

# **Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen**

**Teil 1: Bodenmaterial**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 102**

**bast**

# **Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen**

## **Teil 1: Bodenmaterial**

von

Christine Kellermann-Kinner  
Michael Bürger  
Tanja Marks

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Bergisch Gladbach

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 102**

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

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 Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt F1100.3207034:**  
Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau –  
Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen

### Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0  
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

### Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

### Druck und Verlag

Fachverlag NW in der  
Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9323

ISBN 978-3-95606-270-4

Bergisch Gladbach, Juli 2016

## Kurzfassung – Abstract

### Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen

Bei Straßenbaumaßnahmen werden im Erdbau große Massen bewegt. Nicht immer gelingt der Massenausgleich innerhalb einer Baumaßnahme, sodass 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 ausgebracht werden können.

Die Bundesanstalt für Straßenwesen widmet sich diesem Themenbereich in der Forschungslinie „Die post-fossile Gesellschaft: Verbesserte Nutzung endlicher Ressourcen im Straßenwesen“. 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 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 im Erdbau mit Ersatzbaustoffen technische Sicherungsmaßnahmen (TSM) entwickelt. 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 Sickerwassermenge zu schaffen. Daraus werden Instrumente entwickelt, um die Wirksamkeit der unterschiedlichen technischen Sicherungsmaßnahmen zu beurteilen. Durch die ökonomisch und ökologisch optimierten Bauweisen soll das Potenzial für den Einsatz von Ersatzbaustoffen im Erdbau des Straßenbaus erhöht 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 entwickelt und eine zugehörige Berechnungseinheit. Mit der Anlage wurde ein Instrument geschaffen, um unter vergleichbaren, kontrollierten und zeitge-rasteten Bedingungen verschiedene Kombinationen aus TSM und Ersatzbaustoffen am Ausschnitt einer Böschung im Maßstab 1:1 zu prüfen. Um klimatische Einflüsse weitestgehend auszuschließen, wird die Anlage in einer Versuchshalle aufgestellt, sodass Lysimeteruntersuchungen unter 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 gehört, 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 ersten Versuchsserie wurden ein bindiger und ein kiesiger Boden untersucht. Als TSM wurden eine Dränmatte, eine wasserabweisende Anspritzung mit Bitumen und eine Vergleichsvariante ohne TSM eingesetzt, sodass sich aus der Kombination von zwei Böden und drei Bauweisen insgesamt sechs Versuchsreihen ergeben. Die Lysimeterversuche wurden von September 2011 bis Dezember 2012 durchgeführt. Während der 15-wöchigen Versuchsreihe wurde jeden Tag das Gewicht des Lysimeters und des Oberflächenabflusses ermittelt. Das Sickerwasser wurde gemessen und analysiert. Während dieser Zeit wurden in jeder Woche ein bis drei Regenereignisse durchgeführt.

Die wesentlichen Erkenntnisse zur Wirksamkeit der TSM sind: 1. trotz mehrfacher Bitumenanspritzung konnte für beide Böden die Sickerwassermenge nicht wesentlich reduziert werden und 2. die beste Wirkung hat die Bauweise kiesiger Boden mit Dränmatte erzielt. Dies ist erstaunlich, da diese Bauweise eigentlich nur für Baustoff mit geringer Durchlässigkeit vorgesehen ist.

Die Menge an umweltrelevanten Inhaltsstoffen wird von den beiden Faktoren Konzentration im Sickerwasser und Menge des Sickerwassers bestimmt. Der entscheidende Faktor bei den aufsummierten Frachtkurven ist 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.



### **Efficiency of technical safeguards within earthwork – lysimeter investigations conducted under laboratory conditions**

Large volumes of soil are moved within an earthwork during the construction of a road. Balancing out the volumes is not always possible. In effect, other construction materials are required for the creation of an earthwork. Alternative construction materials, like recyclable building materials, industrial by-products or processed soil, can be used to save natural resources. In addition to the suitability of alternative construction materials for use in constructions, the protection of soil and ground water plays an important role in the selection of construction materials. In order to ensure this, alternative construction materials have to be tested whether environmentally relevant substances could be transmitted to the soil and ground water in substantial quantities through the seepage.

The German Federal Highway Research Institute addresses this theme in the research line 'The post-fossil society: improved utilisation of finite resources in road construction.' The overriding aim of the different research projects is to optimise the use of resources and to assess the impact on the environment.

From the view of civil engineers, their knowledge of water within the road construction is sufficient for the assessment of the suitability for use of construction materials. However, the current level of knowledge is still insufficient for hydrogeological assessment of percolation in view of soil and ground water protection. Notably, the following unanswered questions remain: how much water is absorbed by the road construction and how much water percolates through the road embankment?

To protect soil and ground water, technical safeguards (TSM) have been developed with alternative construction materials within earthworks. These constructions can reduce the quantity of seepage entering the construction and in effect reduce, or even completely prevent, the transmittance of environmentally relevant substances.

The aim of the research projects focused on the percolation of road embankments is to create a reliable database for quantity measurements of percolating water. Out of this instruments can be developed to assess the effectiveness of different TSMs. The potential use of alternative construction materials within earthwork can be raised through the economical and ecological optimisation of construction methods.

The conduction of large-scale tests is the adopted research approach for this project, which aims to assess the effectiveness of TSMs. To this, lysimeters and an appropriate unit of irrigation were developed.

This test system was used to create an instrument to test different combinations of TSMs and alternative construction materials on a section of embankment under comparable, controlled and accelerated conditions on a 1:1 scale. In order to eliminate mostly climatic influences, the test system was set up in a testing facility to enable lysimeter investigations to be conducted under laboratory conditions.

The advantages of conducting lysimeter investigations under laboratory conditions include a water balance that is easier to measure and the possibility of regularly gaining water samples for chemical investigations. The weakness of such investigations is that environmental influences and road drainage cannot be taken into consideration and immeasurable marginal influences may exist. The investigations are also of long duration and require rigorous management and supervision. Due to the dimensions of the lysimeter container not all of the TSMs can be applied.

In this first test series a cohesive and gravelly soil was investigated. As TSM a drainage mat and a water-resistant bitumen spray were used. A control version had no TSM. This produced a total of six possible combinations of the two different soil types and three construction methods. The lysimeter investigations were conducted between September 2011 and December 2012. During the fifteen-week long test series, the weight of the lysimeter and run-off was daily measured. The seepage was measured and analysed. During this time, rain simulations were conducted from one up to three times per week.

The main findings of the effectiveness of TSMs are: 1. despite applications of bitumen spray the quantity of percolating water could not be reduced for both types of soil and 2. the most effective construction method was the use of a drain mat and gravelly soil. This is astonishing as this construction method is actually only intended for building materials with low permeability.

The amount of environmentally relevant substances is determined by both of the factors: concentration in and quantity of the seepage. The determining factor of the load graphs of the sum of the functions is the quantity of seepage; this is influenced by the TSM. It is therefore possible to reduce the transmittance of environmentally relevant substances from a road embankment.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	7	<b>7</b>	<b>Auswertung</b> .....	44
<b>2</b>	<b>Konzept</b> .....	8	7.1	Vergleich der Sickerwasser- mengen. ....	44
<b>3</b>	<b>Grundlagen</b> .....	9	7.2	Vergleich der Mengen an Oberflächenabfluss. ....	49
3.1	Rechtliche Hintergründe beim Einsatz von Ersatzbaustoffen .....	9	7.3	Zusammenfassender Vergleich der Wassermengen .....	54
3.2	Umweltrelevante Inhaltsstoffe. ....	11	7.4	Bitumenanspritzung .....	55
3.3	Technische Sicherungs- maßnahmen .....	11	7.5	Umweltrelevante Inhaltsstoffe. ....	56
3.4	Wasserhaushalt .....	12	<b>8</b>	<b>Bewertung und Diskussion</b> .....	67
3.5	Menge und Intensität von Niederschlägen in Deutschland .....	13	8.1	Analyse der Wassermengen .....	67
<b>4</b>	<b>Lysimeteranlage</b> .....	21	8.2	Umweltrelevante Inhaltstoffe .....	68
4.1	Aufbau .....	21	8.3	Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen .....	69
4.1.1	Lysimeterkasten .....	21	<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	69
4.1.2	Berechnungseinheit .....	23	<b>10</b>	<b>Literatur</b> .....	70
4.2	Regenregime .....	25			
<b>5</b>	<b>Untersuchungsprogramm</b> .....	27			
5.1	Material .....	27			
5.2	Lysimeterversuche .....	28			
5.3	Bauweisen .....	28			
5.4	Umweltrelevante Inhaltsstoffe. ....	29			
<b>6</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	30			
6.1	Material und Einbau .....	30			
6.2	Lysimeterversuche .....	31			
6.2.1	Bindiger Boden .....	31			
6.2.2	Kiesiger Boden .....	36			
6.3	Umweltrelevante Inhaltsstoffe. ....	41			
6.3.1	Feststoffanalysen .....	41			
6.3.2	Untersuchungen am Eluat .....	42			
6.3.3	Sickerwasseranalyse .....	43			

### Anhang

Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen  
BAST-Archiv ELBA unter:  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.



## 1 Einleitung

Bei Straßenbaumaßnahmen werden im Erdbau große Massen bewegt. Nicht immer gelingt der Massenausgleich innerhalb einer Baumaßnahme, sodass 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 „Die postfossile Gesellschaft: Verbesserte Nutzung endlicher Ressourcen im Straßenwesen“. 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 günstiger, so kann ein ökologischer Nutzen mit einem finanziellen Vorteil verbunden werden. 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.

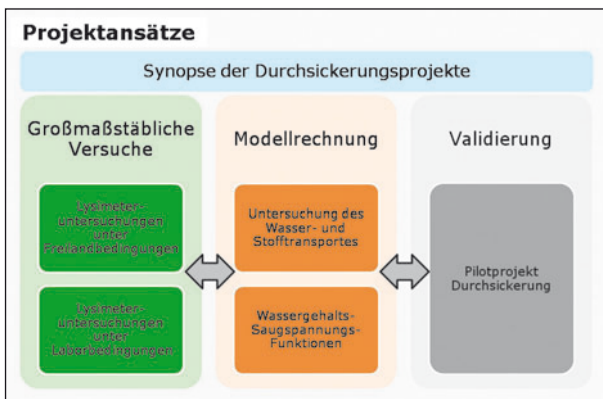
Aus Sicht des Straßenbauingenieurs reicht das vorhandene Wissen über Wasser im Straßenbauwerk für die Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit vollkommen. Für die hydrogeologische Beurteilung der Durchsickerung im Hinblick auf den Boden- und Grundwasserschutz ist der heutige Wissensstand jedoch noch unzureichend. 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 Erdbau technische Sicherungsmaßnahmen entwickelt. Sie sind im „Merkblatt über Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahme beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau“ (M TS E) (FGSV, 2009) 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 Sickerwassermenge zu schaffen. Daraus werden Instrumente entwickelt, um die Wirksamkeit der unterschiedlichen technischen Sicherungsmaßnahmen zu beurteilen. Durch die ökonomisch und ökologisch optimierten Bauweisen soll das Potenzial für den Einsatz von Ersatzbaustoffe 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. Bild 1 zeigt verschiedene Projektansätze der BAST zum Thema Durchsickerung von Straßenböschungen.

Jeder Projektansatz hat seine Stärken und Schwächen. Durch großmaßstäbliche Versuche können



**Bild 1:** Projektansätze zum Thema Durchsickerung innerhalb der Forschungslinie „Die postfossile Gesellschaft: Verbesserte Nutzung endlicher Ressourcen im Straßenwesen“

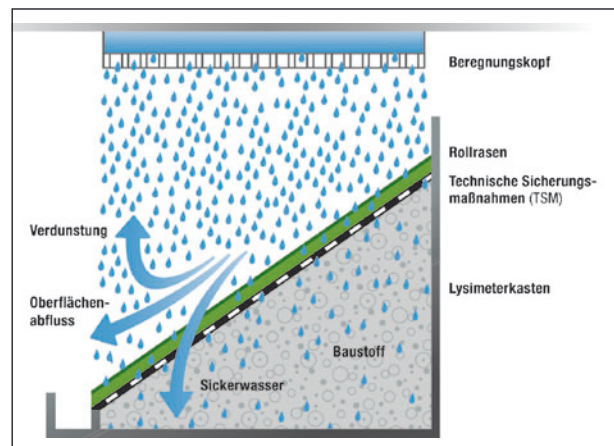
die realen Verhältnisse gut wiedergegeben werden. Der Wasserhaushalt kann gut bilanziert und die Inhaltstoffe des Sickerwassers beprobt werden. Solche Versuche sind jedoch kostenintensiv und langwierig. Es lassen sich nicht alle Einflüsse erfassen und nicht alle Kombinationen von Baustoffen und Sicherungsmaßnahme sind möglich.

Schneller und preisgünstiger sind Modellrechnungen. Die Qualität der Berechnungen 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 zwingend erforderlich. Die Richtigkeit der Werte der großmaßstäblichen Modellversuche wird überprüft und durch eine Modellrechnung des Versuchsdammes werden die Parameter für die Modellierung weiter verbessert. Nur so können zukünftig realitätsnahe Aussagen durch Modellierungen getroffen werden.

Zum Ende der Projekte wird durch eine 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 For-



**Bild 2:** Schematische Darstellung der Lysimeteranlage

schungsansatz der großmaßstäblichen Versuche verfolgt, mit dem Ziel die Wirksamkeit von technischen Sicherungsmaßnahmen (TSM) zu beurteilen. Hierzu wurden Lysimeter und eine zugehörige Beregnungseinheit entwickelt. Mit der Anlage soll ein Instrument geschaffen werden, um unter vergleichbaren, kontrollierten und zeitgerafften Bedingungen verschiedene Kombinationen aus TSM und Ersatzbaustoffen am Ausschnitt einer Böschung zu prüfen. Realisiert werden soll dieser Ausschnitt im Maßstab 1:1. Um klimatische Einflüsse weitestgehend auszuschließen wird die Anlage in einer Versuchshalle aufgestellt, sodass Lysimeteruntersuchungen unter 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 Inhaltstoffe des Sickerwassers analysiert. Eine schematische Darstellung der Lysimeteranlage ist in Bild 2 zu sehen.

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 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 4.

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,
- 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.

In einem ersten Berichtsteil wurde ausführlich über die Entwicklung und Funktionsweise der Lysimeter berichtet (MARKS, 2007). In diesem zweiten Bericht werden die Untersuchungen an zwei aufbereiteten Böden beschrieben, die parallel in einer Lysimeteranlage unter Freilandbedingungen untersucht wurden. Die Ergebnisse unter Freilandbedingungen werden in einem weiteren Bericht veröffentlicht. Im Anschluss an die Untersuchungen mit aufbereiteten Böden, sind weitere Versuchsreihen mit Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten geplant.

In den folgenden Kapiteln werden als erstes die relevanten Grundlagen für Lysimeteruntersuchungen aufgeführt. In einem weiteren Schritt werden

die zu untersuchenden Baustoffe, die Funktion der Anlage, die TSM und das entwickelte Regenregime erläutert. Anschließend werden die Versuchsreihen ausgewertet. Dabei werden sowohl die Menge des Sickerwassers als auch die darin enthaltenen Inhaltsstoffe untersucht. In einem letzten Schritt sollen durch vergleichende Methoden Aussagen über die Wirksamkeit der technischen Sicherungsmaßnahmen getroffen und das Vorgehen bei weiteren geplanten Durchsickerungsversuchen beschrieben werden.

## 3 Grundlagen

### 3.1 Rechtliche Hintergründe beim Einsatz von Ersatzbaustoffen

Den Rahmen für den Einsatz von Ersatzbaustoffen bilden, neben den bautechnischen Notwendigkeiten, die umweltrechtlichen Rahmenbedingungen. Hierauf soll im folgenden Kapitel näher eingegangen werden.

Industrielle Nebenprodukte, Recycling-Baustoffe und aufbereitetes Bodenmaterial können als Ersatzbaustoffe im Straßenbau eingesetzt werden. Sie ersetzen hierbei natürliche Gesteinskörnungen oder natürliche Böden. Von Seiten des Umweltschutzes werden industrielle Nebenprodukte und Recycling-Baustoffe auch den Abfällen zugeordnet. Für den Straßenbauingenieur handelt es sich bei Ersatzbaustoffen in erster Linie um einen Baustoff. Mit der Eigenschaft Abfall oder Produkt sind jedoch unterschiedliche Verpflichtungen verbunden.

Unabhängig von der Definition als Abfall oder Produkt bestehen durch das Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG, 1998) und das Wasserhaushaltsgesetz (WHG, 2009) generell Pflichten für die Schutzgüter Boden und Wasser. Die in diesen Gesetzen meist abstrakt gehaltenen Pflichten bedürfen einer Konkretisierung um als Anforderung an einen Ersatzbaustoff geprüft werden zu können.

Da der Träger der Straßenbaulast gemäß Bundesfernstraßengesetz für seine Bauwerke die eigene Verantwortung trägt, ist es auch für ihn bei den Baustoffen notwendig, Auswirkungen auf Boden und Grundwasser so gering wie möglich zu halten. Daher wird im Straßenbauregelwerk der Einsatz der Baustoffe auch hinsichtlich des Umweltschutzes geregelt. Eine bundesweit einheitliche Regelung besteht dennoch nicht, da in den einzelnen

Bundesländern die umweltrelevanten Anforderungen häufig durch eigene, nicht einheitliche weitere Regelungen konkretisiert sind. Diesem Umstand soll durch die geplante Ersatzbaustoffverordnung abgeholfen werden. Sie ist ein eigenständiger Teil der „Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzbaustoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichen Material“ besser bekannt als Mantelverordnung (MantelV, 2012). Zur Berichtsfassung liegt diese als Entwurf vom 31.10.2012 vor. Insbesondere soll durch die Verordnung der Schutz des Bodens und des Grundwassers beim Einbau von Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke sichergestellt werden.

Grundlage für die Ersatzbaustoffverordnung bildet ein Fachkonzept (SUSSET et al., 2011). Zusammengefasst sind hier folgende zentrale Punkte enthalten:

- Einhaltung von Geringfügigkeitsschwellenwerten im Grundwasser,
- Betrachtungszeitraum für technische Bauwerke 200 Jahre,
- Differenzierung des Untergrundes nach Bodenarten,
- Nutzung der Filterkapazität des Bodens zu 50 %,
- Berücksichtigung der hydraulischen Verdünnungsprozesse innerhalb des technischen Bauwerks und der gemittelten Sickerwasserraten entlang der Bauwerksunterkante,
- Ermittlung der Materialwerte im Säulenkurz-eluat.

Vorgegeben ist, dass die Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS-Werte) für das Grundwasser nach (LAWA, 2004) mit ausreichendem Sicherheitsabstand im Sickerwasser vor Übergang in das Grundwasser eingehalten werden müssen. Die GFS-Werte (Bezugsmaßstäbe) sollen auch nach ausreichend langer Zeit, per Konvention wurden 200 Jahre für technische Bauwerke festgelegt, eingehalten werden. Die 200 Jahre werden auf ein Wasser-Feststoffverhältnis von 2:1 übertragen.

Die Filterkapazität des Untergrundes wird einbezogen. Hierbei wird die den Grundwasserleiter überdeckende Schicht bis zu einem Meter in Abhängigkeit von der Bodenart betrachtet. Durch Anreicherung

von Schadstoffen im Boden könnte die Filterkapazität der rückhaltenden Schicht jedoch aufgebraucht und die bodenschutzrechtlichen Vorsorgewerte im Feststoff überschritten werden. Die Erschöpfung der Filterkapazität wird daher als Bewertungskriterium bei den Rückhalteprozessen betrachtet. Um noch einen Puffer für die Rückhaltung anderer Eintragsquellen zu erhalten, werden im Modell nur 50 % der Filterkapazität in Rechnung gestellt. Bei gut sorbierbaren Stoffen (wie z. B. Blei, Chrom) begrenzt in der Regel die Filterkapazität die maximal zulässige Konzentration beim Wasser-Feststoffverhältnis von 2:1.

Sickerwasser fällt nach Einbau der Ersatzbaustoffe durch den Zutritt von Niederschlagswasser an. Über die Lage des Baustoffs im Bauwerk wird berücksichtigt, welche Mengen an Wasser den Baustoff durchsickern können. Hiervon abhängig ist der Austrag an Stoffen aus dem Bauwerk. Bei Straßendämmen und Schutzwällen mit Ausbildung einer Kapillarschicht finden hydraulische Verdünnungsprozesse statt. Mit der Transportmodellierung wurden relevante Sickerwasserraten an der Unterseite des Bauwerkes ermittelt, was zu einer Erhöhung der zulässigen Konzentration an der Quelle führt. Bei den Einbauweisen werden für Dämme, Lärmschutzwälle und Hinterfüllungen die Bauweisen des M T S E (FGSV, 2009) angegeben. Hinsichtlich des Einsatzes der Baustoffe wird in der Ersatzbaustoffverordnung zwischen den Bauweisen A bis D und E (schwach durchlässiger Baukörper) unterschieden. Die Bauweise F (wasserabweisende Anspritzung) wird nicht aufgeführt (MantelV, 2012). Eine Erläuterung der Bauweisen wird in Kapitel 3.3 ausgeführt. Die Bauweisen A bis D werden im Hinblick auf die Wasserdurchlässigkeit grundsätzlich als gleich gut eingestuft. Bei sehr stark belasteten Mineralstoffen werden geringe Bewertungsunterschiede bzgl. der Langzeitbeständigkeit gemacht. Darüber hinaus ergeben sich wegen der hohen Materialmengen Einschränkungen bei ungünstigen Standorten. Ziel dieses Forschungsprojektes ist es insbesondere Aussagen zur unterschiedlichen Wirkungsweise der Bauweisen des M T S E und so zu realitätsnahen Sickerwassermengen und Inhaltsstoffen zu erreichen. Dadurch können durch eine verbesserte Transportmodellierung die Einbaumöglichkeiten mineralischer Ersatzbaustoffe besser an die Realität angepasst werden.

Um die Eignung der Materialien vor deren Einbau beurteilen zu können, sind Laborverfahren erforderlich, deren Ergebnis im Hinblick auf eine mögliche

Sickerwasserbelastung bewertet werden kann. Für die Ersatzbaustoffverordnung wurden Säulenversuche vorgesehen, da sie als realitätsnahes Untersuchungsverfahren betrachtet werden. Die ausführlichen Säulenversuche nach DIN 19528 eignen sich als Grundlage, um das unterschiedliche Freisetzungsverhalten der Schadstoffgruppen zu kategorisieren. Die in der Verordnung festgelegten Materialwerte beziehen sich auf den sogenannten Säulenkurztest (DIN 19528, 2009), bei dem das Eluat bis zum Wasser-Feststoffverhältnis von 2:1 (WF-2-Eluat) gesammelt wird. Durch computergestützte Berechnungen wurde ermittelt, welche maximale Konzentration für die rückhaltenden Bodenschicht über dem Sickerwasser einwirken kann. Ergebnis dieses Schrittes ist eine maximale Konzentration (Materialwert), die das WF-2-Eluat aufweisen darf, um das Modellkriterium „Einhaltung des Bezugsmaßstabes“ für 200 Jahre einzuhalten.

Die baustoffspezifischen Materialwerte beziehen sich auf das Eluat, bei bestimmten Baustoffen werden zusätzlich Anforderungen an die Feststoffgehalte festgelegt. Die Materialwerte sollen sicherstellen, dass unter Berücksichtigung der Abbau- und Rückhalteprozesse auf der Sickerstrecke im Boden die an den Geringfügigkeitsschwellen (in der Grundwasserverordnung der MantelIV als Prüfwerte bezeichnet) ausgerichteten Stoffkonzentrationen im Grundwasser nicht überschritten werden. Unter Einbeziehung von mehr oder weniger wasserdurchlässigen Bauweisen und in Abhängigkeit vom hydrogeologischen Standort, werden den jeweiligen Ersatzbaustoffen zulässige Bauweisen bzw. Einsatzmöglichkeiten zugewiesen (MantelIV, 2012).

### 3.2 Umweltrelevante Inhaltsstoffe

Die Beurteilung der umweltrelevanten Inhaltsstoffe im Sickerwasser erfordert eine Betrachtung des Freisetzungsverhaltens dieser Stoffe. Die wissenschaftlichen Grundlagen dafür wurden im BMBF-Forschungsverbund Sickerwasserprognose geschaffen und – wie auch zuvor dargestellt – von (SUSSET et al., 2011) mit berücksichtigt. Bei der materialübergreifenden Betrachtung des Freisetzungsverhaltens von Stoffen aus mineralischen Ersatzbaustoffen können im Wesentlichen zwei verschiedene Quellertypen unterschieden werden. Salze und mobile Anteile von Metallen zeigen i. d. R. ein rasches Abklingen der Konzentration mit zunehmendem Wasser-Feststoffverhältnis bis teilweise unter die Geringfügigkeitsschwellen. Sie

werden daher als „endliche Quellen“ bezeichnet. Das Konzentrationsabklingen geschieht durch Auflösungs-, Auswaschungs- und Abreicherungsprozesse. In der Realität können bei großen Materialschichten wie z. B. Straßendämmen die Abreicherungszeiträume Jahrzehnte betragen.

Bei Schwermetallen schließt sich an die anfängliche Abklingphase der leichtlöslichen Anteile oftmals ein langanhaltendes Abflauen mit konstanten Konzentrationen an. Man spricht hier von „quasi unendlichen Quellen“. Die Quellstärke von organischen, stark sorbierenden Verbindungen wie z. B. PAK ist zeitlich nahezu konstant. Numerische Berechnungen der zeitlichen Quellstärkeentwicklung zeigen, dass für sorptive Metalle die Abflaudauer in der Größenordnung von Jahrhunderten liegen kann. Eine starre Zuordnung ist nicht immer möglich. Chrom und Molybdän klingen beispielsweise nach anfänglicher Abreicherung der mobilen Bestandteile relativ langsam ab und liegen bei einigen Ersatzbaustoffen nach den Modellen des Fachkonzeptes oberhalb der GFS-Werte. Chlorid und Sulfat unterliegen dagegen in der Transportzone keinen relevanten Rückhalteprozessen (SUSSET et al., 2011).

### 3.3 Technische Sicherungsmaßnahmen

Technische Sicherungsmaßnahmen sind bautechnische oder konstruktive Maßnahmen, die geeignet sind den Schutz von Boden, Grundwasser und Oberflächengewässer beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen sicherzustellen (FGSV, 2009). Hierfür gibt es unterschiedliche Konzepte. Zum einen ist es möglich, den Austrag umweltrelevanter Inhaltsstoffe durch Bindung an den Baustoff selbst zu minimieren, wie es im „Merkblatt über die Behandlung von Böden und Baustoffen mit Bindemitteln zur Reduzierung der Eluierbarkeit umweltrelevanter Inhaltsstoffe“ (FGSV, 2009) beschrieben ist. Zum anderen kann die Menge des eintretenden Sickerwassers minimiert werden und dadurch der Austrag an diesen Inhaltsstoffen. In diesem Bericht wird der Weg der Minimierung der Sickerwassermengen betrachtet.

Grundlage bildet das FGSV „Merkblatt über Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau – M T S E“ (FGSV, 2009). Hierin werden verschiedene



Abdichtungssysteme beschrieben. Die Verwendung des Begriffs System wurde bewusst gewählt, da für die bautechnischen Notwendigkeiten und umwelttechnisch Wirksamkeit die Betrachtung des gesamten Bauwerkes notwendig ist. Ein Abdichtungssystem besteht aus einem Dichtungselement wie z. B. einer mineralischen Abdichtung, einer geosynthetischen Tondichtungsbahn, einer Kunststoffdichtungsbahn oder einer wasserabweisenden Anspritzung und den gegebenenfalls erforderlichen Sicker-, Schutz-, Stütz-, Trenn- und Filterschichten. Die Hauptanwendung wird in Straßendämmen und Schutzwällen gesehen. Fahrbahndecken werden bei den Bauweisen grundsätzlich als dicht angesehen, sodass auf ein Dichtelement unterhalb des Fahrbahnkörpers verzichtet wird. Abbildungen aller Bauweisen befinden sich im Anhang (Bild-A 1 bis Bild-A 5).

Aufgrund des im Rahmen dieses Forschungsprojektes gewählten Untersuchungsansatzes mit Lysimetern unter Laborbedingungen und der hiermit verbundenen begrenzten Größe des Lysimeterkastens werden die Bauweise A: Damm mit witterungsempfindlichen Dichtungselement (Bild-A 1) und B: Damm mit witterungsempfindlichen Dichtungselementen und Sickerschicht (Bild-A 2) nicht in die vorliegenden Untersuchungen einbezogen. Das mineralische Dichtungselement hat bei diesen Bauweisen eine Dicke von 50 cm und benötigt eine Überdeckung, die mit mindestens 1,5 m Dicke aus Dammbaustoffen und einer Oberbodenschicht vorgesehen ist.

Auf eine Untersuchung der Bauweise C mit witterungsunempfindlichem Dichtungselement (Bild-A 3) wird ebenfalls verzichtet, da die Dichtheit von Kunststoffdichtungsbahnen bei sachgerechtem Einbau nicht angezweifelt wird.

Bauweise D beinhaltet den Einbau des Ersatzbaustoffes im Kern des Straßenbauwerkes, also unter der undurchlässigen Fahrbahndecke. Da im Rahmen dieses Forschungsprojektes der Schwerpunkt auf der Erfassung der Prozesse im Böschungsbe-  
reich gelegt ist, passt diese Bauweise nicht in die Untersuchungsstrategie und wird daher nicht einbezogen.

Auch wenn die Bauweisen A bis C zur Reduzierung der Sickerwassermengen geeignet sind, bestehen andererseits Kritikpunkte hinsichtlich der bautechnischen Umsetzung sowie der notwendigen finanziellen Mittel zur Realisierung dieser Bauweisen. Eine Entscheidung, welche Bauweise im jeweiligen

Anwendungsfall zu realisieren ist, kann nicht pauschal beantwortet werden. Es ist aber eine Möglichkeit zu schaffen, verschiedene Bauweisen, deren Wirksamkeit ggf. weiter belegt werden muss, zur Wahl anzubieten. Welche Bauweisen sich durchsetzen, ist letztendlich abhängig von der Praxis. Je leichter und günstiger eine Maßnahme jedoch umzusetzen ist, desto besser sind die Chancen des Einsatzes von Ersatzbaustoffen bei gleichzeitigem Schutz von Boden und Grundwasser.

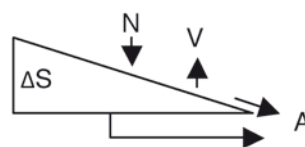
Näher untersucht werden sollen daher die Bauweise E (Bild-A 4) und F (Bild-A 5). Bauweise E beinhaltet einen schwach durchlässigen Baukörper. Zur schnellen Ableitung des Niederschlagswassers ist eine mineralische Sickerschicht oder eine Dränmatte auf dem schwach durchlässigen Körper vorgesehen. Die Bauweise F erhält eine wasserabweisende Anspritzung. In der Praxis werden hierfür Anspritzungen mit mindestens 0,8 kg/m<sup>2</sup> Bitumenemulsion eingesetzt. Diese beiden Bauweisen können gut in die Lysimeterkästen eingebaut werden, da ihre Wirkung nicht mit großen Schichtdicken anderer Baustoffe verbunden ist. Um die Wirksamkeit der Bauweisen beurteilen zu können ist gleichermaßen zu testen, welche Ergebnisse ohne Technische Sicherungsmaßnahme erhalten werden.

### 3.4 Wasserhaushalt

Für das Verständnis der Durchsickerung von Straßenböschungen ist eine Betrachtung des komplexen Systems Feststoff-Wasser-Luft notwendig. Für Böden sind die Beziehungen in diesem System gut beschrieben. Da in diesem Projekt nur die Wasserbilanz betrachtet wird und nicht der Strömungsverlauf im Lysimeter, wird zu Fragen der Bodenmatrix und ihrer Wechselwirkungen auf die Bodenphysikalische auf die Grundlagenliteratur verwiesen (SCHEFFER et al., 2010; HARTGE et al., 2009).

Die Wasserbilanz im Lysimeter lässt sich auf die hydrologische Grundgleichung oder die Wasserhaushaltsgleichung zurückführen.

$$N = V + \Delta S$$



mit

$N$  = Niederschlag

V = Verdunstung

A = Abfluss

$\Delta S$  = Wasservorratsänderung

Übertragen auf die Lysimeterversuche entspricht N der Menge des aufgebrachtens Regens. Der Abfluss wird als Oberflächenabfluss und als Sickerwasser gesammelt und gemessen. Die Wasservorratsänderung setzt sich zusammen aus dem gemessenen Sickerwasser und der Gewichtsänderung des Lysimeters. Diese drei Werte lassen sich im Projekt gut bestimmen. Die Verdunstung setzt sich zusammen aus der Transpiration des Rollrasens und Verdunstungsverlusten im Schlauchsystem des Lysimeters. Diese wird im Projekt aus der Differenz der drei anderen Größen berechnet.

Zur besseren Übersicht werden die wichtigsten Messgrößen des Regens und ihre Umrechnungsfaktoren hier kurz erläutert.

Die Menge des gefallenen Regens wird als Niederschlagshöhe angegeben. Diese besagt, wie hoch flüssiger Niederschlag eine horizontale Erdoberfläche in einer Betrachtungszeitspanne bedecken würde, wenn nichts von dieser Fläche abfließen, verdunsten oder versickern könnte. Wird z. B. eine Niederschlagshöhe von 1 mm gemessen, so entspricht dieser Wert einer Niederschlagsmenge von 1 Liter pro Quadratmeter. Die Umrechnung geschieht mit folgender Formel:

$$1 \frac{\text{l}}{\text{m}^2} = 1 \frac{10^{-3} \text{m}^3}{\text{m}^2} = 1 \cdot 10^{-3} \text{m} = 1 \text{ mm}$$

Als Niederschlagsspende wird das Volumen des in einer bestimmten Zeitspanne auf eine bestimmte Fläche gefallenen Niederschlags, dividiert durch das Produkt aus dieser Zeitspanne und dieser Fläche (angegeben in l/(s · ha)) bezeichnet. Bei bekannter Dauer lässt sich aus der Niederschlagsspende die Niederschlagsmenge aus folgender Formel errechnen:

$$1 \frac{\text{l}}{(\text{s} \cdot \text{ha})} = 1 \frac{10^{-3} \text{m}^3}{(\text{s} \cdot 10^4 \text{m}^2)} = 1 \frac{10^{-7} \text{m}}{\text{s}} = 1 \frac{10^{-4} \text{mm}}{\frac{\text{min}}{60}} = 6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

Da bei der Lysimeteranlagen die Wassermengen als Massen erfasst werden und das Lysimeter eine festgelegte Grundfläche von 0,76 m x 1,44 m hat, lassen sich die Niederschlagsspenden wie folgt in Wassermenge umrechnen, die auf das Lysimeter zu verregnen sind:

$$1 \frac{\text{l}}{(\text{s} \cdot \text{ha})} \cdot 0,76 \text{ m} \cdot 1,44 \text{ m} = 1 \frac{10^{-3} \text{m}^3}{(\text{s} \cdot 10^4 \text{m}^2)} \cdot 1,0944 \text{ m}^2 =$$

$$1,0944 \frac{10^{-7} \text{m}^3}{\frac{\text{min}}{60}} = 6,5664 \cdot 10^{-3} \frac{10^{-3} \text{mm}}{\text{min}} = 6,5664 \cdot 10^{-3} \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

Unter der Annahme, dass ein Liter Wasser einem Kilogramm entspricht, lassen sich so aus den im Regenregime festgelegten Niederschlagsspenden die Wassermengen ermitteln, die mit dem Beregnungskopf auf das Lysimeter aufgebracht werden müssen.

### 3.5 Menge und Intensität von Niederschlägen in Deutschland

Regen und die Entstehung von Sickerwasser bilden einen unmittelbaren Zusammenhang. Hierbei wirken sich sowohl die Menge, als auch die Intensität des Regens auf die Menge des Sickerwassers aus. Für die Erstellung des Regenregimes (siehe Kapitel 4.2) zur Beregnung der Hallenlysimeter sollte daher eine möglichst große Bandbreite verschiedener in Deutschland vorkommender Niederschlagsereignisse betrachtet werden. Hierfür wurden Beratungsgespräche mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) geführt. Auf Grundlage dieser Besprechungen und der Ergebnisse im Zuge eigener Recherchen und Überlegungen wurden die Standorte Bremen, Neuruppin, Würzburg, Augsburg und Kempten ausgewählt und zugehörige Wetterdaten des DWD herangezogen. Die Charakterisierung dieser Standorte ist in Tabelle 1 dargestellt.

Folgende DWD-Wetterdaten wurden zu den Standorten Bremen, Neuruppin, Würzburg, Augsburg und Kempten betrachtet und ausgewertet:

- mittlerer Jahresniederschlag,
- Menge der Niederschlagsereignisse mit Intensitäten von > 0,1 mm/5 min bis > 20 mm/5 min,
- Anzahl der Niederschlagsereignisse mit Intensitäten von > 0,1 mm/5 min bis > 20 mm/5 min,

Standort	Charakteristik
Bremen	Mittlerer Jahresniederschlag, häufige Nieselregen
Neuruppin	Geringer Jahresniederschlag, relativ trocken
Würzburg	Mittlerer Jahresniederschlag, extreme Niederschlagsintensitäten mit kurzer Andauer
Augsburg	Mittlerer Jahresniederschlag (Vergleich mit Freilandlysimetern Augsburg)
Kempten	Hoher Jahresniederschlag, extreme Niederschlagsintensitäten mit langer Andauer

Tab. 1: Charakterisierung ausgewählter Standorte hinsichtlich der Niederschläge

- Niederschlagshöhen und Niederschlagsspenden nach Kostra-DWD-2000 (BARTELS et al., 2005),
- Dauer von Trockenphasen.

In Tabelle 2 wird der mittlere Jahresniederschlag der fünf Standorte dargestellt. Dieser ist für die Festlegung der Regenmenge, die im Zuge des Regenregimes abgerechnet werden soll, von Bedeutung. Für den Zeitraum von 1961 bis 1990 weisen die in Tabelle 2 aufgezeigten Standorte die mittleren Jahresniederschläge auf (Tabelle DWD 1961 bis 1990).

Der mittlere Jahresniederschlag der fünf Standorte beträgt 781,9 mm. Damit entspricht dieser in etwa dem mittleren Jahresniederschlag von Deutschland, der nach Angaben des DWD für den o. g. Zeitraum 789,0 mm beträgt.

Für die fünf Standorte wurden vom DWD umfangreiche Datensätze zur Verfügung gestellt. Den Datensätzen liegen geringfügig unterschiedliche Messzeiträume an den einzelnen Standorten zugrunde, die in Tabelle 3 aufgeführt sind. Es ist zu sehen, dass der Messzeitraum an den Standorten Bremen, Neuruppin, Würzburg und Kempten knapp 12 Jahre und an dem Standort Augsburg knapp 8 Jahre beträgt.

Standort	[mm]	Schwankungsbereich [mm]
Bremen	713,0*	638,8 – 753,2
Neuruppin	510,9	
Würzburg	613,6*	587,7 – 637,7
Augsburg	798,4*	749,7 – 834,0
Kempten	1.273,4	
<b>Mittelwert</b>	<b>781,9</b>	
* Mittelwert verschiedener am Standort befindlicher Messstationen		

Tab. 2: Mittlerer Niederschlag an den ausgewählten Standorten

Standort	Messzeitraum
Bremen	Feb.'93 – Dez.'04
Neuruppin	Feb.'93 – Dez.'04
Würzburg	Feb.'93 – Dez.'04
Augsburg	Feb.'97 – Dez.'04
Kempten	Jan.'93 – Dez.'04

Tab. 3: Messzeiträume der Niederschläge an den ausgewählten Standorten

Die vom DWD zur Verfügung gestellten Datensätze, die die Dauer von Niederschlagsereignissen mit Intensitäten von  $> 0,1 \text{ mm/5 min}$  bis  $> 20 \text{ mm/5 min}$  (14 Intensitätsstufen) für die einzelnen Standorte angeben wurden weiter ausgewertet.

Durch Umrechnung wurden aus diesen DWD-Daten die Niederschlagsmengen und die Niederschlagsspenden ermittelt. Die Niederschlagsmengen sind, sortiert nach Niederschlagsdauer und Niederschlagsspende, für die fünf Standorte in Tabelle 4 dargestellt.

Die Niederschlagsmenge ist als „ $x \text{ mm}$ “ angegeben. Dies ergibt sich aus der Umrechnung o. g. Intensitäten und bedeutet, dass eine größere als die angegebene Regenmenge für die jeweilige Niederschlagsdauer gemessen wurde.

Es ist zu erkennen, dass bei den aufgetretenen Niederschlagsereignissen stärkere Niederschlagsereignisse nur relativ geringe Niederschlagsdauern aufweisen. Bei Niederschlagsdauern zwischen 5 Minuten und 20 Minuten wurden die stärksten Niederschlagsereignisse in Würzburg gemessen (rote Zahlen). Die größte Niederschlagsspende beträgt  $667 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$ . Dabei wurde eine Niederschlagsmenge von 20 mm abgerechnet.

Bei Niederschlagsdauern zwischen 20 Minuten und 60 Minuten treten die stärksten Niederschlagsereignisse in Kempten auf. Die größte Niederschlagsspende beträgt  $166,67 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$ . Hier wurden Niederschlagsmengen zwischen 6 mm und 25 mm gemessen.

Die an allen fünf Standorten gemessenen größten Niederschlagsmengen sind für die jeweilige Niederschlagsdauer als blaue Zahlen dargestellt.

Tendenziell nehmen die Niederschlagsmengen bei zunehmender Niederschlagsdauer ab.

In Anlehnung an den vorherigen Aussagen sind anstelle der Niederschlagsmengen die Anzahl der Niederschlagsereignisse für die fünf Standorte sortiert nach Niederschlagsdauer und Niederschlagsspende in den Tabellen 5 bis 9 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass mit Zunahme der Niederschlagsspende und Niederschlagsdauer die Häufigkeiten der jeweiligen Niederschlagsereignisse abnehmen. Der weitaus größte Teil der Niederschlagsereignisse weist Niederschlagsspenden  $\leq 166,67 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$  und Niederschlagsdauern von  $\leq 35 \text{ min}$  auf (siehe roten Bereich). Lediglich Nie-

Niederschlags- spende [l/s·ha]	Niederschlagsdauer [min]											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
> 3,33	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
> 16,67	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0 B W A	5,5 B N A K	6,0 B W K
> 33,33	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0 B W A K	7,0 B W A K	8,0 N A K	9,0 B W K	10,0 W K	11,0 K	
> 50,00	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5 B W A K	9,0 B W A K		12,0 N A K				
> 66,67	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0 B W A K	12,0 W	14,0 N A K	16,0 K				
> 116,67	3,5	7,0	10,5 B W A K	14,0 N W A K		21,0 K						
> 166,67	5,0	10,0	15,0 K	20,0 N W K	25,0 K							
> 250,00	7,5 B N A K	15,0 B A K	22,5 N W	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p><b>Niederschlagsmenge</b>                      Zahl: [&gt; x mm]    B: Bremen                      N: Neuruppin    A: Augsburg                      W: Würzburg    K: Kempten</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Schwarze Zahl: gemessenen Niederschlagsmenge (in mm) an der Messstation des Standortes                      Blaue Zahl: größte Niederschlagsmenge (in mm) für die jeweilige Niederschlagsdauer, die bei allen 5 Messstationen gemessen wurde                      Rote Zahl: größte gemessene Niederschlagsmenge (in mm) für die jeweilige Niederschlagsdauer</p> </div>								
> 333,33	10,0 B N K	20,0 A	30,0 W									
> 500	15,0 K	30,0 W										
> 666,67	20,0 W											

Tab. 4: Auswertung der Niederschläge an fünf Standorten in Deutschland

derschlagsereignisse mit kleinen Niederschlags-spenden von 3,33 l/(s · ha) treten häufiger auch mit größeren Niederschlagsdauern auf. Alle übrigen Niederschlagsereignisse treten im gemessenen Zeitraum nur untergeordnet auf (grüner Bereich).

In den DWD-Datensätzen weisen nur Niederschlagsereignisse mit Niederschlagsspenden < 33,33 l/(s · ha) Niederschlagsdauern > 60 min auf. Das Niederschlagsereignis mit der größten Niederschlagsdauer wurde in Kempten registriert. Die Niederschlagsdauer betrug 730 min (rd. 12,2 Std.) bei einer Niederschlagsspende von 3,33 l/(s · ha). Die übrigen Standorte weisen deutlich geringere Niederschlagsdauern auf.

Neben den in überwiegend moderaten Niederschlagsdaten des DWD werden auch die Niederschlagshöhen und -spenden aus KOSTRA-DWD-

2000 (BARTELS et al., 2005) in die Betrachtung einbezogen, um ergänzend auch extreme Niederschlagsereignisse der ausgewählten Standorte über einen längeren Zeitraum zu berücksichtigen. Bei diesen Niederschlagsdaten handelt es sich um Starkregenauswertungen, wobei die Niederschlagshöhen und -spenden bei verschiedenen Niederschlagsandauern zwischen 5 Minuten und 72 Stunden und bei verschiedenen Wiederkehrzeiten zwischen 0,5 Jahren und 100 Jahren aus Tabellen (Datenblätter) für zahlreiche Standorte abgegriffen werden können. Der Auswertungszeitraum erstreckt sich von 1951 bis 2000.

Generell sind bei den KOSTRA-Datenblättern folgende Zusammenhänge vorhanden:

- Je höher die Wiederkehrzeit, desto größer sind die Niederschlagshöhen und -spenden.

Bremen	Niederschlagsdauer [min]											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Niederschlagsspende [l/s · ha]												
> 3,33	3.179	1.178	565	341	218	131	87	60	48	51	34	34
> 16,67	562	243	86	50	25	9	9	4	2	2	3	1
> 33,33	223	102	27	14	5	5	1		1			
> 50,00	136	63	13	4	1	2						
> 66,67	97	23	6	3	2							
> 116,67	27	8	2									
> 166,67	11	4										
> 250,00	4	1										
> 333,33	1											

[Anzahl] Anzahl der Niederschlagsereignisse ≥ 10

[Anzahl] Anzahl der Niederschlagsereignisse < 10

Tab. 5: Anzahl der Niederschlagsspenden bei bestimmten Niederschlagsdauern für den Standort Bremen

Neuruppin	Niederschlagsdauer [min]											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Niederschlagsspende [l/s · ha]												
> 3,33	2.500	853	405	225	133	99	61	40	26	23	17	16
> 16,67	413	164	53	27	17	4	2	2	2		2	
> 33,33	169	45	16	5	2			1				
> 50,00	85	19	10	1				1				
> 66,67	41	16	2				1					
> 116,67	15	3		1								
> 166,67	9	2		1								
> 250,00	5		1									
> 333,33	1											

[Anzahl] Anzahl der Niederschlagsereignisse ≥ 10

[Anzahl] Anzahl der Niederschlagsereignisse < 10

Tab. 6: Anzahl der Niederschlagsspenden bei bestimmten Niederschlagsdauern für den Standort Neuruppin

Würzburg	Niederschlagsdauer [min]											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Niederschlagsspende [l/s·ha]												
> 3,33	2.582	866	428	228	156	108	71	59	36	41	32	21
> 16,67	389	152	65	25	15	11	9	5	1	2		3
> 33,33	175	66	16	7	8	6	1		1	1		
> 50,00	131	35	10	4	3	1						
> 66,67	75	28	5	5	1	1						
> 116,67	26	7	1	1								
> 166,67	14	2		1								
> 250,00			1									
> 333,33			1									
> 500		1										
> 666,67	1											

[Anzahl] Anzahl der Niederschlagsereignisse  $\geq 10$

[Anzahl] Anzahl der Niederschlagsereignisse  $< 10$

Tab. 7: Anzahl der Niederschlagsspenden bei bestimmten Niederschlagsdauern für den Standort Würzburg

Augsburg	Niederschlagsdauer [min]											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Niederschlagsspende [l/s·ha]												
> 3,33	2.049	831	454	305	191	138	113	99	61	47	45	27
> 16,67	279	177	60	29	24	11	7	4	3	4	1	1
> 33,33	127	56	15	11	5	5	1	1				
> 50,00	65	14	1	7	3	1		1				
> 66,67	37	6	8	5	1		1					
> 116,67	12	6	4	3								
> 166,67	9	6										
> 250,00	4	1										
> 333,33	1											

[Anzahl] Anzahl der Niederschlagsereignisse  $\geq 10$

[Anzahl] Anzahl der Niederschlagsereignisse  $< 10$

Tab. 8: Anzahl der Niederschlagsspenden bei bestimmten Niederschlagsdauern für den Standort Augsburg

Kempten	Niederschlagsdauer [min]											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Niederschlagsspende [l/s·ha]												
> 3,33	5.105	1.843	988	961	464	301	212	167	157	91	82	68
> 16,67	661	339	136	84	36	24	15	8	7	5	2	1
> 33,33	274	99	47	24	5	6	1	2	1	1	1	
> 50,00	163	49	24	6	4			3				
> 66,67	84	34	12	6	1		1	1				
> 116,67	37	8	3	1		2						
> 166,67	15	4	1	1	1							
> 250,00	7	1										
> 333,33	1											
> 500	1											

[Anzahl] Anzahl der Niederschlagsereignisse  $\geq 10$

[Anzahl] Anzahl der Niederschlagsereignisse  $< 10$

Tab. 9: Anzahl der Niederschlagsspenden bei bestimmten Niederschlagsdauern für den Standort Kempten



- Je länger die Andauer des Niederschlags bei einer bestimmten Wiederkehrzeit, desto größer ist die Niederschlagshöhe und desto kleiner ist die zugehörige Niederschlagsspende (siehe Tabellen 10 und 11).

In Tabelle 10 werden von den fünf betrachteten Standorten jene mit den größten Niederschlagshöhen und -spenden für ausgewählte Niederschlagsandauern und Wiederkehrzeiten dargestellt. Dabei wurde die Niederschlagsandauer so gewählt, dass zwar einzelne Andauerstufen aus Gründen der Übersichtlichkeit entfallen sind, jedoch die Breite des Spektrums erhalten geblieben ist. Bei den Wiederkehrzeiten wurden die Niederschlagsdaten mit kleinster (0,5 Jahre) und größter (100 Jahre) Wiederkehrzeit berücksichtigt, um auch hier das größtmögliche Niederschlagsspektrum abbilden zu können. Dabei spiegeln die Niederschlagsangaben mit einer Wiederkehrzeit von 0,5 Jahren für die jeweiligen Standorte nahezu übliche Niederschlagsereignisse wider, während die Niederschlagsangaben mit einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren die extremsten Niederschlagsereignisse nach KOSTRA (BARTELS et al., 2005) darstellen.

Bei einer Wiederkehrzeit von 0,5 Jahren treten die größten Niederschlagshöhen und -spenden in Kempten auf. Bei einer Wiederkehrzeit von 100

Jahren treten bei Niederschlagsandauern zwischen 5 Minuten und 1 Stunde die größten Niederschlagshöhen und -spenden in Würzburg auf und bei 12 Stunden bis 72 Stunden in Kempten.

Um nicht nur Extreme einzelner Standorte zu erfassen, werden auch die Mittelwerte der Niederschlagshöhen und -spenden mit den Wiederkehrzeiten 0,5 Jahre, 10 Jahre und 100 Jahre für alle 5 Standorte dargestellt (Tabelle 11).

Im Vergleich mit den mittleren Niederschlagshöhen bei einer Wiederkehrzeit von 0,5 Jahren liegen die mittleren Niederschlagshöhen bei einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren etwa um den Faktor 2,5 (bei langer Andauer) bis 4 (bei kurzer Andauer) höher.

Um einen Zusammenhang zwischen den Hallenversuchen in der BAST und den Freilandversuchen in Augsburg herstellen zu können sind für den Standort Augsburg in Tabelle 12 auch häufig auftretende Niederschläge mit einer Wiederkehrzeit von 0,5 Jahren und ausgewählten Niederschlagsandauern dargestellt.

Beim Vergleich mit den Niederschlagswerten in den Tabellen 11 und 12 liegen die Niederschlagswerte für Augsburg zwischen den Extremwerten und den Mittelwerten aller fünf Standorte.

<b>KOSTRA – Wiederkehrzeit 0,5 Jahre</b>			
<b>Ort</b>	<b>Andauer</b>	<b>Niederschlagshöhe [mm]</b>	<b>Niederschlagsspende [l/s·ha]</b>
Bremen/Kempten	5 Min	3,7	122,8
Kempten	15 Min	8,7	96,9
Kempten	30 Min	12,2	67,6
Kempten	1 Std	14,7	40,9
Kempten	12 Std	34,5	8,0
Kempten	24 Std	45,8	5,3
Kempten	48 Std	60,9	3,5
Kempten	72 Std	68,4	2,6
<b>KOSTRA – Wiederkehrzeit 100 Jahre</b>			
Würzburg	5 Min	18,0	600,8
Würzburg	15 Min	29,9	332,2
Würzburg	30 Min	39,3	218,6
Würzburg	1 Std	50,2	139,4
Kempten	12 Std	95,8	22,2
Kempten	24 Std	114,7	13,3
Kempten	48 Std	138,0	8,0
Kempten	72 Std	157,1	6,1

**Tab. 10:** Extremwerte für ausgewählte Wiederkehrzeiten und Niederschlagsandauern

Andauer	Niederschlagshöhe [mm]	Niederschlagsspende [l/s·ha]
<b>KOSTRA – Wiederkehrzeit 0,5 Jahre – Mittelwerte aller 5 Standorte</b>		
5 Min	3,4	113,4
15 Min	7,4	81,9
30 Min	9,8	54,6
1 Std	11,3	31,4
6 Std	19,4	9
12 Std	23,8	5,5
24 Std	29,0	3,4
48 Std	37,5	2,2
72 Std	42,7	1,6
<b>KOSTRA – Wiederkehrzeit 10 Jahre – Mittelwerte aller 5 Standorte</b>		
5 Min	9,4	311,9
15 Min	17,0	188,8
30 Min	23,0	127,4
1 Std	29,3	81,4
6 Std	44,9	20,8
12 Std	53,2	12,3
24 Std	62,1	7,2
48 Std	75,6	4,4
72 Std	82,5	3,2
<b>KOSTRA – Wiederkehrzeit 100 Jahre – Mittelwerte aller 5 Standorte</b>		
5 Min	13,9	464,4
15 Min	24,4	270,9
30 Min	33,0	183,4
1 Std	43,1	119,8
6 Std	64,5	29,9
12 Std	75,7	17,5
24 Std	87,5	10,1
48 Std	104,9	6,1

Tab. 11: Mittelwerte aller 5 Standorte für ausgewählte Wiederkehrzeiten und Niederschlagsandauern

<b>KOSTRA – Wiederkehrzeit 0,5 Jahre – Standort Augsburg</b>		
Andauer	Niederschlagshöhe [mm]	Niederschlagsspende [l/s·ha]
5 Min	3,6	119,9
15 Min	7,7	85,3
30 Min	10,1	56,3
1 Std	11,7	32,5
12 Std	26,6	6,2
24 Std	32,5	3,8
48 Std	42,6	2,5
72 Std	47,2	1,8

Tab. 12: Standort Augsburg – Häufig auftretende Niederschläge



Für die prozentuale Aufteilung von Regen- und Trockentagen im Regenregime wurde für die einzelnen Standorte die Zahl der Trockentage (zusammenhängende Tage < 1 mm Niederschlag) und der zugehörige prozentuale Anteil im Messzeitraum ermittelt (Tabelle 13). Der Messzeitraum erstreckt sich vom 01/1993 – 12/2006 und umfasst damit insgesamt 5.110 Tage.

Aus Tabelle 13 geht hervor, dass der Anteil der Trockentage im Messzeitraum im Mittel 67 % beträgt, d. h. dass der Messzeitraum zu etwa 2/3 aus Trockentagen besteht!

Neben dem Anteil der Trockentage ist auch die Aufteilung zusammenhängender Trockentage als Trockenphasen von Interesse. Die prozentuale Aufteilung der 1-tägigen bis 14-tägigen Trockenphasen ist in Tabelle 14 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die Trockenphasen mit zunehmender Dauer seltener auftreten. Die dargestellten 1-tägigen bis 14-tägigen Trockenphasen erreichen einen Anteil von 95,9 % der gesamten Trockenphasen, wobei die 1-tägigen bis 3-tägigen Trockenphasen bereits einen Anteil von rund 60 % ausmachen.

Trockentage	Anzahl der Trockentage	Anteil der Trockentage [%]
Bremen	3.366	65,9
Neuruppin	3.638	71,2 (max)
Würzburg	3.613	70,7
Augsburg	3.399	66,5
Kempten	3.094	60,5 (min)
	Mittelwert	67,0

Tab. 13: Prozentuale Aufteilung der Trockenphasen aller 5 Standorte

Trockenphasen Dauer	Bremen	Neuruppin	Würzburg	Augsburg	Kempten	Mittelwert (gerundet)
	[%]					
1-tägig	32,0	27,3	26,3	30,5	32,8	30
2-tägig	18,0	19,9	18,3	17,5	18,4	18
3-tägig	12,3	11,9	11,3	13,0	12,8	12
4-tägig	6,8	6,9	9,2	8,0	8,3	8
5-tägig	6,4	7,9	6,8	8,0	8,0	7
6-tägig	4,7	3,8	5,3	5,0	4,7	5
7-tägig	3,0	2,7	3,1	3,8	3,7	3
8-tägig	3,9	3,6	3,5	2,9	2,5	3
9-tägig	1,9	2,7	3,4	2,3	2,2	3
10-tägig	2,0	3,3	2,6	2,1	1,9	2
11-tägig	1,1	1,0	1,8	1,5	1,2	1
12-tägig	1,4	1,5	1,7	1,5	0,8	1
13-tägig	0,9	1,0	0,8	0,7	0,4	1
14-tägig	1,1	0,4	1,3	0,2	0,0	1
1- bis 14-tägig	95,5	93,9	95,4	97,0	97,7	
Rest	4,5	6,1	4,6	3,0	2,3	
	<b>Rote Zahl:</b> Maximum in der x-tägigen Trockenphase <b>Blaue Zahl:</b> Minimum Maximum in der x-tägigen Trockenphase					

Tab. 14: Prozentuale Aufteilung der Trockenphasen in Abhängigkeit von der Anzahl der Trockentage aller 5 Standorte

Die Minimal- und Maximalwerte sind farblich hinterlegt. Bei den 1-tägigen bis 7-tägigen Trockenphasen sticht kein Standort mit besonders hohen oder niedrigen prozentualen Anteilen hervor. Bei den 8-tägigen bis 14-tägigen Trockenphasen weist Kempten die meisten Minimalwerte und Würzburg die meisten Maximalwerte auf.

Bei der Festlegung der gesamten abzuregnenden Niederschlagsmenge ist neben dem natürlichen Niederschlag auch der Straßenabfluss zu berücksichtigen, um realitätsnahe Infiltrationsbedingungen im Böschungsbereich einer Straße nachzubilden. Die Größe des Straßenabflusses ist von verschiedenen Faktoren wie beispielsweise Straßenbreite, Straßengefälle, Beschaffenheit der Straßenoberfläche usw. abhängig. Die Größe der Straßenabflussmenge, die in das Bankett und die Böschung infiltriert, ist wiederum in starkem Maße von der Bodenbeschaffenheit, Lagerungsdichte, Vegetation und der Gefällesituation im Böschungsbereich abhängig. Genauere Abschätzungen können daher nur fallspezifisch durchgeführt werden. In Abhängigkeit von den o. g. Einflussgrößen kann der Straßenabfluss jedoch ein Mehrfaches der abgeregneten Niederschlagsmenge im Bankett- und Böschungsbereich betragen.

Auf Grundlage der Niederschlagsdaten wurde für die Lysimeteranlage ein Regenregime entwickelt, welches in Kapitel 4.2 beschrieben wird.

## 4 Lysimeteranlage

### 4.1 Aufbau

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

Eine ausführliche Beschreibung über Hintergründe und Entwicklung der Lysimeteranlage befindet sich im Bericht „Planung und Erprobung großmaßstäblicher Laboruntersuchungen sowie Einrichtung eines Freilandlysimeters zur Kalibrierung“ (MARKS, 2007). Die Lysimeteranlage wird mit einem extra entwickelten Regenregime betrieben, welches in Kapitel 4.2 beschrieben wird. Sie besteht aus zwei wesentlichen Teilen, der Beregnungseinheit und dem Lysimeterkasten. Im Folgenden werden der Aufbau des Lysimeters und die Funktionen seiner Teile erläutert.

#### 4.1.1 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 Böschungneigung 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, sodass während der Versuchsdauer das Gewicht kontrolliert werden kann. Die Waage hat im Messbereich zwischen 1.500 kg und 3.000 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 werden 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 zeigt, wie der Lysimeterkasten mit dem Gabelstapler auf der Waage platziert wird.

Die Grundfläche für das eingebaute Material 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 Lysimeterkastens noch das Sammelbecken für den Oberflächenabfluss befindet.

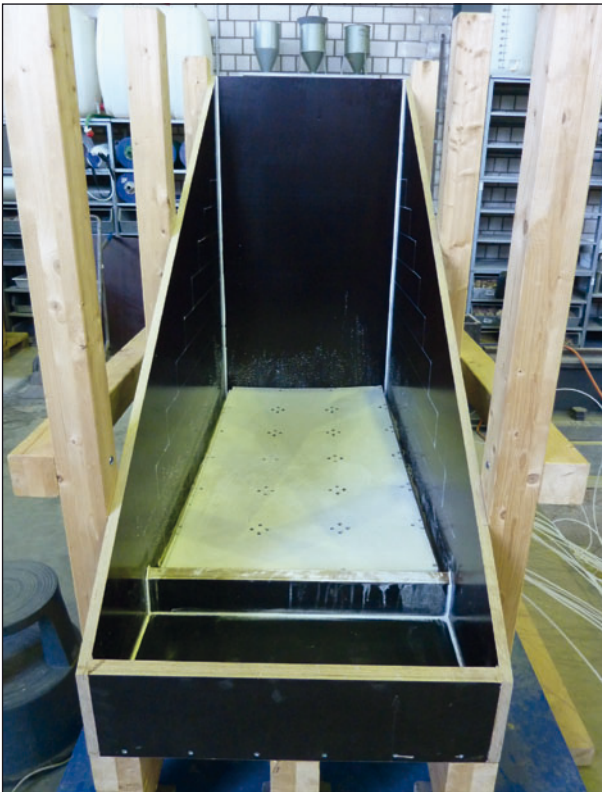
Da sich am Lysimeterboden ein Grenzschichten effekt ausbildet, kann das Sickerwasser nicht ein-



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

fach aus dem Kasten abfließen. Der Lysimeterboden wird mit 18 Saugplatten ausgelegt, die mit Quarzmehl eingeschlämmt werden. Bild 4 zeigt den noch leeren Lysimeterkasten mit den 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

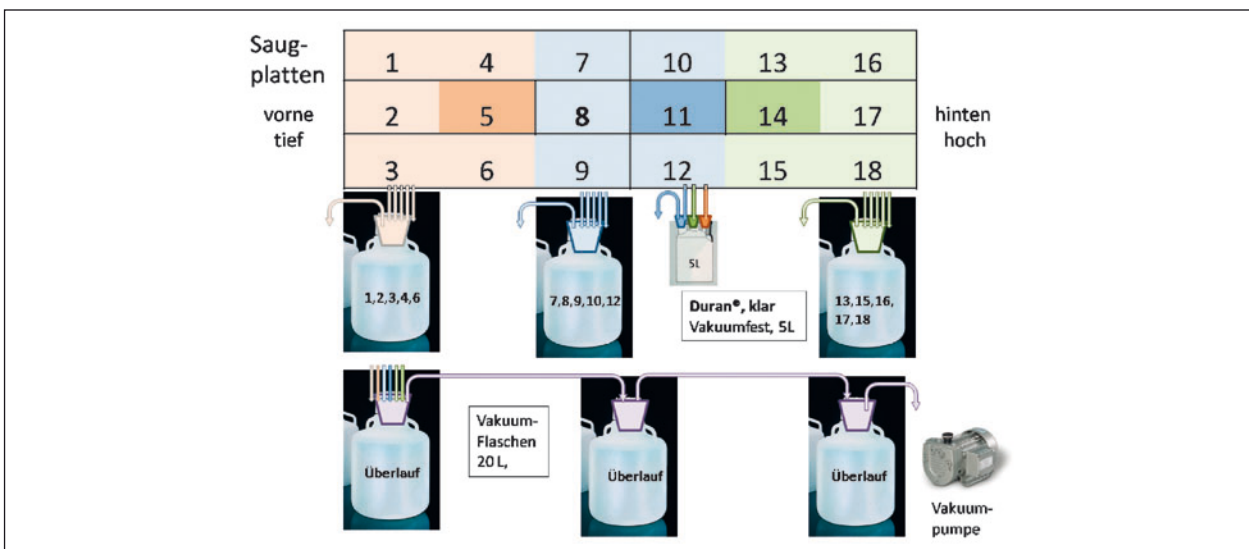


**Bild 4:** Lysimeterkasten mit Sicht auf die Saugplatten

gesamte System wird durch eine 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“. Mithilfe der Saugplatten soll jedoch nur simuliert werden, dass die Bodenschicht (und damit die hängende Wassersäule) weitergeht, d. h., dass das Bauwerk nicht am Lysimeterboden endet. Bild 5 stellt eine schematische Anordnung der Saugplatten und Sammelflaschen dar, aus der hervorgeht, welche Saugplatten zu welcher Sammelflasche führen. Das Sickerwasser der Saugplatten 5, 11 und 14 wird in einer Duranflasche gesammelt und auf Inhaltsstoffe chemisch analysiert.

Der Einbau des Bodenmaterials erfolgt in 10 cm hohen Schichten. Dafür wird eine Schalung gebaut, die sich treppenförmig nach oben verjüngt. Aufgrund des Wassergehaltes und der Dichte des Bodens wird die Menge berechnet, die in die Schicht eingebaut werden muss, damit die gewünschte Verdichtung erreicht wird. Die Verdichtung erfolgt dann statisch mit Gewichten oder Handstampfern. Nach dem Einbau wird die Schalung entfernt. Das überstehende Bodenmaterial wird wieder abgetragen und abgezogen, sodass die Böschungsneigung entsteht. Bild 6 und Bild 7 zeigen den Einbau des Bodenmaterials in den Lysimeterkasten.

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



**Bild 5:** Schematische Anordnung der Saugplatten und Sammelflaschen





**Bild 6:** Abtragen des treppenförmigen eingebauten Bodenmaterials zur Herstellung der Böschungsneigung



**Bild 7:** Detailansicht des treppenförmigen Einbaus des Bodenmaterials in den Lysimeterkasten

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

#### 4.1.2 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 An-



**Bild 8:** Detailaufnahme des Pumpensystems und der Steuerungseinheit

lage wurde so entwickelt, dass sie eine gleichmäßige, flächenhafte Beregnung der Lysimeteroberfläche mit natürlichen Tropfengrößen gewährleistet. Zur Erzeugung des gesamten Regenspektrums wurden zwei Pumpensysteme gewählt. Das kleine Pumpensystem besteht aus 20 Dosierpumpen, die paarweise geschaltet werden und kann 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 8 zeigt das große und kleine Pumpensystem sowie die Steuerungseinheit.

Der Beregnungskopf aus Plexiglas besteht aus Deckel-, Kanülen- und Schutzplatte. Er ist ca.  $150 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$  groß und enthält ca. 250 Edelstahlkanülen, die eine natürliche Tropfengröße ermöglichen. Eine Detailaufnahme während der Beregnung wird in Bild 9 dargestellt. Zudem verfügt er über einen Zulauf und ein Entlüftungsventil. Zur Beregnungseinheit gehört noch ein Wasservorratsbehälter mit  $200 \text{ l}$  Fassungsvermögen, aus dem entionisiertes Wasser in den Beregnungskopf gepumpt wird. Der Wasservorratsbehälter ist wägbar, sodass die verregnete Wassermenge genau bestimmt werden kann. Die Waage hat eine Messgenauigkeit von  $10 \text{ g}$ .

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





**Bild 9:** Detailaufnahme des Beregnungskopfes von untern während der Beregnung



**Bild 11:** Beregnungskopf mit Gestell und offener Schublade über Lysimeterkästen (Vorderansicht)



**Bild 10:** Gesamtansicht der zwei Lysimeter mit Wasservorratsbehältern und Arbeitsplatz

in Beregnungspausen unkontrolliert Wasser auf den Lysimeterkästen gelangt. In Bild 10, Bild 11 und Bild 12 ist die gesamte Anlage aus verschiedenen Perspektiven zu sehen.



**Bild 12:** Beregnungskopf über Lysimeterkästen mit Sammelflaschen (Seitenansicht)

## 4.2 Regenregime

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

Bei der Auswahl des Regenregimes für die Hallenversuche sind folgende wesentliche Anforderungen ausschlaggebend:

1. Es soll einen Vergleich mit den natürlichen Verhältnissen zulassen. Dies ist notwendig, um die Ergebnisse der Hallenversuche mit den in der Freilandanlage Augsburg gemessenen Werten vergleichen zu können.
2. 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.
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 im Zuge des Regenregimes die dreifache Menge des mittleren Jahresniederschlags von Deutschland abgerechnet werden.
6. Die Dauer des Regenregimes wird für die Versuche in der Halle auf einen Zeitraum von 49 Tagen festgelegt. Nach dieser Zeit soll eine Wiederholung erfolgen, um festzustellen, ob sich das Verhältnis zwischen Oberflächenabfluss und Sickerwasserabfluss ändert (z. B. aufgrund einer Aufsättigung des Bodens).

Randbedingungen bei der Generierung des Regenregimes sind die möglichen Regenspenden der Beregnungsanlage zwischen ca.  $6,8 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$  und  $754 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$ .

Geringere Regenspenden als  $6,8 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$  können nur durch zwischengeschaltete Beregnungspausen erzeugt werden.

Um die o. g. Vorgaben möglichst optimal zu erfüllen, soll wie folgt vorgegangen werden:

- Es wird recherchiert, welche Regenereignisse in Deutschland vorkommen. Hierzu werden 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 werden mit den ausgewählten Standorten verglichen, um den Freilandstandort Augsburg charakterisieren zu können.
- Die Daten werden so ausgewertet, dass sowohl Extremwerte als auch Mittelwerte hinsichtlich der Niederschlagsintensitäten, der Dauer der Niederschlagsereignisse und der Trockenphasen charakterisiert werden können. Aus dieser Charakterisierung wird eine Bandbreite von Niederschlagsereignissen gewählt, die hinsichtlich der Versickerungsraten Einfluss hat und die für alle Standorte charakteristische Größen abbildet.

Für die Generierung des Regenregimes gemäß den Vorgaben wurde eine Auswahl der in Kapitel 3.5 dargestellten Niederschlagsdaten der fünf Standorte vorgenommen.

Es wurde eine Auswahl verschiedener Niederschlagsereignisse vorgenommen mit dem Ziel, ein möglichst breites Spektrum unterschiedlichster Niederschläge zu erfassen (Tabelle 15). Dabei wurden sowohl die größten an allen fünf Standorten gemessenen Niederschläge aus den DWD-Datensätzen als auch die Starkniederschläge nach KOSTRA berücksichtigt.

Mit den in Tabelle 15 aufgeführten Niederschlagsereignissen wurde ein Regenregime generiert (Bild 13).

Das Regenregime erstreckt sich über einen Zeitraum von 49 Tagen. Dabei wurde der in Kapitel 3.5 angegebene mittlere Jahresniederschlag Deutschlands von 789 mm zugrunde gelegt, der in etwa dem mittleren Jahresniederschlag der 5 Standorte entspricht. Damit auch der erfahrungsgemäß quantitativ bedeutsame Straßenabfluss nicht unberücksichtigt bleibt, wird hierfür der dreifache Jahresniederschlag, d. h. 2.367 mm angesetzt. Bezogen auf den Zeitraum von 49 Tagen ergibt sich daraus eine



Niederschlags- spende [l/(s· ha)]	Niederschlags- 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 Kempten für die angegebene Niederschlagsdauer gemessen wurde
40,9	14,7	1 h	0,5	KOSTRA – Kempten
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. 15: Auswahl der Niederschlagsereignisse für die Generierung des Regenregimes

Niederschlagsmenge von 317 mm, die möglichst durch entsprechende Zusammenstellung der in Tabelle 15 aufgeführten Niederschlagsereignisse zu erreichen war. Tatsächlich ergeben die in Bild 13 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 (siehe Kapitel 3.5).

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 auch das 72-stündige Niederschlagsereignis mit der größten Niederschlagsmenge von 113,1 mm an das Ende des Zeitraums platziert, weil hier mit größeren und länger andauernden Durchsickerungen gerechnet wird.

Zur Verdeutlichung des Verlaufs der abgerechneten Niederschlagsmengen im Zuge des Regenregimes wurden auch die Summen der Niederschlagsmengen dargestellt (Bild 14).

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

Beim Vergleich mit Bild 13 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), worauf bereits in Kapitel 3.5 hingewiesen wurde.

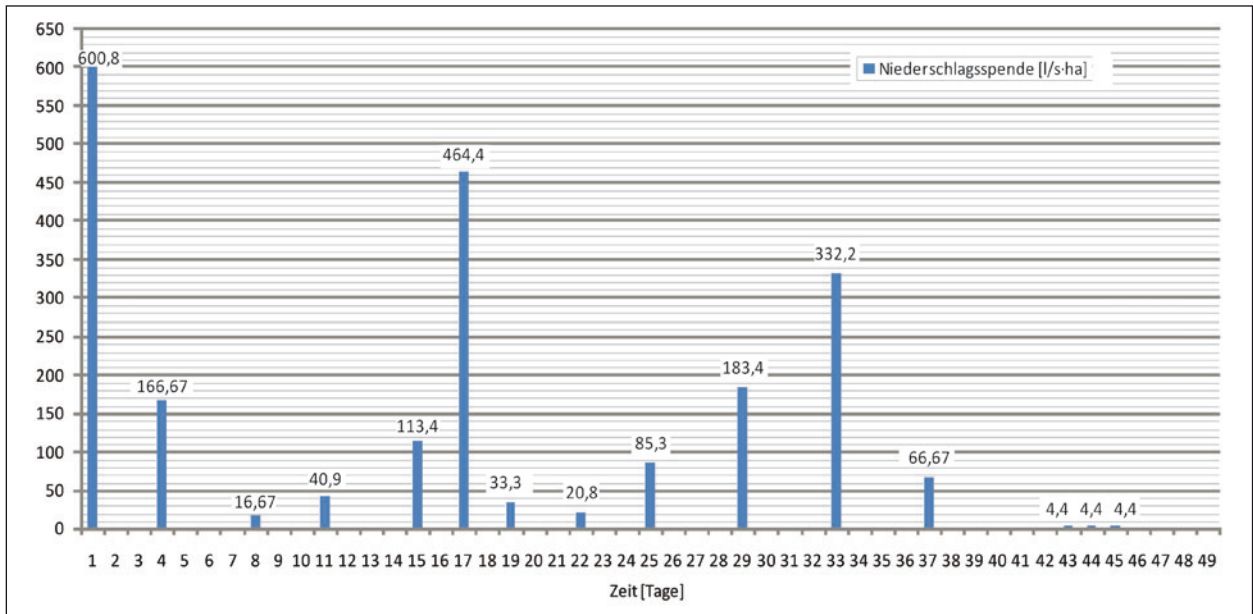


Bild 13: Regenregime (Beregnungsprogramm) mit zugehörigen Niederschlagsereignissen

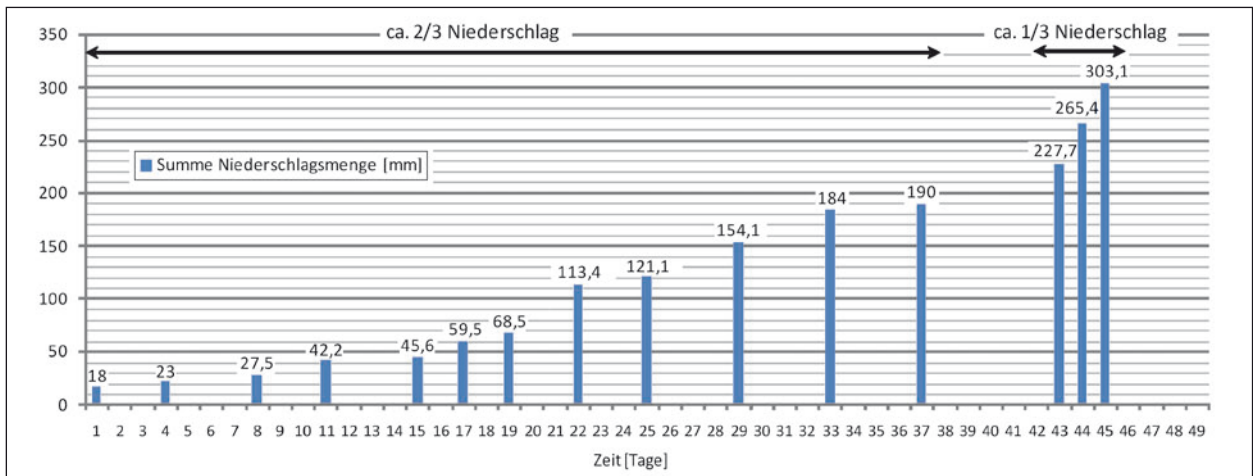





Bild 14: Summen der Niederschlagsmengen

## 5 Untersuchungsprogramm

### 5.1 Material

Für die erste Untersuchungsserie mit den Lysimetern wurden zwei aufbereitete Böden mit unterschiedlicher Kornzusammensetzung verwendet, die im Folgenden als bindiger und kiesiger Boden bezeichnet werden. Dasselbe Bodenmaterial wird in einem gemeinsamen Forschungsprojekt der Hochschule Augsburg und der BAST in einer Freilandlysimeteranlage in Augsburg verwendet.

Tabelle 16 zeigt die Matrix des im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten Untersuchungsprogramms und das jeweilige Startdatum der Versuchsreihe.

	 Bauweise ohne TSM	 Bauweise mit Dränmatte	 Bauweise mit Bitumenanspritzung
Bindiger Boden	12.09.11	31.10.11	26.03.12
Kiesiger Boden	17.09.12	17.09.12	26.03.12

Tab. 16: Untersuchungsprogramm in der Lysimeteranlage

An den beiden Materialien wurden jeweils die folgenden bautechnischen Untersuchungen durchgeführt: Korngrößenverteilung, Proctorversuche nach DIN 18130 und Durchlässigkeitsversuche nach DIN 18127.



## 5.2 Lysimeterversuche

Nach dem Einbau der Böden und TSM in die Lysimeterkästen werden die im Beregnungsregime festgelegten Regenmengen verregnet. Ein Umlauf dauert 49 Tage und wird 2-mal wiederholt, sodass ein Versuch mit einer Woche Nachlaufzeit 106 Tage dauert. Nach dem ersten Umlauf wird der Rollrasen gewechselt, da dieser aufgrund des Lysimeteraufbaus nicht ausreichend mit Licht versorgt werden kann und daher abstirbt. Dabei erhöht sich das Gewicht des Lysimeterkastens, da der frische Rollrasen mehr wiegt als der alte. Im Anhang (Tab.-A 1) befindet sich ein exemplarischer Beregnungsplan für den kiesigen Boden ohne TSM.

Der Wasserzulauf zur Beregnungseinheit erfolgt durch einen Wasservorratsbehälter. Dieser steht auf einer Waage. Aus dem im Regenregime festgelegten Niederschlagsspenden und deren Dauer wird die Regenmenge errechnet, die für die Oberfläche des Lysimeterkastens benötigt wird. Diese Regenmenge wird in Litern pro Minute umgerechnet, sodass eine Kontrolle der verregneten Menge kontinuierlich erfolgen kann. 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 der 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, sollte so lange eingeregnet werden, bis der gewünschte Wert mindestens 5 Minuten konstant bleibt. Nun beginnt die eigentliche Beregnung. Die Schublade wird herausgezogen, sodass das Wasser auf den Lysimeterkasten regnet. Gleichzeitig wird das Gewicht des Wasservorratsbehälters notiert und die Uhr für die Versuchsdauer gestartet. Aus der Differenz der Menge, die verregnet werden soll, errechnet sich dann die Anzeige der Waage, bei der die Schublade wieder zugeschoben werden muss und die Messung beendet ist. Dabei ist die entscheidende Größe die Wassermenge und nicht die Zeit. Nach Beendigung der Messung werden alle Pumpen wieder abgestellt und ggf. der Wasservorratsbehälter wieder mit entionisiertem Wasser gefüllt. Das Gesamt-

gewicht des Lysimeterkastens wird jeweils vor und nach der Beregnung gemessen. Die Einregnung und die Beregnung werden dokumentiert.

Die Beregnungsversuche haben am 12.09.2011 begonnen, mit dem bindigen Boden ohne TSM. Die Reihenfolge der Versuche hatte rein einbaupraktische Gründe. Seit Oktober 2011 stand das zweite Hallenlysimeter zur Verfügung, sodass alle nachfolgenden Versuchsreihen immer parallel mit zwei Lysimetern durchgeführt wurden (Tabelle 16).

Während der Beregnungsversuche wird an jedem Arbeitstag das Gewicht des Lysimeterkastens und die Menge des Oberflächenabflusses sowie des Sickerwassers bestimmt.

## 5.3 Bauweisen

Für die Bauweise F mit wasserabweisender Anspritzung sollen laut M T S E (FGSV, 2009) mindestens  $0,8 \text{ kg/m}^2$  Bitumenemulsion eingesetzt werden. Nach dem Anspritzen bricht die Emulsion und bleibt als zäher wasserabweisender Belag auf dem Baustoff haften. Das Merkblatt empfiehlt eine C69B 2, also eine kationische Emulsion mit einem Nennwert an Bindemittel von 69 % und einem Brechwert der Klasse 2. In den Versuchsreihen wurde eine U60 K verwendet, was einer C60B nach neuer Bezeichnung entspricht und häufig in der Praxis verwendet wird.

Bei den Versuchen mit der Bauweise mit Bitumenanspritzung wurden für beide Böden unerwartet hohe Sickerwassermengen gemessen. Um dies weiter zu untersuchen, wurde der Versuch verlängert. Dafür wurde am Versuchsende nach 106 Tagen der Rollrasen abgetragen. Nach Augenschein erhielt die Schicht aus Bitumenemulsion durch das Abnehmen des Rollrasens keine Beschädigung. Auf den bestehenden Bodenkörper wurde eine weitere Lage mit  $0,8 \text{ kg/m}^2$  Bitumenemulsion aufgesprüht, sodass insgesamt  $1,6 \text{ kg/m}^2$  verwendet wurden. Anschließend wurde frischer Rollrasen verlegt und ein weiterer Umlauf (49 Tage) des Regenregimes durchgeführt.

Für die Untersuchungen mit Dränschicht wurde als Dränmatte eine beidseitig mit Vlies kaschierte Krallmatte verwendet.

## 5.4 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. Beide Untersuchungsmaterialien sollten einen ausreichend hohen Gehalt an umweltrelevanten Inhaltsstoffen aufweisen, um einen analytischen Nachweis der mit dem Sickerwasser ausgetragenen Schadstoffe führen zu können. Die Werte sollten jedoch so niedrig sein, dass der Boden als Baustoff verwendet werden darf. Da durch den Aufbau der Versuchseinrichtung organische Schadstoffe vermutlich nur verfälscht gemessen werden können, wurde der Schwerpunkt auf die Untersuchung anorganischer Parameter gelegt.

In der Praxis war es nicht möglich, Böden zu beschaffen, die sowohl die bautechnischen, als auch die umweltrelevanten Anforderungen erfüllten. Daher wurden geeignete Böden mit Schadstoffen dotiert. Diese wurden in Form von Cadmiumacetat ( $C_4H_6CdO_4$ ), Kaliumferrocyanid ( $C_6FeK_4N_6$ ) und Kupfersulfat ( $CuSO_4$ ) in Pulverform den Böden zugegeben und gründlich durchmischt. Dabei wurde 65 % des Z2 Wertes (LAGA, 2003) angestrebt.

Die in der BAST für die Lysimeterversuche angelieferte Böden wurden auf ihre Inhaltsstoffe untersucht. An diesen Proben wurden jeweils Feststoffuntersuchungen durchgeführt und Eluatewerte bestimmt.

Die Eluate aus den Bodenproben wurden mit mehreren Verfahren hergestellt. Nach dem Entwurf der neuen Ersatzbaustoffverordnung (MantelV, 2012) sollen die Eluate mit dem Perkolationsverfahren nach (DIN 19528, 2009) bestimmt werden. Da das Perkolationsgerät aus einer durchflossenen Säule besteht spricht man auch vom Säulentest. Bisher liegen allerdings langjährige Erfahrungen und Bewertungshintergründe mit den DEV S4 (DIN EN 38414-4, 1984) vor. Zusätzlich wurde noch Eluat mit dem Schüttelverfahren (2:1 Verfahren) (DIN 19529, 2009) bestimmt.

Bei den Versuchen zum Freisetungsverhalten von Feststoffen wird grundsätzlich nach drei Kategorien unterschieden: Die „grundlegende Charakterisierung“ wird genutzt, um Informationen über das kurz- und langfristige Elutionsverhalten von Feststoffen zu gewinnen. „Verfahren zur Übereinstimmungsuntersuchung“ werden genutzt, um festzu-

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

Tab. 17: W/F-Verhältnisse für die grundlegende Charakterisierung beim Perkolationsverfahren

stellen, ob der zu untersuchende Feststoff einem spezifischen Verhalten oder spezifischen Bezugswerten entspricht. Eine „Verifizierung vor Ort“ liefert eine schnelle Bestätigung, dass es sich um den gleichen zu untersuchenden Feststoff handelt, dabei muss es sich nicht notwendigerweise um eine Eluationsprüfung handeln (DIN 19528, 2009).

Bei dem Perkolationsverfahren (DIN 19528, 2009) wird für die grundlegende Charakterisierung nach den in Tabelle 17 enthaltenen W/F-Verhältnissen geprobt (ausführlicher Säulentest). Für die Übereinstimmungsuntersuche ist das gesamte Eluat bis zu W/F-Verhältnis 2 l/kg in einer Sammelflasche aufzufangen (Säulenkurztest).

Bei den durchgeführten Lysimeteruntersuchungen wird die in der Duramglasflasche gesammelte Probe (siehe Kapitel 4.1.1) zur Analyse gebracht, wenn mindestens 200 ml erreicht wurden. Die Inhaltsstoffe werden durch das Referat „Chemische Grundlagen, Umweltschutz, Labordienst“ der BAST bestimmt. Die Parameter Sulfat und Cyanid werden von einem externen Labor bestimmt.

An den während der Lysimeterversuchen gewonnenen Sickerwasserproben wurden die Parameter aus Tabelle 18 untersucht und mit den GFS Werten und den Prüfwerten nach BBodSchV verglichen. In der Tabelle sind die Werte nach (LAWA, 2004), (BBodSchV, 2012) und die Werte aus dem Entwurf der (MantelV, 2012) eingetragen. Die Änderungen sind farbig markiert.

Die beiden Versuchsreihen mit Bitumenanspritzung und mit 2-facher Bitumenanspritzung wurden für die chemischen Auswertungen zusammengefasst, da die Erdkörper nicht ausgetauscht wurden. Dies gilt sowohl für den kiesigen als auch für den bindigen Boden.

Parameter	Einheit	GFS (LAWA, 2004)	Prüfwert (BBodSchV, 2012)	GFS (MantelIV, 2012)	Prüfwert Humus < 1 % (MantelIV, 2012)
ph-Wert	[-]				
El. Leitfähigkeit	[ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]				
Chlorid	[mg/l]	250		250	250
Sulfat	[mg/l]	240		250	250
Cyanid	[mg/l]	0,05	0,05	0,05	0,05
Arsen	[mg/l]	0,01	0,01	0,01	0,01
Blei	[ $\mu\text{g}/\text{l}$ ]	7	25	7	23
Cadmium	[ $\mu\text{g}/\text{l}$ ]	0,5	5	0,25	2
Chrom	[mg/l]	0,007	0,05	0,007	0,01
Kupfer	[mg/l]	0,014	0,05	0,014	0,02
Nickel	[mg/l]	0,014	0,05	0,014	0,02
Quecksilber	[mg/l]	0,0002	0,001	0,00005	0,00005
Fluorid	[mg/l]	0,75	0,75	0,75	0,75
Zink	[mg/l]	0,058	0,5	0,058	0,1
Molybdän	[mg/l]	0,035	0,05	0,035	0,035
Vanadium	[mg/l]	0,004		0,004	0,02
Thallium	[mg/l]	0,0008		0,0008	0,0008
Antimon	[mg/l]	0,005	0,01	0,005	0,005

Tab. 18: GFS und Prüfwerte für umweltrelevante Inhaltsstoffe

## 6 Ergebnisse

### 6.1 Material und Einbau

Für den Aufbau der Böschungskerne wurden in Abhängigkeit von der Bauweise ein feinkörniges (schwach durchlässiges) und ein grobkörniges (durchlässiges) Bodenmaterial benötigt.

Das feinkörnige Bodenmaterial sollte der Boden- gruppe UL, UM oder UA nach DIN 18196 entsprechen. Der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  soll bei einem Verdichtungsgrad  $D_{Pr} = 100\%$  zwischen  $1 \cdot 10^{-7}$  und  $1 \cdot 10^{-8}$  [m/s] betragen. In diesem Bericht wird dieses Material als bindiger Boden bezeichnet. Kriterium war im Wesentlichen die Durchlässigkeit. Aufgrund der Kornzusammensetzung handelt es sich beim ausgewählten Boden um einen SÜ mit der Frostempfindlichkeitsklasse F3, der jedoch im gewünschten Durchlässigkeitsbereich lag. Der Feinanteil < 0,063 mm beträgt 26,8%. Die Proctordichte wurde zu  $2,016 \text{ g}/\text{cm}^3$  bei einem optimalen Wassergehalt von 9 M.-% bestimmt. Der Durchlässigkeitsbeiwert wurde mit  $k_f = 2 \cdot 10^{-9}$  m/s bei 100 % Proctordichte ermittelt. Eine Sieblinie befindet sich im Anhang (Bild-A 7).

Beim grobkörnigen Bodenmaterial wurde die Bodengruppe GW oder GI nach DIN 18196 gesucht. Der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  soll bei einem Verdichtungsgrad  $D_{Pr} = 100\%$  größer  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s sein. In diesem Bericht wird dieses Material als kiesiger Boden bezeichnet. Bei dem kiesigen Material handelt es sich um einen grobkörnigen Boden, einen intermittierend gestuften Kies (GI) der Frostempfindlichkeitsklasse F1. Die Proctordichte beträgt  $2,250 \text{ g}/\text{cm}^3$  bei einem optimalen Wassergehalt von 7,7 M.-%. Der Durchlässigkeitsbeiwert wurde mit  $k_f = 1,2 \cdot 10^{-6}$  m/s bei 100 % Proctordichte bestimmt. Eine Sieblinie befindet sich im Anhang (Bild-A 6).

Aufgrund der Versuche zur Wasserdurchlässigkeit war bekannt, dass bei Verdichtung auf 100 % der Proctordichte eine zu geringe Wasserdurchlässigkeit erreicht würde. Da die Anforderungen an die Proctordichte aber für die eingebauten Böschungsausschnitte im Lysimeterkasten bautechnisch nicht notwendig sind, wurde beim kiesigen Material die Verdichtung daher nur mit 85 % der Proctordichte realisiert, um eine für wichtiger angesehenen hohe Durchlässigkeit zu erhalten.

	Masse Boden trocken	Wassergehalt	Trockendichte	Proctordichte	Verdichtungsgrad
	[kg]	[M.-%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]
<b>Bindiger Boden</b>					
ohne TSM	1.074,2	9,8	1,880	2,016	93,3
mit Dränmatte	1.062,1	11,9	1,836	2,016	91,1
mit Bitumenemulsion	1.050,7	12,5	1,865	2,016	92,5
<b>Kiesiger Boden</b>					
ohne TSM	1.244,4	3,1	1,913	2,255	85
mit Dränmatte	1.249,5	3,0	1,915	2,255	85,1
mit Bitumenemulsion	1.199,1	2,3	1,899	2,255	84,4

Tab. 19: Einbauwerte für den bindigen und kiesigen Boden für die verschiedenen Versuchsreihen

Die Einbauwassergehalte zeigen beim bindigen Boden, dass mit einem leicht über dem optimalen liegenden Wassergehalt eingebaut wurde. Der Einbauwassergehalt des kiesigen Bodens hingegen liegt unterhalb des optimalen Wassergehaltes.

Um auf einen Nachweis der erreichten Verdichtung verzichten zu können, erfolgt der Einbau in 10 cm hohen Schichten unter definierten Bedingungen (Kapitel 4). Kurz vor dem Einbau wurde der aktuelle Wassergehalt bestimmt. Aus dem Wassergehalt, der Proctordichte und dem festgelegten Verdichtungsgrad wurde dann berechnet, wie viel Masse an Material in eine Schicht von 10 cm eingebaut werden muss. Nach dem abwägen und einfüllen des Materials wurde dann so lange verdichtet, bis die Schichtdicke von 10 cm erreicht wurde. Dabei wurden immer Proben genommen, aus denen der eingebaute Wassergehalt bestimmt wurde. Tabelle 19 zeigt eine Übersicht der Einbauwerten.

## 6.2 Lysimeterversuche

### 6.2.1 Bindiger Boden

Die aufgebrachte Regenmenge und der Oberflächenabfluss wurden bei jedem Regenereignis bestimmt. Die Sickerwässer wurden an jedem Werktag gewogen. Exemplarisch werden die Diagramme in den Bildern 15 und 16 für den bindigen Boden ohne TSM erläutert.

Bild 15 stellt die gemessenen und aufsummierten Wassermengen des Versuches bindiger Boden ohne TSM dar. Die blaue Linie zeigt die Menge des verregneten Wassers. Da alle Versuche mit dem gleichen Regenregime durchgeführt wurden, ist die

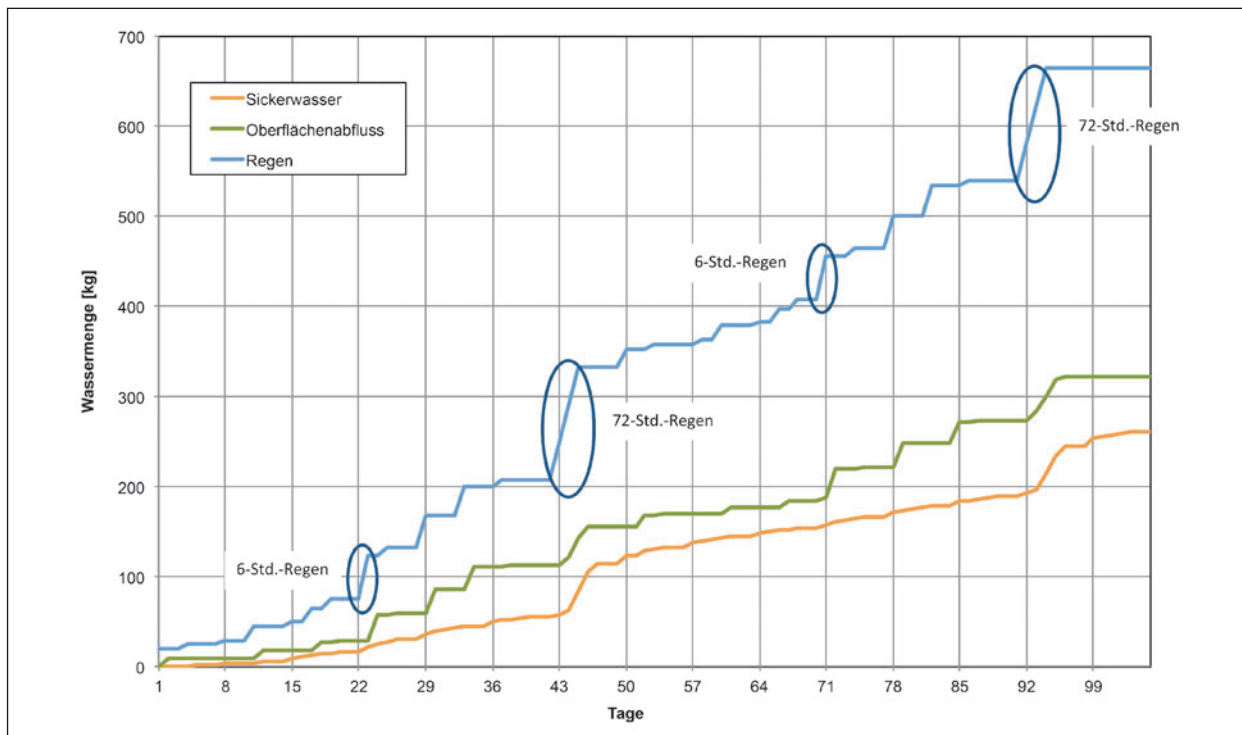
blaue Linie für alle Versuche gleich. Kleinere Abweichungen ergeben sich lediglich aus der vereinzelt Verschiebung von Regenereignissen aufgrund von Feiertagen. An der Linie sind gut die Charakteristiken der unterschiedlichen Regenereignisse mit ihren unterschiedlichen Regenmengen zu sehen. Waagerechte 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 dargestellt. Dieser wird nur in direkter Folge eines Regenereignisses gemessen, daher hat auch diese Kurve waagerechten Stellen ohne Wasserzunahme und Sprünge bei den langen Regenereignissen. Sie entspricht einer gestauchten Kurve der Regenmenge. Die orange Kurve stellt die Menge des Sickerwassers 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 72-Stunden-Regen. Die Summenliniendiagramme der Wassermengen zeigen sehr gut das Verhältnis Sickerwasser zu Oberflächenabfluss. Für den Versuch bindiger Boden ohne TSM fällt etwa gleichviel Oberflächenabfluss wie Sickerwasser an.

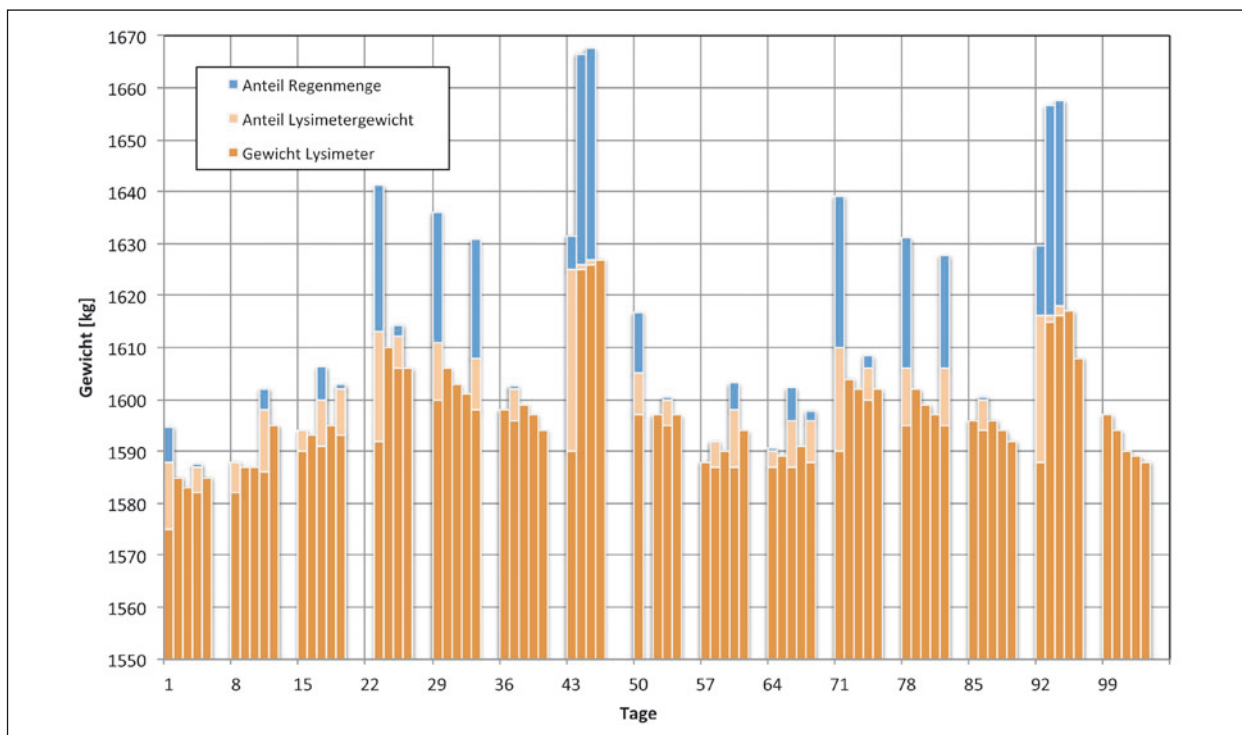
Die Summe aus Sickerwasser und Oberflächenabfluss ist kleiner als die Summe des Regenwassers. Dieser Schwund lässt sich durch Verdunstung und Verlusten im System erklären. Der Versuch ohne TSM gilt als Ausgangspunkt, um bei den weiteren Versuchen die Wirksamkeit der TSM abschätzen zu können.

Vor und nach einem Regenereignis sowie bei den werktägl. Messungen wurde das Gewicht des Lysimeterkastens bestimmt. In Bild 16 wird die Gewichtsentwicklung während der Versuche dargestellt.

Die dunkelorange Balken zeigen das jeweilige Gewicht des Lysimeterkastens. Der hellorange Balken und der blaue Balken bilden in der Summe die Menge die an dem Tag verregnet wurde. Zum



**Bild 15:** Wassermengen für den bindigen Boden ohne TSM



**Bild 16:** Gewicht des Lysimeters für den bindigen Boden ohne TSM



Beispiel werden am ersten Tag 19,7 kg Wasser verregnet. Die Gewichtsmessung vor und nach der Berechnung hat eine Gewichtszunahme des Lysimeters von 13 kg ergeben. Diese wird durch den hellorangenen Balken dargestellt. Der blaue Balken stellt die 6,7 kg Differenz zur verregneten Menge dar. Diese Differenz setzt sich aus Oberflächenabfluss, und bei den länger andauernden Regen zusätzlich aus Sickerwasser und Verdunstung zusammen. In der Summe ergeben der orangene und der blaue Balken 19,7 kg. An den Trockentagen wird das Lysimeter wieder leichter. Beim bindigen Boden sammelt sich das Sickerwasser zunächst im Boden und fließt nur langsam ab, sodass das Gewicht des Lysimeters stets über dem Ausgangsgewicht liegt. Der Boden kann nur eine bestimmte Menge Wasser aufnehmen und hat dann eine vorläufige Sättigung erreicht. Dies ist an den Tagen mit dem 72-Stunden-Regen gut erkennbar. Am ersten Tag kann eine größere Gewichtszunahme gemessen werden. Das Gesamtgewicht bleibt dann während der Berechnung auf diesem Niveau, um nach dem Regen schnell wieder abzusinken. Nach dem 14-wöchigen Versuch wird das Sickerwasser noch eine Woche weiter gemessen um den weiteren Verlauf zu beobachten, sodass die Versuchszeit für alle Versuche 15 Wochen oder 106 Tage beträgt. Da die ersten beiden Versuche zeitversetzt liefen, wurde beim Versuch bindiger Boden ohne TSM die Menge des Sickerwassers über insgesamt 23 Wochen bestimmt. Es zeigte sich, dass immer noch Sickerwasser gemessen wurde. Anhand des Lysimetergewichtes ist zu sehen, dass dieses Wasser aus Porenwasser stammt, da das Lysimetergewicht deutlich unter das Ausgangsgewicht sank.

Bild 17 zeigt die Wassermengen für die Versuchsreihe bindiger Boden mit Dränmatte. 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 deutlich die Regenmengenkurve wider.

Die geringe Sickerwassermenge wird in Bild 18 deutlich, dass das Lysimetergewicht zeigt. Auch bei den langanhaltenden Regenereignissen mit großen Regenmengen steigt das Gewicht des Lysimeters kaum an und schwankt während der gesamten Versuchsdauer im Bereich von ca. 10 kg.

Bei der Versuchsreihe bindiger Boden mit Bitumenanspritzung zeigt Bild 19, mit den Wassermengen zunächst den erwarteten Verlauf. Die Kurve des Oberflächenabflusses liegt deutlich über der Sickerwasserkurve. Nach dem ersten 72-Stunden-Regen steigt die Kurve des Sickerwassers deutlich an, während die Kurve des Oberflächenabflusses flacher wird, sodass zum Versuchsende hin die Sickerwasserkurve über der Oberflächenabflusskurve liegt. Insgesamt wird etwa gleich viel Sickerwasser wie Oberflächenabfluss gemessen.

Das in Bild 20 dargestellte Lysimetergewicht liegt zunächst deutlich unter dem Ausgangsgewicht. Erst nach dem ersten 72-Stunden-Regen zeigt sich eine deutliche Gewichtszunahme, was darauf schließen lässt, dass mehr Wasser in den Bodenkörper versickert und dort länger gehalten wird.

Aufgrund des Sickerwasseranstiegs in der zweiten Hälfte des Versuches bindiger Boden mit Bitumenanspritzung, wurde beschlossen den Versuch noch einmal mit einer dickeren Bitumenanspritzung zu wiederholen. Für diesen Versuch wurde der Rollrasen entfernt. Nach Augenschein wurde die erste Bitumenschicht hierbei nicht beschädigt. Auf den eingebauten Erdkörper wurde eine zweite Anspritzung auf die bereits bestehende Bitumenschicht aufgebracht. Dieser Versuch wurde mit nur einem Beregnungsregime, also nur 7 Wochen plus eine Woche Nachlaufzeit durchgeführt.

Nach Auswertung der Daten zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den Versuchen mit einfacher Bitumenanspritzung. In Bild 21 ist zu erkennen, dass die Kurven von Oberflächenabfluss und Sickerwasser zunächst relativ ähnlich verlaufen. Nach dem 72-Stunden-Regen steigt die Sickerwasserkurve steil an.

Dies wird durch Bild 22 visualisiert, auf dem das Lysimetergewicht dargestellt ist. Das Gewicht bleibt zunächst relativ gleich, nach dem ersten längeren 6-Stunden-Regen steigt es an, um dann nach dem 72-Stunden-Regen noch einmal anzusteigen.

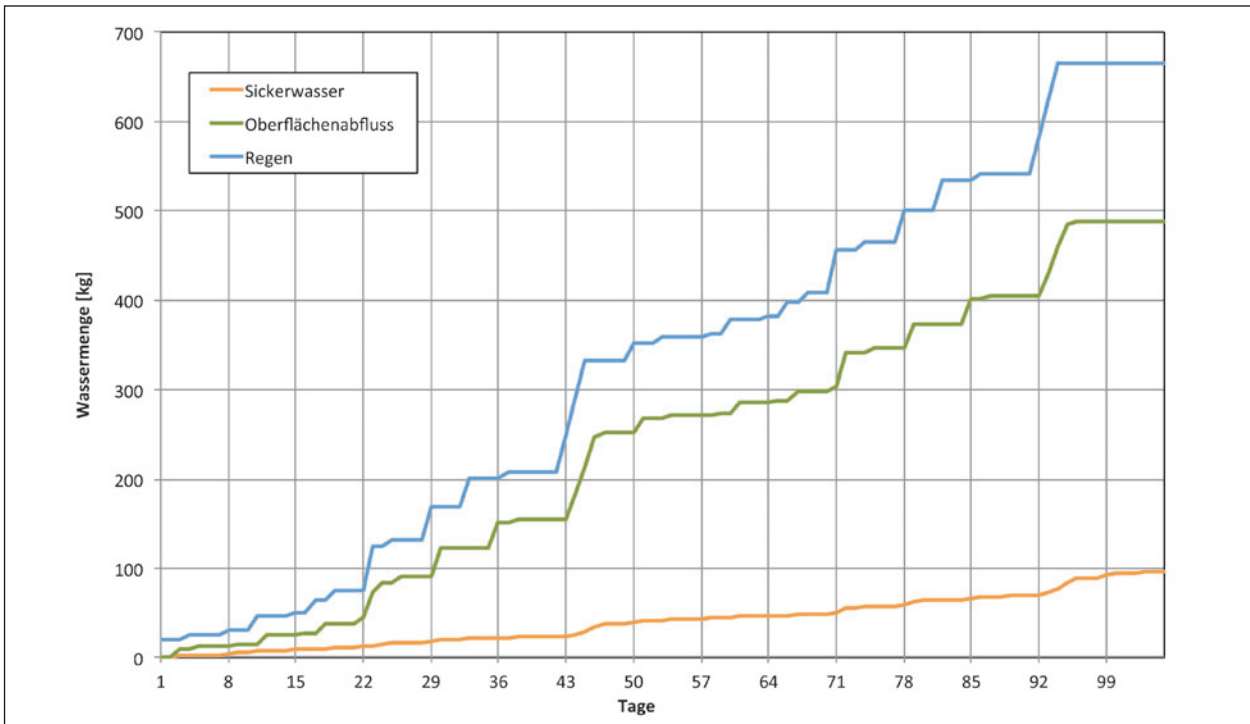


Bild 17: Wassermengen für den bindigen Boden mit Dränmatte

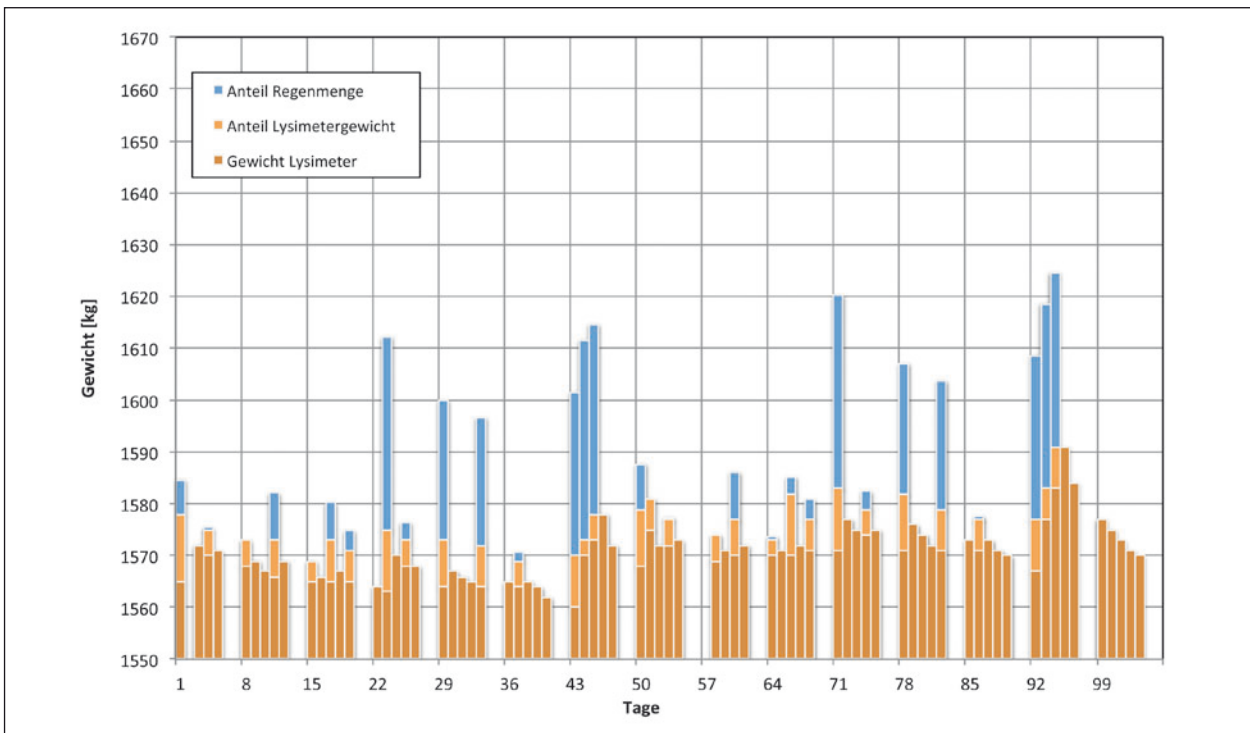


Bild 18: Gewicht des Lysimeters für den bindigen Boden mit Dränmatte

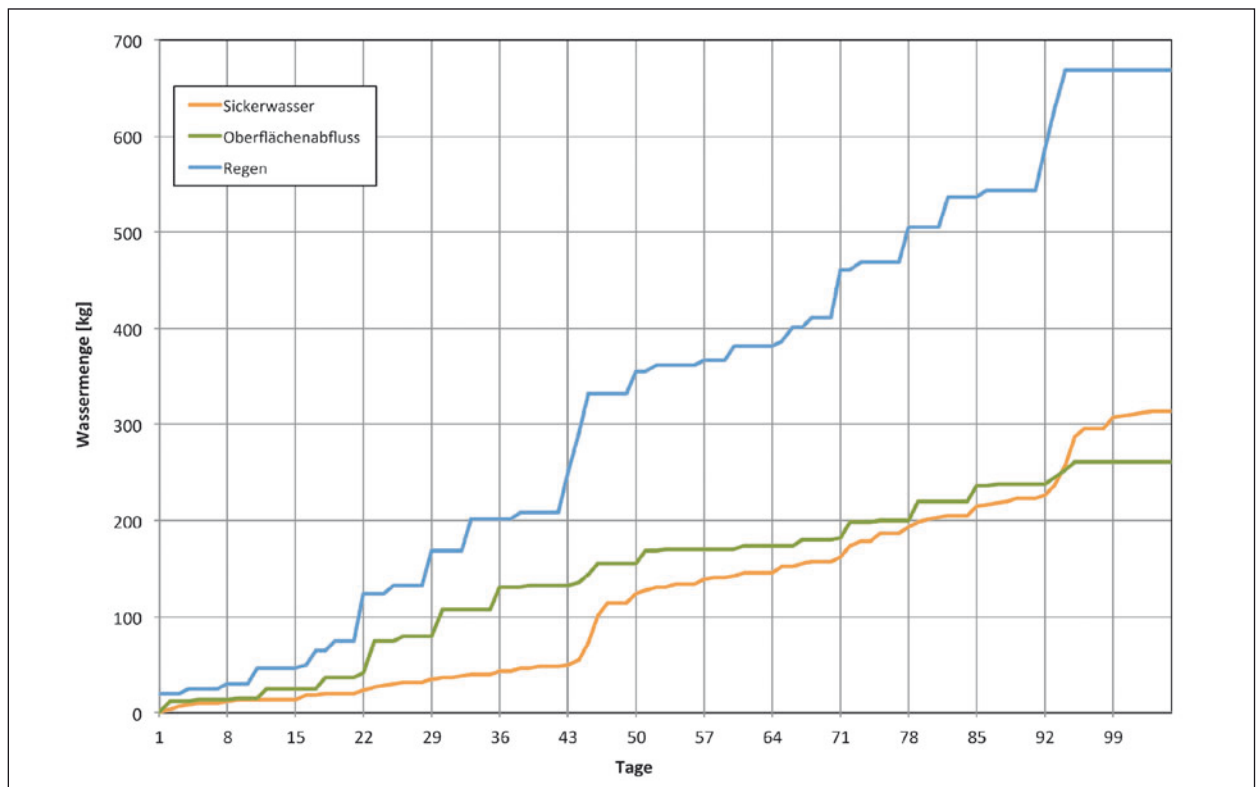


Bild 19: Wassermengen für den bindigen Boden mit Bitumenanspritzung

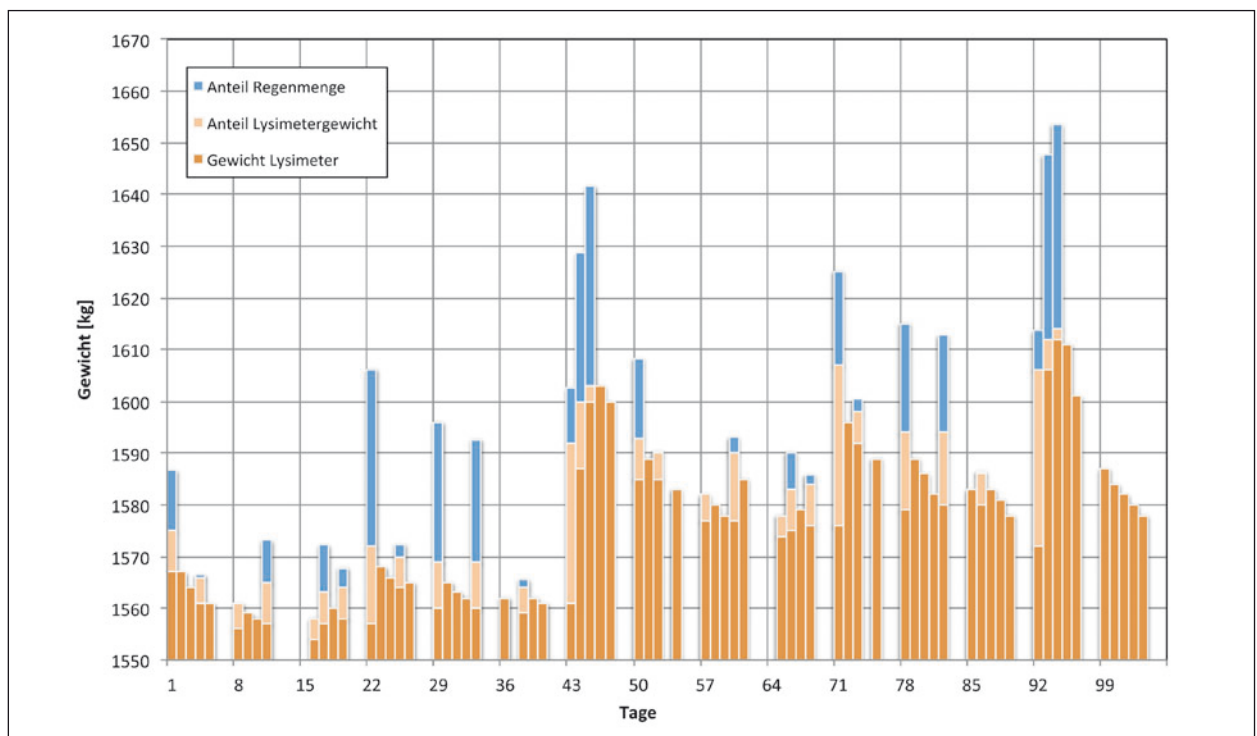


Bild 20: Gewicht des Lysimeters für den bindigen Boden mit Bitumenanspritzung



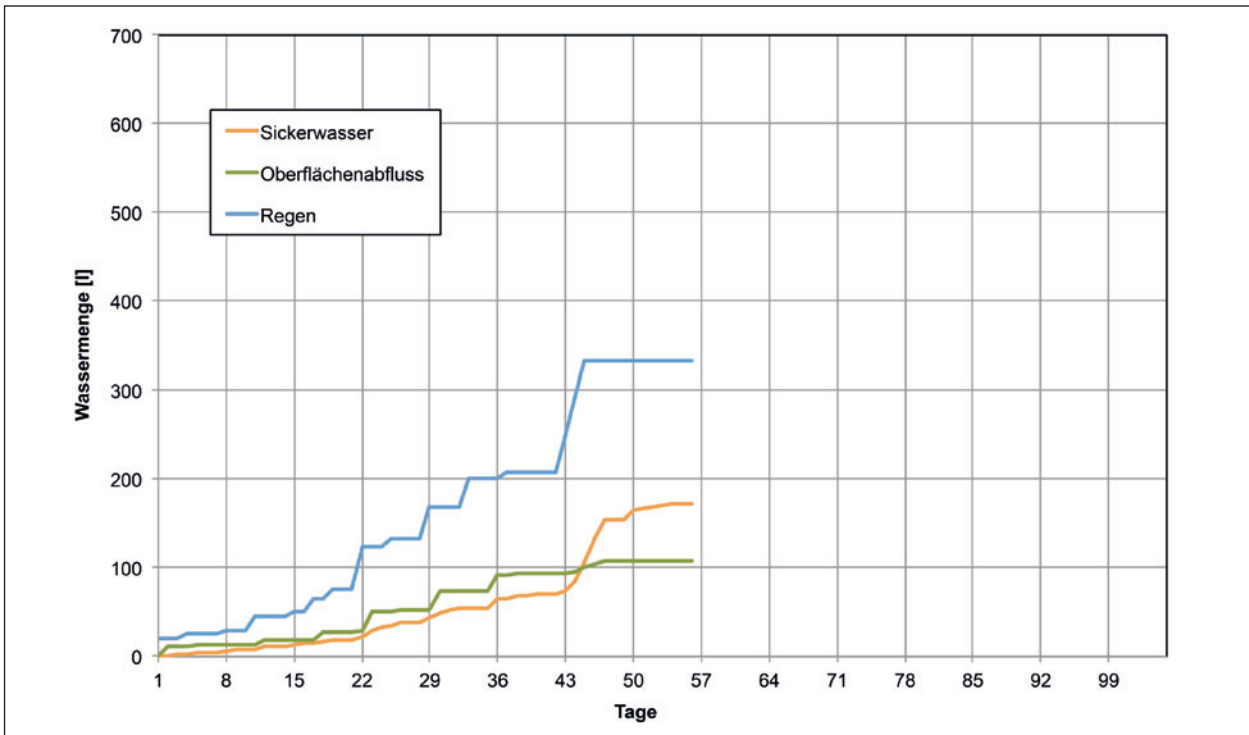


Bild 21: Wassermengen für den bindigen Boden mit 2 x Bitumenanspritzung

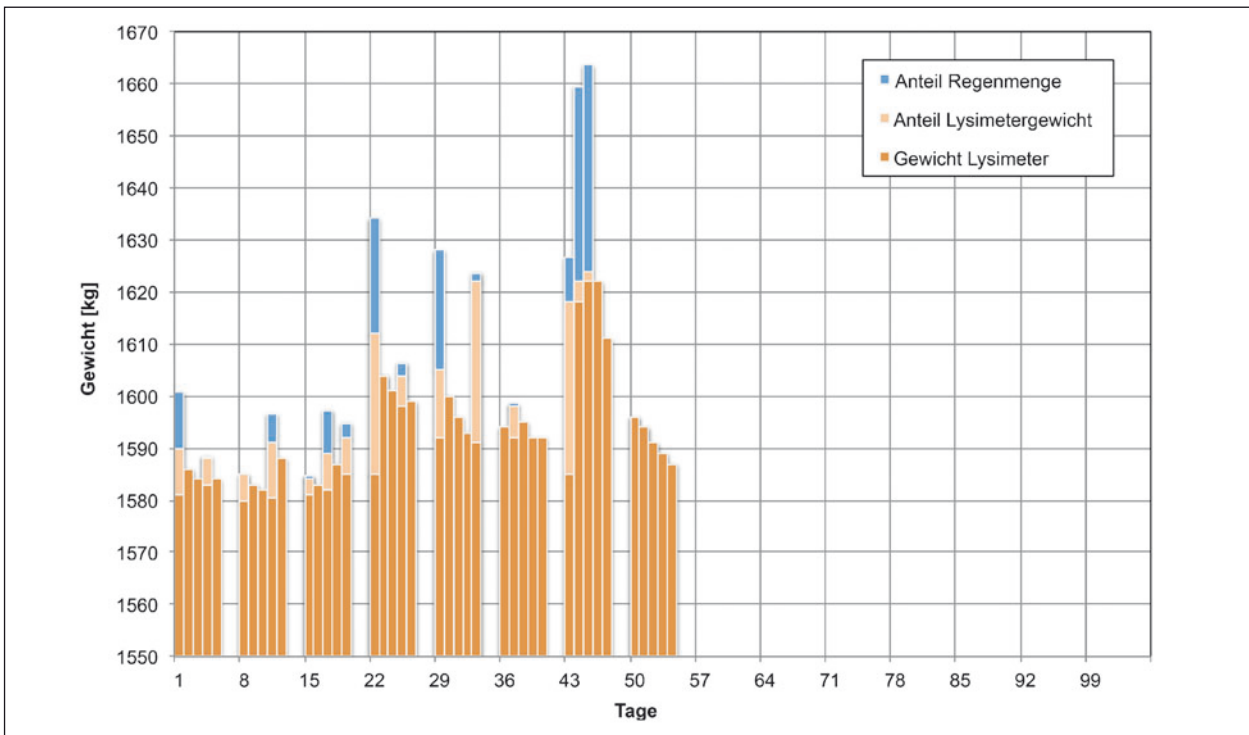


Bild 22: Gewicht des Lysimeters für den bindigen Boden mit 2 x Bitumenanspritzung

### 6.2.2 Kiesiger Boden

Beim Versuch kiesiger Boden ohne TSM tritt wie erwartet sehr viel Sickerwasser auf. Die Stufen in der Regenmengenkurve, spiegeln sich in Bild 23 gut in der Sickerwasserkurve. Deutliche Anstie-

ge 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.

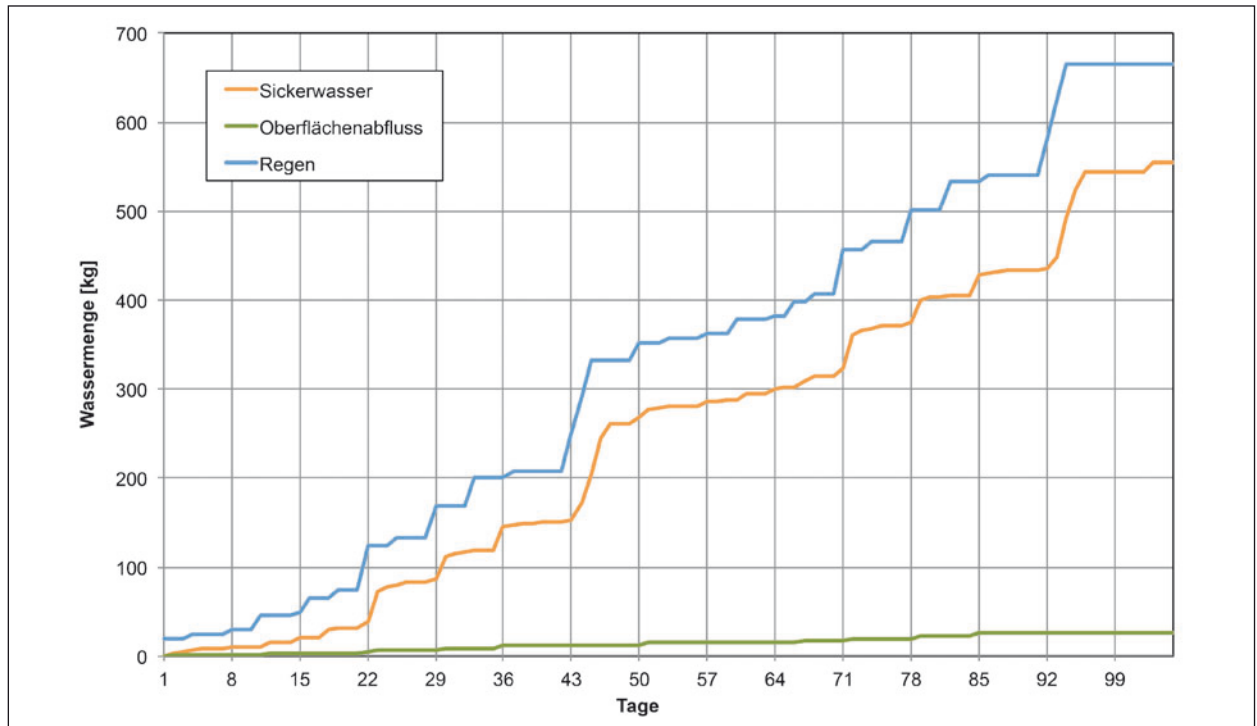


Bild 23: Wassermengen für den kiesigen Boden ohne TSM

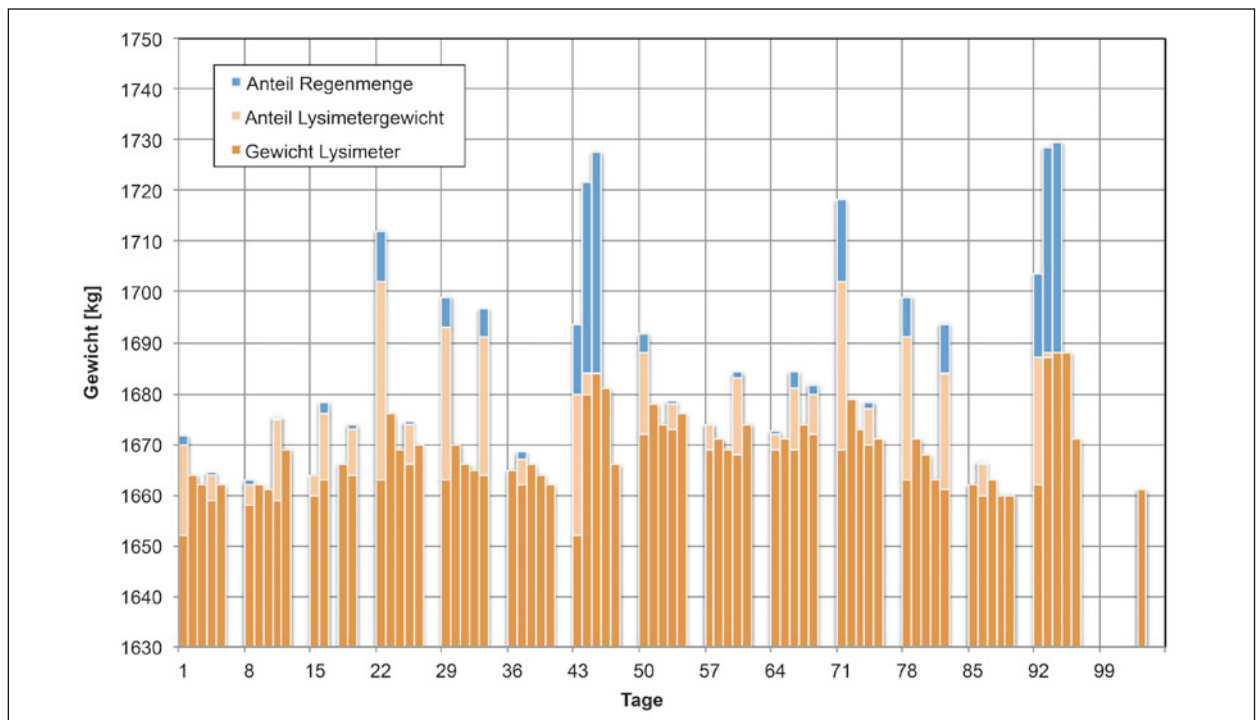


Bild 24: Gewicht des Lysimeters für den kiesigen Boden ohne TSM

Bild 24 zeigt, dass die Gewichtszunahmen durch die Beregnung schnell wieder abklingen und das Gesamtgewicht des Lysimeters insgesamt konstant bleibt.

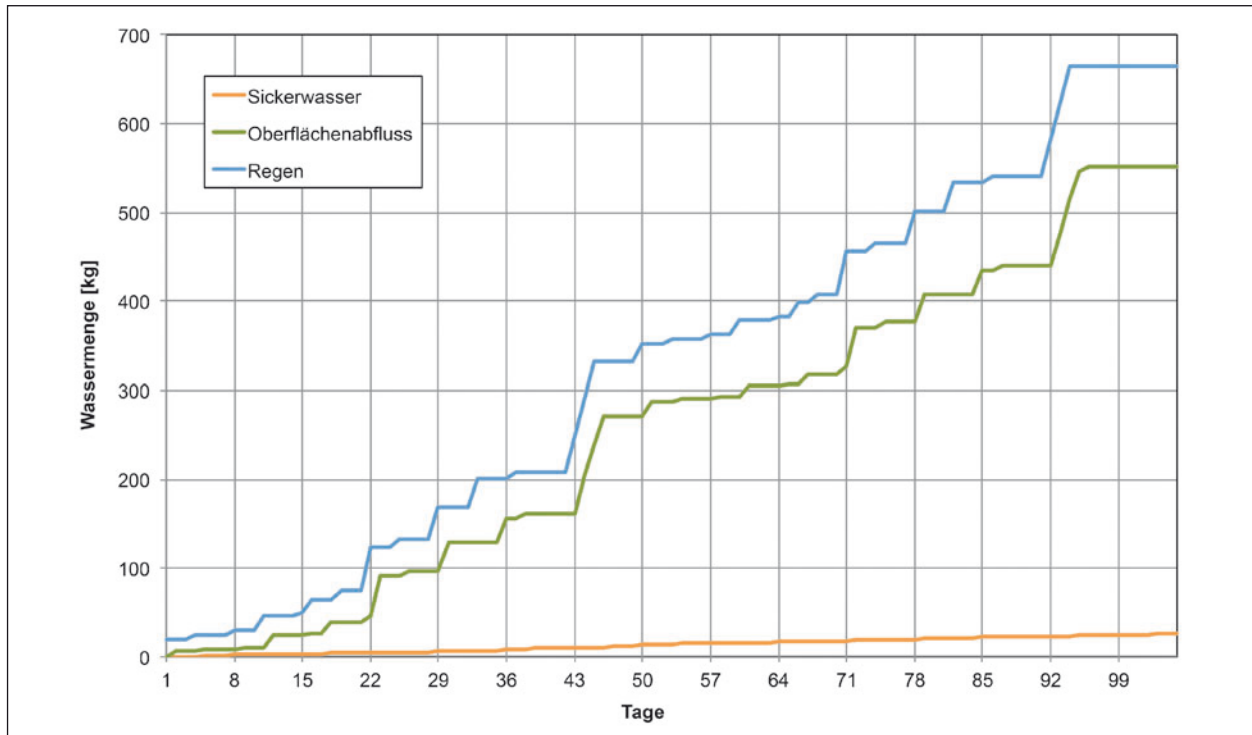
An der Größe der hellorangenen Balken erkennt man, dass das meiste Wasser direkt versickert

und eine Gewichtserhöhung des Lysimeters bewirkt. Beim 72-Stunden-Regen sind längere blaue Balken vorhanden. Im Gegensatz zu den bindigen Böden ist davon auszugehen, dass in diesen Mengen auch größere Mengen an Sickerwasser enthalten sind. Das Lysimetergewicht wurde nur ein-

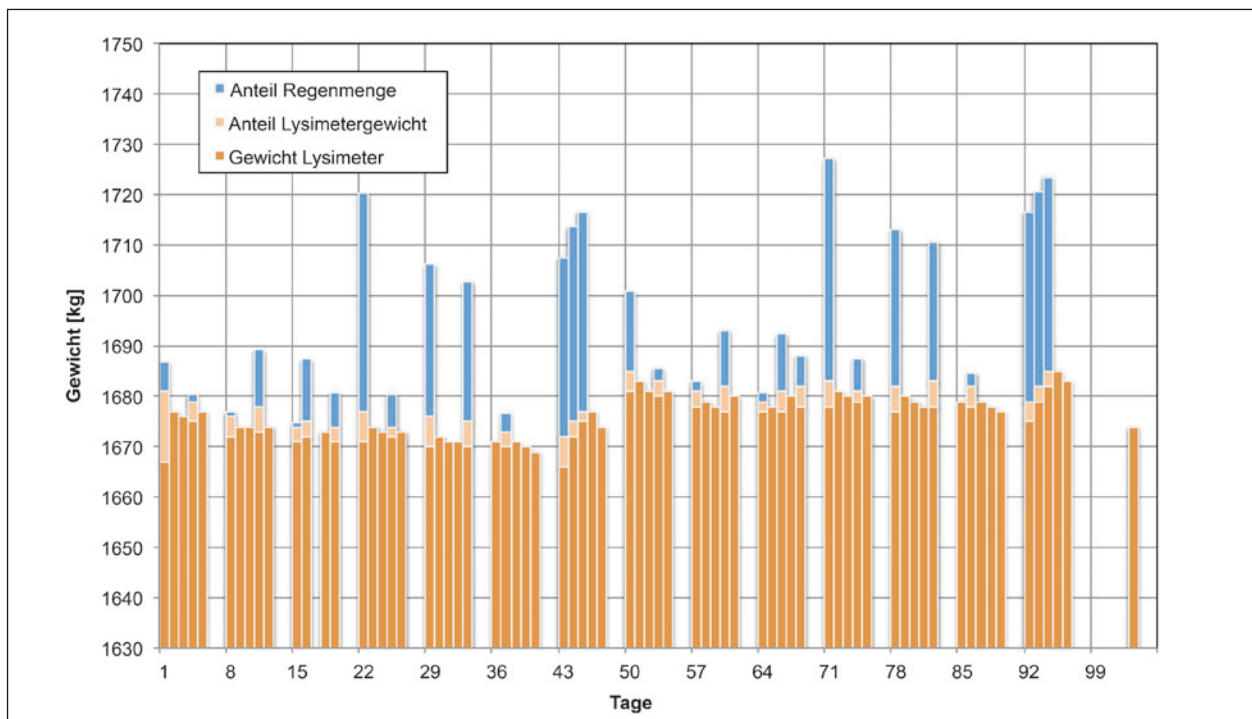
mal am Tag gemessen und während dieser langandauernden Regen steigen die Sickerwassermenge (orangene Kurve in Bild 23) stark an. Das Wasser fließt also mit geringer Zeitverzögerung durch das Lysimeter hindurch. Dies zeigt auch der rasche Abfall des Gewichtes nach dem 72-Stun-

den-Regen, da der kiesige Boden das Wasser nicht lange halten kann.

Genau gegensätzlich verhält sich der kiesige Boden mit Dränmatte in Bild 25. Dieser Versuch wurde eigentlich nur zur Vervollständigung der



**Bild 25:** Wassermengen für den kiesigen Boden mit Dränmatte



**Bild 26:** Gewicht des Lysimeters für den kiesigen Boden mit Dränmatte

Versuchsmatrix durchgeführt. Das M T S E (FGSV, 2009) sieht diese Bauweise Dränmatte auf durchlässigen Baukörper nicht vor. Hier fließt fast das gesamte Wasser oberflächlich ab. Während der Versuche ist optisch gut erkennbar, dass das Wasser tatsächlich über die Dränmatte abgeleitet

wird und nicht über die Oberfläche abfließt. Bei der Kurve des Oberflächenabflusses können gut die Beregnungsstufen erkannt werden. Die Sickerwasserkurve zeigt nur minimale Werte, die auch nach dem 72-Stunden-Regen nicht ansteigen.

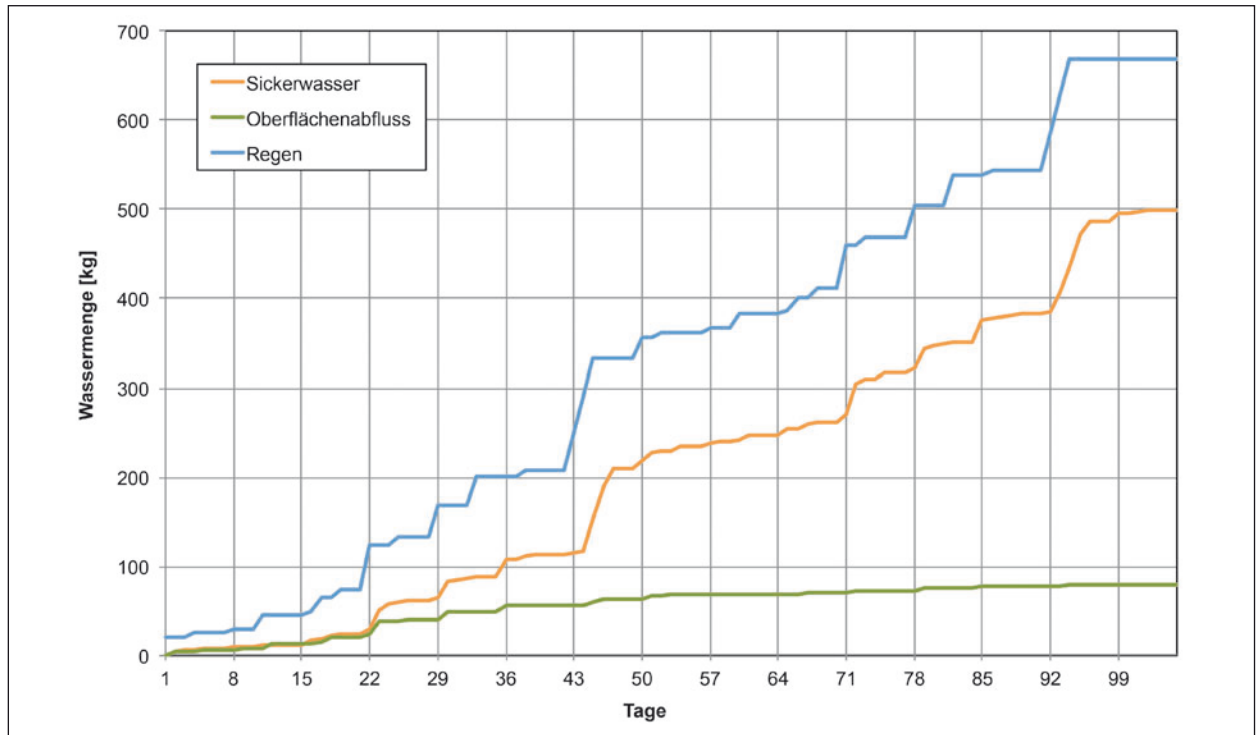


Bild 27: Wassermengen für den kiesigen Boden mit Bitumenanspritzung

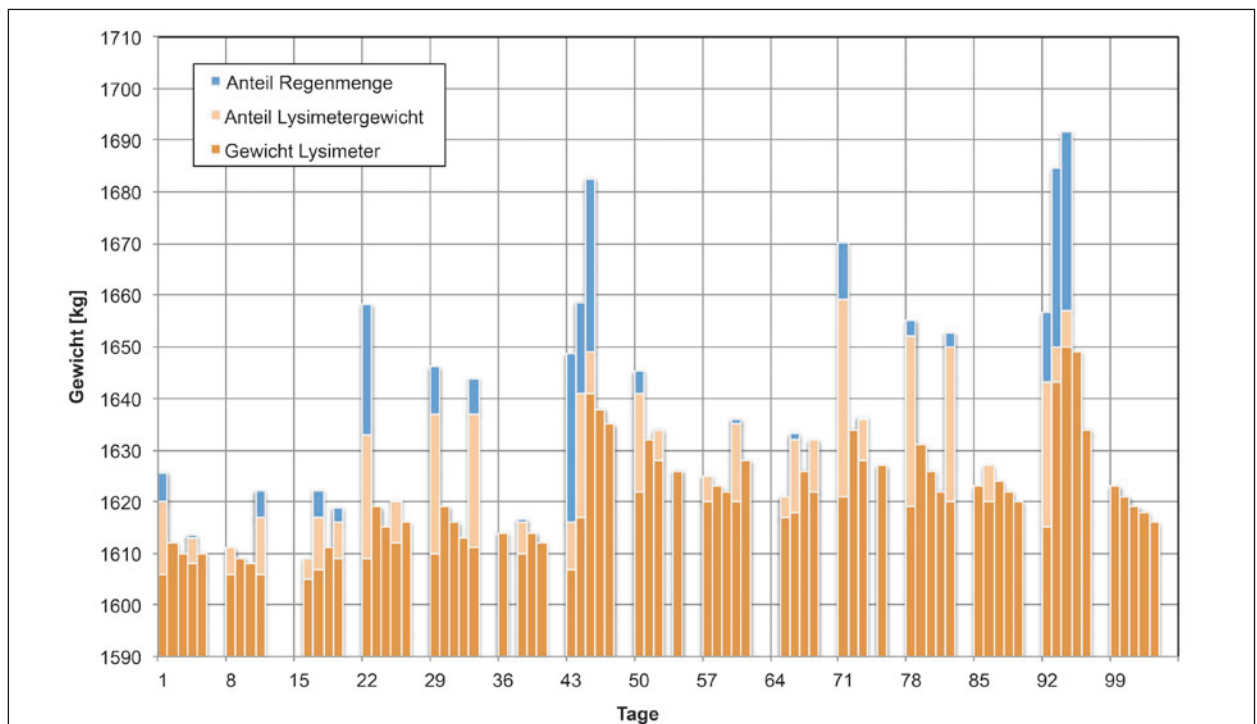
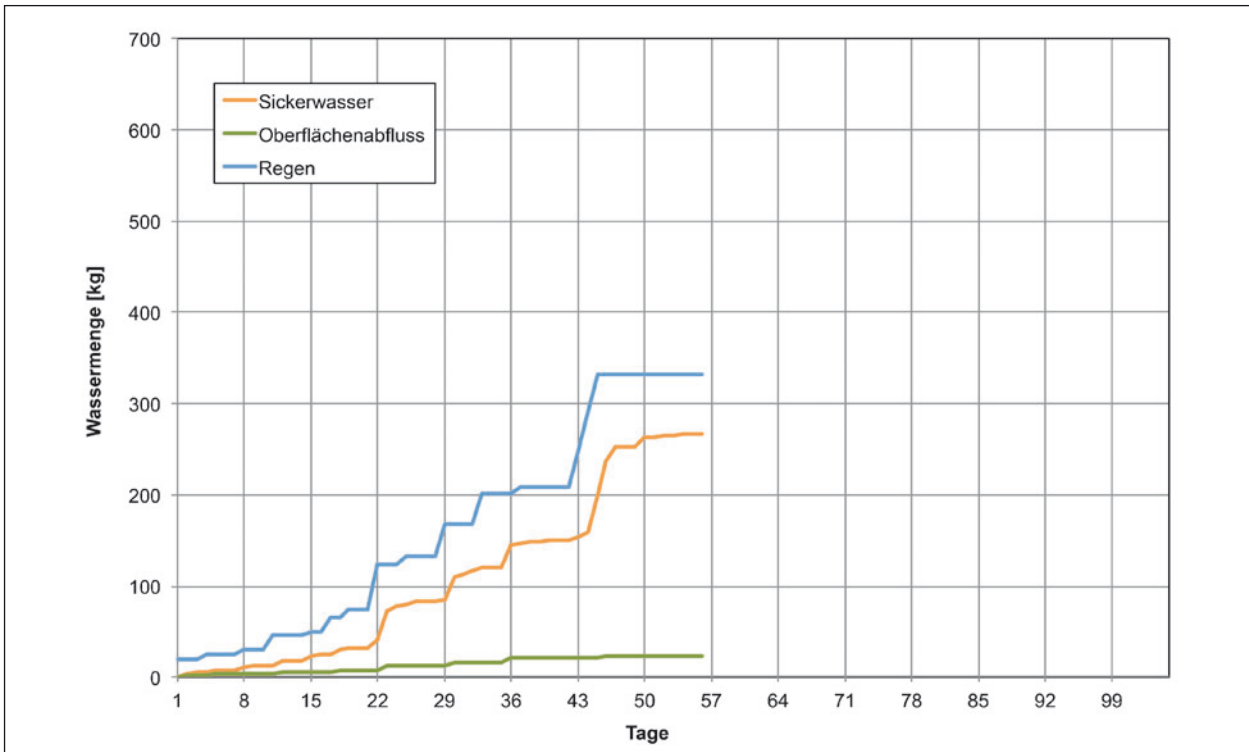


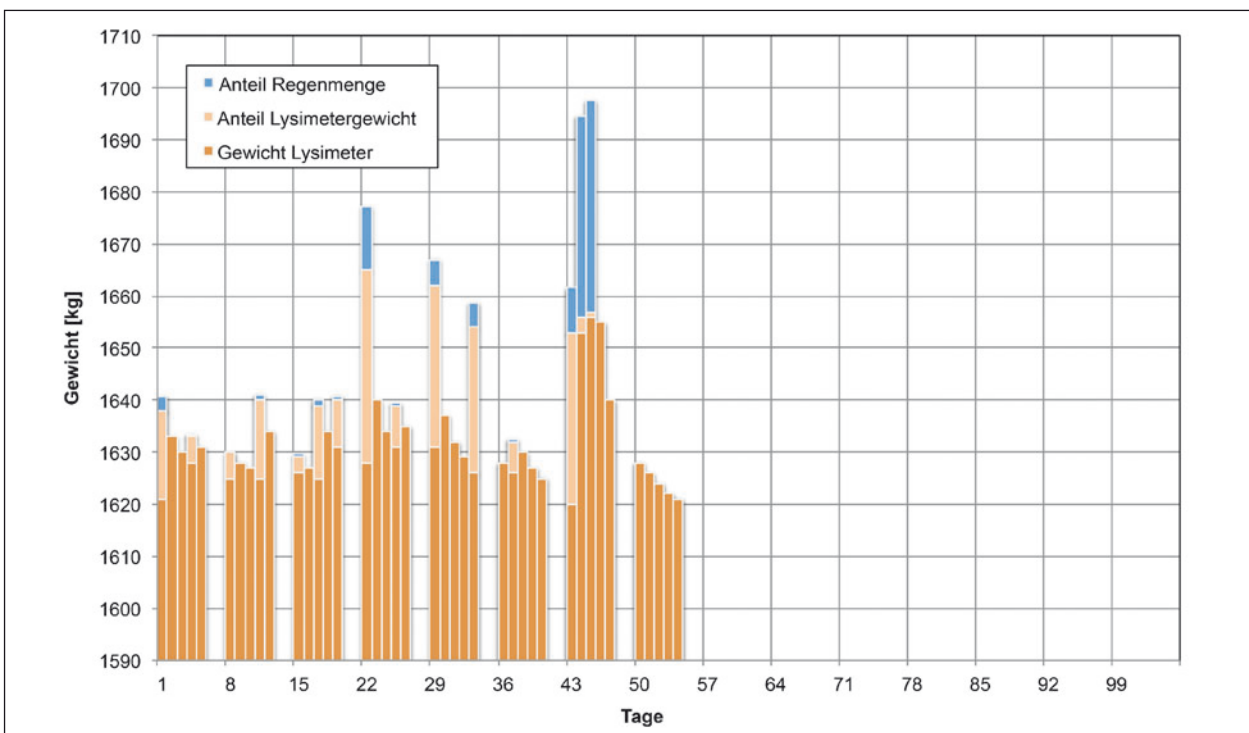
Bild 28: Gewicht des Lysimeters für den kiesigen Boden mit Bitumenanspritzung

Dies wird auch durch das Lysimetergewicht deutlich, das selbst durch die langanhaltenden Regen kaum steigt (Bild 26). Gut zu erkennen ist an den orangefarbenen Balken, dass das Lysimeter während der Beregnung kaum an Gewicht zunimmt.

Bild 27 zeigt die Verteilung der Wassermengen des kiesigen Bodens mit Bitumenanspritzung. Überraschenderweise ist viel Sickerwasser und sehr wenig Oberflächenabfluss zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die Sickerwasserkurve gut den Ver-



**Bild 29:** Wassermengen für den kiesigen Boden mit 2 x Bitumenanspritzung



**Bild 30:** Gewicht des Lysimeters für den kiesigen Boden mit 2 x Bitumenanspritzung

lauf der Regenmenge widerspiegelt. Bis zum ersten 6-Stunden-Regen sind die Sickerwasser und die Oberflächenabflusskurve fast identisch. Danach steigt die Sickerwasserkurve steil an. Dieser Effekt wird durch den 72-Stunden-Regen noch verstärkt. Dagegen kommt es kaum noch zu Oberflächenabfluss.

Obwohl reichlich Sickerwasser gemessen wird, zeigt das Lysimetergewicht zunächst keine nennenswerte Gewichtszunahme (Bild 28). Das Gewicht pendelt, trotz großer Gewichtszunahmen nach den Regenereignissen, um das Ausgangsgewicht. Erst nach dem ersten 72-Stunden-Regen steigt das Gewicht um ca. 10 kg an verbleibt dann aber auf diesem Niveau.

Wie beim bindigen Boden wurde der Versuch mit einer weiteren Bitumschicht auf demselben Erdkörper fortgeführt und ein 7-Wochen-Regenregime durchgeführt. In Bild 29 und Bild 30 zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie bei dem Versuch mit nur einer Schicht Bitumenanspritzung. Dies wird gekennzeichnet durch sehr hohe Sickerwassermengen, kaum Oberflächenabfluss und eine nennenswerte Gewichtsänderung im Lysimeter erst nach dem 72-Stunden-Regen.

## 6.3 Umweltrelevante Inhaltsstoffe

### 6.3.1 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.

Wie im Kapitel 3 ausführlich beschrieben wird, gibt es keine bundeseinheitlichen Regelungen zur Beurteilung der umweltrelevanten Inhaltsstoffe, da die Ersatzbaustoffverordnung (MantelV, 2012) zur Berichtslegung erst als Entwurf vorliegt. Zur Einordnung der Ergebnisse werden hier die Geringfügigkeitsschwellenwerte (GSF) im Grundwasser nach (LAWA, 2004) und die Prüfwerte nach (BBodSchV, 2012) für die Eluatanalyse herangezogen. Die Materialwerte für die Feststoffe der beiden untersuchten Böden werden nach (LAGA, 2003) eingeordnet.

Tabelle 20 zeigt die verwendeten Farbhervorhebungen für Tabelle 21 und Tabelle 22 basierend auf der Zuordnung der Feststoffwerte nach (LAGA, 2003).

In Tabelle 21 und Tabelle 22 sind die Ergebnisse der Feststoffanalyse für den kiesigen und den bindigen Boden dargestellt. Die Böden wurden zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten beprobt. Die erste Probe wurde direkt nach der Mischung mit den zugegebenen Stoffen (siehe Kapitel 5.4) genommen. Davon wurden Rückstellproben genommen und luftdicht, kühl und trocken gelagert. Das restliche Material wurde bis zum Einbau auf zwei abgedeckten Halden gelagert. Von diesen Materialien wurden vor Einbau ebenfalls Proben genommen. Die erste direkt nach Mischung gewonnene Probe wurde von einem anderen Labor untersucht als die darauffolgenden Proben.

Alle maßgeblichen organischen Parameter wie PAK, KW, LHKW, BTX, PCB lagen unterhalb der Bestimmungsgrenze.

Cyanid, Cadmium und Kupfer sind in Tabelle 21 und Tabelle 22 farblich hervorgehoben. Beim kiesigen Boden wird für Cadmium und Kupfer sogar der Z2-Wert überschritten. Diese Stoffe wurden als

	< Z0
	> Z0
	> Z1.1
	> Z1.2
	> Z2

Tab. 20: Farbeinteilung der Feststoffwerte (LAGA, 2003)

Kiesiger Boden Analyse bez. auf Trockenrückstand		nach Mischung	aus Rückstell- probe	vor Einbau
Cyanid gesamt	mg/kg	4,1	9,1	7,8
Arsen	mg/kg	< 2	1,4	1,5
Blei	mg/kg	< 4	2	3,7
Cadmium	mg/kg	6,4	12,1	12,7
Chrom gesamt	mg/kg	3	5	5,3
Kupfer	mg/kg	300	532	600
Nickel	mg/kg	2,8	4,4	4,7
Quecksilber	mg/kg	< 0,05	< 0,1	< 0,1
Thallium	mg/kg	< 0,1	< 0,4	< 0,4
Zink	mg/kg	4	7,4	8,6
EOX	mg/kg	< 1	< 1	< 1
Kohlenwasserstoffindex	mg/kg	< 50	< 50	< 50
TOC,s [%]	%		4,4	4,2
Humusgehalt [%]	%		7,4	7,1

Tab. 21: Feststoffanalyse des kiesigen Bodens



Bindiger Boden Analyse bez. auf Trockenrückstand		nach Mischung	aus Rückstell- probe	vor Einbau
Cyanid gesamt	mg/kg	5,1	4,9	5,5
Arsen	mg/kg	12	12,2	13
Blei	mg/kg	< 4	6,5	7
Cadmium	mg/kg	3,7	4,4	5
Chrom gesamt	mg/kg	17	16,2	18,2
Kupfer	mg/kg	180	220	259
Nickel	mg/kg	14	15	16,7
Quecksilber	mg/kg	< 0,05	< 0,1	< 0,1
Thallium	mg/kg	< 0,1	< 0,4	< 0,4
Zink	mg/kg	26	31	32
EOX	mg/kg	< 1	< 1	< 1
Kohlenwasser- stoffindex	mg/kg	< 50	< 50	< 50
TOC,s [%]	%		1,1	1,1
Humusgehalt [%]	%		1,8	1,8

Tab. 22: Feststoffanalyse des bindigen Bodens

Cadmiumacetat, Kaliumferrocyanid und Kupfersulfat den Ausgangsböden zugemischt. Die Mischung von mehreren Tonnen Boden mit wenigen Gramm von Schadstoffen ist problematisch. Es ist nicht belegbar, woraus die Unterschiede bei den Feststoffwerten zwischen erster und den weiteren Probenahmen resultieren. Mögliche Ursachen können sein:

- nicht ausreichend homogen gemischte Böden,
- Unterschiede bei der Analytik der verschiedenen Labore,
- Fehler bei der Probenahme.

Da Cyanid, Cadmium und Kupfer als Feststoffverbindungen zugegeben wurden, waren die Auswirkungen auf die Eluate nicht direkt voraussehbar.

### 6.3.2 Untersuchungen am Eluat

Die Eluate wurden mit den Verfahren DEV S4 (DIN EN 38414-4, 1984), Schüttelverfahren (2:1 Elution) (DIN 19529, 2009) sowie dem Perkulationsverfahren (Säulentest) (DIN 19528, 2009) hergestellt. Die W/F-Verhältnisse der Säulenfraktionen sind in Kapitel 5.4 beschrieben. An allen Proben, an denen Feststoffuntersuchungen durchgeführt wurden, wurden auch Eluate mit dem DEV-S4-Verfahren hergestellt. Für die weiteren Eluatunter-

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

Tab. 23: Farbeinteilung der Eluatwerte

suchungen wurden die Materialien aus den Rückstellprobe und von der Halde verwendet. Auch hier wurden die direkt nach Mischung hergestellten Proben von einem anderen Labor untersucht, als die Folgenden. Die Ergebnisse aller Untersuchungen sind im Anhang in den Tabellen Tab.-A 4 bis Tab.-A 9 so groß dargestellt, dass die Zahlenwerte gut lesbar sind. Es wird jeweils unterchieden nach kiesigen und bindigen Material und nach Zeitpunkt der Probenahme.

Tabelle 23 zeigt die verwendeten Farbhervorhebungen für die Eluate. Die Zahlenwerte finden sich in Tabelle 18.

In den Tabellen 24 und 25 werden durch die farbliche Markierungen eine Übersicht über die Eluatwerte für das kiesige und bindige Material gegeben. Dabei werden nur die Ergebnisse der Proben von den Halden dargestellt, da diese in die Lysimeter eingebaut wurden. In den Eluaten des kiesigen Bodens (Tabelle 24) liegen Cyanid, Chrom und Molybdän teilweise über den Prüfwerten der BBodSchV. Die Stoffe Sulfat, Cadmium, Kupfer und Zink liegen teilweise über den GFS-Werten.

Bei den Eluaten des bindigen Bodens (Tabelle 25) liegen Cyanid immer, und Chrom teilweise über den Prüfwerten der BBodSchV. Sulfat und Kupfer liegen teilweise über den GFS-Werten.

Die Tabellen Tab.-A 6 und Tab.-A 7 im Anhang zeigen die Ergebnisse der Säulenkurztests. Bei den Versuchen A und B wurden die in (DIN 19528, 2009) angegebenen Toleranzen für das Wasser-Feststoffverhältnis nicht eingehalten. Daraufhin wurde der Versuch mit einer Doppelbestimmung der Haldenmaterialien (C und D) wiederholt. Von der Rückstellprobe war leider kein Material mehr für eine Doppelbestimmung vorhanden. Es sind trotz Abweichungen die gleichen Tendenzen wie bei den anderen Verfahren zu erkennen.

Eluatanyalse von Halde	DEV S4	2:1 Elution	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
Kiesiger Boden	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Chlorid	< 1	< 1	13,3	< 1	< 1	< 1
Cyanid gesamt	0,088	0,029	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,033
Sulfat	49,5	279	1970	411	80,8	6,5
Antimon	< 0,01	< 0,01	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003
Arsen	< 0,001	< 0,001	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Blei	< 0,001	0,0018	0,006	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Cadmium	< 0,0003	< 0,0003	0,00206	0,00057	0,00116	< 0,0004
Chrom gesamt	< 0,001	< 0,001	0,00151	0,0124	0,0504	0,00667
Kupfer	0,0091	0,0277	0,018	0,00535	0,0145	0,00629
Molybdän	< 0,01	0,012	0,0683	0,0123	0,00747	0,00526
Nickel	< 0,001	< 0,001	0,00362	0,00104	< 0,001	< 0,001
Quecksilber	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Thallium	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,002
Vanadium	< 0,01	< 0,01	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Zink	< 0,01	< 0,01	0,085	0,0361	0,0159	< 0,005

Tab. 24: Vergleich der Eluatanalysen für den kiesigen Boden

Eluatanyalse von Halde	DEV S4	2:1 Elution	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
Bindiger Boden	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Chlorid	1,1	< 1	4,5	2	< 1	< 1
Cyanid gesamt	0,21	0,83	2,519	1,537	0,439	0,271
Sulfat	26,5	126	575	337	30,9	< 1
Antimon	< 0,01	< 0,01	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003
Arsen	< 0,001	< 0,001	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Blei	0,0011	< 0,001	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Cadmium	< 0,0003	< 0,0003	0,00061	< 0,0004	< 0,0004	< 0,0004
Chrom gesamt	0,0019	0,0074	0,0227	0,0573	0,0221	0,0104
Kupfer	< 0,005	< 0,005	0,0185	0,0037	0,021	0,00467
Molybdän	< 0,01	< 0,01	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Nickel	< 0,001	< 0,001	0,00222	0,00136	< 0,001	< 0,001
Quecksilber	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Thallium	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Vanadium	< 0,01	< 0,01	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Zink	< 0,01	0,0109	0,0479	0,0378	0,048	0,0137

Tab. 25: Vergleich der Eluatanalysen für den bindigen Boden

### 6.3.3 Sickerwasseranalyse

Während der 15-wöchigen Versuchsdauern wurden bis zu 72 Sickerwasserproben genommen. Eine statistische Auswertung aller gemessenen umweltrelevanten Inhaltsstoffe im Sickerwasser enthalten die Tabellen Tab.-A 2 und Tab.-A 3 im Anhang.

Die Tabelle 26 und Tabelle 27 zeigen als Übersicht die 90-Perzentile aller gemessenen Werte. Die Farbhervorhebungen entsprechen den Definitionen in Tabelle 23.

Für den kiesigen Boden liegen die Werte im Sickerwasser für Cadmium, Molybdän und teilweise für Kupfer über den Prüfwerten der BBodSchV. Die



Kiesiger Boden Sickerwasser- analyse	ohne TSM	Dränmatte	Bitumen- anspritzung
90-Perzentil	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Chlorid	50,98	44,03	55,46
Cyanid gesamt	0,003	0,005	0,007
Sulfat	2230	2314	2210
Antimon	<0,001	<0,001	<0,001
Arsen	<0,001	<0,001	<0,001
Blei	4,90E-05	5E-07	2,65E-04
Cadmium	0,0083	0,0083	0,0017
Chrom gesamt	0,0047	0,0047	0,0041
Kupfer	0,0419	0,0576	0,1075
Molybdän	0,0917	0,0936	0,0712
Nickel	0,0099	0,0088	0,0108
Quecksilber	<0,001	<0,001	<0,001
Thallium	<0,001	<0,001	<0,001
Vanadium	0,0005	0,0005	<0,001
Zink	0,0209	0,0032	0,0021
Fluorid	0,57	0,26	0,58

Tab. 26: 90-Perzentile der Sickerwasseranalyse für den kiesigen Boden

90-Perzentile von Sulfat liegen über den Geringfügigkeitsschwellenwerten. Tabelle 27 zeigt, dass für den bindigen Boden die Sickerwasserkonzentrationen für Cyanid und teilweise für Cadmium und Chrom über den Prüfwerten der BBodSchV liegen. Über den Geringfügigkeitsschwellenwerten liegen die Werte von Sulfat.

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. Der ausführliche Säulentest spiegelt das Auslaugverhalten am besten wieder. Am Auffälligsten ist, dass beim kiesigen Boden kaum Cyanid im Sickerwasser gefunden wurde und dass beim bindigen Boden im Eluat kaum Cadmium gefunden wurde. Dafür sind die Cyanidwerte beim bindigen Boden im Sickerwasser sehr hoch.

Die Tabellen geben nur eine Übersicht wieder und sagen nichts über den Konzentrationsverlauf im Sickerwasser aus. Insgesamt lassen sich das zudotierte Cadmium, Cyanid, Kupfer und Sulfat gut verfolgen und werden zusammen mit Fluorid und Molybdän beim kiesigen Boden und Chrom beim bindigen Boden in der Auswertung in Kapitel 7.5 näher betrachtet.

Bindiger Boden Sickerwasser- analyse	ohne TSM	Dränmatte	Bitumen- anspritzung
90-Perzentil	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Chlorid	35,76	23,66	43,16
Cyanid gesamt	6,78	6,9	3,1
Sulfat	1558	1736	1220
Antimon	0,005	<0,001	<0,001
Arsen	<0,001	<0,001	<0,001
Blei	8,97E-04	6,70E-05	3,50E-04
Cadmium	0,0071	0,0051	0,0038
Chrom gesamt	0,0494	0,0586	0,0383
Kupfer	0,0010	0,0095	0,0089
Molybdän	0,0074	0,0062	0,0050
Nickel	0,0072	0,0073	0,0076
Quecksilber	<0,001	<0,001	<0,001
Thallium	<0,001	<0,001	<0,001
Vanadium	0,0023	0,0005	0,0005
Zink	0,0107	0,0118	0,0088
Fluorid	0,09	0,12	0,27

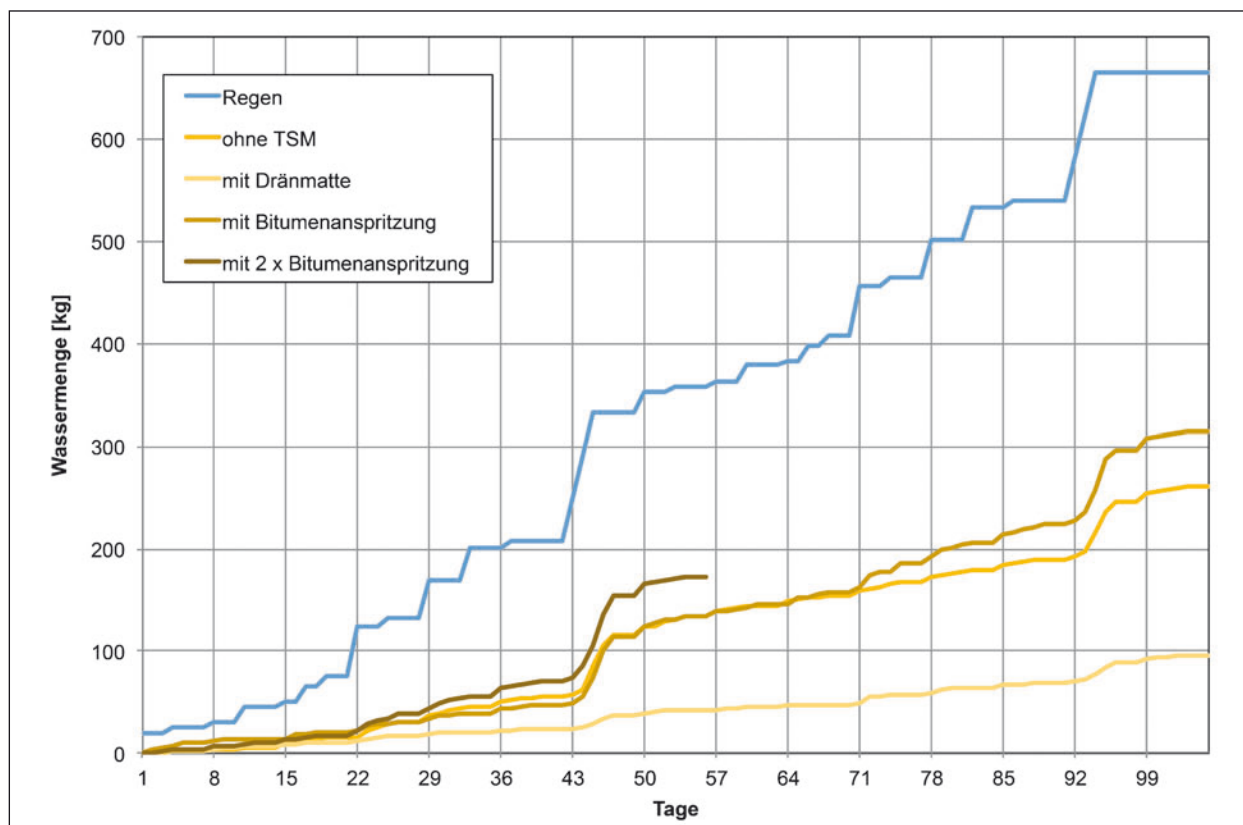
Tab. 27: 90-Perzentile der Sickerwasseranalyse für den bindigen Boden

## 7 Auswertung

### 7.1 Vergleich der Sickerwassermengen

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

Bild 31 zeigt den Vergleich der gemessenen Sickerwassermengen für die Versuchsreihen mit bindigen Boden. Blau dargestellt ist wieder die Summe der aufgetragenen Regenmenge. Es ist gut zu erkennen, dass die Kurve des Versuches mit Dränmatte deutlich unter der Sickerwasserkurve des Versuches ohne TSM liegt. Die Kurve des Versuches mit Bitumenanspritzung verläuft zunächst fast identisch mit der Vergleichskurve ohne TSM. Ab dem zweiten 6-Stunden-Regen steigt die Kurve mit Bitumenanspritzung jedoch steiler an, sodass am Ende mehr Sickerwasser gemessen wird als ohne TSM. Dieses unerwartete Ergebnis wurde überprüft, indem auf den vorhandenen Erdkörper mit Bitumenanspritzung noch eine zweite Schicht Bitumen aufgespritzt und ein weiterer Umlauf des Regenregimes durchgeführt wurde. Auch diese Schicht führte nicht zu einer deutlichen Reduzierung der Sickerwassermengen.



**Bild 31:** Vergleich der Sickerwassermengen beim bindigen Boden

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 wird in Bild 32 gestrichelt dargestellt. Es zeigt sich, dass die Sickerwasserkurven der zweiten Umläufe immer über denen der ersten Umläufe (Versuchswochen 1 bis 7) liegen. Die Kurve für die Versuchsreihe mit 2-facher Bitumenanspritzung liegt über der Kurve des ersten Umlaufes mit Bitumenanspritzung aber unter der Kurve des zweiten Umlaufes mit Bitumenanspritzung. Sie ist ebenfalls gestrichelt dargestellt, da es sich im Grunde um den dritten Umlauf mit Bitumenanspritzung handelt.

Bild 33 zeigt den Vergleich der gemessenen Sickerwassermengen für die Versuchsreihen mit kiesigem Boden. Die Summe der aufgebrachten Regenmenge ist wieder blau dargestellt. Beim kiesigen Boden ohne TSM tritt, wie erwartet, viel Sickerwasser auf. Die Sickerwasserkurve des Versuches mit Bitumenanspritzung liegt zwar unter der des Versuches ohne TSM, die Kurven verlaufen

aber parallel und der Abstand ist gering. Daher wurde auch hier ein weiterer Umlauf mit einer zweiten Schicht Bitumenanspritzung durchgeführt. Diese Kurve ist fast identisch mit der Kurve des Versuches ohne TSM und liegt überraschenderweise oberhalb der Kurve mit der einfachen Bitumenanspritzung. Die Sickerwasserkurve für den Versuch kiesiger Boden mit Dränmatte verläuft dagegen überraschend flach.

Bild 34 zeigt den Vergleich der Umläufe bei der Sickerwasserentwicklung. Die Kurve für die Bauweise mit Dränmatte zeigt für beide Umläufe gleich wenig Sickerwasser. Die Kurve des ersten Umlaufs ohne TSM liegt oberhalb der Kurve des ersten Umlaufs mit Bitumenanspritzung. Die zweiten Umläufe mit Bitumenanspritzung und ohne TSM liefern das meiste Sickerwasser und verlaufen fast identisch. Die Kurve mit 2-facher Bitumenanspritzung liegt genau auf der Kurve des ersten Umlaufs ohne TSM. Die teilweise sehr gute Übereinstimmung der Kurve zeigt, dass bei gleichen Bedingungen mit dem Hallenlysimeter vergleichbare Ergebnisse erzielt werden.

Bild 35 zeigt vergleichend alle Sickerwasserkurven. Erwartungsgemäß liegen die Kurven des kiesigen

Bodens über den Sickerwasserkurven des bindigen Bodens mit Ausnahme der Versuche mit Dränmatte. Hier verläuft die Sickerwasserkurve des kiesigen Bodens wesentlich flacher als die des bindigen Bodens.

Um die Aufsättigung des Bodens zu untersuchen, wurde der Verlauf der Sättigung während des Versuchs betrachtet. Generell liegen die Sättigungszahlen bei den Bauweisen mit bindigen Boden mit Werten zwischen 60 % und annähernd 100 % we-

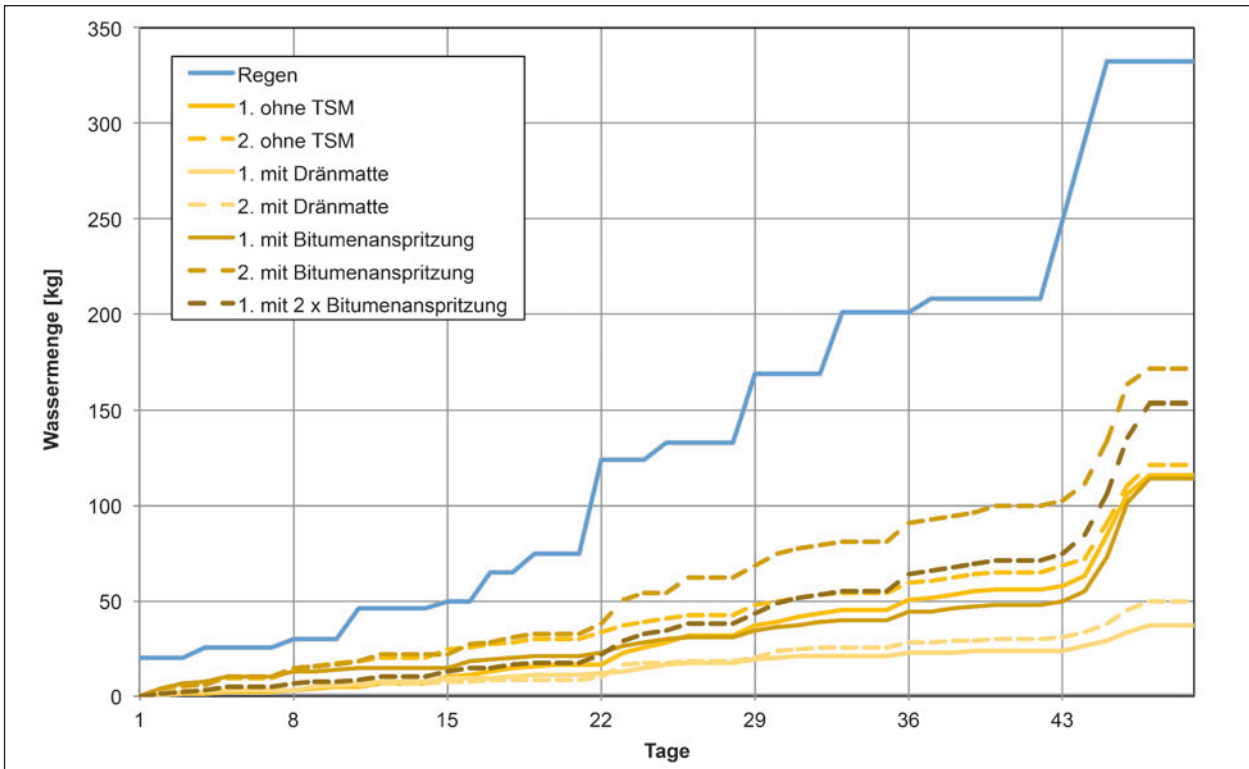


Bild 32: Vergleich der Sickerwassermenge der beiden Umläufe beim bindigen Boden

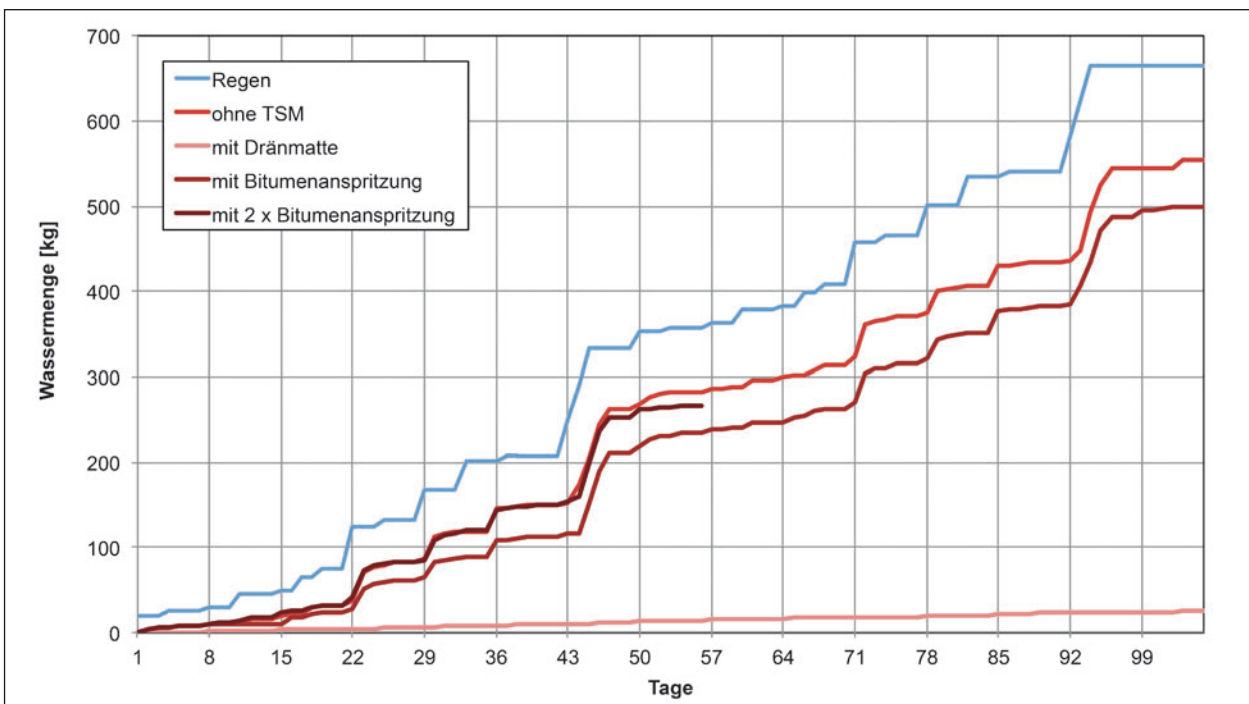
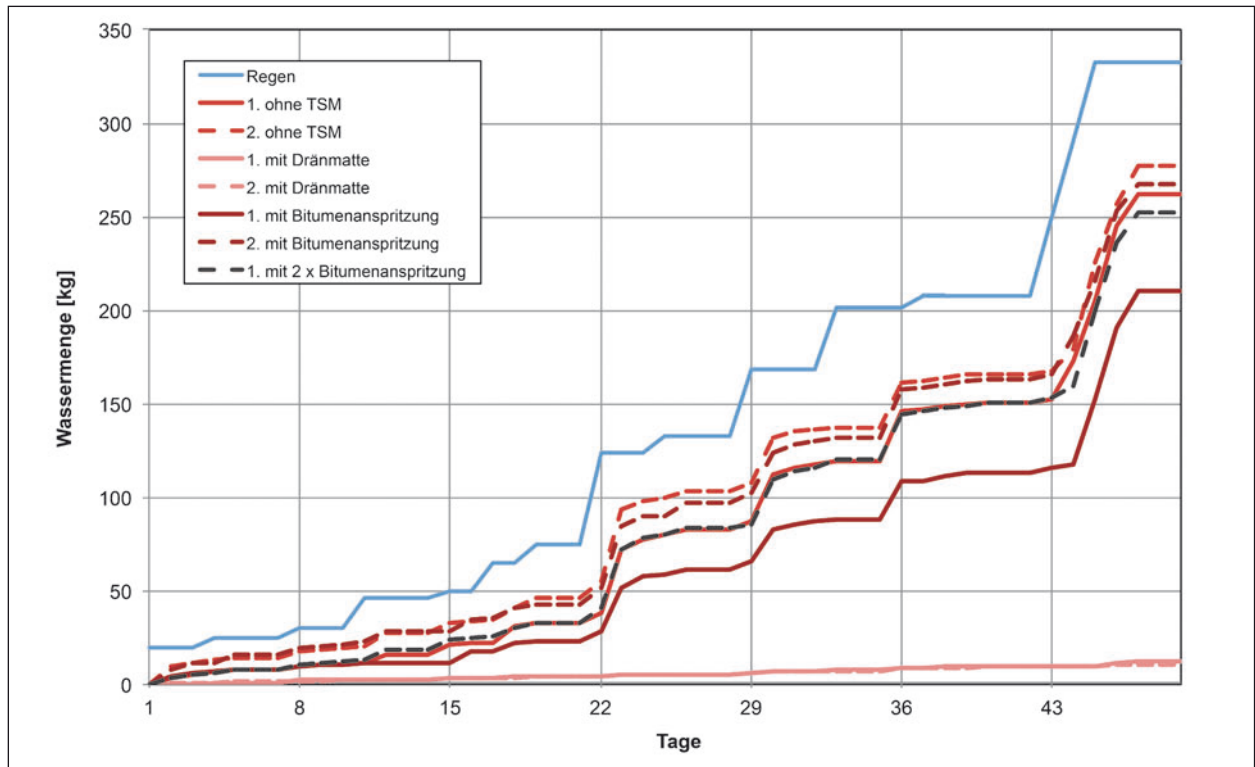


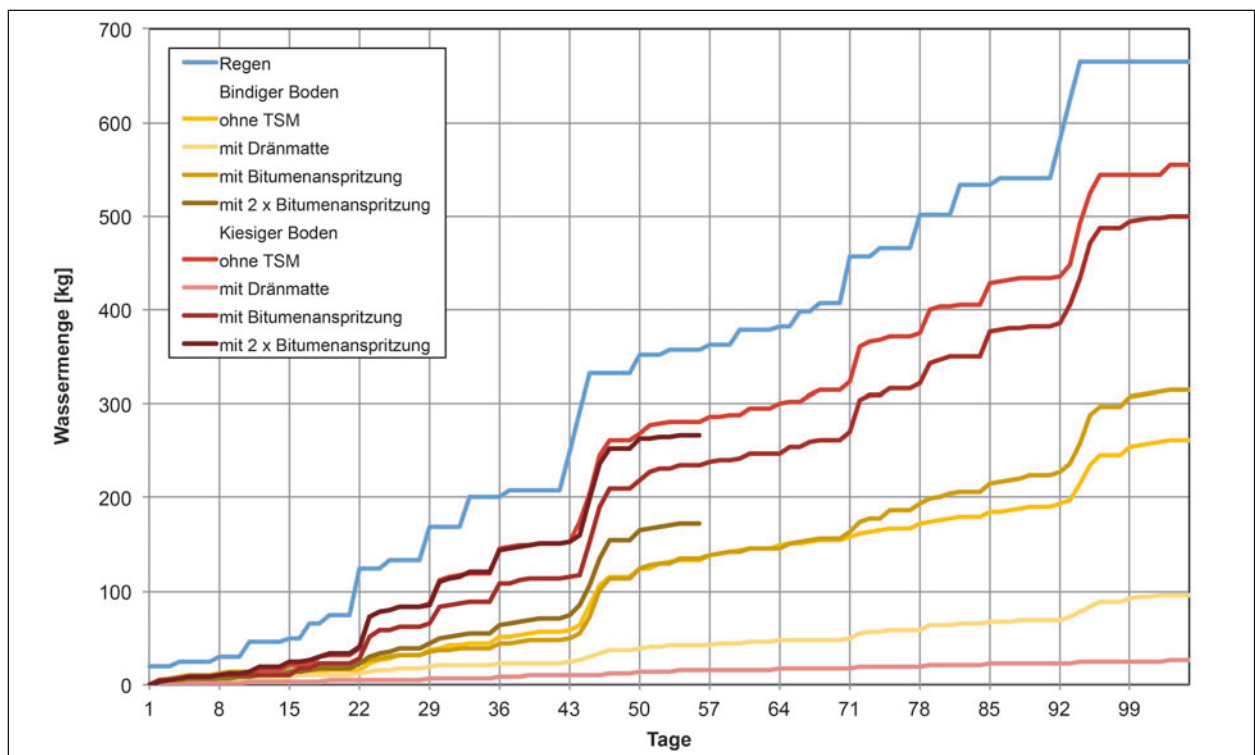
Bild 33: Vergleich der Sickerwassermengen beim kiesigen Boden

sentlich über den Sättigungsverläufen des kiesigen Bodens mit Werten zwischen 15 % und 40 % Sättigung. Eine deutliche Steigerung der Sättigung konnte jeweils nach den langandauernden 72-Stun-

den-Regen beobachtet werden. Eine signifikante Aufsättigung im 2. Durchlauf des Regenregimes konnte allerdings nicht beobachtet werden, sodass auf eine grafische Darstellung verzichtet wurde.



**Bild 34:** Vergleich der Sickerwassermenge der beiden Umläufe beim kiesigen Boden



**Bild 35:** Vergleich der Sickerwassermenge für alle Versuche



Das Sickerwasser wird über insgesamt 18 Saugplatten gewonnen (siehe Bild 5). Dies erlaubt eine detaillierte Betrachtung der Sickerwasserverteilung. Da insbesondere bei den bindigen Böden 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 10 für den bindigen Boden und Tab.-A 11 für den kiesigen Boden.

Exemplarisch werden hier die Verteilungen für die Versuchsreihen bindiger Boden ohne TSM jeweils getrennt nach erstem (Bild 36) und zweitem (Bild 37) Umlauf des Regenregimes wiedergegeben. Die Regenereignisse angegeben als Regenmenge pro Zeiteinheit werden in der Reihenfolge ihrer Durchführung dargestellt.

Bei dem Versuch mit bindigem Boden ohne TSM sind besonders deutlich 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.

Beim kiesigen Boden besteht kein wesentlicher Unterschied bei der Verteilung der Sickerwassermengen zwischen dem ersten und dem zweiten Regenregime. Hier ähnelt das Muster des ersten Durchlaufs sehr dem Muster des zweiten Durchlaufs. Gut zu erkennen ist beispielsweise die hohe Menge, die aus dem vorderen Bereich der Saugplatten abgeführt wird beim 6. Regen (15,24/5) des Regenregimes.

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 ist das im Boden zwischen gespeicherte Wasser relativ gleichmäßig verteilt.

Bei der Versuchsreihe Dränmatte auf kiesigen Boden wurde kaum Sickerwasser gewonnen. Die größte Sickerwassermenge wurde in die Duranglasflasche (Nr. 5, 11, 14) geliefert.

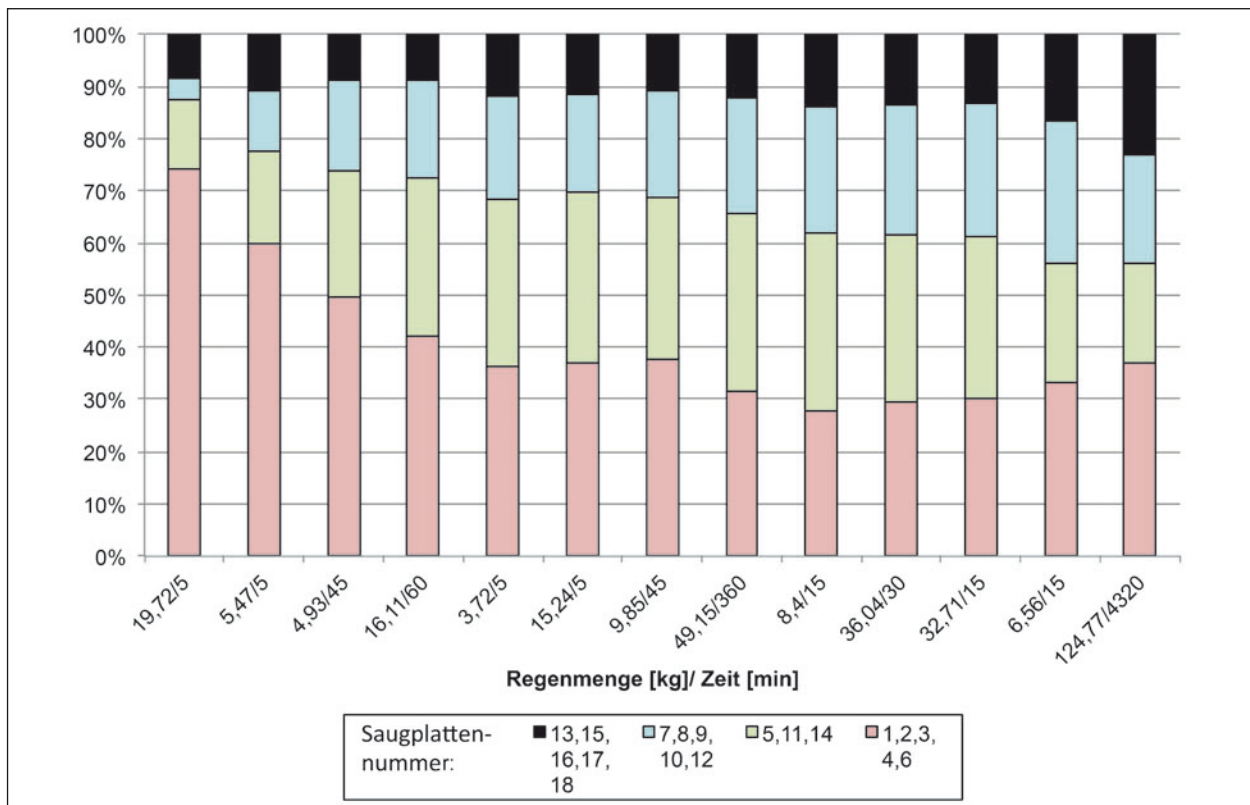


Bild 36: Prozentuale Verteilung des Sickerwassers für den bindigen Boden 1. Umlauf ohne TSM

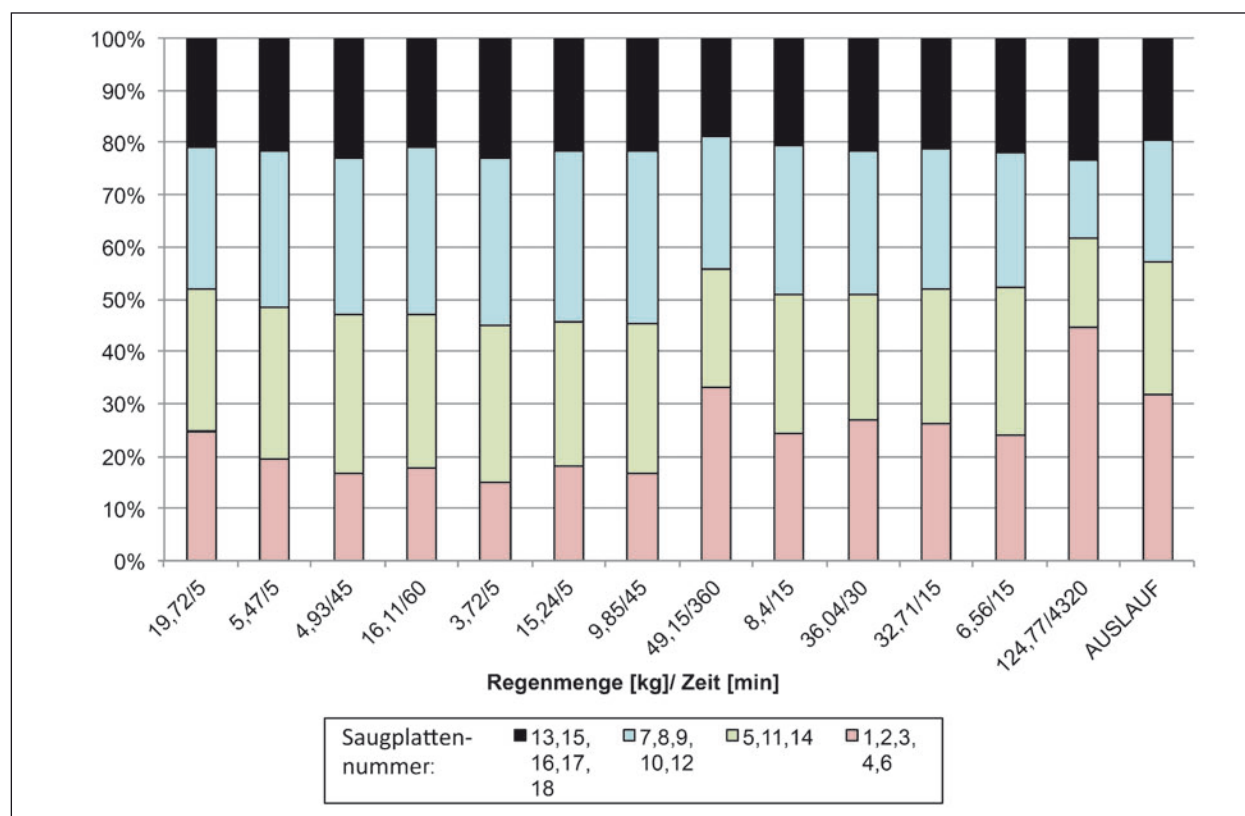


Bild 37: Prozentuale Verteilung des Sickerwassers für den bindigen Boden 2. Umlauf ohne TSM

## 7.2 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 Boden 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 Niederschlagspende einen Einfluss auf die Menge des Oberflächenabflusses hat. Es wird vermutet, dass starke, kurze Regen mehr Oberflächenabfluss erzeugen als schwache, langandauernde Regen. Zur besseren Übersicht werden Bauweisen mit ähnlichen Oberflächenverhalten zusammengefasst. Der prozentuale Anteil wurde berechnet, indem die Menge an gemessenen Oberflächen-

abfluss auf die Menge des jeweiligen Regens bezogen wurde. Es wurden beide Umläufe des Regenregimes getrennt von einander betrachtet, um Einflüsse der Sättigung des Bodens zu erkennen.

Das Ganze wird als Linie dargestellt, um den Verlauf besser zu erkennen, obwohl es sich eigentlich um Einzelwerte handelt. Bild 38 zeigt die beiden Versuchsreihen mit Dränmatte, hier wurde insgesamt der meiste Oberflächenabfluss gemessen. Die Regenereignisse sind nach aufsteigender Regenmenge sortiert und als Regenmenge pro Zeiteinheit angegeben, da nur so sinnvolle Zusammenhänge erkannt werden konnten.

Unabhängig vom Boden nimmt der Anteil des Oberflächenabflusses bei dieser Bauweise mit steigender Regenmenge zu und das unabhängig von der Regendauer. Nur bei den sehr langen Regen (6 Stunden und 72 Stunden) nimmt beim bindigen Boden der Anteil des Oberflächenabflusses wieder ab. Auffällig ist, dass der Regen (19,72/5) bei beiden 1. Umläufen deutlich niedriger liegt als die Grafik erwarten lässt. Hierbei handelt es sich um den ersten Regen im Regenregime, sodass vermutlich mehr Wasser in den noch trockenen Bodenkörper versickert.

In Bild 39 sind die Bauweisen ohne TSM und mit Bitumenanspritzung für den bindigen Boden zusammengefasst. Die Abflussraten sind hier insgesamt niedriger als bei den Versuchsreihen mit Dränmatten. Es ist ebenfalls ein Ansteigen des

Anteils des Oberflächenabflusses mit der Regenmenge zu erkennen. Überlagert wird dieser Effekt durch eine Abhängigkeit von der Regendauer. Diese zeigt sich vor allen durch ein rapides Absinken der Anteile bei den sehr langen Regenereig-

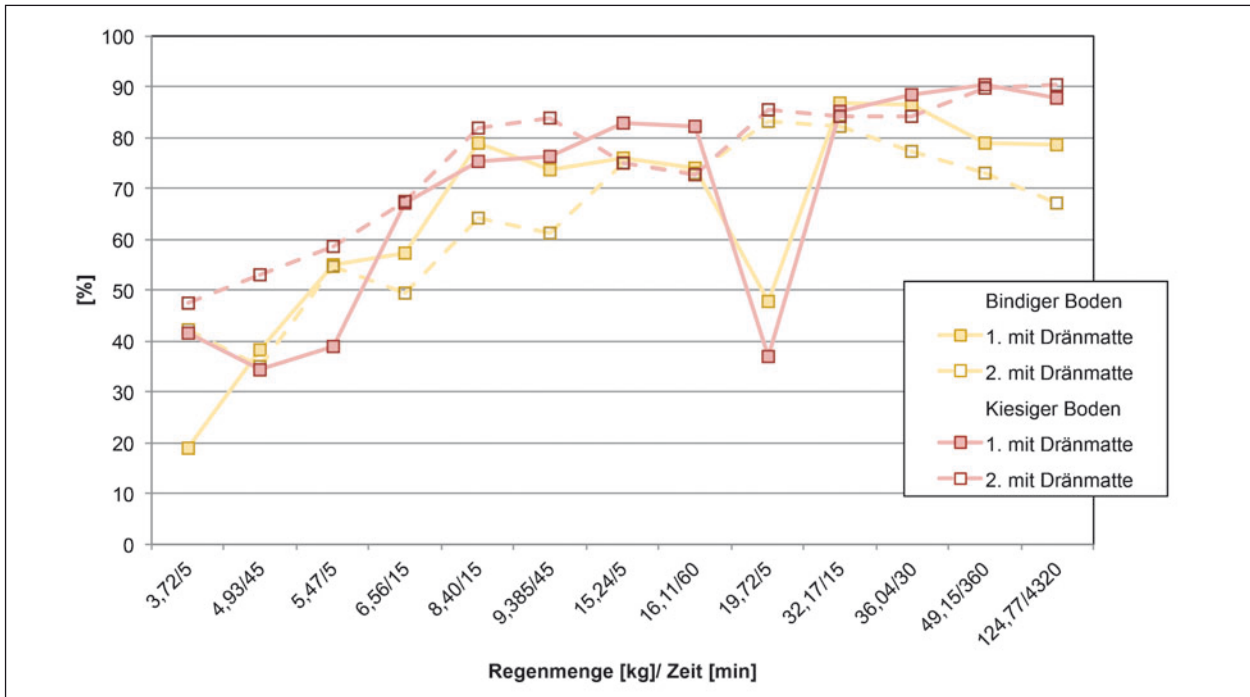


Bild 38: Prozentualer Anteil des Oberflächenabflusses an der Regenmenge für die Bauweisen mit Dränmatte

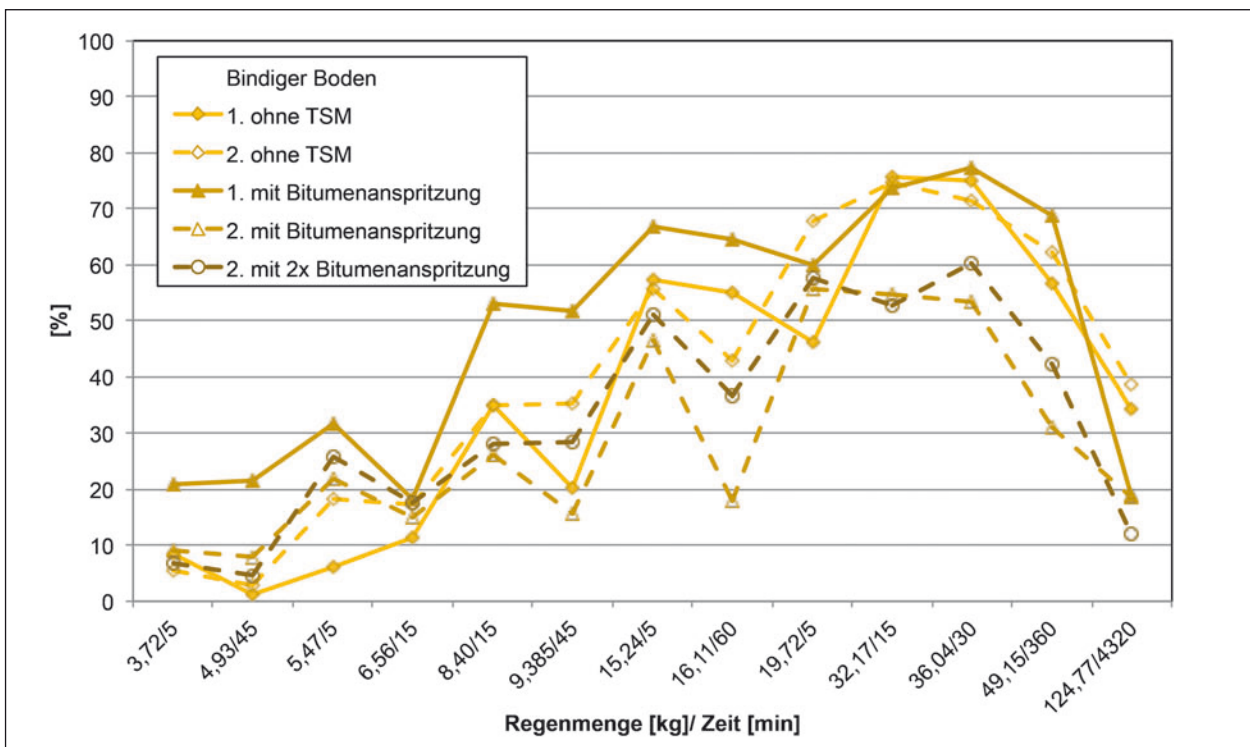


Bild 39: Prozentualer Anteil des Oberflächenabflusses an der Regenmenge für die Bauweisen mit bindigem Boden

nissen (6 Stunden und 72 Stunden). Aber auch bei den anderen Regen zeigt der Zickzackanstieg der Kurven, dass bei gleicher Regenmenge kürzere Regen teilweise deutlich mehr Oberflächenabfluss entwickeln als längere. Dabei ist der Einfluss der Regenmenge wesentlich stärker als der Einfluss der Regendauer.

Die Anteile des Oberflächenabflusses für den kiesigen Boden und die Bauweisen Bitumenanspritzung und ohne TSM sind in Bild 40 dargestellt. Diese Versuchsreihen haben insgesamt den geringsten Oberflächenabfluss, sodass die zuvor beobachteten Einflüsse hier kaum erkennbar sind. Lediglich beim ersten Umlauf mit Bitumenanspritzung kommt es zu nennenswerten Abflussraten. Tendenziell ist ebenfalls ein Anstieg zu erkennen.

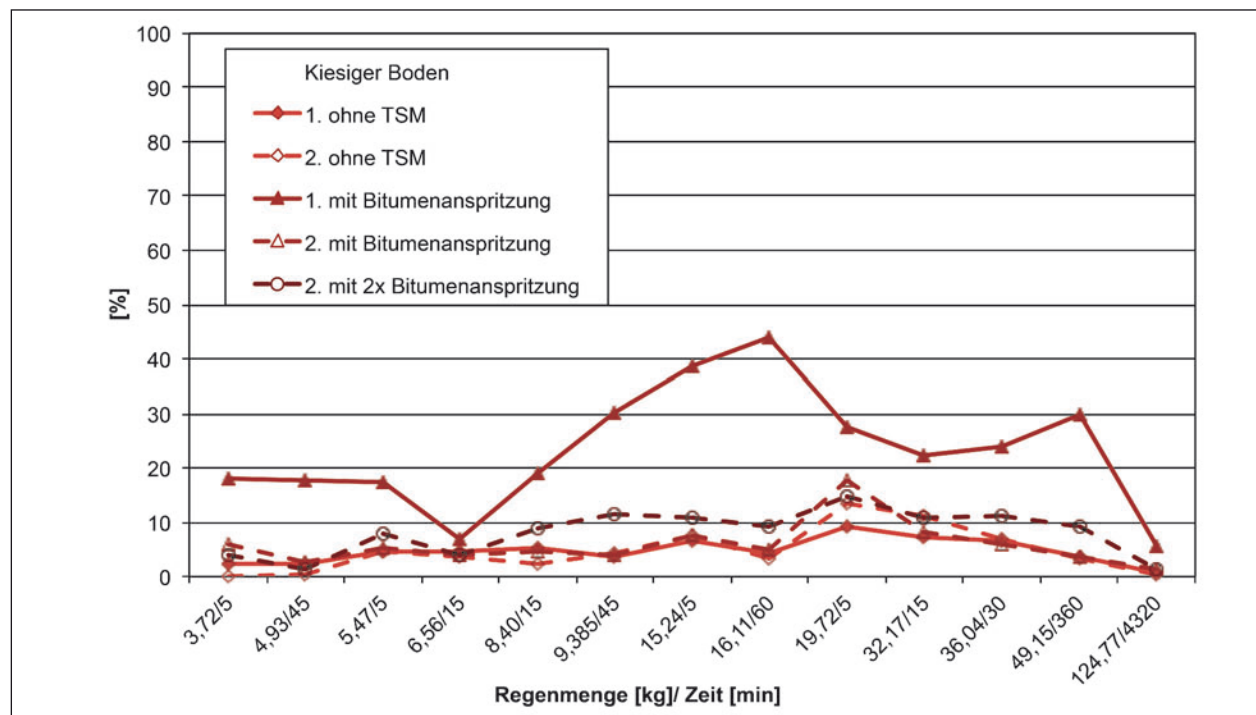
Die ersten Umläufe mit Bitumenanspritzung sind sowohl beim kiesigen als auch beim bindigen Boden die einzigen Versuchsreihen, bei denen beim ersten Regenregime signifikant größere Anteile des Oberflächenabflusses gemessen werden als beim zweiten. Hier scheint die Bitumenemulsion noch eine Wirkung zu haben.

Um die Anteile der Oberflächenabflüsse unabhängig von der jeweiligen Menge miteinander vergleichen zu können, wurde der Anteil am Gesamtfluss bestimmt. Dafür wurde getrennt für jeden

Umlauf die Menge eines Oberflächenabflusses prozentual zur Gesamtmenge des Umlaufes angegeben. So ist es möglich den Einfluss der Regenereignisse unabhängig von der Bauweise beurteilen zu können. Die Regenereignisse wurden nach aufsteigender Regenmenge sortiert. Bild 41 zeigt diesen Anteil am Gesamtfluss für alle Versuchsreihen. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass der Anteil am Gesamtfluss mit der Regenmenge ansteigt. Auch der schwächere Einfluss der Regendauer ist zu erkennen, so liegen die Anteile des 16,11-kg-Regens in 60 Minuten deutlich unter denen des 15,24-kg-Regens in 5 Minuten. Bei den sehr langen Regen ist für einige Bauweisen wieder ein Abfall der Anteile zu erkennen.

In Bild 42 werden die beiden Bauweisen mit Dränmatten näher untersucht, die den meisten Oberflächenabfluss liefern. Die Anteile am Gesamtfluss, die jedes Regenereignis liefert, stimmen trotz unterschiedlicher Böden sehr gut überein.

Betrachtet man nur die Bauweisen mit bindigen Boden in Bild 43, so sieht man, dass der Einfluss der Regenmenge auf den Oberflächenabfluss dominiert. Bei den meisten Bauweisen hat die Frage, ob es sich um den ersten oder zweiten Umlauf der Regenregime handelt, keinen Einfluss auf den Anteil des Oberflächenabflusses. Lediglich beim 19,72-kg-Regen, er ist erste im Regenregime, ist



**Bild 40:** Prozentualer Anteil des Oberflächenabflusses an der Regenmenge für die Bauweisen mit kiesigem Boden

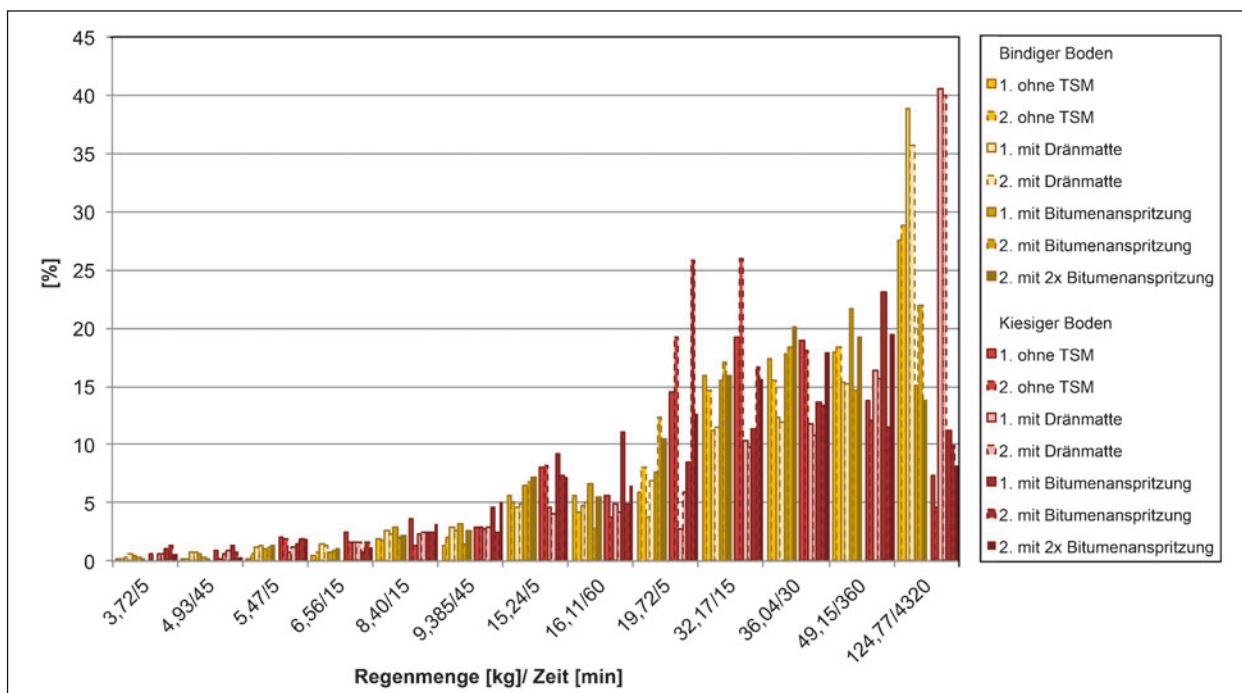


Bild 41: Prozentuale Anteil des Oberflächenabflusses am Gesamtabfluss für alle Bauweisen

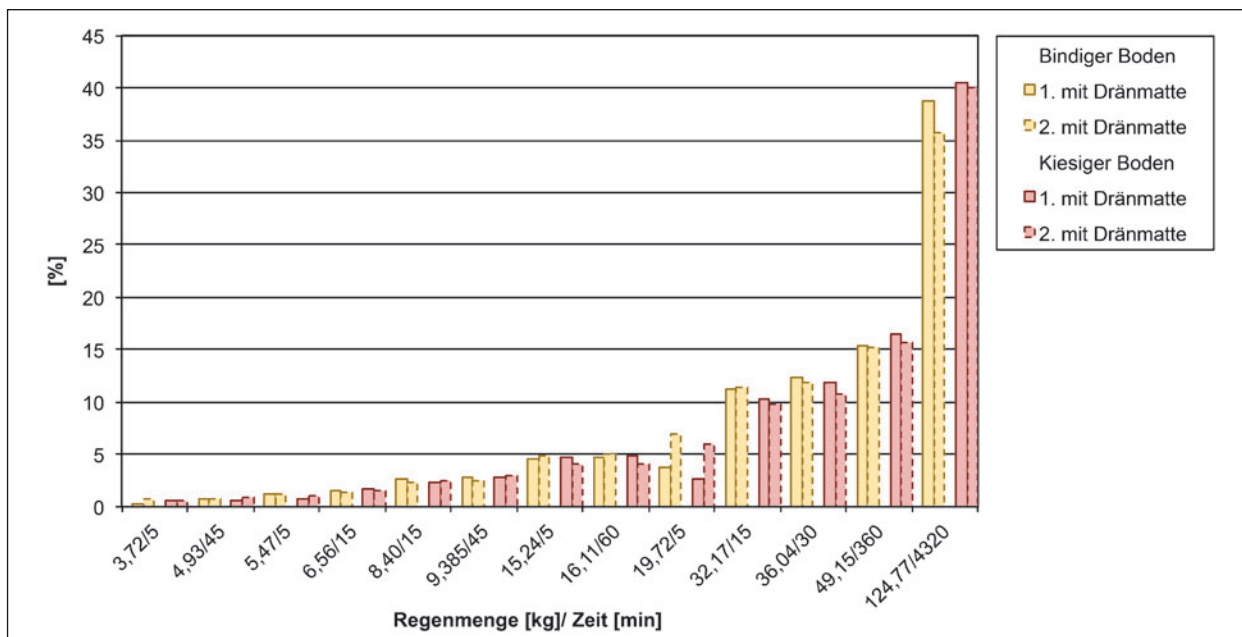


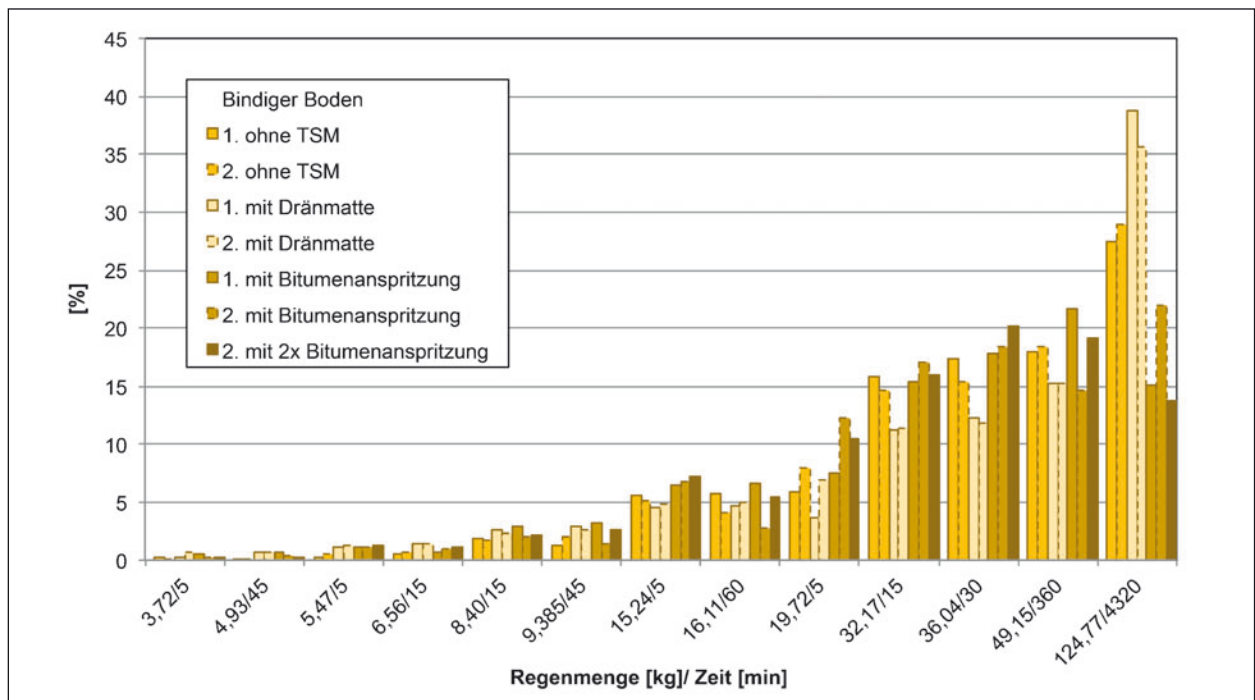
Bild 42: Prozentuale Anteil des Oberflächenabflusses am Gesamtabfluss für die Bauweisen mit Dränmatte

für alle Bauweisen im ersten Umlauf ein kleinerer Anteil zu erkennen.

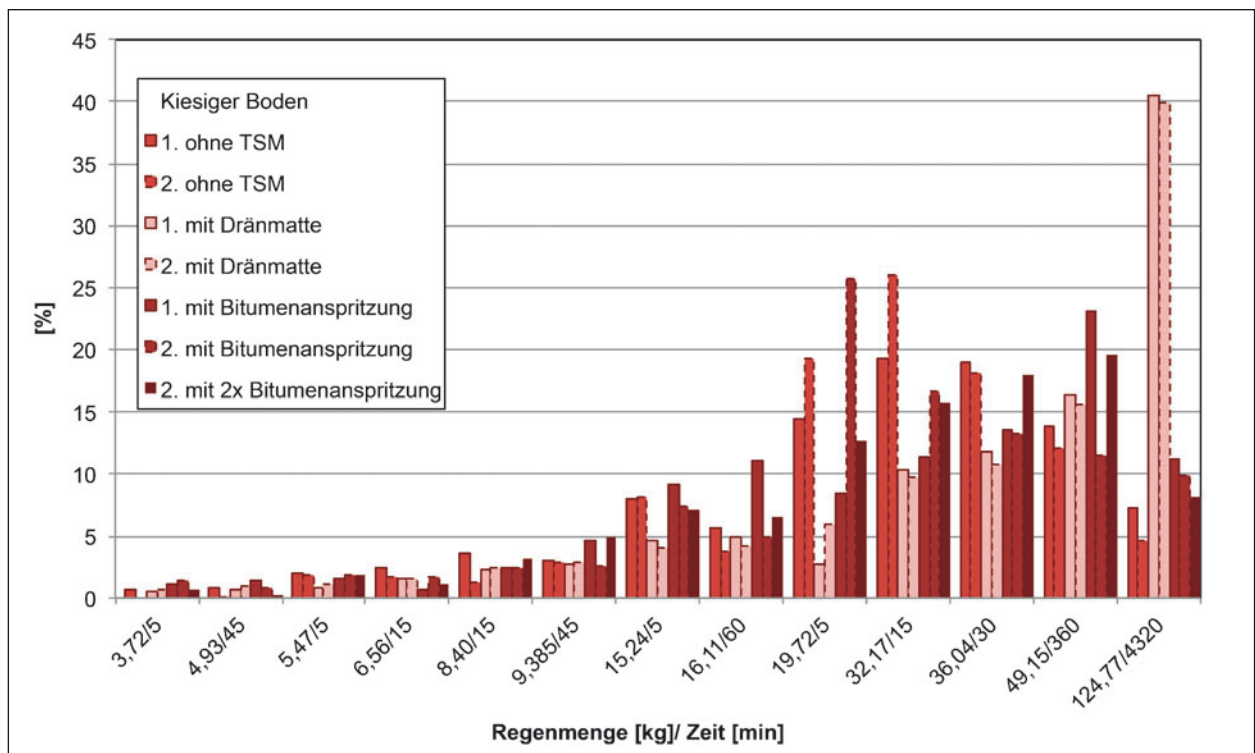
Die Bauweisen mit kiesigem Boden sind in Bild 44 zu sehen. Hier sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Umläufen größer. Beim kiesigen Boden wurde deutlich weniger Oberflächenabfluss gemessen, mit Ausnahme der Bauweise mit Dränmatte, somit wirken sich kleinere Schwankungen

stärker auf den Prozentualen Anteil des Oberflächenabflusses aus. Aber auch beim kiesigen Boden sind die kleineren Anteile der Abflüsse der ersten Durchläufe beim 1. Regen sichtbar. Der Einfluss der Regendauer scheint größer zu sein als beim bindigen Boden.





**Bild 43:** Prozentualer Anteil des Oberflächenabflusses am Gesamtabfluss des bindigen Bodens



**Bild 44:** Prozentualer Anteil des Oberflächenabflusses am Gesamtabfluss des kiesigen Bodens



### 7.3 Zusammenfassender Vergleich der Wassermengen

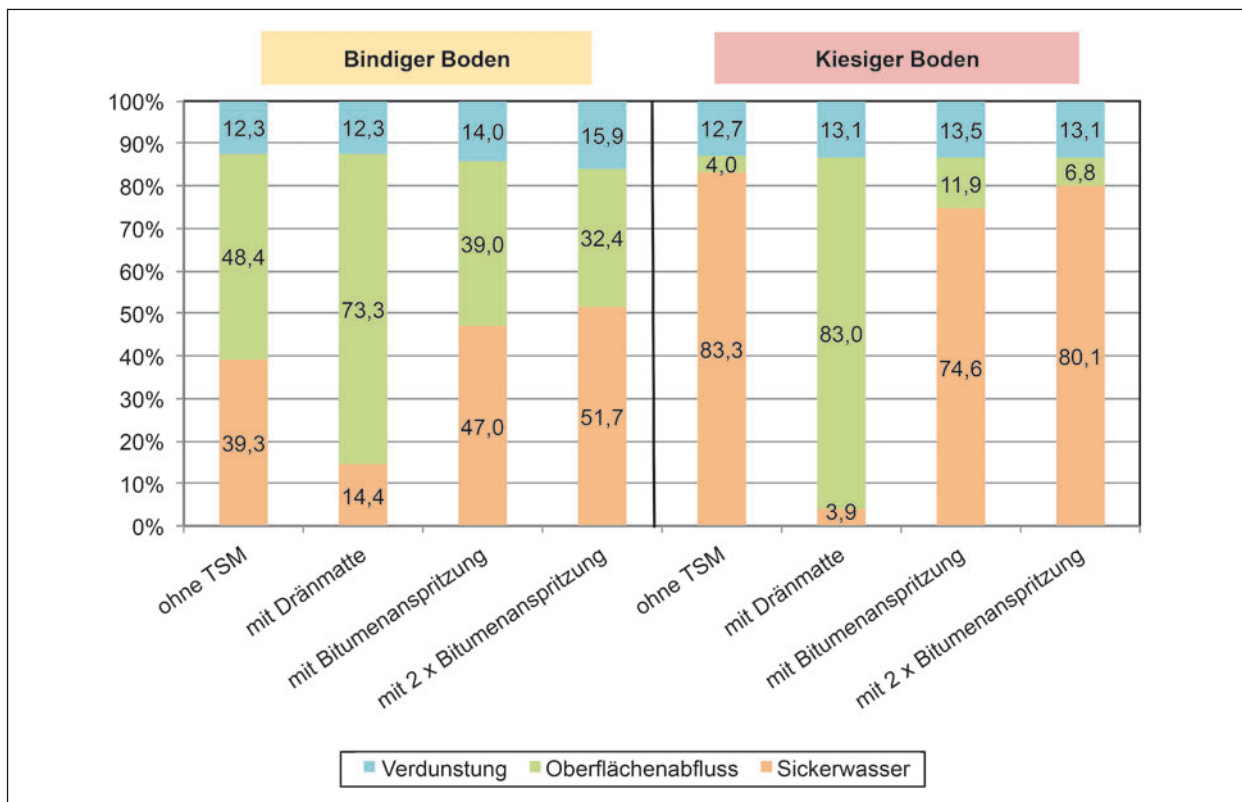
Bild 45 zeigt die prozentualen Anteile von Oberflächenabfluss und Sickerwasser für alle Versuchsreihen. Aus der Differenz der gemessenen Mengen von Sickerwasser und Oberflächenabfluss zu der aufgetragenen Regenmenge errechnet sich die Verdunstung. Diese setzt sich zusammen aus der Transpiration des Rollrasens und Verdunstungsverlusten beim Beregnen und im Schlauchsystem des Lysimeters. Die Verdunstung liegt für alle Versuche zwischen 12 und 16 %. In Deutschland liegt die mittlere Verdunstungshöhe bei 532 mm/a (Hydrologischer Atlas von Deutschland (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Erweiterte Ausgabe 2003)). Bezogen auf einen mittleren Jahresniederschlag von 782 mm/a wäre das eine Verdunstungsrate von 68 %. Die niedrigen Verdunstungsraten bei den Versuchsreihen, lassen sich durch die relativ konstanten Laborbedingungen erklären. Die Raumtemperatur liegt bei ca. 20 °C ±5 °, 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 Verdun-

tungsschutz eingesetzt. Hierdurch sollte weitestgehend sichergestellt werden, dass die verregnete Menge auch auf der Böschung ankommt.

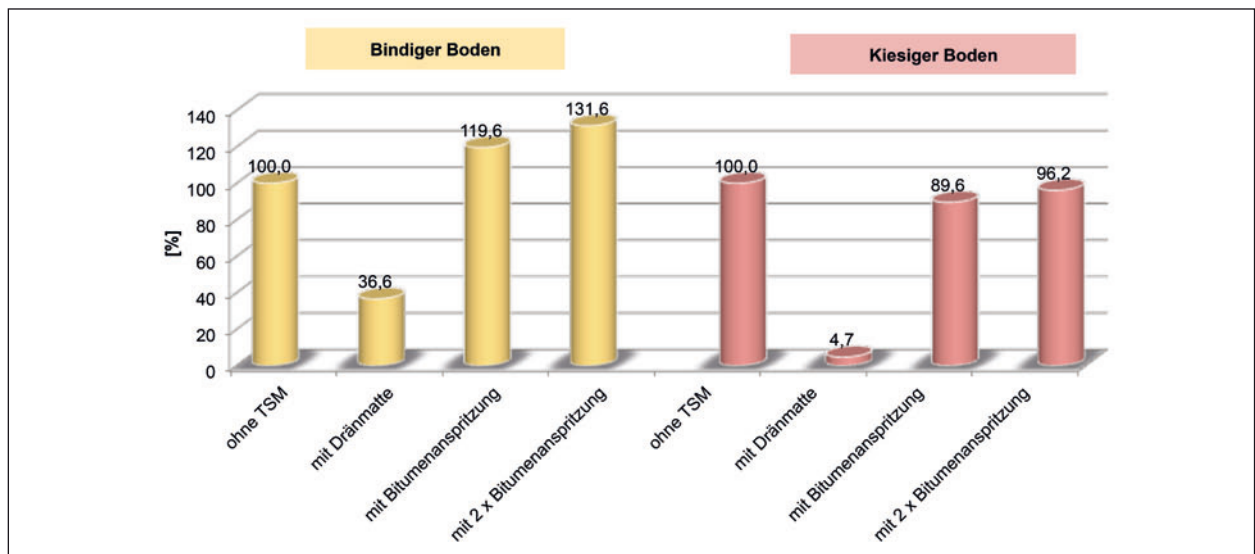
Ziel des Projektes ist es, die Wirksamkeit der TSM zu beurteilen. Dafür wurde mit beiden Böden je eine Versuchsreihe ohne TSM durchgeführt. Das Maß der Reduzierung des Sickerwassers durch die TSM kann dann als Maß für deren Wirksamkeit betrachtet werden.

In Bild 46 ist dargestellt, um wieviel Prozent sich die Sickerwassermenge durch die Bitumenanspritzung oder Dränmatte prozentual geändert hat. Die Sickerwassermenge der Versuchsreihe ohne TSM wurde dabei zu 100 % gesetzt.

Als wesentliche Erkenntnisse sind dem Bild 46 zu entnehmen, dass sich bei der Bauweise mit Bitumenanspritzung beim bindigen Boden, der Anteil des Sickerwassers sogar um rund 30 % erhöht, während beim kiesigen Boden der Sickerwasseranteil nur um ca. 10 % reduziert wird. Bei der Bauweise mit Dränmatte wird beim bindigen Boden eine Reduktion der Sickerwassermenge auf rund ein Drittel erreicht. Beim kiesigen Boden wird durch die Dränmatte das Sickerwasser sogar um 95 % reduziert.



**Bild 45:** Prozentualer Vergleich von Oberflächen und Sickerwasser von allen Versuchsreihen



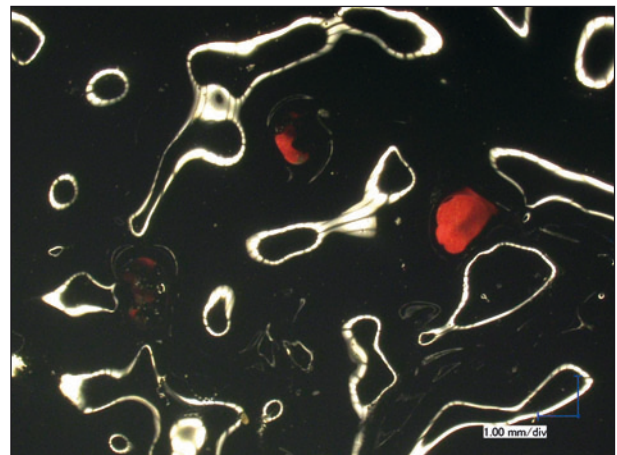
**Bild 46:** Reduzierung der Sickerwassermenge in Prozent

## 7.4 Bitumenanspritzung

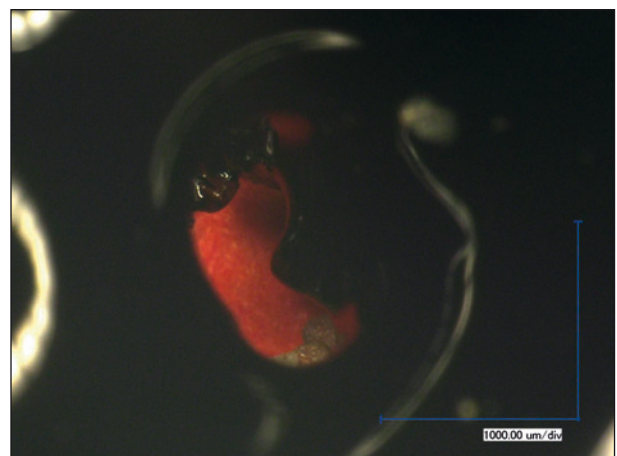
Die Ursache für die großen Sickerwassermengen bei beiden Versuchsreihen mit Bitumenanspritzung wurde weiter untersucht. Zunächst wurde Bitumenemulsion in unterschiedlichen Stärken auf eine Sandschicht aufgetragen und das Versickerungsverhalten beobachtet. Es zeigte sich, dass Wasser schnell versickerte, die Dicke der Bitumenemulsion fiel dabei kaum ins Gewicht. Zu erkennen war, dass trotz der gleichmäßigen Ansprühung und der feinen Körnung des Sandes durch das Bitumen keine dichte Schicht erzielt wurde. Es verbleiben kleinere Löcher. Da sich die Bitumenschicht gut vom Sand lösen lässt, konnte sie mithilfe eines Mikroskops näher untersucht werden. Hierbei wurde die Bitumenschicht auf eine rote Unterlage gelegt, sodass die Löcher in der Schicht deutlich zu erkennen sind (siehe Bild 47 und Bild 48).

Laut M T S E (FGSV, 2009) beruht die Wirkung der Bauweise F auf einer wasserabweisenden Anspritzung. Bild 49 zeigt einen Wassertropfen auf der Bitumenschicht.

Die Beobachtung des Wassertropfens auf der Schicht zeigt, dass sich die Bitumenschicht nicht hydrophob verhält, sondern im Gegenteil, die Oberflächenspannung des Wassers wurde aufgelöst. Es ist zu vermuten, dass sich das Wasser hierdurch an das Bitumen „anschiebt“ und somit besonders gut in die bestehenden Löcher hineinfließt. Darauf hin wurden im Labor der BAST eine Probe des reinen Bitumens und zwei Proben des auf Sand aufgetragenen Bitumens mit der Tropfenkonturmessung

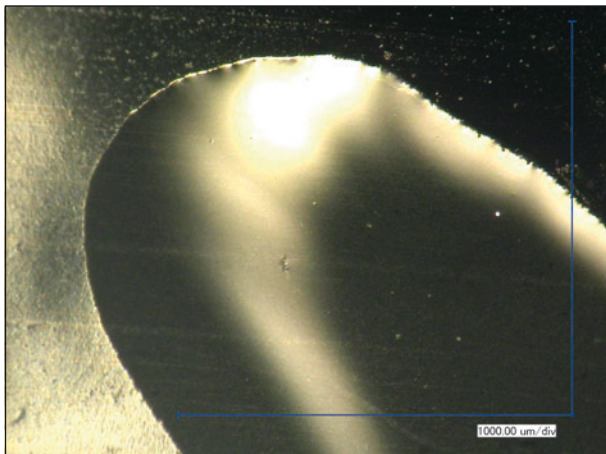


**Bild 47:** Mikroskopaufnahme: Bitumenanspritzung auf Sand, kleinere Auflösung



**Bild 48:** Mikroskopaufnahme: Bitumenanspritzung auf Sand, höhere Auflösung

untersucht und die polaren und dispersen Anteile der Oberflächenenergie gemessen. Dem internen



**Bild 49:** Mikroskopaufnahme: Wassertropfen auf Bitumenschicht

Bericht zu den Untersuchungen ist zu entnehmen: „Die Oberflächenenergie der Referenzprobe des reinen Bitumens liegt mit fast 90 mN/m deutlich höher als die der Proben auf Sand mit ca. 60 mN/m. Dies wurde auf die Verunreinigung mit Staubpartikel zurückgeführt. Die ungleichmäßige Oberfläche kann durch Flüssigkeiten schlechter benetzt werden und hat deshalb größeren Kontaktwinkel zur Folge. Die Oberflächenenergien haben dementsprechend kleinere Werte. Die Oberflächen aller Proben haben fast ausschließlich polare Eigenschaften. Nach dem Brechen der Emulsion und Abtrocknen des Restwassers reichern sich offensichtlich Emulgatoren und andere Hilfsstoffe an der Oberfläche an. Diese Stoffe besitzen polare Eigenschaften und überlagern die Wirkung der unpolaren Bitumenbestandteile“ (BAST, S6, 2012). Dies erklärt die große Affinität zum ebenfalls polaren Wasser und warum das Wasser so gut in den verbleibenden Öffnungen versichert.

## 7.5 Umweltrelevante Inhaltsstoffe

Die gemessenen Einzelkonzentrationen aller Inhaltsstoffe befinden sich im Anhang (Tab.-A 12 bis Tab.-A 15). 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 finden sich in Tabelle 18. Sind beide Zahlenwerte gleich wird nur die Rote Linie dargestellt.

Auf eine Darstellung der Summenkurven dieser Stoffe wird verzichtet, da sie aufgrund der geringen gemessenen Konzentration überwiegend den Sickerwasserverlauf widerspiegeln. Die Gesamt-

frachten aller Inhaltsstoffe sind in Tab.-A 16 im Anhang aufgeführt.

Die Ergebnisse in Kapitel 6 haben gezeigt, dass Cadmium, Cyanid, Kupfer und Sulfat zusammen mit Fluorid und Molybdän beim kiesigen Boden und Chrom beim bindigen Boden in der Auswertung näher betrachtet werden sollten.

Bild 50 zeigt die im Sickerwasser gemessenen Konzentrationen von Cyanid für den bindigen Boden und die unterschiedlichen Bauweisen. Beim bindigen Boden wurden in allen Versuchsreihen sehr hohe Cyanidkonzentrationen gemessen, die um ein Vielfaches über den Prüfwerten (BBodSchV, 2012) liegen, obwohl die Feststoffgehalte unkritisch waren. Die Kurve für die Versuchsreihe mit Bitumenanspritzung ist am längsten, da für die Analyse der umweltrelevanten Inhaltsstoffe die Versuchsreihe mit 1-facher und mit 2-facher Bitumenanspritzung zusammengefasst wurden. Jede Versuchsreihe hat unterschiedlich viele Messpunkte je nach Anfall des Sickerwassers.

Bei der Bauweise ohne TSM kann man einen deutlichen Verkleinerung der Konzentration sehen, wenn bei den 72-Stunden-Regen die Sickerwassermenge steigt.

Nach 92 Tagen ist ein deutlicher Abfall beim zweiten 72-Stunden-Regen zu sehen, die Konzentrationen liegen aber immer noch über den Prüfwerten. Die Werte bei der Bauweise mit Bitumenanspritzung schwanken mit einer leichten Tendenz zu kleiner werdenden Konzentrationen. Die Konzentration im Sickerwasser bei der Bauweise mit Dränmatte schwanken stark und sind am höchsten. Ein Abfallen der Werte ist nicht zu erkennen.

Im Bild 51 werden die Schadstofffrachten betrachtet. Dafür werden jeweils die Konzentrationen mit den bis zu Analysezeitpunkt gemessenen Sickerwassermengen multipliziert und aufsummiert.

Die Kurve der Bauweise ohne TSM steigt stetig an, zunächst steil dann etwas flacher. Was vor allem daran liegt, dass die gemessenen Konzentrationen kleiner werden. Diese Kurve liegt am höchsten, obwohl weniger Sickerwasser anfällt als bei der Bauweise mit Bitumenanspritzung. Die Kurve der Bauweise mit Bitumenanspritzung steigt stetig an. Da die Konzentrationen nicht stark absinken, spiegelt die Kurve den Verlauf der Sickerwasserkurve wieder. Die Kurve für die Bauweise mit Dränmatte verläuft am niedrigsten. Hier ist zwar die Konzentration

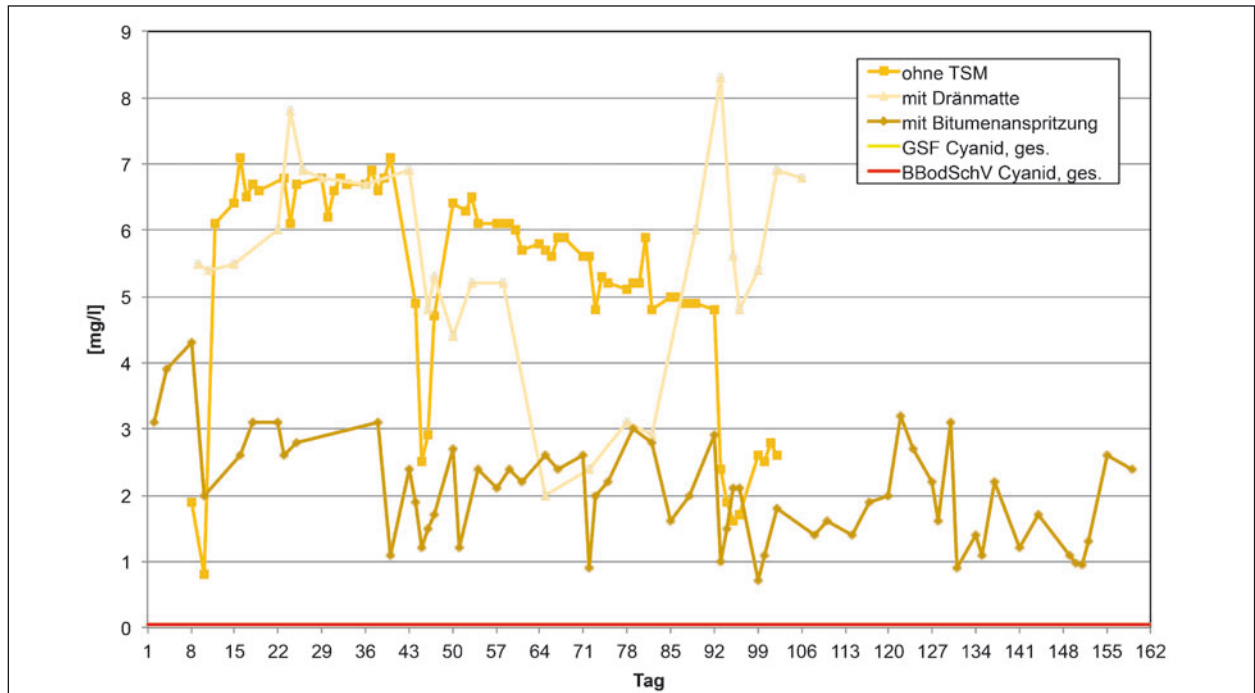


Bild 50: Cyanidkonzentration im Sickerwasser beim bindigen Boden

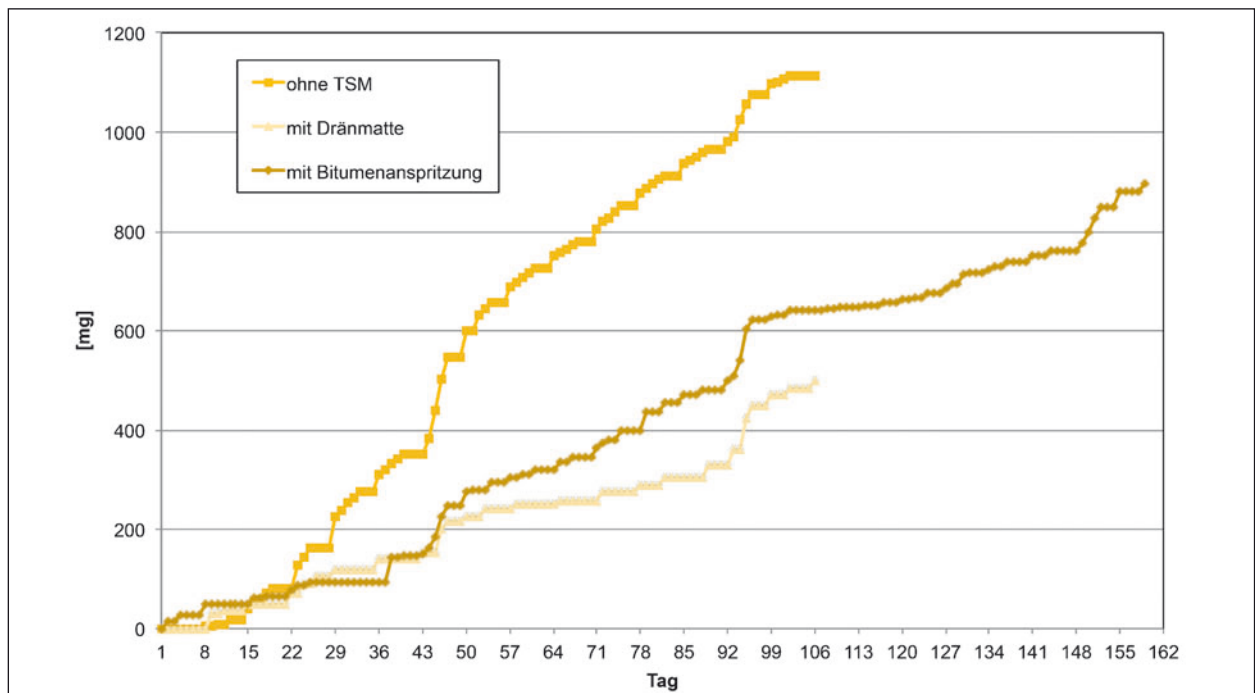


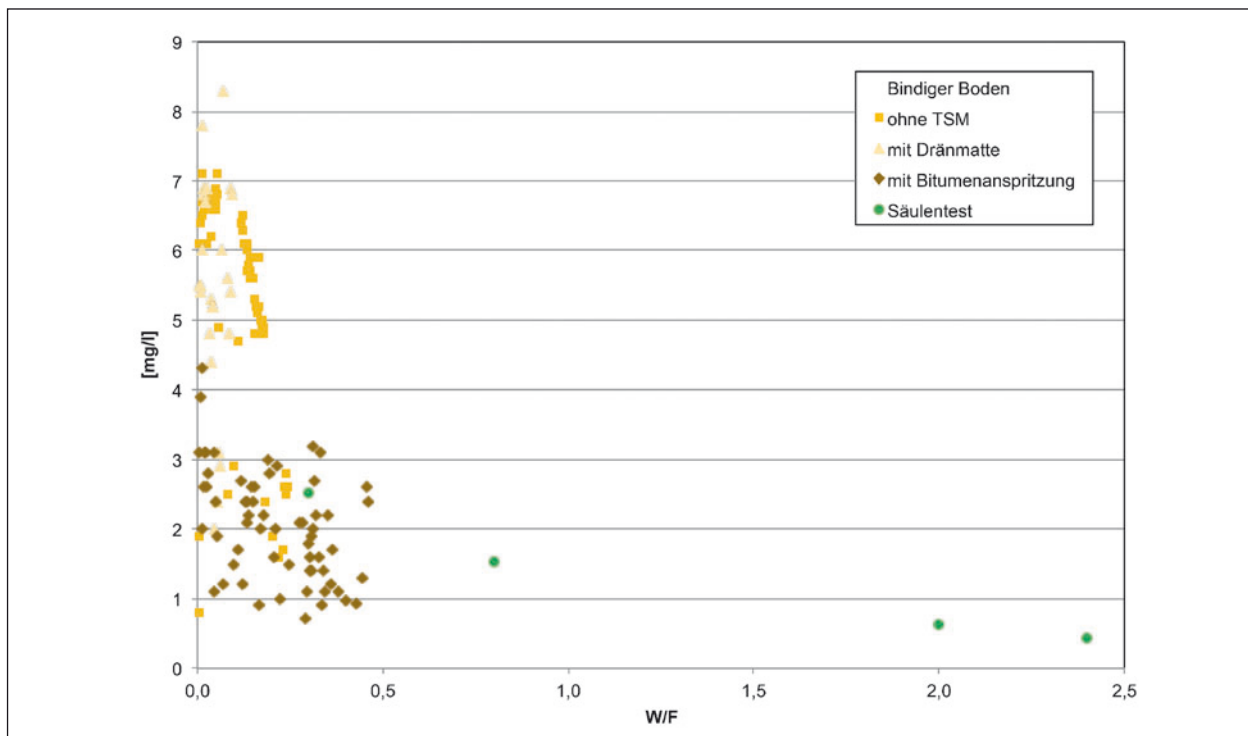
Bild 51: Summenkurven Cyanid im bindigen Boden

am höchsten, die Sickerwassermenge aber am geringsten. Die ansteigenden Kurvenverläufe deuten daraufhin, dass die Auslaugung von Cyanid noch nicht beendet ist.

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 Bodens. Aufgrund des Versuchsaufbaus und den beinhalteten Regenereignissen werden bis zum Versuchsende nur sehr kleine W/F erreicht. Selbst bei der Versuchsreihe mit Bitumenanspritzung wird trotz dreimaligem Regenregime und hoher Sickerwassermengen nur ein W/F von





**Bild 52:** Cyanidkonzentration im bindigen Boden nach W/F

0,46 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 zu erkennen ist. Noch andauernde Auslaugungen sind besser in den Konzentrations- und Summen- diagrammen zu erkennen.

Die Cyanidkonzentration für den bindigen Boden aufgetragen über das W/F sind in Bild 52 dargestellt. Der Punkt beim W/F von 2 ist der Säulen- kurztest, der immer mit demselben W/F durchgeführt wird und dient als Übereinstimmungsversuch. Die übrigen Säuleneeluat sollen das Freisetzungsvorhalten grundlegend charakterisieren. Es zeigt sich hier ein abklingender Verlauf der sich gut an die Cyanidkonzentrationen im Sickerwasser anfügt. Die Ergebnisse des Säulenversuches zeigen aber auch, dass noch mit weiterem Cyanidaus- trag gerechnet werden muss. Das 4. Eluat des Säulen- langtest wird nicht mehr dargestellt, da es mit W/F von 3,3 bis 4,7 die Grafik verzerren würde. Die Auswertungen der Säulentests befinden sich in Kapitel 6.

Bild 53 zeigt die Auslaugung von Chrom für den bindigen Boden. Die Konzentrationsverläufe für Chrom im Sickerwasser beim bindigen Boden haben leicht abfallende Tendenz, liegen aber

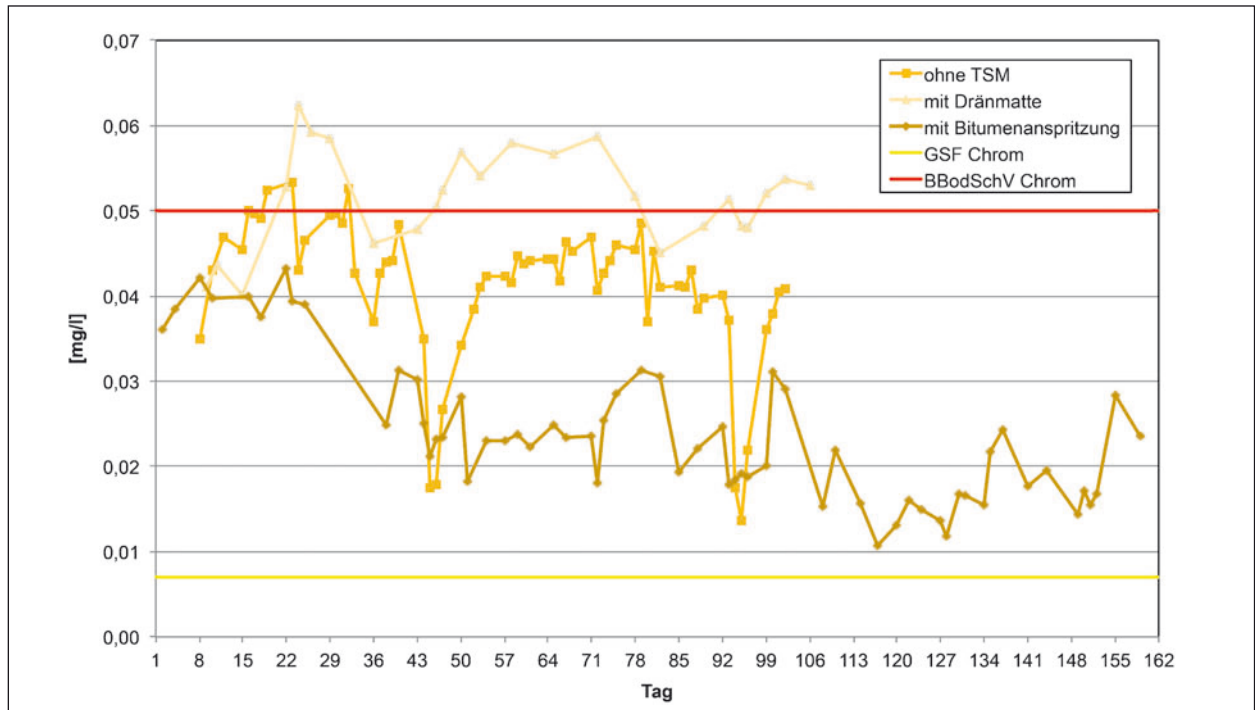
alle über den GSF-Werten (LAWA, 2004) und teilweise über den Prüfwerten nach (BBodSchV, 2012). Deutlich ist bei der Bauweise ohne TSM ein Abfall der Konzentration bei den 72-Stunden- Regen zu sehen.

Die Summenkurven der Chromfracht in Bild 54 steigen stark an. Die Kurve mit Bitumenanspritzung steigt über die Kurve ohne TSM, was an der längeren Versuchsdauer liegt, und zeigt dass mit der weiteren Auslaugung von Chrom gerechnet werden muss.

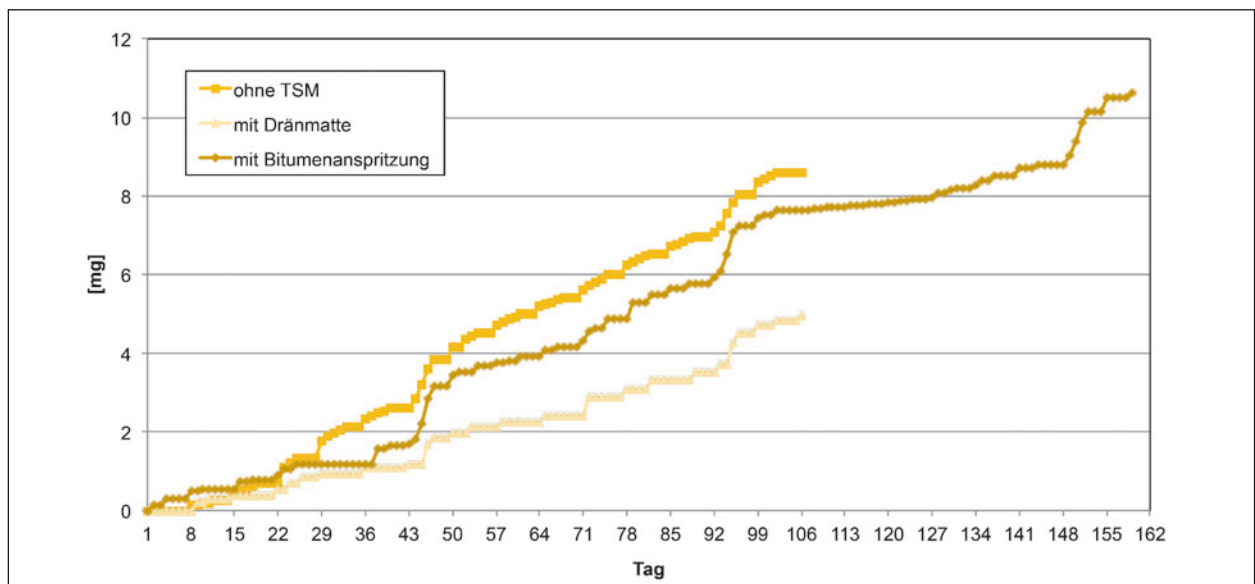
Bild 55 zeigt die Chromkonzentration im Sickerwasser, aufgetragen über das W/F der verschiedenen Bauweisen und für die Säulenversuche. Der Wert fürs 2. Eluat des Säulenversuches bei einem W/F von 0,8 ist sehr hoch, korrespondiert aber gut mit den hohen Konzentrationen der Bauweisen ohne TSM und mit Dränmatte. Der Säulenwert für das 3. Eluat bei einem W/F von 2,35 und der Wert des Säulenkurztestes bei einem W/F von 2,0 stimmen gut mit dem Wertebereich der Bauweise mit Bitumenanspritzung überein. Dies bestätigt die Aussage aus Bild 54, dass die Auslaugung von Chrom weiter anhält.

Bei der Auslaugung von Molybdän im kiesigen Boden ist in Bild 56 ein deutlicher Rückgang zu





**Bild 53:** Chromkonzentration im Sickerwasser beim bindigen Boden



**Bild 54:** Summenkurven Chrom im bindigen Boden

erkennen. Die Werte für alle Bauweisen liegen zu Beginn der Berechnung über den Prüfwerten der BBodSchV, fallen aber bei längerer Versuchsdauer auf Werte unterhalb der Geringfügigkeitsschwelle ab. Dies ist erstaunlich, da die Menge des Sickerwassers beim Versuch bindiger Boden mit Dränmatte nur sehr gering ist, im Gegensatz zu den anderen Bauweisen. Die Verringerung der Konzentration scheint unabhängig von einer Abreicherung

des Stoffes über den Austrag mit dem Sickerwasser zu sein.

Auch bei der Betrachtung der Frachten in Bild 57 ist zu sehen, dass der Austrag von Molybdän gering bleibt für die Bauweise mit Dränmatte. Dies liegt hauptsächlich daran, dass bei der Bauweise kiesiger Boden mit Dränmatte kaum Sickerwasser anfällt.

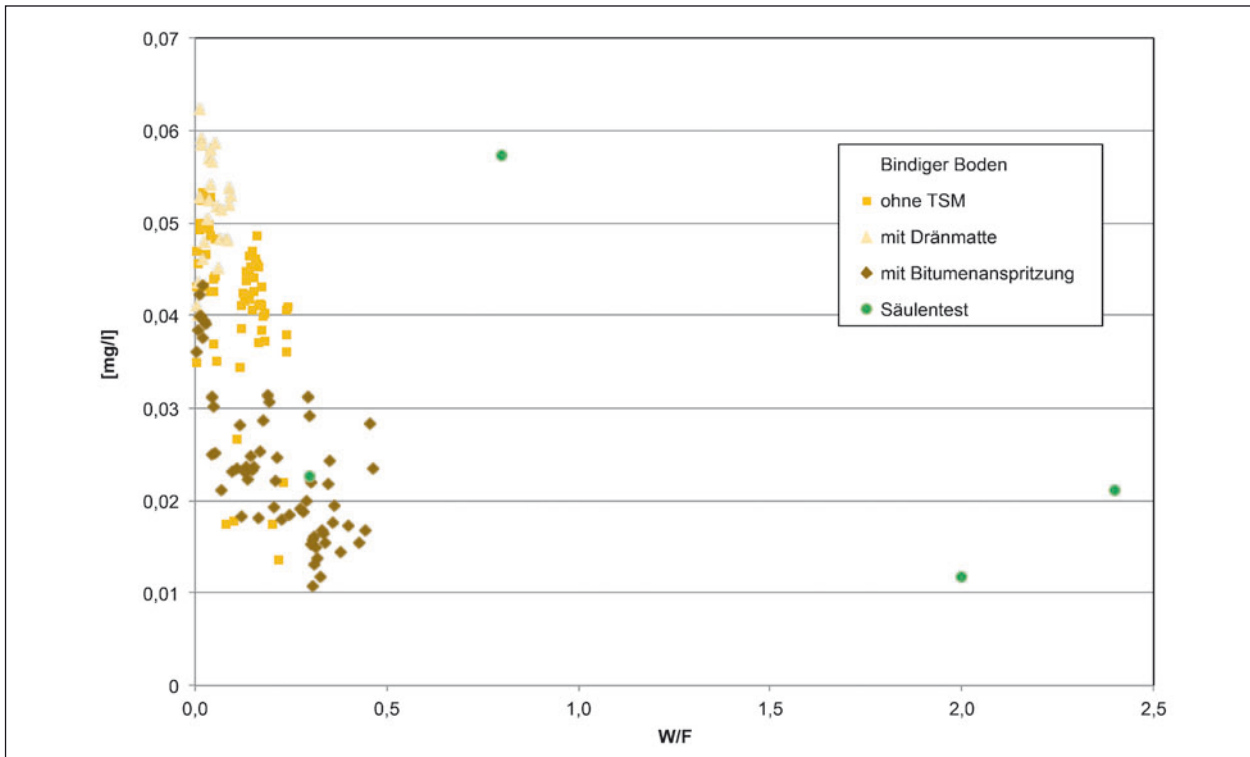


Bild 55: Chromkonzentration im bindigen Boden nach W/F

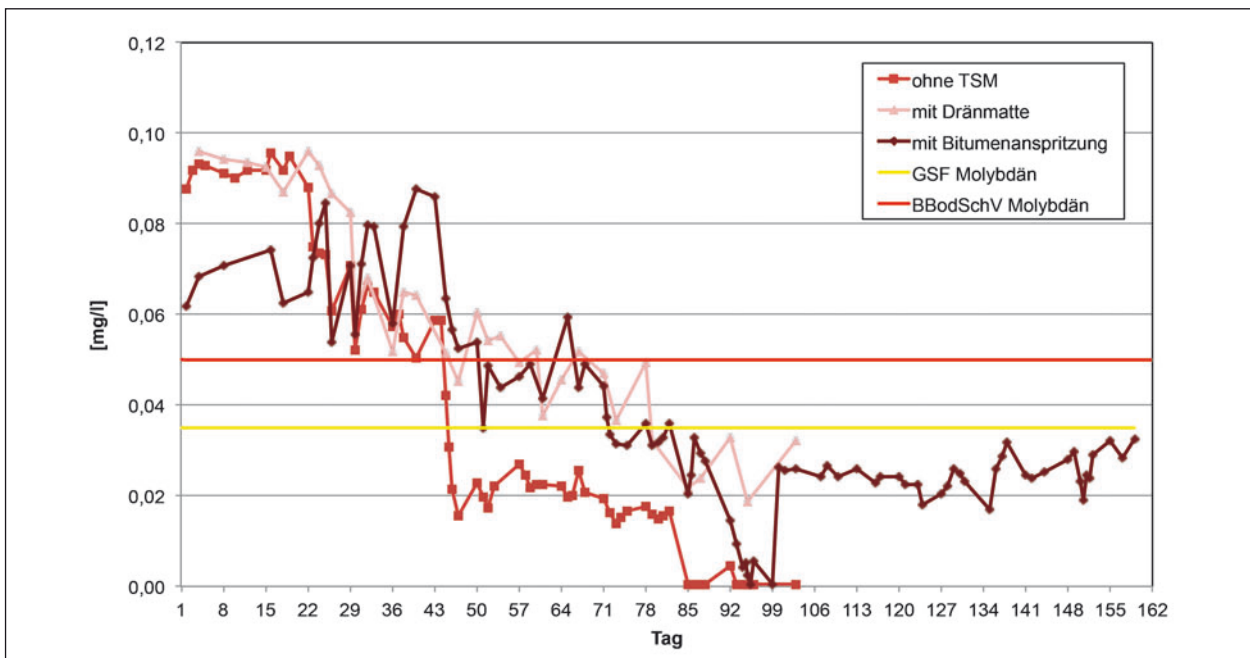


Bild 56: Molybdänkonzentration im Sickerwasser beim kiesigen Boden

Die Werte bei der Bauweise ohne TSM fallen bis auf die Nachweisgrenze zurück. Dies wird auch in der Summenkurve deutlich, die sich für diese Bauweise asymptotisch einem Endwert nähert. Bei der Summenkurve der Bauweise mit Bitumenanspritzung ist dieser Endwert noch nicht zu erkennen.

Bild 58 stellt die Molybdänkonzentration nach W/F dar. Aufgrund der größeren Sickerwassermengen beim kiesigen Boden liegt hier das maximale W/F bei 0,63 für die Bauweise mit Bitumenanspritzung. Die Säulenversuche geben sehr gut den deutlichen Abfall des Konzentrationsverlaufes wieder.

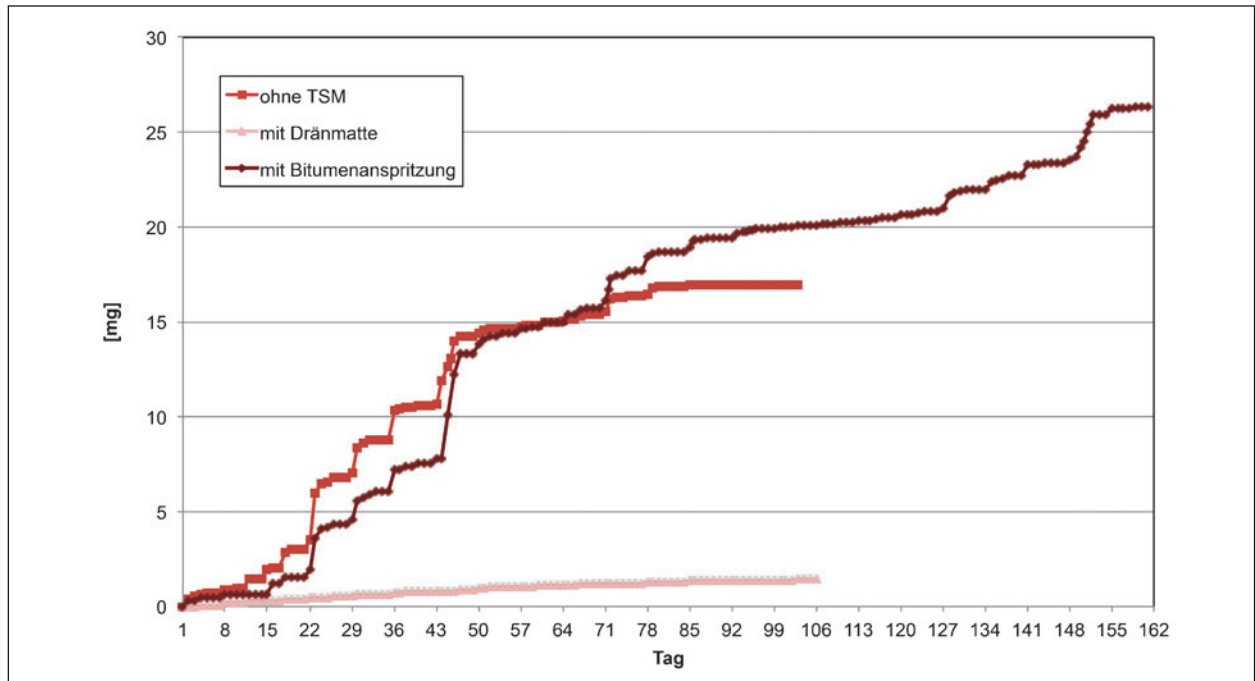


Bild 57: Summenkurven Molybdän im kiesigen Boden

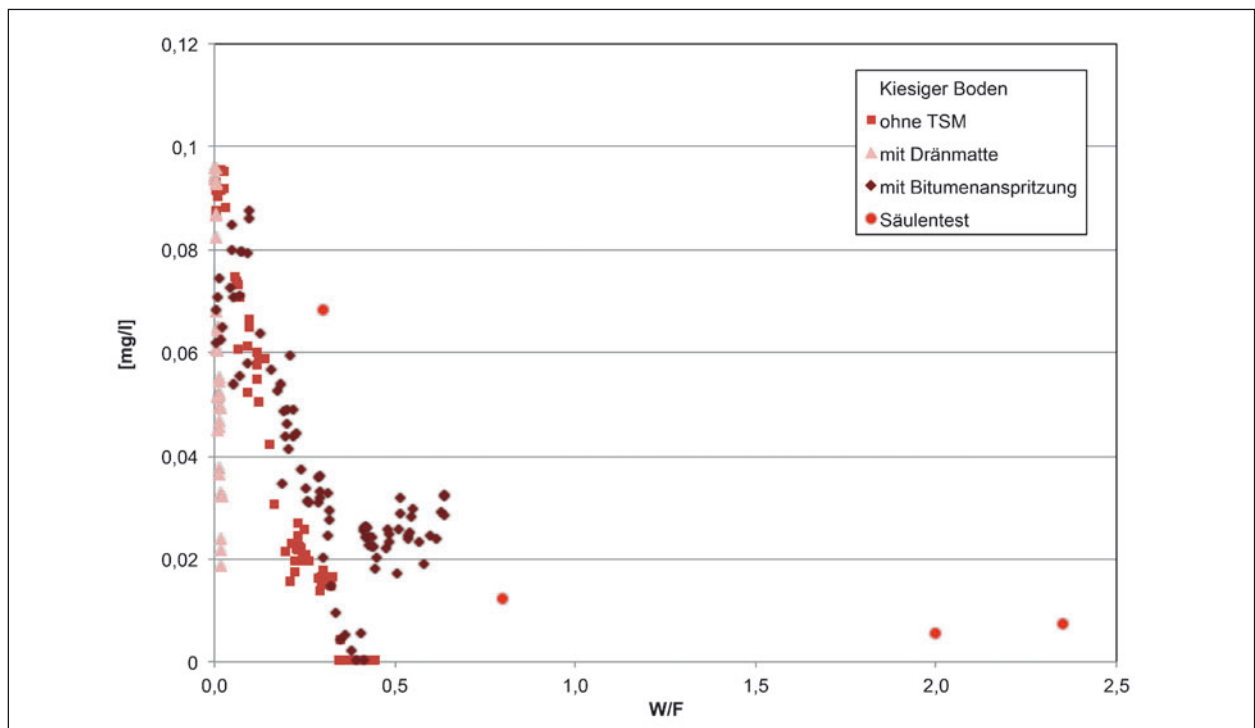
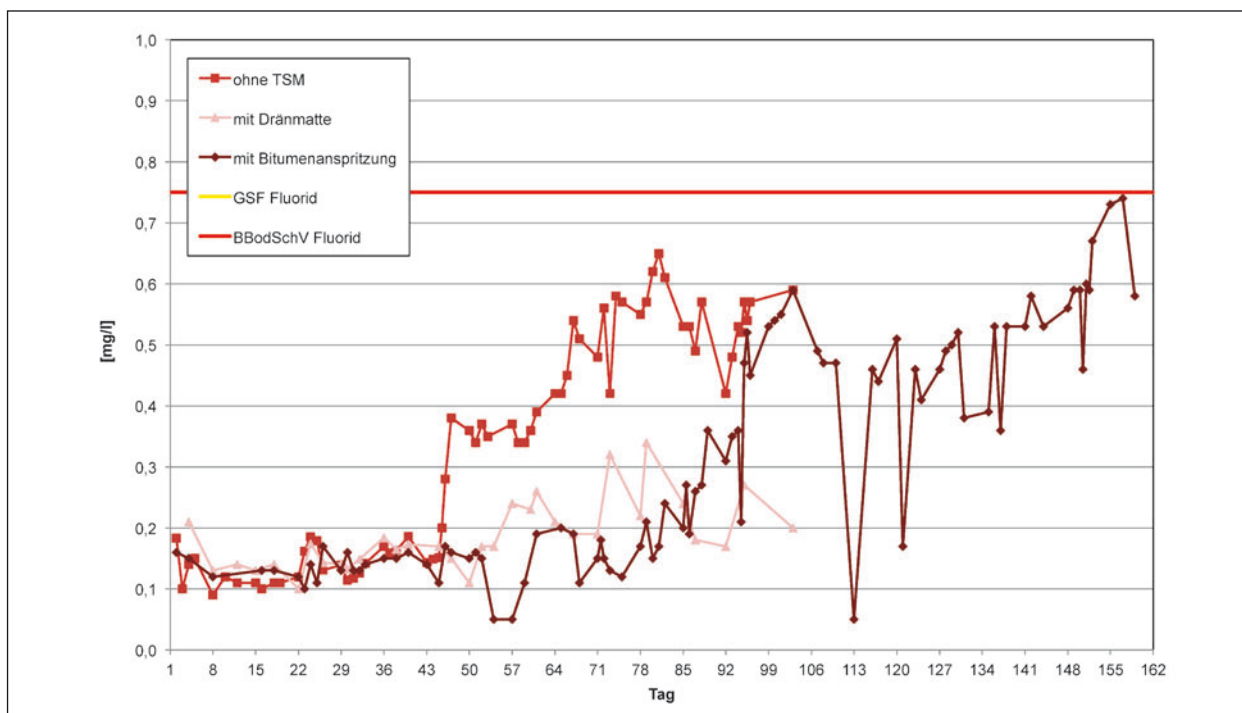


Bild 58: Molybdänkonzentration für den kiesigen Boden nach W/F

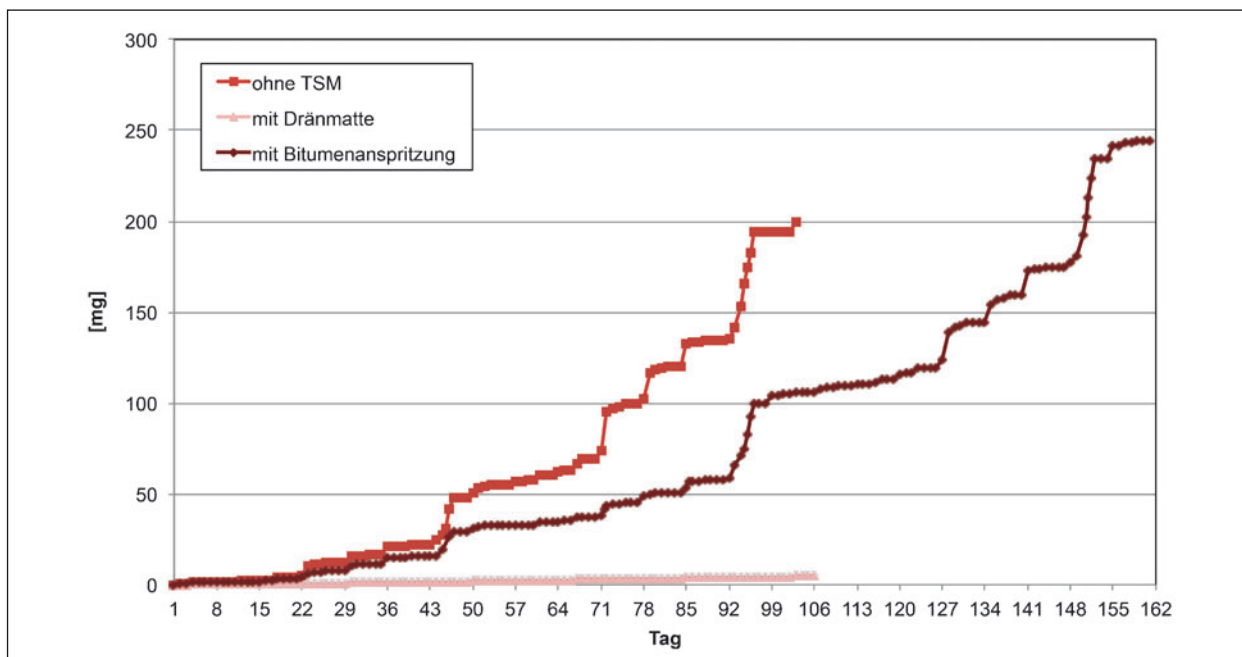
Bild 59 zeigt die Entwicklung der Fluoridkonzentration im Sickerwasser des kiesigen Bodens. Fluorid ist interessant, da es im Verlaufe des Versuchs in zunehmend höheren Konzentrationen mit dem Sickerwasser ausgetragen wird. Zunächst wurden niedrige Konzentrationen gemessen, die nach dem ersten 72-Stunden-Regen stark anstei-

gen und bei der Bauweise mit Bitumenanspritzung fast die Prüfwerte nach (BBodSchV, 2012) erreichen.

Dieses Verhalten wird auch gut in Bild 60 wiedergegeben, das die ausgetragenen Frachten zeigt. Die Kurven steigen stark an und ein Endwert



**Bild 59:** Fluoridkonzentration im Sickerwasser beim kiesigen Boden



**Bild 60:** Summenkurven Fluorid im kiesigen Boden

ist nicht zu erkennen. Aufgrund der geringen Wassermengen bleibt die Summenkurve des Versuchs mit Dränmatte sehr flach.

Cadmium, Kupfer und Sulfat werden für die kiesigen und bindigen Böden zusammen ausgewertet, da sie in denselben Größenordnungen ausgetragen werden. Sie überschreiten häufig die Prüfwerte nach (BBodSchV, 2012).

Die in Bild 61 dargestellten Konzentrationen von Cadmium im Sickerwasser steigen zunächst an, und fallen am Ende der Versuche zu Teilen wieder stark ab. Sie sind dann zwar unterhalb der Prüfwerte aber immer noch über den Geringfügigkeitsschwellenwerten. Insgesamt werden für den kiesigen Boden zunächst deutlich höhere Werte gemessen, die aber stärker zurückgehen. Besonders auffällig sind die hohen Werte

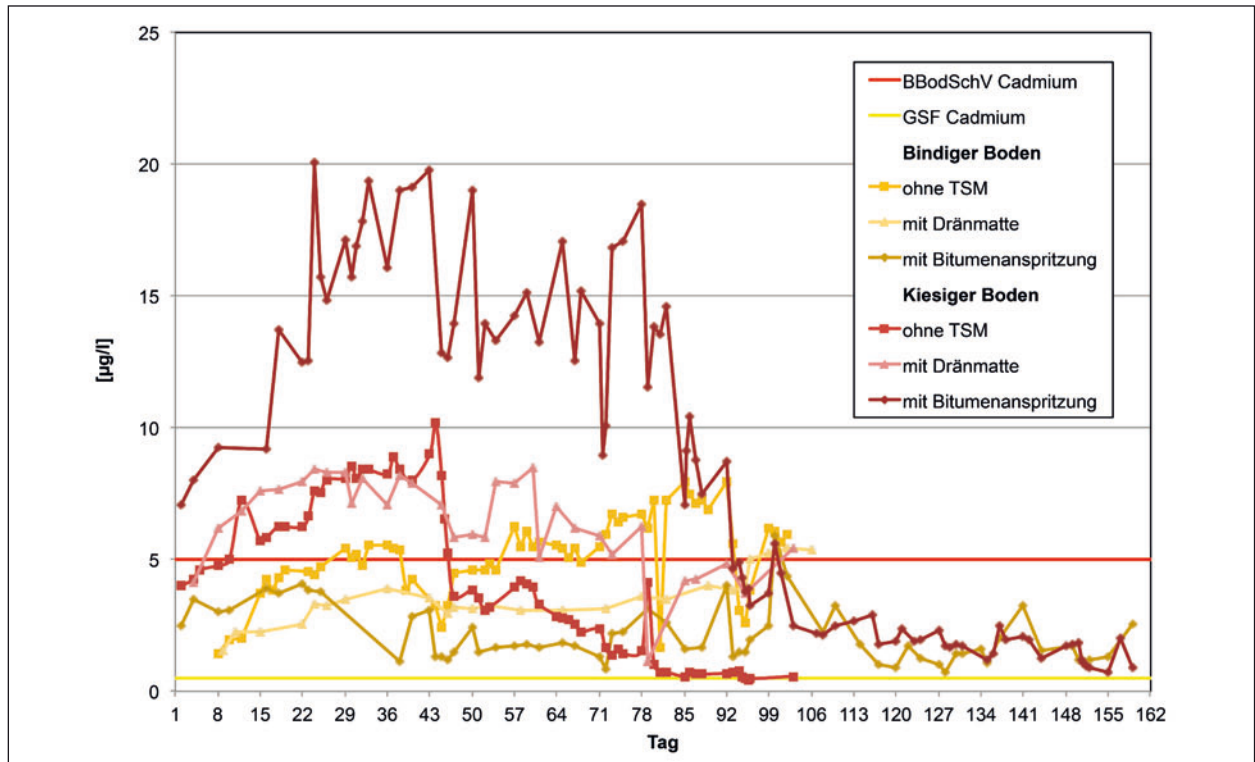


Bild 61: Cadmiumkonzentration im Sickerwasser für beide Böden

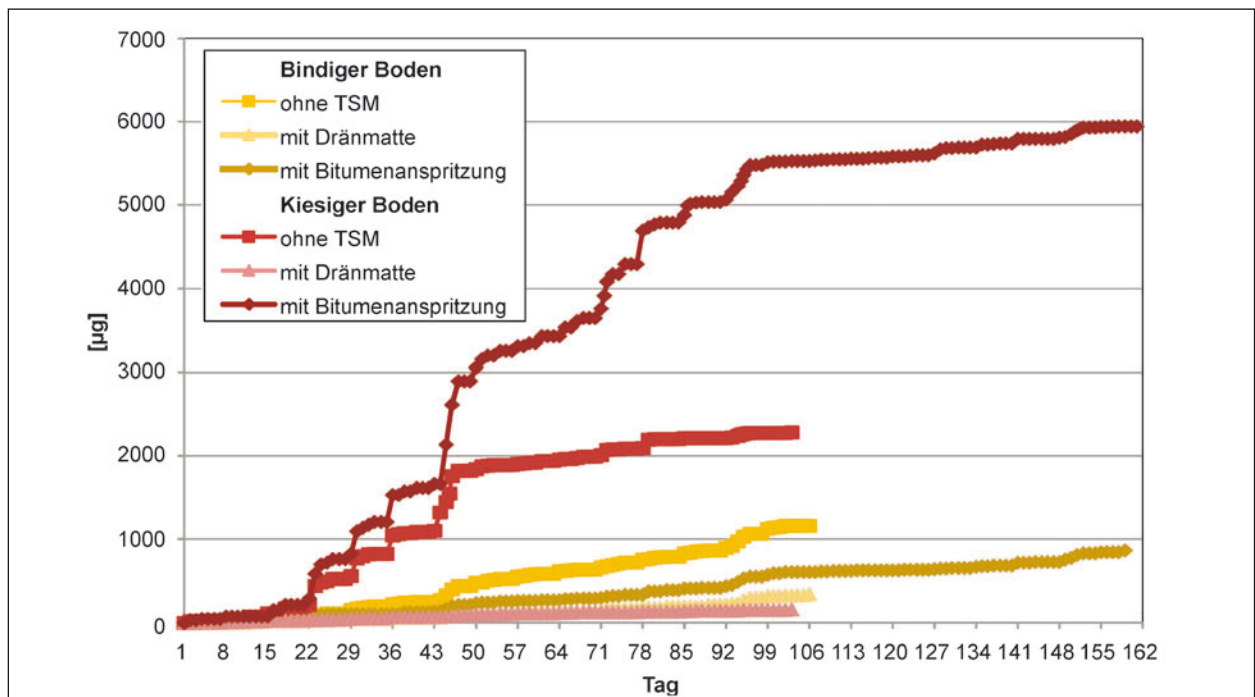


Bild 62: Summenkurve Cadmium für beide Böden

beim Versuch kiesiger Böden mit Bitumenanspritzung.

Dies spiegeln in Bild 62 auch die Summenkurven wider. Am stärksten steigt die Kurve für die Bauweise kiesiger Boden mit Bitumenanspritzung.

Dagegen verlaufen alle anderen Kurven relativ flach. Das liegt zum einen an der höheren Konzentration aber auch an der größeren Sickerwassermenge. Aufgrund der abnehmenden Konzentrationen haben vor allen die Kurve des kiesigen Bodens am Ende einen asymptotischen Verlauf.



Der Konzentrationsabfall beim Cadmium nach W/F wird in Bild 63 dargestellt. Zwar weisen die Säulenversuche nicht die hohen Anfangskonzentrationen wie das Sickerwasser auf, aber der rasche Abfall der Konzentration stimmt gut mit dem Sickerwasser überein.

Bild 64 zeigt die Konzentrationen von Sulfat im Sickerwasser für beide Böden. Die Konzentra-

tionen für den kiesigen Boden sind zu Beginn der Versuchsreihen sehr hoch und alle auf demselben Niveau. Während der Versuche fallen sie dann unterschiedlich schnell auf Werte unterhalb der Geringfügigkeitsschwelle. Die Konzentrationen für den bindigen Boden liegen zu Beginn unter denen des kiesigen Bodens, aber auch alle auf einem Niveau. Beim bindigen Boden ist kein deutlicher Abfall unter die Geringfügigkeitsschwelle zu beobachten.

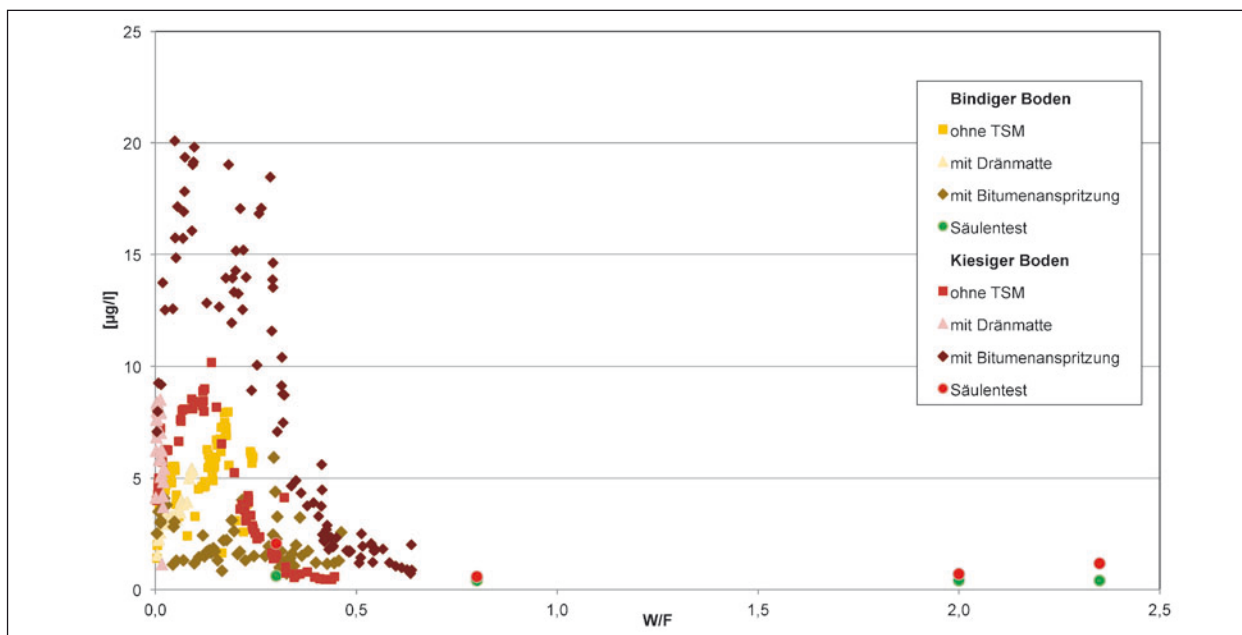


Bild 63: Cadmiumkonzentration für beide Böden nach W/F

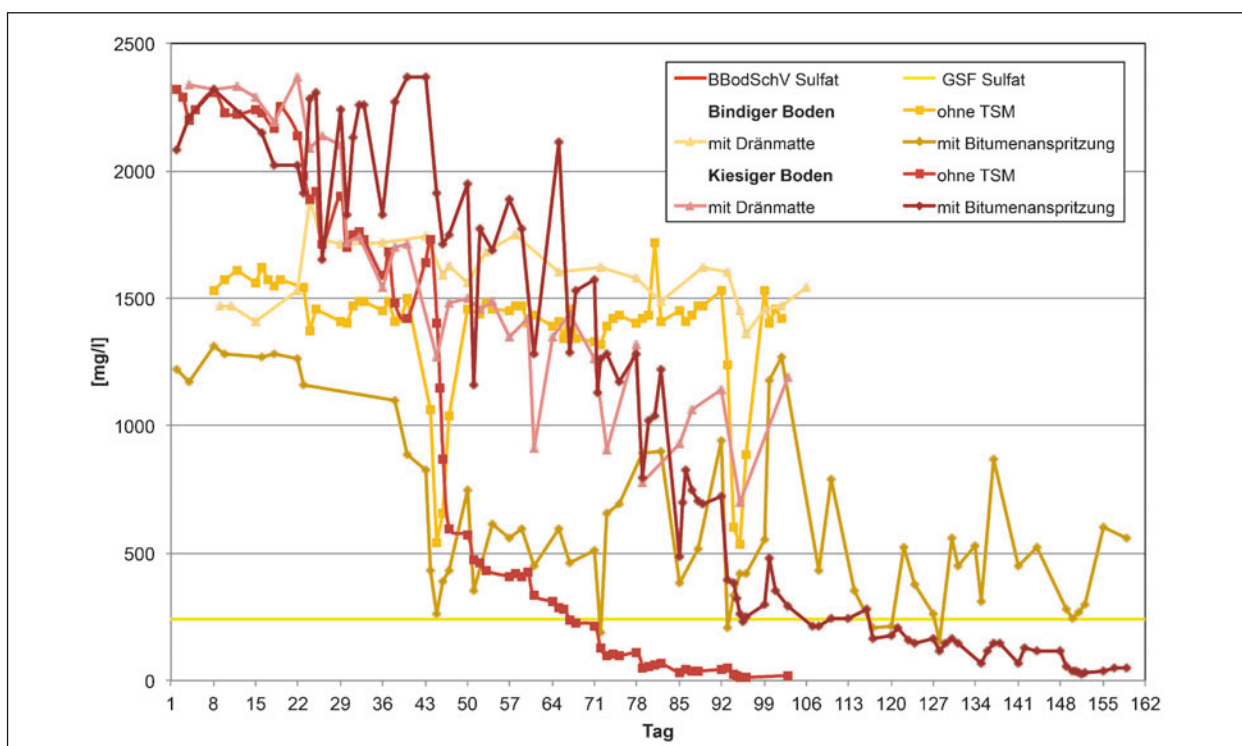


Bild 64: Sulfatkonzentration im Sickerwasser für beide Böden

In Bild 65 werden die Summenkurven für Sulfat dargestellt. Durch die höheren Konzentrationen und die größeren Wassermengen liegen die Summenkurven des kiesigen Bodens mit Bitumenanspritzung und ohne TSM deutlich höher als die des bindigen Bodens. Der Konzentrationsabfall ist deutlich im asymptotischen Verlauf der Kurve zu erkennen.

Die Kurven für den bindigen Boden steigen dagegen stetig an. Hier ist noch weiterer Sulfat austrag zu erwarten.

Am deutlichsten wird diese Abhängigkeit der Konzentration vom W/F beim Sulfat in Bild 66. Hier zeigt der Säulenversuch bei kleinen W/F-Ver-

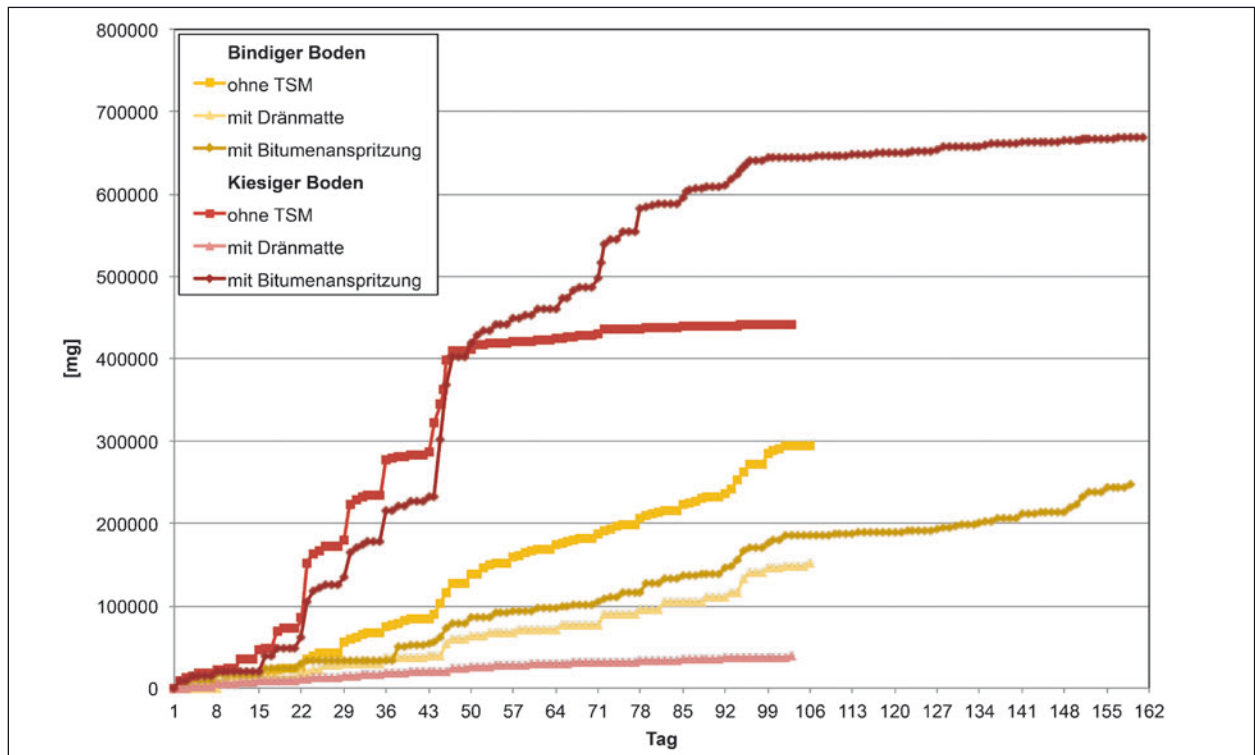


Bild 65: Summenkurve Sulfat für beide Böden

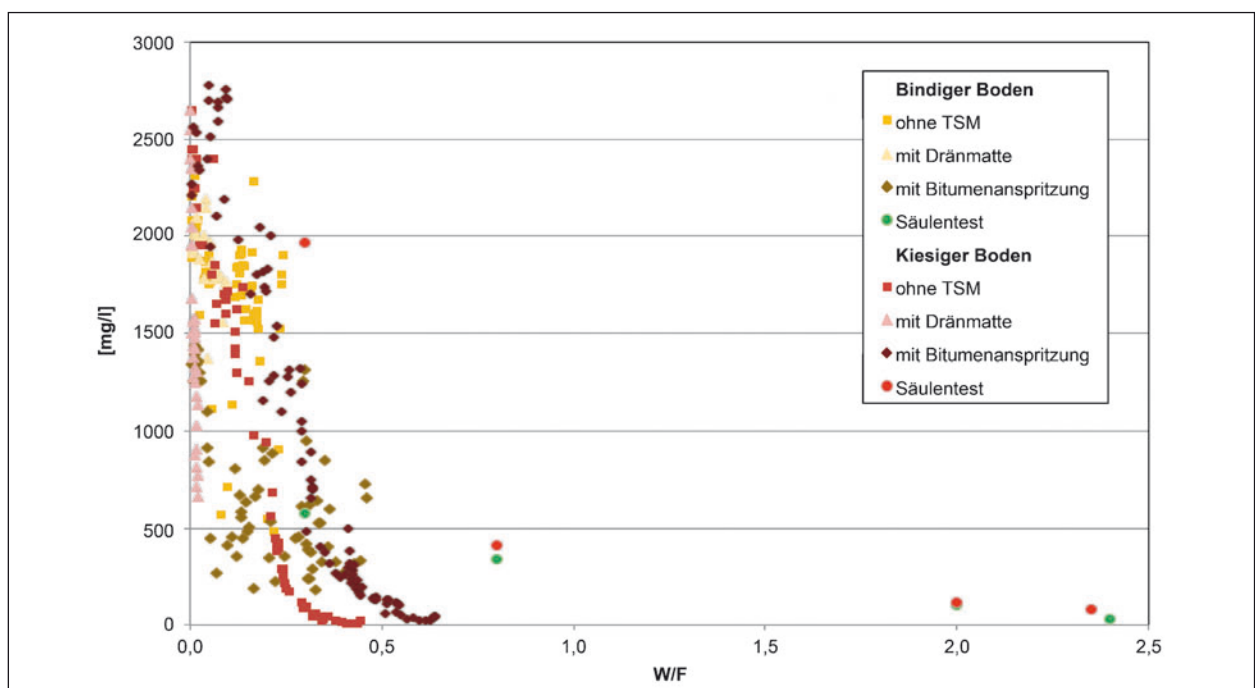


Bild 66: Sulfatkonzentration für beide Böden nach W/F

hältnissen für den kiesigen Boden auch hohe Konzentration an, die dann rasch abfallen. Dies gilt auch für den bindigen Boden. Es kann erwartet werden, dass die hohen Sulfatkonzentrationen im Sickerwasser mit weiterer Durchsickerung auch für den bindigen Boden zurückgehen würden.

Ein etwas gegenläufiges Verhalten zeigt Bild 67 für Kupfer. Beim kiesigen Boden steigt die Konzentration zunächst langsam an und hält sich dann auf hohem Niveau bei den Bauweisen mit Dränmatte und Bitumenanspritzung sogar oberhalb der Prüfwerte nach (BBodSchV, 2012). Besonders auffällig sind auch hier (wie beim Cadmium) die extrem

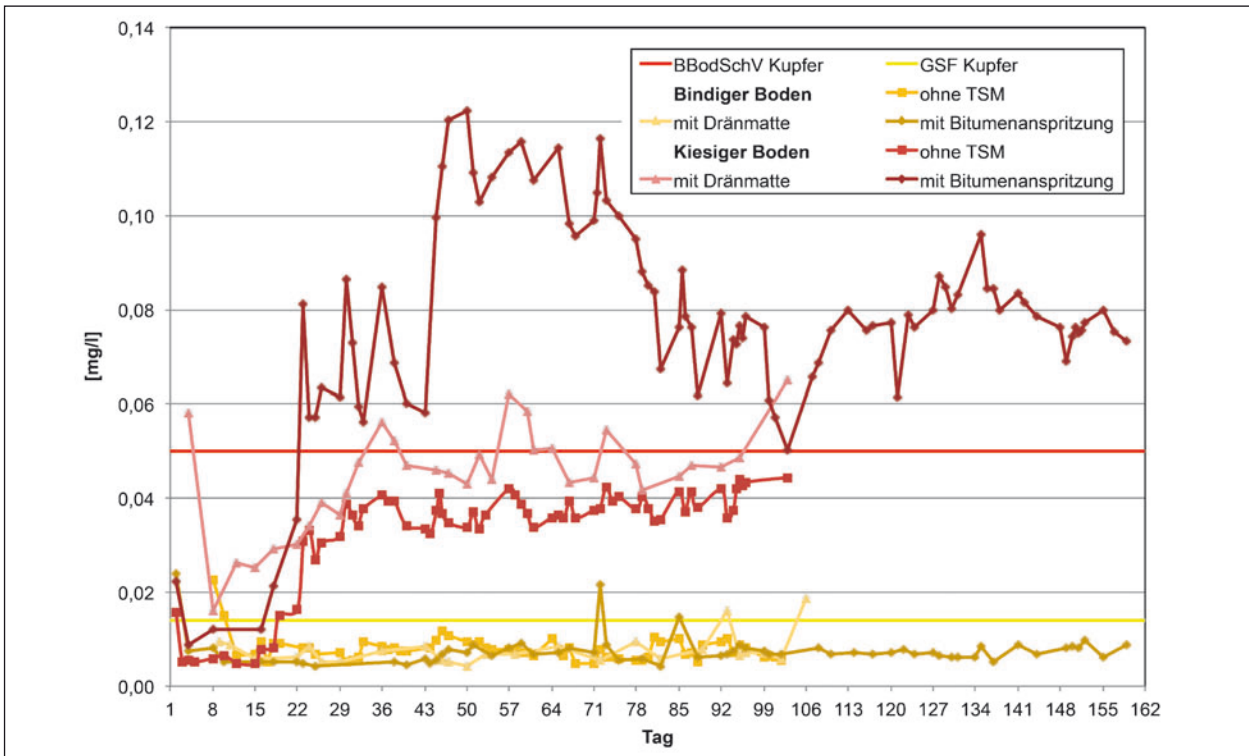


Bild 67: Kupferkonzentration im Sickerwasser für beide Böden

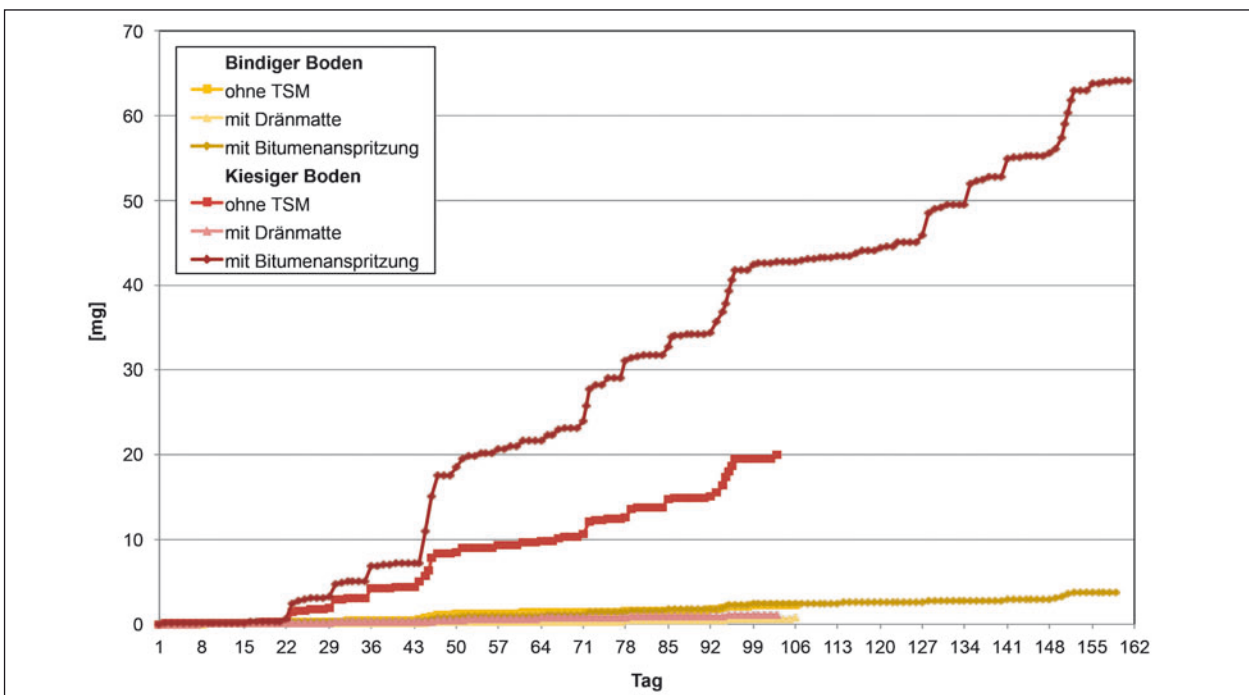


Bild 68: Summenkurve Kupfer für beide Böden

hohen Konzentrationen beim Versuch mit kiesigem Boden und Bitumenanspritzung.

Die Konzentrationen für den bindigen Boden sind deutlich niedriger und verlaufen gleichbleibend auf einem Niveau unterhalb der Geringfügigkeitsschwelle mit gelegentlichen Ausreißern nach oben.

Bild 68 spiegelt die niedrigen Konzentrationen beim bindigen Boden wider, die Kurven verlaufen sehr flach. Die Summenkurve für die Bauweise kiesiger Boden mit Dränmatte verläuft ebenfalls sehr niedrig, dies liegt allerdings an der sehr geringen Sickerwassermenge. Die beiden Kurven kiesiger Boden ohne TSM und mit Bitumenanspritzung verlaufen viel steiler und steigen stetig an.

## 8 Bewertung und Diskussion

### 8.1 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 sechs Versuchsreihen mit zwei Böden und drei unterschiedlichen Bauweisen durchgeführt. Dabei wurde die Menge des Regens und des Oberflächenabflusses erfasst. Die Menge des Sickerwassers wurde gemessen und dessen Inhaltstoffe analysiert.

Da der Oberflächenabfluss direkt auf das vorangegangene Regenereignis bezogen werden kann, lassen sich durch die Auswertung Rückschlüsse auf das gewählte Regenregime machen. Den größten Einfluss auf den Oberflächenabfluss hat die Regenmenge. Hier hat sich die Annahme bestätigt, dass mit steigender Regenmenge der Anteil des Oberflächenabflusses steigt. Einen weitaus schwächeren Einfluss hat die Regendauer auf den Oberflächenabfluss. Dies zeigt sich nur bei den sehr langen Regen (6 Stunden und 72 Stunden) oder wenn die gleiche Regenmenge in unterschiedlicher Zeit verregnet wird. Dann wird bei längerer Dauer weniger Oberflächenabfluss gemessen. Ein Einfluss des ersten oder zweiten Umlaufs des Regenregimes konnte lediglich bei der Bauweise mit Bitumenanspritzung beobachtet werden. Nur der aller-

erste Regen zeigt teilweise deutlich weniger Oberflächenabfluss als der erste Regen des 2. Umlaufes, was vermutlich an den noch sehr trockenen Erdbaukörper liegt.

Um das Regenregime beurteilen zu können, wurde die Menge eines Oberflächenabflusses proportional zur Gesamtmenge des Umlaufes betrachtet. Dabei ist zu beobachten, dass der Anteil am Gesamtabfluss unabhängig von der Bauweise oder des Bodens mit der Regenmenge steigt. Es lässt sich also nachweisen, dass die im Regenregime kreierten realitätsnahen Regenereignisse jeweils anders auf die Anteile von Sickerwasser und Oberflächenabfluss auswirken. Dabei ist die Regenmenge wieder der entscheidende Faktor. Damit Sickerwasser fließt, muss zunächst eine gewisse Menge Wasser in den Bodenkörper einfließen. Durch die kurzen Trockenpausen wird eine Austrocknung des Bodenkörpers verhindert und überschüssiges Wasser kann als Sickerwasser abfließen.

Das Sickerwasser wird in Form von Summenkurven dargestellt und steigt für alle Versuchsreihen stetig an. Nach den beiden langandauernden Regen (6 Stunden und 72 Stunden) 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 kiesiger Boden mit Dränmatte, hier fällt insgesamt sehr wenig Sickerwasser an, sodass weder die Anstiege bei den langen Regen noch ein Anstieg des Sickerwassers im zweiten Umlauf zu erkennen sind. Durch die Auswertung der Sickerwassermengen wird deutlich, dass die Anlagen bei gleichen Durchlässigkeiten identische 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 Böden 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 zeigt, dass es mit den Lysimeteranlage möglich ist vergleichbare, kontrollierte und zeitgerafften Untersuchungen durchzuführen.

Insgesamt zeigt das Regenregime, dass die unterschiedlichen Regen unterschiedliche Charaktere haben und sich besonders die Regenmenge auf die Anteile des Oberflächenabflusses auswirken. Für die weiteren Versuchsreihen sollte das Regenregime beibehalten werden. Aufgrund der Versuche sollten in zukünftige Simulationsrechnungen die unterschiedlichen Charaktere der Regen berücksichtigt werden. Keinesfalls darf von einem gleichmäßigen Dauerregen ohne Trocknungsphasen ausgegangen werden.

Die berechnete Verdunstung während der Versuche lag mit 12 bis 16 % deutlich unter der mittleren Verdunstungsrate in Deutschland mit 68 %. Dies liegt an den gleichbleibenden Laborbedingungen und den Verdunstungsschutzmaßnahmen bei längeren Regenereignissen.

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. Die Anlage eignet sich auch um kurzfristig neue Bauweisen und Kombinationen auszuprobieren.

Die wesentlichen Erkenntnisse zur Effizienz der TSM sind:

1. trotz mehrfacher Bitumenanspritzung konnte für beide Böden die Sickerwassermenge nicht wesentlich reduziert werden und
2. die beste Wirkung hat die Bauweise kiesiger Boden mit Dränmatte erzielt, obwohl diese Bauweise im M T S E (FGSV, 2009) gar nicht vorgesehen ist.

Beim bindigen Boden mit Bitumenanspritzung versickert mehr Wasser als bei der Bauweise ohne TSM. Dies kann zum einen am hydrophilen Verhalten der verwendeten Bitumenemulsion liegen, so dass Wasser auf der bindigen Bodenschicht abfließen würde und ebenfalls durch das Bitumen versickert. Denkbar ist auch, das Wasser, welches einmal in den Erdkörper eingedrungen ist, nicht wieder durch die Bitumenschicht verdunsten kann, da diese wie eine Dampfsperre wirkt. Es gibt aber eine Vielzahl von Bitumenemulsionen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften, die auch von der verwendeten Gesteinskörnung abhängen. Hier müssten weiterführende Versuche durchgeführt werden, bevor die Bauweise generell in Frage gestellt wird.

Ein weiteres überraschendes Ergebnis ist, dass die Dränmatte auf dem kiesigen Boden so gut funktioniert, dass eine Reduktion des Sickerwassers von 100 % bei der Bauweise ohne TSM auf 5 % mit Dränmatte stattfand. Beim bindigen Boden wurde immerhin eine Reduktion auf 37 % der ursprünglichen Sickerwassermenge erreicht. Im M T S E (FGSV, 2009) ist die Bauweise E nur für schwach durchlässige Baustoffe mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von  $k \leq 1 \cdot 10^{-7}$  m/s vorgesehen. Hier wird als Kriterium einzig die Wasserdurchlässigkeit herangezogen. Für das beobachtete Ergebnis wirkt die Dränmatte als kapillarbrechende Schicht und die Menge des in den Erdkörper übergehenden Wassers hängt weniger von der Wasserdurchlässigkeit ab, als vielmehr von der kapillaren Saugspannung des Materials. So lässt sich auch erklären, dass der Wassereintrag beim bindigen Boden größer ist als beim kiesigen Boden. Zu diesem Themenkomplex wird zurzeit das Projekt FE 05.0162 „Bestimmung hydraulischer Eigenschaften von im Straßenbau verwendeten Ersatzbaustoffen“ an der TU Braunschweig bearbeitet. In diesem Projekt werden auch die Wassergehalts-Saugspannungsbeziehungen der verwendeten Böden untersucht.

## 8.2 Umweltrelevante Inhaltstoffe

Trotz intensiver Suche war es nicht möglich, Bodenmaterial zu finden, dass über Inhaltsstoffe verfügte, die einerseits gut analysierbar waren aber andererseits die Umwelt nicht gefährdeten. Daher wurden Cadmiumacetat, Kaliumferrocyanid und Kupfersulfat als Feststoff den Böden zugegeben und gründlich durchmischt. Während sich Cadmium, Kupfer und Sulfat in den Sickerwässern der untersuchten Böden wieder fand, konnte Cyanid in relevanten Mengen nur im Sickerwasser des bindigen Bodens nachgewiesen werden. Dies zeigt auch wie schwierig es ist von gemessenen Feststoffkonzentrationen auf Werte im Eluat zu schließen.

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 eine gewisse Abhängigkeit vom Wasser/Feststoffverhältnis. Aufgrund der großen Masse des Bodenmaterials im Lysimeter erreicht das W/F bei den durchgeführten Versuchsreihen maximal



einen Wert von 0,63. Das ist wesentlich geringer als das W/F von 2 beim Säulenkurztest. Es stellt sich die Frage, ob für reale Dämme die W/F der Säulenversuche nicht zu groß angelegt sind, da zu erwarten ist, dass bei großen Dammbauwerken das W/F Verhältnis, das mit Sickerwasser erreicht wird noch kleiner als im Laborversuch sein würde. Der entscheidende Faktor bei den aufsummierten Frachtkurven ist die Sickerwassermenge, da diese eine wesentlich höhere Größenordnung hat als die Konzentration. Und diese Sickerwassermenge lässt sich sehr gut durch eine geeignete TSM beeinflussen. Die höchsten Summen werden bei der Bauweise kiesiger Boden mit Bitumenanspritzung gemessen, da hier eine Kombination von langanhaltenden hohen Konzentrationen und viel Sickerwasser vorliegt. 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.

### 8.3 Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen

Das Ziel der Forschungsarbeiten zum Thema Durchsickerung von Straßenböschungen ist es, eine belastbare Datengrundlage zur Sickerwassermenge 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 konnte.

Der Betrieb der Anlage ist betreuungs- und wartungsintensiv. Aufgrund der 15-wöchigen Versuchsdauer konnten bisher erst zwei Böden und drei TSM untersucht werden. Daher sollen weitere Versuchsreihen mit den Lysimetern durchgeführt werden, zunächst sind dafür Bauweisen mit RC-Baustoffen und Industriellen Nebenprodukten geplant, an denen besonders die Wirksamkeit von Dränmaten untersucht werden soll.

Die hier beschriebenen Versuche gehören zu einer Reihe von Projekten, die das komplexe Thema Durchsickerung durch verschiedene Ansätze ver-

folgen. Als nächstes müssen die Ergebnisse der Lysimeter unter Laborbedingungen mit denen unter Freilandbedingungen verglichen werden. Um die Eingangsparameter für die Strömungsmodellierung in Böschungen zu verbessern, sollen die Lysimeterergebnisse am Modell nachgerechnet werden. Um die Ergebnisse zu validieren, sollen in einem Straßendammbau die verschiedenen Bauweisen unter realen Bedingungen beobachtet 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.

## 9 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 „Die postfossile Gesellschaft: Verbesserte Nutzung endlicher Ressourcen im Straßenwesen“. 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 Erbau 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 zur Sickerwassermenge 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 wird die Anlage in einer Versuchshalle aufgestellt, sodass Lysimeteruntersuchungen unter 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 ersten Versuchsserie wurden ein bindiger und ein kiesiger Boden untersucht. Als TSM wurde eine Dränmatte, eine wasserabweisende Anspritzung mit Bitumen und eine Vergleichsvariante ohne TSM eingesetzt, sodass sich aus der Kombination von zwei Böden und drei Bauweisen insgesamt sechs Versuchsreihen ergeben. Die Lysimeterversuche wurden von September 2011 bis Dezember

2012 durchgeführt. Während der 15-wöchigen Versuchsreihe wurde jeden Tag das Gewicht des Lysimeters und des Oberflächenabfluss ermittelt. Das Sickerwasser wurde gemessen und analysiert. Während dieser Zeit wurden in jeder Woche ein bis drei Regenereignisse durchgeführt.

Die wesentlichen Erkenntnisse zur Wirksamkeit der TSM sind:

1. trotz mehrfacher Bitumenanspritzung konnte für beide Böden die Sickerwassermenge nicht wesentlich reduziert werden und
2. die beste Wirkung hat die Bauweise kiesiger Boden mit Dränmatte erzielt, obwohl diese Bauweise eigentlich nur für Baustoff mit geringer Durchlässigkeit vorgesehen ist.

Die Menge an umweltrelevanten Inhaltsstoffen wird von den beiden Faktoren Konzentration im Sickerwasser und Menge des Sickerwassers bestimmt. Der entscheidende Faktor bei den aufsummierten Frachtkurven ist 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.

Die Auswertung zeigt, dass es mit der Lysimeteranlage und dem Regenregime möglich ist, unter vergleichbaren, kontrollierten und zeitgerafften Bedingungen großmaßstäbliche Versuche durchzuführen.

## 10 Literatur

- BARTELS, H. et al. (2005): KOSTRA-DWD-2000 Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951-2000). Offenbach, Deutscher Wetterdienst
- BAST, S6(2012): Oberflächenanalytische Untersuchung einer Bitumenemulsion. Bergisch Gladbach, intern
- BBodSchG (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz – BBodSchG). 17.03.1998 zuletzt geändert am 24.02.2012
- BBodSchV (2012): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999, geändert am 24.02.2012

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (erweiterte Ausgabe 2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland. Freiburg, Freiburger Verlagsdienst
- DIN 19528 (2009): Eluation von Feststoffen – Perkolationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Eluationsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen. Berlin, Beuth Verlag
- DIN 19529 (2009): Eluation von Feststoffen – Schüttelverfahren zur Untersuchung des Eluationsverhaltens von anorganischen Stoffen mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg. Berlin, Beuth Verlag
- DIN EN 38414-4 (1984): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S); Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S. 4)
- FGSV (2009): Merkblatt über Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau. Köln, s. n.
- FGSV (2009): Merkblatt über die Behandlung von Böden und Baustoffen mit Bindemitteln zur Reduzierung der Eluierbarkeit umweltrelevanter Inhaltsstoffe
- HARTGE und HORN (2009): Die physikalische Untersuchung von Böden. Stuttgart, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
- KrWG (2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) vom 24. Februar 2012
- LAGA (2003): Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen – Technische Regeln für die Verwertung
- LAWA (2004): Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser
- MantelV (2012): Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzbaustoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichen Material (Entwurf 31.10.2012)
- MARKS, T. et al. (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
- SCHEFFER, SCHACHTSCHNABEL et al. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag
- SUSSET, B. et al. (2011): Weiterentwicklung von Kriterien zur Beurteilung des schadlosen und ordnungsgemäßen Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe und Prüfung alternativer Wertevorschläge – Zwischenbericht 2010
- SUSSET, B.; LEUCHS, W. (2011): Ableitung von Materialkennwerten im Eluat und Einbaumöglichkeiten mineralischer Ersatzbaustoffe – Umsetzung der Ergebnisse des BMBF-Verbundes „Sickerwasserprognose“ in konkrete Vorschläge zur Harmonisierung von Methoden. Dessau, Umweltbundesamt
- WHG (2009): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG). 2009. 31.07.2009 zuletzt geändert am 08.04. 2013

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Straßenbau“

## 2008

S 49: Zweischichtiger offenporiger Asphalt in Kompaktbauweise  
Ripke € 12,50

S 50: Finanzierung des Fernstraßenbaus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der FGSV am 25./26. September 2006 in Tecklenburg-Leeden € 15,50

S 51: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Haftfestigkeit von Straßenmarkierungsfolien  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Killing, Hirsch € 14,50

S 52: Statistische Analyse der Bitumenqualität aufgrund von Erhebungen in den Jahren 2000 bis 2005  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Hirsch € 16,00

S 53: Straßenrecht und Föderalismus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 24./25. September 2007 in Bonn € 15,50

S 54: Entwicklung langlebiger dünner Deckschichten aus Beton  
Silwa, Roßbach, Wenzl € 12,50

S 55: Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSüB)  
Leykauf, Birmann, Weller € 13,50

## 2009

S 56: Vergangenheit und Zukunft der deutschen Straßenverwaltung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 22./23. September 2008 in Bonn € 14,00

S 57: Vergleichende Untersuchung zweischichtiger offenporiger Asphaltbauweisen  
Ripke € 13,50

S 58: Entwicklung und Untersuchung von langlebigen Deckschichten aus Asphalt  
Ludwig € 15,50

S 59: Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmessmethode  
Hirsch, Friemel-Göttlich € 16,00

## 2010

S 60: Die Zukunftsfähigkeit der Planfeststellung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2009 in Bonn € 15,50

S 61: Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes  
Wolf, Fielenbach € 16,50

S 62: 41. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 18,50

S 63: Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten  
Blume € 16,00

S 64: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten (OPA)  
Teil 1: Bestandsaufnahme an vorhandenen Strecken  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller, Ripke, Zöller, Pöppel-Decker € 23,00

S 65: Untersuchungen von Dübellagen zur Optimierung des Betondeckenbaus  
Freudenstein, Birmann € 14,00

## 2011

S 66: Qualitätssicherung von Waschbetonoberflächen  
Breitenbücher, Youn € 14,50

S 67: Weiterentwicklung der automatisierten Merkmalerkennung im Rahmen des TP3  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Canzler, Winkler € 16,50

S 68: Lärmindernder Splittmastixasphalt  
Ripke  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 69: Untersuchung der Messunsicherheit und der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen  
Müller, Wasser, Germann, Kley € 14,50

S 70: Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen  
Dieser Bericht liegt außerdem in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de> heruntergeladen werden.  
Jansen, Kurz € 16,00

S 71: Enteignung für den Straßenbau – Verfahrensvereinheitlichung – Privatisierung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ im September 2010 in Bonn € 15,00

S 72: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten – Teil 2: Neue Baumaßnahmen  
Jansen, Pöppel-Decker € 15,00

S 73: Längsebenenheitsauswerteverfahren „Bewertetes Längsprofil“ – Weiterentwicklung der Längsebenenheitsbewertung der Zustandserfassung und -bewertung  
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

## 2012

S 74: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche  
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr 2“ € 30,50

S 75: Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen  
Krauter, Kumerics, Feuerbach, Lauterbach € 15,50

S 76: 42. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

S 77: Netzplanung – Netzbildung – Netzbereinigung  
Durner € 16,50

S 78: Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Verfahren  
Bürckert, Gauterin, Unrau € 16,50



## 2013

- S 79: Gussasphalt ohne Abstreuerung  
Ripke € 9,00
- S 80: Entwicklung einer neuen Versuchstechnik zur Bestimmung der Grenze zwischen halbfestem und festem Boden  
Vogt, Birle, Heyer, Etz € 17,50
- S 81: Das straßenrechtliche Nutzungsregime im Umbruch – Aktuelle Fragen des Planungsrechts  
Durner € 15,00

## 2014

- S 82: Qualitätskontrolle PWS – Wehner/Schulze Quality Control  
Teil 1: Auswertung der Kenndaten der PWS Prüfung  
Teil 2: Auswertung von Vergleichsuntersuchungen zur Prüfung der Poliereinheit mittels Schleifpapier  
Jansen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 83: Die Stellung der Gemeinden im Straßenrecht – aktuelle Probleme des Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 23./24. September 2013 in Bonn  
Durner € 17,00
- S 84: Anforderungen an die Erhaltung von Radwegen  
Maerschalk, Oertelt € 19,00
- S 85: Kornformbeurteilung mit dem optischen Partikelmessgerät Camsizer®  
Kunz  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2015

- S 86: Einfluss des Asphaltgranulates auf die bemessungs- und ermüdungsrelevanten Materialeigenschaften einer zwangsgerasteten, kaltgebundenen und bitumendominanten Tragschicht  
Radenberg, Miljković, Schäfer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden
- S 87: Untersuchungen zur Ermittlung von Präzisionswerten für zwei AKR-Schnelltests Durchführung und Auswertung  
Müller, Seidel, Böhm  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 88: Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten  
Hünger, Börner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 89: Ermittlung von repräsentativen Substanzwerten in homogenen Abschnitten  
Villaret, Frohböse, Jähmig, Karcher, Niessen, Buch, Zander  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 90: AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche  
Müller, Seidel, Böhm, Stark, Ludwig, Seyfarth  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 91: Straßen im Gesamtsystem der Verkehrsträger  
Durner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

- S 92: Längsebenenmesssysteme – Überprüfung der Signalverarbeitungsverfahren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM)  
Neubeck, Wiesebrock  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2016

- S 93: Bewertung und Optimierung der Hydrophobierung zur Verminderung des AKR-Schädigungsfortschrittes in Fahrbahndeckenbetonen  
Weise, Schrang € 19,50
- S 94: Beanspruchung und Entfernbarkeit temporärer Fahrbahnmarkierung  
Kemper, Schacht, Klaproth, Oeser, Beyer € 16,50
- S 95: Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel  
Bialucha, Merkel, Motz, Demond, Schmidt, Ritter, Haas € 14,50
- S 96: Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen Polieren von Gesteinskörnungen nach dem PWS-Verfahren  
Dudenhöfer, Rückert  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 97: Einheitliche Bewertungs- kriterien für Elemente der Straßenverkehrsinfrastruktur im Hinblick auf Nachhaltigkeit – Straße und Tunnel  
Fischer, Sauer, Jungwirth, Baumgärtner, Hess, Ditter, Roth, Xalter  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 98: Verifikation eines Europäischen Prüfverfahrens zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Asphalt  
Böhm, Beara in Vorbereitung
- S 99: Ansprache und Steuerung von Healing-Effekten bei Asphalt  
Wistuba, Alisov, Isailović
- S 100: Probekörperherstellung für performance-basierte Asphaltprüfungen  
R. Roos, C. Karcher, A. Wittenberg  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 101: Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS10 Sensorik zur Beanspruchungsdetektion im ersten gemeinsamen Versuchsbetrieb  
Wacker, Scherckenbach, Rabe, Golkowski  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 102: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen – Teil 1: Bodenmaterial  
Kellermann-Kinner, Bürger, Marks € 16,50

---

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)