

**Effizienz technischer
Sicherungsmaßnahmen im
Erdbau -
Lysimeteruntersuchungen unter
Laborbedingungen**

**Teil 2: Recycling-Baustoff und
industrielle Nebenprodukte**

**Fachveröffentlichung der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

bast

Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau - Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen

Teil 2: Recycling-Baustoff und industrielle Nebenprodukte

Projektnummer

F 1100.3213100 und F 1100.3216002

Christine Kellermann-Kinner
Michael Bürger
Tanja Marks

Bundesanstalt für Straßenwesen
Bergisch Gladbach

Fachbetreuung

Christine Kellermann-Kinner
Tanja Marks

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, 51427 Bergisch Gladbach

Mai 2023

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Kurzfassung – Abstract

Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen

Teil 2: Recycling-Baustoff und industrielle Nebenproduktion

Bei Straßenbaumaßnahmen werden im Erdbau große Massen bewegt. Nicht immer gelingt der Massenausgleich innerhalb einer Baumaßnahme, so dass dann andere Baustoffe zur Herstellung der Erdbauwerke benötigt werden. Hierfür können Ersatzbaustoffe, wie Recycling-Baustoffe, industrielle Nebenprodukte oder aufbereitetes Bodenmaterial verwendet werden, um natürliche Ressourcen zu schonen. Neben der bautechnischen Eignung der Ersatzbaustoffe spielt der Schutz von Boden und Grundwasser mittlerweile bei der Auswahl der Baustoffe eine wesentliche Rolle. Um diesen zu gewährleisten, ist bei Ersatzbaustoffen zu prüfen, ob umweltrelevante Inhaltsstoffe mit dem Sickerwasser in relevanten Mengen in Boden und Grundwasser ausgetragen werden können.

Die Bundesanstalt für Straßenwesen widmet sich diesem Themenbereich in der Forschungslinie „Ressourcenschonender und umweltverträglicher Straßenbau“. Das übergeordnete Ziel der verschiedenen Forschungsprojekte ist dabei, den Einsatz von Ressourcen zu optimieren und gleichzeitig die Auswirkungen auf die Umwelt zu bewerten.

Aus Sicht des Straßenbauingenieurs reicht das Wissen über Wasser im Straßenbauwerk für die Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit vollkommen. Für die hydrogeologische Beurteilung der Durchsickerung im Hinblick auf den Boden- und Grundwasserschutz ist der heutige Wissensstand jedoch noch unzureichend. Insbesondere sind dazu folgende Fragen offen: **Wie viel Wasser gelangt in das Straßenbauwerk und wie viel Wasser durchsickert die Straßenböschung?**

Zum Schutz von Boden- und Grundwasser wurden für den Einsatz bestimmter Ersatzbaustoffe im Erbau Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen (TSM) entwickelt. Durch diese Bauweisen kann die Menge des Sickerwassereintrags in das Bauwerk reduziert und damit der Austrag an umweltrelevanten Inhaltsstoffen verringert oder sogar ganz vermieden werden.

Ziel der Forschungsarbeiten zum Thema Durchsickerung von Straßenböschungen ist es, eine belastbare Datengrundlage zum Wasserhaushalt von Straßenböschungen zu schaffen. Daraus werden Instrumente entwickelt, um die Wirksamkeit der unterschiedlichen technischen Sicherungsmaßnahmen zu beurteilen. So sollen Ersatzbaustoffe durch ökonomisch und ökologisch optimierte Bauweisen weiter für den Erdbau des Straßenbaus genutzt werden.

In diesem Projekt „Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen“ wird der Forschungsansatz der großmaßstäblichen Versuche verfolgt, mit dem Ziel die Wirksamkeit von TSM zu beurteilen. Hierzu wurden Lysimeter und eine zugehörige Beregnungseinheit entwickelt. Mit der Anlage wurde ein Instrument geschaffen, um unter vergleichbaren, kontrollierten und zeitgerafften Bedingungen verschiedene Kombinationen aus TSM und Ersatzbaustoffen am Ausschnitt einer Böschung im Maßstab 1:1 zu prüfen. Um klimatische Einflüsse weitestgehend auszuschließen, ist die Anlage in einer Versuchshalle aufgestellt, so dass die Lysimeteruntersuchungen unter gleichbleibenden Laborbedingungen durchgeführt werden können.

Die Vorteile der Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen liegen in einer gut erfassbaren Wasserbilanz und der Möglichkeit, regelmäßig Wasserproben für die chemischen Untersuchungen zu gewinnen. Zu den Schwächen gehören, dass Umwelteinflüsse und Straßenabfluss nicht berücksichtigt werden und ggf. nicht erfassbare Randeinflüsse vorhanden sind. Zudem sind die Versuchsdauern lang und die Versuche sind betreuungsintensiv. Aufgrund der Abmessungen des Lysimeterkastens sind nicht alle TSM realisierbar.

In dieser zweiten Versuchsserie wurden eine Hausmüllverbrennungsgasche (HMVA), ein Recycling-Baustoff (RC) ein Gießereirestsand (GRS) und eine Steinkohlenkesselasche (SKA) untersucht. Als TSM wurden drei verschiedene Dränmatten und eine Vergleichsvariante ohne TSM eingesetzt, so dass insgesamt zehn Versuchsreihen durchgeführt worden sind. Die Lysimeterversuche wurden von April 2013 bis Dezember 2016 durchgeführt. Während den 15-wöchigen Versuchsreihen wurde an jedem Arbeitstag das Gewicht des Lysimeters und des Oberflächenabfluss ermittelt. Das Sickerwasser wurde ebenfalls gewogen und analysiert. Während dieser Zeit wurden in jeder Woche ein bis drei Regenereignisse aufgebracht. Abschließend wurde für die Materialien RC und SKA noch die Sensitivität der Versuchsergebnisse gegenüber der Regenmenge untersucht.

Die wesentlichen Erkenntnisse zur Effizienz der technischen Sicherungsmaßnahmen sind:

1. Für alle Materialien lässt sich durch die Verwendung von Dränmatten eine Reduktion der Sickerwassermenge um mindestens 40 % erzielen.
2. Bei der Effizienz der Bauweise kommt es zu einer Überlagerung verschiedener Eigenschaften, wie
 - den hydraulischen Eigenschaften der Dränmatte sowie
 - der Wasserdurchlässigkeit,
 - dem Verdichtungsgrad und
 - der kapillaren Saugspannung des in der Böschung untersuchten Materials.

Die Menge an umweltrelevanten Inhaltstoffen wird von den beiden Faktoren Konzentration im Sickerwasser und Menge des Sickerwassers bestimmt. Der entscheidende Faktor bei den aufsummierten Frachtkurven ist in den meisten Fällen die Sickerwassermenge, diese wird von der TSM beeinflusst. Es ist also möglich, mit einer geeigneten TSM den Austrag von umweltrelevanten Inhaltstoffen aus einer Straßenböschung zu verringern.

In zukünftige Simulationsrechnungen sollten die unterschiedlichen Charaktere der Regen und die Trocknungsphasen berücksichtigt werden. Keinesfalls darf von einem gleichmäßigen Dauerregen ohne Trocknungsphasen ausgegangen werden. Es konnte gezeigt werden, dass dies die Menge von Oberflächen- und Sickerwasserabfluss beeinträchtigt.

Für eine wirkungsvolle Reduzierung der Sickerwassermenge muss die Bauweise mit dem Material und den Einbaubedingungen abgestimmt werden. Dafür steht mit dem Hallenlysimeter ein Instrument zur Verfügung, das unter vergleichbaren, kontrollierten und zeitgerafften Bedingungen die Beurteilung der Effizienz von TSM erlaubt.

Efficiency of technical safety measures in earthworks – lysimeter studies under laboratory conditions

Part 2: Recycling construction material and industrial by-products

Large volumes of soil are moved during road construction work. Earthwork balance is not always possible within a building project, so that other building materials are then required to create the earthworks. Alternative building materials such as recycled building materials, industrial by-products or treated soil material can be used for this purpose, thereby conserving natural resources. In addition to the structural suitability of the alternative building materials, protecting the soil and groundwater are now major considerations when selecting building materials. In order to ensure this, it is important to examine with regard to alternative building materials whether significant quantities of environmentally relevant substances can be discharged through seepage into the soil and groundwater.

The German Federal Highway Research Institute addresses this subject area in its research into "Resource and environmentally friendly road construction". The primary aim of the various research projects is to optimise the use of resources while simultaneously assessing the impact on the environment.

From the perspective of civil engineers they have ample knowledge of water in road structures to permit an evaluation of suitability. There is, however, still insufficient knowledge at the present time to produce a hydrogeological assessment of the seepage in terms of soil and groundwater protection. In particular the following questions remain unanswered: how much water gets into the road structure and how much seeps through the road embankment?

Construction methods for technical safety measures (TSMs) have been developed to protect the soil and groundwater when deploying certain alternative building materials within earthworks. These construction methods can reduce, or even completely prevent, the quantity of seepage discharged into the structure.

The objective of the research work into the issue of seepage on road embankments is to create a reliable database on the hydrological balance on road embankments, and on the basis of this to develop instruments to assess the efficacy of the various technical safety measures. The ensuing economically and ecologically optimised construction methods will then enable the continued use of alternative building materials for earthworks in road construction.

In this "Efficiency of technical safety measures in earthworks – lysimeter studies under laboratory conditions" project, the research approach taken is that of conducting large-scale tests aimed at

evaluating the efficacy of the TSMs. Lysimeters and a corresponding irrigation unit have been developed to this end. The test system has created an instrument for examining various combinations of TSMs and alternative building materials in a section of embankment under comparable, controlled and accelerated conditions at a scale of 1:1. To eliminate climatic influences as far as possible, the system has been set up in a test facility so that the lysimeter tests can be conducted under consistent laboratory conditions.

The advantages of conducting the lysimeter studies under laboratory conditions lie in a hydrological balance that can be easily measured and the opportunity to obtain regular water samples for chemical tests. Weaknesses include the inability to take environmental influences and road runoff into consideration, and that marginal influences may be present that cannot be detected. The tests also take a long time and require extensive monitoring. It is not possible to realise all TSMs due to the dimensions of the lysimeter container.

In this second series of experiments, tests were conducted on municipal solid waste incinerator ash (MSWIA), a recycled material (RM), waste foundry sand (WFS) and coal fly ash (CFA). Three different drainage mats were used as TSMs, together with a control variant without TSMs, so that ten series of tests were conducted in total. The lysimeter tests were conducted between April 2013 and December 2016. The weight of the lysimeter and of the surface runoff was measured on each working day throughout the 15-week series of tests. The seepage was also weighed and analysed. During this period, between one and three rain events per week were applied. Finally the sensitivity of the RM and CFA materials test results to the rainfall was investigated.

The significant findings regarding the efficiency of the technical safety measures are as follows:

1. The use of drainage mats enables a reduction in the quantity of seepage of at least 40 % to be achieved for all materials.
2. With respect to the efficiency of the construction method, there is an overlapping of various properties such as
 - the hydraulic properties of the drainage mat, as well as
 - the water permeability,
 - the degree of compaction and
 - the capillary suction of the material examined in the embankment.

The volume of environmentally relevant substances is determined by two factors – the concentration in the seepage and the quantity of the seepage. In most cases the decisive factor for the cumulated load curves is the quantity of seepage, which is influenced by the TSM. It is therefore possible using a suitable TSM to reduce the discharge of environmentally relevant substances from a road embankment.

The different characteristics of the rain and drying phases are to be taken into consideration in future simulation calculations. Under no circumstances is it reasonable to infer steady continuous rainfall without drying phases. It was possible to show that this impairs the quantity of surface water and seepage runoff.

For an effective reduction in the quantity of seepage, it is necessary to coordinate the construction method, the material and the installation conditions. The indoor lysimeter provides an instrument that permits an evaluation of the efficiency of TSMs under comparable, controlled and accelerated conditions.

Inhalt

1	Einleitung	6
2	Konzept	8
3	Lysimeteranlage	9
3.1	Aufbau	9
3.1.1	Lysimeterkasten	9
3.1.2	Beregnungseinheit	13
3.2	Regenregime	16
3.3	Sensitivitätsanalyse.....	19
4	Untersuchungsprogramm	19
4.1	Untersuchungsumfang	19
4.2	Material.....	20
4.3	Lysimeterversuche	21
4.4	Bauweisen	21
4.5	Umweltrelevante Inhaltsstoffe.....	25
5	Ergebnisse	27
5.1	Material und Einbau	27
5.2	Wassermengen.....	28
5.2.1	Hausmüllverbrennungsasche	28
5.2.2	Recycling-Baustoff	34
5.2.3	Gießereirestsand	40
5.2.4	Steinkohlenkesselasche	41
5.3	Umweltrelevante Inhaltsstoffe.....	45
5.3.1	Feststoffanalysen	45
5.3.2	Untersuchungen am Eluat.....	46
5.3.3	Sickerwasseranalyse.....	50
6	Auswertung	53
6.1	Vergleich der Sickerwassermengen.....	53
6.2	Vergleich der Mengen an Oberflächenabfluss	62
6.3	Zusammenfassender Vergleich der Wassermengen.....	63
6.4	Umweltrelevante Inhaltsstoffe.....	66
7	Bewertung und Diskussion	74
7.1	Analyse der Wassermengen.....	74
7.2	Umweltrelevante Inhaltstoffe	75
7.3	Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen	76
8	Zusammenfassung	77
	Literatur	79
	Bilder	81
	Tabellen	83

1 Einleitung

Bei Straßenbaumaßnahmen werden im Erdbau große Massen bewegt. Nicht immer gelingt der Massenausgleich innerhalb einer Baumaßnahme, so dass dann andere Baustoffe zur Herstellung der Erdbauwerke benötigt werden. Hierfür können Ersatzbaustoffe, wie Recycling-Baustoffe, industrielle Nebenprodukte oder aufbereitetes Bodenmaterial verwendet werden, um natürliche Ressourcen zu schonen. Neben der bautechnischen Eignung der Ersatzbaustoffe spielt der Schutz von Boden und Grundwasser mittlerweile bei der Auswahl der Baustoffe eine wesentliche Rolle. Um diesen zu gewährleisten, ist bei Ersatzbaustoffen zu prüfen, ob umweltrelevante Inhaltsstoffe mit dem Sickerwasser in relevanten Mengen in Boden und Grundwasser ausgetragen werden können.

Die Bundesanstalt für Straßenwesen widmet sich diesem Themenbereich in der Forschungslinie „Ressourcenschonender und umweltverträglicher Straßenbau“. Das übergeordnete Ziel der verschiedenen Forschungsprojekte ist dabei, den Einsatz von Ressourcen zu optimieren und gleichzeitig die Auswirkungen auf die Umwelt zu bewerten.

Der Einsatz von Recycling-Baustoffen und industrielle Nebenprodukten aber auch von aufbereitetem Bodenmaterial wird seit Jahrzehnten praktiziert und ist das gern genannte Beispiel der „gelebten“ Kreislaufwirtschaft. Durch die Verwendung dieser mineralischen Ersatzbaustoffe müssen weniger natürliche Primärbaustoffe wie Kies, Sand oder Naturstein abgebaut werden. Zudem wird immer knapper werdender Deponieraum geschont. Ersatzbaustoffe sind meist kostengünstiger als Primärbaustoffe, so dass ein ökologischer Nutzen mit einem finanziellen Vorteil verbunden werden kann. Im Hinblick auf immer schärfere Umweltaforderungen tritt die Frage in den Vordergrund, ob die Ersatzbaustoffe umweltrelevante Inhaltsstoffe enthalten, die durch Sickerwasser in Boden und Grundwasser ausgetragen werden können und dort zu schädlichen Auswirkungen führen. Um den Einsatz von Ersatzbaustoffen bewerten zu können, ist es wichtig, deren Auslagverhalten und mögliche Auswirkungen auf Boden und Grundwasser zu erforschen.

Für das Straßenwesen existiert ein in Jahrzehnten gewachsenes Regelwerk, welches ständig weiter entwickelt wird. Der Straßenbauingenieur trägt die Verantwortung für seine Bauwerke, dies beinhaltet auch die Pflicht, Boden und Grundwasser zu schützen. Dieser Verantwortung wird in den Regelwerken des Straßenwesens Rechnung getragen. Leider finden diese nicht immer die nötige Akzeptanz bei den Umweltverantwortlichen. Im Gegenzug berücksichtigen die Regelwerke aus dem Bereich des Umweltschutzes das komplexe Mehrschichtensystem Straßenbauwerk meist nur unzureichend.

Aus Sicht des Straßenbauingenieurs reicht das vorhandene Wissen über Wasser im Straßenbauwerk für die Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit vollkommen. Für die hydrogeologische Beurteilung der Durchsickerung im Hinblick auf den Boden- und Grundwasserschutz ist der heutige Wissensstand jedoch noch unzureichend. Insbesondere sind dazu folgende Fragen offen: **Wie viel Wasser gelangt in das Straßenbauwerk und wie viel Wasser durchsickert die Straßenböschung?**

Zum Schutz von Boden- und Grundwasser wurden für den Einsatz bestimmter Ersatzbaustoffe im Erdbau Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen entwickelt. Sie sind im „Merkblatt über Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau“ (M T S E)(FGSV, 2017) beschrieben. Mit diesen Bauweisen kann die Menge des Sickerwassereintrags in das Bauwerk reduziert und damit der Austrag an umweltrelevanten Inhaltsstoffen verringert oder sogar ganz vermieden werden.

Ziel der Forschungsarbeiten zum Thema Durchsickerung von Straßenböschungen ist es, eine belastbare Datengrundlage zur Erfassung des Wasserhaushaltes des gesamten Bauwerkes zu schaffen. Daraus werden Instrumente entwickelt, um die Wirksamkeit der unterschiedlichen technischen Sicherungsmaßnahmen zu beurteilen. Durch die ökonomisch und ökologisch optimierten Bauweisen soll das Potential für den Einsatz von Ersatzbaustoffen im Erdbau des Straßenbaus erhöht werden.

Da die Durchsickerung von Straßenböschungen und der damit verbundene Transport umweltrelevanter Inhaltsstoffe ein sehr komplexes Thema ist, erfordert die Bearbeitung die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Straßenbauern, Hydrogeologen, Geoökologen, Mathematikern und Chemikern, um die vielfältigen Fragestellungen zu lösen. In Bild 1-1 sind die verschiedenen Projektansätze der BAST beim Thema Durchsickerung von Straßenböschungen aufgezeigt.

Jeder Projektansatz hat seine Stärken und Schwächen. In großmaßstäblichen Versuchen können die realen Verhältnisse gut wiedergegeben werden. Der Wasserhaushalt kann gut bilanziert und die Inhaltstoffe des Sickerwassers beprobt werden. Solche Versuche sind jedoch personalintensiv und langwierig. Es lassen sich nicht alle Einflüsse erfassen und nicht alle Kombinationen von Baustoffen und Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahme sind möglich.

Schneller und preisgünstiger sind Modellrechnungen. Die Qualität der Berechnungsergebnisse hängt aber stark von der Qualität der gewählten Parameter ab. Durch inverse Modellierung müssen die Eingabeparameter der Programme zur Modellrechnung an die Realität angepasst werden. Die realen Bedingungen werden am besten durch ein Pilotprojekt an einem realen Versuchsdamm wiedergegeben. Diese Versuche sind sehr aufwendig und sehr kostenintensiv, aber zur Validierung der Modellrechnung und der großmaßstäblichen Versuche erforderlich. Die Zuverlässigkeit der Werte der großmaßstäblichen Versuche wird überprüft und durch eine Modellrechnung des Versuchsdammes werden die Parameter für die Modellierung weiter verbessert. Nur so können zukünftig realitätsnahe Aussagen zum Wasserhaushalt von Straßenböschungen durch Modellierungen getroffen werden.

Projektansätze

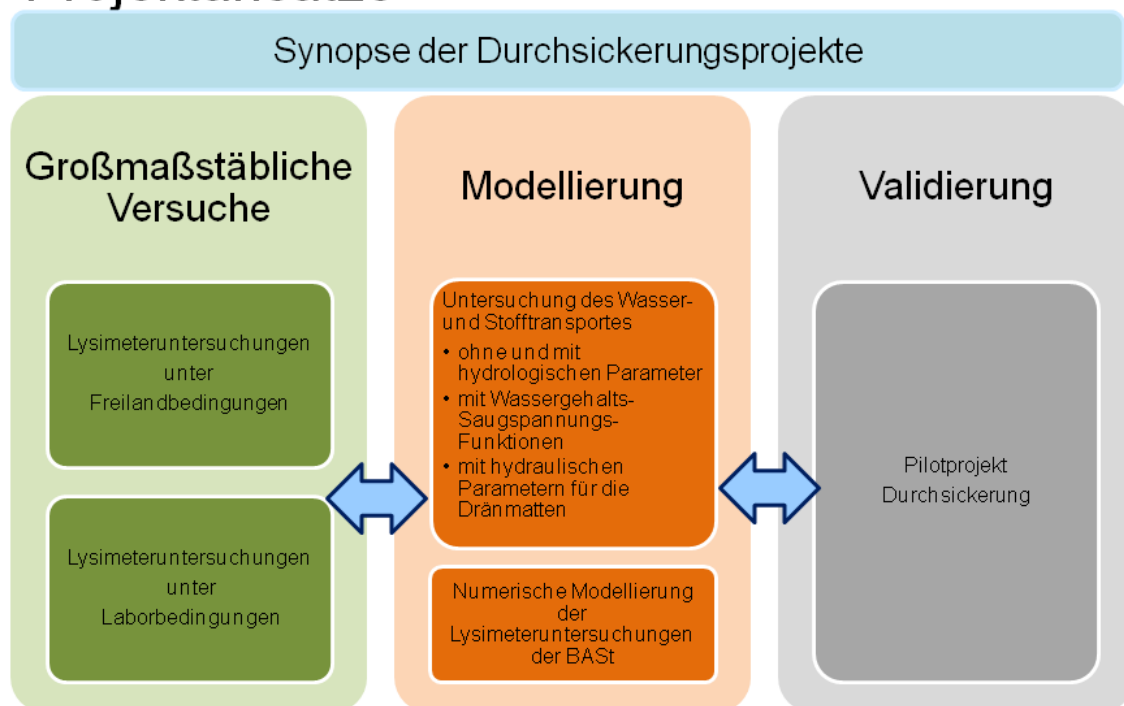


Bild 1-1: Projektansätze zum Thema Durchsickerung

Zum Ende der Projekte soll in einer Synopsis aller Durchsickerungsprojekte eine gemeinsame Auswertung der Ergebnisse und Aufbereitung für die Fachwelt erfolgen.

2 Konzept

In diesem Projekt „Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen“ wird der Forschungsansatz der großmaßstäblichen Versuche verfolgt, mit dem Ziel, die Wirksamkeit von Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen (TSM) zu beurteilen. Hierzu wurden Lysimeter und eine zugehörige Beregnungseinheit entwickelt. Mit der Anlage wurde ein Instrument geschaffen, um unter vergleichbaren, kontrollierten und zeitgerafften Bedingungen verschiedene Kombinationen aus TSM und Ersatzbaustoffen am Ausschnitt einer Böschung zu prüfen. Realisiert wurde dieser Ausschnitt im Maßstab 1:1. Um klimatische Einflüsse weitestgehend auszuschließen, ist die Anlage in einer Versuchshalle aufgestellt, so dass die Lysimeteruntersuchungen unter gleichbleibenden Laborbedingungen durchgeführt werden können.

In der BAST stehen zwei Lysimeteranlagen zur Verfügung. Die Lysimeter werden 15 Wochen parallel nach einem festgelegten Programm beregnet. Dabei werden Sickerwasser und Oberflächenabfluss gemessen und die Inhaltsstoffe des Sickerwassers analysiert. Eine schematische Darstellung der Lysimeteranlage ist in Bild 2-1 zu sehen.

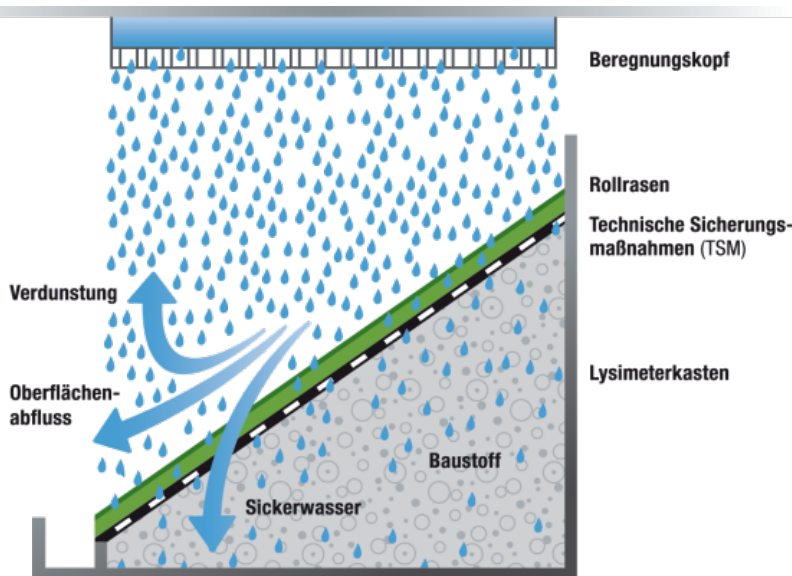


Bild 2-1: Schematische Darstellung der Lysimeteranlage

Die Vorteile der Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen liegen in einer gut erfassbaren Wasserbilanz und der Möglichkeit, regelmäßig Wasserproben für die chemischen Untersuchungen zu gewinnen. Zu den Schwächen gehört, dass Umwelteinflüsse und Straßenabfluss nicht berücksichtigt werden können und ggf. nicht erfassbare Randeinflüsse vorhanden sind. Zudem sind die Versuchsdauern lang und die Versuche sind betreuungsintensiv. Aufgrund der Abmessungen des Lysimeterkastens sind nicht alle TSM realisierbar. Eine ausführliche Beschreibung der Anlage erfolgt in Kapitel 3.

Die Durchsickerung von Straßenböschungen und der Austrag von umweltrelevanten Inhaltsstoffen mit dem Sickerwasser sind von verschiedenen Faktoren abhängig, im Wesentlichen können genannt werden:

- Materialeigenschaften des Baustoffs,
- umweltrelevante Inhaltsstoffe im Baustoff,
- Bauweise für technische Sicherung,
- Menge und Zusammensetzung des Straßenabflusses,
- Menge und Intensität des Regens,
- weitere klimatische Einflussfaktoren,
- Untergrundbeschaffenheit.

Hieraus entstehen unzählige Kombinationen, die nicht alle im Einzelfall betrachtet werden können. Daher ist es notwendig, eine Auswahl zu treffen, die eine für einen möglichst großen Anteil an Kombinationen repräsentativ ist, ohne dabei so sehr zu pauschalisieren, dass der jeweilige Einzelfall nicht wiederzufinden ist.

Bei den Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde der Schwerpunkt gelegt auf:

- die Kombination verschiedener Baustoffe und Bauweisen,
- die Abbildung realitätsnaher und repräsentativer Regenereignisse,
- die möglichst genaue Erfassung aller Wassermengen und
- die Erfassung umweltrelevanter Inhaltsstoffe durch Analyse des Sickerwassers.

Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) widmet sich mittlerweile seit mehreren Jahren dem Themenbereich Durchsickerung von Straßenböschungen. Die bisherigen Erkenntnisse wurden in mehreren Berichten zusammengefasst. Von (MARKS, 2007) wurde über die Planung und Erprobung der großmaßstäblichen Laborversuche berichtet. Dieser Bericht wurde nicht veröffentlicht, aber die Ergebnisse dienten zur Festlegung der Randbedingungen für die weiteren Versuche. Die Ergebnisse von Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen an zwei aufbereiteten Böden wurden von (KELLERMANN-KINNER, et al., 2016) veröffentlicht. Dieselben Böden wurden parallel in einer Lysimeteranlage unter Freilandbedingungen untersucht. Diese Ergebnisse unter Freilandbedingungen für den Untersuchungszeitraum 2010-2013 wurden in einem dritten Bericht von (BRAND, et al., 2016) veröffentlicht. Eine Veröffentlichung zu den Ergebnissen unter Freilandbedingungen der Jahre 2013 bis 2016 und der anschließenden Tracerversuche zum Wasserfluss wird folgen.

In dem vorliegenden Bericht sind die Untersuchungen an Hausmüllverbrennungstasche (HMVA), RC-Baustoff (RC), Gießereirestsand (GRS) und Steinkohlenkesselasche (SKA) in der Lysimeteranlage unter Laborbedingungen beschrieben. Der Schwerpunkt wurde dabei auf unterschiedliche Dränmatten als technische Sicherungsmaßnahme gelegt.

Das Kapitel „Grundlage“ wurde ausführlich in (KELLERMANN-KINNER, et al., 2016) beschrieben und umfasste die Unterkapitel „Rechtliche Hintergründe beim Einsatz von Ersatzbaustoffen“, „Umweltrelevante Inhaltsstoffe“, „Technische Sicherungsmaßnahmen“, „Wasserhaushalt“ und „Menge und Intensität von Niederschlägen in Deutschland“ und wird hier nicht wiederholt.

3 Lysimeteranlage

3.1 Aufbau

Das Wort „Lysimeter“ stammt aus dem Griechischen und bedeutet *lysis* = Lösung und *metron* = Maß, also eine Anlage, um Lösungen zu messen.

Die Lysimeteranlage wird mit einem von der BASt entwickelten Regenregime betrieben, welches in Abschnitt 3.2 beschrieben ist. Sie besteht aus zwei wesentlichen Teilen, der Beregnungseinheit und dem Lysimeterkasten. Im Folgenden werden der Aufbau des Lysimeters und die Funktionen seiner Teile erläutert.

3.1.1 Lysimeterkasten

Der Lysimeterkasten soll einen Ausschnitt aus einer Böschung repräsentieren. Hierzu ist es notwendig, die entsprechende Geometrie auf das Lysimeter zu übertragen, also eine entsprechende Böschungsneigung herzustellen. Um die im Straßenbau verwendeten Verdichtungsgrade einbauen zu können, ist eine entsprechende Stabilität des Lysimeters notwendig. Während der Versuche steht der Lysimeterkasten auf einer Waage, so dass während der Versuchsdauer das Gewicht kontrolliert werden kann. Die Waage hat im Messbereich zwischen 1500 kg und 3000 kg eine Genauigkeit von 1 kg. Der Kasten muss so stabil sein, dass er nach dem Einbau auf die Waage gehoben werden kann. Als Material wurden beschichtete Multiplexplatten aus dem Betonschalungsbau gewählt. Die Fugen wurden mit Silikon abgedichtet. Zusätzlich wurde für die Stabilität ein verstärkender Rahmen aus Vierkanthölzern

vorgesehen. Um den Kasten mit einem Gabelstapler anheben zu können, wurden am unteren Rand dafür Aussparungen angebracht. Bild 3-1 zeigt, wie der Lysimeterkasten mit dem Gabelstapler auf der Waage platziert wird.



Bild 3-1: Seitenansicht des Lysimeterkastens, beim Aufstellen auf die Waage

Die Grundfläche für den Materialeinbau beträgt 0,76 m x 1,44 m, die Füllhöhe ist etwa 1 m in Abhängigkeit von der gewählten TSM. Die Grundfläche des Kastens ist größer, da sich am vorderen Ende des Lysimeters noch das Sammelbecken für den Oberflächenabfluss befindet.

Da sich am Lysimeterboden ein Grenzschichteneffekt ausbildet, kann das Sickerwasser nicht einfach aus dem Kasten abfließen. Der Lysimeterboden wird deshalb mit 18 Saugplatten ausgelegt, die mit Quarzmehl eingeschlämmt werden. Bild 3-2 zeigt den noch leeren Lysimeterkasten mit den Saugplatten.



Bild 3-2: Lysimeterkasten mit Sicht auf die Saugplatten

Die Saugplatten sind mit Schlauchleitungen verbunden, die aus dem Kasten herausgeführt werden und zu den Sammelflaschen führen. Die Sammelflaschen sind miteinander verbunden. Für das gesamte System wird mit einer Vakuumpumpe ein Unterdruck erzeugt. Der Unterdruck wird gering gehalten (ca. 80 mbar), damit der Wasserhaushalt nicht durch den Unterdruck bestimmt ist. Hohe Unterdrücke würden dem Boden das Wasser „aussaugen“. Mit Hilfe der Saugplatten soll jedoch nur simuliert werden, dass die Bodenschicht (und damit die hängende Wassersäule) weitergeht, also dass das Bauwerk nicht am Lysimeterboden endet. In Bild 3-3 ist eine schematische Anordnung der Saugplatten und der Sammelflaschen dargestellt, aus der hervorgeht, welche Saugplatten zu welcher Sammelflasche führen. Das Sickerwasser der Saugplatten 5, 11 und 14 wird in einer Duranglasflasche gesammelt und auf Inhaltsstoffe chemisch analysiert.

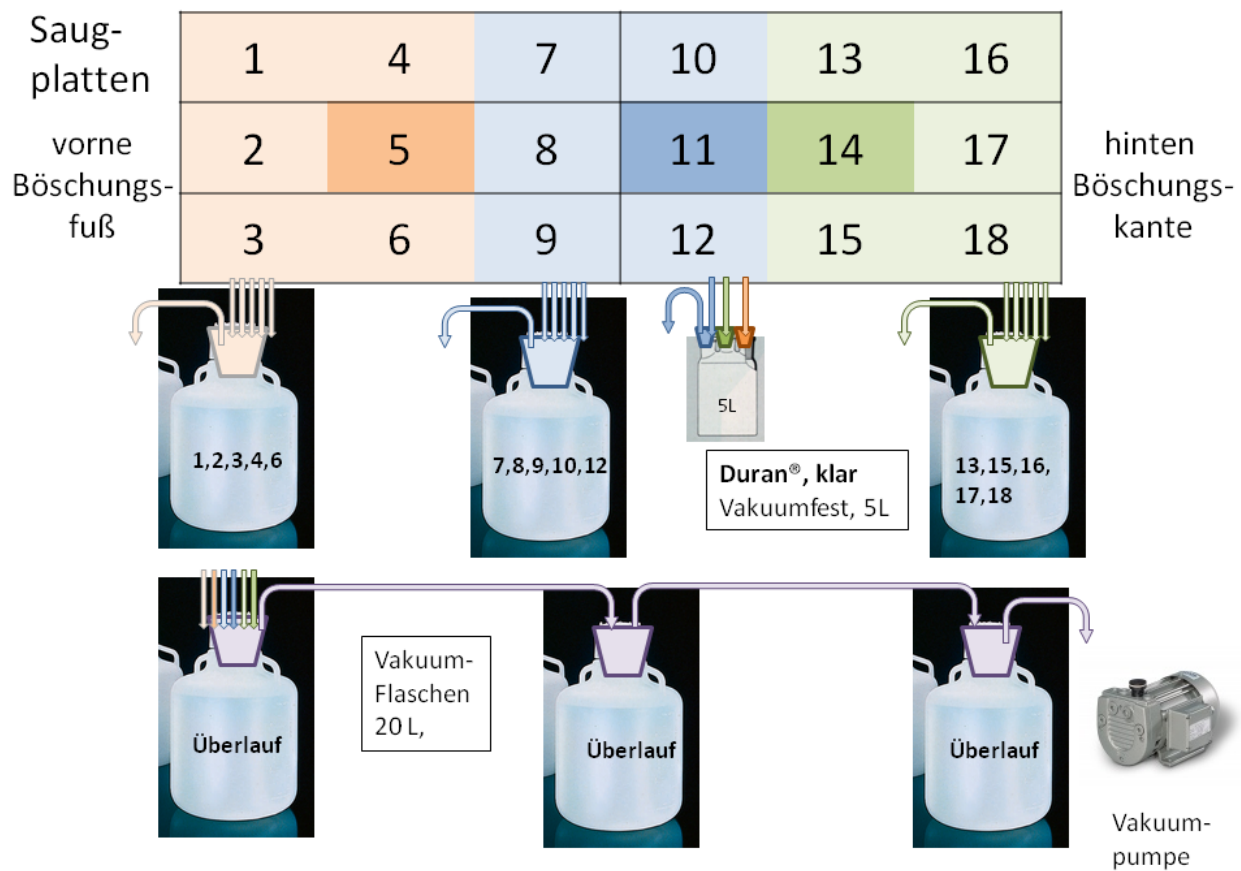


Bild 3-3: Schematische Anordnung der Saugplatten (Draufsicht) und Sammelflaschen

Der Einbau des Materials erfolgt in 10 cm hohen Lagen. Dafür wurde eine Schalung gebaut, die sich treppenförmig nach oben verjüngt. Das Volumen einer Lage ist damit vorgegeben. Mit dem Wassergehalt und der Dichte des Materials wurde die Menge berechnet, die in die Lage eingebaut werden muss, damit die gewünschte Verdichtung erreicht wird. Die Verdichtung erfolgt dann statisch mit Gewichten oder Handstämpfern. Nach dem Einbau wird die Schalung entfernt. Das überstehende Material wird wieder abgetragen und abgezogen, so dass die Böschungsneigung von 1:1,5 entsteht. Bild 3-4 und Bild 3-5 zeigen den Einbau des Materials in den Lysimeterkasten.



Bild 3-4: Detailansicht des treppenförmigen Einbaus des Materials in den Lysimeterkasten



Bild 3-5: Abtragen des treppenförmigen eingebauten Materials zur Herstellung der Böschungsneigung

Der Wassergehalt im Einbauzustand wird durch Rücktrocknung von Proben ermittelt, die während des Einbaus genommen wurden.

Zum Schluss wird die jeweilige TSM eingebaut und Rollrasen verlegt. Dieser dient im Wesentlichen als Erosionsschutz, simuliert aber auch den Oberboden mit Bewuchs.

3.1.2 Beregnungseinheit

Für eine möglichst genaue Nachbildung natürlicher Regenereignisse wurden verschiedene Anforderungen an die Beregnungsanlage gestellt. Die Beregnungsanlage kann Regenspenden zwischen $6,8 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$ und $754 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$ nachbilden. Die Anlage wurde so entwickelt, dass sie eine gleichmäßige, flächenhafte Beregnung der Lysimeteroberfläche mit annähernd natürlichen Tropfengrößen gewährleistet. Zur Erzeugung des gesamten Regenspektrums wurden zwei Pumpensysteme installiert. Das kleine Pumpensystem besteht aus 20 Dosierpumpen, die paarweise geschaltet werden und stufenweise Regenspenden zwischen $6,8 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$ und $68,0 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$ erzeugen. Die große Pumpe ist eine leistungsstarke Membranpumpe, die stufenlos große Regenspenden zwischen $80 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$ und $754 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$ erzeugen kann. Bild 3-6 zeigt das große und kleine Pumpensystem sowie die Steuerungseinheit.



Bild 3-6: Detailaufnahme des Pumpensystems und der Steuerungseinheit

Der Beregnungskopf aus Plexiglas besteht aus Deckel-, Kanülen- und Schutzplatte. Er ist ca. 150 cm x 80 cm groß und enthält ca. 250 Edelstahlkanülen, die eine annähernd natürliche Tropfengröße ermöglichen. Eine Detailaufnahme während der Beregnung ist in Bild 3-7 dargestellt. Der Beregnungskopf verfügt über einen Zulauf und ein Entlüftungsventil. Zur Beregnungseinheit gehört noch ein Wasservorratsbehälter mit 200 l Fassungsvermögen, aus dem entionisiertes Wasser in den Beregnungskopf gepumpt wird. Der Wasservorratsbehälter ist wägbar, so dass die verregnete Wassermenge genau bestimmt werden kann. Die Waage hat eine Messgenauigkeit von 10 g.



Bild 3-7: Detailaufnahme des Beregnungskopfes von unten während der Beregnung

Der Beregnungskopf und die Steuereinheit mit den Pumpensystemen sind an einem fahrbaren Gestell montiert, das über dem Lysimeterkasten platziert wird. Zu dem Gestell gehört eine große Schublade, die

zwischen Beregnungskopf und Lysimeterkasten geschoben werden kann, dadurch wird verhindert, dass beim Einregnen oder in Beregnungspausen unkontrolliert Wasser auf den Lysimeterkasten gelangt. Auf Bild 3-8, Bild 3-9 und Bild 3-10 ist die gesamte Anlage aus verschiedenen Perspektiven zu sehen.



Bild 3-8: Gesamtansicht der 2 Lysimeter mit Wasservorratsbehältern und Arbeitsplatz



Bild 3-9: Beregnungskopf mit Gestell und offener Schublade über Lysimeterkasten (Vorderansicht)



Bild 3-10: Beregnungskopf über Lysimeterkasten mit Sammelflaschen (Seitenansicht)

3.2 Regenregime

Für die Beregnung der Böschungen in den Hallenlysimetern ist ein für Deutschland repräsentatives Regenregime mit einer großen Bandbreite, aus unterschiedlichen Einzelregenereignissen und zwischengeschalteten Trockenphasen generiert worden.

Bei der Auswahl des Regenregimes für die Hallenversuche sind folgende Vorgaben gemacht worden:

1. Es soll für Deutschland typische Niederschlagsereignisse und Trockenphasen sowie Extrembedingungen enthalten. (Da die Ergebnisse aus den Hallenversuchen Allgemeingültigkeit besitzen, aber auch „worst case“ - „best case“ Szenarien enthalten sollen.)
2. Es soll einen Vergleich mit den natürlichen Verhältnissen zulassen. (Um die Ergebnisse der Hallenversuche mit den in der Freilandanlage Augsburg vergleichen zu können, wurden auch die Niederschlagsereignisse aus Augsburg berücksichtigt.)
3. Es soll eine „zeitgeraffte“ Wiedergabe der typischen Niederschlagsereignisse und Trockenphasen ermöglicht werden.
4. Neben den Niederschlagsereignissen soll auch der Straßenabfluss in dem Regenregime berücksichtigt werden.
5. Zur Gewährleistung der Vorgaben der Punkte 3. und 4. soll in der vorgesehenen Beregnungsdauer die dreifache Menge des mittleren Jahresniederschlags von Deutschland abgerechnet werden.
6. Die Dauer des Regenregimes ist auf einen Zeitraum von 49 Tagen festgelegt worden. Nach dieser Zeit erfolgt eine Wiederholung, um festzustellen, ob sich das Verhältnis zwischen Oberflächenabfluss und Sickerwasserabfluss aufgrund einer Aufsättigung des Bodens ändert.

Randbedingungen bei der Generierung des Regenregimes sind die möglichen Regenspenden der Berechnungsanlage zwischen ca. 6,8 l/(s·ha) und 754 l/(s·ha).

Geringere Regenspenden als 6,8 l/(s·ha) können nur durch zwischengeschaltete Berechnungspausen erzeugt werden.

Um die o.g. Vorgaben möglichst optimal zu erfüllen, ist wie folgt vorgegangen worden:

- Es wurde recherchiert, welche Regenereignisse in Deutschland vorkommen. Hierzu wurden verschiedene Standorte ausgewählt, die zum einen Extremwerte abbilden (extrem hohe und geringe Niederschlagsintensitäten sowie extrem lange Niederschlagsereignisse, die zu hohen Versickerungsraten führen). Zum anderen wird ein Standort ausgewählt, der hinsichtlich des Jahresniederschlags und der Niederschlagsintensitäten Mittelwerte repräsentiert.
- Die Niederschlagsaufzeichnungen der Wetterstation in Augsburg wurden mit den ausgewählten Standorten verglichen, um den Freilandstandort Augsburg charakterisieren zu können.
- Die Daten wurden so ausgewertet, dass sowohl Extremwerte als auch Mittelwerte hinsichtlich der Niederschlagsintensitäten, der Dauer der Niederschlagsereignisse und der Trockenphasen enthalten sind. Daraus ist eine Bandbreite von Niederschlagsereignissen gewählt worden, die hinsichtlich der Versickerungsraten Einfluss hat und die für alle Standorte charakteristische Größen abbildet.

Die Beschreibung aller ausgewerteten Niederschlagsereignisse wird ausführlich in Abschnitt 3.5 des Berichtes Teil 1: Bodenmaterial (KELLERMANN-KINNER, et al., 2016) erläutert. Aus diesen verschiedenen Niederschlagsereignissen an den untersuchten fünf Standorten (Bremen, Neuruppin, Würzburg, Augsburg und Kempen) wurde eine Auswahl vorgenommen mit dem Ziel, ein möglichst breites Spektrum unterschiedlichster Niederschläge zu erfassen. Dabei wurden sowohl die größten gemessenen Niederschläge aus den DWD-Datensätzen als auch die Starkniederschläge nach KOSTRA berücksichtigt. Die ausgewählten Niederschlagsereignisse und der Grund für ihre Auswahl sind in der Tab. 3-1 dokumentiert. Das Regenregime wurde mit den in Tab. 3-1 aufgeführten Niederschlagsereignissen generiert (Bild 3-11). Das Regenregime erstreckt sich über einen Zeitraum von 49 Tagen. Es wurde der mittlere Jahresniederschlag Deutschlands von 789 mm zugrunde gelegt, der in etwa dem mittleren Jahresniederschlag der 5 Standorte entspricht. Damit auch der quantitativ bedeutsame Straßenabfluss nicht unberücksichtigt bleibt, wurde hierfür der dreifache Jahresniederschlag, d.h. 2367 mm angesetzt. Bezogen auf den Zeitraum von 49 Tagen ergibt sich daraus eine Niederschlagsmenge von 317 mm, die durch entsprechende Zusammenstellung der in Tab. 3-1 aufgeführten Niederschlagsereignisse zu erreichen war.

Niederschlags-spende [l/(s·ha)]	Niederschlag s-menge [mm]	Dauer	Wiederkehrzeit [a]	Bemerkung
4,4	113,1	72 h	100	KOSTRA - Mittelwert aller Standorte
16,7	4,5	45 min	---	DWD-Datensatz - größte Niederschlagsmenge, die an allen 5 Standorten für die angegebene Niederschlagsdauer gemessen wurde
20,8	44,9	6 h	10	KOSTRA - Mittelwert aller 5 Standorte
33,3	9,0	45 min	---	DWD-Datensatz - größte Niederschlagsmenge, die in Bremen, Würzburg und Kempen für die angegebene Niederschlagsdauer gemessen wurde
40,9	14,7	1 h	0,5	KOSTRA - Kempen
66,7	6,0	15 min	---	DWD-Datensatz - größte Niederschlagsmenge, die an allen 5

				Standorten für die angegebene Niederschlagsdauer gemessen wurde
85,3	7,7	15 min	0,5	KOSTRA - Augsburg
113,4	3,4	5 min	0,5	KOSTRA - Mittelwert aller 5 Standorte
166,7	5,0	5 min	---	DWD-Datensatz - größte Niederschlagsmenge, die an allen 5 Standorten für die angegebene Niederschlagsdauer gemessen wurde
183,4	33,0	30 min	100	KOSTRA - Mittelwert aller 5 Standorte
332,2	29,9	15 min	100	KOSTRA - Würzburg
464,4	13,9	5 min	100	KOSTRA - Mittelwert aller 5 Standorte
600,8	18,0	5 min	100	KOSTRA - Würzburg

Tab. 3-1: Auswahl der Niederschlagsereignisse für die Generierung des Regenregimes

Tatsächlich ergeben die in Bild 3-11 dargestellten Niederschlagsereignisse eine Niederschlagsmenge von 303 mm. Unter Beachtung der Niederschlagsmenge wurde das Regenregime so zusammengestellt, dass es 15 Regentage (entspricht 31 % von 49 Tagen) und 34 Trockentage (entspricht 69 % von 49 Tagen) enthält und damit ein realitätsnahes Verhältnis zwischen Regen- und Trockentage aufweist.

Dabei wurden die Regentage so verteilt, dass zwischen den einzelnen Regenereignissen Pausen liegen und somit ein Zeitraum für Sickerprozesse im Boden zur Verfügung steht, der nicht direkt durch ein Regenereignis beeinflusst wird. Aus diesem Grund wurde das 72-stündige Niederschlagsereignis mit der größten Niederschlagsmenge von 113,1 mm am Ende des Zeitraums platziert, weil hier mit größeren und länger andauernden Durchsickerungen gerechnet wird. So können beim 1. Durchgang (1. bis 49. Tag) die Sickerwasserprozesse ausgehend vom Einbauwassergehalt untersucht werden und im 2. Durchgang (49. bis 98. Tag) die Sickerwasserprozesse am durch das 72-stündige Niederschlagsereignis aufgesättigten Boden betrachtet werden.

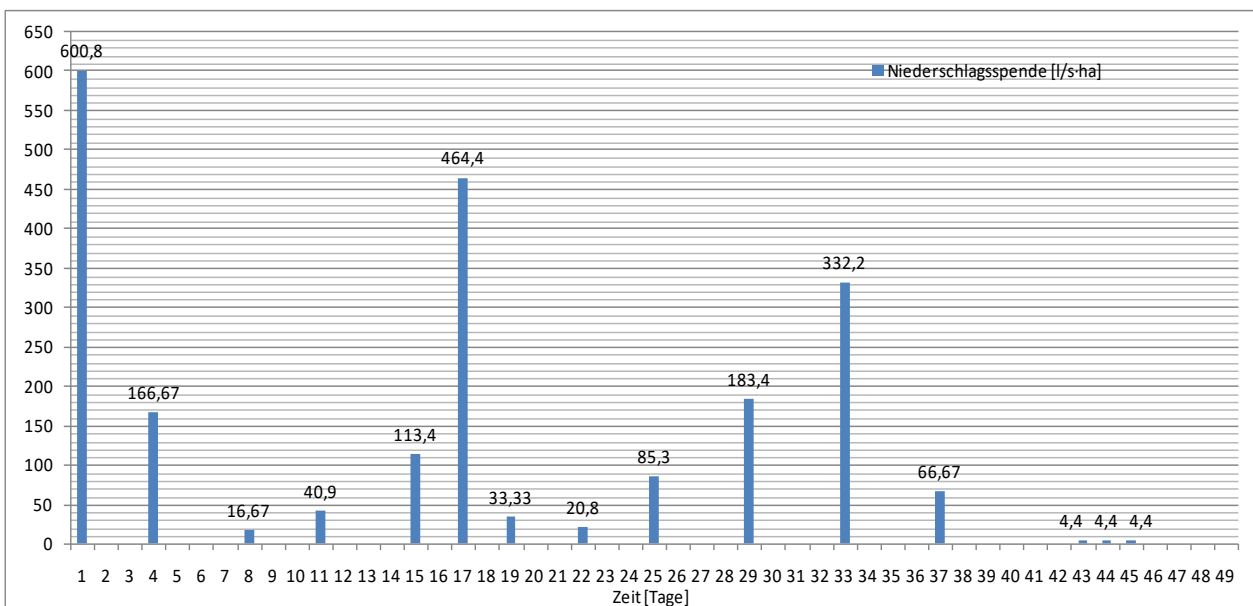


Bild 3-11: Regenregime (Berechnungsprogramm) mit zugehörigen Niederschlagsereignissen

Zur Verdeutlichung des Verlaufs der abgerechneten Niederschlagsmengen im Zuge des Regenregimes sind die Summen der Niederschlagsmengen in Bild 3-12 dargestellt.

Auffällig ist hierbei insbesondere, dass allein der 72h-Regen, der während der drei letzten Tage des Regenregimes abgerechnet wird, rund ein Drittel der gesamten Niederschlagsmenge (113,1 mm) ausmacht.

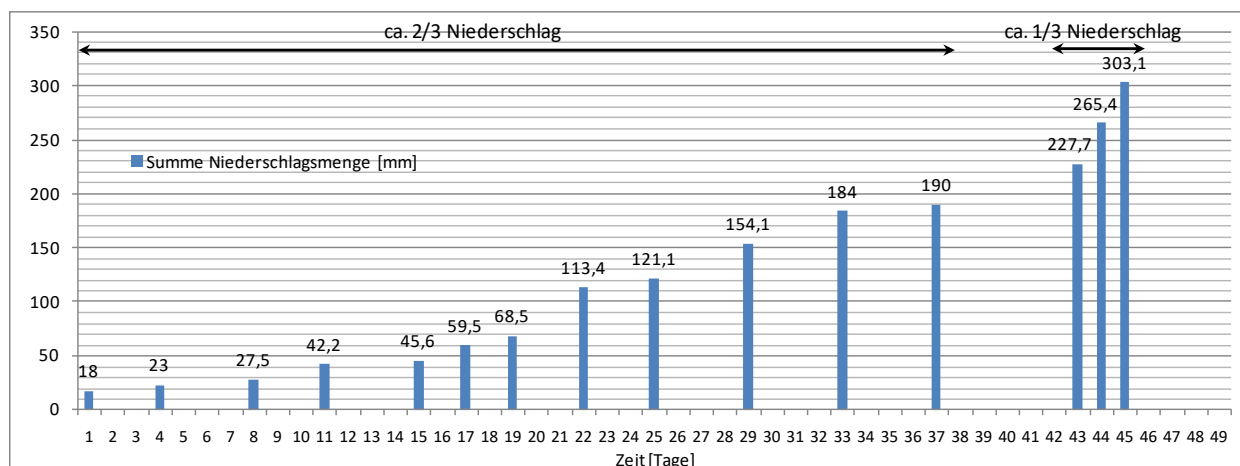


Bild 3-12: Summen der Niederschlagsmengen

Beim Vergleich mit Bild 3-11 wird nochmals deutlich, dass Niederschlagsereignisse mit großen Niederschlagsspenden nur relativ geringe Niederschlagsmengen erzeugen (siehe Beginn Regenregime), während Niederschlagsereignisse mit kleinen Niederschlagsspenden aufgrund der sehr viel längeren Niederschlagsdauer sehr große Niederschlagsmengen erzeugen können (siehe Ende Regenregime).

3.3 Sensitivitätsanalyse

Für die Aufstellung des Regenregimes wurde der durchschnittliche Jahresniederschlag in Deutschland verdreifacht, um den Straßenabfluss zu berücksichtigen, und zur Zeitraffung auf die 98 Tage Versuchsprogramm umgerechnet. Auf die Lysimeteranlage werden so in 14 Wochen Versuchsdauer etwa 665 l Wasser nach einem festgelegten Regenregime verregnet. Um die Sensitivität der Versuchsergebnisse gegenüber der Regenmenge zu untersuchen, wurde in einer abschließenden Versuchsreihe nur der Jahresniederschlag bezogen auf den Versuchszeitraum verregnet. Daraus ergibt sich ein Abminderungsfaktor von 0,35 gegenüber der ursprünglichen Regenmenge im Regenregime. Die Verteilung bleibt gleich. Der Berechnungsplan für die Sensitivitätsanalyse ist als Tab.-A 2 im Anhang abgebildet.

4 Untersuchungsprogramm

4.1 Untersuchungsumfang

In der zweiten Untersuchungsserie mit den Lysimetern wurden eine Hausmüllverbrennungssasche (HMVA), ein Recycling-Baustoff (RC) ein Gießereirestsand (GRS) und eine Steinkohlenkesselasche (SKA) untersucht.

Die Tab. 4-1 zeigt die Matrix des im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführten Untersuchungsprogramms und das jeweilige Startdatum der Versuchsreihen. Der Schwerpunkt der zweiten Untersuchungsserie lag auf der Wirkungsweise unterschiedlicher Dränmaten, die im Kapitel 4.4 ausführlich beschrieben werden. Aufgrund externer Randbedingungen, z.B. ist im Winter kein Rollrasen verfügbar, konnten nur 4 Versuchsreihen pro Jahr durchgeführt werden. Durch die langen Versuchslaufzeiten war es notwendig, eine sinnvolle Auswahl zu treffen, da nicht alle Kombinationen

betrachtet werden konnten. Die Reduzierung der Wassermengen durch Dränmatten kann nur vergleichend beschreiben werden, daher mussten zunächst für alle Materialien Null-Varianten ohne TSM durchgeführt werden. Anschließend wurden zunächst Versuche mit Dränmatte 1 durchgeführt, die schon im Teil Bodenmaterial verwendet wurde. Für einen Vergleich aller 3 Dränmatten wurde das Material HMVA ausgewählt. Da die Dränmatte 3 hier etwas besser abschnitt als Dränmatte 2 wurde die Bauweise SKA mit Dränmatte 3 getestet. Um die Wirkungsweisen der unterschiedlichen Dränmatte besser vergleichen zu können, wurde entschieden, der Variant RC mit Dränmatte 3 dem Vorzug vor einer Variante mit GRS zu geben, so dass wegen der begrenzten Anzahl der Versuchsreihen GRS nicht mehr mit Dränmatte getestet werden konnte.

Für die Sensitivitätsanalyse wurden die selben Lysimeterfüllung benutzt wie für die Versuchsreihe RC und SKA mit Dränmatte 3. Um den Einfluss der geringeren Wassermenge besser herauszuarbeiten wurde für die Sensitivitätsanalyse die Bauweise ohne TSM untersucht.

					
	Bauweise ohne TSM	Bauweise mit Dränmatte 1	Bauweise mit Dränmatte 2	Bauweise mit Dränmatte 3	Bauweise ohne TSM [Sensitivitätsanalyse]
HMVA	29.04.2013	29.04.2013	15.09.2014	15.09.2014	
RC	28.04.2014	28.04.2014		04.05.2015	15.08.2016
GRS	26.08.2013				
SKA	26.08.2013			04.05.2015	15.08.2016

Tab. 4-1: Untersuchungsprogramm in der Lysimeteranlage

4.2 Material

In diesem zweiten Berichtsteil wurden ein RC-Baustoff und industrielle Nebenprodukte untersucht. Es wurden Stoffe ausgewählt, die im Erdbau des Straßenbaus verwendet werden. Nachfolgend werden diese Materialien beschrieben.

HMVA entsteht bei der Verbrennung von Hausmüll zunächst als Rostasche. Diese wird anschließend durch Abtrennen der metallischen und unverbrannten Teile aufbereitet und durch Brechen und Sieben klassifiziert. Da in der Asche Bestandteile enthalten sind, die zu einer latenten chemischen Reaktion führen können, muss die Asche vor Verwendung 90 Tage feucht gelagert werden. In Deutschland fallen jährlich ca 4,5 Mio. t HMVA an (FGSV, 2014).

RC sind Gemische aus Gesteinskörnungen, die zuvor schon als natürliche oder künstliche mineralische Baustoffe in gebundener oder ungebundener Form eingesetzt waren. Sie werden beim Umbau, Rückbau oder Abbruch gewonnen und dem neuen Verwendungszweck entsprechen aufbereitet (FGSV, 2002).

Im Jahr 2014 betrug der Anfall mineralischer Abfälle der Fraktion Bauschutt und Straßenaufbruch insgesamt 68.2 Mio. t. Daraus wurden 55,3 Mio. t Recycling Baustoffe hergestellt. Dazu kommen noch Recycling-Gesteinskörnungen die bei den Fraktionen Boden und Steine (12,1 Mio. t) und der Aufbereitung der Fraktion Baustellenabfälle (0,2 Mio. t) angefallen sind, so dass im Jahr 2014 insgesamt 67,6 Mio. t Recycling-Baustoffe hergestellt wurden. Das deckt etwa 12,3 % des Bedarfs an Gesteinskörnungen von insgesamt 549,0 Mio. t in 2014. Von den 67,6 Mio. t Recycling-Baustoffen wurden 52,5 % im Straßenbau und 24,3 % im Erdbau eingesetzt (Kreislaufwirtschaft Bau, 2017).

SKA fällt bei der Verbrennung von Steinkohle und deren Mitverbrennungsstoffen in Kohlekraftwerken mit Staubfeuerung an. Sie entsteht aus den mineralischen Bestandteilen der Brennstoffe, die im Feuerraum der Kraftwerke zu Agglomeraten zusammensintern, aufgrund ihrer Masse herabfallen und durch eine Öffnung im Kesselboden über ein Wasserbad abgezogen werden (FGSV, 2009).

GRS ist rieselfähiger Sand, der in Eisen-, Stahl-, Temper- und Nichteisenmetall-Gießereien als Reststoff anfällt. In den Gießereien wird flüssiges Metall in Formen aus mit Bindemitteln verfestigtem Sand gegossen. Durch die hohen Temperaturen reagieren die organischen Bindemittel des Sandes, so verliert z.B. Bentonit in tongebundenen Formsanden seine Bindefähigkeit. Jährlich fallen ca. 1 Mio. t GRS an. (FGSV, 1999)

An den Materialien wurden jeweils die folgenden bautechnischen Untersuchungen durchgeführt: Korngrößenverteilung DIN 18123, Durchlässigkeitsversuche nach DIN 18130 und Proctorversuche nach DIN 18127. Beim RC wurde zusätzlich die stoffliche Zusammensetzung bestimmt.

4.3 Lysimeterversuche

Nach dem Einbau der Materialien und TSM in die Lysimeterkästen werden die im Beregnungsregime festgelegten Regenmengen verregnet. Ein Umlauf dauert 49 Tage und wird zweimal durchgeführt, so dass ein Versuch 98 Tage dauert und nach einer Woche Nachlaufzeit nach 105 Tagen beendet wird. Nach dem ersten Umlauf wird der Rollrasen gewechselt, da dieser aufgrund des Lysimeteraufbaus nicht ausreichend mit Licht versorgt werden kann und daher abstirbt.

Der Wasserzulauf zur Beregnungseinheit erfolgt durch den Wasservorratsbehälter, der auf einer Waage steht. Aus dem im Regenregime festgelegten Niederschlagsspenden und deren Dauer wird die Regenmenge errechnet, die für die Fläche des Lysimeterkastens benötigt wird. Diese Regenmenge wird in Litern pro Minute umgerechnet, so dass eine Kontrolle der verregneten Menge kontinuierlich erfolgen kann. Im Anhang (Tab.-A 1) befindet sich ein exemplarischer Beregnungsplan für HMVA ohne TSM und für die Sensitivitätsanalyse mit RC ohne TSM (Tab.-A 2), die die Umsetzung des Beregnungsregimes in konkrete Wassermengen zeigen.

Vor jedem Regenereignis muss der Beregnungskopf gefüllt und entlüftet werden. Dies geschieht bei geschlossener Schublade, um unkontrollierten Wasserzulauf auf den Lysimeterkasten zu verhindern. Dafür wird das Entlüftungsventil geöffnet und alle Pumpen so lange laufen gelassen, bis keine Luft mehr austritt. Anschließend wird das Entlüftungsventil wieder geschlossen, und es erfolgt die Einregnung. Dazu werden die Pumpensysteme so einjustiert, dass die im Regenregime vorgegebene Menge Wasser pro Minute aus dem Wasserbehälter in den Beregnungskopf gepumpt wird. Da das System träge reagiert, wird so lange eingeregnet, bis der gewünschte Wert mindestens 5 Minuten konstant bleibt.

Nun beginnt die eigentliche Beregnung. Die Schublade wird herausgezogen, so dass das Wasser auf das Lysimeter regnet. Gleichzeitig wird das Gewicht des Wasservorratsbehälters notiert und die Uhr für die Versuchsdauer gestartet. Nachdem die gewünschte Wassermenge aus dem Wasservorratsbehälter auf das Lysimeter verregnet wurde, wird die Schublade wieder zugeschoben und die Messung ist beendet. Dabei ist die entscheidende Größe die verregnete Wassermenge und in 2. Linie die Zeit. Nach Beendigung der Messung werden alle Pumpen abgestellt und ggf. der Wasservorratsbehälter wieder mit entionisiertem Wasser gefüllt. Das Gesamtgewicht des Lysimeterkastens wird jeweils vor und nach der Beregnung gemessen. Die Einregnung und die Beregnung werden dokumentiert.

Während der Beregnungsversuche werden an jedem Arbeitstag der Lysimeterkastens und die Menge des Oberflächenabflusses sowie des Sickerwassers gewogen.

4.4 Bauweisen

Für die Untersuchungen in der ersten Versuchsreihe Teil Bodenmaterial wurde als Dränmatte 1 eine beidseitig mit Vlies kaschierte Krallmatte verwendet. In der zweiten Versuchsreihe wurden zusätzlich die nachfolgend beschriebenen Dränmatten 2 und 3 untersucht.

Kunststoff-Dränelemente, auch Dränmatten genannt, sind industriell vorgefertigte, flächenartige Elemente zur Entwässerung. Sie bestehen aus einer Sickerschicht und einem auf der Oberseite des Dränkörpers

aufgebrachten Filtergeotextil. In der Regel wird werkseitig auch auf der Unterseite ein Geotextil als Schutzschicht aufgebracht. Kunststoff-Dränelemente werden vor allen in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien eingesetzt und übernehmen dort im Allgemeinen drei Funktionen:

- Filtern gegenüber Rekultivierungsboden (Nachweis der mechanischen und hydraulischen Filterwirksamkeit für das Filtergeotextil)
- Dränen (Nachweis der hydraulischen Leistungsfähigkeit)
- Schützen (Schutzwirksamkeitsnachweis).

Als Rohstoffe für Formmassen und Fasern der Komponenten Sickerkörper und Geotextilen werden überwiegend Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) und Polypropylen (PP) eingesetzt.

Der Verbund der drei Komponenten Filterlage, Dränkern und Trägergeotextil kann beispielsweise mit vollflächiger thermischer Fixierung, linienförmiger Vernähung, punktförmiger Heißverklebung oder punktförmiger Ultrahochfrequenzverschweißung ausgeführt sein. Für die Lysimeteruntersuchungen ist besonders die Dränleistung von Interesse, die für die Dränung maßgebende Kenngröße der Dränmatten ist das langfristige Wasserableitvermögen.

Um das eingedrungene Sickerwasser dauerhaft ableiten zu können, ist ein druckstabiler und kriecharmer Dränkern notwendige Voraussetzung. In Kriechversuchen wird unter verschiedenen Druck- und Scherbeanspruchung die Veränderung der Dicke über einen Zeitraum von mindestens 10.000 h ermittelt, da der zur Verfügung stehende Porenraum durch das Eindringen des Filtrvlieses geringer wird. Mit diesen Kriechkurven wird die voraussichtliche Restdicke nach 100 Jahren extrapoliert. Aus der Messung der Dicke als Funktion der Druckspannung werden dann die Drücke ermittelt, die erforderlich sind, um das Dränelement auf diese Restdicken zusammenzudrücken. Das Wasserableitvermögen wird bei unterschiedlichen hydraulischen Gradienten und unterschiedlichen Bettungen (hart/hart, hart/weich, weich/weich) als Funktion der Druckspannung bestimmt. Das Langzeit-Wasserableitvermögen bei einer bestimmten Druck- und Scherbeanspruchung ist dann das Wasserableitvermögen, das bei der Druckspannung ermittelt wurde, die zu der entsprechenden Restdicke gehört. Der ermittelte Wert des Wasserableitvermögens wird durch Abminderungsfaktoren reduziert. Dieser reduzierte Wert muss dann mindesten so groß sein wie der maßgebliche spezifische Dränabfluss. (BAM, 2015) (RUTHMANN, 2010)

Die Eignung für ein konkretes Projekt mit teilweise einzigartigen Randbedingungen muss separat unter Berücksichtigung der projektspezifischen Parameter sowie der Einfluss- und Abminderungsfaktoren beurteilt werden. Dabei ist nachzuweisen, dass das Kunststoff-Dränelement die maßgebliche Dränspende unter Beachtung aller projektbezogenen Randbedingungen mit ausreichender Sicherheit ableitet. (GDA, 2015)

In diesem Projekt wurden folgenden Dränmatten untersucht:

Dränmatte 1 (Polyfelt Megadrain)

Die Megadrain Dränmatte ist ein Geoverbundstoff aus dreidimensionalen PP-Monofilament-Matten, die zweiseitig mit einem Filtergeotextil kombiniert wurde (Tencate, 2010). Bild 4-1 zeigt Detailaufnahmen der Dränmatte 1. Diese Dränmatte wurde auch in der ersten Versuchsreihe mit Bodenmaterial und bei den Freilandversuchen in Augsburg verwendet.

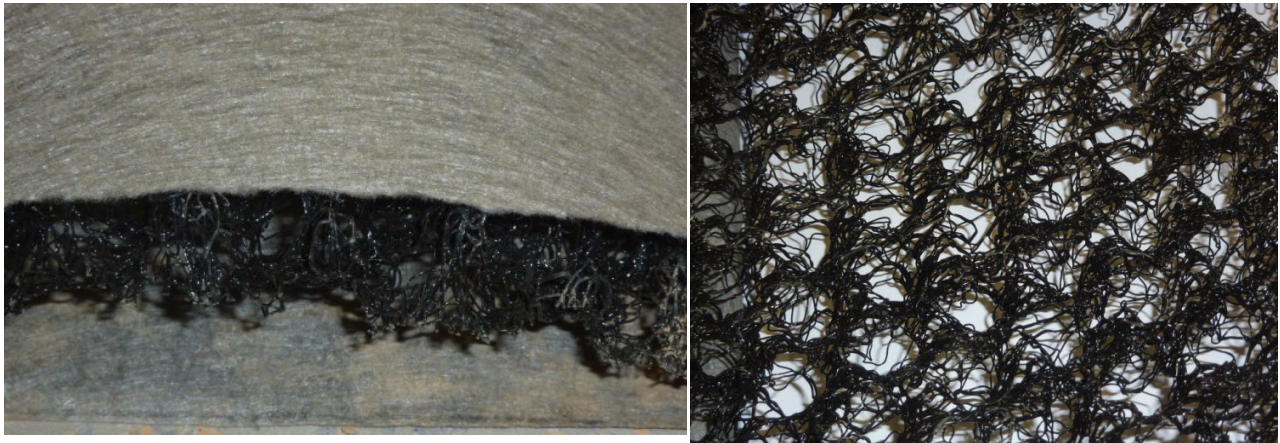


Bild 4-1: Detailaufnahmen der Dränmatte 1 (Polyfelt Megadrain)

Dränmatte 2 (Terram 1B1)

Bei dieser Dränmatte, die in Bild 4-2 zu sehen ist, handelt es sich um ein Dränagegitter aus extrudierten Polyethylen von hoher Dichte (PE-HD). Das beidseitig auflaminierte Filtervlies besteht aus Polypropylen.(Terram, 2013)

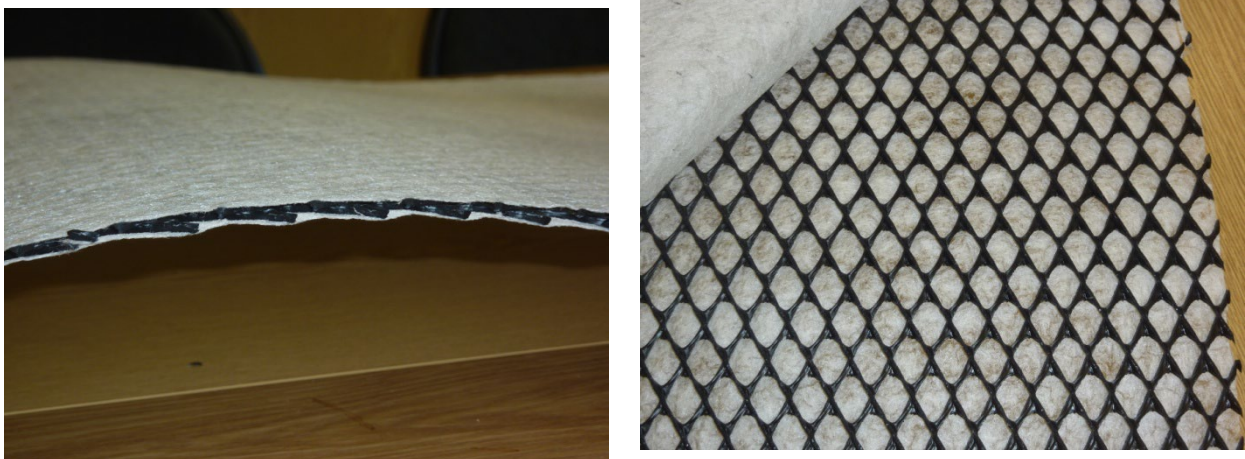


Bild 4-2: Detailaufnahmen der Dränmatte 2 (Terram 1B1)

Dränmatte 3 (Enkadrain ZB)

Die Dränmatte Enkadrain besteht aus einem welligen Wirrgelege aus PP-Strängen, das als Dränkern dient, und einem Filter – und Trägervliesstoff. Die lose übereinander liegenden Komponenten werden mit einer Nähmaschine an verschiedenen Stellen vernäht, dies ist gut in Bild 4-3 zu erkennen. Als Filter- und Trägergeotextil dient ein vernadelter Vliesstoff aus schwarzen PP-Stapelfasern (Colbond, 2007). Enkadrain hat eine Zulassung als Kunststoff-Dränelement für Deponieoberflächenabdichtungen durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM, 2010).



Bild 4-3: Detailaufnahmen der Dränmatte 3 (Enkadrain ZB)

In Tab. 4-2 sind die von den Herstellern zugesicherten Eigenschaften aus den Produktdatenblättern für die verwendeten Dränmatten zusammengestellt.

Prüfgröße	Prüfvorschrift	Einheit	Dränmatte 1 Polyfelt Megadrain	Dränmatte 2 Terram 1B1	Dränmatte 3 Enkadrain ZB
Zugfestigkeit	DIN EN ISO 10319	kN/m	18/19	20,0	22,0
Stempeldurchdruckkraft	DIN EN ISO 12236	N	1350	3300	1900
Kegelfallversuch	DIN EN ISO 13433	mm	25	38	20
Charakteristische Öffnungsweite	DIN EN ISO 12956	μm	95	75	110
Wasserdurchflussrate	DIN EN ISO 11058	$\text{l}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	110	50	80
Wasserleitvermögen in der Ebene 20kPA, $i=1,0$, weich/weich	DIN EN ISO 12958	$\text{l}/(\text{m} \cdot \text{s})$	5,2	0,70	1,6

Tab. 4-2: Eigenschaften der verwendeten Dränmatten

Dränmatte 1 erreicht bei den für die Dränung wichtigen Prüfgrößen Wasserdurchflussrate und Wasserleitvermögen die jeweils höchsten Werte, gefolgt von Dränmatte 3.

4.5 Umweltrelevante Inhaltsstoffe

Um die Wirksamkeit von technischen Sicherungsmaßnahmen beurteilen zu können, ist nicht nur die Menge des Sickerwassers, sondern auch die darin gelösten umweltrelevanten Inhaltsstoffe von Interesse. Die in der BAST für die Lysimeterversuche angelieferten Materialien wurden auf ihre Inhaltsstoffe untersucht. An diesen Proben wurden jeweils Feststoffuntersuchungen durchgeführt und Eluatwerte bestimmt.

Die Eluate aus den Bodenproben wurden mit mehreren Verfahren hergestellt. Nach dem Entwurf der geplanten Ersatzbaustoffverordnung (EBV), die Teil der sogenannten Mantelverordnung ist (MantelV, 2017), sollen die Eluate mit dem Perkolationsverfahren nach (DIN 19528, 2009) bestimmt werden. Da die Perkolationsverfahren in einer definierten Säule durchgeführt wird, spricht man auch vom Säulentest. Zusätzlich wurde noch Eluat mit dem auch in der Ersatzbaustoffverordnung genannten Schüttelverfahren (2:1 Verfahren) (DIN 19529, 2015) bestimmt. Hinsichtlich der im Eluat gemessenen Parameter liegen die umfangreichsten Erfahrungen mit dem seit vielen Jahren eingesetzten deutschen Einheitsverfahren DEV S4 (DIN 38414-4, 1984) vor. Das DEV S4-Verfahren wurde mittlerweile ersatzlos zurückgezogen. Stattdessen wird das Schüttelverfahren nach (DIN EN 12457-4, 2003) empfohlen. Ein präzisiertes Schüttelverfahren (L/S = 10:1) ersetzt auch seit 2016 das DEV S4-Verfahren in den TP Gestein-StB Teil 7.1.1 (FGSV, 2016). Aufgrund der Vergleichbarkeit mit den anderen Berichtsteilen (KELLERMANN-KINNER, et al., 2016), wurden hier weiter mit dem DEV S4-Verfahren Eluate hergestellt.

Bei dem Perkolationsverfahren (DIN 19528, 2009) wird für die grundlegende Charakterisierung von Ersatzbaustoffen nach den in Tab. 4-3 enthaltenen W/F-Verhältnissen geprobt (ausführlicher Säulentest). Für die Übereinstimmungsuntersuchung ist das gesamte Eluat bis zu W/F-Verhältnis 2 l/kg in einer Sammelflasche aufzufangen (Säulenkurzttest).

Fraktion-Nr.	W/F-Verhältnis l/kg
1	0,3
2	1,0
3	2,0
4	4,0

Tab. 4-3: W/F-Verhältnisse für die grundlegende Charakterisierung beim Perkolationsverfahren (ausführlicher Säulentest)

Bei den durchgeführten Lysimeteruntersuchungen wurde die in der Duranglasflasche gesammelte Probe zur Analyse gebracht, wenn mindestens 200 ml darin enthalten waren. Die Inhaltsstoffe werden durch das Referat „Chemische Grundlagen, Umweltschutz, Labordienst“ der BAST bestimmt. Die Parameter Sulfat und Cyanid wurden von einem externen Labor bestimmt.

An den während der Lysimeterversuchen gewonnenen Sickerwasserproben wurden die Parameter aus Tab. 4-4 untersucht. Während des langjährigen Untersuchungszeitraums der Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen waren die Bezugswerte einem steten Wandel unterzogen. Dies bezieht sich nicht nur auf die Höhe der Werte, sondern auch auf die zu prüfenden Stoffe und die zu verwendenden Prüfverfahren. So gab es zwei neue Entwürfe der Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung, kurz Mantelverordnung (MantelV, 2017). Der letzte hier zugrundegelegte Entwurf ist vom Mai 2017. Bisher wurde die Verordnung aber noch nicht eingeführt, so dass weiter auf eine bundeseinheitliche Regelung gewartet wird. In 2016 hat die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA, 2016) die Ableitung der Geringfügigkeitsschwellenwerten (GFS) überarbeitet. Um einen Vergleich mit dem Berichtsteil 1. Bodenmaterial zu haben, wurden die zu Beginn der Untersuchungen 2011 festgelegten Parameter weiterhin geprüft. Tab. 4-4 zeigt die festgelegten Parameter und die Veränderung der GFS und der Prüfwerte. In der Tabelle sind die Werte nach (LAWA, 2004), (BBodSchV, 2012), (LAWA, 2016) und die Werte aus dem Entwurf der (MantelV, 2017) eingetragen. Die Änderungen sind farbig markiert. Eine ausführliche Erläuterung der rechtlichen Hintergründe beim Einsatz von Ersatzbaustoffen und zu den umweltrelevanten Inhaltsstoffen ist im Teil 1:

Bodenmaterial (KELLERMANN-KINNER, et al., 2016) enthalten. Im Rahmen der Europäischen Normung durch CEN wird zurzeit ein europäisches Verfahren zur Eluatherstellung entwickelt und eingeführt. Es ist daher damit zu rechnen, dass die Werte der zu prüfenden Stoffe auch weiterhin im Fluss sein werden.

Die Geringfügigkeitsschwelle gilt als Maßstab, bis zu welcher Stoffkonzentration anthropogen, räumlich begrenzte Änderungen der chemischen Beschaffenheit des Grundwassers als geringfügig einzustufen sind und ab welcher Konzentration eine nachteilige Veränderung der Wasserbeschaffenheit des Grundwassers vorliegt. Im nachsorgenden Bodenschutz sind die GFS-Werte Basis für die Fortschreibung der Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser und die Vorgaben zu deren Anwendung in der BBodSchV. Die bodenschutzrechtlichen Prüfwerte dienen der Gefährdungsabschätzung. Ein hinreichender Gefahrenverdacht liegt in der Regel dann vor, wenn Prüfwerte überschritten sind. Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser beziehen sich auf den Übergangsbereich von der ungesättigten in die gesättigte Bodenzone (Ort der Beurteilung). Die Vorsorge gegen nachteilige Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit betrifft auch die Stofffreisetzungen aus mineralischen Materialien. Es ist sicherzustellen, dass die GFS bei Eintritt in das Grundwasser eingehalten werden. (LAWA, 2016)

Parameter	Einheit	GFS (LAWA, 2004)	Prüfwerte (BBodSchV, 2012)	GFS (LAWA, 2016)	Prüfwerte (MantelV, 2017)
ph-Wert	[-]				
El. Leitfähigkeit	[μ S/cm]				
Chlorid	[mg/l]	250		250	
Sulfat	[mg/l]	240		250	
Cyanid	[mg/l]	0,05	0,05	0,05	0,05
Arsen	[mg/l]	0,01	0,01	0,0032	0,01
Blei	[μ g/l]	7	25	1,2	10
Cadmium	[μ g/l]	0,5	5	0,3	3
Chrom	[mg/l]	0,007	0,05	0,0034	0,05
Kupfer	[mg/l]	0,014	0,05	0,0054	0,05
Nickel	[mg/l]	0,014	0,05	0,007	0,02
Quecksilber	[mg/l]	0,0002	0,001	0,0001	0,001
Fluorid	[mg/l]	0,75	0,75	0,9	1,5
Zink	[mg/l]	0,058	0,5	0,06	0,6
Molybdän	[mg/l]	0,035	0,05	0,035	0,035
Vanadium	[mg/l]	0,004		0,004	
Thallium	[mg/l]	0,0008		0,0002	
Antimon	[mg/l]	0,005	0,01	0,005	0,005

Tab. 4-4: GFS und Prüfwerte für Umweltrelevante Inhaltsstoffe

Um die Eignung der Materialien vor deren Einbau beurteilen zu können, sind einfache, praktikable Laborverfahren erforderlich, deren Ergebnisse im Hinblick auf die zu erwartende Sickerwasserbelastung bewertet werden können. Durch computergestützte Berechnungen wurde ermittelt, welche maximale Konzentration auf die rückhaltende Bodenschicht über das Sickerwasser einwirken kann, ohne dass vor Ablauf von 200 Jahren am unteren Ende dieser Bodenschicht Konzentrationen auftreten, die über der

GFS liegen. Für jedes einzelne in der EBV enthaltene Tabellenfeld ergibt sich in Abhängigkeit von den zugrunde gelegten Eingabekenngrößen nach dem fachlichen Bewertungsansatz pro Schadstoff ein spezifischer rechnerisch ermittelter medien-schutzbasierter Einbauwert mit jeweils spezifischer Grenzkonzentration, bei deren Einhaltung gewährleistet ist, dass die GFS eingehalten werden. Durch Vergleich der Materialwerte mit den medien-schutzbasierten Einbauwerten ergibt sich, ob der Einbau des Materials möglich ist oder nicht. Die Materialwerte (MantelV, 2017) der verwendeten Materialien sind im Anhang in Tab.-A 3 aufgelistet.

5 Ergebnisse

5.1 Material und Einbau

In diesem Versuchsteil wurden drei industrielle Nebenprodukte und ein RC-Baustoff untersucht. Die bautechnischen Kenngrößen sind im Anhang Bild-A 2 bis Bild-A 5 abgebildet. In Tab. 5-1 wird eine Übersicht der Materialwerte gezeigt. Bei allen Materialien gab es keine Anteile an der Korngruppe > 63 mm. Bei HMVA und SKA wurde darauf verzichtet, die Plastizität der feinkörnigen Beimengungen zu bestimmen. Erfahrungsgemäß wurden diese als Schluff eingestuft.

	$d \leq 0,063 \text{ mm}$	$d \leq 2 \text{ mm}$	Bodengruppe (DIN 18196)	Proctor- dichte	Optimaler Wassergehalt	Durchlässigkeit (100 % Verdichtung)
	[M.-%]	[M.-%]	[-]	[g/cm ³]	[M.-%]	[m/s]
HMVA	6,4	38,7	GU	1,638	17,3	$2,5 \cdot 10^{-4}$
RC	2,3	20,5	GI	1,927	8,6	$1,1 \cdot 10^{-6}$
SKA	15,0	79,3	SU	1,083	31,6	$5,9 \cdot 10^{-5}$
GRS	3,4	100	SE	1,724	13,7	$3,2 \cdot 10^{-5}$

Tab. 5-1: Bautechnische Materialwerte für die verwendeten Materialien

Der Nachweis der erreichten Verdichtung erfolgte durch den Einbau in 10 cm hohen Lagen unter definierten Bedingungen (Kapitel 3). Kurz vor dem Einbau wurde der aktuelle Wassergehalt bestimmt. Aus dem Wassergehalt, der Proctordichte und dem angestrebten Verdichtungsgrad wurde dann berechnet, wie viel Masse an Material in eine Lage von 10 cm eingebaut werden muss. Die Verdichtung wird so durch den Einbau definierter Volumina und das Wiegen des eingebauten Materials bestimmt. Während des Einbaus wurden mehrere Proben aus dem einzubauenden Haufwerk für die Wassergehaltsbestimmung genommen. Da eine Rüttelplatte im Lysimeterkasten nicht einsetzbar war, wurde der Einbau von Hand mit statisch einsetzbaren Verdichtungsgeräten durchgeführt. Auf diese Weise konnten Verdichtungsgrade zwischen 102% und 96 % erreicht werden. Tab. 5-2 zeigt eine Übersicht der Einbauwerte.

		Masse Boden trocken	mittlerer Wassergehalt	Trockendichte	Verdichtungsgrad
		[kg]	[M.-%]	[g/cm ³]	[%]
HMVA	ohne TSM	937,8	14,9	1,647	100,5
	mit Dränmatte 1	904,0	16,7	1,621	99,0
	mit Dränmatte 2	865,5	19,7	1,569	95,8
	mit Dränmatte 3	896,4	18,7	1,577	96,3
RC	ohne TSM	1144,8	6,7	1,925	99,9
	mit Dränmatte 1	1121,7	6,8	1,923	99,8
	mit Dränmatte 3	1063,9	7,9	1,974	102,4
SKA	ohne TSM	589,1	32,5	1,076	99,4
	mit Dränmatte 1	566,1	33,1	1,071	98,9
GRS	ohne TSM	1085,0	8,2	1,747	101,3

Tab. 5-2: Einbauwerte der Materialien für die verschiedenen Versuchsreihen

5.2 Wassermengen

5.2.1 Hausmüllverbrennungsasche

Die aufgebrachte Regenmenge und der Oberflächenabfluss wurden bei jedem Regenereignis bestimmt. Die Sickerwässer wurden an jedem Werktag gewogen. Exemplarisch werden die folgenden Diagramme für HMVA ohne TSM erläutert.

In Bild 5-1 sind die gemessenen und aufsummierten Wassermengen des Versuches HMVA ohne TSM dargestellt. Die blaue Linie zeigt die Menge des verregneten Wassers in kg. Da alle Versuche mit dem gleichen Regenregime durchgeführt wurden, ist die blaue Linie für alle Versuche gleich. Kleinere Abweichungen ergeben sich lediglich aus der vereinzelt Verschiebung von Regenereignissen aufgrund von Feiertagen. An der Linie sind gut die Charakteristiken der unterschiedlichen Regenereignisse mit ihren unterschiedlichen Regenmengen zu sehen. Waagerechte Teilstücke zeigen die Trockentage an. Als steile Sprünge gut zu erkennen sind die langen Regen von 6 und 72 Stunden, die zwar eine geringe Intensität aufweisen, aber aufgrund der langen Dauer die höchsten Mengen verregnen.

Grün ist die Menge des Oberflächenabflusses in kg dargestellt. Dieser wird nur in direkter Folge eines Regenereignisses gemessen, daher hat auch diese Kurve bei ausreichend großem Oberflächenabfluss waagerechte Stellen ohne Wasserzunahme und Sprünge bei den langen Regenereignissen. Sie entspricht einer gestauchten Kurve der Regenmenge. Die orange Kurve stellt die Menge des Sickerwassers in kg dar. Im Gegensatz zum Oberflächenabfluss fällt das Sickerwasser kontinuierlich an, so dass die Sprünge in der Kurve und die waagerechten Stellen verschmieren. Deutliche Zunahmen zeigt die Sickerwassermenge bei den beiden 72h-Regen. Die Summenliniendiagramme der Wassermengen zeigen sehr gut das Verhältnis Sickerwasser zu Oberflächenabfluss. Für den Versuch HMVA ohne TSM fällt wesentlich mehr Sickerwasser als Oberflächenabfluss an.

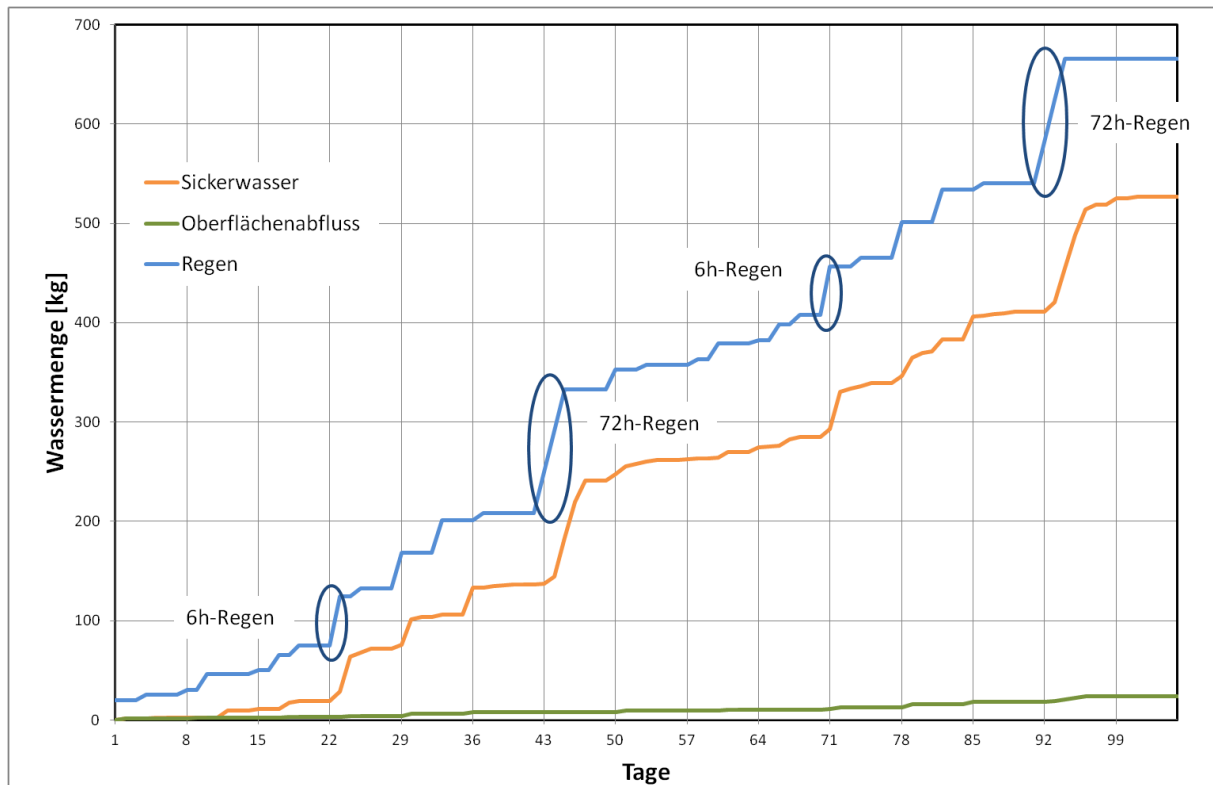


Bild 5-1: Wassermengen für die HMVA ohne TSM

Die Summe aus Sickerwasser und Oberflächenabfluss ist kleiner als die Summe des Regenwassers. Diese Differenz lässt sich durch Verdunstung und Verlusten im System erklären. Der Versuch ohne TSM gilt als Ausgangspunkt, um bei den weiteren Versuchen die Wirksamkeit der TSM abschätzen zu können. Während der gesamten Versuchszeit steht der Lysimeterkasten einschließlich Material, TSM und Rollrasen auf einer Waage. Vor und nach einem Regenereignis sowie bei den werktäglichen Messungen wurde das Gesamtgewicht des Lysimeterkastens bestimmt. In Bild 5-2 wird die Gewichtsentwicklung während der Versuche dargestellt. Die dunkelorange Balken zeigen das jeweilige Gewicht des Lysimeterkastens. An Regentagen zeigen die dunkelorange Balken das Gewicht des Lysimeterkastens vor der Beregnung. Der hellorange Balken und der blaue Balken bilden in der Summe die Menge die an dem Tag verregnet wurde. Zum Beispiel werden am ersten Tag 19,7 kg Wasser verregnet. Die Gewichtsmessung vor und nach der Beregnung hat eine Gewichtszunahme des Lysimeters von 18 kg ergeben. Der hellorange Balken stellt den Anteil des Regen dar, der während der Beregnung vom Lysimeter gespeichert wird und so das Gewicht es Lysimeters erhöht. Der blaue Balken stellt den Anteil der Regenmenge dar, der während der Beregnung direkt als Oberflächenabfluss anfällt oder bei den länger andauernden Regen verdunstet. In diesem Beispiel sind es 1,7 kg. In der Summe ergeben der orange und der blaue Balken wieder 19,7 kg. Nach der Gewichtszunahme an den Beregnungstagen wird das Lysimeter an den Trockentagen wieder leichter.

Bei der HMVA findet zunächst eine Aufsättigung des Baustoffs statt und das Sickerwasser fließt nur langsam ab. Eine deutliche Zunahme des Sickerwassers ist erst nach dem 6h-Regen zu beobachten. Das Material kann aber nur eine bestimmte Menge Wasser aufnehmen. Dies ist an den Tagen mit dem 72h-Regen gut erkennbar. Am ersten Tag kann eine größere Gewichtszunahme gemessen werden. Das Gesamtgewicht bleibt dann während der Beregnung auf diesem Niveau, um nach dem Regen schnell wieder abzusinken. Nach dem 14-wöchigen Versuch wurde das Sickerwasser noch eine Woche weiter gemessen um den weiteren Verlauf zu beobachten, so dass die Versuchszeit für alle Versuche 15 Wochen oder 105 Tage beträgt.

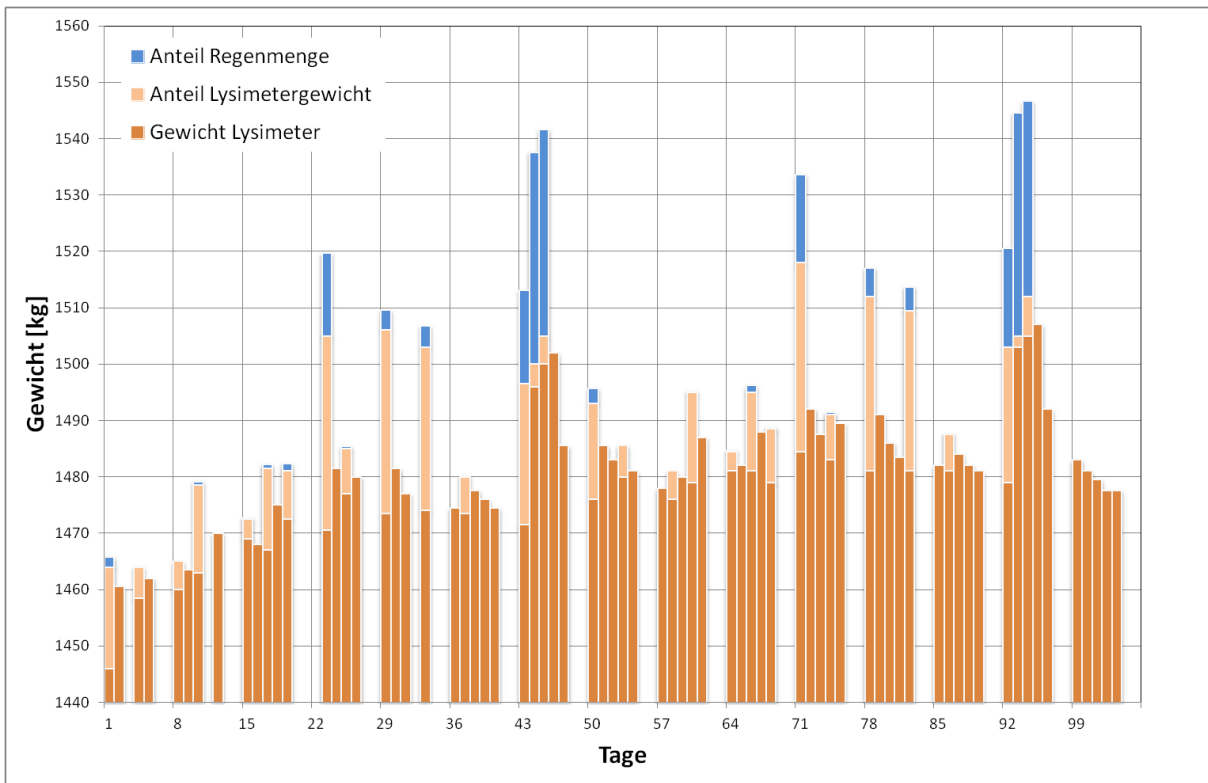


Bild 5-2: Gewichtsanteile des Lysimeters für die HMVA ohne TSM

Das Bild 5-3 zeigt die Wassermengen für die Versuchsreihe HMVA mit Dränmatte 1. Bei dieser Bauweise findet wesentlich mehr Oberflächenabfluss statt und die Kurve für das Sickerwasser liegt deutlich unter der des Oberflächenabflusses. Die Kurve des Oberflächenabflusses spiegelt die Sprünge der Regenmengenkurve wider.

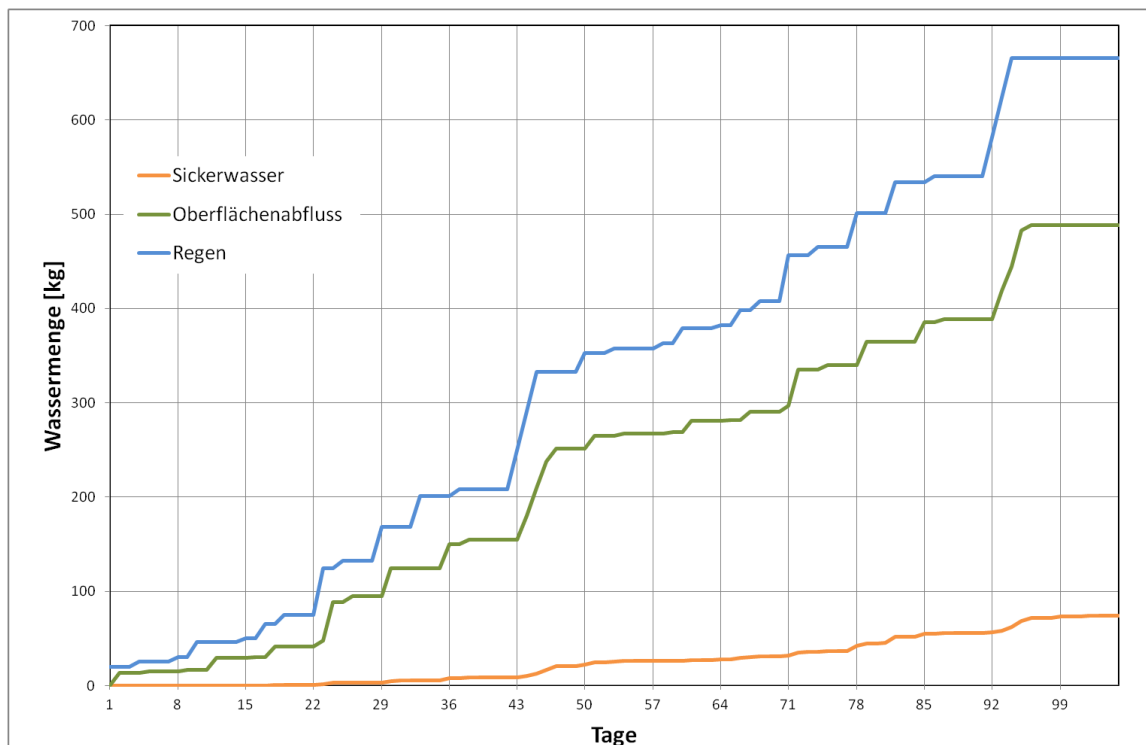


Bild 5-3: Wassermengen für die HMVA mit Dränmatte 1

Die geringe Sickerwassermenge wird auch in dem Bild 5-4 ersichtlich, welches das Lysimetergewicht zeigt. Auch bei den langanhaltenden Regenereignissen mit großen Regenmengen steigt das Gewicht des Lysimeters kaum an und schwankt während der gesamten Versuchsdauer nur im Bereich von ca. 10 kg.

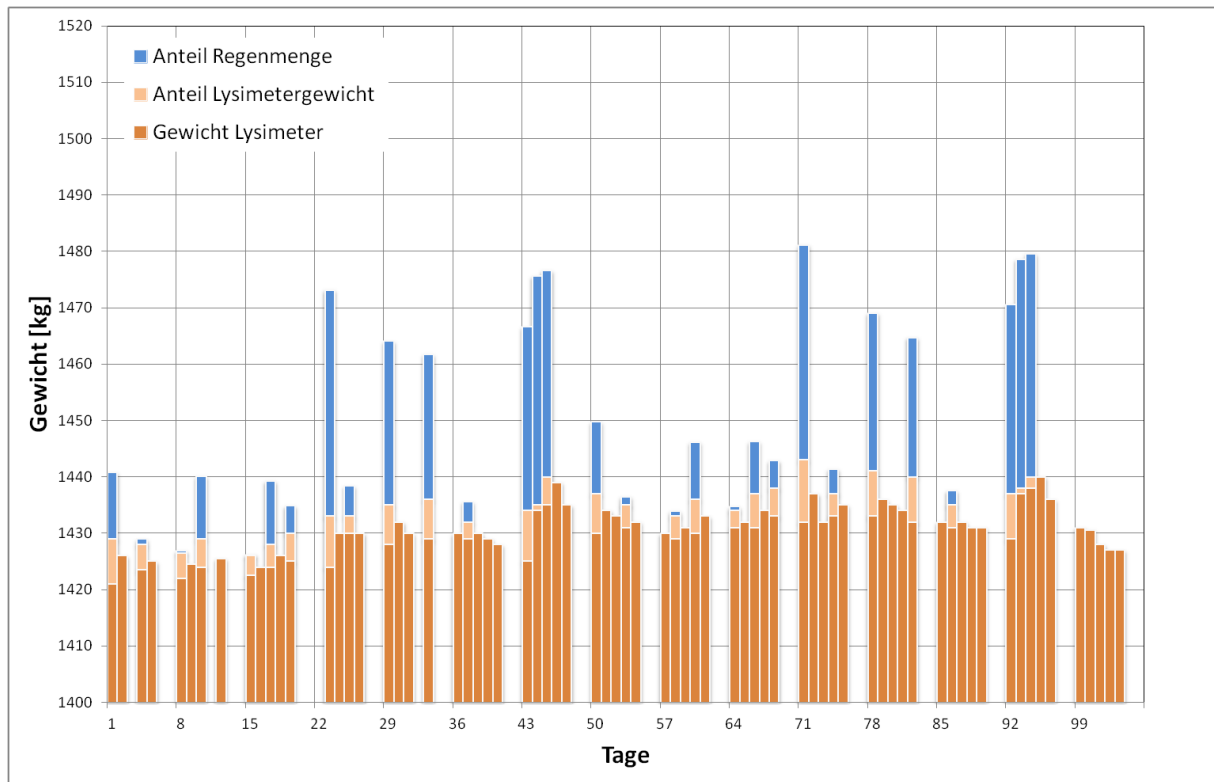


Bild 5-4: Gewichtsanteile des Lysimeters für die HMVA mit Dränmatte 1

Die beiden Versuchsreihen mit HMVA und den Dränmatten 2 und 3 zeigen insgesamt einen ähnlichen Verlauf. Das Bild 5-5 zeigt die Wassermenge für HMVA mit Dränmatte 2. Die Kurve des Oberflächenabflusses liegt deutlich über der Sickerwasserkurve. Im zweiten Versuchsumlauf ab dem Tag 50 wird wesentlich mehr Sickerwasser gemessen als im ersten Versuchsumlauf.

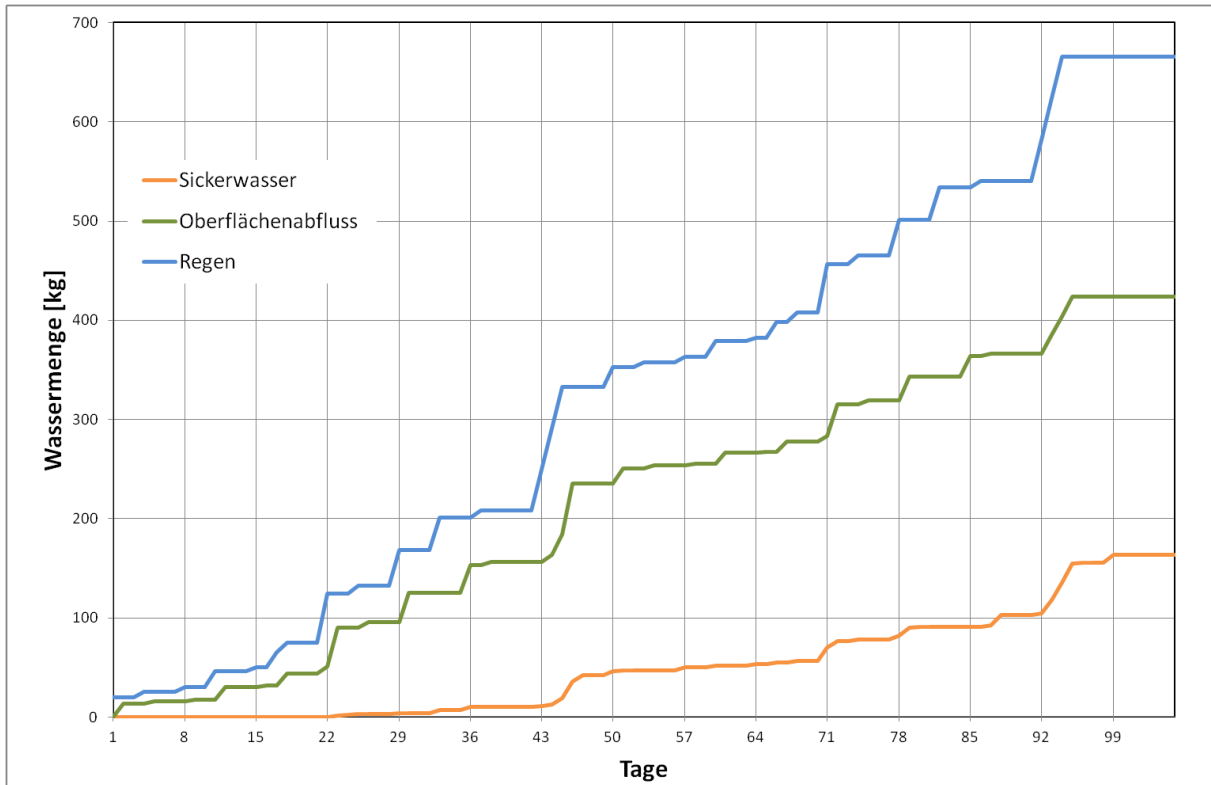


Bild 5-5: Wassermengen für HMVA mit Dränmatte 2

Der Anstieg des Sickerwassers im zweiten Versuchsumlauf wird auch in Bild 5-6 dargestellt. Erst nach dem ersten 72h-Regen zeigt sich eine deutliche Gewichtszunahme, was darauf schließen lässt, dass mehr Wasser in den Bodenkörper versickert wird.

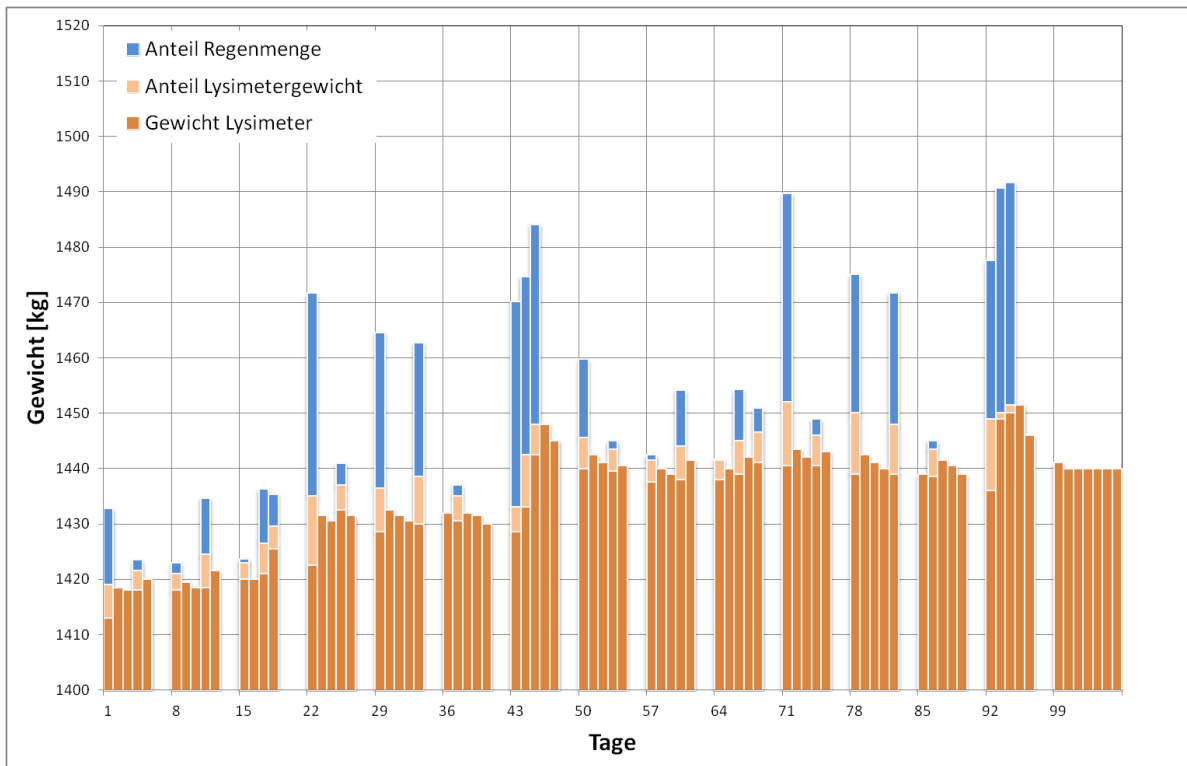


Bild 5-6: Gewichtsanteile des Lysimeters für den bindigen Boden mit Bitumenanspritzung

Auf dem Bild 5-7, welches die Wassermengen für die Bauweise HMVA mit Dränmatte 3 zeigt, ist zu erkennen, dass die Kurven von Oberflächenabfluss und Sickerwasser sehr denen der Bauweise HMVA mit Dränmatte 2 ähneln. Es wird bei beiden Bauweisen etwa gleichviel Sickerwasser und Oberflächenabfluss gemessen.

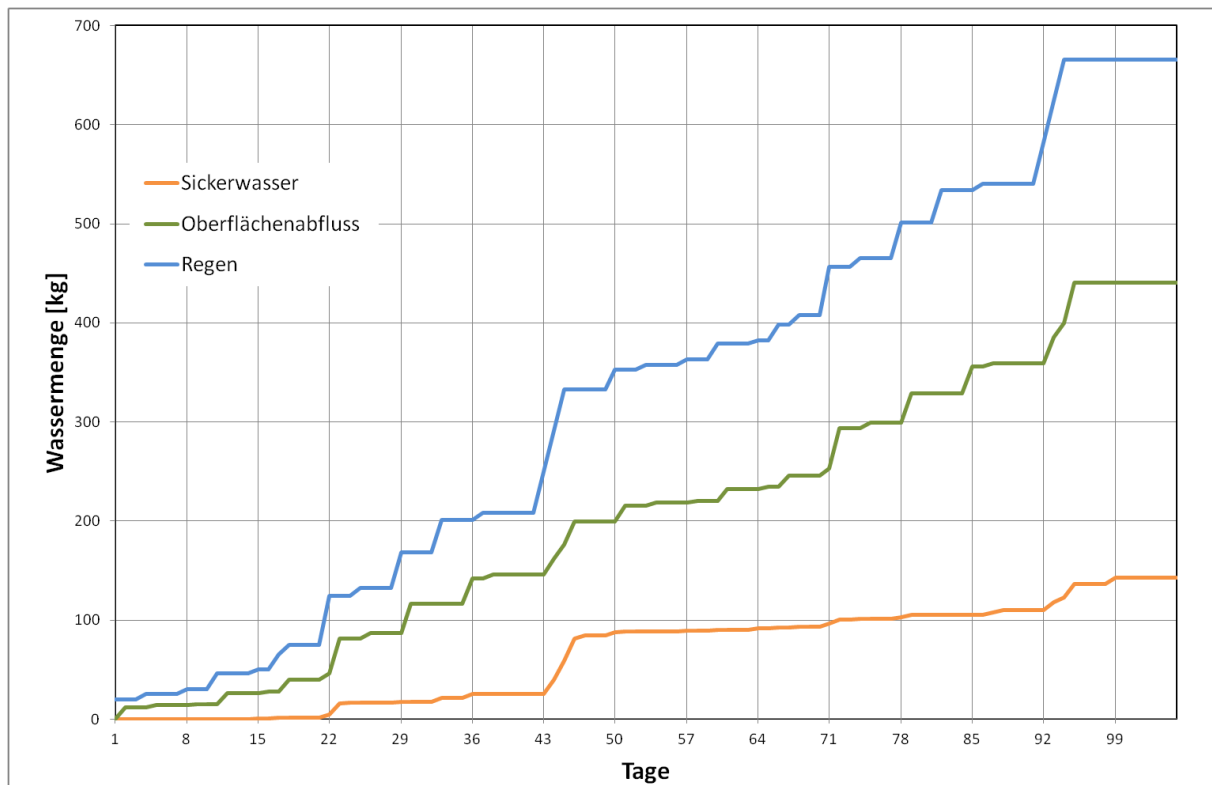


Bild 5-7: Wassermengen für die HMVA mit Dränmatte 3

Durch Bild 5-8 wird visualisiert, dass das Lysimetergewicht sich kaum verändert. Der große Anteil des Oberflächenabflusses wird auch gut durch die blauen Balken der Regenmenge verdeutlicht. Sie zeigen an, dass das meiste Wasser oberflächlich abfließt und sich das Lysimetergewicht durch die Beregnung kaum ändert.

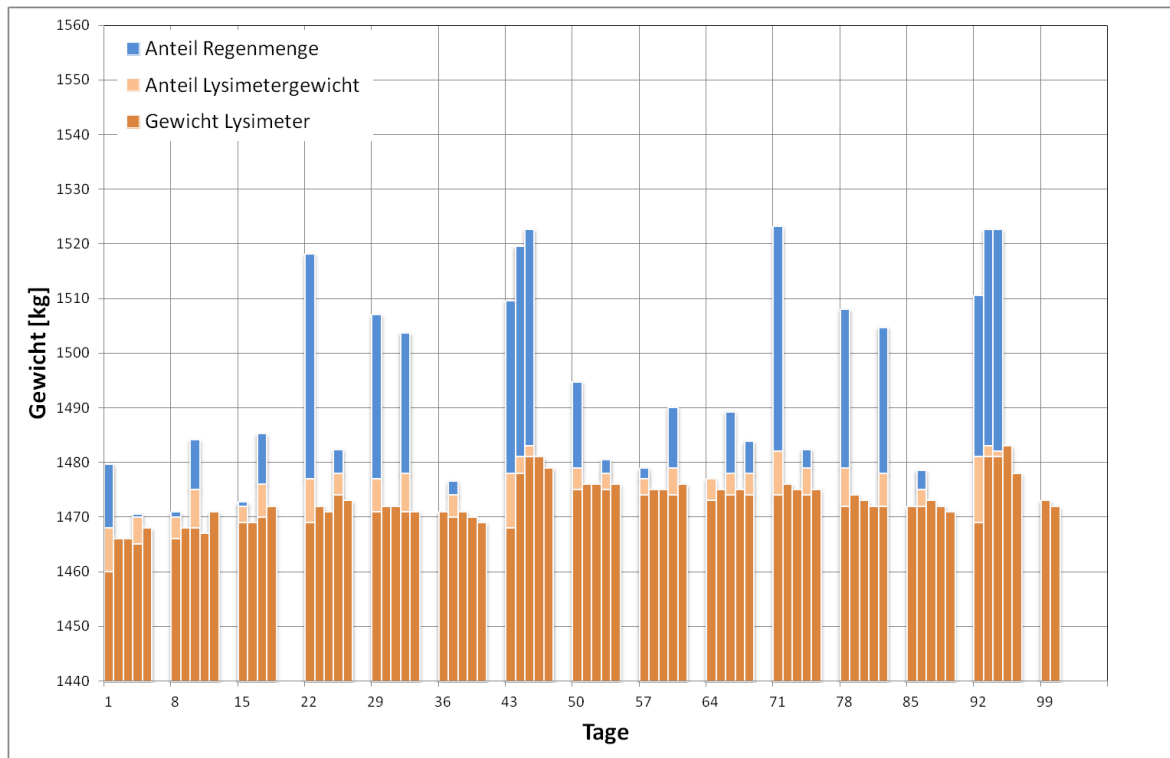


Bild 5-8: Gewichtsanteile des Lysimeters für die HMVA mit Dränmatte 3

5.2.2 Recycling-Baustoff

Beim Versuch RC ohne TSM tritt wie erwartet sehr viel Sickerwasser auf. Die Stufen in der Regenmengenkurve, spiegeln sich in Bild 5-9 gut in der Sickerwasserkurve wider. Deutliche Anstiege sind nach den langanhaltenden Regen zu erkennen. Trotz großer verregneter Wassermengen bei diesen Regen ist der Oberflächenabfluss minimal. Und auch die kurzen Regenereignisse mit hoher Intensität werden fast ausschließlich versickert.

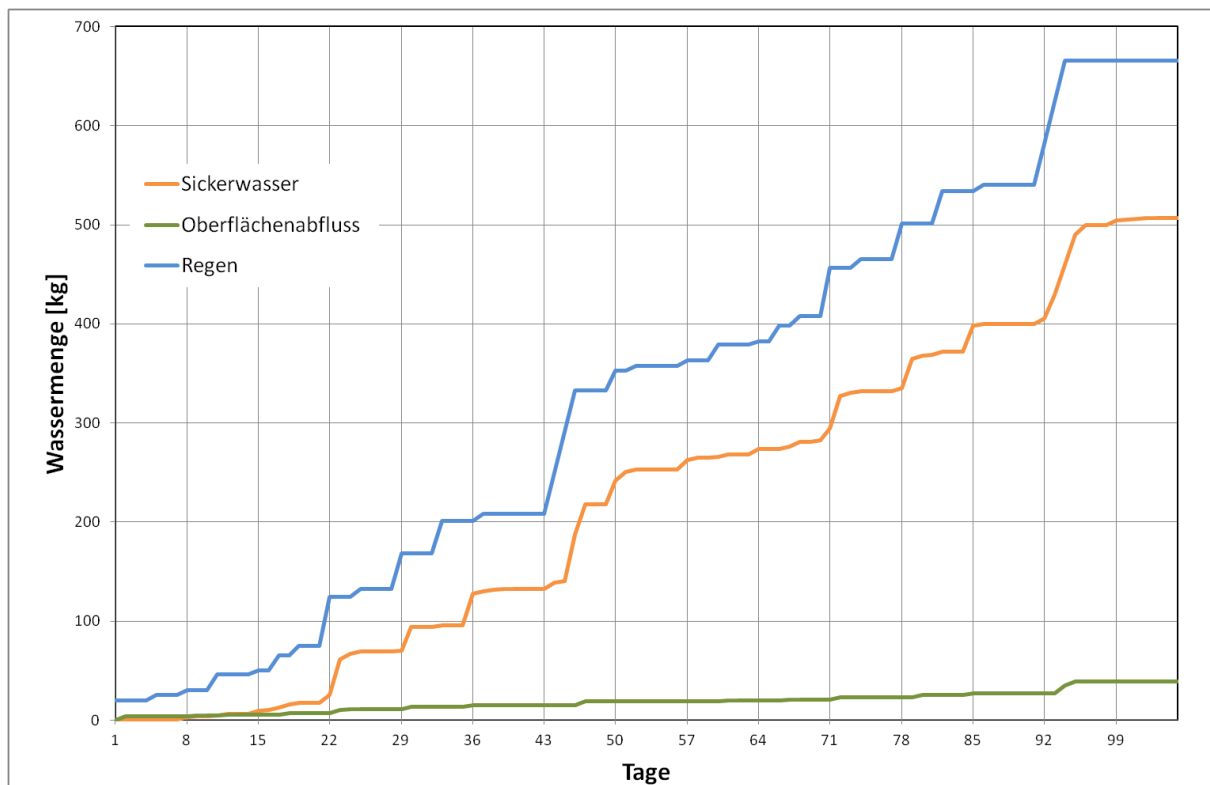


Bild 5-9: Wassermengen für RC ohne TSM

Das Bild 5-10 zeigt, dass die Gewichtszunahmen nach einer Anfangsphase durch die Beregnung schnell wieder abklingen und das Gesamtgewicht des Lysimeters insgesamt stark schwankt.

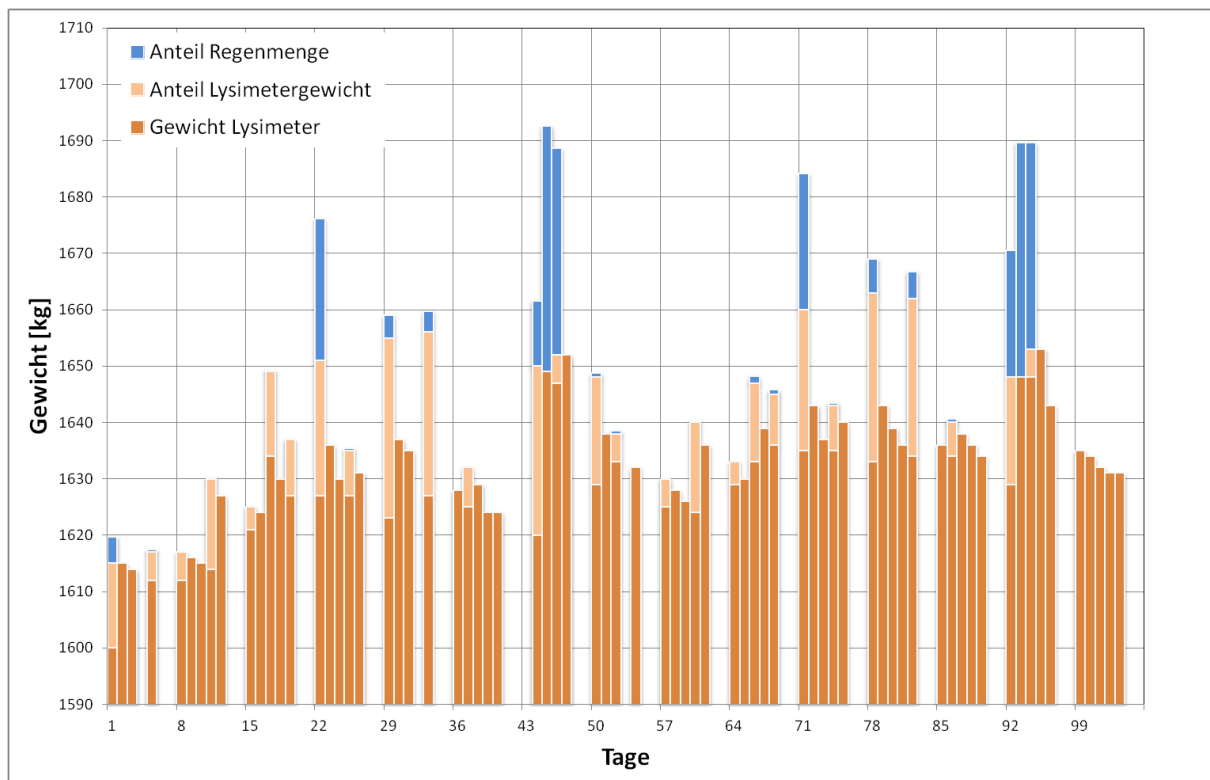


Bild 5-10: Gewichtsanteile des Lysimeters für RC ohne TSM

An der Größe der hellorange Balken erkennt man, dass das meiste Wasser direkt versickert und eine Gewichtserhöhung des Lysimeters bewirkt. Beim 72h-Regen sind längere blaue Balken vorhanden. Es ist davon auszugehen, dass in diesen Mengen auch größere Mengen an Sickerwasser enthalten sind. Das Lysimetergewicht wurde nur einmal am Tag gemessen, und während dieser langandauernden Regen steigen die Sickerwassermenge (orange Kurve in Bild 5-9) stark an. Das meiste Wasser fließt also mit geringer Zeitverzögerung durch das Lysimeter hindurch. Dies zeigt auch der rasche Abfall des Gewichtes nach dem 72h-Regen, da der RC-Baustoff das Wasser nicht langfristig halten kann, jedoch liegt das Gewicht zu Versuchsende über dem Startgewicht.

Bei der Versuchsreihe RC mit Dränmatte 1, welche in Bild 5-11 dargestellt ist, verlaufen die Kurven des Sickerwassers und des Oberflächenabflusses fast identisch. Insgesamt wird etwa gleich viel Sickerwasser wie Oberflächenabfluss gemessen.

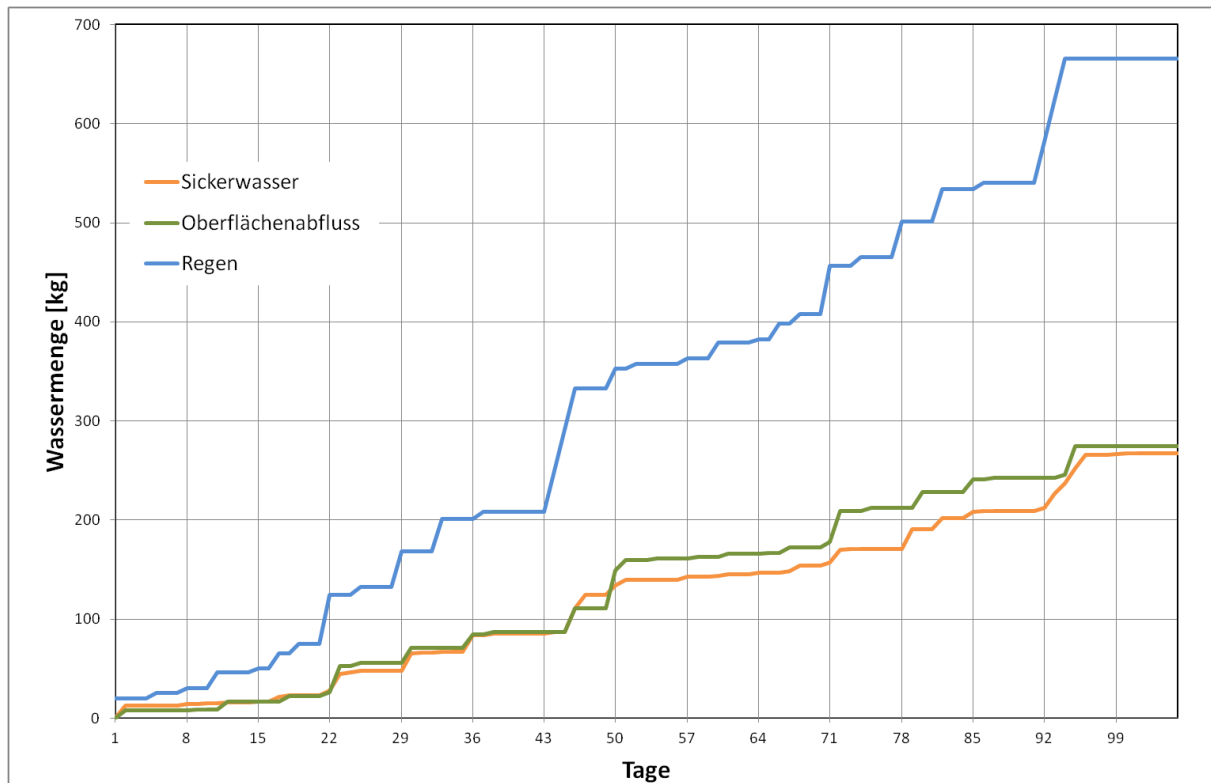


Bild 5-11: Wassermengen für RC mit Dränmatte 1

Dies wird auch durch das Lysimetergewicht deutlich, das selbst durch die langanhaltenden Regen kaum steigt (Bild 5-12). Gut zu erkennen ist an den orangen Balken, dass das Lysimeter während der Beregnung kaum an Gewicht zunimmt. Bei den Regen mit weniger Regenmenge herrscht ein ausgewogenes Verhältnis zwischen blauen und hellorange Balken, das heißt, es versickert etwa so viel, wie oberflächlich abfließt.

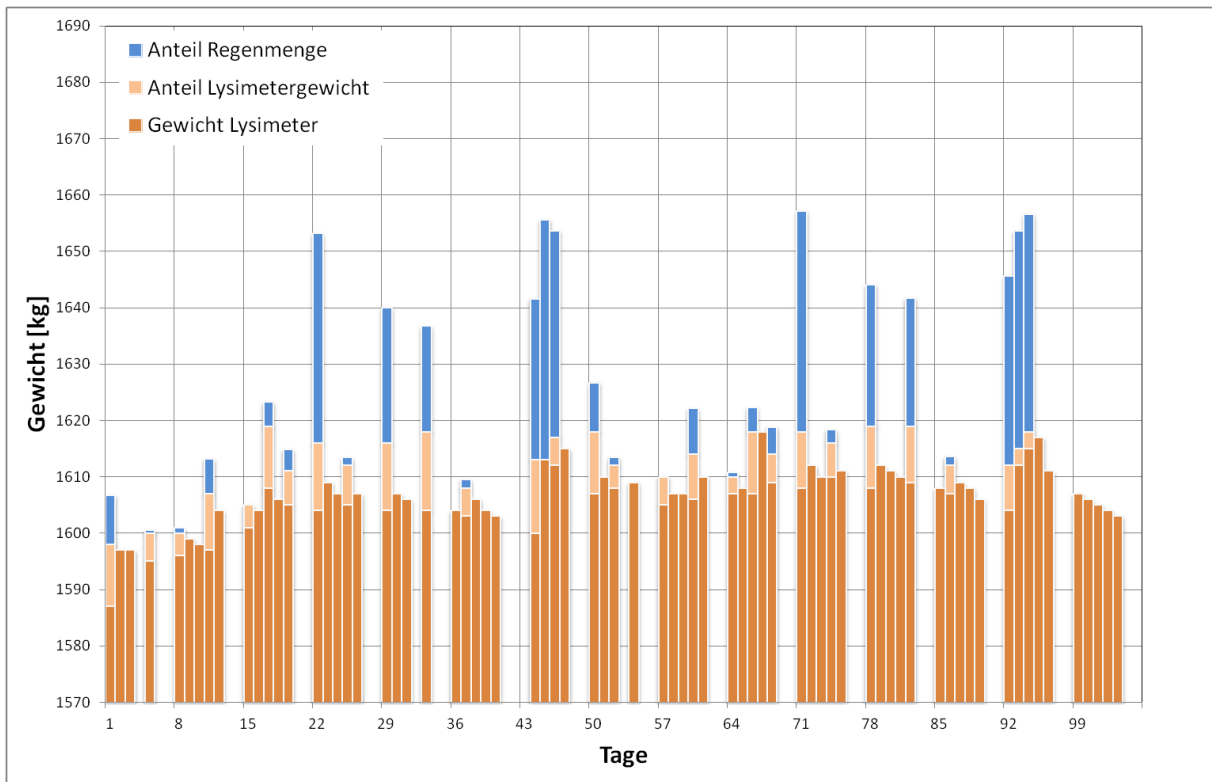


Bild 5-12: Gewichtsanteile des Lysimeters für RC mit Dränmatte 1

Bild 5-13 zeigt die Verteilung der Wassermengen des RC Materials mit Dränmatte 3. Es herrscht ein ähnlich ausgewogenes Verhältnis zwischen Sickerwasser und Oberflächenabfluss vor wie bei der Bauweise mit Dränmatte 1, wobei insgesamt mehr Oberflächenabfluss gemessen wurde.

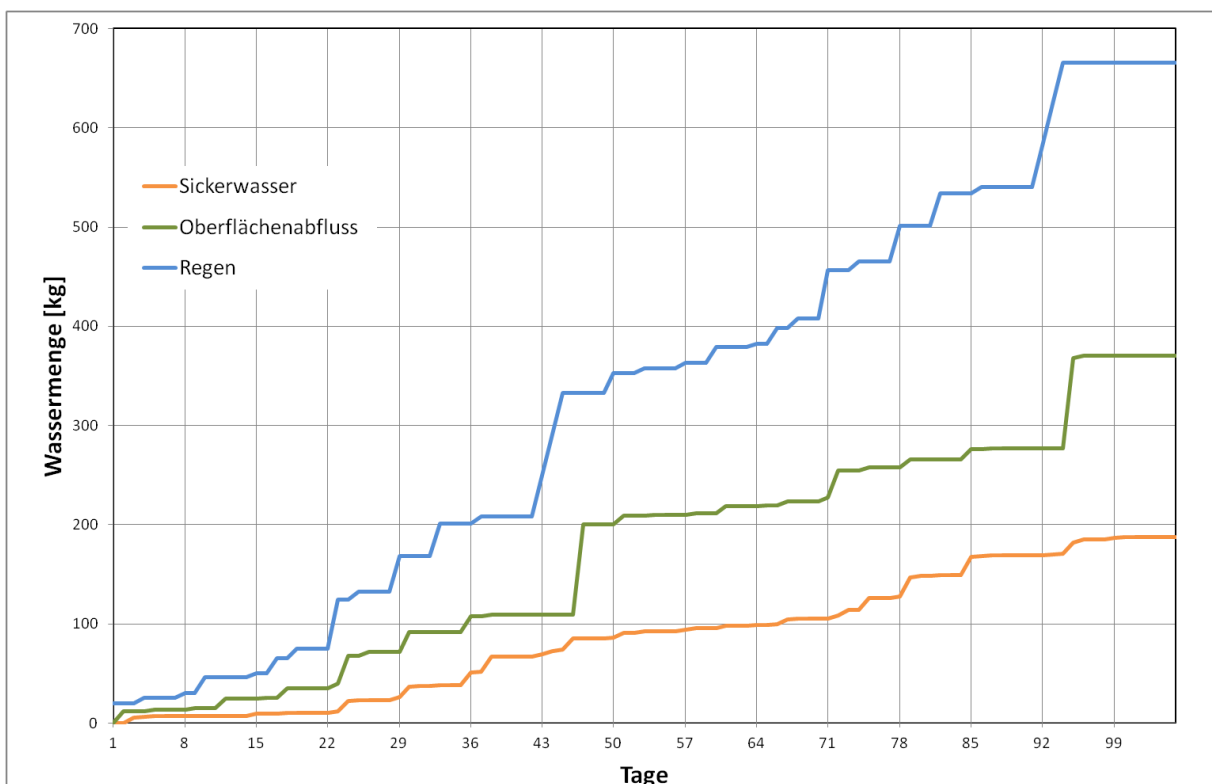


Bild 5-13: Wassermengen für RC mit Dränmatte 3

Das ausgeglichene Verhältnis zeigt auch das Bild 5-14 des Lysimetergewichtes. Es ist keine nennenswerte Gewichtszunahme zu beobachten, und die blauen und hellorange Balken sind bei den kürzeren Regen etwa gleich groß.

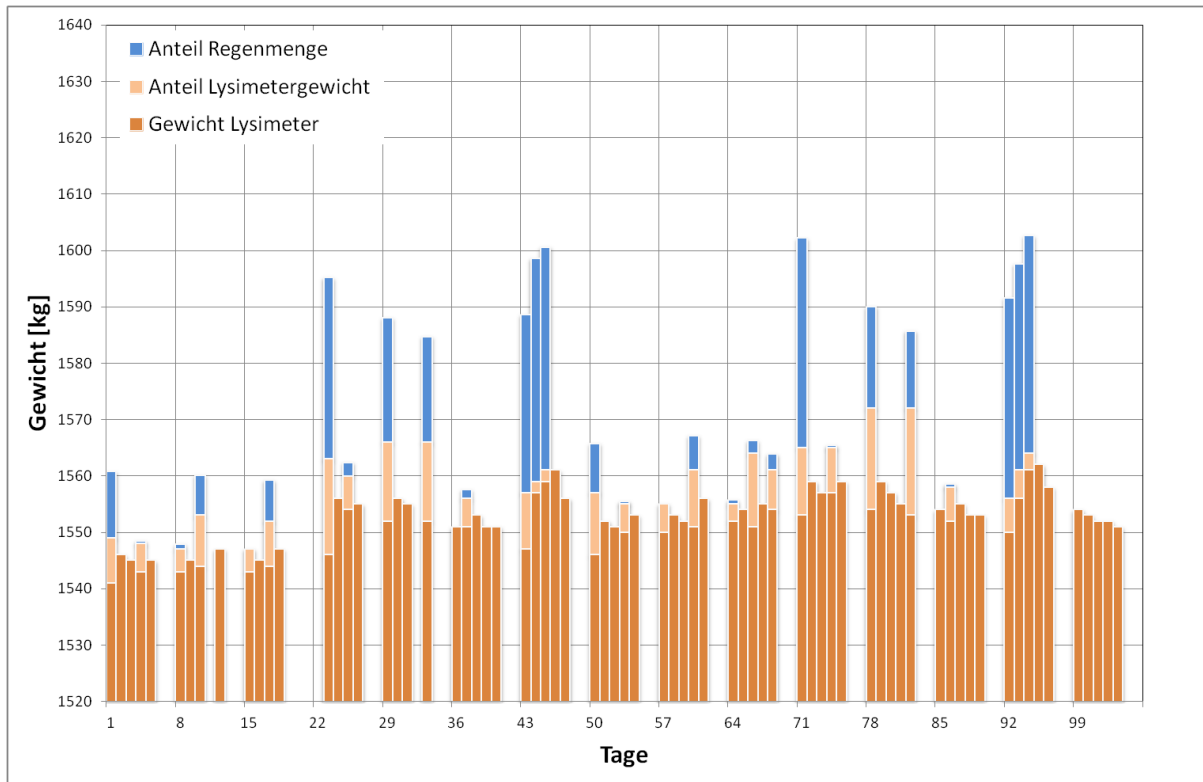


Bild 5-14: Gewichtsanteile des Lysimeters für RC mit Dränmatte 3

Mit dem Baustoff RC wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Diese ist in Kapitel 3.3 beschrieben. Wie in Bild 5-15 dargestellt, wurden insgesamt nur 35% der Wassermenge verregnet. Dabei wurde dieselbe Lysimeterfüllung wie für die Versuchsreihe RC mit Dränmatte 3 verwendet. Ähnlich wie bei der vergleichbaren Versuchsreihe RC ohne TSM wurde sehr wenig Oberflächenabfluss gemessen. Sickerwasser tritt hauptsächlich nach den langanhaltenden Regen auf, im 2. Umlauf tritt deutlich mehr Sickerwasser auf als im 1. Umlauf. Bei der Sensitivitätsanalyse wird im Verhältnis deutlich weniger Sickerwasser gemessen als bei der Versuchsreihe mit der regulären Regenmenge.

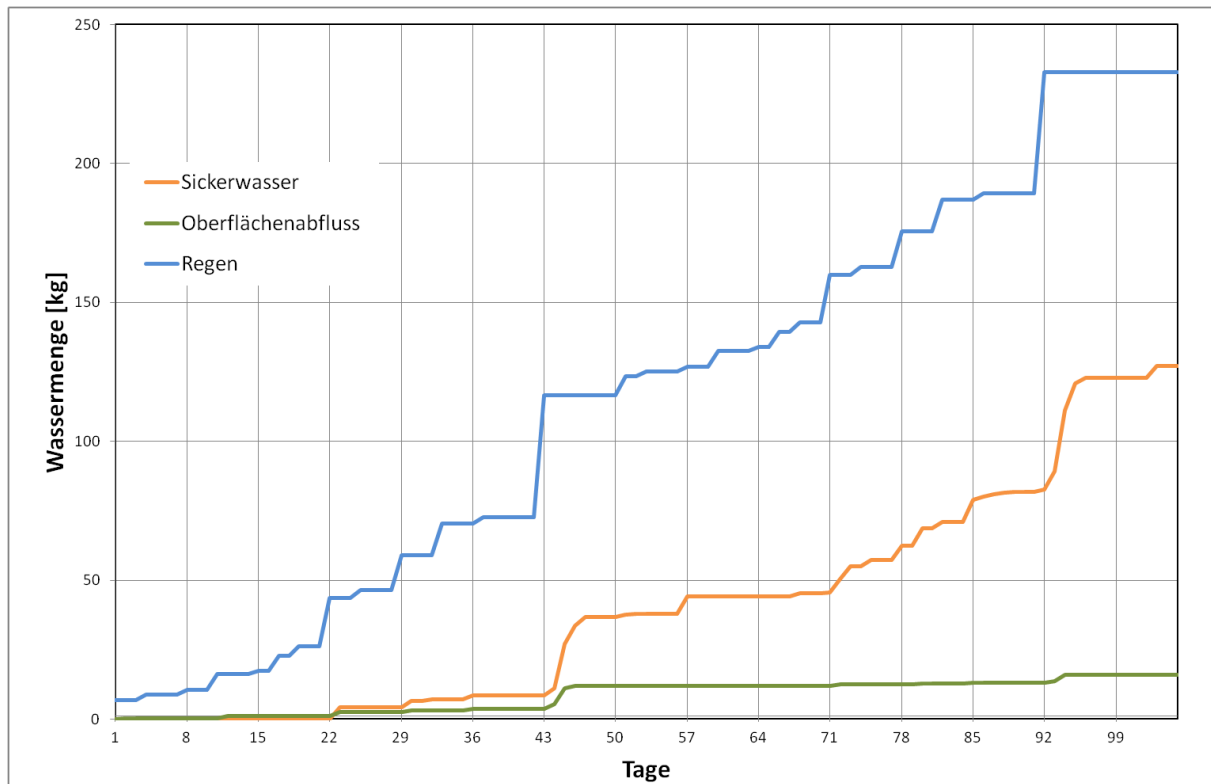


Bild 5-15: Wassermenge für RC ohne TSM, Sensitivitätsanalyse

Die Gewichtsentwicklung des Lysimeters für die Sensitivitätsanalyse RC ohne TSM ist in Bild 5-16 dargestellt. Im 1. Umlauf nimmt das Lysimeter Gewicht stetig zu, erst nach dem 72h-Regen pendelt sich das Lysimetergewicht ein. Die fehlenden Blauen Regenanteile im Diagramm weisen darauf hin, dass die Aufgebrachte Regenmenge fast ausschließlich sofort versickerte.

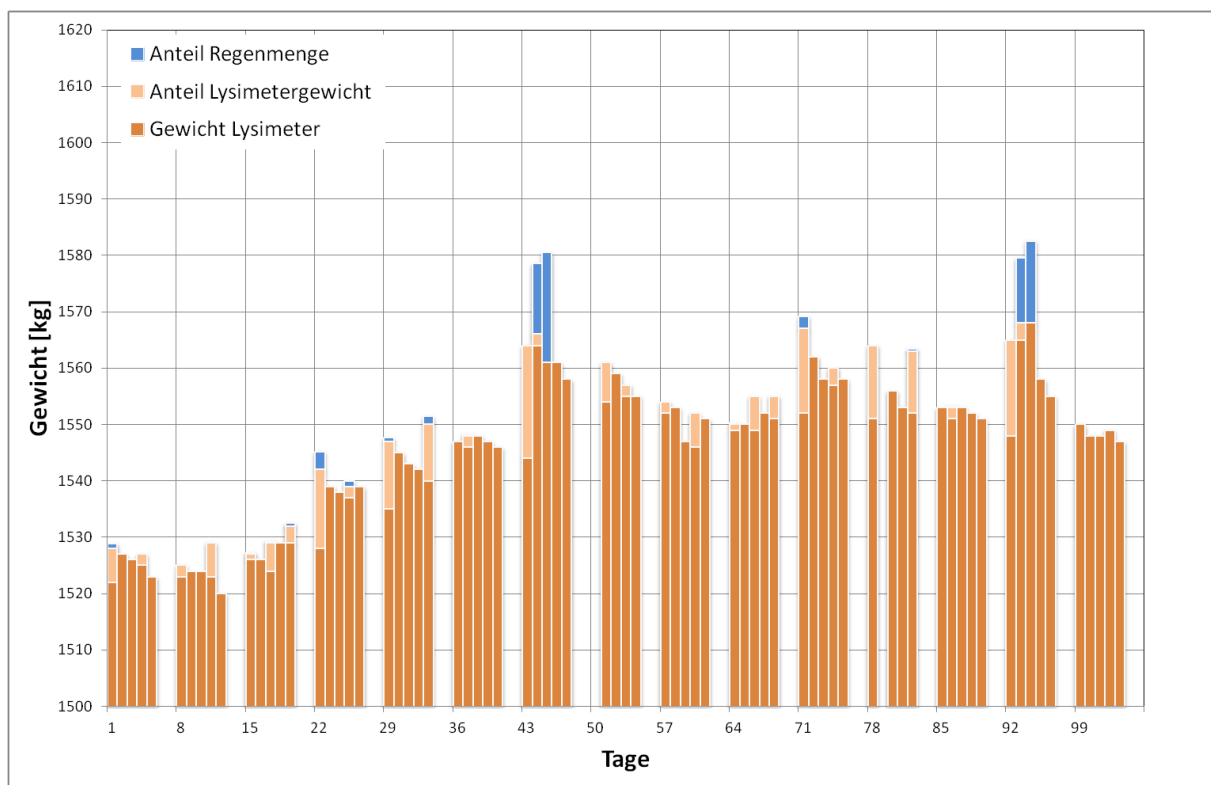


Bild 5-16: Gewichtsanteile des Lysimeters für RC ohne TSM, Sensitivitätsanalyse

5.2.3 Gießereirestsand

In Bild 5-17 werden die gemessenen Wassermengen für die Bauweise GRS ohne TSM dargestellt. Da es sich um eine Bauweise ohne TSM handelt, fällt erwartungsgemäß sehr viel Sickerwasser und nur wenig Oberflächenwasser an. Die Abhängigkeit der Sickerwassermenge von der Regenmenge kann an dieser Kurve deutlich gesehen werden.

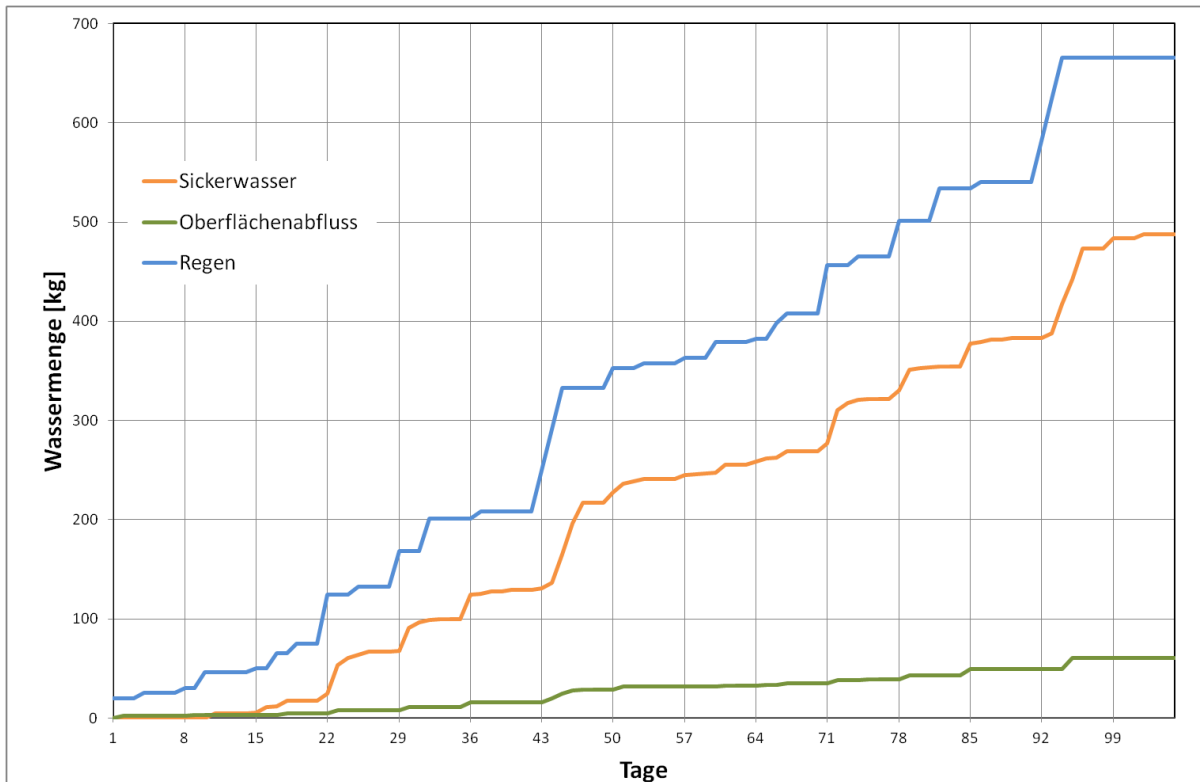


Bild 5-17: Wassermengen für GRS ohne TSM

Der geringe Oberflächenabfluss wird auch in Bild 5-18 deutlich, da das Lysimetergewicht während einer Beregnung stark ansteigt. Insgesamt kommt es im ersten Versuchsumlauf zu einer deutlichen Gewichtssteigerung des Gesamtgewichtes.

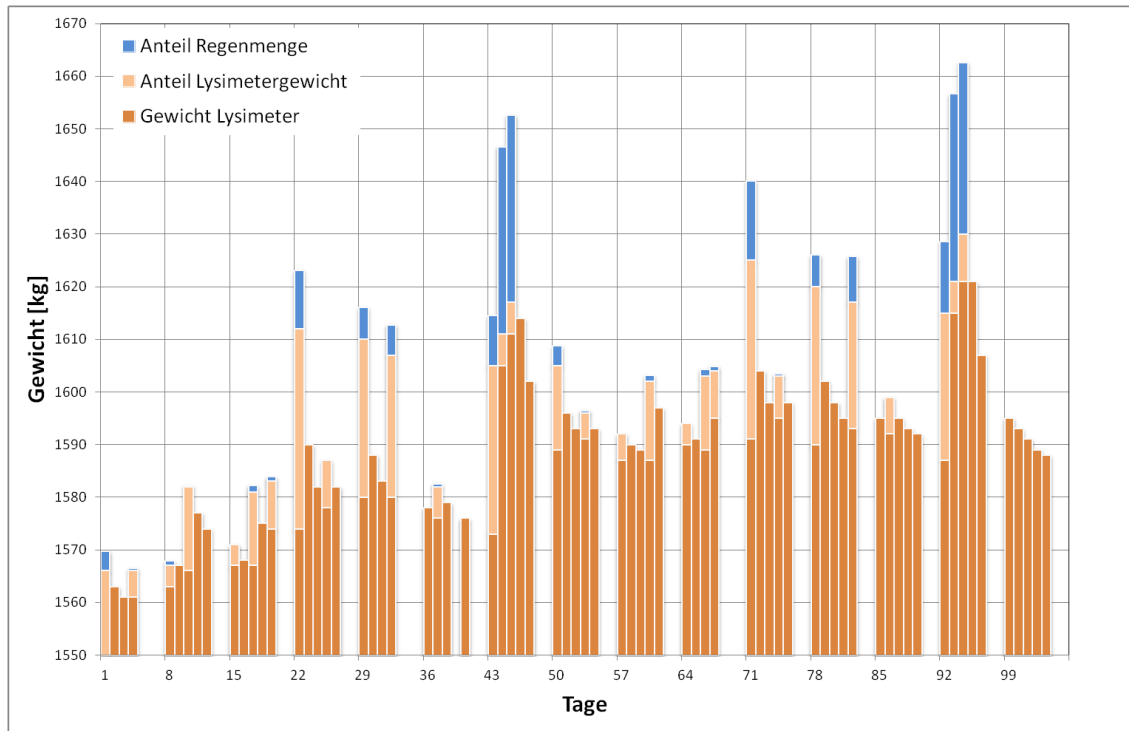


Bild 5-18: Gewichtsanteile des Lysimeters für GRS ohne TSM

5.2.4 Steinkohlenkesselasche

In der Versuchsreihe SKA ohne TSM handelt es sich ebenfalls um eine Versuchsreihe ohne TSM, so dass sehr ähnliche Ergebnisse herauskommen. Bild 5-19 zeigt jedoch, dass bei SKA noch mehr Sickerwasser gemessen wird als beim GRS.

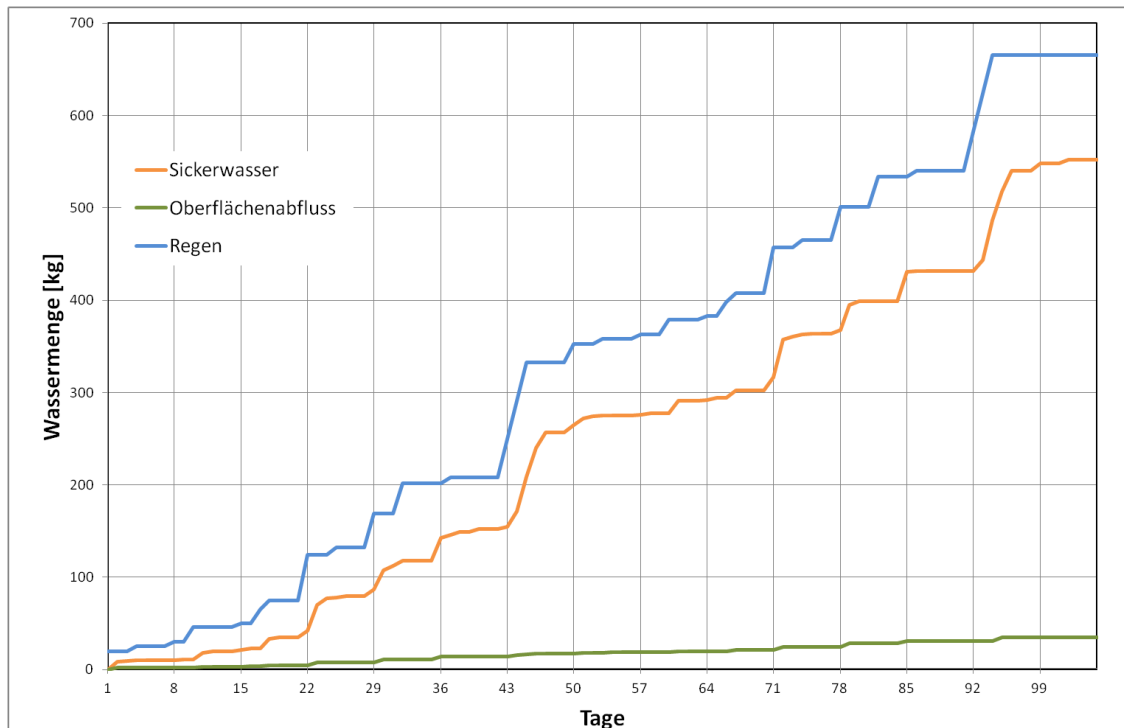


Bild 5-19: Wassermengen für SKA ohne TSM

Das in Bild 5-20 dargestellte Lysimeter Gewicht verläuft zunächst ziemlich gleichmäßig. Erst nach den ersten 72h-Regen zeigt sich eine deutliche Gewichtszunahme, was darauf schließen lässt, dass mehr Wasser in das Material versickert. Die Regenmenge findet sich überwiegend im Lysimetergewicht nach der Beregnung wieder, so dass kaum etwas oberflächlich abfließen kann.

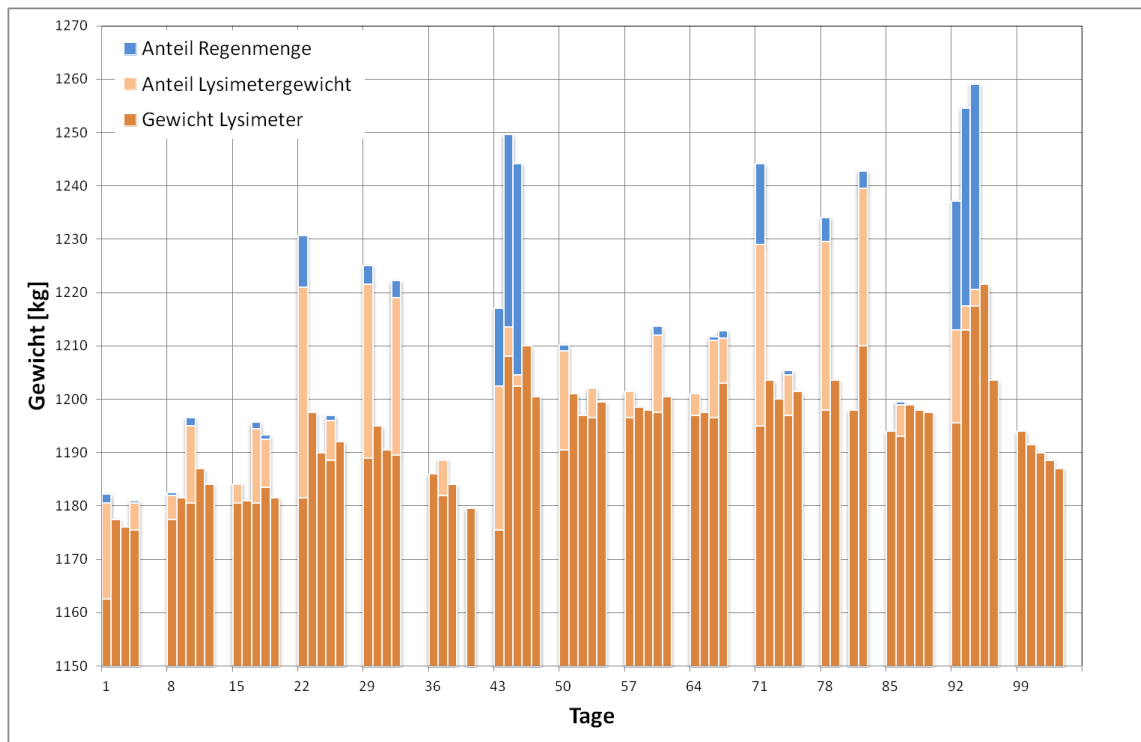


Bild 5-20: Gewichtsanteile des Lysimeters für SKA ohne TSM

Bei der Bauweise SKA mit Dränmatte 3, die in Bild 5-21 gezeigt wird, liegen die gemessenen Kurven für Sickerwasser und Oberflächenabfluss ziemlich lange gleich auf. Am Ende der Versuchsreihe wird aber mehr Sickerwasser als Oberflächenabfluss gemessen.

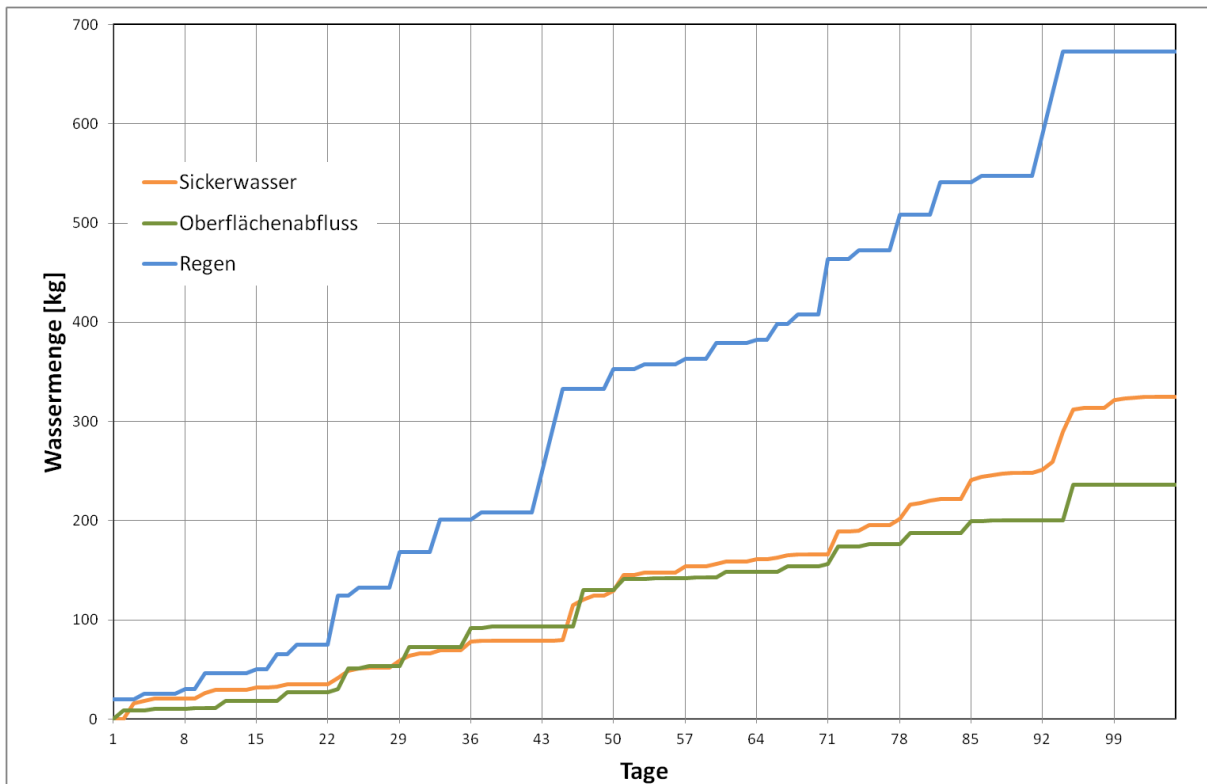


Bild 5-21: Wassermengen für SKA mit Dränmatte 3

Dies wird auch in Bild 5-22 dargestellt. Die Lysimetergewichte im ersten Versuchsumlauf liegen deutlich unter denen des zweiten Umlaufs. Erst durch die langandauernden Regen wird das Material gesättigt, so dass im zweiten Umlauf mehr Sickerwasser fließen kann.

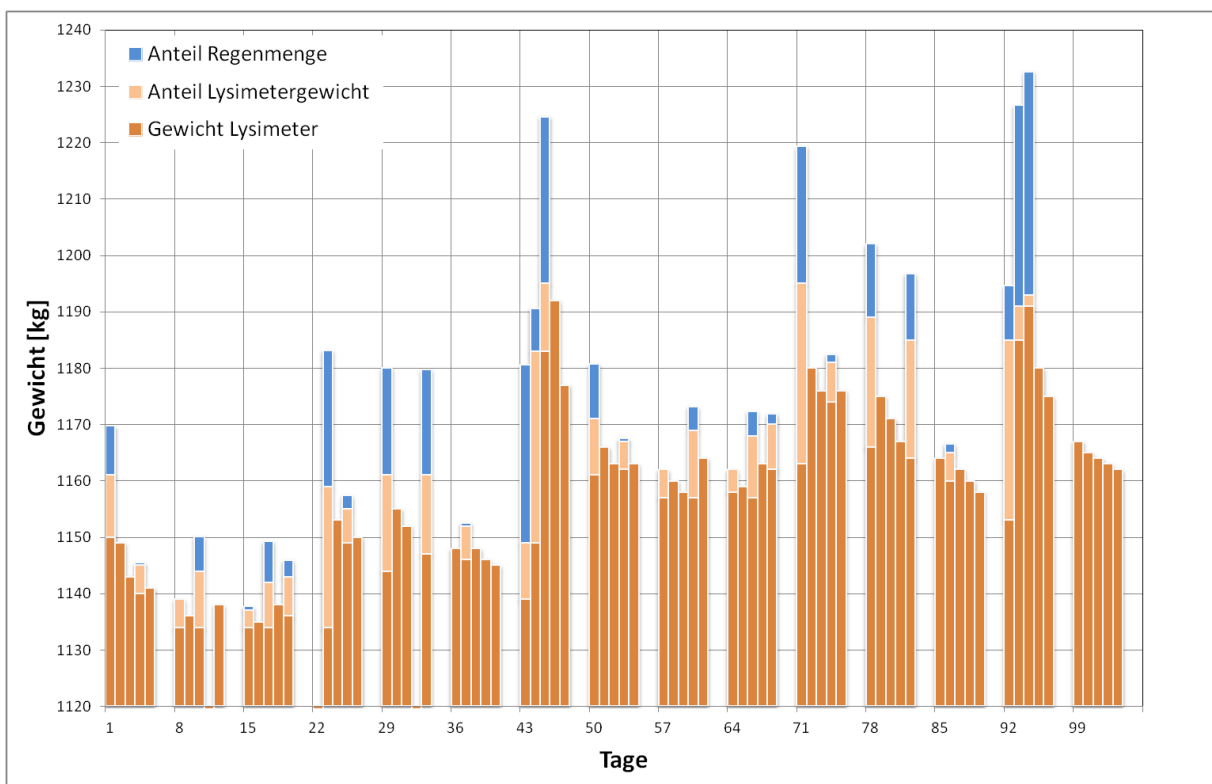


Bild 5-22: Gewichtsanteile des Lysimeters für SKA mit Dränmatte 3

Mit dem Baustoff SKA wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dafür wurden nur 35% der Wassermenge verregnet. Es wurde dieselbe Lysimeterfüllung wie für die Versuchsreihe SKA mit Dränmatte 3 verwendet. Bild 5-23 zeigt, dass bei dieser Versuchsreihe kaum Oberflächenabfluss gemessen wurde. Sickerwasser fällt in nennenswertem Maße erst nach dem zweiten 72h-Regen an.

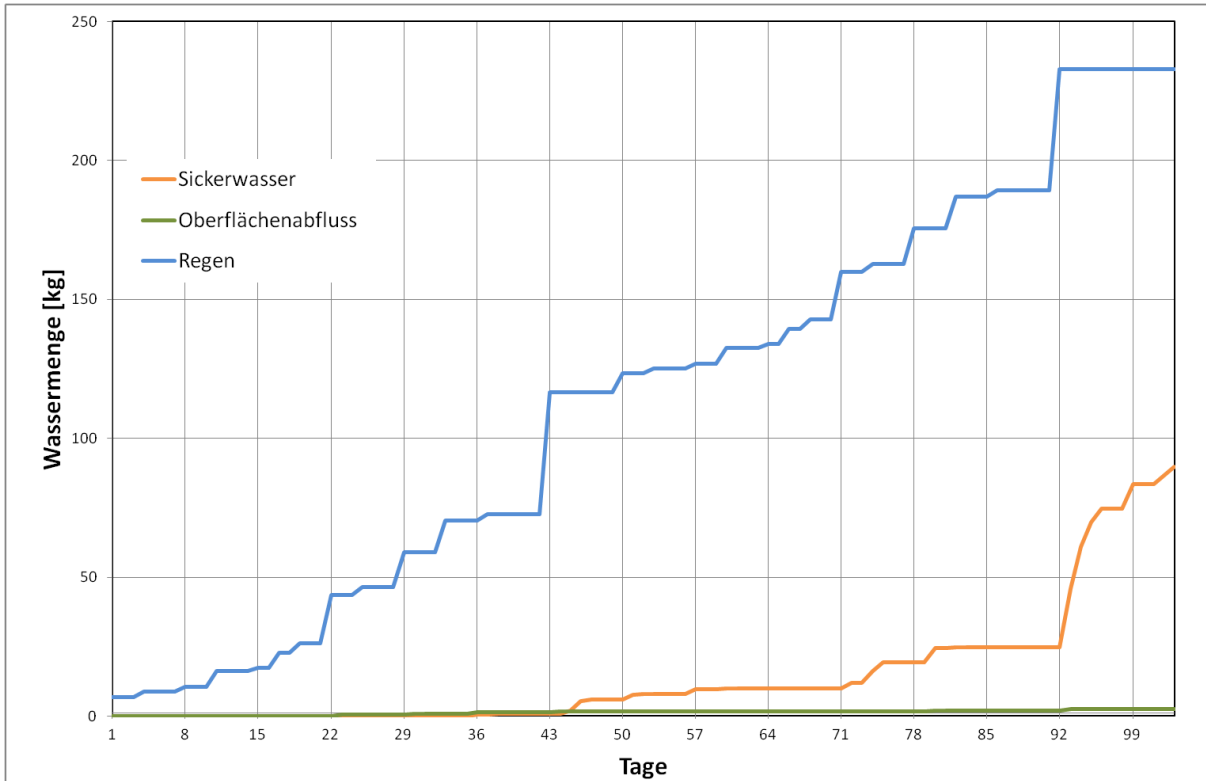


Bild 5-23: Wassermenge für SKA ohne TSM, Sensitivitätsanalyse

Der geringe Oberflächenabfluss wird auch in Bild 5-24 deutlich. Sämtliches aufgebrachte Wasser erhöht zunächst das Lysimetergewicht. Während des 1. Umlaufes steigt das Gewicht stark an. Insgesamt zeigt das Lysimetergewicht Unterschiede von ca. 80 kg.

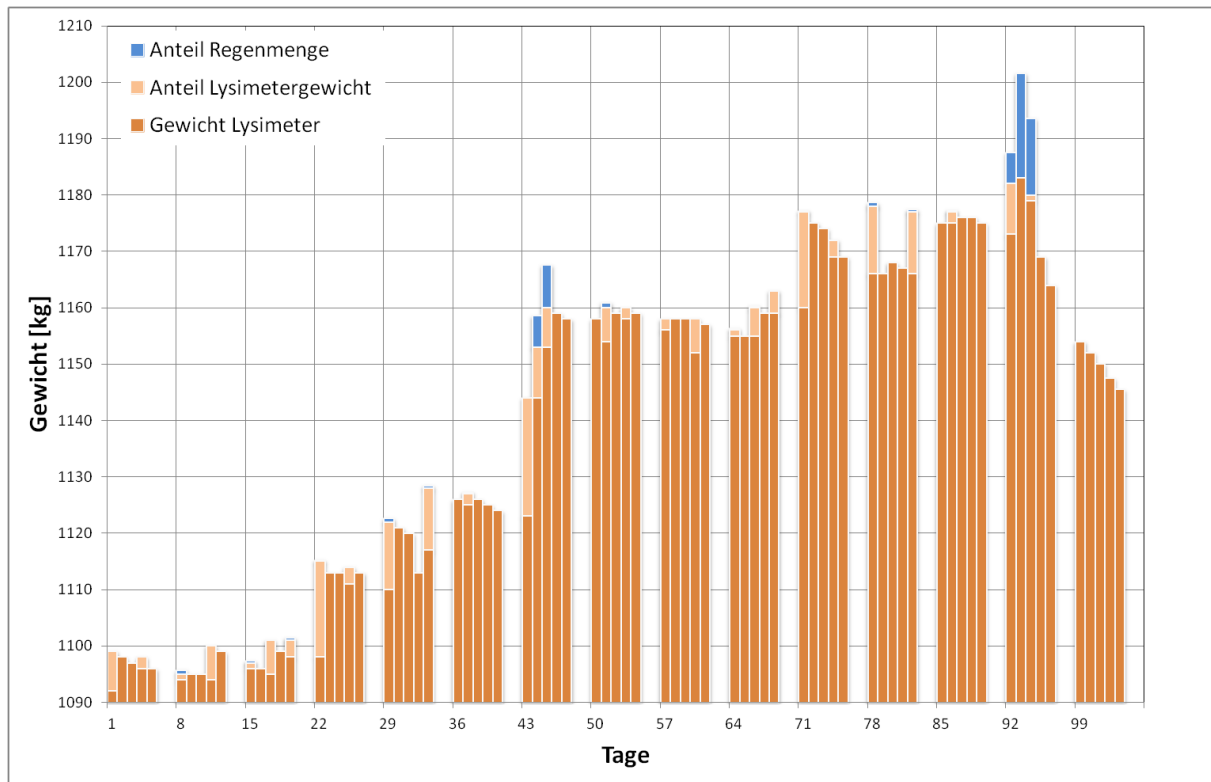


Bild 5-24: Gewichtsanteile des Lysimeters für SKA ohne TSM, Sensitivitätsanalyse

5.3 Umweltrelevante Inhaltsstoffe

5.3.1 Feststoffanalysen

Die chemische Analyse von umweltrelevanten Inhaltsstoffen ist ein komplexes Thema. An dieser Stelle werden nur Übersichtstabellen dargestellt. Die ausführlichen Ergebnistabellen der chemischen Untersuchungen befinden sich im Anhang.

In der Tab. 5-3 sind die Ergebnisse der Feststoffanalyse aller Materialien dargestellt. Alle maßgeblichen organischen Parameter wie PAK, KW, LHKW, BTX, PCB sind unauffällig. Im Entwurf von 2017 der Ersatzbaustoffverordnung (MantelV, 2017) sind nur bei Bodenmaterial und Baggergut Feststoffwerte bei den Materialwerten angegeben. Lediglich für RC-Baustoffe sind Überwachungswerte angegeben. Die hier gemessenen Feststoffwerte liegen deutlich unter den in der Ersatzbaustoffverordnung angegebenen Werten.

Sofern ein Vergleich mit den Zuordnungswerten für Feststoffe gemäß (LAGA, 2003) möglich ist, sind keine Überschreitungen zu erkennen.

Analyse bez. auf Trockenrückstand		HMVA	RC	GRS	SKA
Cyanid gesamt	mg/kg	< 1	< 1	1,51	< 1
Arsen	mg/kg	7,18	5,63	1,04	4,61
Blei	mg/kg	807	13,7	1,09	4,41
Cadmium	mg/kg	16,6	0,13	< 0,1	< 0,1
Chrom gesamt	mg/kg	193	23,8	4,48	21,6
Kupfer	mg/kg	1770	17,5	5,5	17,6
Nickel	mg/kg	143	24,5	2,03	24,8
Quecksilber	mg/kg	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Thallium	mg/kg	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4
Zink	mg/kg	2930	54,7	8,69	25,9
Antimon	mg/kg	49,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Molybdän	mg/kg	43,5	43,7	1,75	30,9
Vanadium	mg/kg	44,8	17,8	3,15	40,5
EOX	mg/kg	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8
Kohlenwasserstoffindex (C ₁₀ -C ₄₀)	mg/kg	171	288	< 100	< 100
Kohlenwasserstoffindex (C ₁₀ -C ₂₂)	mg/kg	< 100	< 100	< 100	< 100
PAK (EPA)	mg/kg	0,94	3,6	0,08	0,08
TOC [%]	%	1,55	< 5	0,94	7,32

Tab. 5-3: Feststoffanalyse der Materialien

5.3.2 Untersuchungen am Eluat

Wie im Bericht (KELLERMANN-KINNER, et al., 2016) und im Kapitel 4.5 ausführlich beschrieben wird, gibt es keine bundeseinheitlichen Regelungen zur Beurteilung der umweltrelevanten Inhaltsstoffe, da die Ersatzbaustoffverordnung (MantelV, 2017) zur Berichtslegung erst als Entwurf vorliegt.

Die Eluate wurden mit den Verfahren DEV S4 (DIN 38414-4, 1984), Schüttelverfahren (2:1 Elution) (DIN 19529, 2015) sowie dem Perkulationsverfahren (Säulentest) (DIN 19528, 2009) hergestellt. Die W/F-Verhältnisse der Säulenfraktionen sind in Abschnitt 4.5 beschrieben. Die Tab. 5-4 zeigt die verwendeten Farbhervorhebungen für die Eluate. Zur Einordnung der Ergebnisse werden hier die Materialwerte herangezogen. Dabei ist zu beachten, dass Anforderungswerte und Prüfverfahren zusammengehören müssen. So wurden die Ergebnisse des DEV S4 Verfahren mit den Richt- und Grenzwerte für die umweltrelevanten Merkmale nach Tabelle D.1 der TL Gestein-StB (FGSV, 2018) verglichen. Die Zahlenwerte der Tabelle D.1 für die hier untersuchten Stoffe befinden sich in Tab.-A 4 im Anhang. Die Ergebnisse der anderen Eluate wurden mit den Materialwerten der Ersatzbaustoffverordnung verglichen. Die Zahlenwerte für die Materialwerte der hier untersuchten Stoffe befinden sich in Tab.-A 3 im Anhang.

Tab. 5-4: Farbeinteilung der Eluatwerte

< Bestimmungsgrenze
kein Materialwert angegeben
Klasse 1
Klasse 2
Klasse 3

In den Tab. 5-5 bis Tab. 5-8 werden durch die farbliche Markierung eine Übersicht über die Eluatwerte für die verschiedenen Materialien gegeben.

		TL Gestein	Materialwerte Mantel V (Entwurf 2017)					
Eluatanalyse		DEV S4	2-1 Eluat	Säule Kurz	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
HMVA	W/F	10	2	2	0,3	1	2	4
pH-Wert	[-]	7,84	8,37	8,08	7,53	7,73	7,48	7,91
el. Leitf.	[$\mu\text{S}/\text{cm}$]	508	1862	1120	2100	1577	1065	807
Arsen	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 10	11,2	< 10	< 10	14,1	16,3	11,8
Blei	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 7	< 7	< 7	< 7	< 7	< 7	< 7
Cadmium	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Chrom	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 7	< 7	11,5	23,9	20,9	16,2	11,3
Kupfer	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 10	23,3	11	26,1	25,2	23,2	10,8
Nickel	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Quecksilber	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Zink	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40
Molybdän	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	14,3	88,4	20,5	85,4	68,2	38,0	36,8
Antimon	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	12,1	38,8	17,8	32,7	27,3	21,5	25,4
Vanadium	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	7,4	19,1	15,2	25,5	27,4	24,9	15,1
Thallium	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Cyanide, ges.	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Chlorid	[mg/l]	5,66	32,7	6,23	63,5	45,5	13,5	5,99
Sulfat	[mg/l]	207	1066	555	1163	832	525	345
Fluorid	[mg/l]	< 0,65	< 0,65	< 0,65	< 0,65	< 0,65	< 0,65	< 0,65
DOC	[mg/l]	1,5	2,3	3,1	3,0	2,5	2,3	1,8

Tab. 5-5: Vergleich der Eluatanalysen für HMVA

Bei HMVA müsste das Material aufgrund der Werte von Molybdän, Antimon und Sulfat nach den Materialwerten nach (MantelV, 2017) der Materialklasse 2 zugeordnet werden. Nach TL Gestein gibt es keine Materialwerte für Molybdän und Antimon für HMVA, aufgrund des Sulfatwertes würde das Material auch in Materialklasse 2 eingeordnet. Die elektrische Leitfähigkeit ist ein stoffspezifischer Orientierungswert, bei dessen Abweichung die Ursache zu prüfen ist.

		TL Gestein	Materialwerte Mantel V (Entwurf 2017)					
Eluatanalyse		DEV S4	2-1 Eluat	Säule Kurz	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
RC	W/F	10	2	2	0,3	1	2	4
pH-Wert	[-]	9,84	9,83	9,8	8,93	8,99	9,2	9,29
el. Leitf.	[$\mu\text{S}/\text{cm}$]	188	524	442	559	521	353	247
Arsen	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 10	< 10	< 10	16,3	15,4	19,1	15,4
Blei	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 7	< 7	< 7	< 7	< 7	< 7	< 7
Cadmium	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Chrom	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 10	10,9	9,09	13,7	14,2	10,3	< 0,5
Kupfer	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 10	< 10	< 10	23,1	17,4	14,7	7,33
Nickel	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Quecksilber	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Zink	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40
Molybdän	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 10	< 10	< 10	10,4	< 10	< 10	< 10
Antimon	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Vanadium	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	8,6	24,2	16,2	19,0	25,6	27,4	17,8
Thallium	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Cyanide, ges.	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Chlorid	[mg/l]	2,94	13,91	12,6	22,3	16,03	8,82	4,17
Sulfat	[mg/l]	42,6	166	155	213	182	118	72,9
Fluorid	[mg/l]	< 0,65	< 0,65	< 0,65	< 0,65	< 0,65	< 0,65	< 0,65
DOC	[mg/l]	2,6	6,5	7,2	10,0	8,3	5,8	3,3
PAK ₁₅	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	1,3	1,6	0,36	2,9	1,2	0,73	0,91

Tab. 5-6: Vergleich der Eluatanalysen für RC

Das Material RC kann anhand der Eluatwerte der Materialklasse 1 zugeordnet werden.

		TL Gestein	Materialwerte Mantel V (Entwurf 2017)					
Eluatanalyse		DEV S4	2-1 Eluat	Säule Kurz	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
GRS	W/F	10	2	2	0,3	1	2	4
pH-Wert	[-]	8,55	8,42	8,33	8,21	8,62	8,94	9,11
el. Leitf.	[$\mu\text{S}/\text{cm}$]	45	162	227	47	128	76	59
Arsen	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 10	12,5	17	45,7	36,6	18,1	< 10
Blei	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 7	< 7	< 7	< 7	< 7	< 7	< 7
Cadmium	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Chrom	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 7	< 7	< 7	< 7	< 7	< 7	< 7
Kupfer	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 10	< 10	< 10	11,5	10,6	< 10	< 10
Nickel	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Quecksilber	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Zink	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40
Molybdän	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Antimon	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Vanadium	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	7,6	21,1	32	48,8	50,4	34,4	13,1
Thallium	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Cyanide, ges.	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Chlorid	[mg/l]	< 1	< 1	< 1	1,8	< 1	< 1	< 1
Sulfat	[mg/l]	5,58	30,5	47,6	53,1	8,32	1,12	< 1
Fluorid	[mg/l]	< 0,65	< 0,65	1,31	< 0,65	< 0,65	< 0,65	< 0,65
DOC	[mg/l]	2,6	6	10,5	7,4	5,5	3,9	2,2

Tab. 5-7: Vergleich der Eluatanalysen für GRS

Bei GRS erfüllt lediglich der pH-Wert nicht die Forderung > 9 zu sein. Der pH-Wert ist nur bei GRS als Grenzwert definiert, bei allen anderen Materialien ist er lediglich ein stoffspezifischer Orientierungswert. Dieses Material müsste dann der Materialklasse 2 zugeordnet werden. Dies ist auffällig, da alle den pH-Wert beeinflussenden Stoffe unauffällig sind.

		TL Gestein	Materialwerte Mantel V (Entwurf 2017)					
Eluatanyalse		DEV S4	2-1 Eluat	Säule Kurz	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
SKA	W/F	10	2	2	0,3	1	2	4
pH-Wert	[-]	7,66	8,33	8,16	7,65	7,35	7,64	7,73
el. Leitf.	[$\mu\text{S}/\text{cm}$]	121	431	160	801	516	287	144
Arsen	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 10	27,3	11,4	31,3	33	30,1	23,8
Blei	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 7	< 7	< 7	< 7	< 7	< 7	< 7
Cadmium	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Chrom	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 7	< 7	< 7	< 7	< 7	< 7	< 7
Kupfer	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 10	< 10	< 10	15,2	11,2	10,3	< 10
Nickel	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Quecksilber	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Zink	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40
Molybdän	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 10	30	< 10	86,4	45,7	19,4	< 10
Antimon	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Vanadium	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	19,1	77,2	43,5	65,3	66,2	70,2	58,8
Thallium	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Cyanide, ges.	[$\mu\text{g}/\text{l}$]	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Chlorid	[mg/l]	2,05	7,05	1,85	16,9	8,65	4,32	1,49
Sulfat	[mg/l]	18,4	73,9	17,86	153	88,3	54,6	18,5
Fluorid	[mg/l]	< 0,65	< 0,65	< 0,65	< 0,65	< 0,65	< 0,65	< 0,65
DOC	[mg/l]	1,7	1,5	1,6	1,8	1,6	1,6	1,6

Tab. 5-8: Vergleich der Eluatanalysen für SKA

Das Material SKA kann anhand der Eluatwerte der Materialklasse 1 zugeordnet werden.

5.3.3 Sickerwasseranalyse

Während der 15-wöchigen Versuchsdauern wurden bis zu 51 Sickerwasserproben genommen. Eine statistische Auswertung aller gemessenen umweltrelevanten Inhaltsstoffe im Sickerwasser enthalten die Tabellen Tab.-A 5 und Tab.-A 6 im Anhang.

Die Tab. 5-10 und Tab. 5-13 zeigen als Übersicht die 90-Perzentile aller gemessenen Werte. Die Farbhervorhebungen entsprechen den Definitionen in Tab. 5-9. Um den Vergleich mit dem ersten Berichtsteil (KELLERMANN-KINNER, et al., 2016) zu haben wurde die Werte der Tab. 4-4 nach (LAWA, 2004) und (BBodSchV, 2012) verwendet.

<	Bestimmungsgrenze
>	Bestimmungsgrenze und
<	Geringfügigkeitsschwelle
>	Geringfügigkeitsschwelle
	(LAWA, 2004)
>	Prüfwerte (BBodSchV, 2012)

Tab. 5-9: Farbeinteilung der Sickerwasseranalyse

Tab. 5-10: 90-Perzentile der Sickerwasseranalyse für HMVA

HMVA Sickerwasser- analyse 90- Perzentil		ohne TSM	mit Dränmatte 1	mit Dränmatte 2	mit Dränmatte 3
Arsen	[mg/l]	0,0280	0,0070	0,0005	0,0148
Blei	[µg/l]	26,26	2,77	0,13	0,09
Cadmium	[µg/l]	3,33	2,13	1,07	0,56
Chrom	[mg/l]	0,0394	0,0254	0,0461	0,0356
Kupfer	[mg/l]	0,0652	0,0876	0,0270	0,0253
Nickel	[mg/l]	0,0172	0,0143	0,0151	0,0143
Quecksilber	[mg/l]	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Zink	[mg/l]	0,1550	0,0979	0,0642	0,0877
Molybdän	[mg/l]	0,4340	0,2749	0,2944	0,2207
Antimon	[mg/l]	0,0919	0,0697	0,0603	0,0586
Vanadium	[mg/l]	0,0037	0,0040	0,0042	0,0016
Thallium	[mg/l]	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Cyanide, ges.	[mg/l]	0,015	0,026	0,008	0,008
Chlorid	[mg/l]	3450	2355	1155	1082
Sulfat	[mg/l]	2440	1562	1786	1666
Fluorid	[mg/l]	0,217	0,210	0,889	1,227

Tab. 5-11: 90-Perzentile der Sickerwasseranalyse für GRS

GRS Sickerwasser- analyse 90- Perzentil		ohne TSM
Arsen	[mg/l]	0,0351
Blei	[µg/l]	0,35
Cadmium	[µg/l]	0,10
Chrom	[mg/l]	0,0180
Kupfer	[mg/l]	0,0114
Nickel	[mg/l]	0,0034
Quecksilber	[mg/l]	0,0005
Zink	[mg/l]	0,0145
Molybdän	[mg/l]	0,0810
Antimon	[mg/l]	0,0005
Vanadium	[mg/l]	0,007
Thallium	[mg/l]	0,0005
Cyanide, ges.	[mg/l]	0,058
Chlorid	[mg/l]	51
Sulfat	[mg/l]	795
Fluorid	[mg/l]	1,792

Für HMVA liegen sehr viele Werte im Sickerwasser über den Prüfwerten der BBodSchV oder den Geringfügigkeitsschwellenwerten. Zu den Stoffen die am häufigsten über den Prüfwerten liegen zählen Arsen, Molybdän, Kupfer, Chrom und Antimon.

Für GRS werden die Prüfwerte der BBodSchV bei den Stoffen Arsen, Molybdän, Cyanid und Fluorid überschritten.

Tab. 5-12: 90-Perzentile der Sickerwasseranalyse für RC

RC Sickerwasser- analyse 90- Perzentil		ohne TSM	mit Dränmatte 1	mit Dränmatte 3	ohne TSM Sensi
Arsen	[mg/l]	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Blei	[µg/l]	0,47	0,14	0,48	0,27
Cadmium	[µg/l]	0,18	0,17	0,21	0,64
Chrom	[mg/l]	0,0948	0,0476	0,2234	0,0843
Kupfer	[mg/l]	0,2275	0,0558	0,1906	0,0251
Nickel	[mg/l]	0,0494	0,0139	0,0437	0,0095
Quecksilber	[mg/l]	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Zink	[mg/l]	0,0114	0,0149	0,0086	0,0067
Molybdän	[mg/l]	0,0397	0,0204	0,0886	0,0573
Antimon	[mg/l]	0,0005	0,0005	0,0171	0,0005
Vanadium	[mg/l]	0,0200	0,0185	0,0584	0,0160
Thallium	[mg/l]	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Cyanide, ges.	[mg/l]	0,012	0,008	0,016	0,013
Chlorid	[mg/l]	260	87	333	142
Sulfat	[mg/l]	137	124	1071	1084
Fluorid	[mg/l]	0,893	0,520	0,336	0,293

Tab. 5-13: 90-Perzentile der Sickerwasseranalyse für SKA

SKA Sickerwasser- analyse 90- Perzentil		ohne TSM	mit Dränmatte 3	ohne TSM Sensi
Arsen	[mg/l]	0,0259	0,0005	0,0005
Blei	[µg/l]	0,21	1,42	0,88
Cadmium	[µg/l]	0,10	0,03	0,04
Chrom	[mg/l]	0,0241	0,0184	0,0203
Kupfer	[mg/l]	0,0048	0,0090	0,0043
Nickel	[mg/l]	0,0042	0,0051	0,0066
Quecksilber	[mg/l]	0,0005	0,0005	0,0005
Zink	[mg/l]	0,0118	0,0153	0,0243
Molybdän	[mg/l]	0,0496	0,0608	0,1339
Antimon	[mg/l]	0,0005	0,0005	0,0005
Vanadium	[mg/l]	0,0277	0,0521	0,0437
Thallium	[mg/l]	0,0005	0,0005	0,0005
Cyanide, ges.	[mg/l]	0,009	0,003	0,004
Chlorid	[mg/l]	25	27	37
Sulfat	[mg/l]	120	119	335
Fluorid	[mg/l]	0,124	0,235	0,261

Bei RC liegen mehrere Werte im Sickerwasser über den Prüfwerten der BBodSchV oder den Geringfügigkeitsschwellenwerten. Zu den Stoffen die am häufigsten über den Prüfwerten liegen zählen Molybdän, Kupfer und Chrom.

Für SKA werden die Prüfwerte der BBodSchV bei den Stoffen Arsen und Molybdän überschritten.

Die Elutionsverfahren dienen dazu, das Freisetzungverhalten eines Materials grundsätzlich zu charakterisieren. Bei dem Vergleich der Eluatuntersuchungen und der Sickerwasseruntersuchungen können jedoch nur tendenziell Übereinstimmungen erkannt werden. Insgesamt sind im Sickerwasser mehr Stoffe auffällig als bei den Eluatuntersuchungen. Die Tabellen geben nur eine Übersicht wieder und sagen nichts über den Konzentrationsverlauf im Sickerwasser aus.

6 Auswertung

6.1 Vergleich der Sickerwassermengen

Um Aussagen über die Effizienz der TSM machen zu können, werden die Sickerwassermenge der unterschiedlichen Bauweisen verglichen.

Bild 6-1 zeigt den Vergleich der gemessenen Sickerwassermengen für die Versuchsreihen mit HMVA. Blau dargestellt ist wieder die Summe der aufgebrauchten Regenmenge. Es ist gut zu erkennen, dass die Kurven der Versuche mit Dränmatte deutlich unter der Sickerwasserkurve des Versuches ohne TSM liegen. Beim Versuch HMVA mit Dränmatte 1 fällt am wenigsten Sickerwasser an, selbst bei den 72h-Regenereignissen steigt die Kurve kaum an. Bei den Sickerwasserkurven der Versuche mit Dränmatte 2 und 3 sind deutliche Sickerwasserzunahmen nach den 72h-Regen zu beobachten. Es fällt ungefähr gleich viel Sickerwasser an, aber deutlich mehr als bei Dränmatte 1.

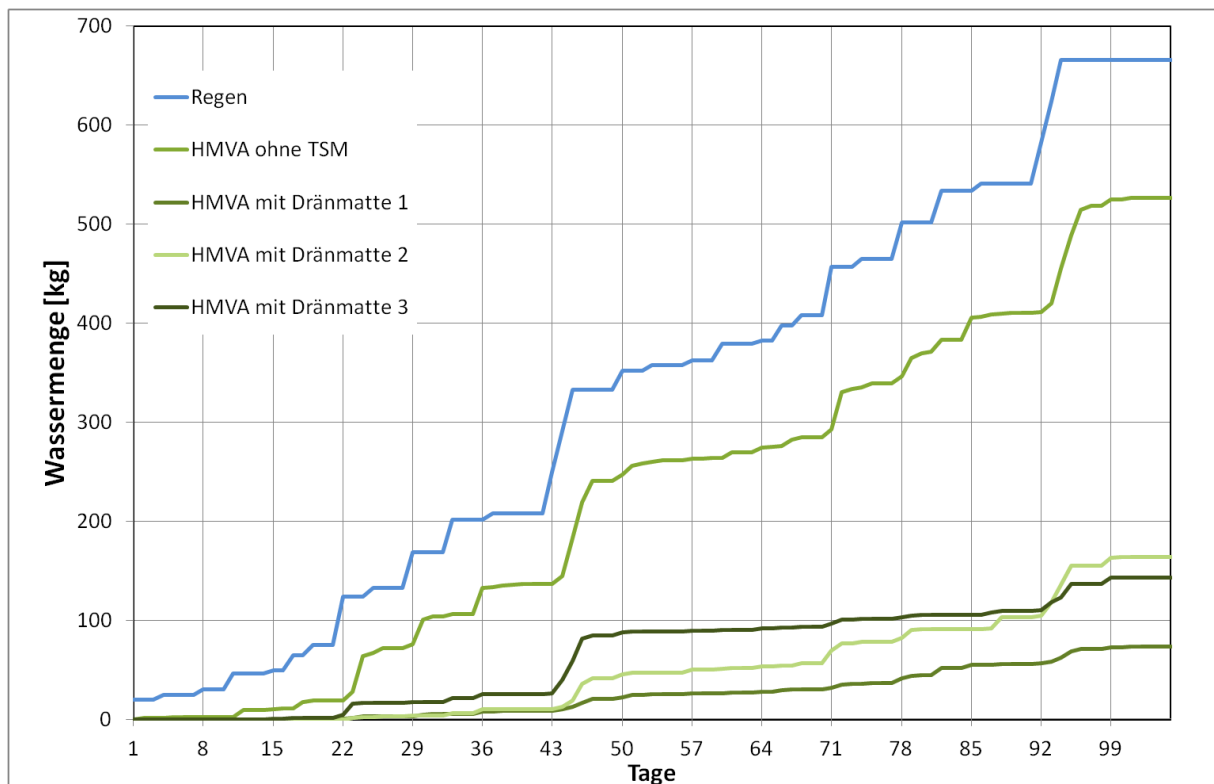


Bild 6-1: Vergleich der Sickerwassermengen für HMVA

Die Auswertung der Einbauwerte in Tab. 5-2 hatte ergeben, dass aufgrund unterschiedlicher Wassergehalte bei den Bauweisen mit Dränmatte 2 und 3 nur ein Verdichtungsgrad von ca. 96 % anstatt von 100% erreicht wurde. Dies führt zu einem größeren Porenraum und einer besseren Durchlässigkeit und könnte neben den unterschiedlichen Dränmatten auch erklären, warum bei diesen Bauweisen mehr Sickerwasser auftritt.

In einem weiteren Schritt wurde untersucht, ob sich die Sickerwässer der beiden Umläufe des Regenregimes in einem Versuch unterscheiden. Dies wurde aufgrund der Aufsättigung des Erdkörpers vermutet. Ein Umlauf des Regenregimes dauert 7 Wochen und wird für einen Versuch zweimal durchgeführt. Der zweite Umlauf umfasst die Versuchswochen 8 bis 14 und ist im Bild 6-2 gestrichelt dargestellt. Es zeigt sich, dass die Sickerwasserkurven der zweiten Umläufe fast immer über denen der ersten Umläufe (Versuchswochen 1 bis 7) liegen. Einzige Ausnahme bildet die Versuchsreihe HMVA mit

Dränmatte 3, hier tritt am Ende des 1. Umlaufes nach dem 72h-Regen wesentlich mehr Sickerwasser auf als beim 2. Umlauf.

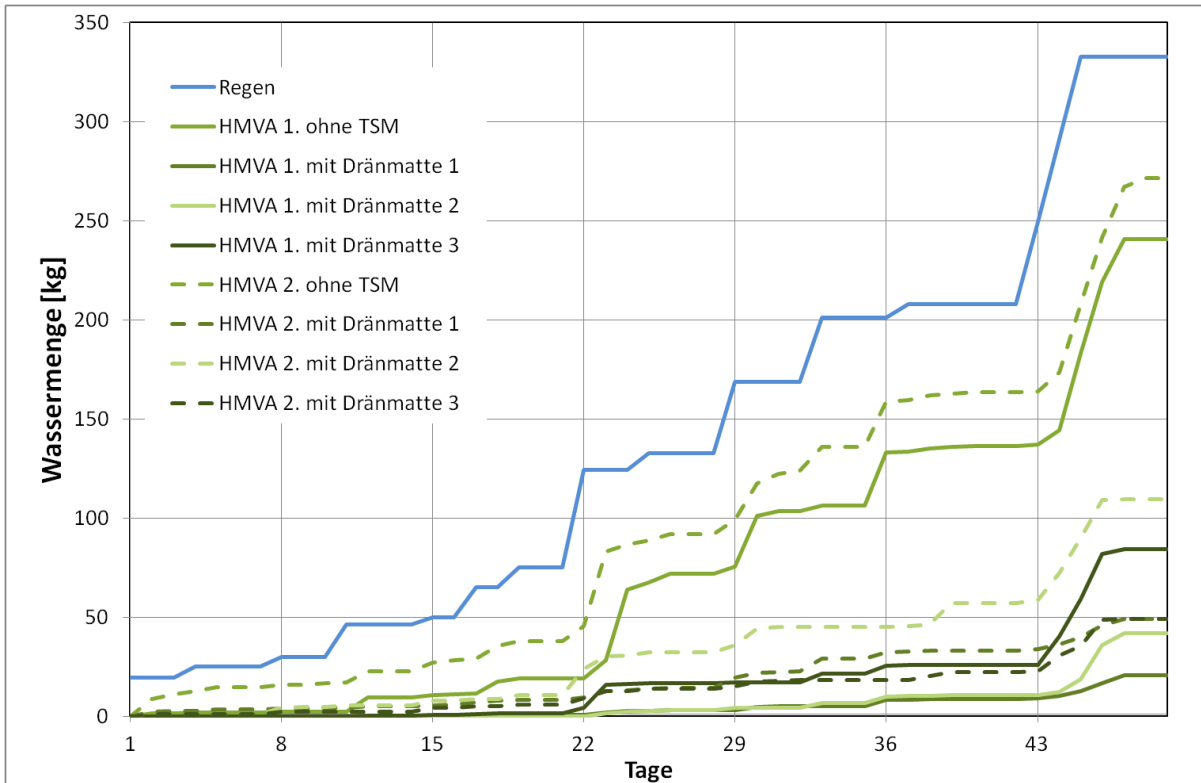


Bild 6-2: Vergleich der Sickerwassermenge der beiden Umläufe für HMVA

Für vergleichbare Materialien wurden im Forschungsprojekt „Bestimmung von Wassergehalts-Saugspannungsfunktionen für Böden, RC-Baustoffe und HMVA“ (DURNER & SCHARNAGL, 2015) die hydraulischen Eigenschaften dieser Materialien untersucht. Bodenmaterial besitzt ähnliche hydraulische Eigenschaften wie natürliche Böden, die weitestgehend bekannt sind. Allerdings liegt verdichtungsbedingt eine geringere Gesamtporosität und damit geringere gesättigte volumetrische Wassergehalte vor. Bei HMVA sind die Porositäten trotz der hohen Grobkorn-Anteile generell höher. HMVA zeigt eine ausgeprägte Makroporosität, welche sich in einem ausgeprägten Abfall des volumetrischen Wassergehalts von der Sättigung zum ungesättigten Zustand äußert. Durch die erhöhte Salzkonzentration kommt im Gesamtpotential eine osmotische Komponente hinzu. Die gesättigten Leitfähigkeiten der HMVA sind mit $> 10^{-5}$ m/s als sehr hoch klassifiziert, fallen aber beim Übergang zum ungesättigten Zustand unmittelbar um 2 bis 3 Größenordnungen ab. Das RC-Material weist auch eine ausgeprägte Makroporosität auf, was sich in einem drastischen Abfallen der hydraulischen Leitfähigkeit beim Übergang zum ungesättigten Bereich zeigt.

Das Bild 6-3 zeigt den Vergleich der gemessenen Sickerwassermengen für die Versuchsreihen mit RC. Die Summe der aufgebrauchten Regenmenge ist die oberste blaue Linie. Bei RC ohne TSM tritt, wie erwartet, viel Sickerwasser auf. Die Kurven der beiden Versuchsreihen mit Dränmatte liegen deutlich darunter. Mit Dränmatte 3 wird das Sickerwasser am meisten reduziert. Bei dieser Bauweise wurde ein Verdichtungsgrad von 102 % erreicht, der größer ist als die 100 % der beiden anderen RC Bauweisen. Dadurch wird der Porenraum geringer und die Durchlässigkeit kleiner, was zu weniger Sickerwasser führen könnte.

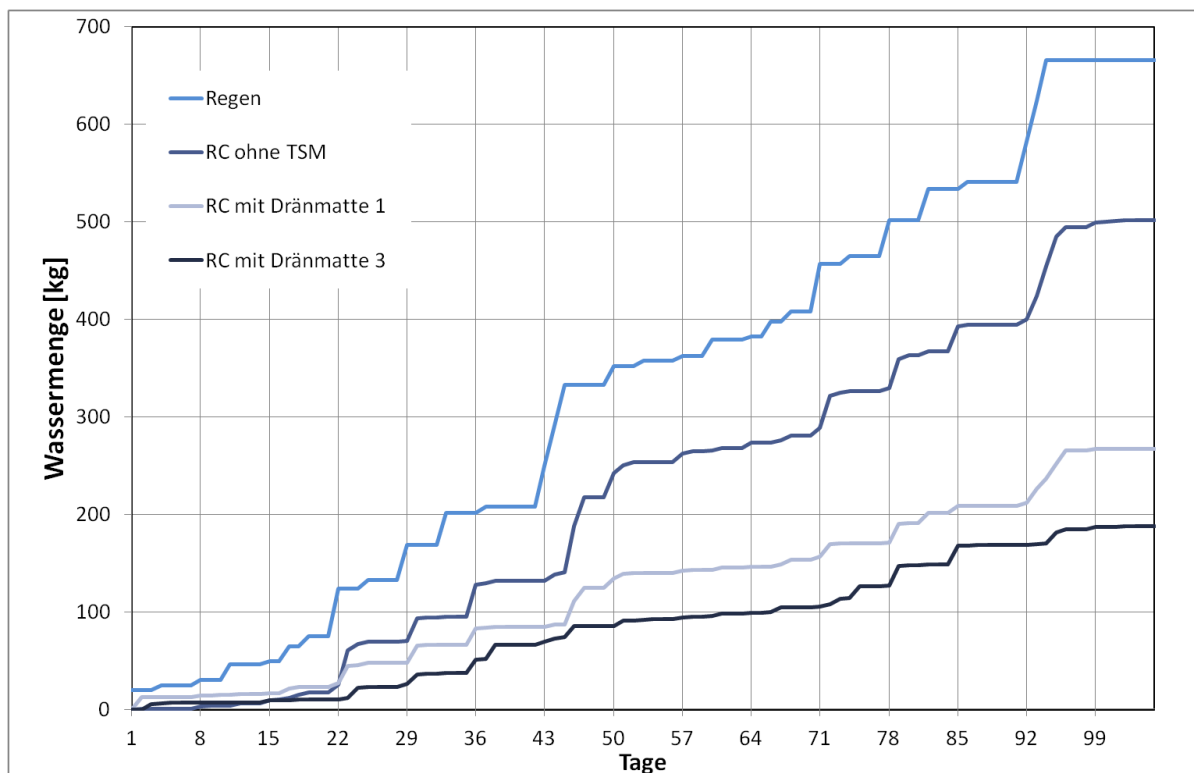


Bild 6-3: Vergleich der Sickerwassermengen für RC

Bild 6-4 zeigt den Vergleich der Umläufe bei der Sickerwasserentwicklung. Die 2. Umläufe liegen jeweils höher als die 1. Umläufe. Bei der Versuchreihe mit Dränmatte 1 sind die Kurven fast identisch

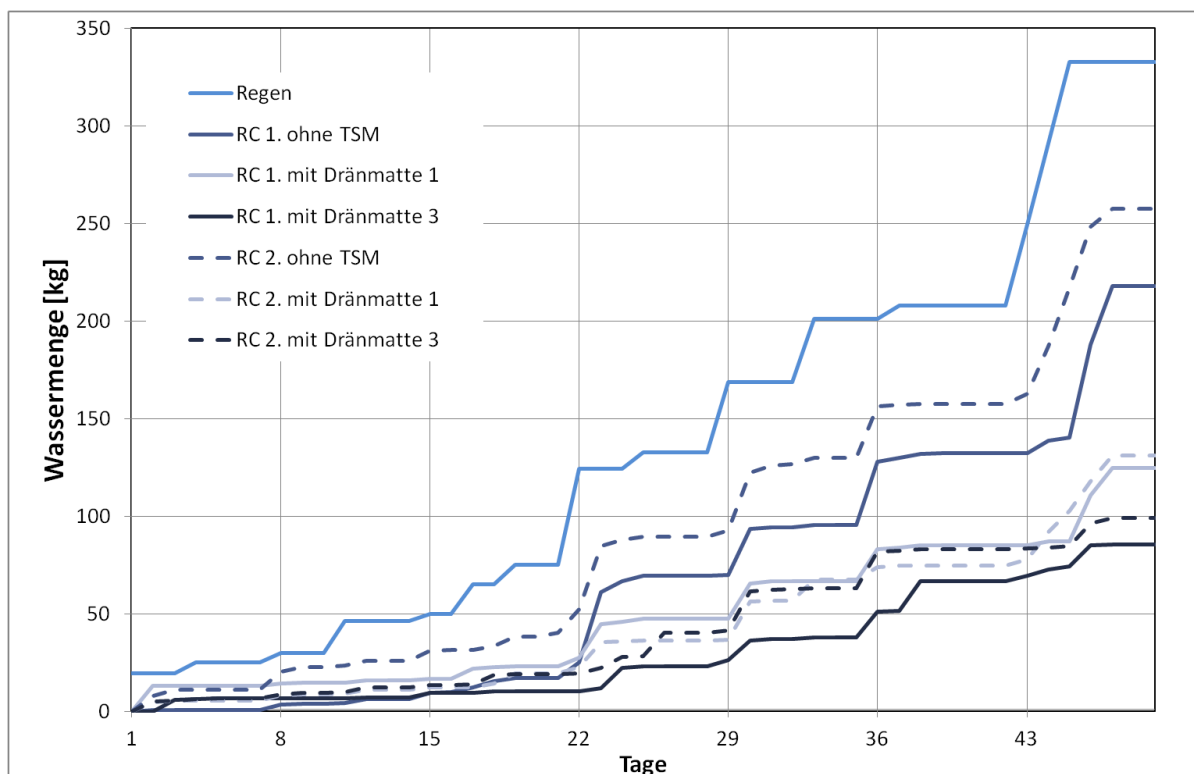


Bild 6-4: Vergleich der Sickerwassermenge der beiden Umläufe für RC

Das Bild 6-5 zeigt vergleichend die Sickerwasserkurven von GRS und SKA. Erwartungsgemäß liegen die Kurven ohne TSM über den Sickerwasserkurven von SKA mit Dränmatte 3. Da für GRS nur eine Versuchsreihe durchgeführt werden konnte, werden die beiden Stoffe in einem Diagramm zusammengefasst. So kann zumindest gezeigt werden, dass GRS und SKA bei den Bauweisen ohne TSM ein ähnliches Versickerungsverhalten zeigen.

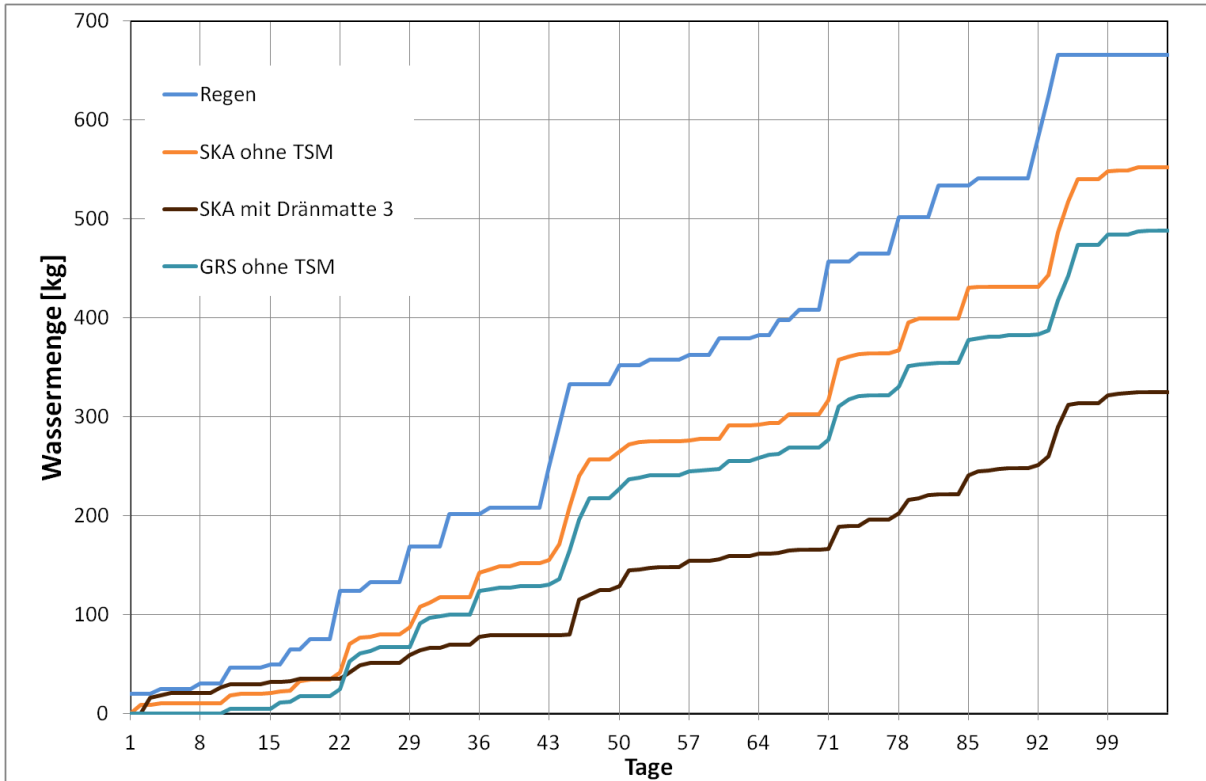


Bild 6-5: Vergleich der Sickerwassermenge für GRS und SKA

Die Kurven der Sickerwassermenge von GRS und SKA des 2. Umlaufes liegen wieder über denen des 1. Umlaufes wie in Bild 6-6 dargestellt. Bei der Bauweise SKA mit Dränmatte 3 ist der Unterschied zwischen den Umläufen am größten.

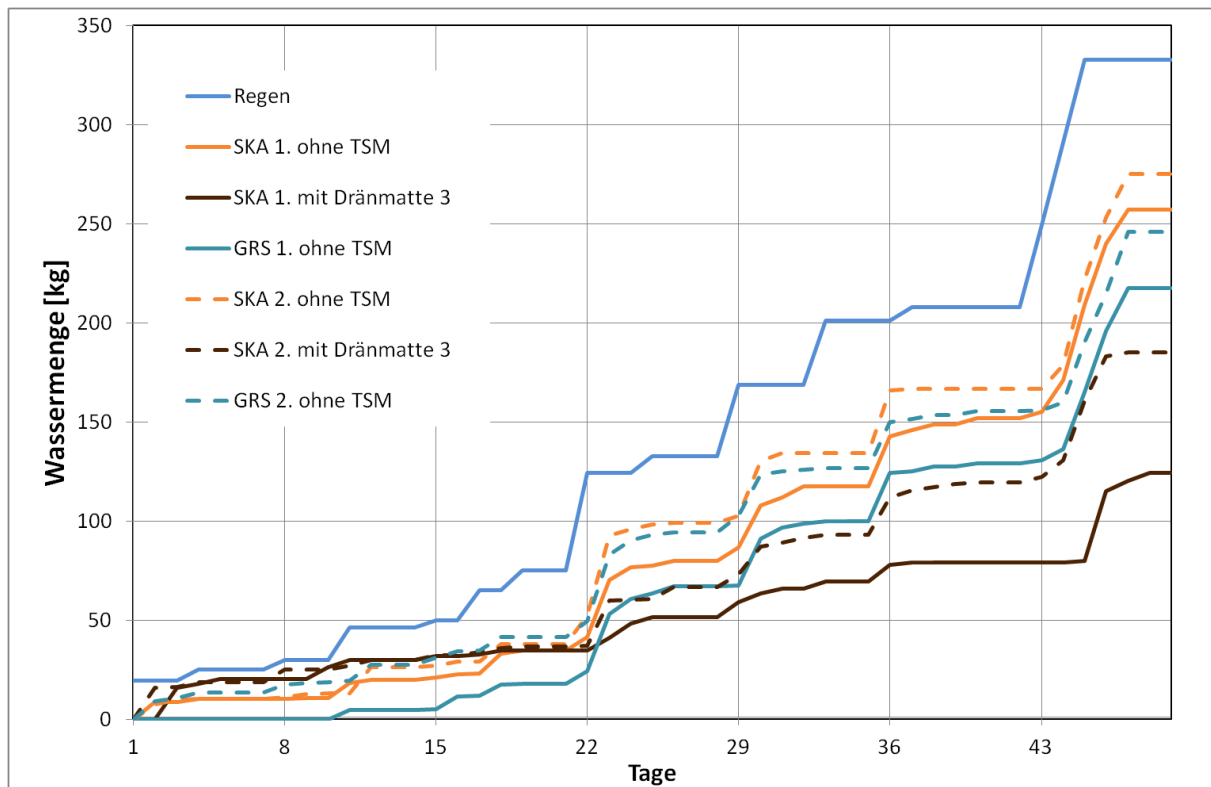


Bild 6-6: Vergleich der Sickerwassermenge der beiden Umläufe für GRS und SKA

Auf den bisherigen Abbildungen ist gut der Einfluss der Bauweise bei Verwendung gleicher Materialien zu erkennen. In den folgenden Abbildungen soll das unterschiedliche Materialverhalten bei gleicher Bauweise untersucht werden. Dafür werden alle Versuche einer Bauweise zusammengefasst. Im ersten Berichtsteil (KELLERMANN-KINNER, et al., 2016) wurden ein bindiger und eine kiesiger Boden untersucht. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihen wurden hier mit berücksichtigt.

In Bild 6-7 können so 6 Materialien, die ohne TSM getestet wurden miteinander verglichen werden. Bei den Bauweisen ohne TSM kann gut der Einfluss des Materials auf die Sickerwassermenge erkannt werden. Deutlich ist zu erkennen, dass alle Kurven einen sehr ähnlichen Verlauf haben und insgesamt sehr viel Sickerwasser gemessen wird. Deutlich weniger Sickerwasser wurde beim bindigen Boden aus dem ersten Versuchsbericht gemessen. Hier fällt nur etwa die Hälfte des Sickerwassers der anderen Versuchsreihen an. Die Wasserdurchlässigkeit bei diesem Material liegt mit 10^{-8} m/s jedoch auch um 2 bis 4 Zehnerpotenzen kleiner als das der übrigen Materialien. Die Sickerwassermengen der Baustoffe (ohne den bindigen Boden) liegen relativ nahe beieinander, der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert der Materialien variiert von $k_f 10^{-4}$ bis $k_f 10^{-6}$. Die Reihung der Baustoffe in Bezug auf die Sickerwassermengen erfolgt jedoch nicht in der Reihung ihrer Wasserdurchlässigkeiten. Dies ist ein Hinweis darauf, dass allein durch die Wasserdurchlässigkeit keine ausreichende Beschreibung des Durchsickerungsverhaltens möglich ist.

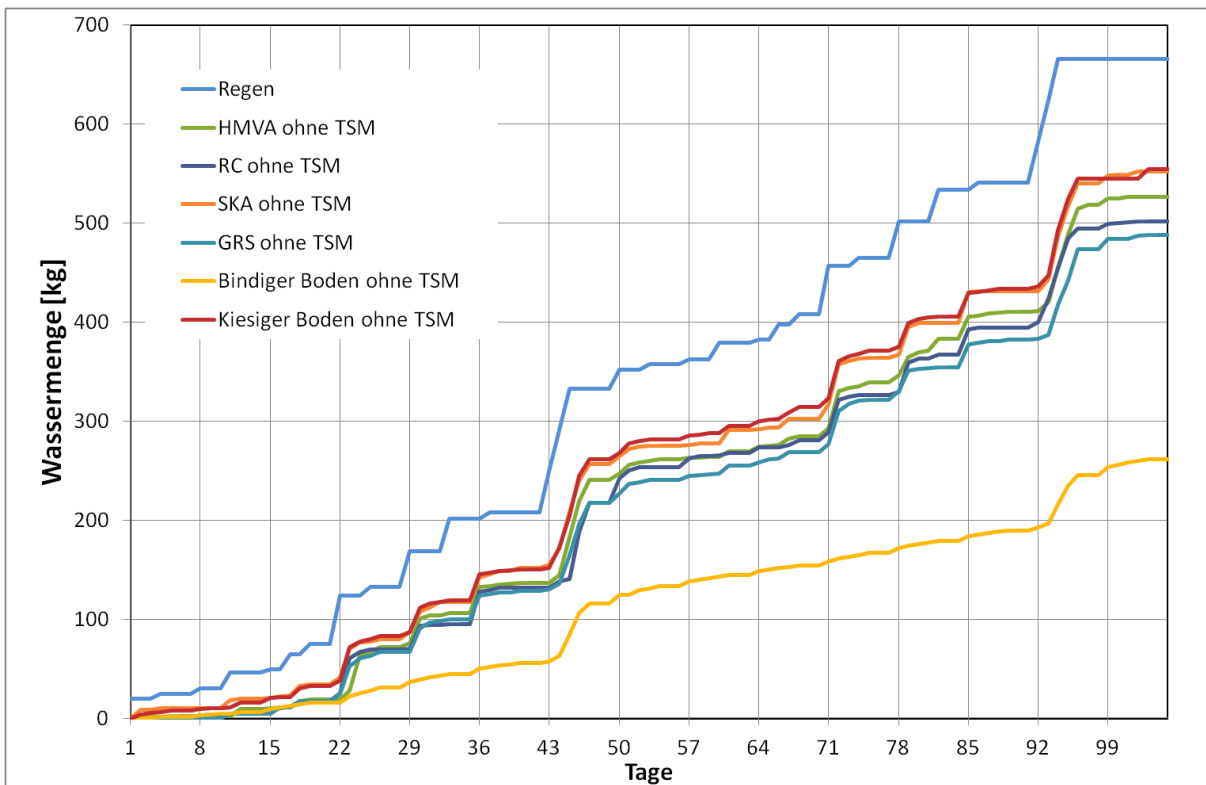


Bild 6-7: Vergleich der Sickerwassermenge für alle Bauweisen ohne TSM

Im Bild 6-8 sind alle Bauweisen mit Dränmatten dargestellt. Bei den Bauweisen mit unterschiedlichen Dränmatten zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Sickerwasserkurven. Die Spreizung zwischen den Kurven ist wesentlich größer als bei den Bauweisen ohne TSM, wenn man den bindigen Boden herausnimmt. So wird z.B. bei SKA mit Dränmatte 3 wesentlich mehr Sickerwasser produziert als mit Boden oder HMVA.

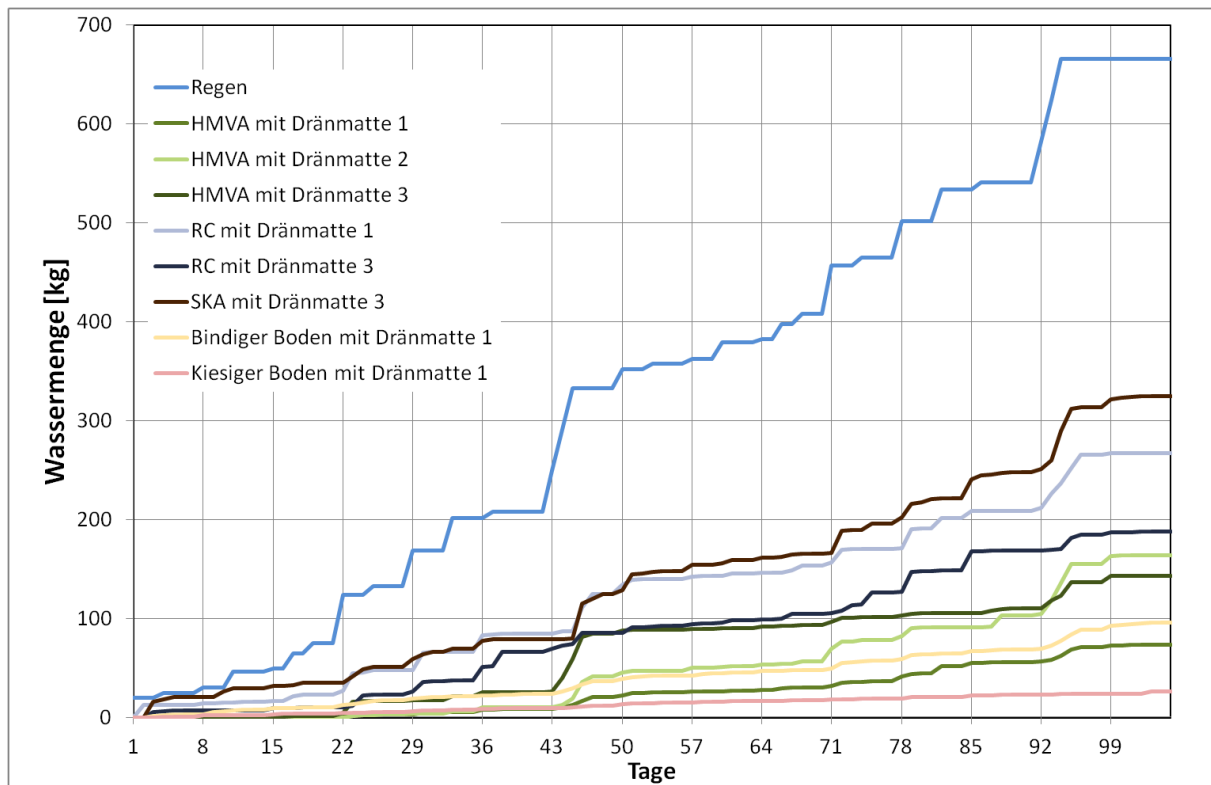


Bild 6-8: Vergleich der Sickerwassermenge für alle Bauweisen mit Dränmatte

Eine Reihung der Effektivität der Dränmatten im Hinblick auf die Reduzierung des Sickerwassers ist nicht möglich. Beim RC-Baustoff bewirkt Dränmatte 3 eine größere Reduzierung der Sickerwassermengen als Dränmatte 1. Bei HMVA ist die Reduktion der Sickerwassermenge durch Dränmatte 1 deutlich höher als bei Dränmatte 2 und 3. Hier kommt es zu einem Zusammenspiel der hydraulischen Eigenschaften der Dränmatten mit den Materialeigenschaften der Baustoffe. So wurde z.B. beim Einbau der HMVA unter Dränmatte 2 und 3 ein niedrigerer Verdichtungsgrad erreicht als beim Einbau der HMVA unter Dränmatte 1. Der Verdichtungsgrad hat wiederum großen Einfluss auf die Durchlässigkeit und die Saugspannung. Aufgrund der sehr zeitaufwendigen Versuche konnten leider nicht alle Dränmatten an allen Materialien getestet werden.

Um die Sensitivität der Versuchsergebnisse gegenüber der Regenmenge zu untersuchen, wurde mit den Materialien RC und SKA Versuche mit 35 % der ursprünglichen Regenmenge durchgeführt. Bild 6-9 zeigt einen Vergleich der Sickerwassermenge der Bauweisen RC und SKA ohne TSM mit der ursprünglich Wassermenge und der reduzierten Wassermenge aus der Sensitivitätsanalyse. Um die Kurven direkt miteinander vergleichen zu können, wurden die gemessenen Sickerwassermengen der Sensitivitätsanalyse wieder um 35 % hochgerechnet. Das heißt, dass die Sickerwassermengen so erhöht wurden, als ob die Originalregenmenge verregnet worden wäre. Trotzdem liegen die Kurven der Sensitivitätsanalyse deutlich unter denen der ursprünglichen Versuchsreihen. Es fällt besonders deutlich auf, dass gerade im 1. Umlauf kaum Sickerwasser anfällt. Erst nach den 72h-Regen kommt es zum nennenswerten Sickerwasserabfluss. Für die Sensitivitätsanalyse wurden die Lysimeterfüllungen nicht neu eingebaut, sondern standen längere Zeit in den Lysimetern, so dass davon ausgegangen werden kann, dass der Anfangswassergehalt der eingebauten Materialien zu Beginn der Sensitivitätsanalyse niedriger war als bei den ursprünglichen Versuchen. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass Sickerwasser erst fließt, wenn es zu einer gewissen Sättigung der Böschung gekommen ist. Die geringen Regenmengen zu Beginn der Umläufe werden fast ausschließlich von der Böschung aufgenommen und über Verdunstung langsam wieder abgegeben. Erst nach längerer, intensiverer Beregnung kommt es zum Sickerwasserabfluss. Mit dem ursprünglichen Regenregime wurden die Sickerwassermengen tendenziell zu hoch eingeschätzt, so dass die Ergebnisse auf der sicheren Seite liegen. Das Ergebnis zeigt aber auch, wie wichtig bei der Betrachtung des Wasserhaushaltes von Straßenböschungen die

Berücksichtigung von Trockentagen ist, da diese einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Sickerwassermenge haben.

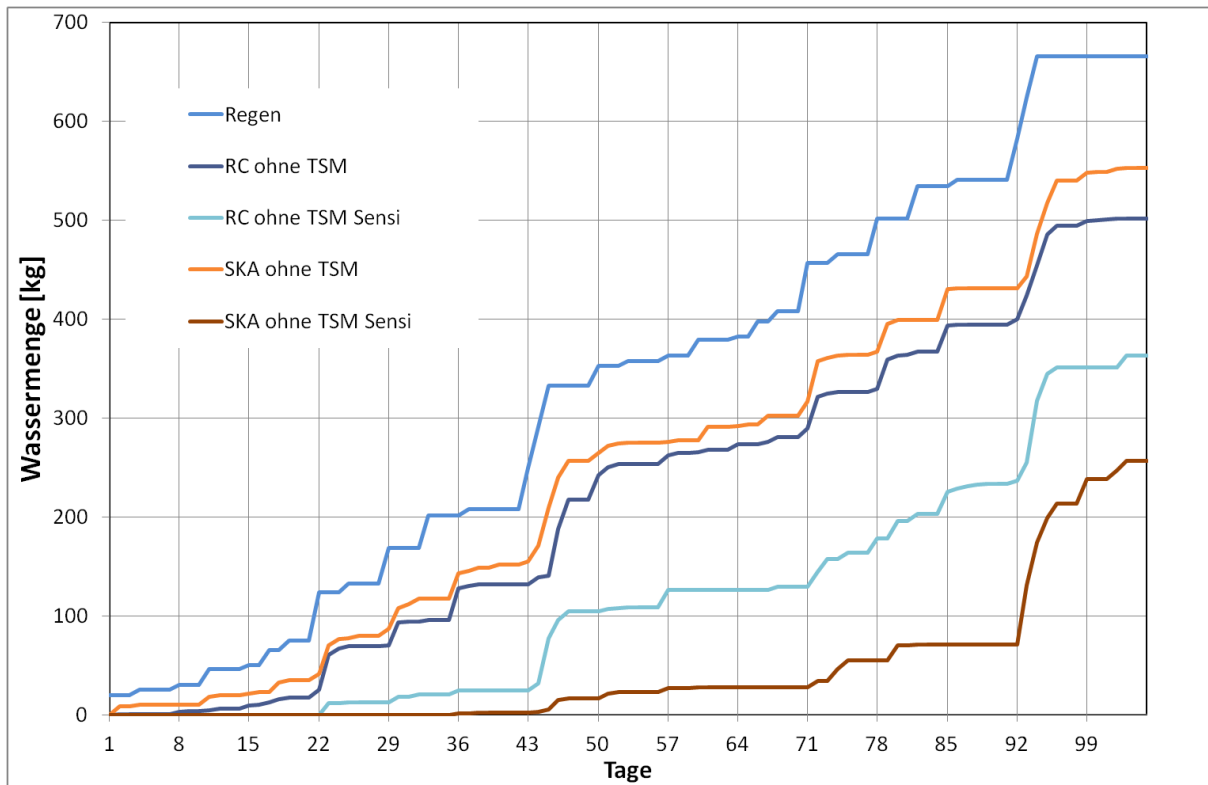


Bild 6-9: Vergleich der Sickerwassermengen aus der Sensitivitätsanalyse für RC und SKA ohne TSM (hochgerechnet)

Das Sickerwasser wird über insgesamt 18 Saugplatten gewonnen (siehe Bild 3-3). Dies erlaubt eine detaillierte Betrachtung der Sickerwasserverteilung. Da bei den Materialien ein Teil des Sickerwassers im Boden gespeichert ist, ist eine eindeutige Zuordnung der Sickerwassermengen zum jeweiligen Regenereignis nicht möglich. Um sie trotzdem vergleichen zu können erfolgte eine Abgrenzung der Sickerwassermengen zum immer gleichen Stichtag in einem Regenregime vor Start des nächsten Regenereignisses. Eine Darstellung der Sickerwasserverteilung für alle Versuchsreihen befindet sich im Anhang in den Tabellen Tab.-A 8 für HMVA, Tab.-A 9 für RC und Tab.-A 10 für GRS und SKA.

Exemplarisch werden hier die Verteilungen für die Versuchsreihen HMVA ohne TSM jeweils getrennt nach erstem (Bild 6-10) und zweitem (Bild 6-11) Umlauf des Regenregimes wiedergegeben. Die Regenereignisse, angegeben als Regenmenge pro Zeiteinheit werden in der Reihenfolge ihrer Durchführung dargestellt.

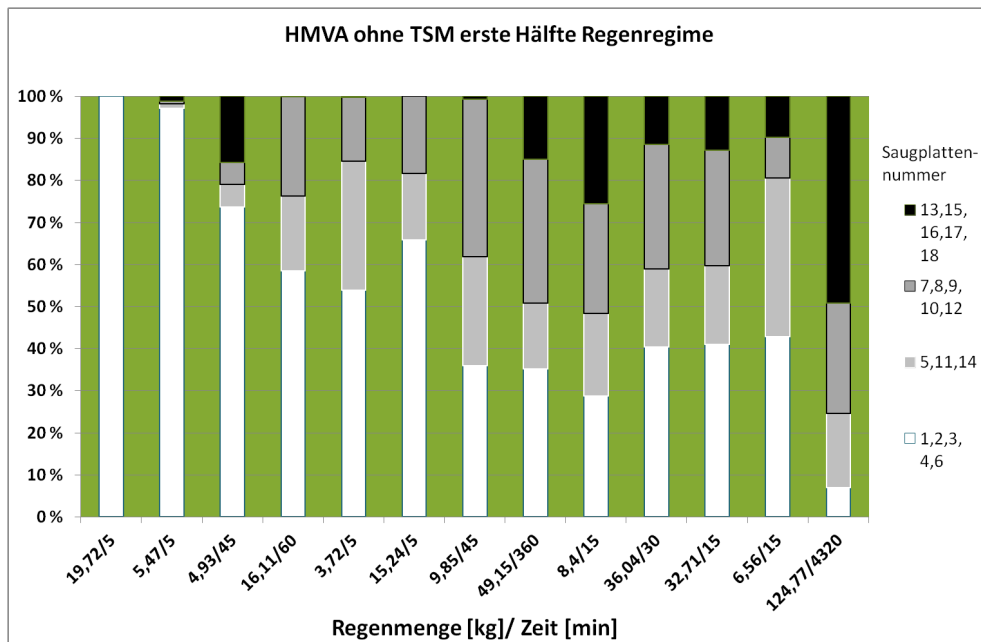


Bild 6-10: Prozentuale Verteilung des Sickerwassers für HMVA 1. Umlauf ohne TSM

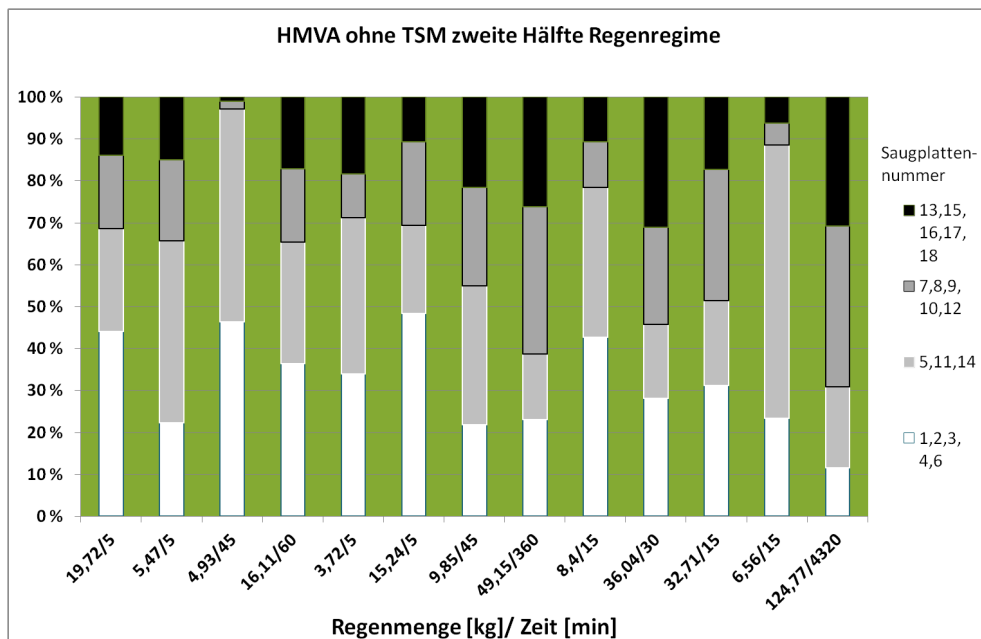


Bild 6-11: Prozentuale Verteilung des Sickerwassers für HMVA 2. Umlauf ohne TSM

Bei dem Versuch mit HMVA ohne TSM sind deutliche Unterschiede zwischen dem ersten und dem zweiten Regenregime in den Bildern zu sehen. Während beim ersten Durchgang die Saugplatten im Bereich des Böschungsfusses (Nr. 1, 2, 3, 4, 6) die größeren Anteile an Sickerwasser abführen, wird diese Tendenz im Laufe der Untersuchungen immer geringer. Beim zweiten Regenregime wird aus allen Saugplatten relativ gleichmäßig Sickerwasser abgeführt.

Für alle Versuchsreihen gilt, dass das meiste Wasser über die vorderen Saugplatten gesammelt wird, der Effekt ist umso stärker, je weniger Sickerwasser anfällt. Er tritt besonders zu Beginn des ersten Regenregimes auf. Bei ausreichend Wassereintrag, insbesondere nach dem 72h-Regen, ist der Baustoffkörper gleichmäßig durchfeuchtet. Danach kann die Durchsickerung gleichmäßig durch den gesamten Baustoffkörper stattfinden.

6.2 Vergleich der Mengen an Oberflächenabfluss

Die Mengen an Sickerwasser sind für den Vergleich der unterschiedlichen technischen Sicherungsmaßnahmen interessant, da sie direkt den Austrag an umweltrelevanten Stoffen aus der Böschung beeinflussen. Allerdings lassen sich die Mengen an angefallenem Sickerwasser nicht klar den einzelnen Regenereignissen zuordnen, da das Sickerwasser zu Teilen im Material zwischengespeichert ist.

Im Gegensatz hierzu fällt Oberflächenwasser nur dann an, wenn ein Regenereignis stattfindet. Daher sind die Mengen gut abgrenzbar und werden im Folgenden betrachtet. Dabei soll untersucht werden, ob die Regendauer, die Regenmenge oder die daraus resultierenden Niederschlagsspenden einen Einfluss auf die Menge des Oberflächenabflusses hat. Es wird vermutet, dass starke, kurze Regen mehr Oberflächenabfluss erzeugen als schwache, langandauernde Regen. Der prozentuale Anteil wurde berechnet, indem die Menge an gemessenen Oberflächenabfluss auf die Menge des jeweiligen Regens bezogen wurde. Es wurden beide Umläufe des Regenregimes getrennt voneinander betrachtet, um Einflüsse der Sättigung des Materials zu erkennen.

Das Ganze wird als Linie dargestellt, um den Verlauf besser zu erkennen, obwohl es sich eigentlich um Einzelwerte handelt. Bild 6-12 zeigt die Versuchsreihen mit Dränmatte, hier wurde insgesamt der meiste Oberflächenabfluss gemessen. Die Regenereignisse sind nach aufsteigender Regenmenge sortiert und als Regenmenge pro Zeiteinheit angegeben. Auf eine Darstellung der Versuchsreihen ohne TSM wird verzichtet, da aufgrund der insgesamt geringen Oberflächenabflüsse alle Werte um die 10 % herum liegen.

Obwohl die Werte insgesamt für die Versuchsreihen sehr unterschiedlich sind, kann man tendenziell erkennen, dass der Anteil des Oberflächenabflusses mit steigender Regenmenge zunimmt und das unabhängig von der Regendauer. Nur bei den sehr langen Regen (6h und 72h) nimmt der Anteil des Oberflächenabflusses bei einigen Materialien wieder ab.

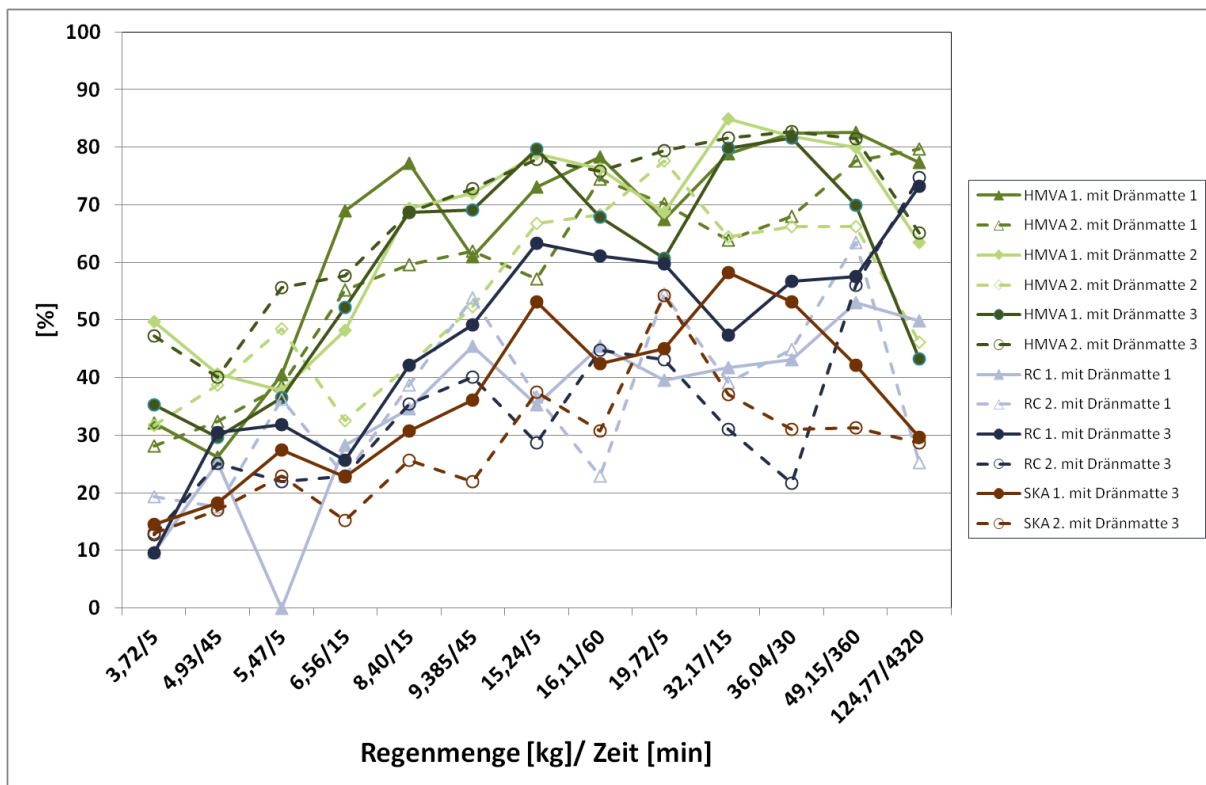


Bild 6-12: Prozentualer Anteil des Oberflächenabflusses an der Regenmenge für die Bauweisen mit Dränmatte

Um die Anteile der Oberflächenabflüsse unabhängig von der jeweiligen Menge miteinander vergleichen zu können, wurde der Anteil am Gesamtabfluss bestimmt. Dafür wurde getrennt für jeden Umlauf die Menge des Oberflächenabflusses prozentual zur Gesamtmenge des Oberflächenabflusses pro Umlauf angegeben. So ist es möglich, den Einfluss der Regenereignisse unabhängig vom Material zu beurteilen. Die Regenereignisse wurden nach aufsteigender Regenmenge sortiert. Bild 6-13 zeigt diesen Anteil am Gesamtabfluss für alle Versuchsreihen mit Dränmatte, die den meisten Oberflächenabfluss liefern. Dafür wurden in die Betrachtung auch die beiden Versuchsreihen der Böden mit Dränmatte 1 aus dem ersten Untersuchungsteil mit in die Betrachtung einbezogen. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass der Anteil am Gesamtabfluss mit der Regenmenge ansteigt, also der Einfluss der Regenmenge auf den Oberflächenabfluss dominiert. Bei den meisten Versuchsreihen hat die Frage, ob es sich um den ersten oder zweiten Umlauf des Regenregime handelt, keinen Einfluss auf den Anteil des Oberflächenabflusses.

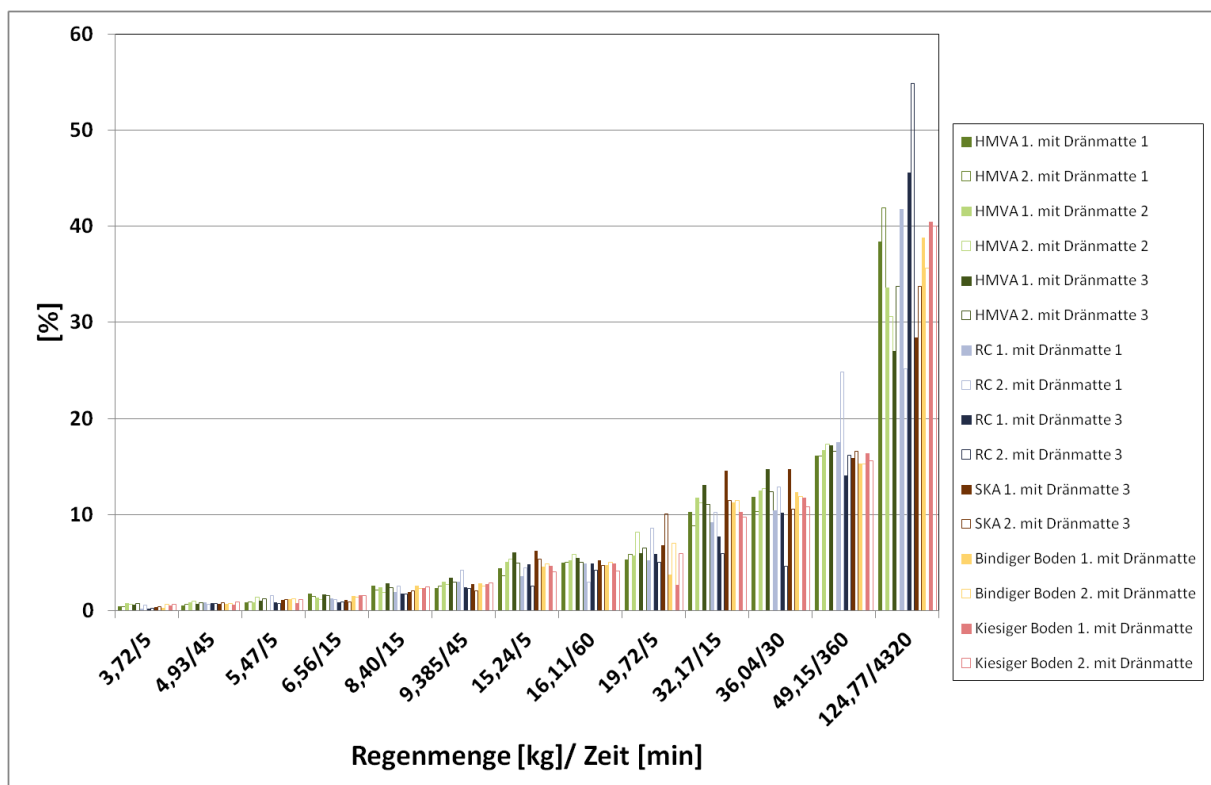


Bild 6-13: Prozentuale Anteil des Oberflächenabflusses am Gesamtabfluss für alle Bauweisen mit Dränmatte

6.3 Zusammenfassender Vergleich der Wassermengen

Die Wirksamkeit einer TSM kann nur im Vergleich mit anderen Bauweisen beurteilt werden. In diesem Abschnitt werden daher die Gesamtmengen und die Veränderungen der Wassermenge durch die TSM für die unterschiedlichen Versuchsreihen verglichen. Dabei werden die Ergebnisse des bindigen und kiesigen Bodens aus dem ersten Untersuchungsteil mit einbezogen.

Bild 6-14 zeigt die prozentualen Anteile von Oberflächenabfluss und Sickerwasser für alle Versuchsreihen dieses Untersuchungsteils. Aus der Differenz der gemessenen Mengen von Sickerwasser und Oberflächenabfluss zu der aufgetragenen Regenmenge errechnet sich die Verdunstung. Diese setzt sich zusammen aus der Transpiration des Rollrasens und Verdunstungsverlusten beim Beregnen und im Schlauchsystem des Lysimeters. Nicht erfasst werden können die Wassermengen, die während des Versuches im Lysimeter verbleiben. Diese werden in den Diagrammen „Gewicht des Lysimeters“ z.B. Bild 5-2 betrachtet. Die Verdunstung liegt für die Versuche

zwischen 12 und 19 %. In Deutschland liegt die mittlere Verdunstungshöhe bei 532 mm/a (Hydrologischer Atlas von Deutschland (BMUNR, 2003)). Bezogen auf einen mittleren Jahresniederschlag von 782 mm/a wäre das eine Verdunstungsrate von 68%. Die niedrigen Verdunstungsrate bei den Versuchsreihen lassen sich durch die relativ konstanten Laborbedingungen erklären. Die Raumtemperatur liegt bei ca. $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}$, das Lysimeter ist keiner direkten Sonnenstrahlung ausgesetzt und die längste Trockenperiode während der Beregnung dauert 6 Tage. Bei den langandauernden Regen, die zudem geringe Regenspenden aufweisen, wurde ein Verdunstungsschutz eingesetzt. Hierdurch sollte weitestgehend sichergestellt werden, dass die verregnete Menge auch auf der Böschung ankommt. Die beiden Versuchsreihen der Sensitivitätsanalyse bei denen die Regenmenge reduziert wurde, haben mit 38,5 % und 60,3 % deutlich höhere Verdunstungen. Das lässt sich vor allem dadurch erklären, dass viel Wasser im Lysimeter verbleibt und weder als Oberflächenabfluss noch als Sickerwasser gemessen werden kann.

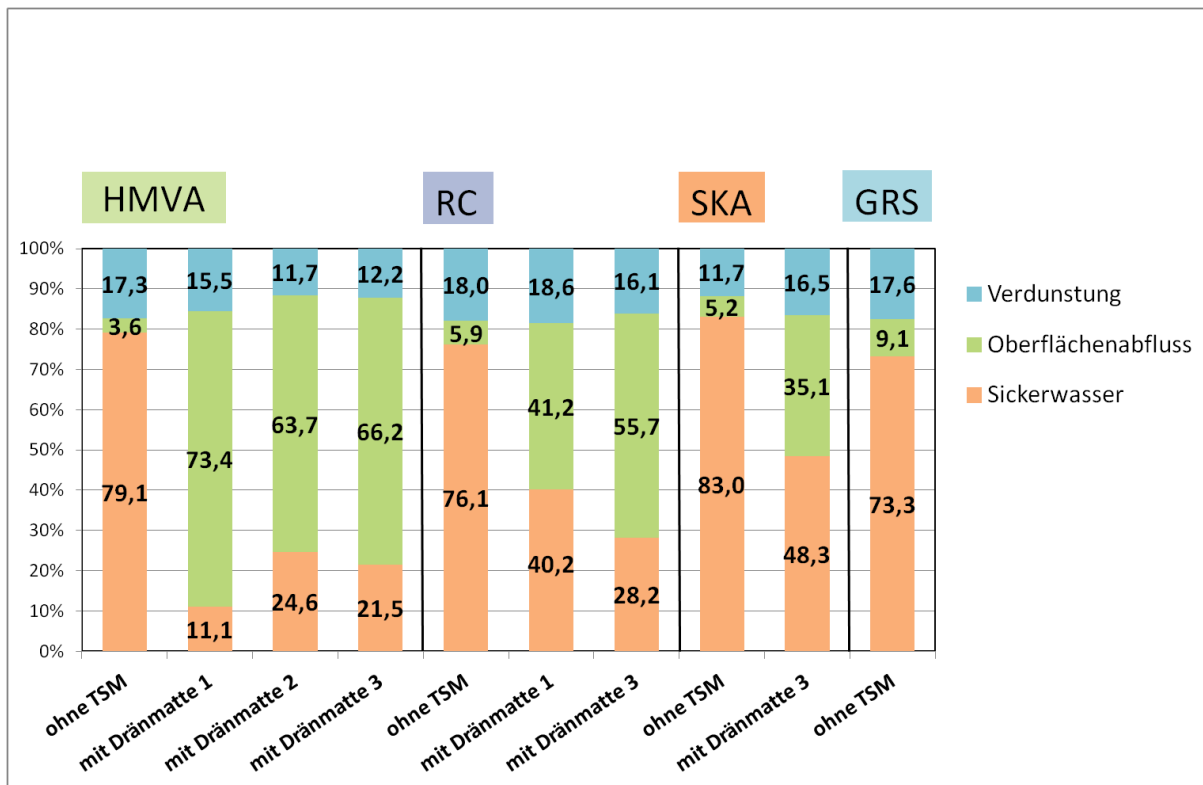


Bild 6-14: Prozentualer Vergleich von Oberflächen und Sickerwasser von allen Versuchsreihen

Ziel des Projektes ist es, die Wirksamkeit der TSM zu beurteilen. Dafür wurde mit allen Materialien je eine Versuchsreihe ohne TSM durchgeführt. Das Maß der Reduzierung des Sickerwassers durch die TSM kann dann als Maß für deren Wirksamkeit betrachtet werden.

Auf Bild 6-15 ist dargestellt, um wie viel Prozent sich die Sickerwassermenge durch die jeweilige Dränmatte prozentual geändert hat. Die Sickerwassermenge der Versuchsreihe ohne TSM wurde dabei zu 100% gesetzt. Für GRS wurde keine Vergleichsuntersuchung mit Dränmatte durchgeführt.

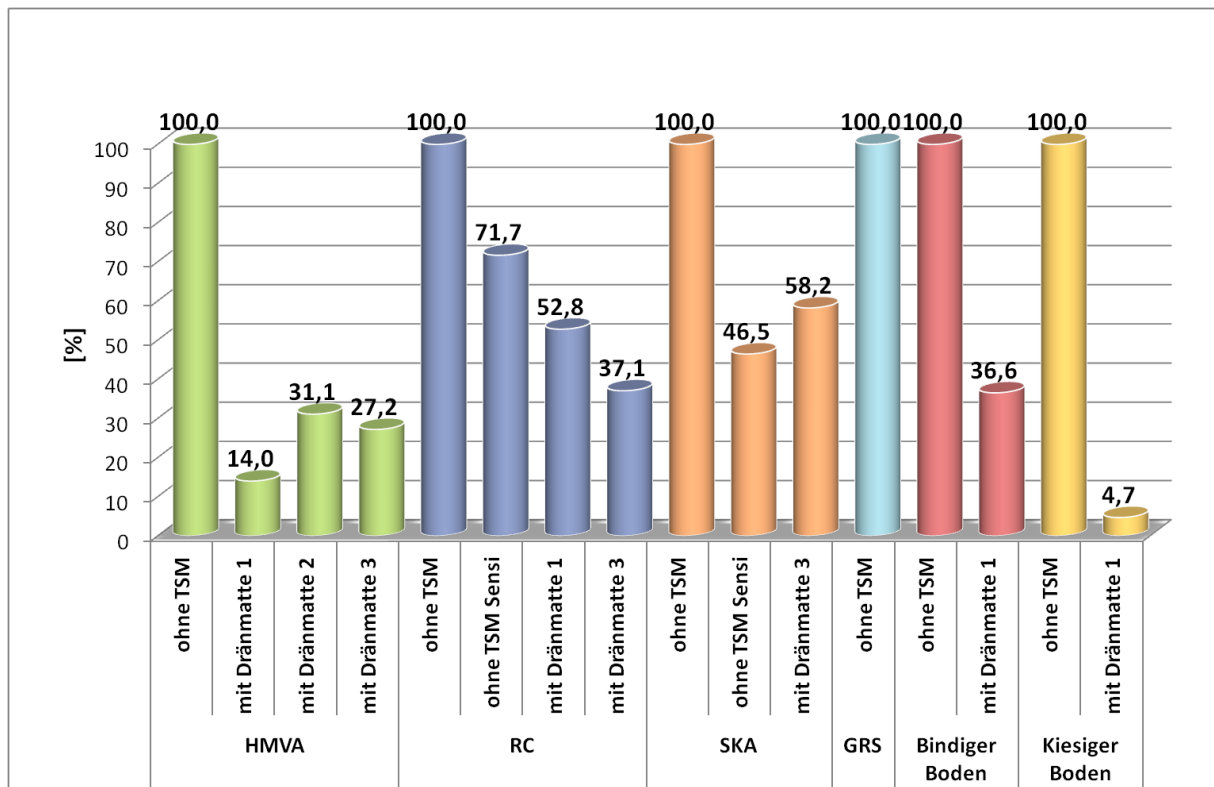


Bild 6-15: Reduzierung der Sickerwassermenge in Prozent

Als wesentliche Erkenntnisse sind dem Bild 6-15 zu entnehmen, dass die Reduzierung der Sickerwassermenge bei gleichen Dränmatten für verschiedene Materialien sehr unterschiedlich sein kann. Beim kiesigen Boden wird durch die Dränmatte 1 das Sickerwasser um 95% reduziert, während bei RC nur eine Reduktion um 50% gemessen wird.

Um die Wirksamkeit der Dränmatten besser vergleichen zu können, werden in Bild 6-16 die Wassermengen in kg aller Versuchsreihen miteinander verglichen. Die Versuchsreihen wurden dafür nach abfallender Sickerwassermenge sortiert. Bei zwei Versuchsreihen wurden etwas mehr Wasser verregnet als bei den übrigen Versuchsreihen. Bei den beiden Versuchsreihen der Sensitivitätsanalyse wurden die gemessenen Wassermengen hochgerechnet, um diese direkt vergleichen zu können. Bei den Versuchsreihen ohne TSM wurde jeweils sehr viel Sickerwasser gemessen. Die Unterschiede hängen allein vom verwendeten Material ab und sind nicht sehr ausgeprägt. Etwas aus der Systematik heraus fällt die Versuchsreihe bindiger Boden ohne TSM, hier wird nur etwa halb so viel Sickerwasser gemessen und teilweise weniger als bei Versuchsreihen mit Dränmatte, was an der geringen Durchlässigkeit dieses Materials liegt. Auch bei den beiden Versuchsreihen der Sensitivitätsanalyse wurde im Verhältnis zu den Versuchsreihen mit regulärer Beregnung deutlich weniger Sickerwasser gemessen. Hier fällt auch auf, dass der Verdunstungsanteil von allen Versuchsreihen am höchsten ist.

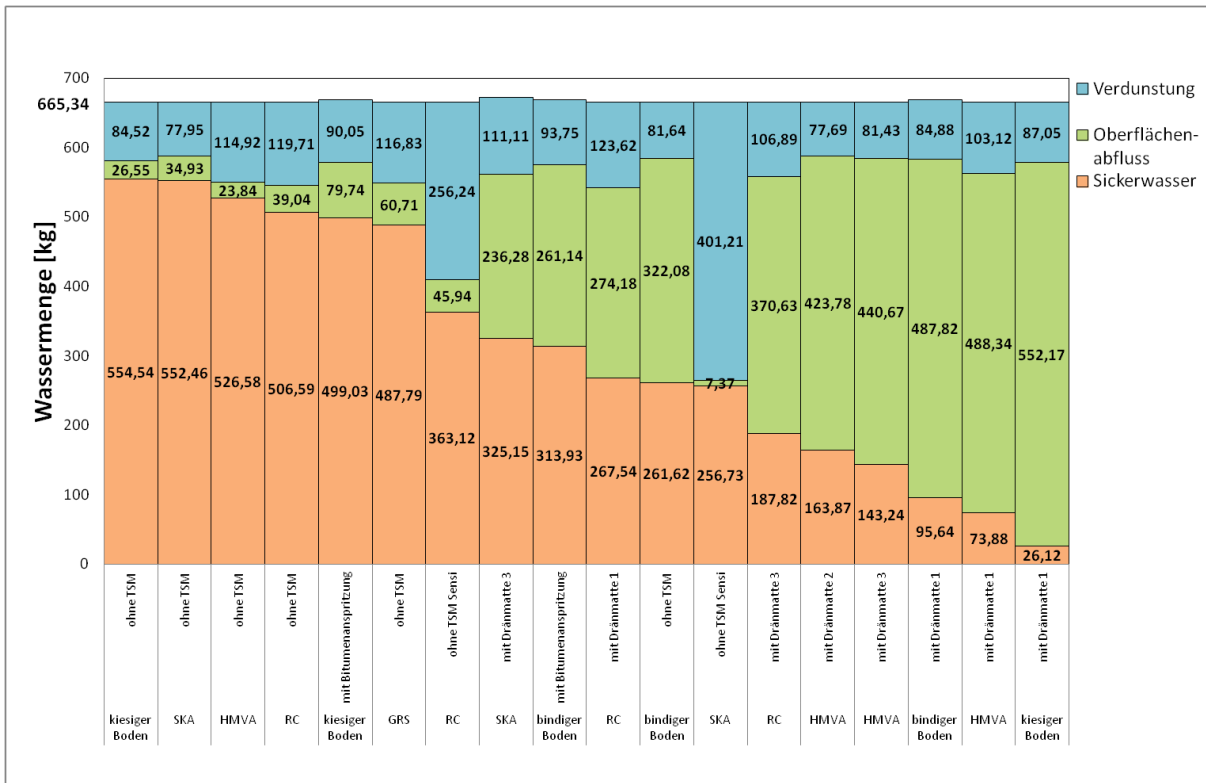


Bild 6-16: Vergleich der Wassermengen für alle Versuchsreihen

Auf den ersten drei Plätzen mit am wenigsten Sickerwasser, also die wirkungsvollsten Bauweisen, sind Versuchsreihen mit Dränmatte 1. Die Dränmatte 1 erreicht bei den für die Dränung wichtigen Prüfgrößen (s. Kapitel 4.4) Wasserdurchflussrate und Wasserableitvermögen die jeweils höchsten Werte, gefolgt von Dränmatte 3. So konnte bei HMVA mit Dränmatte 1 nur etwa die Hälfte des Sickerwasser gemessen werden wie bei den Versuchsreihen mit Dränmatte 2 und 3. Es lässt sich aber nicht generell sagen, dass Dränmatte 1 am wirkungsvollsten ist, da bei den Versuchsreihen mit RC mit Dränmatte 1 etwa ein Drittel mehr Sickerwasser gemessen wurde als bei der Versuchsreihe RC mit Dränmatte 3. Hier kommt es zu einer Überlagerung der Materialeigenschaften mit den hydraulischen Eigenschaften der Dränmatten. Für eine wirkungsvolle Reduzierung der Sickerwassermenge muss also die Bauweise mit dem Material und dem Einbau abgestimmt werden.

6.4 Umweltrelevante Inhaltsstoffe

Die gemessenen Einzelkonzentrationen aller Inhaltsstoffe befinden sich im Anhang (Tab.-A 11 Tab.-A 18). Dabei zeigt die rote Grenzlinie im Diagramm den Prüfwert nach (BBodSchV, 2012) und die gelbe Grenzlinie die Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS-Werte) nach (LAWA, 2004). Die Zahlenwerte dazu finden sich in Tab. 4-4. Aufgrund der Vergleichbarkeit mit dem ersten Berichtsteil (KELLERMANN-KINNER, et al., 2016) sind die Werte nicht den vorübergehenden aktuellen Entwicklungen angepasst worden. Sind beide Zahlenwerte gleich, wird nur die rote Linie dargestellt. Wenn nur die gelbe Linie dargestellt ist, sind keine Prüfwerte festgelegt. Die Gesamtfrachten aller Inhaltsstoffe sind in Tab.-A 19 im Anhang aufgeführt.

Anders als bei der Untersuchungsserie mit Boden, bei denen Schadstoffe zur besseren Nachverfolgbarkeit bewusst zudotiert wurden, handelt es sich hier um handelsübliche Materialien, die die Einbauklasse 1 oder 2 erreichen. Vergleichenden Aussagen sind schwierig, da bei allen Materialien andere Stoffe hervortreten oder die erreichten Werte zwischen Sickerwasser und Eluat nicht korrespondieren. Stellvertretend für alle untersuchten Stoffe wird im Folgenden grundsätzliches Verhalten beschrieben.

Das Bild 6-17 zeigt die im Sickerwasser gemessenen Konzentrationen von Molybdän für HMVA und die unterschiedlichen Bauweisen. Jede Versuchsreihe hat unterschiedlich viele Messpunkte je nach Anfall des Sickerwassers. So konnte bei den Bauweisen mit Dränmatte 1 und 3 erst im zweiten Versuchsumlauf Sickerwasser in der Glasflasche für die chemische Analyse aufgefangen werden. Die meisten Messpunkte hat erwartungsgemäß die Versuchsreihe ohne TSM. Die gemessenen Werte für Molybdän liegen fast alle über den Prüfwerten (BBodSchV, 2012). Sie steigen bei der Bauweise ohne TSM zunächst an und verbleiben dann auf hohem Niveau. Der Materialwert von HMVA in Tab. 5-5 hätte das Material in den meisten Fällen der Materialklasse 2 zugeordnet.

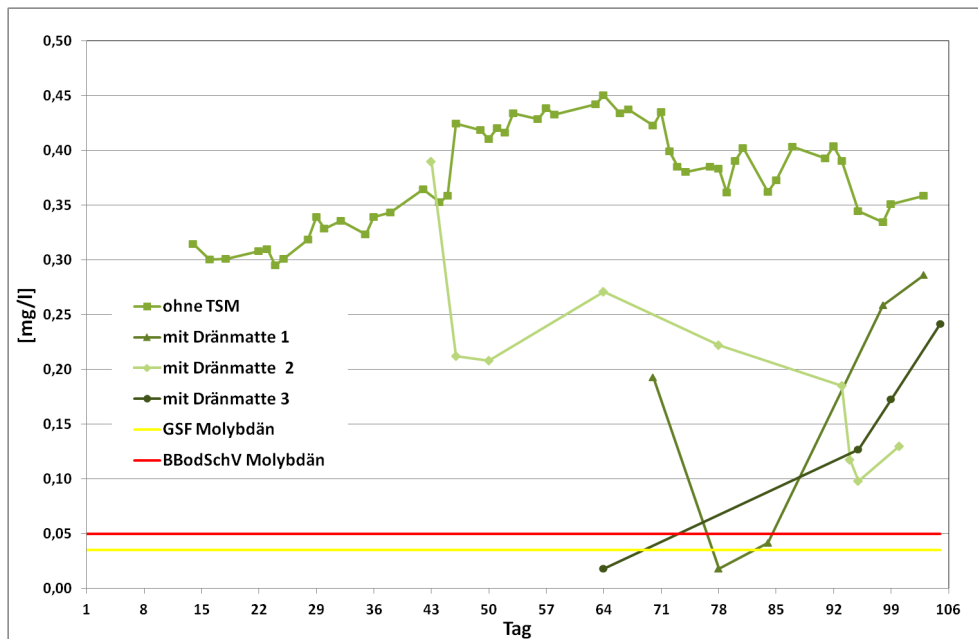


Bild 6-17: Molybdän Konzentration im Sickerwasser bei HMVA

Im Bild 6-18 werden die Schadstofffrachten betrachtet. Dafür werden jeweils die Konzentrationen mit den bis zu Analysezeitpunkt gemessenen Gesamtsickerwassermengen multipliziert und aufsummiert.

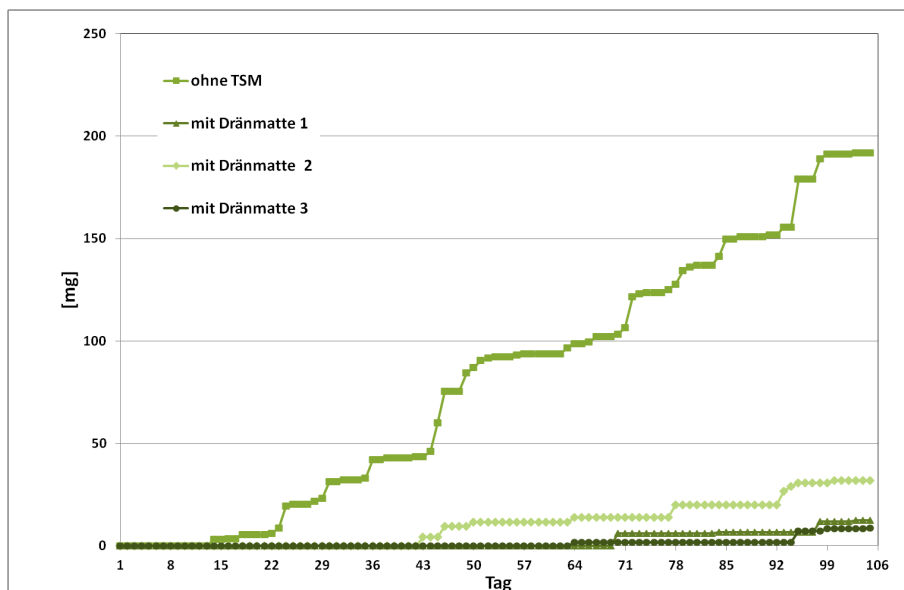


Bild 6-18: Summenkurven Molybdän in HMVA

Die Kurve der Bauweise ohne TSM steigt stetig steil an. Da die Konzentration im Sickerwasser nicht geringer wird, nähert sich der Kurvenverlauf keinem Grenzwert. Der ansteigende Kurvenverlauf deutet daraufhin, dass die Auslaugung von Molybdän noch nicht beendet ist. Die Konzentrationen bleiben gleich, daher spiegelt die Kurve den Verlauf der Sickerwasserkurve wider, da die Sickerwassermenge der entscheidende Faktor ist. Die Kurven für die Bauweisen mit Dränmatte verlaufen wesentlich flacher. Das liegt zum einen an der niedrigeren Konzentration, zum anderen an der wesentlich geringeren Sickerwassermenge.

Bild 6-19 zeigt die Auslaugung von Chlorid für HMVA. Die Konzentrationsverläufe im Sickerwasser zeigen ein deutlich anderes Verhalten als für Molybdän. Für die Bauweise ohne TSM ist ein deutlicher Abfall der Konzentration bis auf die GSF-Werte zu erkennen. Dieser Abfall der Konzentration ist nach dem 72h-Regen am Tag 49 besonders steil. Die Bauweise mit Dränmatte 2 zeigt ein ähnliches Verhalten, allerdings aufgrund der geringeren Wassermenge nicht so ausgeprägt. Bei den Bauweisen mit Dränmatte 1 und 3 ist eine Interpretation aufgrund der geringen Wassermenge und der wenigen Messwerte schwierig. So wurde das Sickerwasser über einen längeren Zeitraum gesammelt, bis genug für eine Analyse vorhanden war, was auch Einfluss auf die Auswertung haben kann. Anhand der Chloridwerte in Eluat nach Tab. 5-5 wäre das Material in die Klasse 1 eingeteilt worden.

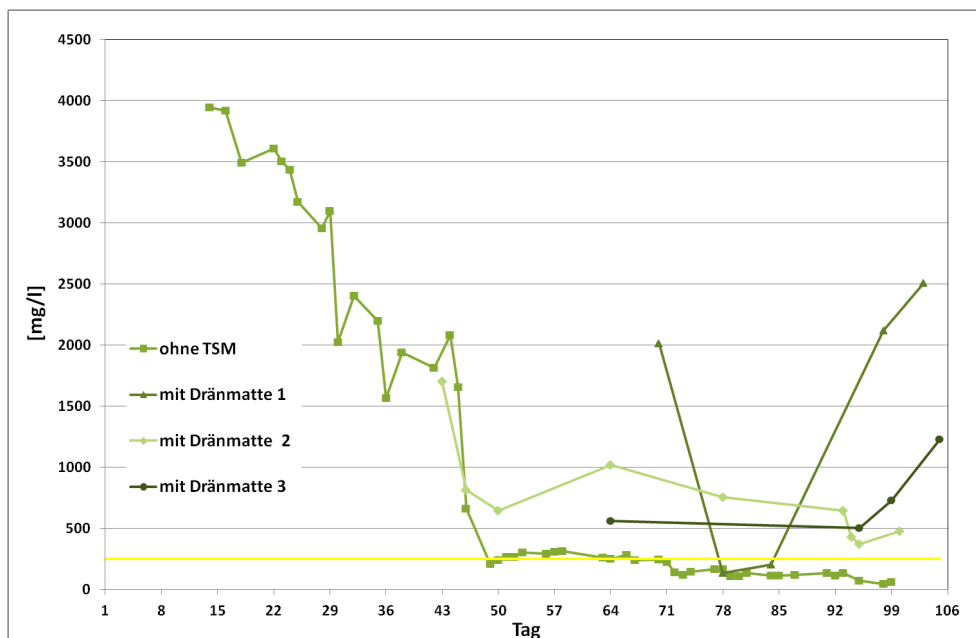


Bild 6-19: Chloridkonzentration im Sickerwasser bei HMVA

Bei der Betrachtung der Frachten in Bild 6-20 ist zu sehen, dass der Austrag von Chlorid für die Bauweise mit Dränmatten geringer bleibt. Dies liegt hauptsächlich daran, dass bei diesen Bauweisen wenig Sickerwasser anfällt. Die Konzentration bei der Bauweise HMVA ohne TSM fallen deutlich zurück. Dies wird auch in der Summenkurve deutlich, die sich für diese Bauweise asymptotisch einem Endwert nähert.

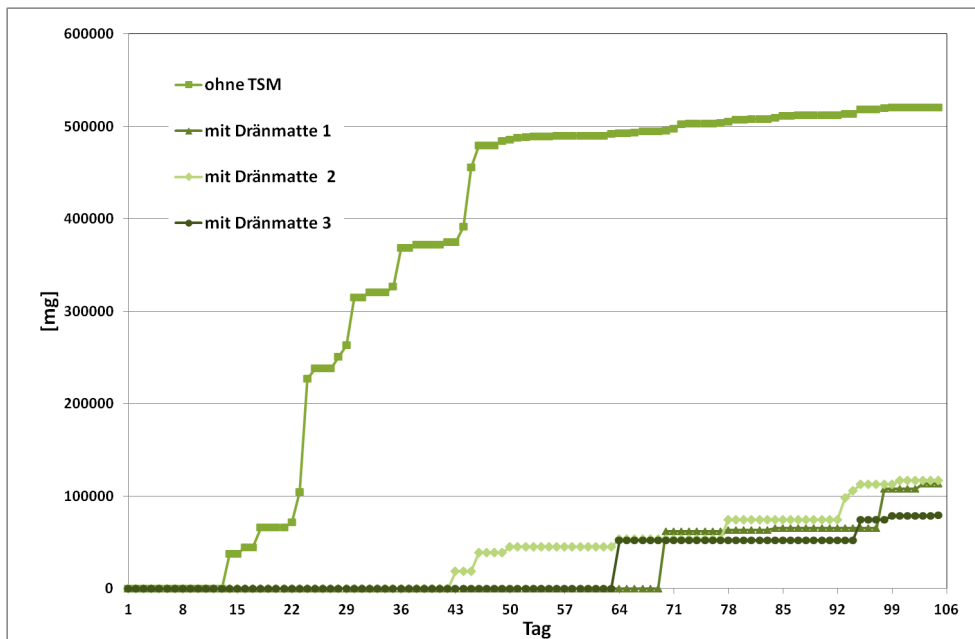


Bild 6-20: Summenkurven Chlorid in HMVA

Um eine Aussage über das langfristige Auslaugverhalten der verschiedenen Stoffe zu bekommen, muss man das Wasser/Feststoffverhältnis (W/F) in die Auswertung mit einbeziehen, dies entspricht der Sickerwassermenge bezogen auf die Menge des eingebauten Materials. Aufgrund des Versuchsaufbaus und den beinhalteten Regenereignissen werden bis zum Versuchsende nur sehr kleine W/F erreicht. Eine gesonderte Auswertung bringt nur eine zusätzliche Aussage, wenn der Stoff eine Abhängigkeit vom W/F zeigt, spricht wenn eine Abnahme der Konzentration mit der Versuchsdauer auszumachen ist. Noch andauernde Auslaugungen sind besser in den Konzentrations- und Summendiagrammen zu erkennen. Zusätzlich müssen die Eluatwerte und die Sickerwasserwerte in einem ähnlichen Größenbereich liegen. Daher macht die Betrachtung über den W/F Wert nur bei ausgewählten Versuchsreihen Sinn.

Das Bild 6-21 zeigt die Chloridkonzentration im Sickerwasser für HMVA aufgetragen über das W/F der verschiedenen Bauweisen und für die Säulenversuche. Hier kann man sehr gut erkennen, dass die Konzentration mit zunehmenden W/F Verhältnis stark abnehmen. Die Werte der Säulenversuche mit ihren unterschiedlichen Wasserfeststoffverhältnisse muten zunächst als sehr gering an, passen sich aber sehr gut in die verlängerte Linie der Abnahme der Sickerwasserkonzentrationen. Der Säulenversuch mit einem W/F Wert von 4 ist nicht mehr im Diagramm dargestellt.

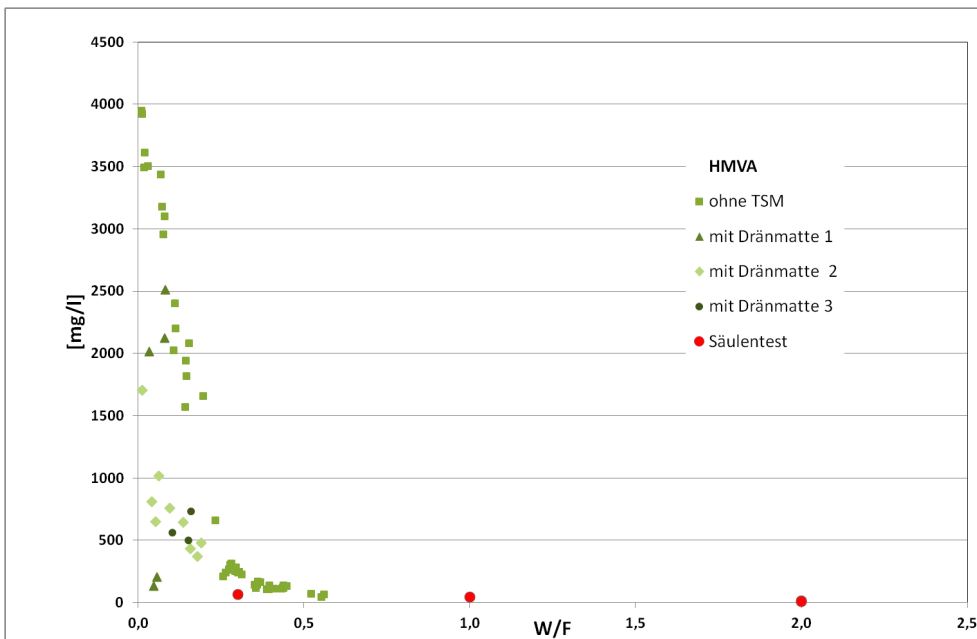


Bild 6-21: Chloridkonzentration von HMVA nach W/F

Eine ähnliche Abnahme der Chloridkonzentrationen zeigt auch das Material RC. In Bild 6-22 sind vergleichend die Chloridkonzentrationen von RC und HMVA dargestellt. Zur besseren Erkennbarkeit der Werte, wurde die Y-Achse auf 800 mg/l begrenzt. Auch hier erkennt man einen deutlichen Abfall der Konzentrationen, wobei die Chloridkonzentration bei RC insgesamt geringer sind als bei HMVA. Die Werte der Säulenversuche passen sich gut in die Verlängerungen der Konzentrationsabnahmen ein und charakterisieren so gut den Endzustand.

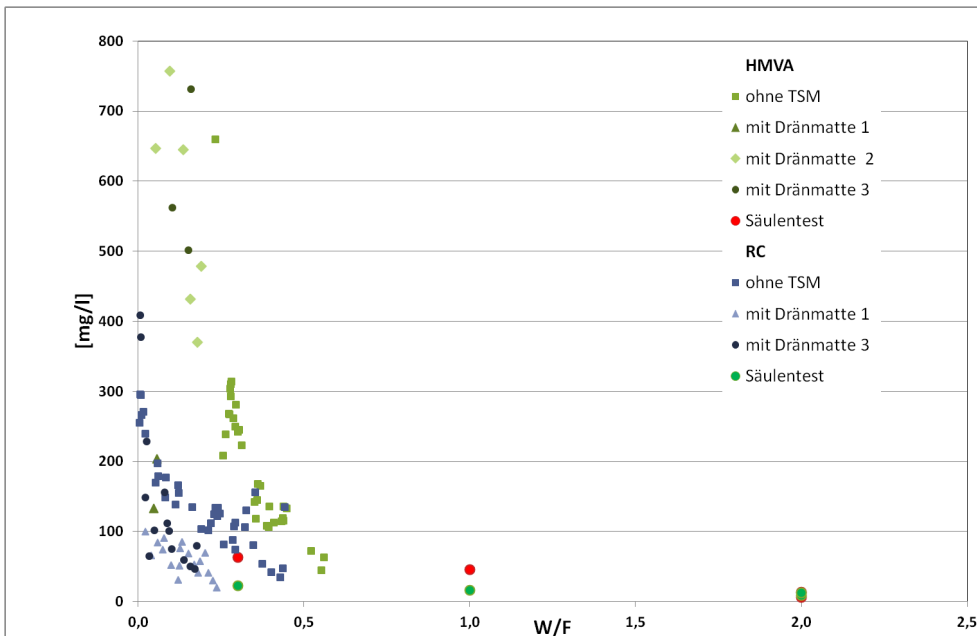


Bild 6-22: Chloridkonzentration von HMVA und RC nach W/F

Kupfer wird für HMVA und RC zusammen ausgewertet, da es in derselben Größenordnung ausgetragen wird und häufig die Prüfwerte nach (BBodSchV, 2012) überschreitet.

Die in Bild 6-23 dargestellte Konzentration von Kupfer im Sickerwasser fällt bei den Bauweisen mit ausreichend Sickerwasser zunächst ab und pendelt sich dann auf Höhe der Prüfwerte ein. Die Konzentrationen von Kupfer im Sickerwasser von RC sind dabei höher als bei HMVA.

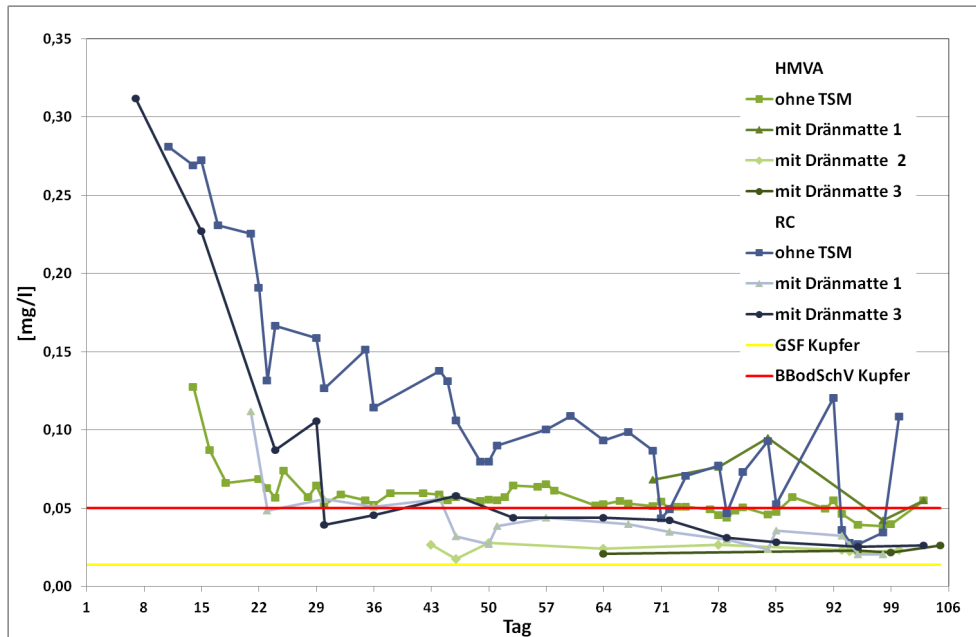


Bild 6-23: Kupferkonzentration im Sickerwasser für HMVA und RC

Dieses Verhalten wird auch gut in Bild 6-24 wiedergegeben, das die Summe der Frachten zeigt. Die Kurven steigen stark an und ein Endwert ist nicht zu erkennen.

Aufgrund der geringeren Wassermengen liegen die Summenkurven der Bauweisen mit Dränmatten deutlich unter denen der Bauweisen ohne TSM. Diese Kurven sind je Material fast deckungsgleich. Die Kurven für RC liegen über denen derselben Bauweise von HMVA. Das liegt vor allen an den höheren Anfangskonzentrationen.

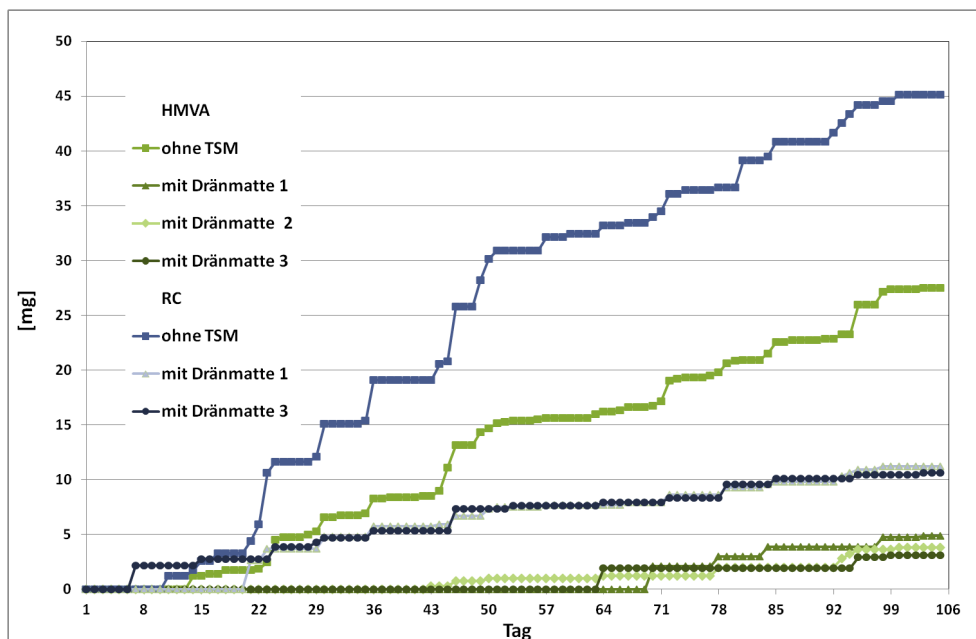


Bild 6-24: Summenkurven Kupfer für HMVA und RC

Der Konzentrationsverlauf beim Kupfer nach W/F wird in Bild 6-25 dargestellt. Zwar weisen die Säulenversuche nicht die hohen Anfangskonzentrationen wie das Sickerwasser auf, aber die Werte stimmen gut mit den Endwerten der Sickerwasserkonzentration überein. Bei dem W/F von 2 gibt es je zwei Säulenversuche, einmal aus dem ausführlichen Säulentest und aus dem Säulenkurztest.

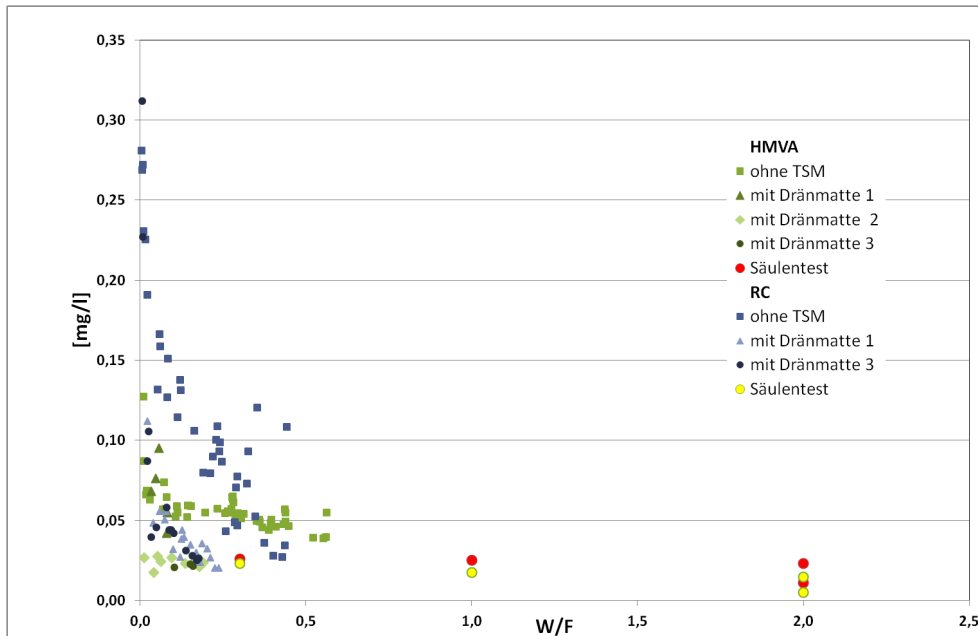


Bild 6-25: Kupferkonzentration für HMVA und RC nach W/F

Der Austrag der Frachten wird von zwei Faktoren beeinflusst, der Sickerwassermenge und der Konzentration des Stoffes im Sickerwasser. In der Regel ist die Sickerwassermenge der entscheidende Faktor, wenn man davon ausgeht, dass beim selben Material die Konzentration im Sickerwasser ähnlich ist. Dies ist auch bei dem überwiegenden Materialien dieser Versuchsreihe so, in der Regel liegt die Summenkurve der Stofffrachten der Bauweise ohne TSM aufgrund der größten Wassermenge am höchsten.

Bei dieser Versuchsserie zeigen aber einige Stoffe ein atypisches Verhalten. Wie in Bild 6-26 erkennbar, weisen die Summenkurven für Fluorid der Bauweisen HMVA mit Dränmatte 2 und 3 deutlich Sprünge auf und liegen über der Kurve für die Bauweise HMVA ohne TSM.

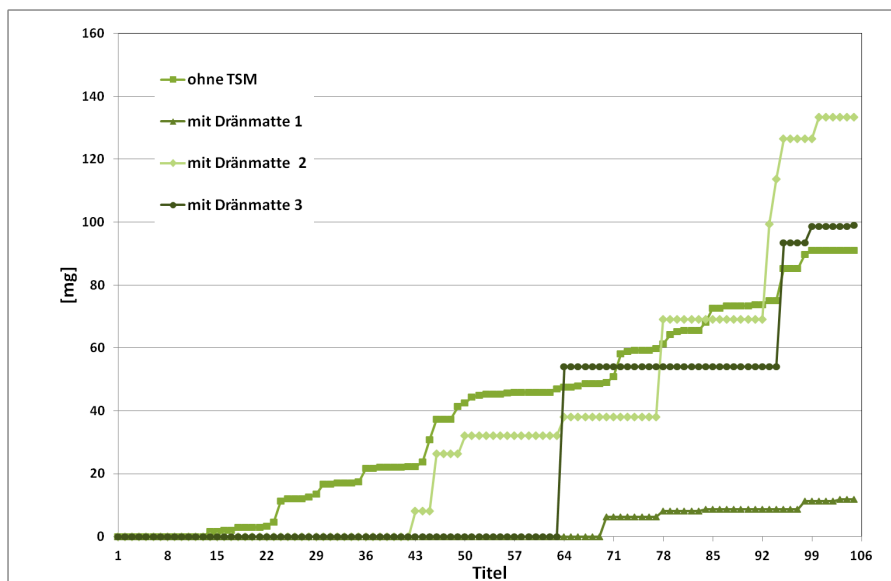


Bild 6-26: Summenkurven Fluorid für HMVA

Betrachtet man dazu die zugehörigen Konzentrationsverläufe in Bild 6-27, wird klar, dass in diesen Fall die Konzentrationen der Bauweise mit Dränmatte 2 und 3 um bis zu fünfmal höher sind als die der anderen Bauweisen. Man erkennt aber auch, dass für diese Bauweisen nur sehr wenige Messpunkte vorhanden sind, so dass das Sickerwasser teilweise sehr lange in der Sammelflasche gesammelt wurde, bevor es analysiert wurde. Dies könnte einen Einfluss auf die chemische Analyse haben. Zum andere wurden die Versuche nicht alle gleichzeitig durchgeführt, teilweise lagen anderthalb Jahre zwischen den Versuchsreihen in den das Material gelagert wurde. Außer bei Fluorid in HMVA kommt dieses Phänomen noch bei den Stoffen Vanadium und Sulfat in RC vor (siehe Tab.-A 14). Auch hier ließen sich im Sickerwasser für die Bauweise mit Dränmatte 3 deutlich höhere Konzentrationen nachweisen. Ein weiterer Erklärungsansatz ist, dass es sich bei den Materialien HMVA und RC im Gegensatz zu Boden um sehr inhomogene Materialien handelt, so dass die Verteilung der Inhaltsstoffe im gesamten Haufwerk unregelmäßig sein kann.

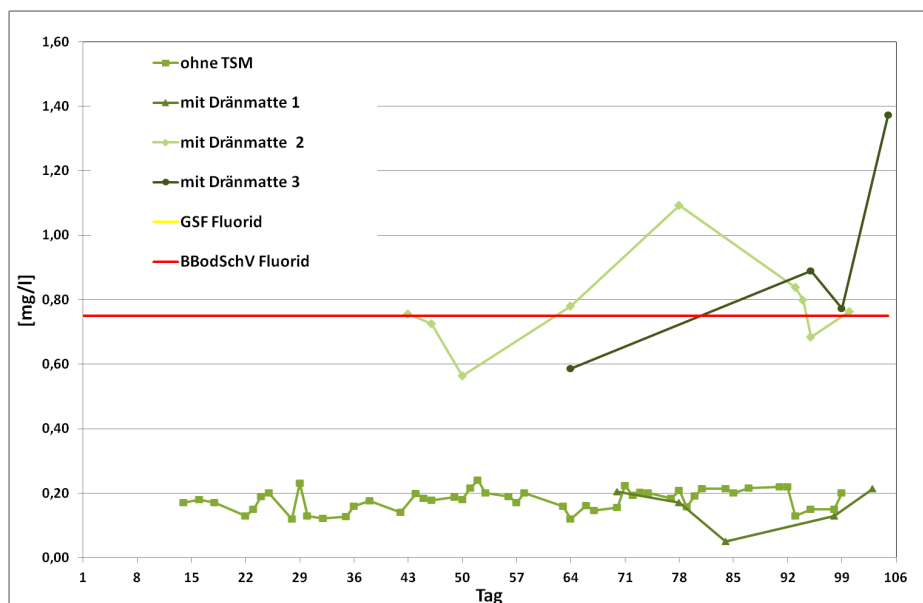


Bild 6-27: Fluoridkonzentration im Sickerwasser für HMVA

7 Bewertung und Diskussion

7.1 Analyse der Wassermengen

Ziel dieser Arbeit ist es, verlässliche Daten über das Durchsickerungsverhalten von Straßenböschungen zu erhalten. Dafür wird die Wirksamkeit von technischen Sicherungsmaßnahmen unter vergleichbaren, kontrollierten und zeitgerafften Bedingungen untersucht und bewertet.

An zwei eigens dafür konzipierten Lysimeteranlagen wurden unter Laborbedingungen zehn Versuchsreihen mit vier Materialien aus dem Bereich der industriellen Nebenprodukten und RC-Baustoffen und vier unterschiedlichen Bauweisen durchgeführt. Hinzu kommen sechs Versuchsreihen aus einer ersten Versuchsserie, in der zwei Bodenmaterialien mit drei Bauweisen geprüft wurden. Insgesamt konnten so in viereinhalb Jahren 16 Kombinationen geprüft werden. Dabei wurde die Menge des Regens und des Oberflächenabflusses erfasst. Die Menge des Sickerwassers wurde gemessen und dessen Inhaltstoffe analysiert. Abschließend wurde für die Materialien RC und SKA noch die Sensitivität der Versuchsergebnisse gegenüber der Regenmenge untersucht.

Da der Oberflächenabfluss direkt auf das vorangegangene Regenereignis bezogen werden kann, lassen sich durch die Auswertung Rückschlüsse auf das gewählte Regenregime machen. Obwohl die Werte für die Versuchsreihen sehr unterschiedlich sind, kann man tendenziell erkennen, dass der Anteil des Oberflächenabflusses mit steigender Regenmenge unabhängig von der Regendauer zunimmt. Nur bei den sehr langen Regen (6h und 72h) sinkt der Anteil des Oberflächenabflusses bei einigen Materialien wieder ab. Der Anteil des Oberflächenabflusses am Gesamtabfluss steigt deutlich mit der Regenmenge an. Bei den meisten Versuchsreihen hat die Frage, ob es sich um den ersten oder zweiten Umlauf des Regenregime handelt keinen Einfluss auf den Anteil des Oberflächenabflusses. Den größten Einfluss auf den Oberflächenabfluss hat also die Regenmenge. Hier hat sich die Annahme bestätigt, dass mit steigender Regenmenge der Anteil des Oberflächenabflusses steigt.

Insgesamt zeigt das Regenregime, dass die unterschiedlichen Regen unterschiedliche Charaktere haben und sich besonders die Regenmenge auf die Anteile des Oberflächenabflusses auswirken. Aufgrund der Versuche sollten in zukünftigen Simulationsrechnungen die unterschiedlichen Charaktere der Regen berücksichtigt werden. Keinesfalls darf von einem gleichmäßigen Dauerregen ohne Trocknungsphasen ausgegangen werden. Der Einfluss der Trockentag auf die Sickerwassermenge wurde auch sehr deutlich durch die Sensitivitätsanalyse gezeigt. Kleinere Regenereignisse wurden fast ausschließlich von der Böschung aufgenommen und über Verdunstung langsam wieder abgegeben. Zum Abfluss von Sickerwasser kommt es erst, wenn genügend Wasser in der Böschung ist.

Die berechnete Verdunstung während der Versuche mit Ausnahme der Sensitivitätsanalyse lag mit 12 bis 19 % deutlich unter der mittleren Verdunstungsrate in Deutschland mit 68 %. Dies könnte an den gleichbleibenden Laborbedingungen und den Verdunstungsschutzmaßnahmen bei längeren Regenereignissen liegen.

Das Sickerwasser wird in Form von Summenkurven dargestellt und steigt für alle Versuchsreihen stetig an. Nach den beiden langandauernden Regen (6h und 72h) im Regenregime ist jeweils ein deutlicher Sprung in der Sickerwasserkurve zu sehen. Eine Analyse der ersten und zweiten Umläufe des Regenregimes hat ergeben, dass bei den zweiten Umläufen immer mehr Sickerwasser anfällt. Die einzige Ausnahme bildet die Bauweise HMVA mit Dränmatte 3, hier fällt nach dem 72h-Regen des 1. Umlauf deutlich mehr Sickerwasser an als beim 2. Umlauf. Insgesamt tritt bei dieser Bauweise aber wenig Wasser auf. Durch die Auswertung der Sickerwassermengen wird deutlich, dass die Anlagen bei gleichen Verhältnissen ähnliche Sickerwasserkurven liefern. Eine nähere Untersuchung der Sickerwasserverteilung hat gezeigt, dass die vorderen Saugplatten das meiste Sickerwasser ableiten. Dieser Effekt zeigt sich besonders zu Beginn des Regenregimes und ist umso stärker, je weniger Sickerwasser vorhanden ist. Aus den Aufzeichnungen der Gewichtsänderungen des gesamten Lysimeterkastens ist ersichtlich, dass die Materialien das Wasser nur bis zu einem gewissen Maße aufnehmen können und sich das Gewicht an den Trockentagen schnell wieder auf einen bestimmten Wert einpendelt. Dies alles zeigt, dass es mit den Lysimeteranlage möglich ist vergleichbare, kontrollierte und zeitgerafften Untersuchungen durchzuführen.

Alle Materialien haben ähnliche Wasserdurchlässigkeiten im Bereich von 10^{-4} bis 10^{-6} m/s, was sich auch darin zeigt, dass für die Bauweisen ohne TSM ähnlich viel Sickerwasser gemessen wird. Beim bindigen Boden fällt nur etwa die Hälfte des Sickerwassers der anderen Versuchsreihen an. Die Wasserdurchlässigkeit bei diesem Material liegt mit 10^{-8} m/s jedoch auch um 2 bis 4 Zehnerpotenzen kleiner als die der übrigen Materialien. Im M TS E (FGSV, 2017) ist die Bauweise E nur für schwach durchlässige Baustoffe mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von $k \leq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s vorgesehen. Hier wird als Kriterium einzig die Wasserdurchlässigkeit herangezogen. Da die Reduktion der Sickerwassermenge durch die Dränmatten aber sehr unterschiedlich ist, reicht das Kriterium Wasserdurchlässigkeit als einziges Kriterium nicht aus. Für das beobachtete Ergebnis wirkt die Dränmatte als kapillarbrechende Schicht und die Menge des in den Baustoffkörper übergehenden Wassers hängt weniger von der Wasserdurchlässigkeit ab, als vielmehr von der kapillaren Saugspannung des Materials. Zu diesem Themenkomplex wurde das Projekt FE 05.0162 „Bestimmung hydraulischer Eigenschaften von im Straßenbau verwendeten Ersatzbaustoffen“ an der TU Braunschweig bearbeitet. Bei diesem Projekt kam heraus, dass sich RC-Baustoff und HMVA ein grundsätzlich anderes hydraulisches Verhalten als natürlich Böden haben. So zeigen beide Stoffe eine ausgeprägte Makroporosität und einen starken Abfall der hydraulischen Leitfähigkeit beim Übergang zum ungesättigten Bereich.

Zu den Vorteilen der großmaßstäblichen Versuche zählen, dass innerhalb relativ kurzer Zeit systematisch verschiedene Varianten untersucht werden können. So können die Versuchsreihen mit TSM direkt mit den Ergebnissen ohne TSM verglichen werden. Das Maß der Reduzierung des Sickerwassers durch die TSM kann als direktes Maß für deren Wirksamkeit betrachtet werden. Die beste Reduktion wurde durch die Bauweise mit Dränmatte 1 beim kiesigen Boden erzielt, hier konnte ausgehend von der Sickerwassermenge ohne TSM die zu 100% gesetzt wurde, die Sickerwassermenge auf 5% reduziert werden. Daraufhin wurden in dieser Untersuchungsserie der Fokus auf unterschiedliche Dränmatten gelegt und drei verschiedenen Systeme getestet. Leider konnten damit, obwohl die Sickerwassermengen der Bauweisen ohne TSM vergleichbar waren, nicht so gute Ergebnisse gemessen werden wie beim kiesigen Boden mit Dränmatte. Die Sickerwassermenge konnte auf Werte zwischen 14 % und 59 % reduziert werden. Auf den ersten drei Plätzen der wirkungsvollsten Bauweisen, sind Versuchsreihen mit Dränmatte 1. Es lässt sich aber nicht generell sagen, dass Dränmatte 1 am wirkungsvollsten ist, da bei der Versuchsreihe mit RC mit Dränmatte 1 mehr Sickerwasser gemessen wurde als mit Dränmatte 3. Eine Erklärung der Unterschiede mit nur einer Eigenschaft ist hier schwierig, da es zu einer Überlagerung der Materialeigenschaften mit den hydraulischen Eigenschaften der Dränmatten kommt.

Die wesentlichen Erkenntnisse zur Effizienz der technischen Sicherungsmaßnahmen sind:

1. Für alle Materialien lässt sich durch die Verwendung von Dränmatten eine Reduktion der Sickerwassermenge um mindestens 40 % erzielen.
2. Bei der Effizienz der Bauweise kommt es zu einer Überlagerung verschiedener Eigenschaften, wie
 - den hydraulischen Eigenschaften der Dränmatte sowie
 - der Wasserdurchlässigkeit,
 - dem Verdichtungsgrad und
 - der kapillaren Saugspannung des in der Böschung untersuchten Materials.

Für eine wirkungsvolle Reduzierung der Sickerwassermenge muss also die Bauweise mit dem Material und den Einbaubedingungen abgestimmt werden. Dafür steht mit dem Hallenlysimeter ein Instrument zur Verfügung, das unter vergleichbaren, kontrollierten und zeitgerafften Bedingungen Ergebnisse liefert, um Bauweisen vergleichen zu können und die Effizienz der Bauweise abschätzen zu können. Durch die Sensitivitätsanalyse konnte gezeigt werden, dass bei den eigentlichen Versuchsreihen die Sickerwassermenge tendenziell zu hoch eingeschätzt wird.

7.2 Umweltrelevante Inhaltstoffe

Anders als bei der Untersuchungsreihe mit Boden, wo Schadstoffe zur besseren Nachverfolgbarkeit bewusst zudosiert wurden, handelt es sich hier um handelsübliche Materialien, die die Einbauklasse 1 und 2 erreichen. Aufgrund der geringen Konzentrationen und den unterschiedlichen Materialien ist es schwierig, generelle Aussagen über Zusammenhänge von gemessenen Feststoffkonzentrationen, Eluatuntersuchungen und Sickerwasseranalysen zu treffen.

Die Menge an umweltrelevanten Inhaltstoffen wird von den beiden Faktoren Konzentration im Sickerwasser und Menge des Sickerwassers bestimmt. Die Untersuchungen zeigen, dass die Höhe der Konzentration von der Sicherungsmaßnahme weitgehend unabhängig ist. Der Verlauf der Konzentration zeigt bei einigen Stoffen eine gewisse Abhängigkeit vom Wasser/Feststoffverhältnis. Aufgrund der großen Masse der Materialien im Lysimeter erreicht das W/F bei den durchgeführten Versuchsreihen maximal einen Wert von 0,94. Das ist wesentlich geringer als das W/F von 2 beim Säulenkurztest. Der entscheidende Faktor bei den aufsummierten Frachtkurven ist die Sickerwassermenge, bis auf wenige Ausnahmen, da diese eine wesentlich höhere Größenordnung hat als die Konzentration. Und diese Sickerwassermenge lässt sich sehr gut durch eine geeignete TSM beeinflusst.

Bei einigen Stoffen zeigen die Summenkurven einen ansteigenden Verlauf, der darauf schließen lässt, dass der Stoffaustrag noch nicht abgeschlossen ist. Obwohl im Lysimeter in 14 Wochen zwei Drittel des Jahresniederschlags verregnet wird, wäre es bei den chemischen Analysen sinnvoll, die Versuche länger durchzuführen. Hier sollten die Ergebnisse mit dem Lysimeteruntersuchungen im Freiland verglichen werden, deren Stärke die Langzeitbeobachtung ist.

7.3 Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen

Das Ziel der Forschungsarbeiten zum Thema Durchsickerung von Straßenböschungen ist es, eine belastbare Datengrundlage zum Wasserhaushalt von Straßenböschungen zu schaffen. Die Versuche mit der Lysimeteranlage unter Laborbedingungen haben gezeigt, dass verschiedene Kombinationen von technischen Sicherungsmaßnahmen und Baustoffen unter kontrollierten, vergleichbaren und zeitgerafften Bedingungen untersucht werden konnten.

Der Betrieb der Anlage ist betreuungs- und wartungsintensiv. Aufgrund der 15wöchigen Versuchsdauer konnten bisher erst 16 Kombinationen untersucht werden. Um die Wirksamkeit einer bestimmten TSM bei einem bestimmten Material beurteilen zu können, müssten im Vorfeld der Baumaßnahmen Vorversuche gemacht werden. Dafür könnte das Hallenlysimeter ein geeignetes Instrument sein.

Die hier beschriebenen Versuche gehören zu einer Reihe von Projekten, die das komplexe Thema Durchsickerung durch verschiedene Ansätze verfolgen. Als nächstes müssen die Ergebnisse der Lysimeter unter Laborbedingungen mit denen unter Freilandbedingungen verglichen werden. Um die Eingangparameter für die Strömungsmodellierung in Böschungen zu verbessern, sollen die Lysimeterergebnisse am Modell nachgerechnet werden. Um die Ergebnisse zu validieren, sollen in einem Straßendamm die verschiedenen Bauweisen unter realen Bedingungen beobachten werden. Im weiteren Verlauf der Forschungen ist eine Synopse aller Durchsickerungsprojekte geplant, die die Ergebnisse vergleichend bewerten und einer breiten Fachöffentlichkeit vorstellen soll.

Durch diese unterschiedlichen Projektansätze wird es möglich sein, das Ziel der Forschungen zum Thema Durchsickerung von Straßenböschungen zu erreichen. Dafür müssen belastbaren Daten generiert werden, aus denen Instrumente zur Beurteilung der Wirksamkeit der unterschiedlichen Sicherungsmaßnahmen entwickelt werden. So können alternative Baustoffe durch ökonomisch und ökologisch optimierte Bauweisen weiter für den Erdbau des Straßenbaus genutzt werden.

8 Zusammenfassung

Bei Straßenbaumaßnahmen werden im Erdbau oftmals große Massen bewegt. Diese müssen bestimmte bautechnische Anforderungen erfüllen. Der Schutz von Boden und Grundwasser spielt bei der Auswahl der Baustoffe eine genauso große Rolle wie der sparsame Umgang mit Ressourcen.

Die Bundesanstalt für Straßenwesen widmet sich diesem Themenbereich in der Forschungslinie „Ressourcenschonender und umweltverträglicher Straßenbau“. Das übergeordnete Ziel der verschiedenen Forschungsprojekte ist dabei, den Einsatz von Ressourcen zu optimieren und gleichzeitig die Auswirkungen auf die Umwelt zu bewerten.

Aus Sicht des Straßenbauingenieurs reicht das Wissen über Wasser im Straßenbauwerk für die Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit vollkommen. Für die hydrogeologische Beurteilung der Durchsickerung im Hinblick auf den Boden- und Grundwasserschutz ist der heutige Wissensstand jedoch noch unzureichend. Insbesondere sind dazu folgende Fragen offen: **Wie viel Wasser gelangt in das Straßenbauwerk und wie viel Wasser durchsickert die Straßenböschung?**

Zum Schutz von Boden- und Grundwasser wurden für den Einsatz bestimmter Ersatzbaustoffe im Erbau Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen (TSM) entwickelt. Durch diese Bauweisen kann die Menge des Sickerwassereintrags in das Bauwerk reduziert und damit der Austrag an umweltrelevanten Inhaltsstoffen verringert oder sogar ganz vermieden werden.

Ziel der Forschungsarbeiten zum Thema Durchsickerung von Straßenböschungen ist es, eine belastbare Datengrundlage zum Wasserhaushalt von Straßenböschungen zu schaffen. Daraus werden Instrumente entwickelt, um die Wirksamkeit der unterschiedlichen technischen Sicherungsmaßnahmen zu beurteilen. So sollen Ersatzbaustoffe durch ökonomisch und ökologisch optimierte Bauweisen weiter für den Erdbau des Straßenbaus genutzt werden.

In diesem Projekt „Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen“ wird der Forschungsansatz der großmaßstäblichen Versuche verfolgt, mit dem Ziel die Wirksamkeit von TSM zu beurteilen. Hierzu wurden Lysimeter und eine zugehörige Berechnungseinheit entwickelt. Mit der Anlage wurde ein Instrument geschaffen, um unter vergleichbaren, kontrollierten und zeitgerafften Bedingungen verschiedene Kombinationen aus TSM und Ersatzbaustoffen am Ausschnitt einer Böschung im Maßstab 1:1 zu prüfen. Um klimatische Einflüsse weitestgehend auszuschließen, ist die Anlage in einer Versuchshalle aufgestellt, so dass die Lysimeteruntersuchungen unter gleichbleibenden Laborbedingungen durchgeführt werden können.

Die Vorteile der Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen liegen in einer gut erfassbaren Wasserbilanz und der Möglichkeit, regelmäßig Wasserproben für die chemischen Untersuchungen zu gewinnen. Zu den Schwächen gehören, dass Umwelteinflüsse und Straßenabfluss nicht berücksichtigt werden und ggf. nicht erfassbare Randeinflüsse vorhanden sind. Zudem sind die Versuchsdauern lang und die Versuche sind betreuungsintensiv. Aufgrund der Abmessungen des Lysimeterkastens sind nicht alle TSM realisierbar.

In dieser zweiten Versuchsserie wurden eine Hausmüllverbrennungsgasche (HMVA), ein Recycling-Baustoff (RC) ein Gießereirestsand (GRS) und eine Steinkohlenkesselasche (SKA) untersucht. Als TSM wurden drei verschiedene Dränmatten und eine Vergleichsvariante ohne TSM eingesetzt, so dass insgesamt zehn Versuchsreihen durchgeführt worden sind. Die Lysimeterversuche wurden von April 2013 bis Dezember 2016 durchgeführt. Während den 15-wöchigen Versuchsreihen wurde an jedem Arbeitstag das Gewicht des Lysimeters und des Oberflächenabfluss ermittelt. Das Sickerwasser wurde ebenfalls gewogen und analysiert. Während dieser Zeit wurden in jeder Woche ein bis drei Regenereignisse aufgebracht. Abschließend wurde für die Materialien RC und SKA noch die Sensitivität der Versuchsergebnisse gegenüber der Regenmenge untersucht.

Die wesentlichen Erkenntnisse zur Effizienz der technischen Sicherungsmaßnahmen sind:

1. Für alle Materialien lässt sich durch die Verwendung von Dränmatten eine Reduktion der Sickerwassermenge um mindesten 40 % erzielen.
2. Bei der Effizienz der Bauweise kommt es zu einer Überlagerung verschiedener Eigenschaften, wie
 - den hydraulischen Eigenschaften der Dränmatte sowie

- der Wasserdurchlässigkeit,
- dem Verdichtungsgrad und
- der kapillaren Saugspannung des in der Böschung untersuchten Materials.

Die Menge an umweltrelevanten Inhaltstoffen wird von den beiden Faktoren Konzentration im Sickerwasser und Menge des Sickerwassers bestimmt. Der entscheidende Faktor bei den aufsummierten Frachtkurven ist in den meisten Fällen die Sickerwassermenge, diese wird von der TSM beeinflusst. Es ist also möglich, mit einer geeigneten TSM den Austrag von umweltrelevanten Inhaltsstoffen aus einer Straßenböschung zu verringern.

In zukünftige Simulationsrechnungen sollten die unterschiedlichen Charaktere der Regen und die Trocknungsphasen berücksichtigt werden. Keinesfalls darf von einem gleichmäßigen Dauerregen ohne Trocknungsphasen ausgegangen werden. Es konnte gezeigt werden, dass dies die Menge von Oberflächen- und Sickerwasserabfluss beeinträchtigt.

Für eine wirkungsvolle Reduzierung der Sickerwassermenge muss die Bauweise mit dem Material und den Einbaubedingungen abgestimmt werden. Dafür steht mit dem Hallenlysimeter ein Instrument zur Verfügung, das unter vergleichbaren, kontrollierten und zeitgerafften Bedingungen die Beurteilung der Effizienz von TSM erlaubt.

Literatur

- BAM, 2010. *Zulassung Kunststoff-Drainelement für Deponieoberflächenabdichtungen Enkadrain ZB*, Berlin: s.n.
- BAM, 2015. *Richtlinien für die Zulassung von Kunststoff-Dränelementen für Deponieoberflächenabdichtungen*. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -Prüfung.
- BBodSchG, 1998. *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG)*, s.l.: s.n.
- BBodSchV, 2012. *Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12 Juli 1999, geändert am 24.02.2012*, s.l.: s.n.
- BMUNR, 2003. *Hydrologischer Atlas von Deutschland*. Freiburg: Freiburger Verlagsdienst.
- BRAND, M., Tiffert, A. & Marks, T. e. a., 2016. *Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau - Untersuchungen von Bauweisen im Freilandlysimumern Teil 1: Untersuchungszeitraum 2010-2013*, Bremen: Fachverlag NW.
- Colbond, 2007. *Enkadrain ZB Produktbeschreibung*, s.l.: s.n.
- DIN 19528, 2009. *Eluation von Feststoffen - Perkulationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Eluationsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen*, Berlin: Beuth Verlag.
- DIN 19529, 2015. *Eluation von Feststoffen - Schüttelverfahren zur Untersuchung des Eluationsverhaltens von anorganischen Stoffen mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg*, Berlin: Beuth Verlag.
- DIN 38414-4, 1984. *Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S); Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S 4)*, s.l.: s.n.
- DIN EN 12457-4, 2003. *Charakterisierung von Abfällen - Auslaugung; Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen - Teil 4: Einstufiges Schüttelverfahren mit einem Flüssigkeits-/Feststoffverhältnis von 10 l/kg*. Berlin: Beuth Verlag.
- Durner, W. & Scharnagl, B., 2015. *Bestimmung von Wassergehalts-Saugspannungsfunktionen für Böden, RC-Baustoffe und HMVA*, s.l.: s.n.
- FGSV, 1999. *Merkblatt über die Verwendung von Gießereireststoffen im Straßenbau*. Köln: FGSV Verlag.
- FGSV, 2002. *Merkblatt über die Wiederverwertung von mineralischen Baustoffen aus Recycling-Baustoffen im Straßenbau*. Köln: FGSV Verlag.
- FGSV, 2009. *Merkblatt über die Verwendung von Kraftwerksnebenprodukten im Straßenbau*. Köln: FGSV Verlag.
- FGSV, 2014. *Merkblatt über die Verwendung von Hausmüllverbrennungssasche im Straßenbau*. Köln: FGSV Verlag.
- FGSV, 2016. *TP Gesteins-StB: Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau*. Köln: FGSV Verlag.
- FGSV, 2017. *Merkblatt über Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau*. Köln: FGSV Verlag.
- FGSV, 2018. *Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, TL Gestein StB 04, Ausgabe 2004/ Fassung 2018*. Köln: FGSV Verlag.
- GDA, 2015. *GDA Empfehlungen E2-20: Entwässerungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen*, s.l.: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. DGGT.
- KELLERMANN-KINNER, C., Bürger, M. & Marks, T., 2016. *Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau - Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen Teil 1: Bodenmaterial*, Bremen: Fachverlag NW.

Kreislaufwirtschaft Bau, 2017. *Mineralische Bauabfälle Monitoring 2014*, Berlin: Bundesverband Baustoffe-Steine und Erden e.V..

KrWG, 2012. *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) vom 24. Februar 2012*, s.l.: s.n.

LAGA, 2003. *Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen - Technische Regeln für die Verwertung-*, s.l.: s.n.

LAWA, 2004. *Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser*, s.l.: s.n.

LAWA, 2016. *Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser, Aktualisierte und überarbeitete Fassung*. s.l.: Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA).

MantelV, 2017. *Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung (Entwurf 03.05.2017)*, s.l.: s.n.

MARKS, T. e. a., 2007. *Effizienz Technischer Sicherungsmaßnahmen bei Einsatz von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Erdbau Teilprojekt "Planung und Erprobung großmaßstäblicher Laboruntersuchungen sowie Einrichtung eines Freilandlysimeters zur Kalibrierung"*, Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen.

Ruthmann, W., 2010. *Fremdprüfung von eignungsfestgestellten Dränmatten*, s.l.: 26. Fachtagung "Die sicherer Deponie 2010".

Tencate, 2010. *Megadrain - Drainage Mats*, Linz: s.n.

Terram, 2013. *Declaration of Performance Terram 1B1*, Maldon: s.n.

WHG, 2009. *Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG)*, s.l.: s.n.

Bilder

- Bild 1-1: Projektansätze zum Thema Durchsickerung
 Bild 2-1: Schematische Darstellung der Lysimeteranlage
 Bild 3-1: Seitenansicht des Lysimeterkastens, beim Aufstellen auf die Waage
 Bild 3-2: Lysimeterkasten mit Sicht auf die Saugplatten
 Bild 3-3: Schematische Anordnung der Saugplatten (Draufsicht) und Sammelflaschen
 Bild 3-4: Detailansicht des treppenförmigen Einbaus des Materials in den Lysimeterkasten
 Bild 3-5: Abtragen des treppenförmigen eingebauten Materials zur Herstellung der Böschungsneigung
 Bild 3-6: Detailaufnahme des Pumpensystems und der Steuerungseinheit
 Bild 3-7: Detailaufnahme des Beregnungskopfes von unten während der Beregnung
 Bild 3-8: Gesamtansicht der 2 Lysimeter mit Wasservorratsbehältern und Arbeitsplatz
 Bild 3-9: Beregnungskopf mit Gestell und offener Schublade über Lysimeterkasten (Vorderansicht)
 Bild 3-10: Beregnungskopf über Lysimeterkasten mit Sammelflaschen (Seitenansicht)
 Bild 3-11: Regenregime (Beregnungsprogramm) mit zugehörigen Niederschlagsereignissen
 Bild 3-12: Summen der Niederschlagsmengen
 Bild 4-1: Detailaufnahmen der Dränmatte 1 (Polyfelt Megadrain)
 Bild 4-2: Detailaufnahmen der Dränmatte 2 (Terram 1B1)
 Bild 4-3: Detailaufnahmen der Dränmatte 3 (Enkadrain ZB)
 Bild 5-1: Wassermengen für die HMVA ohne TSM
 Bild 5-2: Gewichtsanteile des Lysimeters für die HMVA ohne TSM
 Bild 5-3: Wassermengen für die HMVA mit Dränmatte 1
 Bild 5-4: Gewichtsanteile des Lysimeters für die HMVA mit Dränmatte 1
 Bild 5-5: Wassermengen für HMVA mit Dränmatte 2
 Bild 5-6: Gewichtsanteile des Lysimeters für den bindigen Boden mit Bitumenanspritzung
 Bild 5-7: Wassermengen für die HMVA mit Dränmatte 3
 Bild 5-8: Gewichtsanteile des Lysimeters für die HMVA mit Dränmatte 3
 Bild 5-9: Wassermengen für RC ohne TSM
 Bild 5-10: Gewichtsanteile des Lysimeters für RC ohne TSM
 Bild 5-11: Wassermengen für RC mit Dränmatte 1
 Bild 5-12: Gewichtsanteile des Lysimeters für RC mit Dränmatte 1
 Bild 5-13: Wassermengen für RC mit Dränmatte 3
 Bild 5-14: Gewichtsanteile des Lysimeters für RC mit Dränmatte 3
 Bild 5-15: Wassermenge für RC ohne TSM, Sensitivitätsanalyse
 Bild 5-16: Gewichtsanteile des Lysimeters für RC ohne TSM, Sensitivitätsanalyse
 Bild 5-17: Wassermengen für GRS ohne TSM
 Bild 5-18: Gewichtsanteile des Lysimeters für GRS ohne TSM
 Bild 5-19: Wassermengen für SKA ohne TSM
 Bild 5-20: Gewichtsanteile des Lysimeters für SKA ohne TSM
 Bild 5-21: Wassermengen für SKA mit Dränmatte 3
 Bild 5-22: Gewichtsanteile des Lysimeters für SKA mit Dränmatte 3
 Bild 5-23: Wassermenge für SKA ohne TSM, Sensitivitätsanalyse
 Bild 5-24: Gewichtsanteile des Lysimeters für SKA ohne TSM, Sensitivitätsanalyse
 Bild 6-1: Vergleich der Sickerwassermengen für HMVA
 Bild 6-2: Vergleich der Sickerwassermenge der beiden Umläufe für HMVA
 Bild 6-3: Vergleich der Sickerwassermengen für RC
 Bild 6-4: Vergleich der Sickerwassermenge der beiden Umläufe für RC
 Bild 6-5: Vergleich der Sickerwassermenge für GRS und SKA
 Bild 6-6: Vergleich der Sickerwassermenge der beiden Umläufe für GRS und SKA
 Bild 6-7: Vergleich der Sickerwassermenge für alle Bauweisen ohne TSM
 Bild 6-8: Vergleich der Sickerwassermenge für alle Bauweisen mit Dränmatte
 Bild 6-9: Vergleich der Sickerwassermengen aus der Sensitivitätsanalyse für RC und SKA ohne TSM (hochgerechnet)
 Bild 6-10: Prozentuale Verteilung des Sickerwassers für HMVA 1. Umlauf ohne TSM
 Bild 6-11: Prozentuale Verteilung des Sickerwassers für HMVA 2. Umlauf ohne TSM

Bild 6-12: Prozentualer Anteil des Oberflächenabflusses an der Regenmenge für die Bauweisen mit Dränmatte

Bild 6-13: Prozentuale Anteil des Oberflächenabflusses am Gesamtabfluss für alle Bauweisen mit Dränmatte

Bild 6-14: Prozentualer Vergleich von Oberflächen und Sickerwasser von allen Versuchsreihen

Bild 6-15: Reduzierung der Sickerwassermenge in Prozent

Bild 6-16: Vergleich der Wassermengen für alle Versuchsreihen

Bild 6-17: Molybdän Konzentration im Sickerwasser bei HMVA

Bild 6-18: Summenkurven Molybdän in HMVA

Bild 6-19: Chloridkonzentration im Sickerwasser bei HMVA

Bild 6-20: Summenkurven Chlorid in HMVA

Bild 6-21: Chlorkonzentration von HMVA nach W/F

Bild 6-22: Chlorkonzentration von HMVA und RC nach W/F

Bild 6-23: Kupferkonzentration im Sickerwasser für HMVA und RC

Bild 6-24: Summenkurven Kupfer für HMVA und RC

Bild 6-25: Kupferkonzentration für HMVA und RC nach W/F

Bild 6-26: Summenkurven Fluorid für HMVA

Bild 6-27: Fluoridkonzentration im Sickerwasser für HMVA

Tabellen

- Tab. 3-1: Auswahl der Niederschlagsereignisse für die Generierung des Regenregimes
- Tab. 4-1: Untersuchungsprogramm in der Lysimeteranlage
- Tab. 4-2: Eigenschaften der verwendeten Dränmatten
- Tab. 4-3: W/F-Verhältnisse für die grundlegende Charakterisierung beim Perkolationsverfahren
(ausführlicher Säulentest)
- Tab. 4-4: GFS und Prüfwerte für Umweltrelevante Inhaltsstoffe
- Tab. 5-1: Bautechnische Materialwerte für die verwendeten Materialien
- Tab. 5-2: Einbauwerte der Materialien für die verschiedenen Versuchsreihen
- Tab. 5-3: Feststoffanalyse der Materialien
- Tab. 5-4: Farbeinteilung der Eluatwerte
- Tab. 5-5: Vergleich der Eluatanalysen für HMVA
- Tab. 5-6: Vergleich der Eluatanalysen für RC
- Tab. 5-7: Vergleich der Eluatanalysen für GRS
- Tab. 5-8: Vergleich der Eluatanalysen für SKA
- Tab. 5-9: Farbeinteilung der Sickerwasseranalyse
- Tab. 5-10: 90-Perzentile der Sickerwasseranalyse für HMVA
- Tab. 5-11: 90-Perzentile der Sickerwasseranalyse für GRS
- Tab. 5-12: 90-Perzentile der Sickerwasseranalyse für RC
- Tab. 5-13: 90-Perzentile der Sickerwasseranalyse für SKA

Anhang

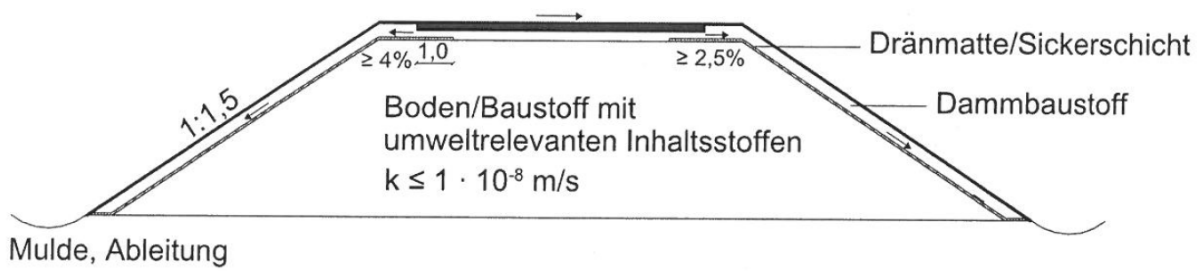
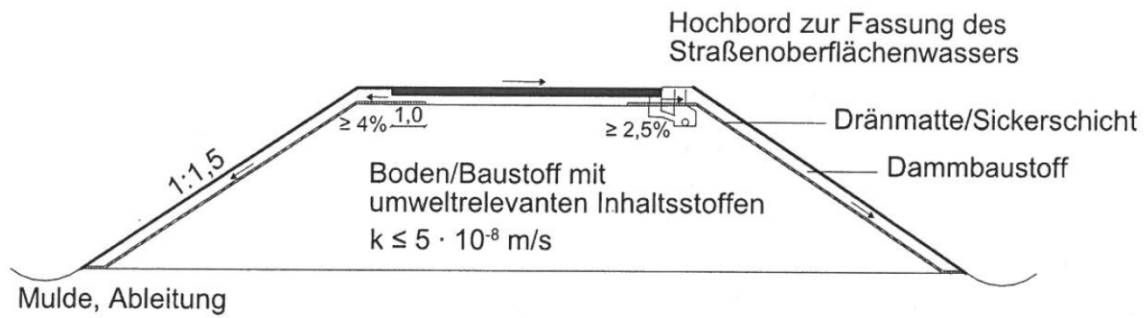


Bild-A 1: Bauweise E: Damm aus schwach durchlässigem Baustoff (FGSV, 2017)

Woche	Regen- nummer	Tag	Datum	Niederschlags- spende	Andauer	Verregnete Menge		Pumpen- system	erledigt
						pro Minute	gesamt		
	-	-	-	[l/(s.ha)]	[min]	[kg]	[kg]	-	
1	1	1	Montag, 29. April 2013	600,8	5	3,944	19,72	groß	
	2	4	Donnerstag, 2. Mai 2013	166,7	5	1,094	5,47	groß	
2	3	8	Montag, 6. Mai 2013	16,7	45	0,110	4,93	klein	
	4	11	Donnerstag, 9. Mai 2013	40,9	60	0,268	16,11	klein	
3	5	15	Montag, 13. Mai 2013	113,4	5	0,744	3,72	groß	
	6	17	Mittwoch, 15. Mai 2013	464,4	5	3,048	15,24	groß	
	7	19	Freitag, 17. Mai 2013	33,33	45	0,219	9,85	klein	
4	8	22	Montag, 20. Mai 2013	20,8	360	0,137	49,15	klein	
	9	25	Donnerstag, 23. Mai 2013	85,3	15	0,560	8,40	groß	
5	10	29	Montag, 27. Mai 2013	183,04	30	1,201	36,04	groß	
	11	33	Freitag, 31. Mai 2013	332,2	15	2,181	32,71	groß	
6	12	37	Dienstag, 4. Juni 2013	66,67	15	0,438	6,56	groß	
7	13	43	Montag, 10. Juni 2013	4,4	4320	0,029	124,77	klein	
8	14	50	Montag, 17. Juni 2013	600,8	5	3,944	19,72	groß	
	15	53	Donnerstag, 20. Juni 2013	166,7	5	1,094	5,47	groß	
9	16	57	Montag, 24. Juni 2013	16,7	45	0,110	4,93	klein	
	17	60	Donnerstag, 27. Juni 2013	40,9	60	0,268	16,11	klein	
10	18	64	Montag, 1. Juli 2013	113,4	5	0,744	3,72	groß	
	19	66	Mittwoch, 3. Juli 2013	464,4	5	3,048	15,24	groß	
	20	68	Freitag, 5. Juli 2013	33,33	45	0,219	9,85	klein	
11	21	71	Montag, 8. Juli 2013	20,8	360	0,137	49,15	klein	
	22	74	Donnerstag, 11. Juli 2013	85,3	15	0,560	8,40	groß	
12	23	78	Montag, 15. Juli 2013	183,04	30	1,201	36,04	groß	
	24	82	Freitag, 19. Juli 2013	332,2	15	2,181	32,71	groß	
13	25	86	Dienstag, 23. Juli 2013	66,67	15	0,438	6,56	groß	
14	26	92	Montag, 29. Juli 2013	4,4	4320	0,029	124,77	klein	
		98	Sonntag, 4. August 2013	Ende					

Tab.-A 1: Berechnungsplan HMVA ohne TSM

Woche	Regen- nummer	Tag	Neu	Niederschla- gs-spende	Andauer	Verregnete Menge		Pumpen- system	erledigt
			Datum			pro Minute	gesamt		
	-	-	-	[l/(s.ha)]	[min]	[kg]	[kg]	-	
1	1	1	Montag, 15. August 2016	210,28	5	1,380	6,90	klein	
	2	4	Donnerstag, 18. August 2016	58,345	5	0,383	1,91	klein	
2	3	8	Montag, 22. August 2016	5,845	45	0,038	1,73	klein	
	4	11	Donnerstag, 25. August 2016	14,315	60	0,094	5,64	klein	
3	5	15	Montag, 29. August 2016	39,69	5	0,261	1,30	klein	
	6	17	Mittwoch, 31. August 2016	162,54	5	1,067	5,33	klein	
	7	19	Freitag, 2. September 2016	11,6655	45	0,077	3,45	klein	
4	8	22	Montag, 5. September 2016	7,28	360	0,048	17,20	klein	
	9	25	Donnerstag, 8. September 2016	29,855	15	0,196	2,94	klein	
5	10	29	Montag, 12. September 2016	64,064	30	0,421	12,62	groß	
	11	33	Freitag, 16. September 2016	116,27	15	0,763	11,45	groß	
6	12	37	Dienstag, 20. September 2016	23,3345	15	0,153	2,30	klein	
7	13	43	Montag, 26. September 2016	1,54	4320	0,010	43,67	klein	
8	14	50	Montag, 3. Oktober 2016	210,28	5	1,380	6,90	klein	
	15	53	Donnerstag, 6. Oktober 2016	58,345	5	0,383	1,91	klein	
9	16	57	Montag, 10. Oktober 2016	5,845	45	0,038	1,73	klein	
	17	60	Donnerstag, 13. Oktober 2016	14,315	60	0,094	5,64	klein	
10	18	64	Montag, 17. Oktober 2016	39,69	5	0,261	1,30	klein	
	19	66	Mittwoch, 19. Oktober 2016	162,54	5	1,067	5,33	klein	
	20	68	Freitag, 21. Oktober 2016	11,6655	45	0,077	3,45	klein	
11	21	71	Montag, 24. Oktober 2016	7,28	360	0,048	17,20	klein	
	22	74	Donnerstag, 27. Oktober 2016	29,855	15	0,196	2,94	klein	
12	23	78	Montag, 31. Oktober 2016	64,064	30	0,421	12,62	groß	
	24	82	Freitag, 4. November 2016	116,27	15	0,763	11,45	groß	
13	25	86	Dienstag, 8. November 2016	23,3345	15	0,153	2,30	klein	
14	26	92	Montag, 14. November 2016	1,54	4320	0,010	43,67	klein	
		98	Sonntag, 20. November 2016	Ende					

Tab.-A 2: Berechnungsplan Sensitivitätsanalyse RC ohne TSM

		HMVA-1	HMVA-2	HMVA-3	RC-1	RC-2	RC-3	GSR-1	GSR-2	SKA
pH-Wert ¹	[-]	7-13	7-13	7-13	6-13	6-13	6-13	> 9	> 6	7-12
el. Leitf. ²	[µS/cm]	2000	12500	12500	2500	3200	10000	2700	4200	2100
Arsen	[µg/l]							65	100	
Blei	[µg/l]							90	600	
Cadmium	[µg/l]									
Chrom	[µg/l]	150	460	600	150	440	900	110	120	
Kupfer	[µg/l]	110	1000	2000	110	250	500	110	150	
Nickel	[µg/l]							30	240	
Quecksilber	[µg/l]									
Zink	[µg/l]							160	650	
Molybdän	[µg/l]	55	400	1000				55	400	400
Antimon	[µg/l]	10	60	150						
Vanadium	[µg/l]	55	150	200	120	700	1350	200	250	230
Thallium	[µg/l]									
Cyanide, ges.	[µg/l]									
Chlorid	[mg/l]	160	5000	5000						
Sulfat	[mg/l]	820	3000	3000	600	1000	3500			600
Fluorid	[mg/l]							8,7	80	
DOC	[mg/l]							30	200	
PAK ₁₅	[µg/l]				6	12	25			

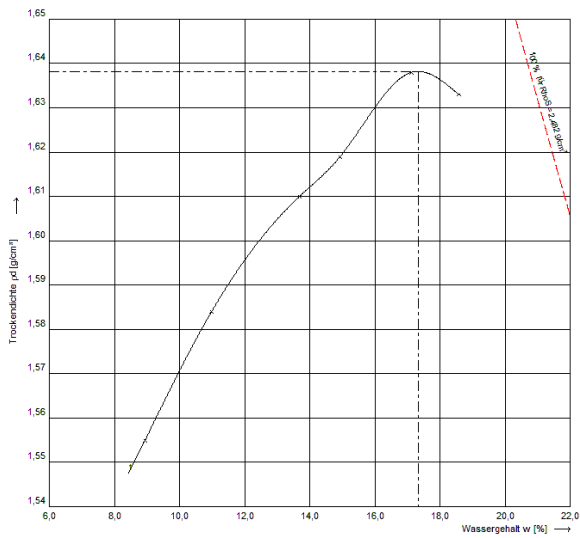
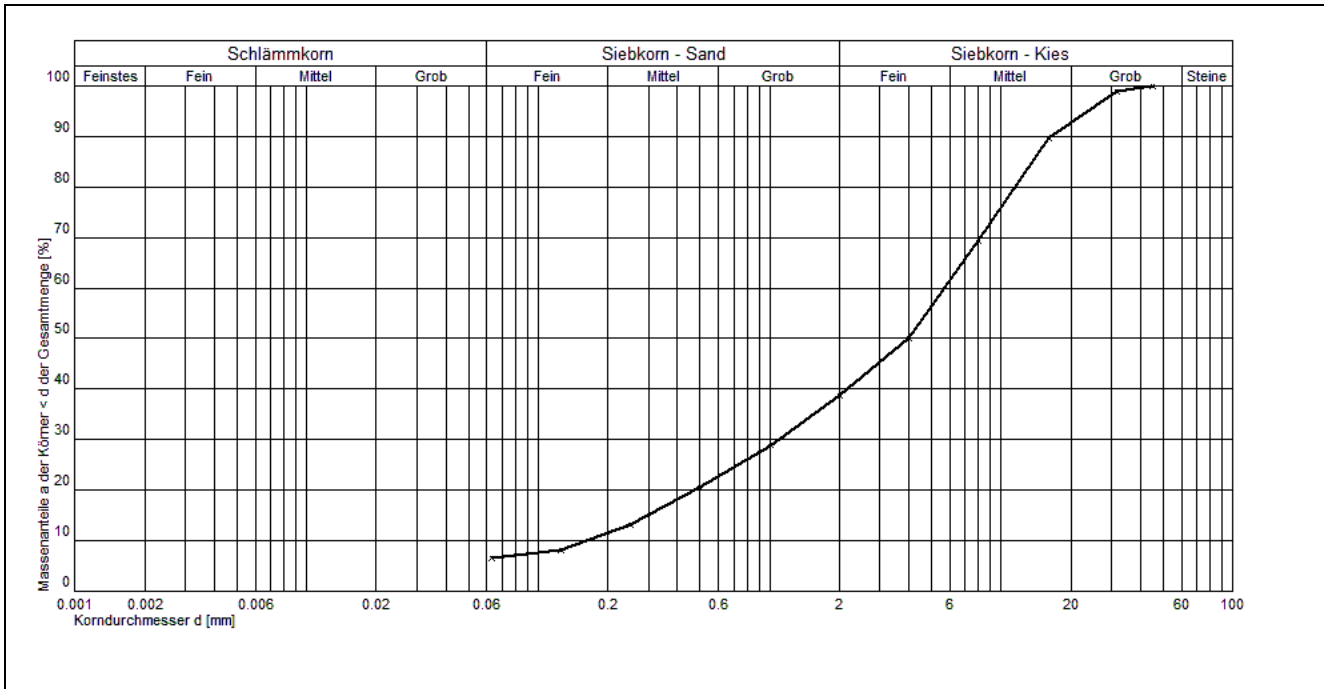
¹ nur bei GRS Grenzwert, ansonsten stoffspezifischer Orientierungswert, bei Abweichung ist die Ursache zu prüfen

² stoffspezifischer Orientierungswert, bei Abweichung ist die Ursache zu prüfen

Tab.-A 3: Materialwerte für geregelte Ersatzbaustoffe (MantelV, 2017)

		HMVA-1	HMVA-2	RC-1	RC-2	RC-3	GSR	SKA
pH-Wert	[-]	7-13	7-13	7-12,5	7-12,5	7-12,5	5,5-12	8-12
el. Leitf.	[µS/cm]	2000	6000	1500	2500	3000	1000	1000
Arsen	[µg/l]			10	40	50	60	40
Blei	[µg/l]	50	50	40	100	100	200	
Cadmium	[µg/l]	5	5	2	5	5	10	
Chrom	[µg/l]	50	50	30	75	100	150	
Kupfer	[µg/l]	300	300	50	150	200	300	
Nickel	[µg/l]	40	40	50	100	100	150	
Quecksilber	[µg/l]	1	1	0,2	1	2		1
Zink	[µg/l]	300	300	100	300	400	600	
Molybdän	[µg/l]							
Antimon	[µg/l]							
Vanadium	[µg/l]							
Thallium	[µg/l]							
Cyanide, ges.	[µg/l]	20	20					
Chlorid	[mg/l]	50	250	20	40	150		50
Sulfat	[mg/l]	200	600	150	300	600		200
Fluorid	[mg/l]						1	
DOC	[mg/l]						20	
PAK ₁₅	[µg/l]							

Tab.-A 4: Richt- und Grenzwerte für das Eluat aus Tabelle D.1 (FGSV, 2018)



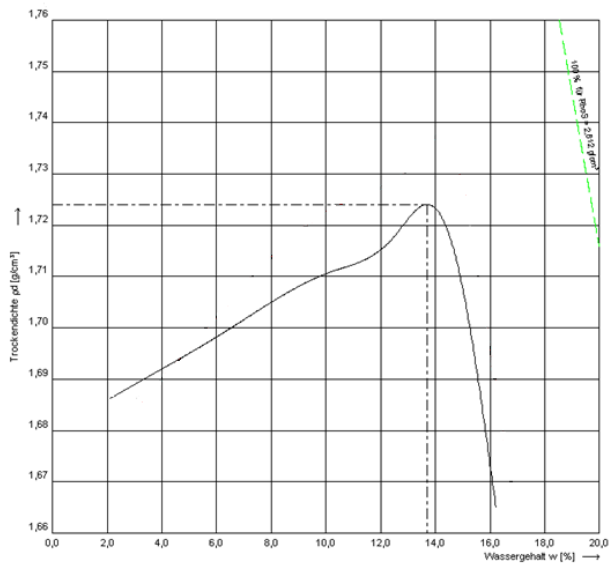
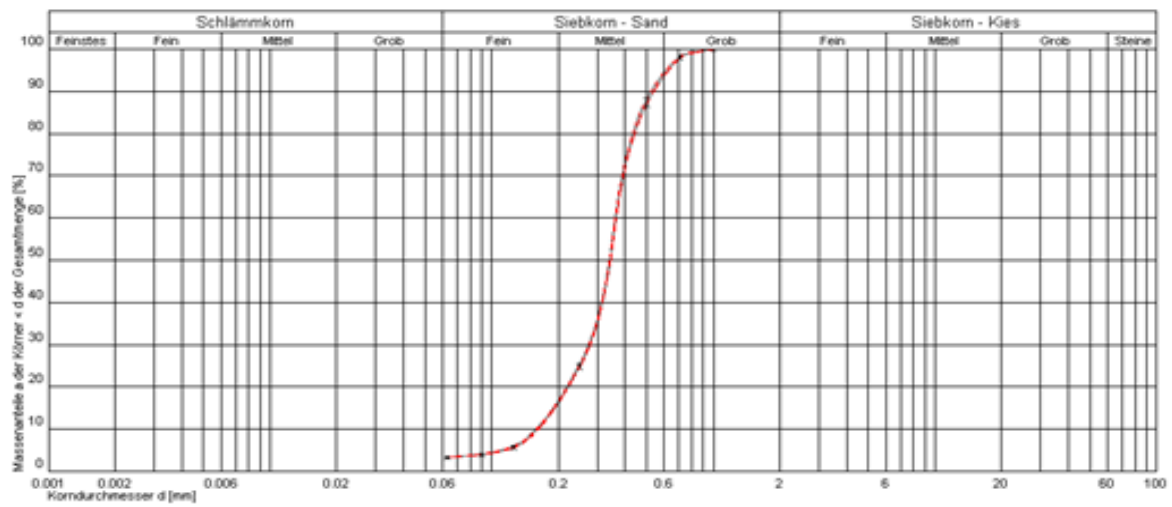
größte Trockendichte ρ_d 1,638 g/cm³
 optimaler Wassergehalt w 17,3 %

Durchlässigkeitsversuch nach DIN 18130

100 % Verdichtung

$2,5 \cdot 10^{-4}$ m/s Durchlässigkeit

Bild-A 2: Bautechnische Kenngrößen für Hausmüllverbrennungsasche



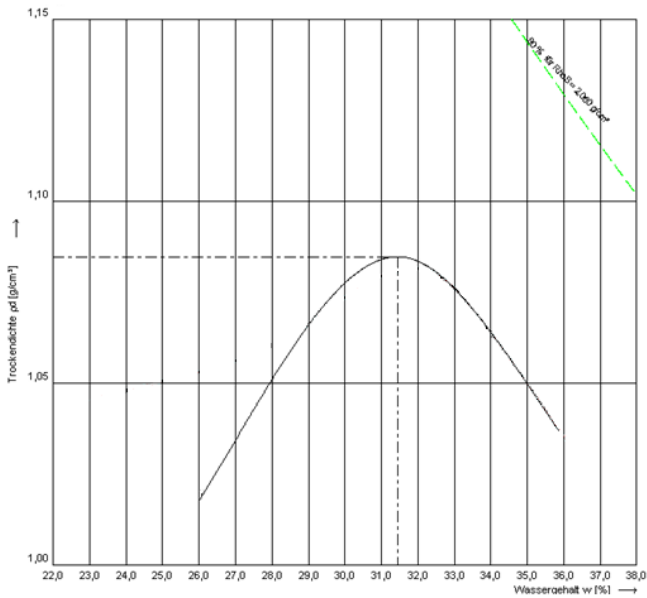
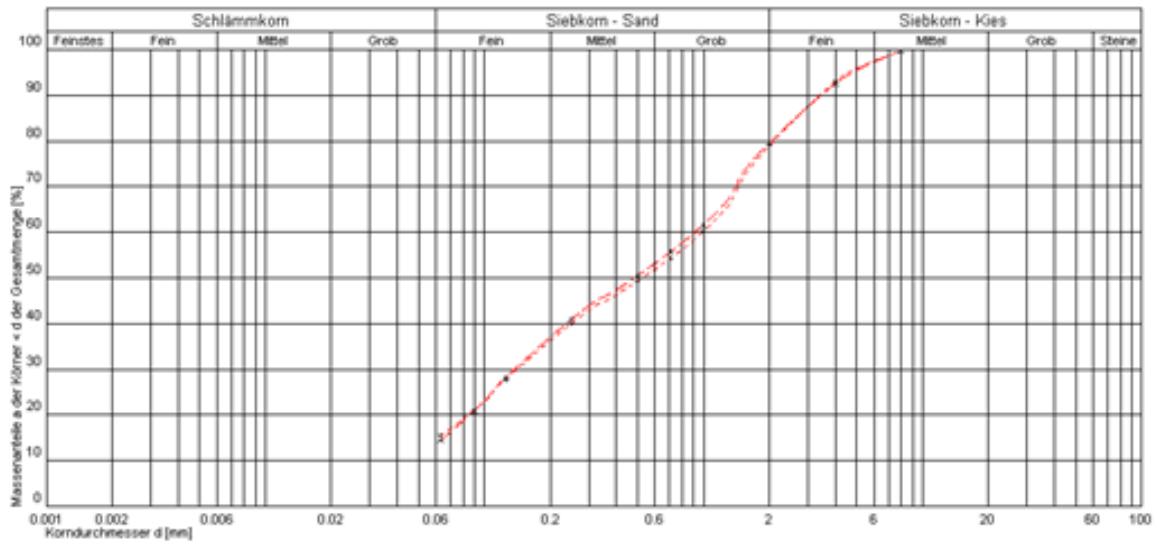
größte Trockendichte ρ_d 1,724 g/cm³
 optimaler Wassergehalt w 13,7 %

Durchlässigkeitsversuch nach DIN 18130

100 % Verdichtung

$3,2 \cdot 10^{-5}$ m/s Durchlässigkeit

Bild-A 3: Bautechnische Kenngrößen für Gießereirestsand



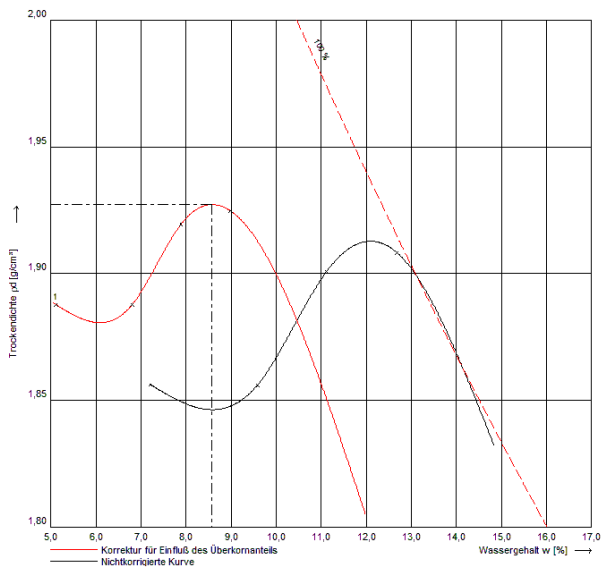
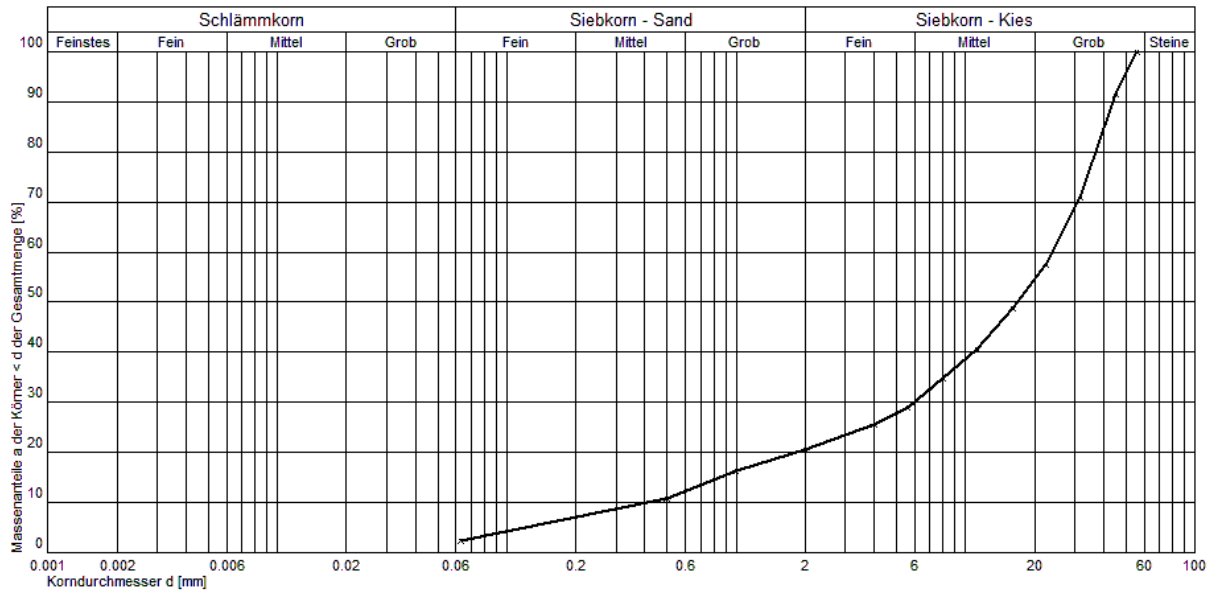
größte Trockendichte ρ_d 1,083 g/cm³
 optimaler Wassergehalt w 31,6 %

Durchlässigkeitsversuch nach DIN 18130

100 % Verdichtung

$5,9 \cdot 10^{-5}$ m/s Durchlässigkeit

Bild-A 4: Bautechnische Kenngrößen für Kesselasche



Nach der Überkornkorrektur von $\bar{U} = 29,08\%$ ergab sich:
 Korr. größte Trockendichte ρ_d 1,927 g/cm³
 Korr. optimaler Wassergehalt w 8,6 %

Stoffliche Zusammensetzung

		RC	
Schwimmendes Material	FL	1,7	[cm ³ /kg]
Nicht schwimmenden Fremdstoffe wie Gummi, Kunststoffe, Textilien, Pappe und Papier	X	0,0	[%]
Eisen und nichteisenhaltige Metalle	X _i	0,0	[%]
Beton, Betonprodukte, Mauersteine aus Beton, zementgebundene Gesteinskörnung	R _c	61,7	[%]
Natürliche und industriell hergestellte Gesteinskörnung	R _u	11,8	[%]
Klinker, Ziegel und Steinzeug	R _b	8,5	[%]
Kalksandstein, Mörtel und ähnlich Stoffe	R _{tk}	4,7	[%]
Mineralische Leicht- und Dämmbaustoffe, nicht schwimmender Porenbeton und Bims	R _{dm}	2,2	[%]
Asphaltgranulat	R _a	11,1	[%]
Glas	R _g	0,0	[%]
Gipshaltige Baustoffe	R _y	0,0	[%]

Durchlässigkeitsversuch nach DIN 18130

100 % Verdichtung

1,1 · 10⁻⁶ m/s Durchlässigkeit

Bild-A 5: Bautechnische Kenngrößen für RC Material

		[-]	[µS/cm]	[mg/l]	[mg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg]
		pH-Wert	elektr. Leitfähigkeit	Chlorid Titration	Arsen	Blei	Cadmium	Chrom	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Zink	Thallium	Molybdän	Antimon	Vanadium	Fluorid	Sulfat
HMVA ohne TSM	Anzahl	50	49	49	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	49	49	
	Min	7,47	2422,4	45	0,0005	0,1294	0,2072	0,0225	0,0387	0,0075	0,0005	0,0672	0,0005	0,2951	0,0729	0,0005	0,12	1540
	10-Perzentil	7,77	3814,6	112	0,0005	0,7178	0,3708	0,02866	0,0461	0,01066	0,0005	0,07417	0,0005	0,30925	0,07572	0,0005	0,13	1720
	Median	7,90	5984,6	267	0,0005	2,7913	1,1053	0,03695	0,055	0,0135	0,0005	0,0863	0,0005	0,3816	0,08345	0,0025	0,18	2110
	Mittelwert	7,89	8088,9	1086	0,0097	11,2271	1,6888	0,0351	0,0566	0,0137	0,0005	0,1005	0,0005	0,3754	0,084026	0,00224	0,18	2127
	90-Perzentil	8,01	15198,9	3450	0,028	26,2586	3,3316	0,0394	0,06521	0,0172	0,0005	0,1550	0,0005	0,43398	0,09185	0,00371	0,22	2440
	Max	8,13	16082,0	3948	0,0401	105,5722	6,6464	0,042	0,1275	0,02	0,0005	0,182	0,0005	0,4499	0,0985	0,00550	0,24	2530
	Standardabw.	0,12	4447,7	1323	0,0124	19,1639	1,5105	0,0049	0,0134	0,0027	0,0000	0,0313	0,0000	0,0459	0,0064	0,0014	0,03	272
HMVA mit Dränmatte 1	Anzahl	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Min	7,02	1104,2	133	0,0005	0,6173	0,4841	0,0025	0,0421	0,0061	0,0005	0,0258	0,0005	0,0183	0,015	0,0005	0,05	372
	10-Perzentil	7,16	1289,8	161	0,0005	0,94458	0,6982	0,0035	0,0473	0,0079	0,0005	0,03168	0,0005	0,0277	0,0262	0,0005	0,08	439
	Median	7,55	2050,0	2017	0,0005	1,7896	1,1164	0,0189	0,0683	0,0121	0,0005	0,066	0,0005	0,1928	0,0473	0,0028	0,17	1270
	Mittelwert	7,47	3766,0	1397	0,00266	1,8547	1,3202	0,0152	0,0674	0,0114	0,0005	0,0649	0,0005	0,1594	0,0487	0,00232	0,15	1054
	90-Perzentil	7,73	7595,7	2355	0,00698	2,7706	2,1295	0,0254	0,08756	0,0143	0,0005	0,0979	0,0005	0,27494	0,06974	0,00404	0,21	1562
	Max	7,81	9763,3	2511	0,0113	2,9906	2,6852	0,0275	0,095	0,0153	0,0005	0,105	0,0005	0,2861	0,0723	0,00460	0,21	1630
	Standardabw.	0,30	3576,4	1137	0,0048	0,9144	0,8208	0,0109	0,0202	0,0034	0,0000	0,0325	0,0000	0,1232	0,0225	0,0018	0,07	564
HMVA mit Dränmatte 2	Anzahl	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	8	
	Min	7,61	3025,8	370	0,0005	0,0005	0,2242	0,0141	0,0174	0,0064	0,0005	0,0303	0,0005	0,098	0,0005	0,0005	0,56	882
	10-Perzentil	7,65	3268,4	419	0,0005	0,0005	0,2539	0,01786	0,0205	0,00832	0,0005	0,0411	0,0005	0,11352	0,01426	0,00218	0,66	916
	Median	7,88	5851,2	647	0,0005	0,0659	0,6056	0,0323	0,0234	0,0107	0,0005	0,0507	0,0005	0,2079	0,0434	0,0033	0,76	1460
	Mittelwert	7,87	5877,9	763	0,0005	0,0625	0,6104	0,0318	0,0237	0,0116	0,0005	0,0527	0,0005	0,2036	0,0391	0,00324	0,78	1390
	90-Perzentil	8,05	8101,1	1155	0,0005	0,1306	1,0699	0,0461	0,02698	0,0151	0,0005	0,0642	0,0005	0,29442	0,0603	0,00420	0,89	1786
	Max	8,11	10518,7	1702	0,0005	0,1345	1,2005	0,057	0,0277	0,0167	0,0005	0,0732	0,0005	0,3897	0,0723	0,00460	1,09	1870
	Standardabw.	0,17	2375,7	407	0,0000	0,0519	0,3517	0,0132	0,0032	0,0034	0,0000	0,0121	0,0000	0,0894	0,0212	0,0012	0,14	381
HMVA mit Dränmatte 3	Anzahl	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	
	Min	7,88	2907,5	502	0,0005	0,0005	0,2432	0,003	0,0208	0,0088	0,0005	0,0128	0,0005	0,018	0,0005	0,0005	0,59	1090
	10-Perzentil	7,92	2943,0	520	0,0005	0,00542	0,2485	0,00777	0,0211	0,00901	0,0005	0,02006	0,0005	0,05067	0,01172	0,0005	0,64	1186
	Median	8,05	4404,9	647	0,0005	0,0218	0,3243	0,0242	0,02225	0,0112	0,0005	0,04595	0,0005	0,14965	0,0384	0,0005	0,83	1570
	Mittelwert	8,05	4951,6	757	0,0056	0,0385	0,3805	0,0224	0,0229	0,0115	0,0005	0,0516	0,0005	0,1397	0,0361	0,00090	0,91	1450
	90-Perzentil	8,17	7397,7	1082	0,01478	0,0850	0,5575	0,0356	0,02532	0,0143	0,0005	0,0877	0,0005	0,2207	0,05864	0,00162	1,23	1666
	Max	8,20	8089,3	1232	0,0209	0,11	0,6303	0,0382	0,0264	0,0149	0,0005	0,1017	0,0005	0,2414	0,0671	0,00210	1,37	1690
Standardabw.	0,13	2478,2	331	0,0102	0,0489	0,1785	0,0152	0,0025	0,0029	0,0000	0,0376	0,0000	0,0938	0,0273	0,0008	0,34	317	

> GFS (LAWA) > Prüfwert (BBodSchV)

Tab.-A 5: Statistische Auswertung der umweltrelevanten Inhaltstoffe im Sickerwasser für die Bauweisen mit HMVA

		[-]	[µS/cm]	[mg/l]	[mg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	
		pH-Wert	elektr. Leitfähigkeit	Chlorid Titration	Arsen	Blei	Cadmium	Chrom	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Zink	Thallium	Molybdän	Antimon	Vanadium	Fluorid	Sulfat	Cyanid, ges.
RC ohne TSM	Anzahl	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	35	36
	Min	9,98	650,4	35	0,0005	0,0005	0,0005	0,0383	0,027	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0113	0,0005	0,0088	0,33	87	0,0025
	10-Perzentil	10,14	1575,2	66	0,0005	0,0005	0,0192	0,05408	0,0404	0,01154	0,0005	0,0005	0,0005	0,01984	0,0005	0,01076	0,35	93	0,0025
	Median	11,44	2312,6	134	0,0005	0,0965	0,0990	0,075	0,1003	0,0209	0,0005	0,006	0,0005	0,0317	0,0005	0,0141	0,57	107	0,0086
	Mittelwert	11,25	2718,6	143	0,0005	0,1721	0,1080	0,0762	0,1159	0,0259	0,0005	0,0059	0,0005	0,0306	0,0005	0,01502	0,59	112	0,0077
	90-Perzentil	12,06	4221,7	260	0,0005	0,4654	0,1799	0,0948	0,22746	0,0494	0,0005	0,0114	0,0005	0,03966	0,0005	0,01998	0,89	137	0,0116
	Max	12,15	5207,9	295	0,0005	0,5789	0,5898	0,1038	0,2809	0,069	0,0005	0,0169	0,0005	0,042	0,0005	0,03120	1,18	169	0,0130
	Standardabw.	0,78	1148,1	69	0,0000	0,1921	0,1017	0,0160	0,0689	0,0152	0,0000	0,0045	0,0000	0,0073	0,0000	0,0048	0,19	18	0,0036
RC ohne TSM Sensi	Anzahl	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7*	7*
	Min	7,83	2001,4	83	0,0005	0,0005	0,0056	0,0234	0,0181	0,0043	0,0005	0,0005	0,0005	0,0263	0,0005	0,0093	0,17	564	0,0020
	10-Perzentil	7,9	2019,9	84	0,0005	0,0005	0,0110	0,0353	0,01882	0,0055	0,0005	0,0013	0,0005	0,0310	0,0005	0,0097	0,18	597	0,0026
	Median	8,3	2307,0	100	0,0005	0,0733	0,0295	0,0687	0,0199	0,0073	0,0005	0,0031	0,0005	0,0455	0,0005	0,0109	0,20	908	0,0030
	Mittelwert	8,2	2454,5	111	0,0005	0,1246	0,2350	0,0618	0,0214	0,0074	0,0005	0,0038	0,0005	0,0448	0,0005	0,0120	0,22	855	0,0063
	90-Perzentil	8,4	2875,6	142	0,0005	0,2737	0,6403	0,08426	0,0251	0,0095	0,0005	0,0067	0,0005	0,0573	0,0005	0,0160	0,29	1084	0,0132
	Max	8,4	2950,8	143	0,0005	0,4981	1,0810	0,1037	0,0317	0,0108	0,0005	0,0107	0,0005	0,0663	0,0005	0,0185	0,31	1143	0,0210
	Standardabw.	0,2	394,4	27	0,0000	0,1720	0,3924	0,0253	0,0046	0,0020	0,0000	0,0033	0,0000	0,0131	0,0000	0,0033	0,05	234	0,0068
RC mit Dränmatte 1	Anzahl	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
	Min	8,93	740,3	20	0,0005	0,0005	0,0005	0,0135	0,0203	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0034	0,0005	0,0039	0,25	53	0,0025
	10-Perzentil	9,58	800,0	31	0,0005	0,0005	0,0072	0,01737	0,0228	0,00578	0,0005	0,00127	0,0005	0,00931	0,0005	0,00438	0,26	59	0,0025
	Median	10,54	983,1	61	0,0005	0,0074	0,0977	0,0345	0,03515	0,0104	0,0005	0,0074	0,0005	0,0141	0,0005	0,0085	0,44	79	0,0025
	Mittelwert	10,56	1172,7	61	0,0005	0,0493	0,0942	0,0329	0,0404	0,0100	0,0005	0,0076	0,0005	0,0145	0,0005	0,01019	0,42	86	0,0047
	90-Perzentil	11,58	1934,3	87	0,0005	0,1393	0,1748	0,0476	0,05583	0,0139	0,0005	0,0149	0,0005	0,02039	0,0005	0,01848	0,52	124	0,0082
	Max	11,71	2330,4	100	0,0005	0,2931	0,2358	0,0519	0,112	0,0191	0,0005	0,0183	0,0005	0,0215	0,0005	0,02080	0,99	144	0,0140
	Standardabw.	0,84	475,4	23	0,0000	0,0805	0,0705	0,0110	0,0211	0,0041	0,0000	0,0054	0,0000	0,0048	0,0000	0,0053	0,18	26	0,0031
RC mit Dränmatte 3	Anzahl	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
	Min	7,7	1029,6	46	0,0005	0,0005	0,0005	0,0212	0,0253	0,0057	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0213	0,14	183	0,0025
	10-Perzentil	7,91	1212,7	53	0,0005	0,0005	0,0010	0,03459	0,0269	0,00691	0,0005	0,0005	0,0005	0,01092	0,0005	0,02366	0,20	233	0,0025
	Median	8,53	1729,0	101	0,0005	0,0221	0,0202	0,07405	0,04405	0,0099	0,0005	0,0055	0,0005	0,02635	0,0005	0,0400	0,29	430	0,0059
	Mittelwert	8,72	1969,6	144	0,0005	0,1228	0,0752	0,0989	0,0797	0,0174	0,0005	0,0052	0,0005	0,0371	0,00505	0,03989	0,27	581	0,0074
	90-Perzentil	9,87	3206,6	333	0,0005	0,4793	0,2103	0,2234	0,19062	0,0437	0,0005	0,0086	0,0005	0,08862	0,01705	0,05839	0,34	1071	0,0157
	Max	10,66	3925,9	409	0,0005	0,7399	0,5357	0,2789	0,3119	0,0663	0,0005	0,0117	0,0005	0,1153	0,0193	0,06380	0,45	1940	0,0190
	Standardabw.	0,85	853,1	117	0,0000	0,2404	0,1498	0,0794	0,0852	0,0186	0,0000	0,0034	0,0000	0,0336	0,0076	0,0138	0,08	474	0,0056

> GFS (LAWA)

> Prüfwert (BBodSchV)

*

Werte wurden von einem anderen Labor bestimmt

Tab.-A 6: Statistische Auswertung der umweltrelevanten Inhaltstoffe im Sickerwasser für die Bauweisen mit RC

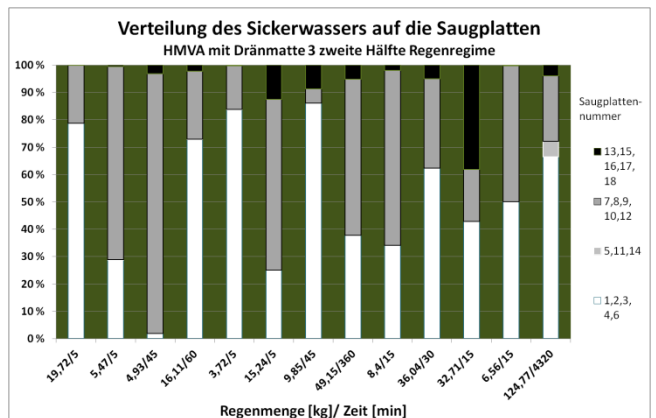
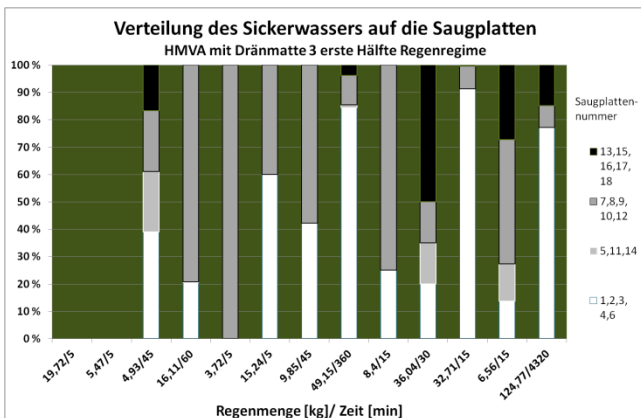
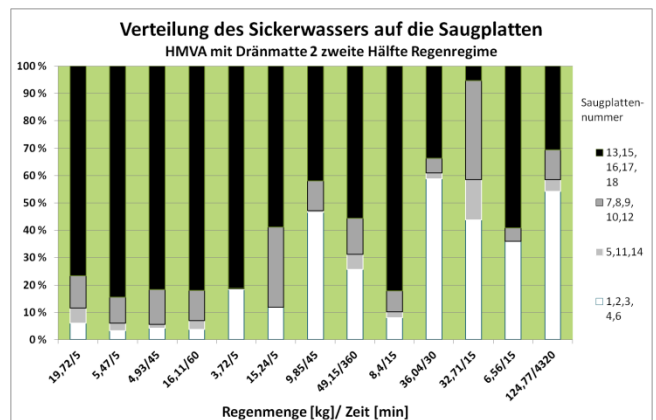
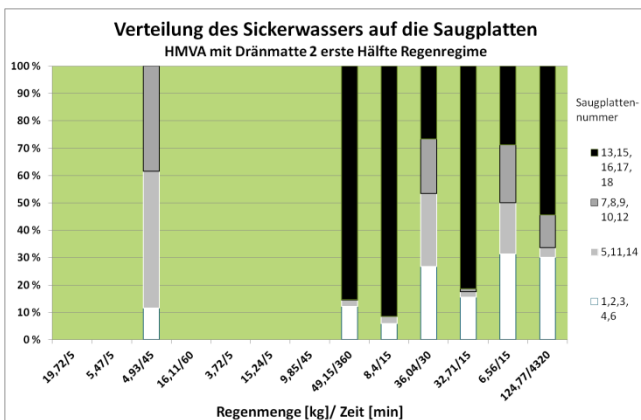
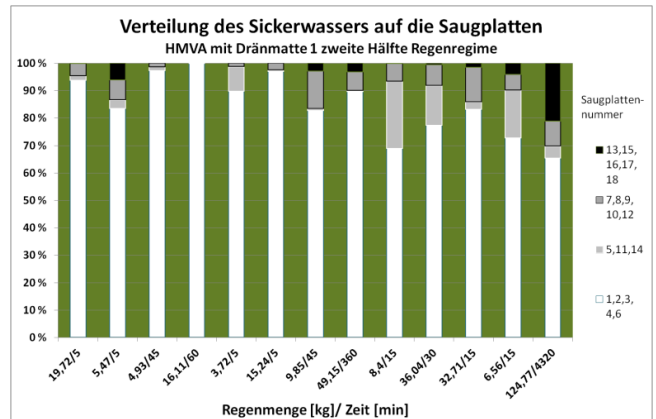
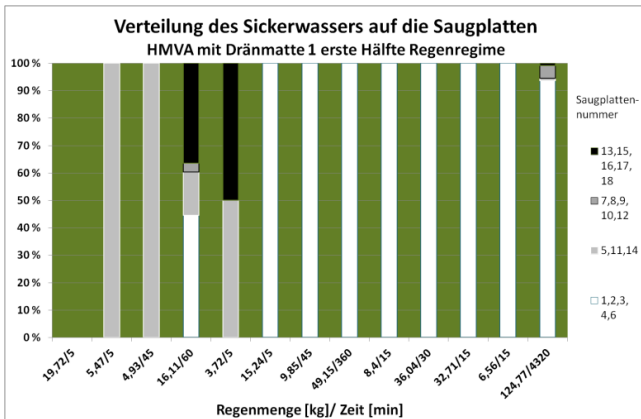
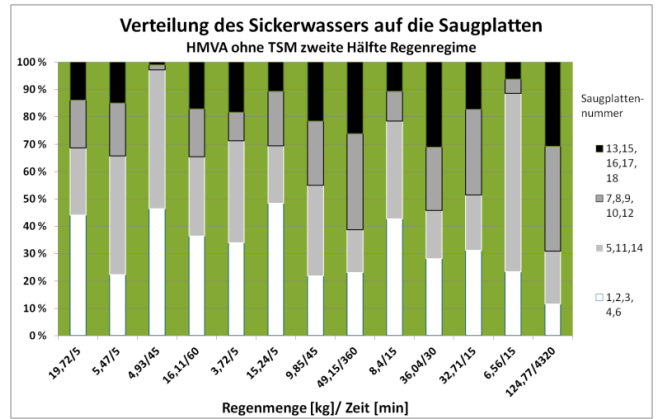
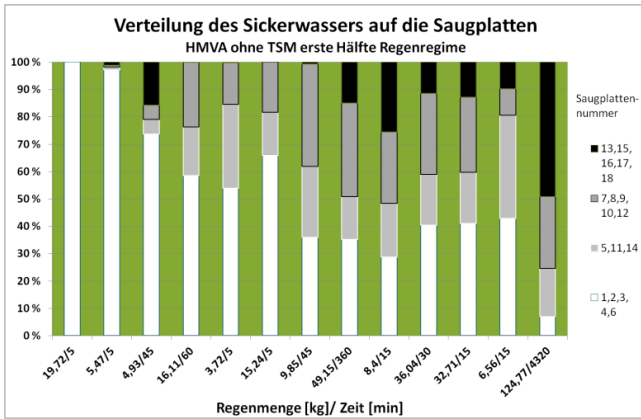
		[-]	[µS/cm]	[mg/l]	[mg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	
		pH-Wert	elektr. Leitfähigkeit	Chlorid Titration	Arsen	Blei	Cadmium	Chrom	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Zink	Thallium	Molybdän	Antimon	Vanadium	Fluorid	Sulfat	Cyanid, ges.
GRS ohne TSM	Anzahl	46	46	45	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	45	46	46
	Min	7,46	619,3	10	0,0005	0,0004	0,0005	0,0061	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0057	0,0005	0,0005	0,10	14	0,0025
	10-Perzentil	7,84	724,1	11	0,0005	0,0005	0,0056	0,00815	0,0026	0,0005	0,0005	0,003	0,0005	0,0105	0,0005	0,00125	0,33	21	0,0066
	Median	8,44	871,1	31	0,0005	0,0198	0,0403	0,0134	0,00555	0,0005	0,0005	0,0075	0,0005	0,01655	0,0005	0,0040	1,38	36	0,0130
	Mittelwert	8,33	1383,4	30	0,01121	0,1023	0,0511	0,0132	0,0068	0,0014	0,0005	0,0079	0,0005	0,0321	0,00113696	0,00440	1,14	230	0,0234
	90-Perzentil	8,59	2933,1	51	0,03505	0,3527	0,0998	0,0180	0,01135	0,0034	0,0005	0,0145	0,0005	0,081	0,0005	0,00715	1,79	795	0,0580
	Max	8,84	3887,9	63	0,0438	0,8347	0,2751	0,0198	0,0233	0,0076	0,0005	0,0223	0,0005	0,0955	0,0191	0,01110	1,80	1220	0,0790
	Standardabw.	0,32	966,0	16	0,0144	0,1781	0,0508	0,0038	0,0042	0,0016	0,0000	0,0046	0,0000	0,0284	0,0031	0,0024	0,54	345	0,0211
SKA ohne TSM	Anzahl	21	21	21	22	21	21	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	21	21
	Min	7,11	391,7	9	0,0005	0,0036	0,0005	0,0095	0,0005	0,0005	0,0005	0,002	0,0005	0,0105	0,0005	0,0199	0,06	40	0,0025
	10-Perzentil	7,62	501,6	10	0,0005	0,0198	0,0022	0,00994	0,0005	0,0005	0,0005	0,00351	0,0005	0,01179	0,0005	0,02354	0,07	43	0,0025
	Median	7,77	537,1	15	0,0005	0,068	0,0296	0,0189	0,00185	0,0005	0,0005	0,0065	0,0005	0,04105	0,0005	0,0261	0,10	105	0,0058
	Mittelwert	7,71	540,4	17	0,01049	0,1091	0,0472	0,0176	0,0051	0,0017	0,0005	0,0074	0,0005	0,0348	0,0007	0,02559	0,10	95	0,0053
	90-Perzentil	7,87	594,1	25	0,02585	0,2079	0,1027	0,0241	0,00479	0,0042	0,0005	0,0118	0,0005	0,04956	0,0005	0,02769	0,12	120	0,0091
	Max	7,93	617,0	44	0,0367	0,5491	0,2556	0,0292	0,054	0,0053	0,0005	0,0195	0,0005	0,0521	0,0049	0,02860	0,19	195	0,0110
	Standardabw.	0,20	48,0	8	0,0128	0,1231	0,0582	0,0058	0,0119	0,0018	0,0000	0,0041	0,0000	0,0155	0,0009	0,0023	0,03	38	0,0026
SKA ohne TSM Sensi	Anzahl	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6*	6*
	Min	6,98	1374,5	26	0,0005	0,1068	0,0005	0,0145	0,0022	0,0042	0,0005	0,0022	0,0005	0,1111	0,0005	0,0388	0,14	233	0,0010
	10-Perzentil	7,0	1391,4	26	0,0005	0,1260	0,0005	0,0158	0,0022	0,0044	0,0005	0,0026	0,0005	0,1138	0,0005	0,0407	0,15	255	0,0010
	Median	7,2	1455,1	33	0,0005	0,1751	0,0005	0,0187	0,0031	0,0053	0,0005	0,0032	0,0005	0,1257	0,0005	0,0433	0,16	309	0,0015
	Mittelwert	7,2	1476,7	32	0,0005	0,3924	0,0130	0,0183	0,0032	0,0054	0,0005	0,0100	0,0005	0,1244	0,0005	0,0425	0,19	299	0,0020
	90-Perzentil	7,3	1583,7	37	0,0005	0,8761	0,0379	0,0203	0,0043	0,0066	0,0005	0,0243	0,0005	0,1339	0,0005	0,0437	0,26	335	0,0035
	Max	7,4	1667,5	40	0,0005	1,5575	0,059	0,0206	0,0052	0,0067	0,0005	0,0423	0,0005	0,1353	0,0005	0,0437	0,32	344	0,0040
	Standardabw.	0,1	103,0	5	0,0000	0,5717	0,0235	0,0022	0,0011	0,0010	0,0000	0,0159	0,0000	0,0094	0,0000	0,0019	0,07	40	0,0013
SKA mit Dränmatte 3	Anzahl	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
	Min	7,31	237,4	14	0,0005	0,0005	0,0005	0,0068	0,0014	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0336	0,18	6	0,0025
	10-Perzentil	7,33	471,1	15	0,0005	0,0005	0,0005	0,01032	0,0018	0,0005	0,0005	0,00222	0,0005	0,01028	0,0005	0,03898	0,19	34	0,0025
	Median	7,53	565,0	20	0,0005	0,0476	0,0078	0,014	0,0031	0,0032	0,0005	0,0049	0,0005	0,0341	0,0005	0,0472	0,20	68	0,0025
	Mittelwert	7,53	561,4	21	0,0005	0,2887	0,0165	0,0140	0,0048	0,0027	0,0005	0,0084	0,0005	0,0346	0,0005	0,04660	0,21	73	0,0025
	90-Perzentil	7,73	649,3	27	0,0005	1,4237	0,0345	0,0184	0,00902	0,0051	0,0005	0,0153	0,0005	0,06084	0,0005	0,05210	0,23	119	0,0025
	Max	7,91	755,6	31	0,0005	1,436	0,0859	0,0217	0,0149	0,0057	0,0005	0,0452	0,0005	0,1048	0,0005	0,06350	0,26	182	0,0025
Standardabw.	0,16	100,3	4	0,0000	0,5360	0,0203	0,0038	0,0035	0,0020	0,0000	0,0100	0,0000	0,0254	0,0000	0,0061	0,02	40	0,0000	

> GFS (LAWA)

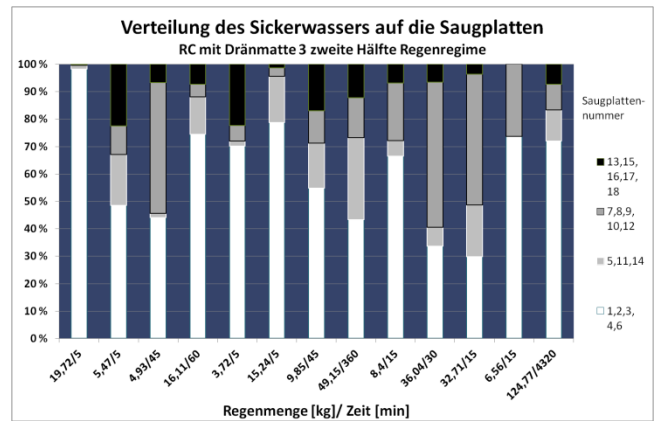
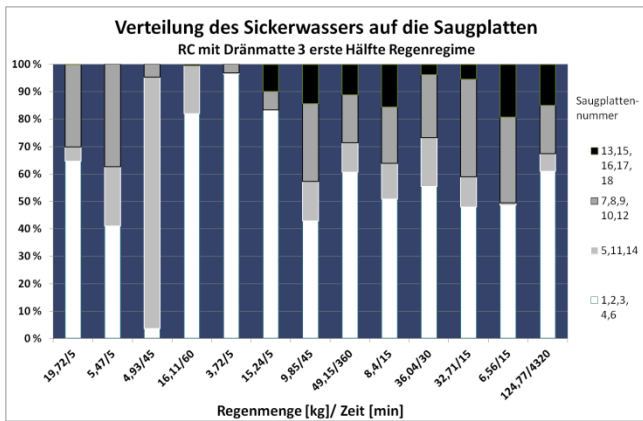
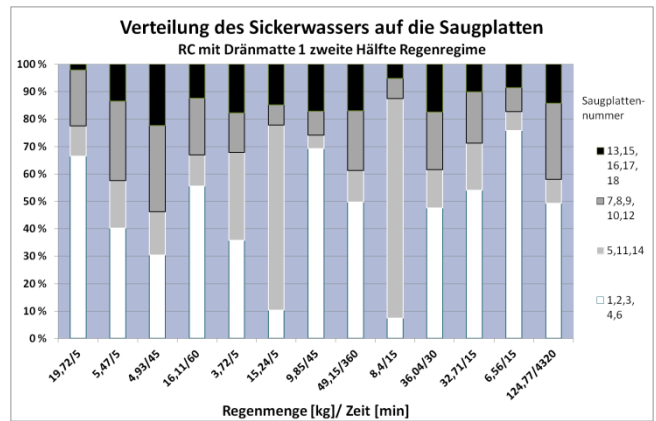
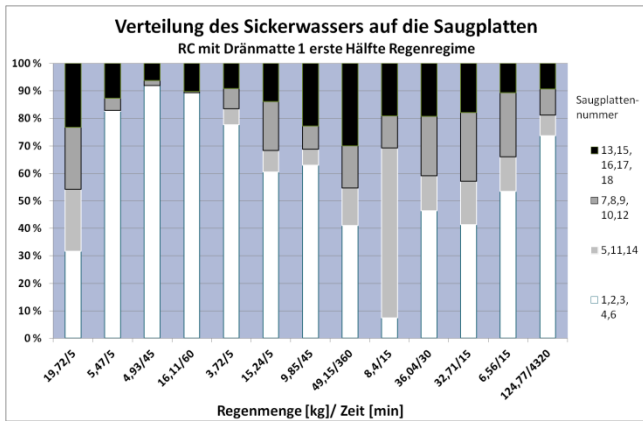
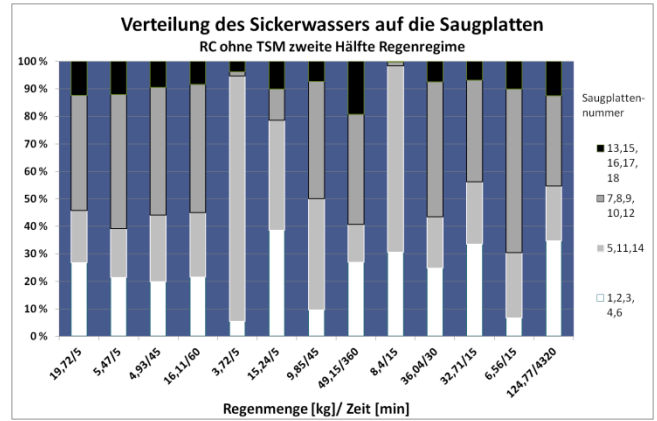
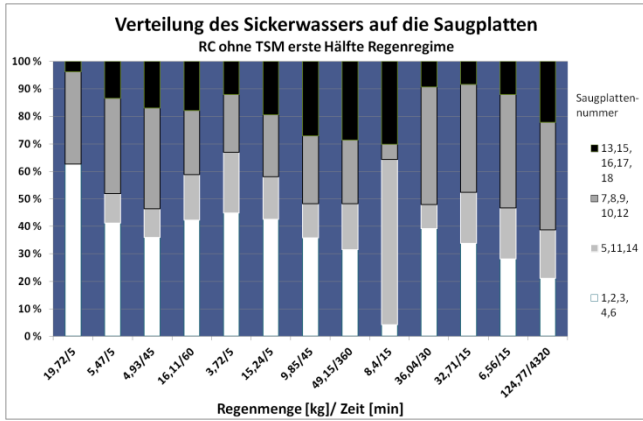
> Prüfwert (BBodSchV)

* Werte wurden von einem anderen Labor bestimmt

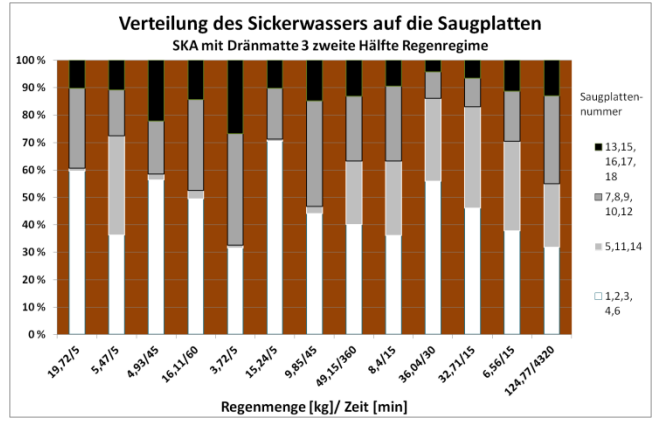
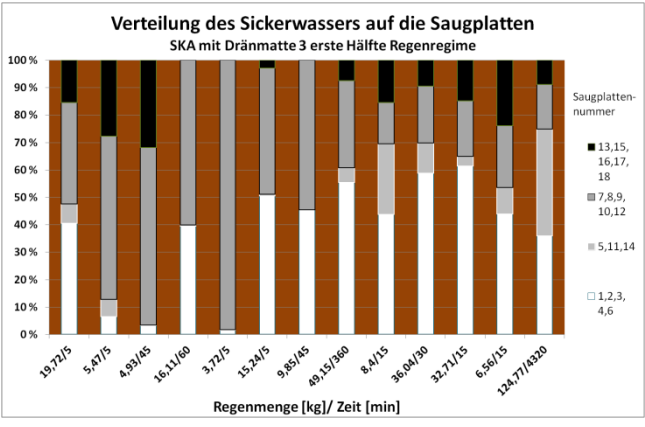
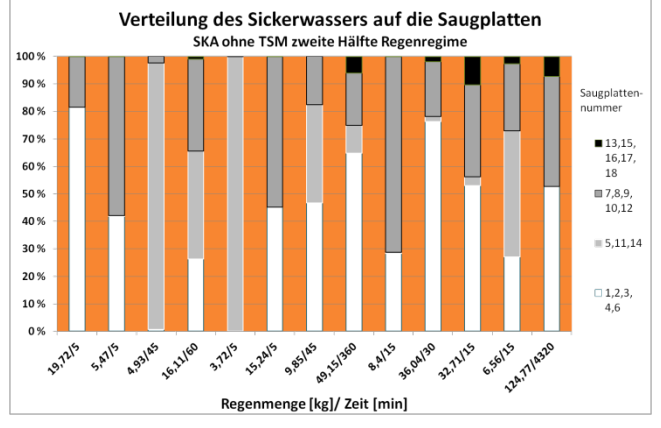
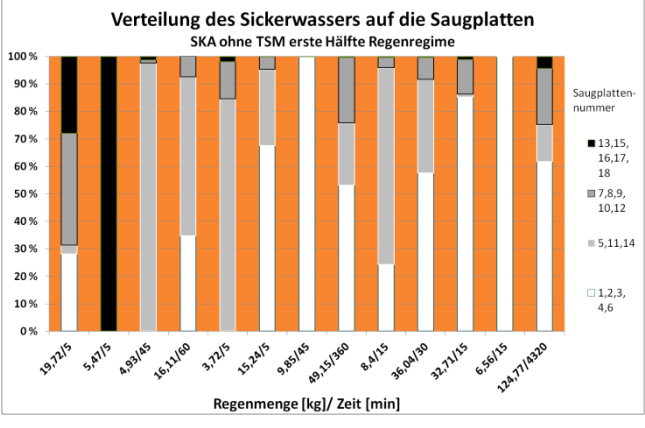
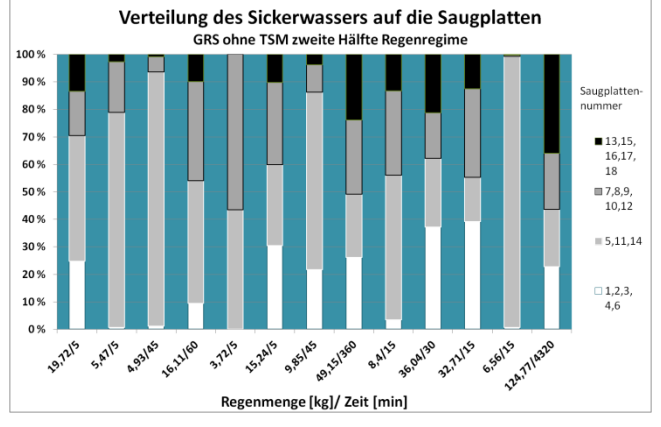
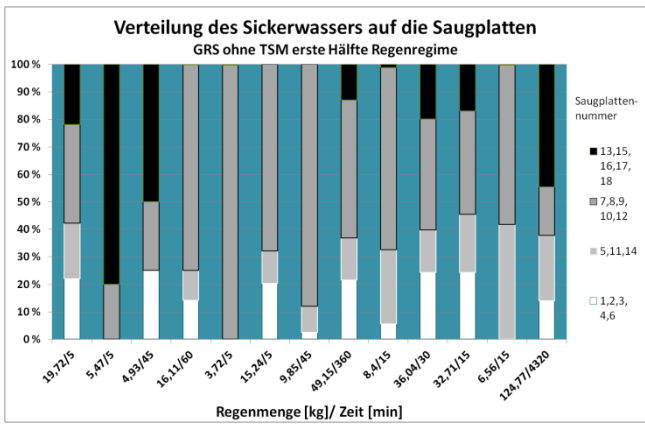
Tab.-A 7: Statistische Auswertung der umweltrelevanten Inhaltstoffe im Sickerwasser für die Bauweisen mit GRS und SKA



Tab.-A 8: Verteilung des Sickerwassers auf die Saugplatten für HMVA



Tab.-A 9: Verteilung des Sickerwassers auf die Saugplatten für RC



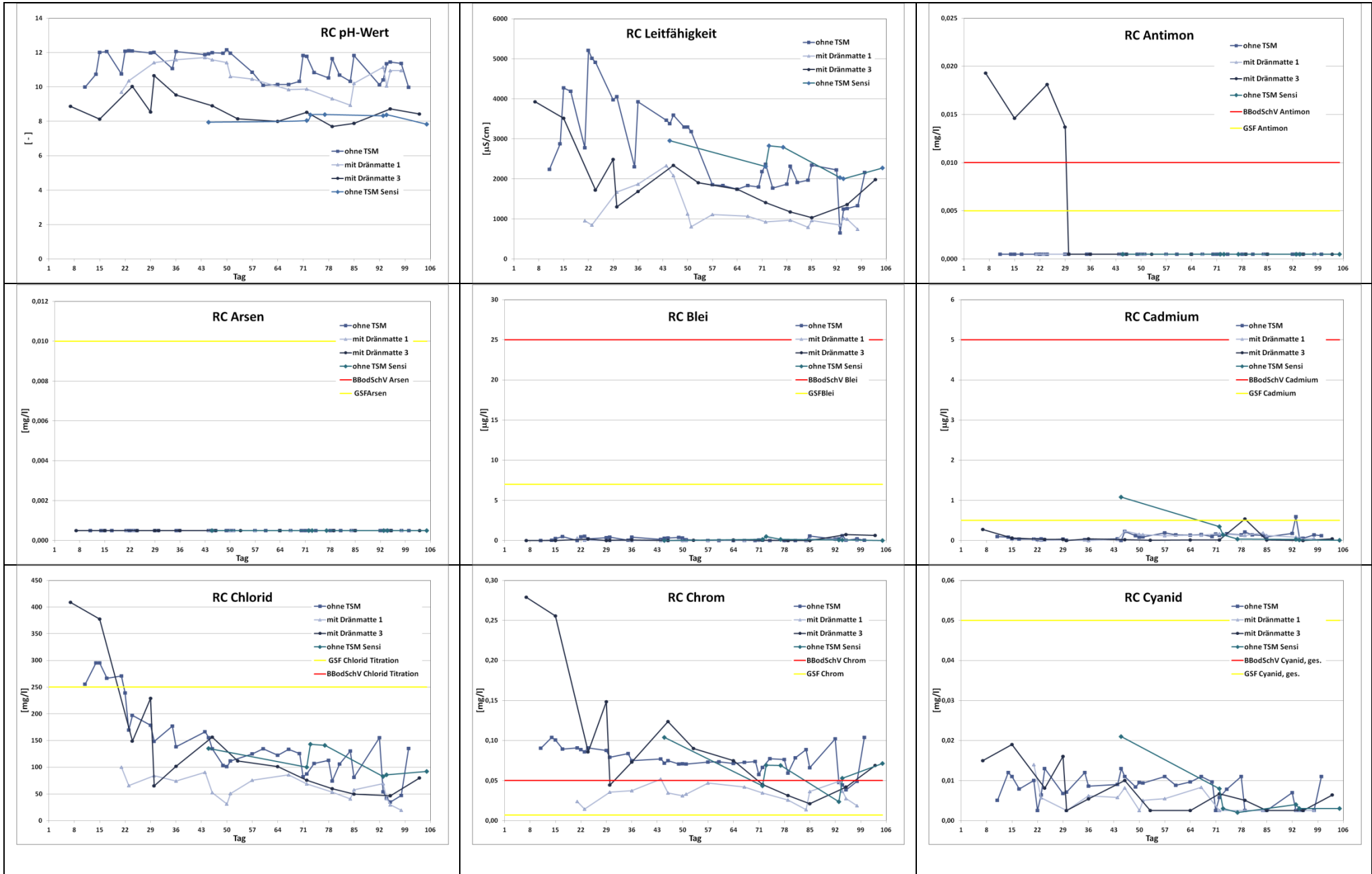
Tab.-A 10: Verteilung des Sickerwassers auf die Saugplatten für GRS und SKA



Tab.-A 11: Konzentration der Inhaltstoffe im Sickerwasser für HMVA (Teil 1)



Tab.-A 12: Konzentration der Inhaltstoffe im Sickerwasser für HMVA (Teil 2)



Tab.-A 13: Konzentration der Inhaltstoffe im Sickerwasser für RC (Teil 1)



Tab.-A 14: Konzentration der Inhaltstoffe im Sickerwasser für RC (Teil 2)



Tab.-A 15: Konzentration der Inhaltstoffe im Sickerwasser für GRS (Teil 1)



Tab.-A 16: Konzentration der Inhaltstoffe im Sickerwasser für GRS (Teil 2)



Tab.-A 17: Konzentration der Inhaltstoffe im Sickerwasser für SKA (Teil 1)



Tab.-A 18: Konzentration der Inhaltstoffe im Sickerwasser für SKA (Teil 2)

	[Tage]	[mg]	[mg]	[µg]	[µg]	[mg]	[mg]	[mg]	[mg]	[mg]	[mg]	[mg]	[mg]	[mg]	[mg]	[mg]	[mg]
	Versuchsdauer	Chlorid Titration	Arsen	Blei	Cadmium	Chrom	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Zink	Thallium	Molybdän	Antimon	Vanadium	Fluorid	Sulfat	Cyanid, ges.
HMVA ohne TSM	105	520140,44	5,58	8051,33	764,39	19,12	27,47	7,15	0,26	52,40	0,26	191,81	44,15	1,04	90,95	1098267,87	3,27
HMVA mit Dränmatte 1	105	113533,43	0,06	139,74	126,28	1,16	4,84	0,91	0,04	4,69	0,04	12,35	3,52	0,18	11,77	81313,40	1,44
HMVA mit Dränmatte 2	105	116921,56	0,08	10,49	91,34	4,89	3,80	1,93	0,08	8,91	0,08	31,81	6,85	0,55	133,35	212213,81	0,55
HMVA mit Dränmatte 3	105	79117,90	0,20	1,37	36,66	1,32	3,08	1,51	0,07	3,21	0,07	8,48	2,00	0,14	98,91	59058,46	0,39
RC ohne TSM	105	58445,28	0,25	126,97	61,45	35,49	45,15	10,20	0,25	2,74	0,25	13,97	0,25	7,00	275,58	48950,45	3,21
RC ohne TSM Sensi	105	11476,25	0,06	8,74	39,26	6,19	2,52	0,75	0,06	0,51	0,06	4,64	0,06	1,21	25,98	90868,71*	0,97*
RC mit Dränmatte 1	105	15932,16	0,13	14,22	24,76	8,17	11,21	2,66	0,13	2,06	0,13	3,71	0,13	2,59	115,84	22113,19	1,27
RC mit Dränmatte 3	105	20746,69	0,09	18,12	25,14	14,25	10,62	2,35	0,09	0,93	0,09	5,28	0,54	6,71	48,93	100324,05	1,19
GRS ohne TSM	105	15963,81	7,27	47,49	24,94	6,62	3,65	0,74	0,24	3,82	0,24	15,14	0,38	2,10	481,63	108028,84	10,82
SKA ohne TSM	105	7663,19	2,76	76,38	11,81	8,23	1,27	1,02	0,28	3,77	0,28	15,21	0,37	14,04	47,29	33905,20	1,73
SKA ohne TSM Sensi	105	1497,60	0,02	9,25	0,30	0,76	0,14	0,24	0,02	0,25	0,02	5,96	0,02	1,89	7,69	14718,39*	0,09*
SKA mit Dränmatte 3	105	6789,12	0,16	105,12	7,51	4,48	1,72	0,95	0,16	3,25	0,16	11,39	0,16	14,83	67,33	24204,97	0,81

*
Werte wurden von einem anderen Labor bestimmt

Tab.-A 19: Gesamtfrachten der Inhaltstoffe bei Versuchsende

Bilder Anhang

- Bild-A 1: Bauweise E: Damm aus schwach durchlässigem Baustoff (FGSV, 2017)
- Bild-A 2: Bautechnische Kenngrößen für Hausmüllverbrennungasche
- Bild-A 3: Bautechnische Kenngrößen für Gießereirestsand
- Bild-A 4: Bautechnische Kenngrößen für Kesselasche
- Bild-A 5: Bautechnische Kenngrößen für RC Material

Tabellen Anhang

- Tab.-A 1: Berechnungsplan HMVA ohne TSM
- Tab.-A 2: Berechnungsplan Sensitivitätsanalyse RC ohne TSM
- Tab.-A 3: Materialwerte für geregelte Ersatzbaustoffe (MantelV, 2017)
- Tab.-A 4: Richt- und Grenzwerte für das Eluat aus Tabelle D.1 (FGSV, 2018)
- Tab.-A 5: Statistische Auswertung der umweltrelevanten Inhaltstoffe im Sickerwasser für die Bauweisen mit HMVA
- Tab.-A 6: Statistische Auswertung der umweltrelevanten Inhaltstoffe im Sickerwasser für die Bauweisen mit RC
- Tab.-A 7: Statistische Auswertung der umweltrelevanten Inhaltstoffe im Sickerwasser für die Bauweisen mit GRS und SKA
- Tab.-A 8: Verteilung des Sickerwassers auf die Saugplatten für HMVA
- Tab.-A 9: Verteilung des Sickerwassers auf die Saugplatten für RC
- Tab.-A 10: Verteilung des Sickerwassers auf die Saugplatten für GRS und SKA
- Tab.-A 11: Konzentration der Inhaltstoffe im Sickerwasser für HMVA (Teil 1)
- Tab.-A 12: Konzentration der Inhaltstoffe im Sickerwasser für HMVA (Teil 2)
- Tab.-A 13: Konzentration der Inhaltstoffe im Sickerwasser für RC (Teil 1)
- Tab.-A 14: Konzentration der Inhaltstoffe im Sickerwasser für RC (Teil 2)
- Tab.-A 15: Konzentration der Inhaltstoffe im Sickerwasser für GRS (Teil 1)
- Tab.-A 16: Konzentration der Inhaltstoffe im Sickerwasser für GRS (Teil 2)
- Tab.-A 17: Konzentration der Inhaltstoffe im Sickerwasser für SKA (Teil 1)
- Tab.-A 18: Konzentration der Inhaltstoffe im Sickerwasser für SKA (Teil 2)
- Tab.-A 19: Gesamtfrachten der Inhaltstoffe bei Versuchsende