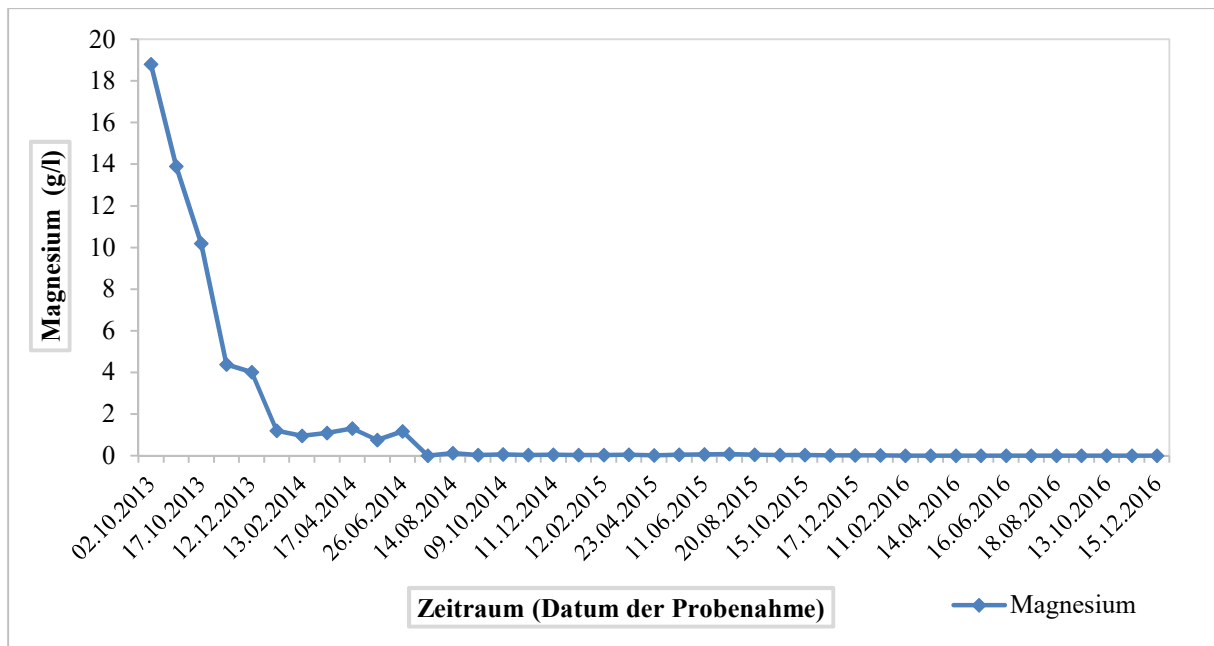


Abbildung 7. Magnesiumkonzentration (g/l) im Sickerwasser des Rückstandslysimeters zwischen dem 02.10.2014 und dem 15.12.2016

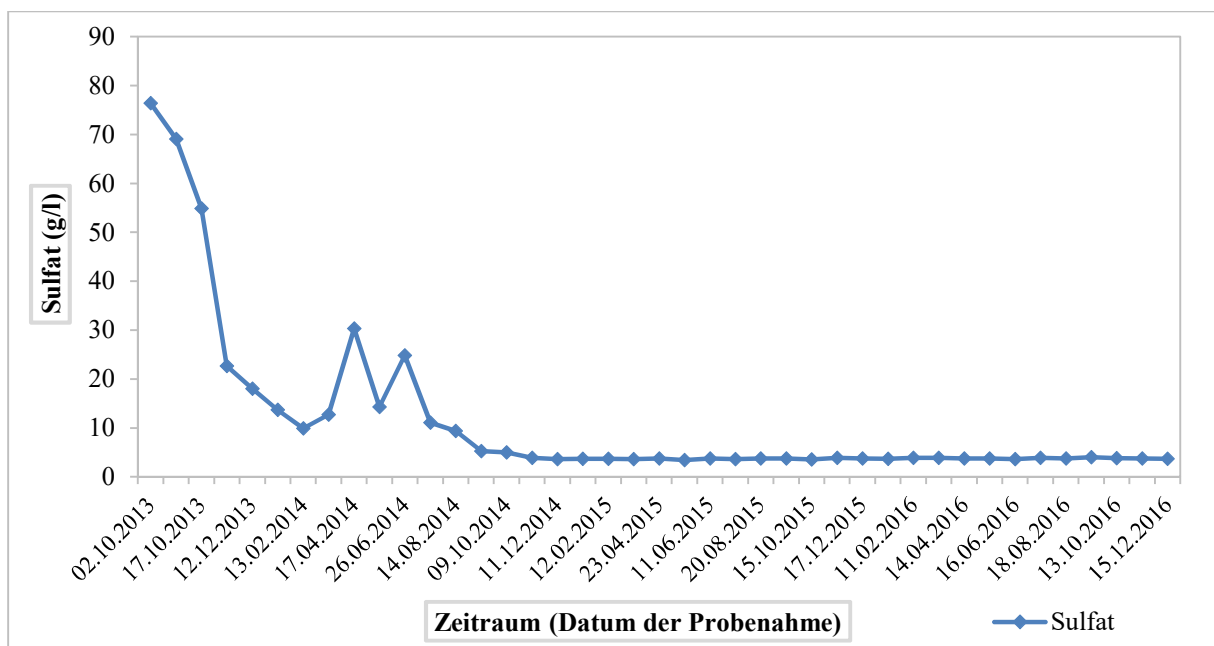


Abbildung 8. Sulfatkonzentration (g/l) im Sickerwasser des Rückstandslysimeters zwischen dem 02.10.2014 und dem 15.12.2016

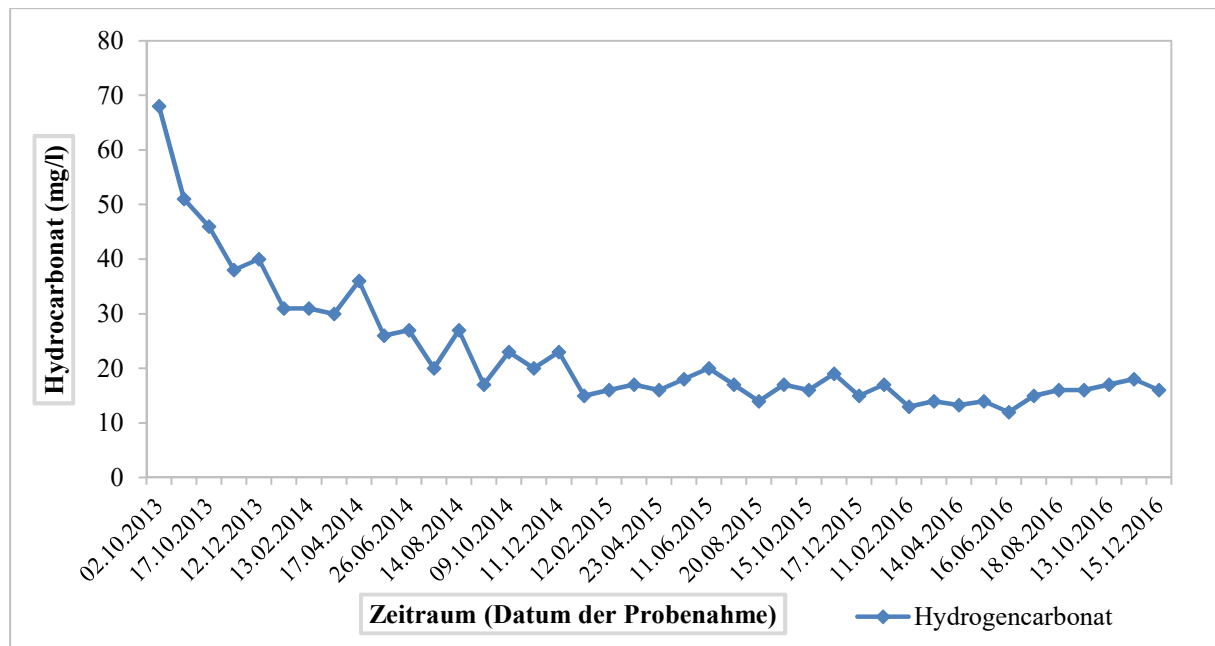


Abbildung 9. Hydrogencarbonatkonzentration (mg/l) im Sickerwasser des Rückstandslysimeters zwischen dem 02.10.2014 und dem 15.12.2016

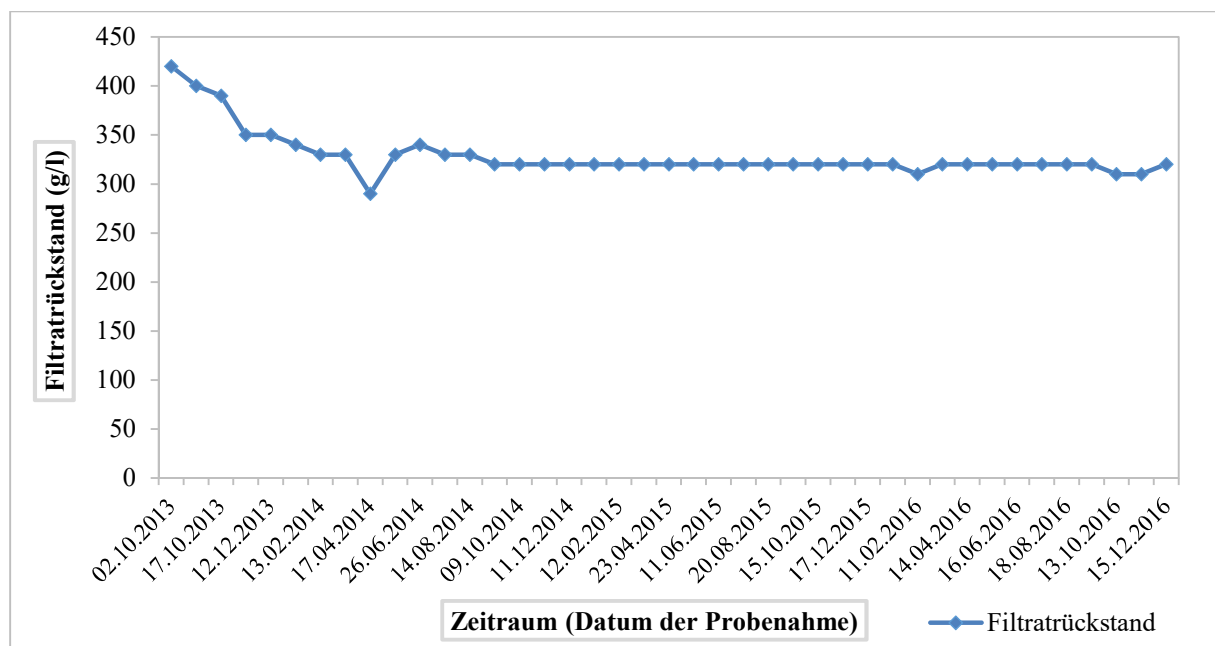


Abbildung 10. Gesamtkonzentration an gelösten Feststoffen (g/l) im Sickerwasser des Rückstandslysimeters zwischen dem 02.10.2014 und dem 15.12.2016

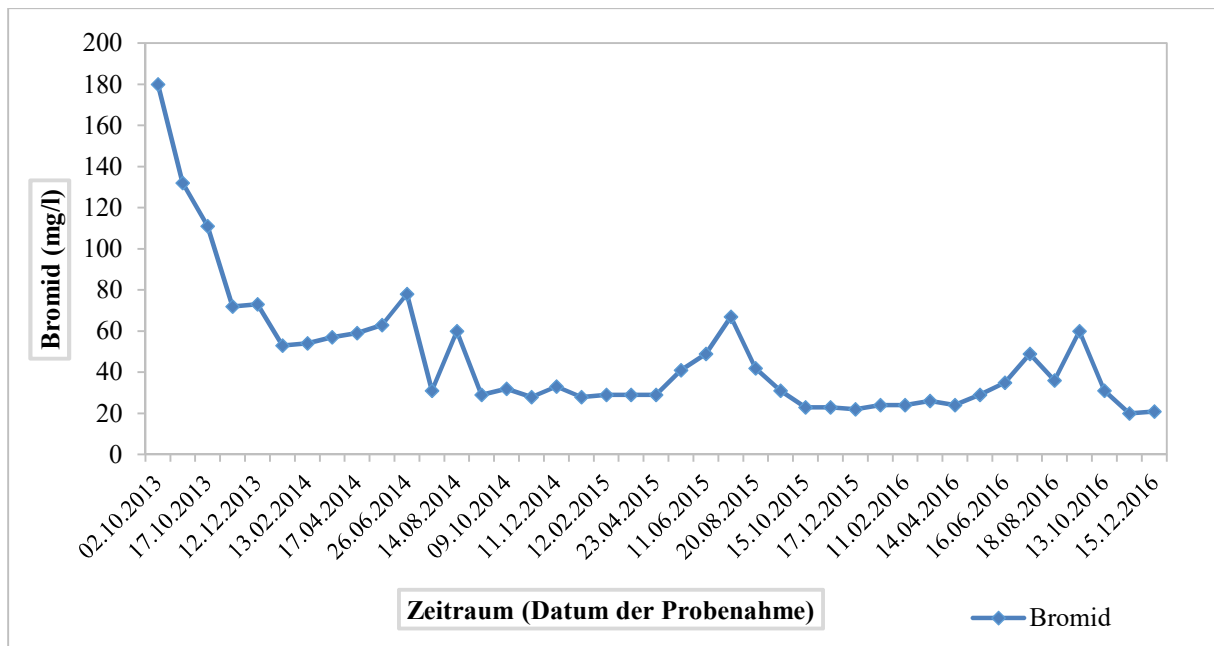


Abbildung 11. Bromidkonzentration (mg/l) im Sickerwasser des Rückstandslysimeters zwischen dem 02.10.2014 und dem 15.12.2016

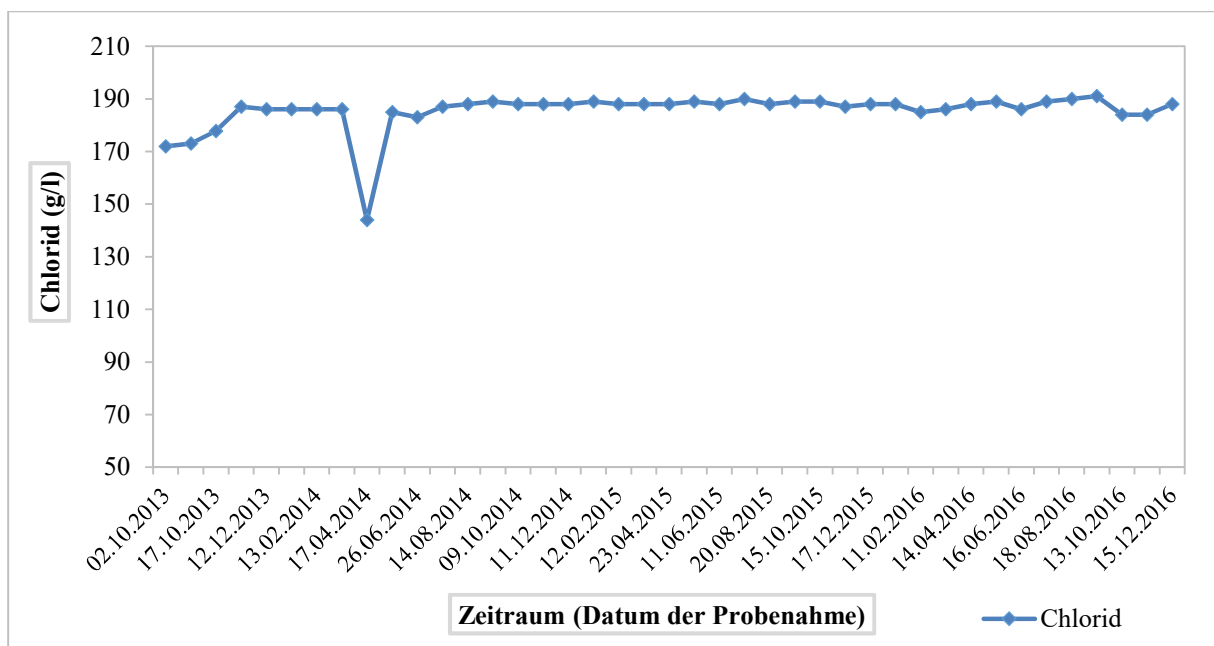


Abbildung 12. Chloridkonzentration (g/l) im Sickerwasser des Rückstandslysimeters zwischen dem 02.10.2014 und dem 15.12.2016

Durch die stetige Auswaschung des Rückstand-Salzes bleibt die Chlorid-Konzentration anhaltend bei einer Konzentration von ca. 185 g/l. Durch eine Reinigung des Tanks mit Frischwasser vor dem 17.4.2014 wurde die Chlorid-Konzentration kurzfristig verfälscht.

Die über die Zeit relativ gleichbleibende Chlorid-Konzentration des untersuchten Sickerwassers spricht dafür, dass das Regenwasser komplett mit Salz gesättigt wird und dieses als Fracht auswäscht.

Die unregelmäßige Abmessung des Lysimeter machte es unmöglich, die berechnete Gesamtfracht der chemischen Verbindungen zu bestimmen.

4. Fazit

Die aus dieser Studie gewonnenen Ergebnisse zur Verdunstungsleistung des Rückstandsmaterials sind nicht belastbar.

Aus diesem Grund wird an dieser Stelle eine **alternative Versuchsanordnung** zur Wasserbilanzierung vorgeschlagen.

Lysimeter mit exakt bekannter Oberflächengröße und Volumen (z.B. 2 m² Oberfläche und 6 m³ Volumen) sollten in mehrfacher Wiederholung (mindesten 3, besser 5 Stück) installiert werden. Eine mindestens dreifache Wiederholung minimiert die Fehleranfälligkeit durch Selbstkontrolle. Eine fest definierte Form (Quader) ist Grundvoraussetzung für akkurate Berechnungen. Auch ist eine gleichmäßige Form (keine Unterschiede in Salzmächtigkeit) wichtig, um ein gleichmäßiges Verdunstungs- und Erosionsverhalten im gesamten Lysimeter zu gewährleisten. So können auch keine salzfreien Flächen entstehen. Um Randeffekte zu minimieren, sollte die umrahmende Begrenzung so dünn wie möglich gestaltet sein. Genau definierte Betreuungsintervalle und Festlegung von Betreuungsmaßnahmen sind ebenfalls zwingend nötig, um eine lückenlose Datenaufnahme zu garantieren und Messfehler zu verringern.

Nachträgliches und wiederholtes Auffüllen von Salz bis zum Rand führt zwar zu einer Verringerung des Windschutzes, jedoch wird so eine Alterung der Oberfläche verhindert. Ältere Flächen verdunkeln sich, was vermutlich zu einer höheren Verdunstung

führt. Alternativ kann der Rand des Versuchsgefäßes gekürzt werden. Hierbei verringert sich jedoch der Salzkörper.

Der Einsatz weiterer Lysimeter hätte folgende Vorteile:

- Extra Flächen für Probennahmen (ohne Versuchslysimeter zu schädigen)
- Probennahme zu verschiedenen Zeitpunkten möglich (nach Starkregenphasen, bei verschiedenen Temperaturen, in Abhängigkeit von Luftfeuchtigkeit etc.)
- Untersuchung des Anfangs- und Endwassergehalts möglich

Bei einem parallelen Einsatz von Klimakammern könnten zudem Untersuchungen zur Hygroskopie durchgeführt werden.

5. Zusammenfassung

Die durch Annäherung berechnete **Verdunstungsrate** des Rückstandslysimeters liegt im Bereich von **-1,1 und 12,0 %**, diese Größenordnung muss allerdings verifiziert werden. Eine **alternative Versuchsanordnung** zur Wasserbilanzierung wird vorgeschlagen. Die Auswaschungsraten von Natrium, der Gesamtmenge an gelösten Feststoffen und Chlorid waren über die Zeit konstant.

Literatur

Aboukhaled, A., Alfaro, A., Smith, M., 1982. Lysimeters, Paper 39, FAO Irrigation and Drainage, Rome.

Abtew, W., Melesse, A.M., 2013. Evaporation and Evapotranspiration. Measurements and Estimations, Springer, London.

Boyd, C.E., 2015. Water Quality: An Introduction. 2nd ed. Springer International Publishing .