

Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 147

bast

Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST

von

Manuel Melsbach

Emanuel Birle

Roberto Cudmani

Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik,
Felsmechanik und Tunnelbau

Technische Universität München

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 147

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 Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, 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 Kommunikation.

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 05.185
Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BASt

Fachbetreuung
Christine Kellermann-Kinner

Referat
Erdbau, Mineralstoffe

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9323
ISBN 978-3-95606-560-6

Bergisch Gladbach, März 2021

Kurzfassung – Abstract

Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST

Die Durchsickerung von Erdbauwerken, wie Straßendämmen und Schutzwällen, ist im Zusammenhang mit dem Einsatz von Ersatzbaustoffen im Erdbau von großer Relevanz. Bei der Bauweise E des „Merkblatts für Technische Sicherungsmaßnahmen im Erdbau“ (M TS E) der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) werden Erdbauwerke mit Dammkernen aus Bodenmaterialien mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen, industriellen Nebenprodukten oder Recyclingmaterialien ohne zusätzliches Abdichtungselement errichtet. Zur Reduktion der Durchsickerung zum Schutz des Grundwassers, werden dabei Anforderungen an die Wasserdurchlässigkeit der einzubauenden Böden bzw. Baustoffe gestellt ($k \leq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s). Zur Beurteilung und rechnerischen Überprüfung der Wirksamkeit dieser Sicherungsmaßnahme ist die Kenntnis des Wasserhaushalts von Straßendämmen erforderlich. Dazu wurden von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) Böschungsausschnitte in verschiedenen Bauweisen mit unterschiedlichen Materialien in Lysimetern im Freien, sowie in der Halle unter Laborbedingungen untersucht.

Gegenstand des vorliegenden Forschungsvorhabens ist die numerische Modellierung der Hallen- und Freilandlysimeter in instationären zweidimensionalen Finite-Elemente Berechnungen. Erstmals ist damit ein umfassender Vergleich zwischen messtechnisch erfassten und errechneten Sickerwassermengen von Straßendämmen möglich.

Die Festlegung hydraulischer Bodenkennwerte erfolgt bei den Bodenmaterialien auf der Grundlage vorhandener Untersuchungsergebnisse bzw. durch Abschätzung anhand von Datenbanken. Mit einer Klimarandbedingung werden unter anderem Niederschlag, Straßenabfluss, Sonneneinstrahlung, relative Luftfeuchtigkeit, Bewuchs etc. angesetzt und daraus Evapotranspiration, Infiltration und Oberflächenabfluss ermittelt. Bei den Hallenlysimetern werden Berechnungen mit tatsächlichem Regenregime mit Berechnungen unter Ansatz von Tagesmittelwerten verglichen. Für die Berechnungen der Freilandlysimeter werden Tagesmittelwerte angesetzt.

Die hydraulischen Kennwerte der Schichten an der Oberfläche, wie Rollrasen, Oberboden, Bankettmaterial und Entwässerungsschicht werden zunächst abgeschätzt und in umfangreichen Voruntersuchungen durch inverse Modellierung angepasst bzw. anhand von Datenbankwerten abgeschätzt. Die Entwässerungsschichten, in vielen Fällen der Experimente als Dränmatte ausgeführt, besitzen in der Realität eine Dicke von ein bis zwei Zentimetern, was im Modell aus Gründen der Netzgenerierung nur bedingt abbildbar ist. In umfangreichen Sensitivitätsuntersuchungen wird hinsichtlich Geometrie und hydraulischen Eigenschaften eine Möglichkeit zur Abbildung einer Dränmatte im Modell in Form eines porösen Mediums erarbeitet. Die Sensitivitätsuntersuchungen zeigten, dass die Schichten an der Oberfläche einen großen Einfluss auf den Wasserhaushalt und damit auf die Berechnungsergebnisse haben.

Eine weitere Fragestellung ist die Verteilung des Straßenabflusses auf der Dammoberfläche. Dazu wurden zwei Varianten näher untersucht. Die Anwendung einer fiktiven Kiesdeckschicht zur Umverteilung des Wassers an der Modelloberfläche wurde getestet, jedoch aufgrund zu großer Beeinflussung des Wasserhaushalts nicht weiterverfolgt. Zur möglichst realitätsnahen Abbildung des Oberflächenabflusses wurde stattdessen eine zweimalige Durchführung der Berechnung gewählt. Dabei wurde in der ersten Berechnung der Straßenabfluss zunächst vollständig als zusätzlicher Niederschlag im Bereich des Banketts aufgebracht. Der im Bereich des Banketts in der 1. Berechnung auftretende Oberflächenabfluss wurde anschließend auf den Böschungsbereich umverteilt. Mit dieser Methode konnten realistische Ergebnisse erzielt werden. Die Unterschiede zur 1. Berechnung waren jedoch zu meist relativ gering.

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass bei den meisten verwendeten Böden und Baustoffen eine recht gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen, insbesondere bei feinkörnigen Dammkernen und Dammaufbauten mit Entwässerungsschichten besteht. Tendenziell werden die Wassermengen, die den Kern durchsickern, in der Modellierung überschätzt.

In Lysimeteraufbauten mit einer Dränmatte über grobkörnigem Kernmaterial war zumeist die Ausbildung einer Kapillarsperre zu beobachten, was sich auch bei den Modellberechnungen zeigte.

Da die Qualität numerischer Modelle stark von der Güte der Eingangsparameter abhängig ist, erfordern Prognoseberechnungen eine gute Kenntnis der hydraulischen Bodeneigenschaften und der Randbedingungen.

Numerical simulation of the water balance in road embankment lysimeters of BAST

Seepage through earth works, such as road and noise protection embankments, is of great interest when using materials containing environmentally hazardous contaminants. In a guidance document on protective measures (M TS E), published by the German Association for Road Construction and Traffic Affairs (FGSV), construction method E determines the design of embankments containing contaminated soils, industrial by-products and recycling materials without a separate liner. With respect to groundwater protection, seepage through the structure has to be reduced by the embankment material itself, which has to meet the requirement of low hydraulic conductivity ($k \leq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s). For assessment of the effectiveness of such a technical design measure, comprehensive understanding of the water balance of road embankments is required. Therefore, the Federal Highway Research Institute (BAST) has carried out lysimeter studies on embankment sections in the field and under laboratory conditions. During these studies, different materials were assessed.

The aim of this research is the simulation of the indoor and outdoor lysimeters with the finite element method in a two-dimensional finite element model. For the first time, this allows a comprehensive comparison of measurements of seepage water in road embankments to modelling results.

The hydraulic parameters for the soils are based on laboratory results, where available, and estimated from databases. The surface of the models comprise a climate boundary condition which sets precipitation, road runoff, solar radiation, relative humidity, and plant cover amongst others to determine evapotranspiration, infiltration and surface runoff. For the indoor lysimeters, results of a model with actual rainfall are compared to those of a model presupposing daily means of precipitation. Daily means of climate data are also used for the models of the outdoor lysimeters.

Initially, parameters of the covering layers, like sod, top soil, shoulder and drainage materials are

estimated and subsequently fitted by inverse modelling or sourced from data bases.

In the experiments, the drainage layers mainly consisted of geo-composite with only one to two centimetres in thickness. Due to meshing constraints this is not feasible within the model. In an extensive sensitivity analysis a feasible solution in terms of geometry and hydraulic parameters is established. The best results are achieved by modelling the drainage layer as a porous medium. The results of the sensitivity analysis further indicate that the layers at the surface have a vast influence on the water balance of the embankment and thus on the modelling results.

Furthermore, the distribution of the road runoff on the verge needs to be taken into consideration. Therefore, two alternatives were examined. A virtual gravel layer for water distribution above the model was tested. However, this method was biased as it influenced the water balance of the whole embankment significantly. To achieve realistic results of the surface runoff, the simulation was run twice. In the first run, all road runoff was applied onto the shoulder. Runoff in this area was redistributed onto the slope in a second run. With this method realistic results could be achieved, although the differences between first and second run were minor.

Modelling results are in reasonable agreement with the experimental measurements for most soils. Especially for embankment cores with cohesive soils and setups with drainage layers, good agreement was achieved. In almost all results a tendency to overestimation of the seepage quantity through the dam core could be observed.

In lysimeters with a drainage layer above a coarse grained soil material, a capillary barrier is established within the drainage element. This could also be observed in the modelling results.

The reliability of the numerical models highly depends on the quality of the input data. Simulations for prognosis purposes thus demand a sound knowledge of the hydraulic properties of the soils and the boundary conditions.

Summary

Numerical simulation of the water balance in road embankment lysimeters of BAST

1 Introduction

Seepage through earthworks like road embankments and noise protection dams is of great relevance when slightly contaminated materials such as soils with environmentally hazardous substances, industrial by-products, and recycling materials shall be used. The potential use of these materials depends on the concentration of contaminants as well as the amount of expected seepage through the earth fill. According to a guidance document on protective measures (M T S E), published by the German Association for Road Construction and Traffic Affairs (FGSV), earth fills with environmentally hazardous substances, industrial by-products and recycling materials have to be protected against water seeping through them. To mitigate affection of groundwater bodies by leaching contaminants, the guidance document suggests certain methods of sealing to avoid or significantly reduce seepage water. Amongst others, method E determines the design of embankments containing contaminated soils and materials without a separate liner. A significant reduction of the amount of seepage water is achieved by material mixtures with a hydraulic conductivity of $k \leq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s. Method E avoids separate liners, that could be damaged over the life span by constructive parts like sign posts etc. which is an advantage compared to the other construction methods.

In earlier studies, the water balance of road embankments was assessed by numerical modelling. Since the processes at the surface of the model were not considered, no evidence on the effectiveness of construction method E could be observed (SCHWELLER et al., 2009). However, when processes like evapotranspiration, water storage, and surface runoff were taken into consideration, amounts of seepage water of construction method E were in the same range as those of the other sealing methods (MICHAELIDES et al., 2012). Apart from a large test fill, calculated amounts of seepage water could not be compared to experimental data so far.

At the German Federal Highway Research Institute (BAST), lysimeter studies were carried out on sections of road embankments in a testing hall under laboratory conditions (KELLERMANN-KINNER et al., 2016, 2017) and in the field (BRAND et al., 2016). In the hall lysimeter studies, natural soil materials (BM), recycling material (RC), household refuse slag (HMVA) and industrial by-products such as moulding sand (GRS) and hard coal ash (SKA) were investigated. Erosion was omitted by a sod on the surface of the lysimeters. In some setups, a geocomposite drainage mat was placed between the sod and the embankment core (referred to as technical safeguarding measure, TSM). With an overhead irrigation system, rain events were applied onto the lysimeter based on real rain intensities. Figure 1 shows a sketch of the hall Lysimeter with the illustration of the hydraulic processes.

The field lysimeters were situated at a road with two lanes in Augsburg/Germany. Two different soils, sandy gravel (BM 1) and a silty, sandy clay (BM 2) were used as embankment cores in lysimeters with

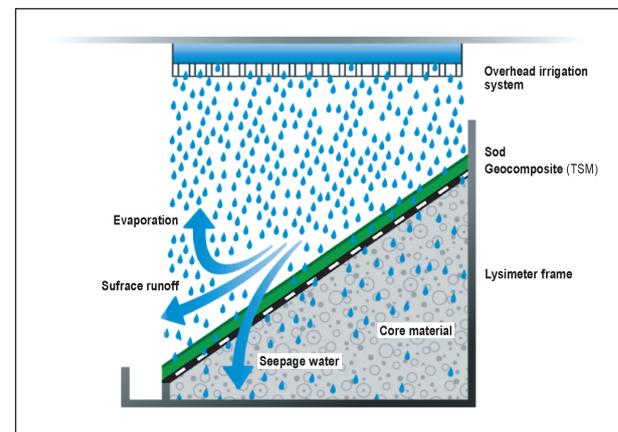


Fig. 1: Sketch of the hall lysimeter with illustration of the hydraulic processes (KELLERMANN-KINNER et al., 2016, 2017)

No.	Core	Layers at the surface
1	BM 2	Top soil 10 cm
2	BM 2	Top soil 10 cm, geo-composite drainage layer
3	BM 2	Top soil 10 cm, mineral drainage layer 10 cm
6	BM 1	Top soil 20 cm
7	BM 1	Top soil 20 cm, modified mineral liner 5 cm
8	BM 1	Top soil 10 cm

Tab. 1: Field lysimeters of BAST (excerpt, only relevant lysimeters are listed)

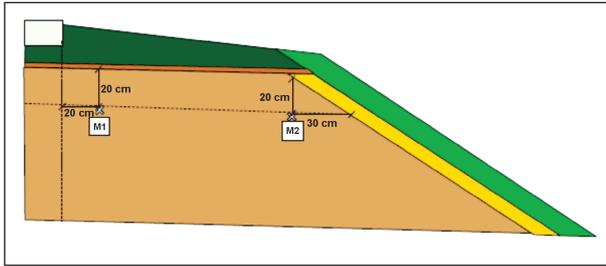


Fig. 2: Sketch of the field Lysimeter with the location of the multi parameter probes M1 and M2 (from BRAND et al., 2016)

different constructions of the layers at the surface, as shown in table 1.

Seepage water from the embankment core as well as intermediate and surface runoff were continuously measured by tipping bucket gauges. Intermediate runoff refers to the lateral flow within the layers near the surface (e. g. top soil and drainage layer) which was conducted to the foot of the verge. Furthermore, soil temperature and water content were measured by multi parameter probes at two different locations within the core. (BRAND et al., 2016)

Figure 2 shows a sketch of the field lysimeter.

2 Aims and objectives

The aim of this study is to simulate the hall lysimeters and the field lysimeters of BAST with numerical modelling with the finite element method.

For the first time, comprehensive comparison of seepage water quantities, derived from simulation and experimental data from road embankments is possible. They shall show, whether numerical modelling can reliably predict the water balance of road embankments.

3 Methodology and modelling

The hall lysimeters were assessed over a period of 105 days which was also adopted for the numerical model. For the field lysimeters, a period of approximately 2.5 years was simulated from September 2010 until March 2013. This period represents the first investigation phase. It allows a direct comparison between the experimental results and the modelling outcomes.

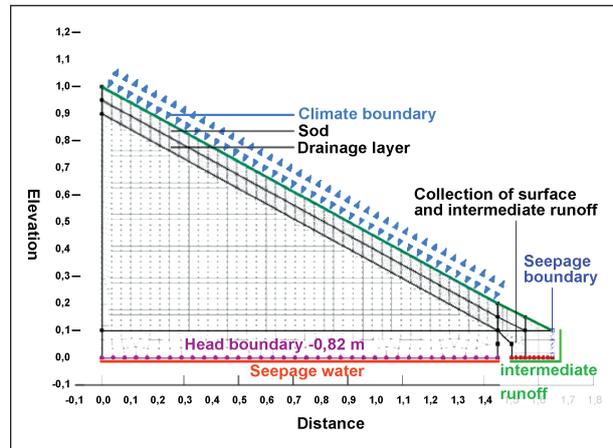


Fig. 3: Geometry of the model of the hall lysimeters

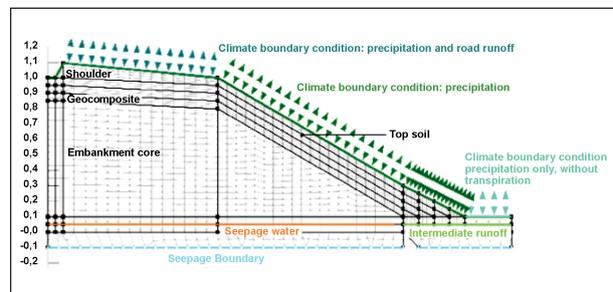


Fig. 4: Geometry of the model of field lysimeter 1 with silty, sandy clay (BM 2)

Numerical modelling was carried out with the finite element software Vadose/W and Seep/W. The geometry of the model is defined according to the dimensions of the real lysimeters. Figure 3 shows the model geometry of the hall lysimeters and figure 4 the one of the field lysimeters.

The hydraulic properties, like the soil water retention curve (SWRC) and the unsaturated hydraulic conductivity of the core materials (BM 1, BM 2, RC 2, RC 5 und HMVA 3) were taken from SCHARNAGL and DURNER (2014). Hydraulic properties for GRS and SKA were taken from the databases UNSODA (FREIKE et al., 1996) and Soilvision (FREDLUND, 2011) for soils with similar grain size distributions and compaction properties. Additionally, laboratory investigations were carried out on these materials (Zentrum Geotechnik, 2019) (referred to as GRS-TUM and SKA-TUM). The SWRCs of the soil materials are shown in figure 5 and the hydraulic conductivities in figure 6.

Hydraulic parameters of the layers near the surface, like sod, topsoil, shoulder material and the modified mineral liner were also taken from databases and literature (HENNING, 2000; FREDLUND, 2011;

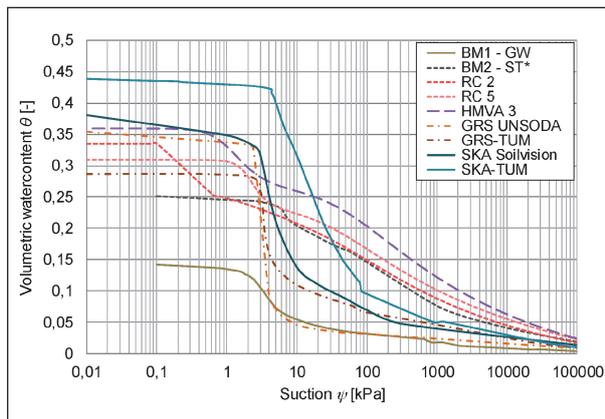


Fig. 5: SWRCs of the materials used within the lysimeters

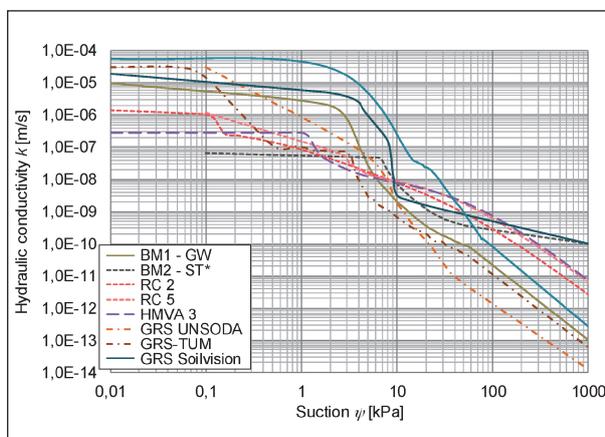


Fig. 6: Hydraulic conductivities of the materials used within the lysimeters

EKBLAD and ISACSSON, 2007; SCHANZ et al., 2004). The unsaturated hydraulic conductivity of the sod was determined by inverse modelling of two hall lysimeters, one containing the embankment with cohesive soil (BM 2) and the other one sandy gravel (BM 1), both without drainage layer.

In most of the experiments, the drainage layers were formed of a geocomposite drainage mat. These usually have a thickness of one to two centimetres in reality. Their dimensions could cause numerical problems with the mesh, as it would have to be very fine in this region. In extensive preliminary studies, a sensitivity analysis was carried out and variations of the geometry and the hydraulic properties of the drainage layer were considered. Initially, variations of the air entry value of the soil water retention curve of a needle punched non-woven geotextile was considered. As the steep slope of the SWRC led to numerical issues, the properties of a porous medium with 5 cm thickness proved to be the best choice for the model. In that way, percolating water from the sod or top soil could

be transported within the drainage layer to the foot of the verge and convergence of all nodes could be achieved in most cases.

At the top of the model a climate boundary condition, determining Precipitation, net radiation, relative humidity, vegetation, etc. was applied. The hall lysimeters were modelled twice: once with the actual precipitation and once with the daily mean of rainfall.

In the field lysimeters, road runoff was added to the precipitation in the section of the shoulder. Climate data was sourced from a meteorological station at Augsburg airport, in approximately 4 km distance from the lysimeter site as the crow flies. Rainfall data was logged on the lysimeter site and was used as input data for the simulations. The models of the field lysimeters use daily means of climate data. From the climate boundary condition, the software determines evapotranspiration, infiltration and surface runoff in relation to the hydraulic properties of the layers near the surface and their current water content (GEO-SLOPE, 2014).

Boundary conditions at the bottom of the lysimeters were determined according to the in-situ conditions. In the model of the hall lysimeters, a head boundary condition was applied, representing suction plates with a negative pressure of 82 mbar (8.2 kPa). In the field lysimeters, the embankment core is drained by an underlying gravel layer. Free drainage from the core was modelled by a seepage boundary condition (Flux $0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, potential seepage face review). The left fringes of the models are defined as impermeable, as the real lysimeter walls are.

Initial conditions for the hall lysimeters were defined by a steady state parent analysis. The initial conditions of the field lysimeters were derived from an initial groundwater table at -1.0 m below the basis of the embankment core.

As part of the preliminary studies, an issue concerning the distribution of the road runoff on the embankment in the field lysimeters had to be covered. In this respect, two different alternatives were considered. The application of a virtual covering layer of gravel to redistribute the road runoff was tested. The water balance of the embankment proved to be very sensitive to changes in the hydraulic conductivity of the virtual covering layer. The influence on the water balance from the virtual layer is too high to get reliable results, so this approach was dropped.

The method of choice was the redistribution of the road runoff from the shoulder division onto the slope division in a second calculation run. The principal is illustrated in figure 7.

In order to optimise the geometry of the field lysimeter models as well as the hydraulic properties of the gravel underneath the core and the shoulder material, variations of the field lysimeters were assessed in preliminary studies.

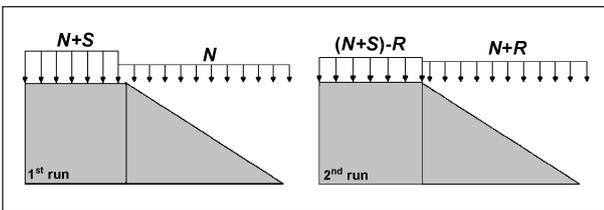


Fig. 7: Redistribution of the surface runoff in the shoulder division onto the slope of the embankment for the second run. N: precipitation; S: road runoff; R: surface runoff in the shoulder division.

4 Results of the hall lysimeters

Numerical modelling results are in good accordance with the measured data from the experiments for most of the investigated materials. Therefore, the hydraulic parameters of the sod and the geo-composite drainage layer had to be fitted by inverse modelling of two of the lysimeter setups prior to processing the remaining models.

Figure 8 provides an overview of the modelling results of the hall lysimeters with the water balances of actual rain events and daily means. Results from the experiments are also shown for comparison.

In setups without drainage layer between sod and embankment core, quantities of seepage water through the core showed a tendency to being slightly overestimated by the simulation for most materials. Only simulations of the materials HMVA, RC and GRS-TUM (with hydraulic parameters determined in the laboratory) returned lower quantities of seepage water than actually measured.

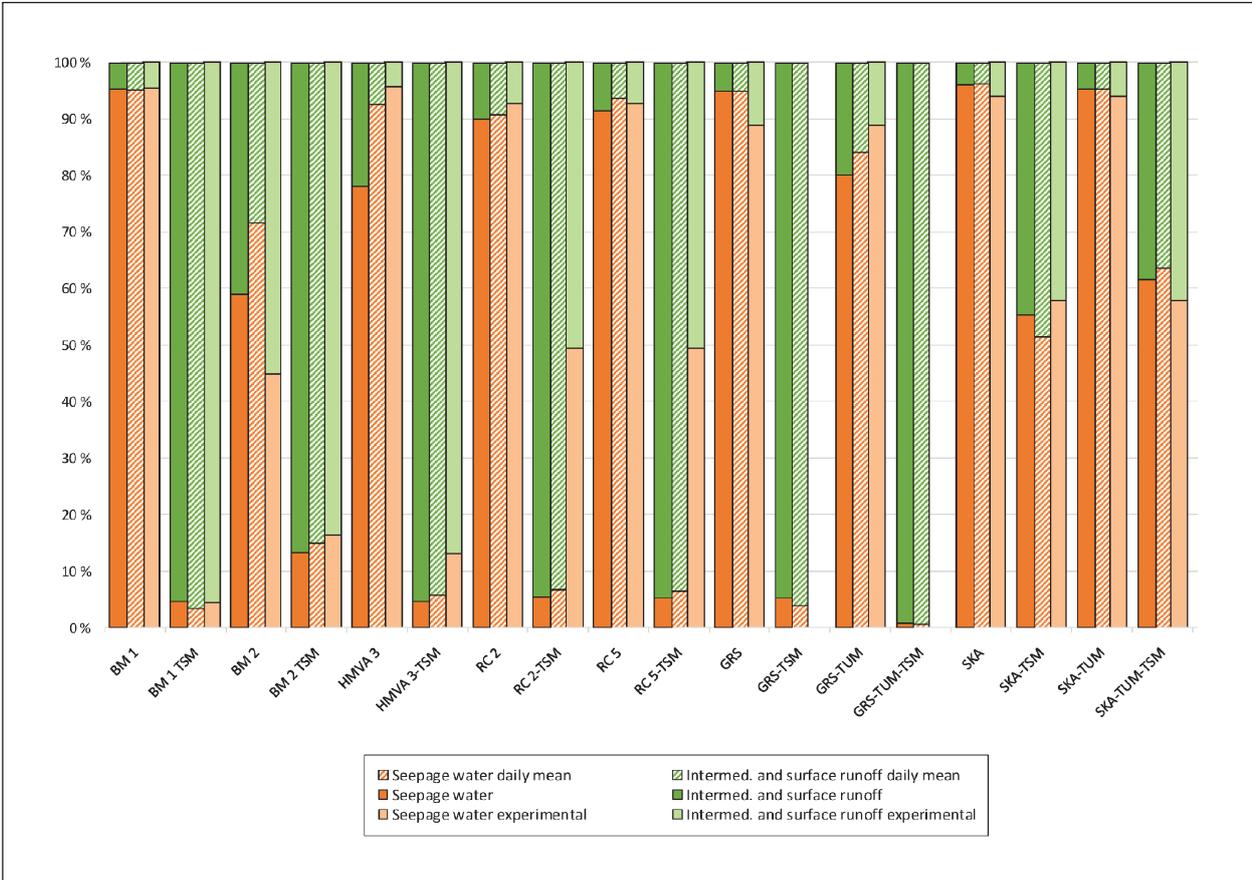


Fig. 8: Ratio between seepage water from the embankment core and intermediate and surface runoff. Overview over the results of the hall lysimeters. Simulation results are given for the actual and rainfall and the daily means.

The simulation of the lysimeters with a geocomposite drainage layer (TSM) over coarse materials resulted in moderate underestimations of the quantity of seepage water through the core. In case of the RC materials the underestimation of seepage water was significant.

In the experimental setups with a geocomposite drainage layer over coarse materials a high percentage of intermediate flow was observed, despite the good hydraulic conductivity of the underlying coarse material. This indicates, that the geocomposite acted as capillary barrier as only small amounts of seepage water percolated from the core. In the simulations, this effect could be modelled accordingly. Preliminary studies, however, suggested that it also depends on the geometry of the model, whether the capillary barrier effect can be observed in the numerical model or not. Furthermore, the hydraulic properties of the drainage layer and the core material have a great influence in this respect. These results emphasize that the water balance of the whole model highly depends on the properties of the layers at the surface.

Simulations with daily means of rainfall do not show substantial changes in the quantities of seepage flow from the core for most core materials compared to the simulations with actual rainfall.

5 Results of the field lysimeters

Simulation results of the field lysimeters were in good accordance with the measured results. It could also be observed that the quality of the results does not only depend on the hydraulic properties of the different soil materials, but also on the geometry and the boundary conditions. As already seen in the hall lysimeters, the layers near the surface have a significant influence on the water balance. Thus, the determination and allocation of the hydraulic parameters of top soil, shoulder material, and drainage layer have a high impact on the total water balance.

Results of the field lysimeter simulations are shown in figure 9. Although, hydraulic properties of the layers at the surface were sourced from databases, the simulated quantities of seepage water correlate well with the experimental results, with a tendency to overestimation.

At times of high precipitation intensities, the model had to deal with large quantities of water from rainfall and road runoff. This resulted eventually in certain non-converging nodes with the consequence of high amounts of water that are not plausible and were thus purged subsequently.

An example of the apportionment of precipitation and road runoff in seepage water, surface and intermediate runoff as well as evaporation and transpiration is shown in figure 10 for lysimeter 1. The chart shows that the water balance is plausible.

In variations of the model setup, the saturated hydraulic conductivity of the shoulder material was altered between $k_s = 1.5 \cdot 10^{-3}$ m/s and $k_s = 1.5 \cdot 10^{-6}$ m/s. Results of the variations show, that a significant reduction of seepage water is only to be expected at values below $k_s = 1.5 \cdot 10^{-5}$ m/s.

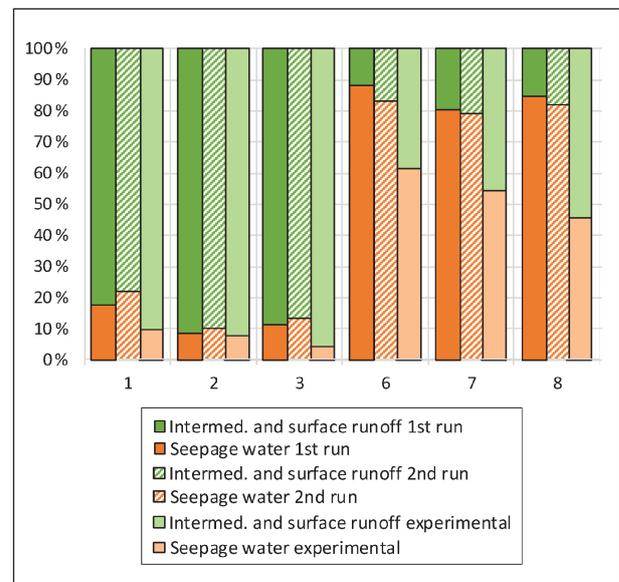


Fig. 9: Comparison of the simulation results of the first and second run of the simulation to the experimental results. The columns represent the ratio between seepage water and surface and intermediate runoff.

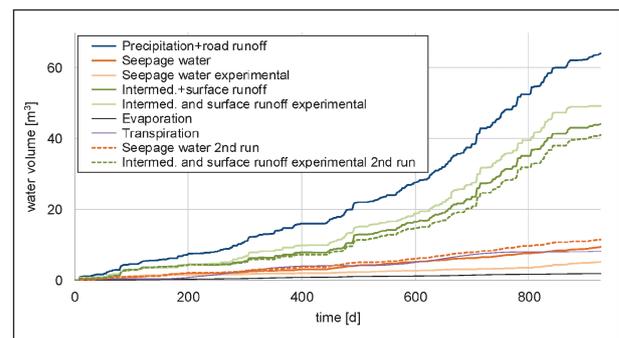


Fig. 10: Cumulative water balance of lysimeter 1

Reallocation of the surface runoff occurring in the section of the shoulder in the first calculation run onto the slope in the second run gives mostly plausible results. However, the method is rather imprecise due to biases in the evaluation of the nodes at the slope breaks. With shoulder materials of relatively high permeability, reallocation of the surface runoff has little impact on the results, so water balances of first and second run are rather similar. Differences become more significant at lower permeabilities (approx. $k_s = 1.5 \cdot 10^{-6}$ m/s) of the shoulder materials.

6 Conclusion

For most of the soil materials, the modelling results are in good accordance with the measured data especially with embankments with cohesive cores and setups with a drainage layer. However, quantities of seepage water through the core tend to being overestimated in the numerical model.

In general, the geometry and the hydraulic properties of the layers near the surface have a major influence on the water balance of the whole model.

In principal, numerical models allow reliable prediction of the water balance of road embankments if hydraulic properties of materials in the layers at the surface and the embankment core are known. Furthermore, the findings on the hydraulic parameters of geocomposite and mineral drainage layers of this research project should be considered in future analyses.

Inhalt

1	Einführung	13	6.3.5	Gießereirestsand GRS	36
2	Zielsetzung	14	6.3.6	Steinkohlenkesselasche SKA	38
2.1	Ziel der Untersuchungen	14	6.3.7	Vergleich der Untersuchungen	40
2.2	Vorgehensweise	15	7	Fazit Hallenlysimeter	42
3	Stand der Forschung	15	8	Modellierung der Freiland- lysimeter	44
3.1	Lysimeteruntersuchungen zum Wasserhaushalt in Straßendämmen ...	15	8.1	Allgemeines	44
3.2	Modellierung des Wasserhaushalts in Straßendämmen	16	8.2	Modellgeometrie	45
4	Grundlagen von Vadose/W und Seep/W	19	8.3	Bodenkennwerte	46
5	Modellierung der Hallenlysimeter ...	20	8.4	Hydraulische Randbedingungen	48
5.1	Modellgeometrie	20	8.5	Klima-Randbedingungen	48
5.2	Bodenkennwerte	21	8.5.1	Niederschlag und Straßenabfluss ...	48
5.2.1	Kernmaterialien	22	8.5.2	Relative Luftfeuchtigkeit	49
5.2.2	Rollrasen und Dränschicht	24	8.5.3	Nettostrahlung	50
5.2.3	Thermische Bodenparameter	24	8.5.4	Bewuchs	52
5.3	Randbedingungen	24	8.6	Anfangsbedingungen	52
5.3.1	Klima-Randbedingungen	24	9	Berechnungsergebnisse Freilandlysimeter	53
5.3.2	Hydraulische Randbedingungen	26	9.1	Oberflächenabfluss	53
5.4	Anfangsbedingungen	27	9.2	Variantenuntersuchung zur Modell- geometrie	54
6	Berechnungsergebnisse der Hallenlysimeter	27	9.2.1	Lysimeter 1 – Ausgangssituation	54
6.1	Untersuchungen zur Festlegung der hydraulischen Eigenschaften des Rollrasens	27	9.2.2	Lysimeter 1 – Variante 1	56
6.2	Sensitivitätsuntersuchungen zur Abbildung der Dränmatte im Modell ...	27	9.2.3	Lysimeter 1 – Variante 2	57
6.3	Ergebnisbetrachtung der Lysimeter- Berechnungen	31	9.2.4	Lysimeter 1 – Variante 3	58
6.3.1	Kiesiger Boden (BM 1)	31	9.2.5	Lysimeter 8 – Ausgangssituation	59
6.3.2	Bindiger Boden (BM 2)	32	9.2.6	Lysimeter 8 – Variante 1	60
6.3.3	Hausmüllverbrennungsgasche HMVA ...	33	9.2.7	Lysimeter 8 – Variante 2	60
6.3.4	Recycling-Material RC	34	9.2.8	Lysimeter 8 – Variante 3	61
			9.2.9	Lysimeter 8 – Variante 4	62
			9.3	Fazit der Variantenuntersuchungen ...	63
			9.4	Ergebnisbetrachtung der Lysimeter- Berechnungen	63
			9.4.1	Lysimeter 1	63

9.4.2	Lysimeter 2.	65
9.4.3	Lysimeter 3.	66
9.4.4	Lysimeter 3 – Variante 1.	67
9.4.5	Lysimeter 6.	68
9.4.6	Lysimeter 6 – Variante 1.	69
9.4.7	Lysimeter 6 – Variante 2.	70
9.4.8	Lysimeter 7.	71
9.4.9	Lysimeter 8.	72
9.5	Vergleich der Untersuchungen.	72
10	Fazit Freilandlysimeter	74
11	Schlussfolgerungen.	76
11.1	Beurteilungen	76
11.2	Zuverlässigkeit der Modellberechnungen	77
12	Zusammenfassung und Ausblick	78
	Literatur.	81
	Bilder	84
	Tabellen	89

Die Anlagen 1 und 2 zum Bericht sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

1 Einführung

Die Durchsickerung von Erdbauwerken, z. B. Straßendämmen und Schutzwällen, ist im Zusammenhang mit dem Einsatz von Ersatzbaustoffen im Erdbau von großer Relevanz. So hängt es neben den umwelttechnischen Eigenschaften der Ersatzbaustoffe wesentlich von den zu erwartenden Sickerwassermengen ab, ob und wie Ersatzbaustoffe im Erdbau eingesetzt werden können. Bei entsprechenden Konzentrationen von umweltrelevanten Inhaltsstoffen in Ersatzbaustoffen können technische Sicherungsmaßnahmen erforderlich werden, um eine Durchsickerung der Ersatzbaustoffe zu vermeiden. Bauweisen mit technischen Sicherungsmaßnahmen sind im Merkblatt M TS E der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV, 2017) beschrieben. Diese können prinzipiell in Bauweisen mit Abdichtungen, Bauweisen mit gering durchlässigem Körper aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen und Kernbauweisen ohne Abdichtungen unterschieden werden. Eine besondere Stellung nimmt die Bauweise mit gering durchlässigem Körper aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen (Bauweise E) ein, da dabei auf ein zusätzliches Abdichtungselement oberhalb der Böden bzw. Baustoffe mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen verzichtet wird.

Im Rahmen der vom Bundesministerium für Bau, Verkehr und Stadtentwicklung geförderten Forschungsvorhaben FE 05.147 (SCHWELLER et al., 2009) und FE 84.105 (MICHAELIDES et al., 2012) wurde die Wirksamkeit der Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen anhand von numerischen Berechnungen untersucht. Im Rahmen des Forschungsvorhabens 05.147 wurden dabei zunächst Untersuchungen zur Durchsickerung von Straßendämmen, die hinsichtlich ihres Aufbaus den Bauweisen A (witterungsempfindliche Abdichtungskomponente ohne Sickerschicht), B (witterungsempfindliche Abdichtungskomponente und Sickerschicht), D (Kern aus Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen unterhalb einer gebundenen Deckschicht) und E (schwach durchlässiger Baukörper aus Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen) des M TS E (FGSV, 2017) entsprachen, unter Ansatz von zeitabhängig konstanten Infiltrationsraten durchgeführt. Auf Basis dieser Berechnungen konnten die Bauweisen hinsichtlich ihrer Sickerwassermengen untereinander verglichen werden. Die Ermittlung von absolu-

ten, realitätsnahen Wassermengen war jedoch nicht möglich, da die bei den durchgeführten Berechnungen als Randbedingung aufgebrachten Infiltrationsmengen ohne Berücksichtigung von Verdunstungsprozessen ermittelt und dadurch deutlich überschätzt worden waren. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens 05.147 durchgeführten Simulationsberechnungen waren aber trotzdem geeignet, um die prinzipielle Wirksamkeit der Bauweisen A, B und D zu belegen. Für die Bauweise E dagegen konnte mit den im Rahmen des Forschungsvorhabens 05.147 durchgeführten Berechnungen eine Wirksamkeit hinsichtlich der Reduzierung der Sickerwassermengen in einer Größenordnung wie bei den Bauweisen A, B und D nicht belegt werden. Die Gründe dafür liegen in der Besonderheit der Bauweise E, bei der im Vergleich zu den Bauweisen A und B auf ein zusätzliches Abdichtungselement oberhalb der Böden bzw. den Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen verzichtet wird. Dabei wird aber von den Böden bzw. Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen mit einem Anforderungswert an den gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert $k \leq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s eine geringe Durchlässigkeit gefordert. Aufgrund der im Rahmen des Forschungsvorhabens 05.147 angesetzten vergleichsweise großen Infiltrationsmengen auf der Dammoberfläche kam es bei Ansatz eines Durchlässigkeitsbeiwertes $k = 1 \cdot 10^{-7}$ m/s (damals gültiger Anforderungswert) rechnerisch immer noch zu vergleichsweise großen Sickerwassermengen aus den Böden/Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen. Um realitätsnahe Sickerwassermengen zu erhalten, wurden deshalb im Forschungsvorhaben 84.105 weiterführende Simulationsberechnungen zum Wasserhaushalt der Bauweise E durchgeführt. Im Rahmen dieser Berechnungen wurden im Vergleich zu den Berechnungen des Vorhabens 05.147 die an der Dammoberfläche stattfindenden Prozesse (Evaporation, Transpiration, Oberflächenabfluss) berücksichtigt, wobei hinsichtlich der als Randbedingungen anzusetzenden Klimadaten auf Messwerte des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für den Flughafen München zurückgegriffen wurde. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen, wurden die Klimadaten von 1992 bis 2002 zur Abbildung eines Simulationszeitraumes von 10 Jahren angesetzt. Die Berechnungsergebnisse haben gezeigt, dass die Sickerwassermengen aus Böden bzw. Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen bei Durchlässigkeitsbeiwerten dieser Stoffe von ca. $k = 1 \cdot 10^{-8}$ m/s rechnerisch nur geringfügig größer sind als im Vergleich zu Bauweisen, bei denen

oberhalb der Böden bzw. Baustoffe mit umweltrelevanten Inhaltsstoffe zusätzlich Abdichtungselemente angeordnet werden. Für entsprechend gering durchlässige Böden bzw. Baustoffe stellt die Bauweise E eine sehr attraktive Alternative dar, da im Vergleich zu den Bauweisen A, B und C keine Dichtungselemente zum Einsatz kommen, die ggf. durch das Einbringen von konstruktiven Bauteilen in Mittelebene gezogen werden können. Stattdessen kann die Bauweise E als eine vergleichsweise robuste Bauweise betrachtet werden.

Die Ergebnisse der durchgeführten Simulationsberechnungen konnten jedoch bisher abgesehen von experimentellen Untersuchungen, die an einer großmaßstäblichen Versuchsschüttung am Münchner Flughafen gewonnen wurden, bisher nicht mit experimentellen Messdaten verglichen werden. Vor diesem Hintergrund kommt dem Forschungsvorhaben FE 89.0246 bzw. FE 89.0270 (Freilandlysimeter) und AP F1100.3207034 (Hallenlysimeter) eine besondere Bedeutung zu, da im Rahmen dieser Forschungsvorhaben für unterschiedliche Bankett- und Böschungssituationen Sickerwassermengen messtechnisch ermittelt wurden.

Die in den Freilandlysimetern untersuchten Straßenböschungen greifen dabei teilweise die Bauweisen nach M T S E auf, indem entsprechend der Bauweise E eine Dränmatte auf gering durchlässigem bindigem Boden verlegt wurde, und stellen teilweise aber auch Bauweisen ohne technische Sicherungsmaßnahmen dar. Entsprechend den klimatischen Bedingungen an der Versuchsstation sind bei der Ermittlung des Wasserhaushaltes auch die an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse der Evaporation und Transpiration zu beachten.

Bei den Hallenlysimeteruntersuchungen dagegen wurden Böschungsausschnitte unter Hallen-, bzw. Laborbedingungen untersucht, wobei der Untersuchungsschwerpunkt auf der Analyse des Wasserhaushaltes bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten lag. Dementsprechend kommt der Evaporation und Transpiration bei diesen Untersuchungen eine nachrangige Bedeutung zu. Bis dato ungeklärt war die Fragestellung, inwiefern der messtechnisch ermittelte Wasserhaushalt der untersuchten Freiland- und Hallenlysimeter mit numerischen Modellen abgebildet werden kann.

2 Zielsetzung

2.1 Ziel der Untersuchungen

Im Rahmen von FE-Projekten der BAST wurden Untersuchungen zur Bauweise E des M T S E (FGSV, 2017) in Hallen- und Freilandlysimetern durchgeführt. Dabei wurden Sickerwassermengen im Dammkörper, sowie Zwischenabflüsse aus einem Dränelement und Oberflächenabflüsse messtechnisch erfasst. In den Freilandlysimetern in Augsburg wurden vier unterschiedlich gestaltete Oberflächen mit jeweils einem kiesigen und einem feinkörnigen Boden im Dammkörper realisiert (BRAND et al., 2016). In den Hallenlysimetern wurden die gleichen Kernmaterialien eingebaut (KELLERMANN-KINNER et al., 2016). Zusätzlich wurden in den Hallenlysimetern Dammkörper aus Hausmüllverbrennungssasche, Recyclingmaterial, Gießereirestsand und Steinkohlenkesselasche eingebaut (KELLERMANN-KINNER et al., 2017). Dabei wurden die Dammaufbauten mit einem Rollrasen als Erosionsschutz versehen. In einigen Versuchsaufbauten wurden zwischen Dammkern und Rollrasen verschiedene Dränmattenprodukte angeordnet und deren Auswirkung auf die Durchsickerung des Kerns messtechnisch erfasst.

In diesem Forschungsvorhaben wurden die Freiland- und Hallenlysimeteruntersuchungen mithilfe numerischer Modellierung mit einem Finite-Elemente-Programm nachgerechnet. Die Berechnungsergebnisse wurden mit den Messergebnissen der experimentellen Untersuchungen verglichen und bewertet. Der Vergleich der Ergebnisse soll Hinweise liefern, inwieweit der Wasserhaushalt von Straßendämmen mit numerischen Modellen wiedergegeben werden kann. Die Untersuchungen stellen die Grundlage für die Weiterentwicklung und Optimierung der Bauweisen von Straßendämmen/Schutzwällen mit und ohne technische Sicherungsmaßnahmen dar. Die Berechnungen tragen damit wesentlich dazu bei, beurteilen zu können, unter welchen Randbedingungen technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden bzw. Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen erforderlich werden und unter welchen Umständen auf zusätzliche Abdichtungselemente verzichtet werden kann.

2.2 Vorgehensweise

Zunächst wird der Stand der Forschung zum Wasserhaushalt von Straßendämmen und Schutzwällen in einer Literaturstudie zusammengestellt. Dabei werden sowohl experimentelle Untersuchungen, als auch numerische Simulationen betrachtet.

Die Simulationsberechnungen wurden mit den Programmen Vadose/W und der Nachfolgeversion Seep/W der Firma Geo-Slope International Ltd. durchgeführt. Dafür wurde zunächst ein Konzept unter Berücksichtigung der Geometrien, Randbedingungen und Ergebnisse der Hallenlysimeter (AP F1100.3207034) und der Freilandlysimeter (FE 89.0270) erarbeitet. Für die Kernmaterialien kiesiger und bindiger Böden wurden die in den Untersuchungen von SCHARNAGL und DURNER (2014; FE 05.0162) ermittelten Saugspannungs-Wassergehaltsbeziehungen und die hydraulischen Leitfähigkeiten zugrunde gelegt. Hydraulische Parameter für Recycling-Material (RC) und Hausmüllverbrennungssasche (HMVA) wurden Untersuchungen an ähnlichen Materialien, ebenfalls von SCHARNAGL und DURNER (2014; FE 05.0162) entnommen. Für Gießereirestsand (GRS) und Steinkohlenkesselsasche (SKA) wurden die Parameter mithilfe von Boden-Datenbanken (UNSODA und Soilvision) abgeschätzt und zusätzlich im Labor untersucht. Zur Modellierung der Freilandlysimeter wurden die hydraulischen Parameter von Bankettmaterial und Oberboden ausgehend von ihren bodenmechanischen Kenngrößen von vergleichbaren Böden ebenfalls aus Datenbanken übernommen. Hydraulische Eigenschaften des bei den Hallenlysimeterversuchen verwendeten Rollrasens wurden ebenfalls abgeschätzt und die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit an einem Modell durch inverse Modellierung angepasst.

Von zentraler Bedeutung ist auch die Festlegung der Klima-Randbedingungen für die Simulation. Diese berücksichtigen die Vorgänge an der Oberfläche des Modells, wie Niederschlag, Temperatur, Netto-Strahlung Wind etc. Daraus ermittelt das Programm, unter Berücksichtigung der Evaporation an der Oberfläche und der Transpiration durch Pflanzenbewuchs, die Infiltration in den Bodenkörper, den Oberflächenabfluss und ggf. Zwischenabflüsse aus Dränelementen.

Die auf diese Weise ermittelten Wasserhaushaltsbilanzen der Lysimeter werden mit den tatsächlich gemessenen Abflusswerten verglichen.

Vor Beginn der eigentlichen Berechnungen wurden Voruntersuchungen zu speziellen Fragestellungen wie der realitätsnahen Abbildung des Dränelements und der Abbildung des Oberflächen- und Straßenabflusses, von dem die tatsächliche Infiltration in den Straßendamm maßgeblich abhängt, untersucht. Dies schließt unter anderem eine Betrachtung ein, unter welchen Voraussetzungen die Dränmatte im System als Kapillarsperre wirkt. Auch zur Verteilung des Straßenabflusses auf den Dammaufbau wurden mehrere Möglichkeiten untersucht. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurden erforderliche Eingangsgrößen variiert.

3 Stand der Forschung

3.1 Lysimeteruntersuchungen zum Wasserhaushalt in Straßendämmen

In der Vergangenheit wurden verschiedentlich Lysimeteruntersuchungen an Straßen und Autobahnen durchgeführt. Der Fokus lag dabei häufig auf Schadstoffeinträgen in den Untergrund, bzw. dem chemischen Retentionsvermögen von Dammbaumaterialien. Darüber hinaus wurden im Rahmen dieser Untersuchungen auch Sickerwassermengen und Bodenfeuchten erfasst und ausgewertet.

BOLLER et al. (2005) führten Untersuchungen zur Durchsickerung des Banketts an einer Landstraße in der Westschweiz durch. Der Lysimeteraufbau bestand in diesem Fall aus annähernd waagrecht in den bestehenden Dammkörper eingebrachten Spundbohlen. Durch ein leichtes Gefälle der Spundbohlen zur Außenseite des Straßendamms konnte am Ende der Spundbohlen Sickerwasser in einem Schacht gesammelt werden. In größerer Entfernung zum Straßendamm wurden ebenfalls Spundbohlen parallel zur Fahrbahn eingebracht um Sickerwasser in verschiedenen Entfernungen zum Damm erfassen zu können.

Im Vordergrund stand bei diesem Projekt die Erfassung umweltrelevanter Inhaltsstoffe im Sickerwasser. Sickerwassermengen wurden daher nur zeitweise händisch erfasst. Als Referenz wurde der Straßenabfluss mithilfe einer Ablaufrinne im Bankett erfasst. Die Bestimmung des Einzugsgebiets der Ablaufrinne erfolgte mit einem Höhenprofil der Straße, das mittels Laserscanning generiert wurde. Zusätzlich wurde auf der Fahrbahnoberfläche ein

Tracerversuch durchgeführt. Als weitere Methode zur Ermittlung des Einzugsgebiets wurde versucht, eine Niederschlags-Abflussbeziehung zugrunde zu legen, was sich jedoch aufgrund von Spritzwasser- und Muldenverlusten schwierig gestaltete. Die Autoren empfehlen für zukünftige Versuche dieser Art eine automatisierte Mengenerfassung des Straßen- bzw. Bankettabflusses.

Neben der Untersuchung des Retentionspotenzials verschiedener Böden im Straßendamm gegenüber umweltrelevanten Inhaltsstoffen, fanden PIGUET et al. (2008) heraus, dass die Infiltrationsraten von Straßenabflüssen und das Speichervermögen der Schichten des Dammaufbaus wesentlich von deren Verdichtungsrichtung abhängen. In dem Projekt wurden mit einer rechtwinklig zur Böschung orientierten Verdichtung der Oberflächenschichten gute Ergebnisse erzielt. Bei flacheren Winkeln der Verdichtungsrichtung erhöhte sich das Speichervermögen dieser Schichten. Zwei der drei Lysimeter sind zum Untergrund hin mit einer Kunststoffdichtungsbahn abgedichtet und im tiefsten Punkt mit einer Drainageleitung versehen. Das dritte Lysimeter erlaubt die Infiltration von Straßenabfluss in das Grundwasser. Die Sickerwege lassen sich durch die Aufzeichnung der Änderung der Bodenwassergerichte mithilfe mehrerer Time Domain Reflectometry-(TDR-)Sonden nachvollziehen. Eine bilanzielle Erfassung der Sickerwassermengen im Vergleich zu Niederschlag und Straßenabfluss wurde jedoch nicht durchgeführt.

Im Rahmen der Untersuchungen zu Schadstoffeinträgen in Bankette, führten WERKENTHIN et al. (2017) Messungen zum Wasserhaushalt der Bankette durch. Automatisch erfasst wurden Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Sickerwasser.

Untersucht wurden drei Bankettmaterialien: eine Kieskörnung 0/32 aus Tragschichtmaterial, ein Oberboden und ein Gemisch aus beidem. Bei dem Gemisch und dem Oberboden machte der Oberflächenabfluss etwa 50 % vom gesamten Straßenabfluss aus (bei einer Bankettbreite von 1,5 m und einer Neigung von 1:30). Bei der Gesteinskörnung 0/32 werden ca. 20 % Oberflächenabfluss gemessen.

3.2 Modellierung des Wasserhaushalts in Straßendämmen

Simulationsberechnungen zur Modellierung des Wasserhaushalts von Straßendämmen wurden insbesondere im Zusammenhang mit der Verwendung von Böden mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen und einem möglicherweise dadurch bedingten Schadstoffaustrag durchgeführt.

BARBOUR et al. (1992) haben die Auswirkung von Infiltrationsvorgängen bzw. Verdunstungsprozessen auf die Wasserströmung in einem Straßendamm untersucht. Dazu wurden stationäre und instationäre 2D-Berechnungen mit dem Programm SEEP/W für unterschiedliche, zeitlich konstante Infiltrations- bzw. Ausflussraten durchgeführt. Der modellierte Straßendamm bestand aus einer 8 cm dicken Asphalttschicht, einer 30 cm mächtigen, sandigen Tragschicht und einem Kern aus schluffigem Ton. Stationäre Berechnungen wurden für drei Infiltrationsraten ($k_{s, Tragschicht}/10$, $k_{s, Tragschicht}$, $10 \cdot k_{s, Tragschicht}$) und für konstante Verdunstungsraten durchgeführt. Die Berechnungen ergaben, dass die Infiltration eine horizontale Strömung unter der Asphalttschicht Richtung Fahrbahnachse verursacht, die mit zunehmenden Infiltrationsraten intensiver wird. Daneben wurde festgestellt, dass die Verdunstungsraten hauptsächlich auf den Bankett- und Böschungsbereich einen Einfluss haben und der Wassergehalt unterhalb der Achse weitgehend unbeeinflusst bleibt. Die instationäre Berechnung hat gezeigt, dass der Boden unterhalb der Asphalttschicht ein Wassergehaltgleichgewicht erreicht, das von den Klimabedingungen und dem Bankettmaterial abhängig ist. Das wurde auch durch Feldmessungen von NGUEN et al. (2010) nachgewiesen.

HANSSON et al. (2005a, 2005b) untersuchten die Wasserströmung in einem Straßendamm gemäß den schwedischen Richtlinien mit dem Programm HYDRUS2D. Um den Oberflächenabfluss realitätsnah abbilden zu können, wurde das Programm mit einem Algorithmus so modifiziert, dass das Wasser entlang der Straßen- bzw. Böschungsoberfläche abgefließen ist, wenn es in einer Stelle nicht infiltrieren konnte. Die verwendeten Parameter zur Beschreibung der hydraulischen Eigenschaften gemäß der Modelle nach VAN GENUCHTEN (1980) bzw. van Genuchten-Mualem (MUALEM, 1976) wurden für die unterschiedlichen Schichten mithilfe der Pedotransferfunktionen von ARYA und PARIS (1981) unter Berücksichtigung der Korngrößenverteilungen abgeleitet. Instationäre Berechnungen

wurden für unterschiedliche Niederschlagsintensitäten, Niederschlagsdauern und Zustände der gebundenen Deckschichten (Risse) durchgeführt. Bei niedrigen bis mittleren Niederschlagsintensitäten wurde ein geringer Oberflächenabfluss berechnet, wobei das Niederschlagswasser hauptsächlich in den Rissen und im Bankettbereich infiltriert und signifikante Kapillarsperreneffekte in den grobkörnigen Schichten beobachtet wurden. Bei hohen Niederschlagsraten nimmt der Oberflächenabfluss zu und es treten keine Kapillarsperreneffekte auf. Da bei hohen Infiltrationsraten die Wasseraufnahmekapazität der Risse und des Banketts übertroffen werden, nimmt der Bereich, wo eine Infiltration in den Straßendamm auftritt, zu, d. h. es findet eine zunehmende Infiltration auch im Böschungsbereich statt.

Die Auswirkung von Fahrbahnrisen und des Randes zwischen befestigter und unbefestigter Fahrbahn auf den Wasserhaushalt von Straßenbauwerken wurde auch von APUL et al. (2007) untersucht. In deren Arbeit wurden die Durchsickerung und der Schadstofftransport in einem Straßendamm mit befestigter Fahrbahn und Bankett, einer Tragschicht aus Ersatzbaustoffen und einem homogenen Böschungs- und Kernbereich modelliert. Hinsichtlich der hydraulischen Eigenschaften der Schichten wurden für die Böschung und den Kern van Genuchten-Parameter für sandige Böden aus der Datenbank des verwendeten Programms HYDRUS2D verwendet. Für die Tragschicht wurden die von BIGL und BERG (1996) ermittelten Retentionskurven für Kiestragschichten herangezogen. Es wurden instationäre Berechnungen mit dem Programm HYDRUS2D durchgeführt, wobei als Randbedingung an der Oberfläche ein zeitlich variabler Zufluss (Flux“-Randbedingung) angesetzt wurde. Der gemessene Niederschlag in Maplewood, Minnesota (USA) in 1998 (720 mm/a) wurde dazu in Form von 15min-Werten angesetzt und zur Abbildung von 20 Jahren 20 Mal wiederholt. Es wurden in verschiedenen Berechnungen unterschiedliche Fahrbahnqualitäten untersucht. Die Asphaltdeckschicht wurde als unversehrt (undurchlässig), mit zwei Rissen bzw. als komplett beschädigt (durchlässig) angenommen. Da das Programm den Oberflächenabfluss nicht realitätsnah abbilden kann, wurden die Niederschlagswerte im Fall der Risse um 10 % erhöht, um den infolge des Oberflächenabflusses von der Fahrbahn erhöhten Zufluss zu berücksichtigen. War die Infiltrationskapazität der Risse übertroffen, wurde das überschüssige Wasser vom Modell entfernt. Obwohl der Fokus auf dem Schadstofftransport liegt, haben

die Berechnungen gezeigt, dass sowohl der asphaltierte Rand als auch die Fahrbahnrisse eine große Auswirkung auf die Sickerwassermengen haben. Ähnlich wie bei BARBOUR et al. (1992) trat am Rand des Banketts wegen der Saugspannungsverteilung und der hydraulischen Eigenschaften der Materialien (die hydraulische Leitfähigkeit der Tragschicht ist bei den herrschenden Saugspannungen höher als die vom Kern) eine horizontale Wasserströmung in Richtung der Fahrbahnachse auf. Fahrbahnrisse im Bereich des niedrigen Fahrbahnrandes weisen wegen des größeren Oberflächenabflusses einen höheren Einfluss auf das Sickerwasser auf als Fahrbahnrisse am höheren Fahrbahnrand. Das durch die Risse infiltrierte Wasser bewegt sich zu Beginn des Niederschlages in der Tragschicht sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung (Richtung Fahrbahnachse und Böschung). Mit andauerndem Niederschlag hat der oben beschriebene Randeffect einen zunehmenden Einfluss auf die Infiltration in die Risse, wodurch das meiste Wasser in Richtung Fahrbahnachse geleitet wird.

Der Schadstofftransport und die Wasserströmung in Straßenbauwerken (Straßendamm bzw. Lärmschutzwand) aus Ersatzbaustoffen wurden auch mittels numerischer Modellierung von BEYER et al. (2007, 2008) beurteilt. Der ungesättigte Sickerfluss wurde dabei mit GeoSys unter Anwendung der Richards-Gleichung berechnet. Für die unterschiedlichen Schichten wurden van Genuchten Parameter verwendet. Für die gesättigte Durchlässigkeit wurde der im Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigung von Verkehrsflächen (FGSV, 1998) für Tragschichten geforderte Wert von $5,4 \cdot 10^{-5}$ m/s verwendet. Stationäre Berechnungen wurden unter Berücksichtigung der Evapotranspiration für einen mittleren jährlichen Niederschlag für Deutschland durchgeführt. Der Oberflächenabfluss von der Asphaltdeckschicht des Straßendamms wurde gleichmäßig auf Bankett und Böschung verteilt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass in beiden Bauwerken im Böschungsbereich ein bevorzugter lateraler Wasserabfluss infolge von unterschiedlichen hydraulischen Leitfähigkeiten und Kapillarspannungen der einzelnen Schichten (sogenannter Kapillarsperreneffekt) auftritt, der die Infiltration des Sickerwassers in den Kern reduziert. Eine tendenziell höhere Infiltration wurde am Böschungsfuß berechnet. Für den Straßendamm wurde daneben auch im Bankettbereich wegen der geringeren Neigung im Vergleich zum Böschungsbereich eine vergleichsweise große Infiltration in den Kern beobachtet.

Eine signifikante Reduktion der Sickerwassermengen durch Dämme mit durchlässigen, grobkörnigen Materialien, bei Verwendung einer Dränschicht, wurde von KOKOLIDOU und BIRLE (2019) festgestellt. Diese untersuchten einen Dammquerschnitt mit unterschiedlichen Bodenmaterialien und Reststoffen mit dem Programm Vadose/W. Dabei wurden auch die Bankettmaterialien gezielt variiert. Es zeigte sich ein deutlicher Einfluss der Durchlässigkeit des Bankettmaterials auf die Sickerwassermenge.

NORAMBUENA-CONTRERAS et al. (2012) haben den Einfluss unterschiedlicher Bodeneigenschaften auf die Sickerwasserströmung eines homogenen Straßendamms untersucht. Dazu wurden instationäre Berechnungen mit HYDRUS2D für drei unterschiedliche Materialien durchgeführt. Die verwendeten Parameter wurden der Literatur entnommen. Als Randbedingung auf Bankett und Böschung wurden Klimadaten von Januar 1986 in Santander, Spanien, angesetzt. Als Anfangsbedingung wurde eine hydrostatische Wasserdruckverteilung berücksichtigt. Der Straßenabfluss von der Asphaltsschicht wurde nicht modelliert, die Evaporation und der Oberflächenabfluss wurden gemäß den Programmmöglichkeiten berücksichtigt. Obwohl die Durchsickerung nur für eine kurze Zeit simuliert wurde und die Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen aufgrund des kurzen Betrachtungszeitraumes nicht überwunden wurde, sind der Einfluss der Bodeneigenschaften und die wesentliche Rolle des Banketts auf die Sickerwasserströmung erkennbar.

YAO et al. (2016) haben die Temperatur und den Wassergehalt im Kern eines Autobahndamms vor und nach seiner Erweiterung mittels FDR Sensoren (Frequency Domain Reflectometry Sensors) aufgezeichnet. Unter Berücksichtigung von Klimadaten einer auf dem Damm errichteten Wetterstation wurden Simulationsberechnungen durchgeführt, um die Feldmessungen mit den Modellprognosen zu vergleichen. Für die hydraulischen Eigenschaften der Böden wurden Parameter für das Modell nach FREDLUND und XING (1994) aus Laborversuchen verwendet. Obwohl das Modell die Anfangsrandbedingungen und die Inhomogenität der Böden im Feld nicht genau abbilden kann, sind die Ergebnisse plausibel. Sowohl die Messungen als auch die Berechnungen haben gezeigt, dass Wassergehaltsänderungen hauptsächlich in der Nähe der Dammoberfläche stattfinden. Tiefer im Kern sind nur kleine Schwankungen im Wassergehalt zu erwarten.

Daten zum Wasserhaushalt des Damms wurden nicht dargestellt.

Ähnliche Ergebnisse wurden von CUI et al. (2010) veröffentlicht. In Rahmen ihrer Arbeit wurden Veränderungen des Wassergehaltes, der Temperatur und der Saugspannungen über neun Monate in einem Versuchsdamm aus zwei verschiedenen schluffigen Böden beobachtet. Die Klimadaten, einschließlich Niederschlag, Sonnenstrahlung, Windgeschwindigkeit, relative Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur und Atmosphärendruck, wurden ebenfalls gemessen. Die Feldmessungen in Dammachse wurden unter Verwendung einer 1D Finite-Differenzen-Methode nachgerechnet. Die hydraulischen Bodenparameter wurden aus Laborversuchen und Feldmessungen ermittelt und die Verdunstung wurde anhand von Energiebetrachtungen abgeschätzt. Feldmessungen und Simulationen ergaben, dass die Auswirkung des Niederschlags und der Evaporation auf den Wassergehalt nur bis in geringe Tiefe von ca. 10 cm reicht. Die Saugspannungen verändern sich im Gegensatz dazu bis in größere Tiefe.

Im Hinblick auf die geohydraulische Bewertung technischer Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von belasteten Böden im Erdbau haben SCHWELER et al. (2009) Simulationsberechnungen durchgeführt. Dabei wurden die FE-Programme FEFLOW und Vadose/W verwendet um unterschiedliche technische Sicherungsmaßnahmen nach M T S E (FGSV, 2017) nachzurechnen. Dies geschah unter dem Ansatz von zeitabhängig konstanten Infiltrationsraten. Eine Berücksichtigung der Evapotranspiration fand dabei zur Reduzierung der Komplexität nicht statt. Ein Vergleich der Sickerwassermengen unter den verschiedenen Bauweisen lieferte plausible Ergebnisse. Insgesamt wurden die Infiltrationsmengen aufgrund der fehlenden Betrachtung der Evapotranspiration jedoch deutlich überschätzt. Dennoch konnte die generelle Wirkungsweise der Bauweisen A, B und D belegt werden.

In einem Folgeprojekt untersuchten MICHAELIDES et al. (2013) die Bauweisen unter Verwendung von Durchschnitts- und Tageswerten des Niederschlags mit Berücksichtigung der Verdunstungsprozesse an der Oberfläche. Der Oberflächenabfluss wurde dabei zu Null angenommen. Beim Ansatz von Klima-Tageswerten sind die berechneten Sickerwassermengen signifikant niedriger als bei konstanter Infiltration. Im Vergleich zu tatsächlich gemessenen Werten sind die berechneten Sickerwassermengen jedoch höher. Die Untersuchungen zeigen, dass die

realitätsnahe Wiedergabe der zeitlichen und quantitativen Verteilung von Niederschlag, Evapotranspiration und Oberflächenabfluss bei derartigen numerischen Berechnungen eine zentrale Rolle einnehmen.

Zahlreiche numerische Untersuchungen wurden auch zum Wasserhaushalt von mineralischen Oberflächenabdichtungen von Deponien durchgeführt. KHIRE et al. (1997) modellierten eine Oberflächenabdichtung mit den Programmen HELP und UNSATH-H. Die untersuchten Oberflächenabdichtungssysteme bestanden dabei aus einer 0,6 m und einer 0,9 m mächtigen Tondichtung mit 15 cm Rekultivierungsschicht. Dieser Aufbau kommt der Bauweise E nach M T S E (FGSV, 2017), bzw. den Augsburger Lysimetern mit bindigem Kern sehr nahe. Die Schichten wurden jedoch in horizontaler Lage modelliert. Obwohl zur Bestimmung der Bodenkennwerte für diese Studie umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt wurden, fiel die Sickerwasserprognose mit beiden Modellen höher aus als der tatsächlich gemessene Sickerwasseranfall.

Im Vergleich der FE-Programme UNSATH-H und Vadose/W, stellten BENSON et al. (2004) fest, dass Vadose/W akkuratere Ergebnisse in Bezug auf Oberflächenabfluss, Evapotranspiration und Wasserspeicherung liefert. Die Berechnungsergebnisse konnten mit Messdaten aus dem Feld verglichen werden. In UNSATH-H wurde vor allem ein zu großer Oberflächenabfluss ermittelt. Die Perkolation von Bodenschichten wird jedoch in Vadose/W tendenziell unterschätzt. Bei außergewöhnlichen Niederschlagsereignissen gaben beide Programme zu geringe Ausschläge in der Wasserspeicherung einzelner Schichten wieder.

Aus den genannten Veröffentlichungen lässt sich damit bezüglich des Wasserhaushaltes von Straßendämmen zusammenfassend Folgendes festhalten:

- Die Ergebnisse von Messungen und Simulationsberechnungen zeigen, dass der Niederschlag und die Evaporation nur auf oberflächennahe Bereiche von Straßendämmen einen maßgeblichen Einfluss haben.
- Die Simulationsberechnungen zeigen, dass sich die Infiltration von Oberflächenwasser bei geringen Niederschlagsintensitäten im Wesentlichen auf den Bankettbereich und den Fußbereich von Straßenböschungen beschränkt, während im Böschungsbereich aufgrund von Kapillareffek-

ten nur sehr geringe Infiltrationen auftreten. Mit zunehmenden Niederschlagsintensitäten kommt es zu einer verstärkten Versickerung auch im Oberboden und es ergibt sich eine größere „Einwirktiefe“ hinsichtlich der Bereiche in denen Wassergehaltsschwankungen auftreten.

- Der Anteil des im Bereich des Banketts und der Böschung versickernden Straßenabflusses hängt maßgeblich von den Eigenschaften des Banketts ab. Es lassen sich deshalb keine pauschalen Werte für den Anteil des im Bereich des Bankettes und der Böschung versickernden Straßenabflusses ableiten.

Verschiedene Studien zeigen, dass die Sickerwassermengen durch Erdbauwerke auch bei Kenntnis der hydraulischen Eigenschaften der Böden rechnerisch tendenziell überschätzt werden.

4 Grundlagen von Vadose/W und Seep/W

Für die Simulationen werden die Finite-Elemente-Programme Vadose/W und die Nachfolgeversion Seep/W der Firma Geo-Slope International Ltd. verwendet. Die Programme können die Bewegung von Wasser in der flüssigen und gasförmigen Phase sowie von Wärme in der gesättigten und der ungesättigten Bodenzone unter stationären und instationären Bedingungen abbilden.

Zur Beschreibung des differenziellen Stofftransports in der Zweidimensionalen Simulation nutzen die Programme die Richards-Gleichung (RICHARDS, 1931):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x(\theta) \cdot \frac{\partial H_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z(\theta) \cdot \left(\frac{\partial H_m}{\partial z} + 1 \right) \right) = C(H_m) \frac{\partial(H_m)}{\partial t} \quad (4.1.)$$

Dabei sind x und z die Koordinaten der Strömungsrichtung, k_x und k_z , die hydraulischen Leitfähigkeiten in Abhängigkeit des volumetrischen Bodenwassergehalts θ und H_m das Matrixpotenzial. Die Kapillarkapazität $C(H_m)$ ist folgendermaßen definiert:

$$C(H_m) = \frac{\partial \theta}{\partial H_m} \quad (4.2.)$$

Die Richards-Gleichung ist eine nichtlineare partielle Differentialgleichung und ist daher in der Regel nur mit numerischen Methoden lösbar. Sie gilt für laminare Strömungsverhältnisse unter Annahme einer konstanten Trockendichte des Bodens.

In der dampfförmigen Phase ist die Wasserbewegung stark temperaturabhängig. Daher werden der differenzielle Wärmetransport und die Wärmespeicherung mitberücksichtigt. Der Zusammenhang zwischen Wasserdruck, Dampfdruck und Temperatur wird mit der von EDLEFSEN und ANDERSON (1943) angepassten Kelvin-Gleichung beschrieben. Die unterhalb des Gefrierpunktes veränderten Leitfähigkeiten werden bei entsprechender Bodentemperatur ebenfalls berücksichtigt (GEO-SLOPE, 2017).

Für die Darstellung der an der Oberfläche stattfindenden Prozesse wird eine sogenannte Klima-Randbedingung bzw. Land-Climate-Interaction verwendet. Daraus werden in Abhängigkeit von den definierten Klimabedingungen und den zustandsabhängigen Eigenschaften des Bodens, wie Wassergehalt und Saugspannung, die an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse (Evaporation, Transpiration, Infiltration und Oberflächenabfluss) bestimmt. Die Abbildung der tatsächlichen Evapotranspiration als Summe aus Evaporation und Transpiration erfolgt mit dem nach WILSON (1990) bzw. nach MONTEITH (1981) angepassten Modell nach PENMAN (1948).

Wasser, das von der Oberfläche nicht aufgenommen werden kann, wird rechnerisch aus dem Modell entfernt und als Oberflächenabfluss bilanziert.

Eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Eingangsparameter ist in den Kapiteln 5.3.1 und 8.5 enthalten.

5 Modellierung der Hallenlysimeter

Für die Modellierung der Hallenlysimeter wurde das Programm Seep/W verwendet. Die Berechnungen bilden einen Simulationszeitraum von 105 Tagen in 2-Stunden-Zeitschritten, also 1.260 Einzelschritten ab.

5.1 Modellgeometrie

Die Hallenlysimeter haben eine Grundfläche von 0,76 m × 1,44 m. Dazu kommt ein Überlauf am Dammfuß. Die Länge des Lysimeters selbst (ohne Überlauf) wird in der Simulation mit 1,45 m nachge-

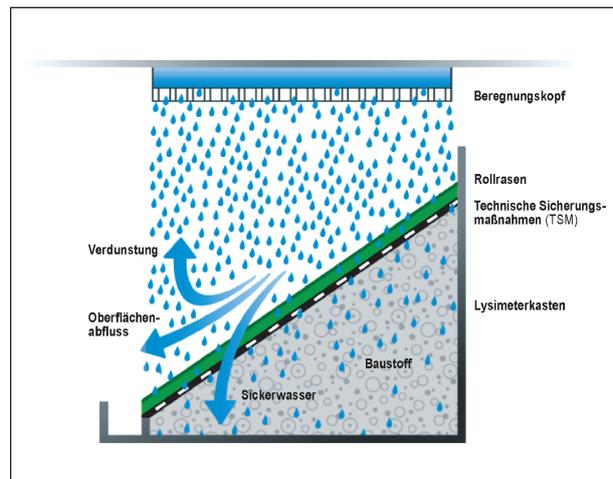


Bild 5-1: Schematische Darstellung der Hallenlysimeter und der hydraulischen Prozesse (KELLERMANN-KINNER et al., 2016)

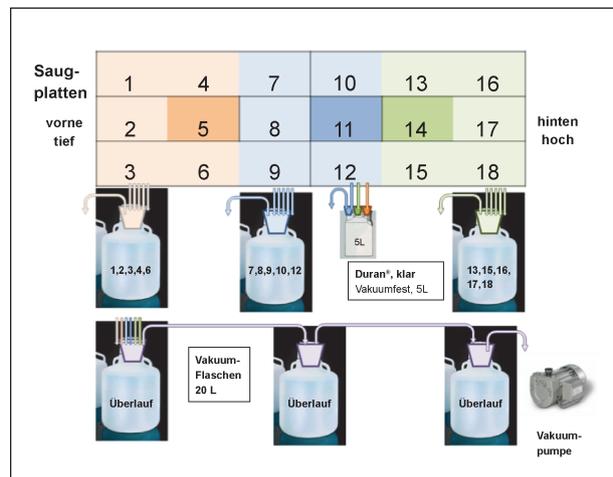


Bild 5-2: Schematische Darstellung der Saugplatten in den Hallenlysimetern – Draufsicht (KELLERMANN-KINNER et al., 2016)

bildet. Bild 5-1 zeigt den schematischen Aufbau eines Hallenlysimeters und die hydraulischen Prozesse.

Für die Modellierung wird in der Darstellungsebene anstelle der in zweidimensionalen Berechnungen üblichen Tiefe von 1,0 m eine Tiefe von 0,76 m gewählt, um die rechnerisch ermittelten Abflussmengen mit den realen Messergebnissen der Lysimeter direkt, ohne zusätzliche Umrechnung vergleichen zu können.

Zur Sickerwassererfassung wurde bei den realen Experimenten der Abfluss aus dem Dammkern mittels 18 Saugplatten erfasst. Diese waren, wie in Bild 5-2 (Draufsicht auf das Lysimeter) dargestellt angeordnet.

				
	Bauweise ohne TSM	Bauweise mit Dränmatte 1	Bauweise mit Dränmatte 2	Bauweise mit Dränmatte 3
Vlies (Material, Verfestigung)		PP, mech.+therm.	PP, mechanisch	PP, mech.+therm.
Dränkern (Material, Art)		PP, Wirrgelege	PE-HD, Geonetz	PP, Wirrg. (V-Struktur)
Kiesiger Boden BM 1	berechnet	berechnet		
Bindiger Boden BM 2	berechnet	berechnet		
Hausmüllverbrennungssasche HMVA	berechnet	berechnet		
Recyclingmaterial RC	berechnet	berechnet		
Gießereirestsand GRS	berechnet	berechnet		
Steinkohlenkesselasche SKA	berechnet	berechnet		

Tab. 5-1: Zusammenstellung der relevanten Hallenlysimeteruntersuchungen (grüne Markierung) mit Kennzeichnung der durchgeführten Berechnungen (nach KELLERMANN-KINNER et al., 2016, 2017)

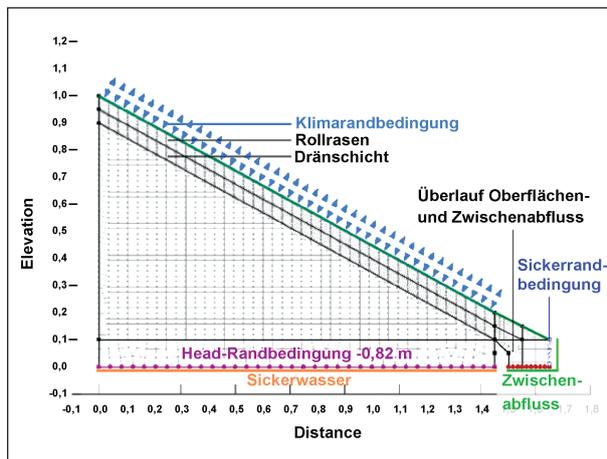


Bild 5-3: Modellgeometrie der Hallenlysimeter

In Tabelle 5-1 sind die Hallenlysimeteruntersuchungen (grüne Markierung) und die dazu durchgeführten Berechnungen in zusammengestellt. Alle Bauweisen wurden sowohl mit Rollrasenabdeckung als auch mit zwischenliegender Dränmatte (auch benannt als technische Sicherungsmaßnahme, TSM) simuliert. Zur Ermittlung des Einflusses der Dränmatte auf den Wasserhaushalt wurde auch die Bauweise GRS mit TSM rechnerisch untersucht, obgleich dazu keine experimentellen Vergleichswerte vorliegen.

In Bild 5-3 ist die generelle Modellgeometrie der Lysimeter für die Modellierung mit dem Finite-Elemente-Netz dargestellt. Dammkern und oberflächennahe Schichten sind als sogenannte Oberflächenschichten (surface layers) in Seep/W abgebil-

det. Der Bereich der Dränschicht wird bei der numerischen Untersuchung von Varianten ohne Dränelement (ohne TSM) als Kernmaterial abgebildet. In Vorversuchen wurde die Geometrie des Überlaufs variiert. Die endgültige Form, wie dargestellt, eignet sich am besten zur Abführung von lateralen Abflüssen aus dem Dränelement. Der Bereich zur Erfassung der Sickerwassermengen aus dem Kern ist orange gekennzeichnet, der Bereich zur Bilanzierung des Überlaufs in grün.

5.2 Bodenkennwerte

Die Kenntnis der hydraulischen Eigenschaften der Versuchsböden ist Voraussetzung für die numerische Modellierung. Für die Beschreibung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung entwickelte VAN GENUCHTEN (1980) den von BROOKS und COREY (1964) vorgeschlagenen Ansatz zu einem dreiparametrischen Modell weiter.

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (\alpha \cdot \psi)^n]^m} \right\} \quad (5.1)$$

Dabei sind n , m und α die an einen messtechnisch ermittelten Verlauf einer Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung anzupassenden Parameter. θ bezeichnet den volumetrischen Wassergehalt, θ_s den Wassergehalt bei voller Sättigung und θ_r den residualen Wassergehalt. Mit dem Parameter α kann die Kurve im Bereich des der Lufteintrittspunktes angepasst werden. Der Parameter n beeinflusst

maßgeblich die Steigung der Kurve im mittleren Bereich. Der Parameter m kann durch einen empirischen Zusammenhang wie folgt festgelegt werden:

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (5.2)$$

Auf Grundlage eines statistischen Ansatzes entwickelte MUALEM (1976) folgenden Zusammenhang zwischen der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und dem Sättigungsgrad eines Bodens:

$$k_r(\theta) = \frac{k(\theta)}{k_s} S_e^\tau \left[\frac{\int_0^\theta \frac{d\theta}{\psi}}{\int_0^{\theta_s} \frac{d\theta}{\psi}} \right]^2 \quad (5.3)$$

Dabei ist k_r der relative, k der absolute und k_s der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert. S_e ist der effektive Sättigungsgrad:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (5.4)$$

Durch eine Verknüpfung des Ansatzes von MUALEM (1976) mit der Funktion nach VAN GENUCHTEN lässt sich die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Saugspannung bei Verwendung eines Tortuositätsfaktors von $\tau = 0,5$ folgendermaßen darstellen:

$$k_r(\psi) = \frac{k(\psi)}{k_s} \cdot \frac{[1 - (\alpha|\psi|)^{n-1} \cdot [1 + (\alpha|\psi|)^n]^{-m}]^2}{[1 + (\alpha|\psi|)^n]^{\frac{m}{2}}} \quad (5.5)$$

Mit dem effektiven Sättigungsgrad S_e wird dies zu:

$$k(S_e) = k_s \cdot S_e^{0,5} \cdot \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (5.6)$$

In Seep/W bestehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Beschreibung der hydraulischen Eigenschaften. Neben den genannten Modellen nach VAN GENUCHTEN/MUALEM ist auch das parametrisierte Modell nach FREDLUND und XING (1994) zur Beschreibung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit verfügbar. Über die Eingabe von Korngrößenverteilungen kann mithilfe von Pedotransferfunktionen die Saugspannungs-Wassergehaltsbeziehung ermittelt werden. Außerdem ist es möglich, Versuchsdaten zu den hydraulischen Eigenschaften direkt einzulesen und zu verwenden. In diesem Fall kommen Interpolationsfunktionen zur Beschreibung der Kurvenverläufe zwischen den Messwerten zum Einsatz. Dieses Verfahren wurde für die Berechnungen verwendet.

5.2.1 Kernmaterialien

Die hydraulischen Eigenschaften (Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung und ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit) des kiesigen (BM 1) und des bindigen Bodens (BM 2) wurden von SCHARNAGL und DURNER (2014) im Labor ermittelt. Für die Modellierung werden diese Untersuchungsergebnisse in Seep/W übernommen. Bei dem kiesigen Boden (BM 1) handelt es sich um einen stark sandigen Kies (GW nach DIN 18196) mit einer gesättigten Durchlässigkeit von $k_s = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s. Der bindige Boden (BM 2) ist ein stark schluffiger, kiesiger Sand (ST* nach DIN 18196) mit einer gesättigten Durchlässigkeit von $k_s = 6,6 \cdot 10^{-8}$ m/s. Zur Modellierung der HMVA und des RC-Materials wurden die hydraulischen Parameter ebenfalls aus SCHARNAGL und DURNER (2014) von den Materialien HMVA 3, RC 2 und RC 5 übernommen. Diese weisen im Vergleich zu den in den Hallenlysimetern verwendeten Materialien, ähnliche Eigenschaften in Bezug auf Kornverteilung und Dichte auf.

Zur Vermeidung von Problemen bei der Berechnung wurde der Kurvenverlauf der hydraulischen Funktionen, wenn nötig, durch geringfügige Modifikation einzelner Datenpunkte geglättet. Um zur Berechnung ggf. benötigte Saugspannungsbereiche abzudecken, für die keine experimentellen Werte verfügbar waren, wurden einzelne Wertepaare abgeschätzt und ergänzt. Die hydraulischen Eigenschaften (der Entwässerung) der Bodenmaterialien sind in Bild 5-4 und Bild 5-5 und einzeln auf Datenblättern zu den Lysimetern in Anhang 1 dargestellt.

Die Daten für den GRS wurden unter Berücksichtigung der Kornverteilung und der Verdichtungseigenschaften der UNSODA-Datenbank (FREIKE et al., 1996) entnommen. Hier wurde auf die im Labor

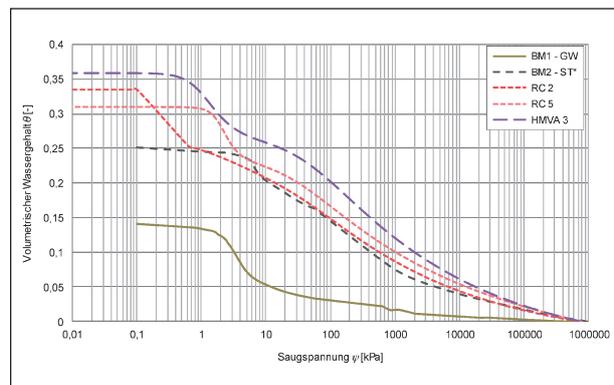


Bild 5-4: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung der Bodenmaterialien nach SCHARNAGL und DURNER (2014)

bestimmten hydraulischen Parameter des Sandbodens 3175 (Calciaquoll nach SCHUH et al., 1991) zurückgegriffen. Hydraulische Parameter der SKA stammen aus der Soilvision-Datenbank (FREDLUND, 2011). Da diese Datenbank nur Böden bis zu einem Größtkorn von 2 mm enthält, wurden die bei dem Versuchsmaterial enthaltenen 20,4 % Kiesanteil nicht berücksichtigt. Der ausgewählte Boden 10700 nach DANE und RHUSKA (1983) hat, wie die SKA einen Feinkornanteil von 15 %, jedoch mit $\rho_d = 1,6 \text{ g/cm}^3$ eine höhere Trockendichte als die SKA mit $\rho_d = 1,08 \text{ g/cm}^3$. Die geringe Dichte der SKA ist bedingt durch die beim Verbrennungsprozess entstehende intragranulare Porenstruktur.

Bild 5-6 zeigt einen Vergleich der Kornverteilungen der beiden Baustoffe und die der Böden aus den Datenbanken.

Zusätzlich zur Verwendung der Kennwerte aus den Datenbanken wurden die hydraulischen Eigenschaften des GRS und der SKA im Labor bestimmt (Zentrum Geotechnik, 2019). Im Folgenden werden diese als GRS-TUM und SKA-TUM bezeichnet. Bild 5-7 und Bild 5-8 sind sowohl die Datenbankwerte als auch die im Labor ermittelten Werte der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen und der hydraulischen Leitfähigkeiten zu entnehmen.

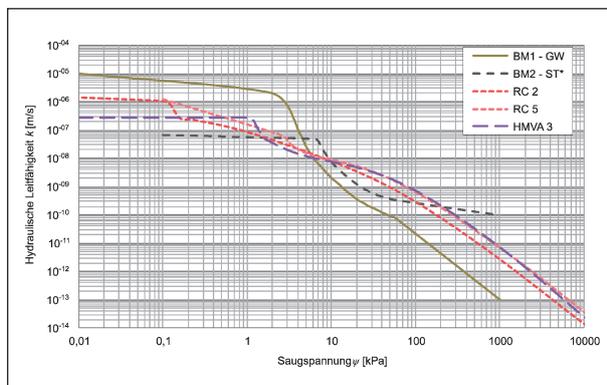


Bild 5-5: Hydraulische Leitfähigkeit der Bodenmaterialien nach SCHARNAGL und DURNER (2014)

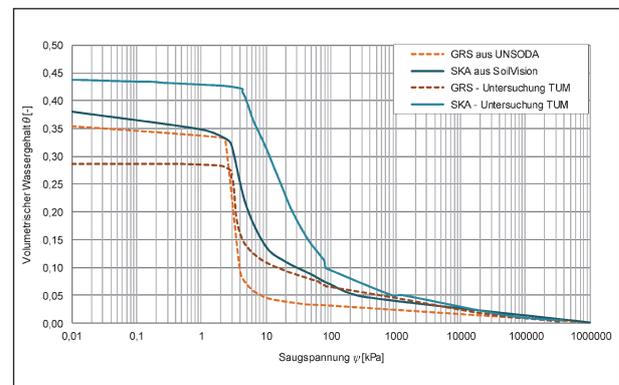


Bild 5-7: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung des GRS und der SKA, bzw. GRS-TUM und SKA-TUM

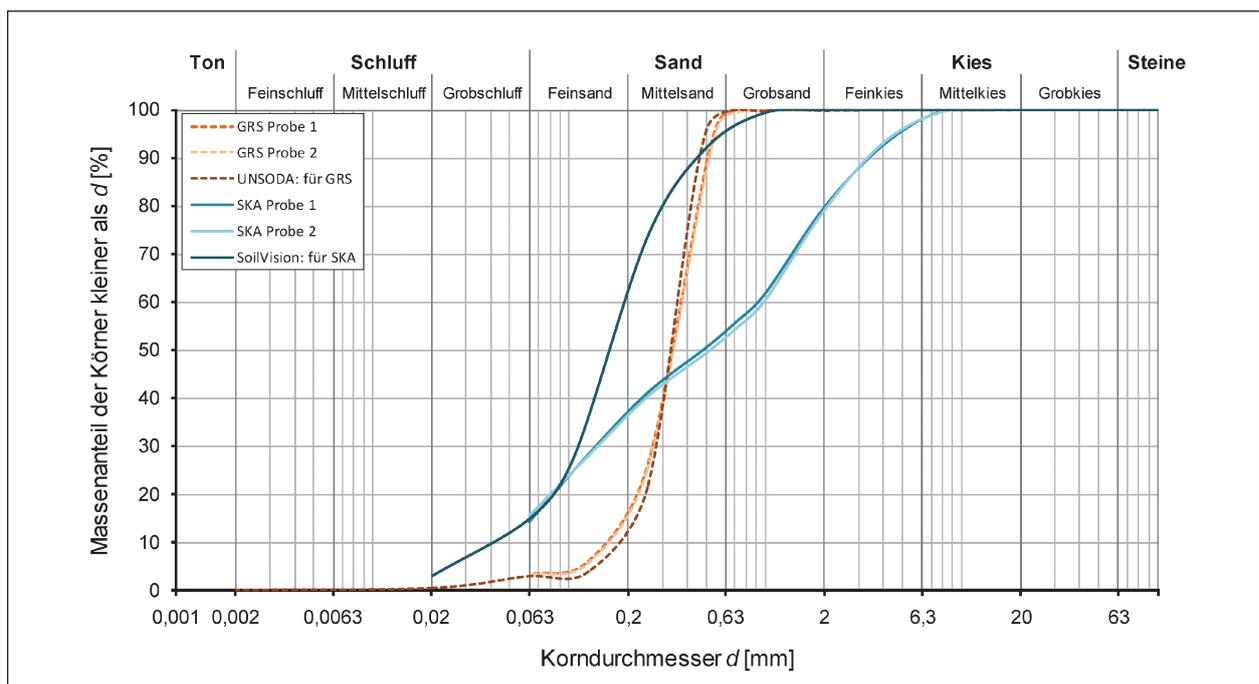


Bild 5-6: Korngrößenverteilung der Kernmaterialien GRS und SKA und der verwendeten Böden aus den Datenbanken UNSODA und Soilvision

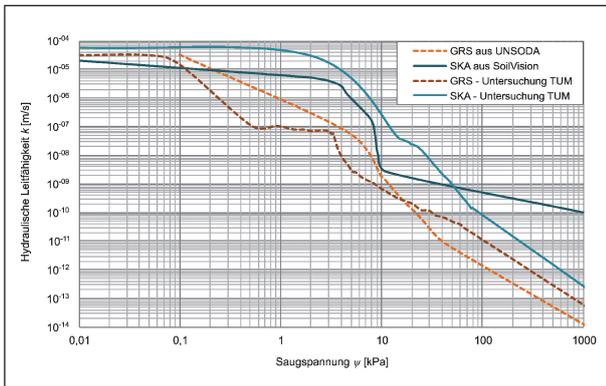


Bild 5-8: Hydraulische Leitfähigkeit des GRS und der SKA, bzw. GRS-TUM und SKA-TUM

DIN 18196	SU/SU*	GU, schluffiger Kies
Schicht	Rollrasen (Su2)	Dränschicht
k_f [m/s]	$5 \cdot 10^{-6}$ *	$5 \cdot 10^{-3}$
θ_s	0,38	0,23
θ_r	0,019	0,011
α [1/cm]	0,0678	1,0/0,1**/0,05**/0,01**
n	1,43	1,79
$m = 1 - (1/n)$	0,30	0,44
* Wert angepasst (siehe Kapitel 6.1)		
** Variation in Voruntersuchungen (siehe Kapitel 6.2)		

Tab. 5-2: van Genuchten-Parameter der Bodenschicht Su2 nach HENNINGS (2000) für den Rollrasen und GU nach EKBLAD und ISACSSON (2007) für das Dränelement (mit Modifikationen)

5.2.2 Rollrasen und Dränschicht

Zur Abbildung der hydraulischen Eigenschaften des Rollrasens und der Dränschicht wurden Kennwerte aus der Literatur unter Verwendung des Modells nach VAN GENUCHTEN (1980) und MUALEM (1976) angewendet.

Für den Rollrasen wurden die Parameter des Bodens Su2 nach HENNINGS (2000) entsprechend Tabelle 5-2 angesetzt. Die in den experimentellen Untersuchungen verwendete Dränmatte 1, eine Polyfelt Megadrain (TENCATE, 2010) wurde unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Voruntersuchungen (siehe Kapitel 6.2) als mineralische Schicht mit einem GU nach EKBLAD und ISACSSON (2007) modelliert, wobei der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert zu $k_s = 5 \cdot 10^{-3}$ m/s und der Parameter α zu 0,05 [1/cm] festgelegt wurden. Die Parameter nach VAN GENUCHTEN sind ebenfalls in Tabelle 5-2 aufgelistet.

DIN 18196	GW	SU*	SU/SU*	GU
Schicht	BM 1 – kiesiger Boden	BM 2 – bindiger Boden	Su2 – Rollrasen	Dränschicht
λ_{solids} [J/(s·m·°C)]	2,4	1,8	1,8	2,4
c_{p_solids} [kJ/(g·°C)]	$7,10 \cdot 10^{-4}$	$1,67 \cdot 10^{-3}$	$1,67 \cdot 10^{-3}$	$7,10 \cdot 10^{-4}$

Tab. 5-3: Thermische Parameter nach VDI-Richtlinie 4640 (VDI, 2010) und KRAHN (2004)

5.2.3 Thermische Bodenparameter

Die zur Beschreibung des Wärmetransportes erforderlichen thermischen Parameter, wie die Wärmeleitfähigkeit λ und die volumenbezogene spezifische Wärmekapazität c_p wurden für die verschiedenen Bodenschichten auf Basis von Tabellenwerten der VDI-Richtlinie 4640 (VDI, 2010) und nach KRAHN (2004) abgeschätzt und sind in Tabelle 5-3 aufgelistet.

Für die Recyclingbaustoffe und die industriellen Nebenprodukte wurden vereinfachend die thermischen Parameter des kiesigen Bodens (BM 1) angenommen, da aufgrund der als konstant angenommenen Temperaturen in der Versuchshalle keine Auswirkungen auf den Wasserhaushalt aufgrund von Temperaturgradienten zu erwarten sind.

5.3 Randbedingungen

5.3.1 Klima-Randbedingungen

Bei den Hallenversuchen wurden die Lysimeter über einen Zeitraum von 49 Tagen künstlich mit zuvor festgelegtem Niederschlagsregime beregnet. Dabei wurden Beregnungsdauer und -intensität variiert. Das Regenregime beinhaltete 15 Regentage (31 %) und 34 trockene Tage (69 %). Dieser Zyklus wurde zweimal wiederholt. Folglich werden in der Simulation 98 Tage abgebildet. Damit ggf. im Kern gespeichertes Sickerwasser nach Beendigung der Beregnung an die Saugplatten abgegeben werden kann, wird die Berechnungszeit analog zu den experimentellen Untersuchungen um sieben Tage auf insgesamt 105 Tage verlängert.

Die Klimarandbedingung umfasst Werte des Niederschlags, der Temperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit, der Windgeschwindigkeit und der Nettostrahlung. Zudem werden Pflanzenparameter berücksichtigt (GEO-SLOPE, 2017).

Der Niederschlag wird entsprechend der in den Hallenversuchen verregneten Wassermenge abgebildet. Dabei werden Intensität und zeitliche Dauer des Niederschlags berücksichtigt. Die Summen der am Lysimeter gemessenen Sickerwassermengen sind kleiner als die verregnete Wassermenge. Die sich dadurch ergebende Differenz ist auf Evaporation und Transpiration zurückzuführen. Daraus ergibt sich folgende Summenbilanz:

$$\sum N = \sum K_e + \sum Z_e + \sum ET_e \quad (5.7)$$

mit

- N Niederschlag
- K_e Sickerwasser Kern, experimentell ermittelt
- Z_e Zwischen- und Oberflächenabfluss, experimentell ermittelt

ET_e Evapotranspiration im Experiment

Evaporation und Transpiration werden, wie folgend erläutert, von der Software Seep/W berechnet. Die klimatischen Bedingungen in der Halle (u. a. Luftfeuchtigkeit, Wind, Strahlung) mussten abgeschätzt werden, da diese messtechnisch nicht erfasst wurden. Aus den Berechnungen ergaben sich damit geringere Werte der Evaporation und Transpiration als aus den gemessenen Abflüssen entsprechend Gleichung 5.7 ermittelt worden war. Für die Berechnungen wurde deshalb die als Randbedingung aufgebrachte Niederschlagsmenge folgendermaßen korrigiert:

$$\sum N_{korr} = \sum N - \left(\sum ET_e - \sum ET_{cal} \right) \quad (5.8)$$

mit

- N_{korr} Niederschlag korrigiert
- ET_{cal} Evapotranspiration durch numerische Berechnungen ermittelt

Für die einzelnen Niederschlagsereignisse ergibt sich damit ein Korrekturfaktor a von:

$$a = \frac{\sum N_{korr}}{\sum N} = \frac{\sum K_e + \sum Z_e + \sum ET_{cal}}{\sum N} = 0,955 \quad (5.9)$$

Der im Rahmen der Berechnungen aufgebrachte korrigierte Niederschlag im Vergleich zum tatsächlichen Niederschlag ist in Bild 5-9 dargestellt.

Zum Vergleich mit den Berechnungen mit tatsächlichen Regenintensitäten wurden die Berechnungen auch unter Ansatz von Tagesmittelwerten des Regenregimes durchgeführt. Bild 5-10 zeigt das Regenregime mit Tagesmittelwerten. Dabei wurde analog zum tatsächlichen Regenregime eine Korrektur der Niederschlagsmenge nach den Gleichungen 5.7 bis 5.9 vorgenommen.

Der Blattflächenindex (Leaf Area Index, LAI) beschreibt das Verhältnis zwischen (einseitiger) Blattfläche und Bodenfläche. Er beeinflusst vor allem die Interzeption, also den Anteil des Niederschlags, der verdunstet, bevor er den Boden erreicht. Außerdem ist die Transpiration der Pflanzen vom LAI abhängig. Für Grasbewuchs wird in der Literatur eine Bandbreite von 1 bis 3 angegeben (GEO-SLOPE, 2014; ALLEN et al. 1998). Da es sich beim Rollra-

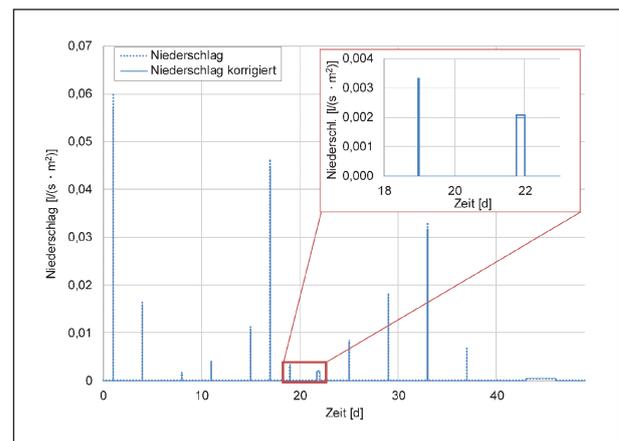


Bild 5-9: Regenregime der Hallenlysimeterversuche für 49 Tage nach KELLERMANN-KINNER et al. (2016). Das Szenario wird ab Tag 50 einmalig wiederholt. Die Vergrößerung verdeutlicht beispielhaft die unterschiedliche Dauer der einzelnen Regenereignisse.

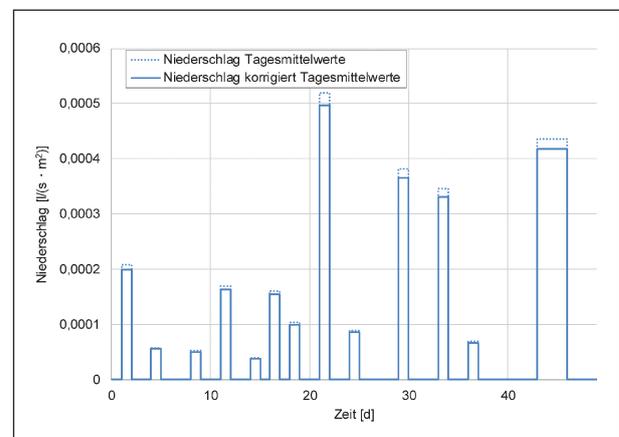


Bild 5-10: Regenregime der Hallenlysimeterversuche für 49 Tage mit Tagesmittelwerten nach KELLERMANN-KINNER et al. (2016). Das Szenario wird ab Tag 50 einmalig wiederholt.

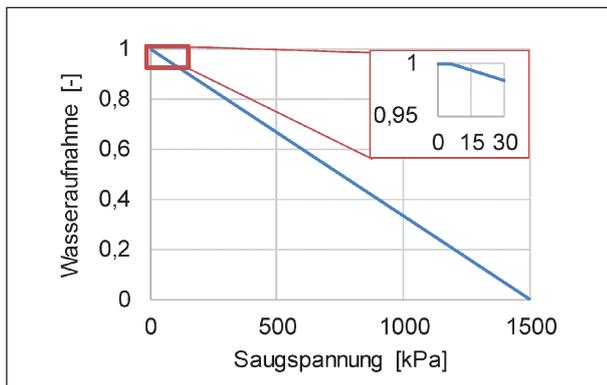


Bild 5-11: Wasseraufnahme (PML-Fn). Die Vergrößerung zeigt den konventionellen Wert der Feldkapazität bei $\psi = 6,3 \text{ kPa}$

sen um verhältnismäßig kurzes Gras handelt und das Wachstum des Rollrasens in den Hallenlysimetern aufgrund geringer Strahlung als schlecht beschrieben wurde, wird für die Simulation der untere Wert von 1 angenommen.

Die Plant Moisture Limiting Function (PML-Fn) beschreibt das Verhältnis der tatsächlichen zur potenziellen Wasseraufnahme einer Pflanze. Sie berücksichtigt, dass die Wasseraufnahme der Pflanzen vom Sättigungsgrad des Bodens abhängt und mit zunehmenden Kapillarspannungen im Boden abnimmt. Gemäß der verwendeten Funktion ist die Wasseraufnahme der Pflanzen bei hohen Wassergehalten bis zum Erreichen des Wassergehaltes der Feldkapazität, die konventionell bei einer Saugspannung von $\psi = 6,3 \text{ kPa}$ angenommen wird, maximal und nimmt anschließend mit zunehmenden Saugspannungen linear auf einen Wert von 0 bei Erreichen des permanenten Welkepunktes bei $\psi = 1.500 \text{ kPa}$ ab. In Bild 5-11 ist die entsprechende Funktion für den Rollrasen dargestellt.

Die Netto-Strahlung wurde für die Versuchshalle mit $R_n = 0,07 \text{ kJ}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ abgeschätzt und konstant von 6:00 Uhr bis 18:00 Uhr angesetzt. Dies entspricht in etwa der Hälfte der Nettostrahlung auf 48° nördlicher Breite in Frühjahr und Herbst. In der übrigen Zeit wurde $R_n = 0 \text{ kJ}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ angenommen.

Für einen gesunden Rollrasen wurden eine Wuchshöhe von $0,03 \text{ m}$ und eine Wurzeltiefe von $0,045 \text{ m}$ angenommen. Die Wurzeldichte wurde an der Geländeoberkante mit $0,3$ und zur maximalen Wurzeltiefe von 5 cm auf 0 abnehmend angenommen.

Folgende weitere Parameter wurden als konstant angenommen:

- Lufttemperatur in der Versuchshalle: $17 \text{ }^\circ\text{C}$,

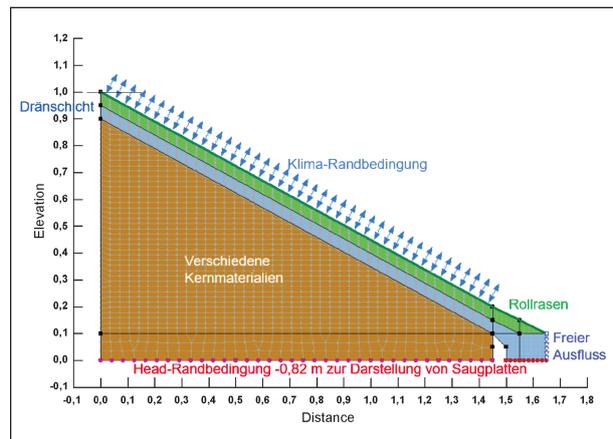


Bild 5-12: Darstellung der Randbedingungen am Modell des Hallenlysimeters

- Relative Luftfeuchtigkeit in der Versuchshalle: 55% ,
- Windgeschwindigkeit in der Versuchshalle: 0 km/h .

Die Klima-Randbedingung wird, wie in Bild 5-12 dargestellt, auf der gesamten Rasenoberfläche des Lysimeters angesetzt.

5.3.2 Hydraulische Randbedingungen

Zur Abbildung des an die Saugplatten an der Lysimeterbasis angelegten Unterdrucks von 80 mbar , wird eine Head-Randbedingung an der Unterkante des Kernmaterials mit einem entsprechenden hydraulischen Potenzial von $-0,82 \text{ m}$ Wassersäule bezogen auf die Unterseite des Lysimeters angelegt.

Die seitlichen Ränder des Modells werden analog zum Lysimeterkasten als undurchlässig betrachtet. Lediglich am rechten Rand wurde eine Sickerrandbedingung als freie Ausflussbedingung (Water Flux $0 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$, Potenzial Seepage Face Review) angesetzt, die im Falle von Sickerwasserandrang im Dränelement einen Wasserfluss aus dem Modell heraus ermöglicht. Dies geschieht, indem nach jeder Iteration der Zustand der Knoten an der Randbedingung überprüft wird. Kommt es zu einem positiven Wasserdruck, wandelt das Programm die Flux-Randbedingung in eine Head-Randbedingung um und setzt an den Knoten eine ihrer tatsächlichen Höhe entsprechende Druckhöhe an. Damit kommt es zum Wasserfluss von innen nach außen (GEO-SLOPE, 2017).

5.4 Anfangsbedingungen

Um die Anfangszustände der verwendeten Materialien ermitteln zu können, benötigt Seep/W einen initialen Grundwasserspiegel oder eine vorgeschaltete stationäre Berechnung. Im Fall der Hallenlysimeter werden die Anfangszustände der Bodenmaterialien in einer stationären Berechnung ermittelt. Bei der darauffolgenden instationären Berechnung wird dieser Anfangszustand, bei dem es sich um einen hydrostatischen Gleichgewichtszustand entsprechend der Head-Randbedingung am unteren Rand handelt, für den ersten Zeitschritt übernommen.

6 Berechnungsergebnisse der Hallenlysimeter

6.1 Untersuchungen zur Festlegung der hydraulischen Eigenschaften des Rollrasens

Für die Abbildung des Rollrasens wurden die Eigenschaften des Bodens Su2 nach HENNINGS (2000) entsprechend Tabelle 5-2 zugrunde gelegt (siehe Kapitel 5.2.2). Da keine Untersuchungen zur gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit des Rollrasens verfügbar waren, wurde diese auf $k = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s geschätzt. Die Funktion der hydraulischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Saugspannung wurde zunächst bei diesem Wert eingehängt. Anschließend wurde die gesättigte Leitfähigkeit variiert und am Modell mit kiesigem Boden (BM 1) ohne Dränmatte durch inverse Modellierung angepasst. Dies geschah durch mehrere Berechnungsläufe und einen Vergleich der Ergebnisse mit den gemessenen kumulierten Abfluss- und Sickerwassermengen. Die beste Übereinstimmung von Berechnungs- und Messergebnissen wurde mit einem Durchlässigkeitsbeiwert des Rollrasens von $k = 5 \cdot 10^{-6}$ m/s erreicht (siehe auch Kapitel 6.3.1 und 6.3.2).

6.2 Sensitivitätsuntersuchungen zur Abbildung der Dränmatte im Modell

Voruntersuchungen am numerischen Modell des Hallenlysimeters ergaben, dass die berechnete Durchsickerung des Kerns maßgeblich von den hydraulischen Eigenschaften der Schichten an der Oberfläche abhängt. Am Modell mit bindigem Kern, Rollrasen und Dränmatte zeigte sich, dass sich ab-

hängig von den hydraulischen Kennwerten der Dränschicht sehr unterschiedliche Abflussmengen ergeben. Auch die Konvergenz der Berechnungen und somit deren Aussagekraft hängen maßgeblich von der Ausbildung des Dränelements und dessen hydraulischen Eigenschaften ab.

Für die Abbildung des Dränelements in der Simulation bestehen unterschiedliche Möglichkeiten. In der Realität ist eine Dränmatte als Geokomposit aus drei Lagen aufgebaut. Um die Filterstabilität gegen den angrenzenden Boden sicherzustellen, bestehen die äußeren Lagen zumeist aus mechanisch und/oder thermisch verfestigten Vliesstoffen. Dazwischen befindet sich ein Wirrgelege aus Kunststoff mit großem Porenvolumen, wodurch eine Dränmatte unter bestimmten Voraussetzungen kapillarbrechend wirken kann. Die Gesamtdicke einer Dränmatte beträgt je nach Fabrikat ca. 8 mm bis 20 mm (z. B. COLBOND, 2007; TENCATE, 2010).

Im numerischen Modell kann eine Dränmatte entweder als Kontinuum, beispielsweise in Form einer Kiesschicht oder als Linienelement (Interface) abgebildet werden. Auch eine Kombination aus beidem als Dreischichtsystem wäre denkbar. Im vorliegenden Fall wurde zugunsten der Modellierung einer 5 cm dicken Kiesschicht entschieden, da die durchgeführten Voruntersuchungen gezeigt hatten, dass die anderen beiden Varianten detailliertere Kenntnisse über das hydraulische Verhalten der einzelnen Komponenten der verwendeten Dränmatten erfordern (SCHWEIZER, 2018).

Bei Verwendung einer Kiesschicht als Dränelement ist ein ausreichendes Porenvolumen und damit eine gewisse Mächtigkeit Voraussetzung, um die Dränspende über die gesamte Dränlänge abführen zu können, wie dies durch eine Dränmatte sichergestellt wird.

Aufgrund des großen Porenanteils im Kern einer Dränmatte liegt der Sättigungswassergehalt θ_s nahe 1. Die Porenverteilungen von Dränkern und Vliesstoff sind sehr eng gestuft, was im Gegensatz zu natürlichen Böden bereits in Bereichen kleiner Saugspannungen zu einem steilen Abfall des Wassergehalts und der hydraulischen Leitfähigkeit führt. In der Literatur werden Untersuchungen zur Ermittlung der hydraulischen Eigenschaften von Dränmatten und Vliesstoffen beschrieben (z. B. IRYO und ROWE, 2003; BOUAZZA et al., 2006; SIEMENS und BATHURST, 2010; PICKLES und ZORNBERG, 2012).

k_f [m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$
θ_s	0,990
θ_r	0,020
α [1/cm]	0,1569/1,569*/15,69*
n	7,00
$m = 1 - (1/n)$	0,857
* Variation in Voruntersuchungen	

Tab. 6-1: van Genuchten-Parameter des mechanisch verfestigten Vliesstoffs GT3 (BOUAZZA et al., 2006)

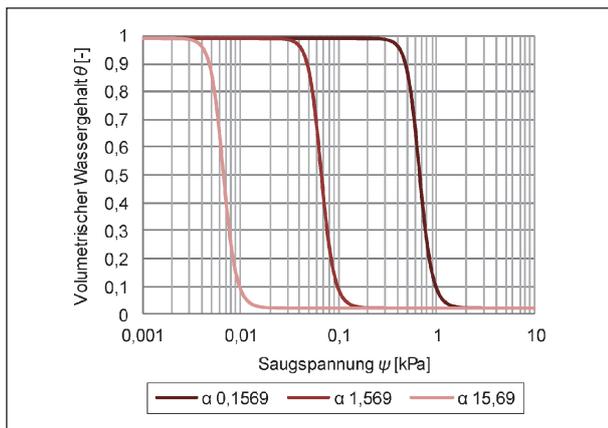


Bild 6-1: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung eines mechanisch verfestigten Vliesstoffs nach BOUAZZA et al. (2006) unter Variation des Luftpunktes

Die von BOUAZZA et.al. (2006) ermittelten hydraulischen Eigenschaften für einen mechanisch verfestigten Vliesstoff einer Dränmatte GT 3 wurden für Voruntersuchungen zugrunde gelegt. Die aus experimentellen Untersuchungen abgeleiteten van Genuchten-Parameter sind in Tabelle 6-1 dargestellt. Die hydraulische Leitfähigkeit wurde dabei mit dem van Genuchten-Mualem-Modell (siehe Kapitel 5.2) berechnet.

Der Parameter α , der die Lage des Luftpunktes beeinflusst, wurde dabei, wie in Bild 6-1 und Bild 6-2 dargestellt variiert.

Aufgrund des steilen Anstiegs der Kurven in einem sehr engen Saugspannungsbereich, konnte in den Berechnungen jedoch keine Konvergenz erreicht werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die hydraulische Leitfähigkeit bereits bei geringen Saugspannungen auf ein sehr niedriges Niveau abfällt (siehe Bild 6-2) und die Schicht somit im Simulationsverlauf kaum Wasser aufnehmen und transportieren kann. Für einen Sechs-Stunden-Regen mit einer Niederschlagsmenge von $Q = 44$ mm führt dies zu erheblichen Konvergenzproblemen, wie Bild 6-3 am Beispiel des bindigen Kerns (BM 2) zeigt.

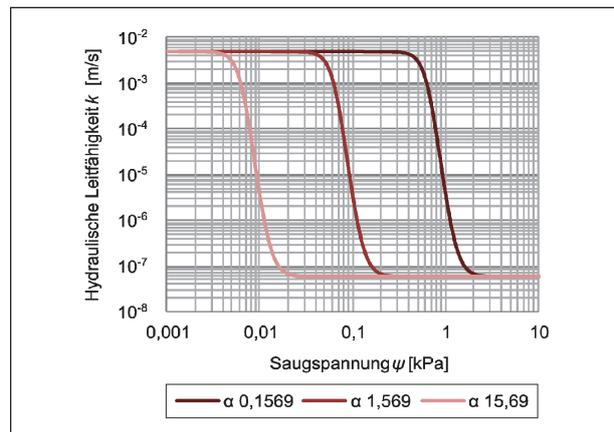


Bild 6-2: Hydraulische Leitfähigkeit eines mechanisch verfestigten Vliesstoffs nach BOUAZZA et al. (2006) unter Variation des Luftpunktes

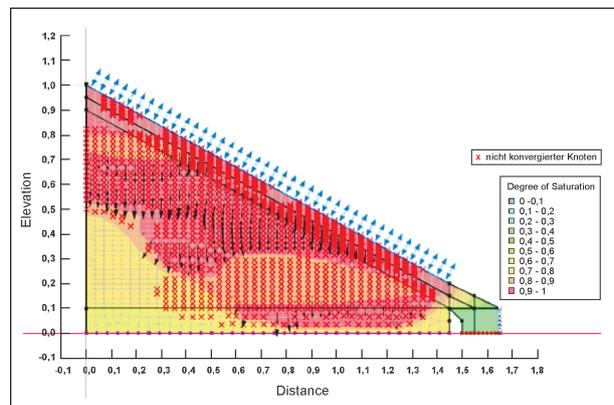


Bild 6-3: Konvergenzprobleme des Modells bei einem Sechs-Stunden-Regen mit einer Niederschlagsmenge von $Q = 44$ mm. Kernmaterial: bindiger Boden (BM 2). Dränelement GT 3 mit $\alpha = 0,1569/cm$ nach BOUAZZA et al. (2006).

Von diesen Beobachtungen ausgehend wurde die Dränschicht zunächst mit konstanter hydraulischer Durchlässigkeit, unabhängig von der Entwicklung der Saugspannung modelliert. Der Ausgangswert $k = 5 \cdot 10^{-1}$ m/s wurde dabei jeweils um eine halbe Zehnerpotenz reduziert. Bild 6-4 zeigt die kumulativen Berechnungsergebnisse nach einem Simulationszeitraum von 105 Tagen am Modell mit kiesigem Kern (BM 1).

Wie aus dem Diagramm ersichtlich, ergeben sich im Bereich $5 \cdot 10^{-1}$ m/s $> k > 5 \cdot 10^{-4}$ m/s konstante Abflussmengen. Zwischen $5 \cdot 10^{-4}$ m/s $> k > 1 \cdot 10^{-5}$ m/s reduziert sich die Menge des Zwischenabflusses, was auf die geringere laterale Leitfähigkeit des Dränelements zurückzuführen ist. Das Sickerwasser aus dem Kern nimmt in diesem Bereich zu, d. h. die Dränschicht gibt Wasser in vertikaler Richtung nach unten ab. Bei hydraulischen Leitfähigkeiten $k < 1 \cdot 10^{-5}$ m/s treten bereichsweise Konvergenz-

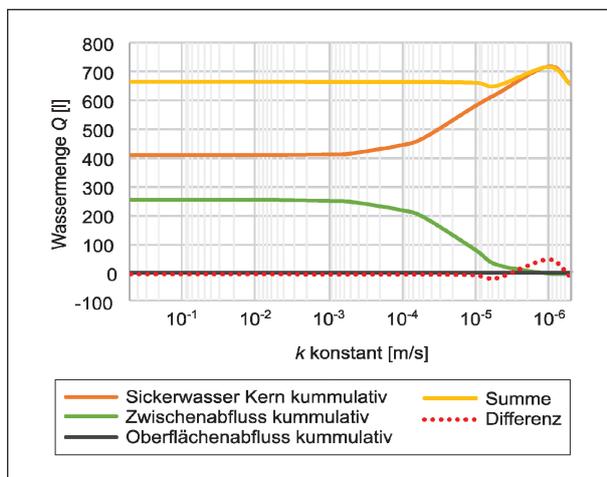


Bild 6-4: Kumulierte Abflussmengen nach 105 Tagen Simulationszeitraum am Modell mit kiesigem Kern (BM 1) und Dränmatte GT 3 nach BOUAZZA et al. (2006) mit $\alpha = 0,1569$ [1/cm] bei konstanter hydraulischer Leitfähigkeit. Reduktion des Durchlässigkeitsbeiwerts k in halben Zehnerpotenzschritten. Negative Differenzwerte bedeuten eine Wasserspeicherung im Modell, positive Differenzen bedeuten eine Erhöhung der Gesamtwassermenge.

probleme auf, was an der veränderten Summe aus kumuliertem Sickerwasser und kumuliertem Zwischenabfluss, bzw. deren Differenz ersichtlich wird. Negative Differenzwerte bedeuten eine Wasserspeicherung im Modell, positive Differenzen bedeuten eine Erhöhung der Gesamtwassermenge, was aus praktischer Sicht nicht möglich ist.

Zur Vermeidung von Konvergenzproblemen im Verlauf der Berechnungen bestünde die Möglichkeit, die hydraulische Leitfähigkeit des Dränelements auf $k > 1 \cdot 10^{-5}$ m/s zu beschränken, also die Funktion der hydraulischen Leitfähigkeit mit einem sogenannten „Capping“ zu versehen. Untersuchungen mit dieser Vorgehensweise führten jedoch bei anderen Kernmaterialien teilweise auch zu Konvergenzproblemen. Dies ist vermutlich in dem steilen Anstieg der hydraulischen Funktionen begründet.

Als Alternative wurden die hydraulischen Parameter eines schluffigen Kiesel GU aus der Literatur nach EKBLAD und ISACSSON (2007) gewählt. Die hydraulischen Funktionen dieses Bodens weisen einen flacheren Anstieg und vor allem einen sanfteren Übergang zum Sättigungsbereich auf. Die van Genuchten-Parameter dieses Bodens sind in Tabelle 5-2 (Kapitel 5.2.2) zusammengestellt. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit wurde in Anlehnung an den Vliesstoff nach BOUAZZA et al. (2006) bei $k = 5 \cdot 10^{-3}$ m/s angesetzt.

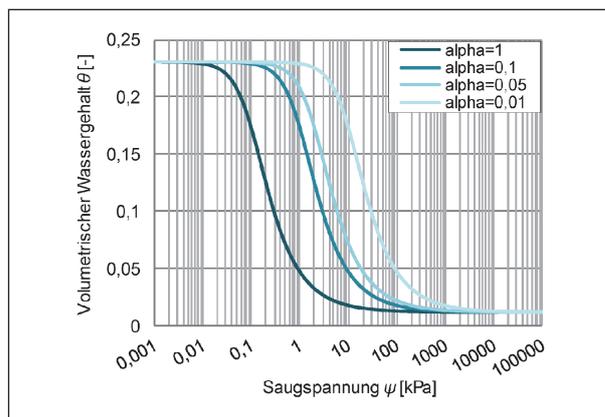


Bild 6-5: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung des GU nach EKBLAD und ISACSSON (2007) unter Variation des Lufteintrittspunktes zur Verwendung als Dränelement

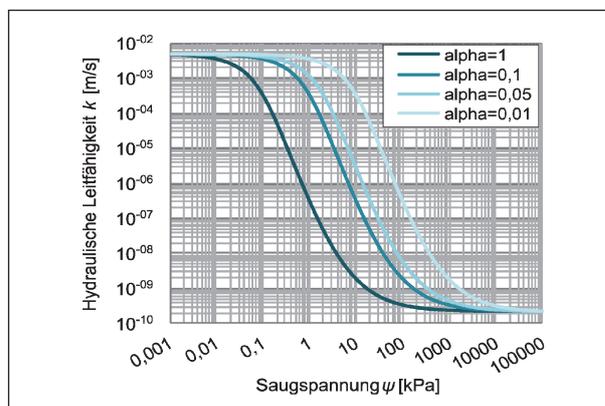


Bild 6-6: Hydraulische Leitfähigkeit des GU nach EKBLAD und ISACSSON (2007) unter Variation des Lufteintrittspunktes zur Verwendung als Dränelement

Wie Bild 6-5 und Bild 6-6 zeigen, wurde die Lage des Lufteintrittspunktes des GU durch Veränderung des Parameters α variiert. Berechnungen mit den jeweiligen Parametern erfolgten sowohl mit kiesigem (BM 1) als auch mit bindigem Kernmaterial (BM 2).

In Bild 6-7 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsuntersuchungen des Dränelements mit kiesigem Kern (BM 1) dargestellt. Darin wird deutlich, dass ab $\alpha < 0,1$ [1/cm] die Dränschicht zeitweise lateral Wasser zur Auffangwanne transportiert. Bei $\alpha = 0,05$ [1/cm] ist dieser Effekt fast über die gesamte Berechnung zu beobachten. Der Vergleich mit den Messwerten ergibt mit $\alpha = 0,05$ [1/cm] die beste Übereinstimmung.

Die Sensitivitätsuntersuchungen des Dränelements mit bindigem Kern sind in Bild 6-8 dargestellt. Auch hier wird mit $\alpha = 0,05$ [1/cm] die beste Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung erzielt.

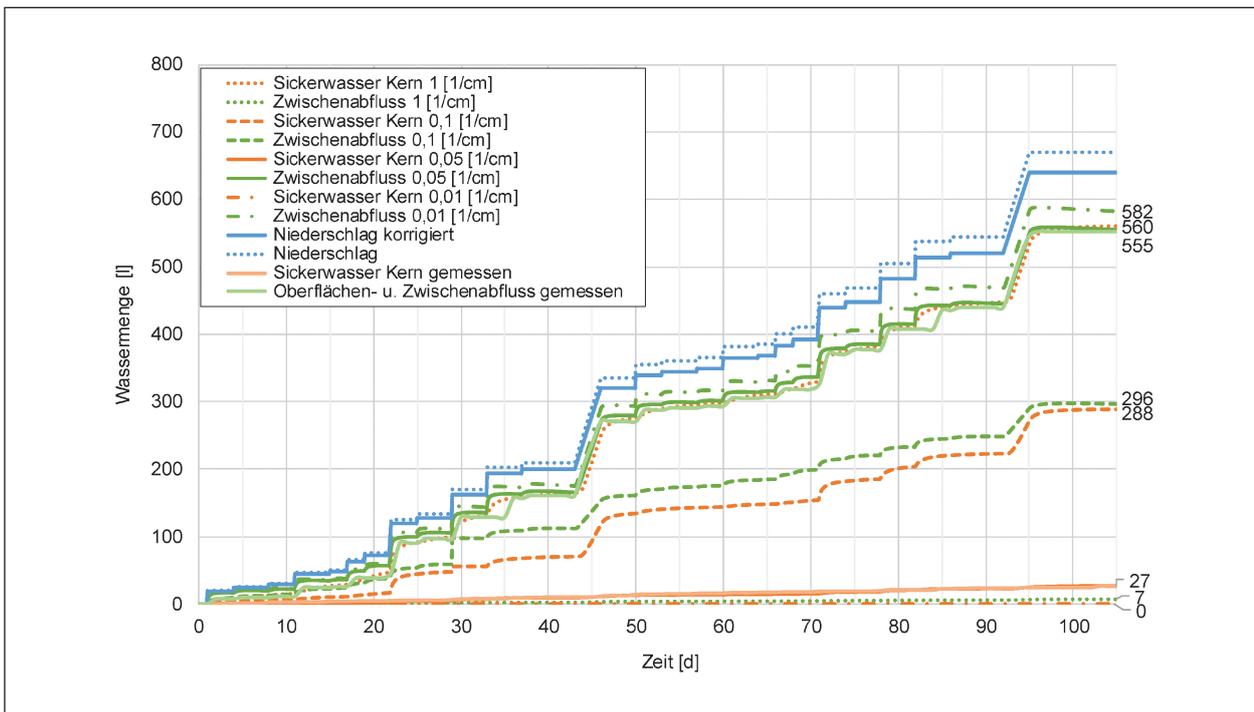


Bild 6-7: Variation des Luftpunktes in der Dränschicht. Berechnungsergebnisse mit kiesigem Kern (BM 1)

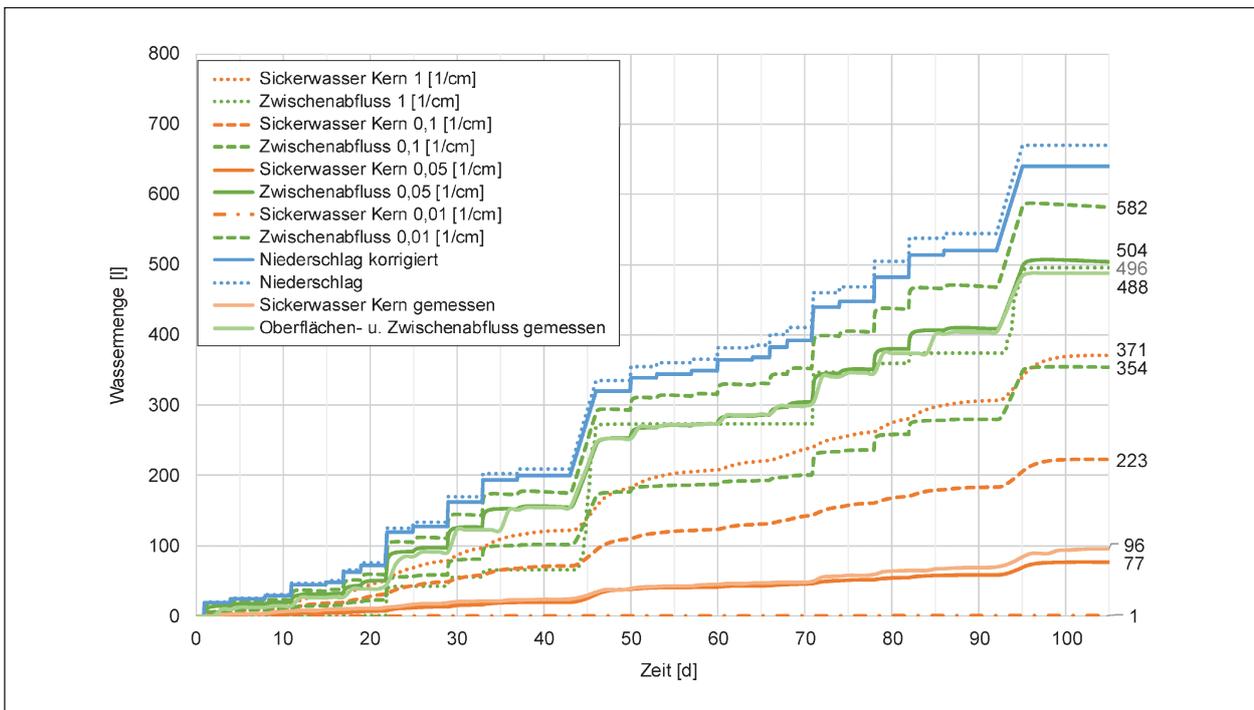


Bild 6-8: Variation des Luftpunktes in der Dränschicht. Berechnungsergebnisse mit bindigem Kern (BM 2). Bei Verwendung der Dränmatte mit $\alpha = 1$ [1/cm] traten Konvergenzprobleme auf (zu hoher Oberflächen- und Zwischenabfluss mit 496 l)

6.3 Ergebnisbetrachtung der Lysimeter-Berechnungen

Nachfolgend werden die Ergebnisse der numerischen Berechnungen mit tatsächlichem Regenregime und mit Tagesmittelwerten im Vergleich zu den gemessenen Abflussmengen dargestellt. Die angegebenen %-Werte beziehen sich auf den Gesamtabfluss und geben die Aufteilung zwischen kumuliertem Sickerwasser und kumuliertem Oberflächen- und Zwischenabfluss an.

6.3.1 Kiesiger Boden (BM 1)

Bild 6-9 zeigt die Summenkurven des Lysimeters mit kiesigem Kern (BM 1) ohne Dränmatte. Hier zeigt sich, dass 95 % des Gesamtabflusses durch den Kern sickern, was sehr gut mit dem Messergebnis übereinstimmt. Dazu ist jedoch anzumerken, dass an diesem Modell die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Rollrasens angepasst wurde. Die Sickerwassermengen der Berechnung mit Tagesmittelwerten liegen ebenfalls bei 95 %.

Die Ergebnisse der Berechnungen mit Dränmatte sind in Bild 6-10 dargestellt. In diesem Fall durchsickern lediglich 5 % des Sickerwassers den kiesigen

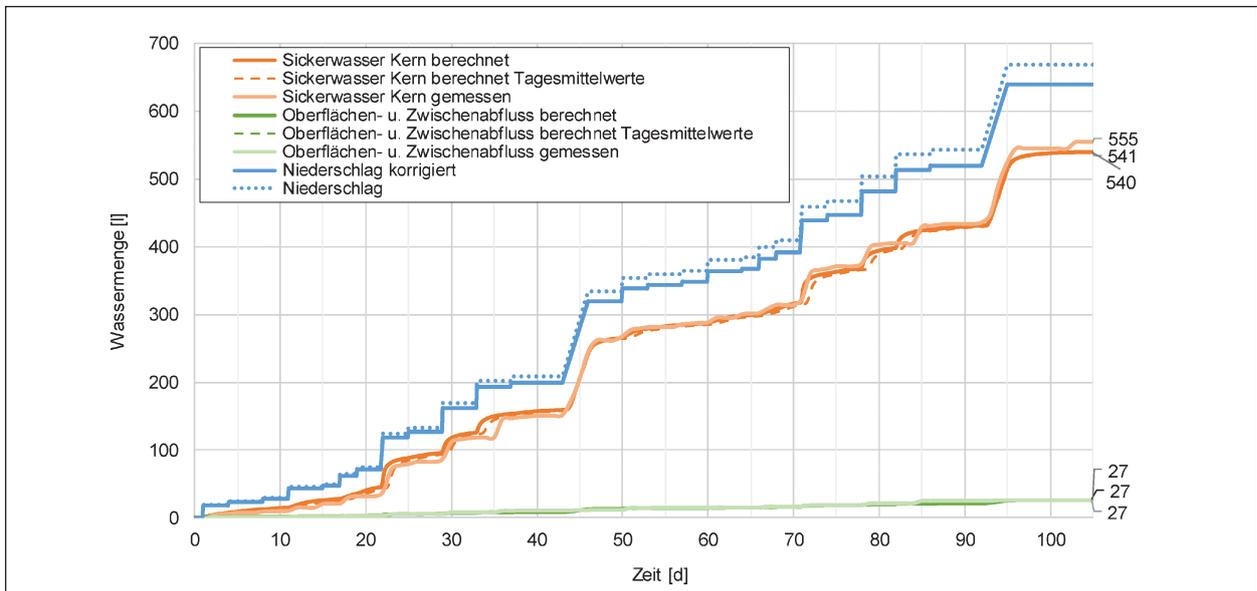


Bild 6-9: Berechnungsergebnisse mit kiesigem Kern (BM 1) ohne Dränelement

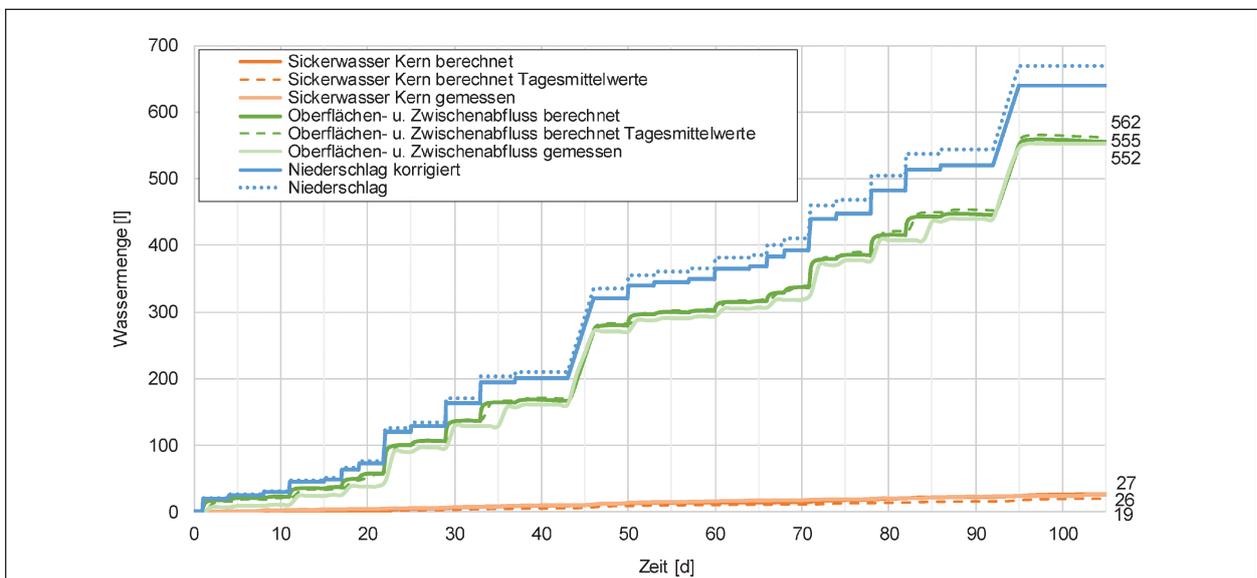


Bild 6-10: Berechnungsergebnisse mit kiesigem Kern (BM 1) mit Dränelement

Kern. Der größte Teil (95 %) des Sickerwassers wird im Dränelement in den Überlauf abgeführt. Die Dränmatte führt damit sowohl in der Berechnung als auch im Versuch zu einer signifikanten Reduzierung der Durchsickerung des Kerns. Die Abweichung der Berechnung mit Tagesmittelwerten zu den Berechnungen mit den tatsächlich ausgeführten Niederschlagsintensitäten fällt gering aus.

Im Modell ohne Dränmatte liegt die berechnete Durchsickerung des Kerns bei 59 % im Gegensatz zur Messung von 45 %. Die Berechnung mit Tagesmittelwerten ergibt 72 % Sickerwasser. Dahingegen liegen die berechneten Sickerwassermengen des bindigen Kerns mit Dränelement (13 %; 15 % Tagesmittelwerte) nahe bei den Messwerten (16 %), was aber auch auf die an diesem Modell erfolgte Anpassung der Dränmatte zurückzuführen ist.

6.3.2 Bindiger Boden (BM 2)

Die Berechnungsergebnisse für bindigen Boden ohne Dränmatte sind in Bild 6-11 und mit Dränmatte in Bild 6-12 dargestellt.

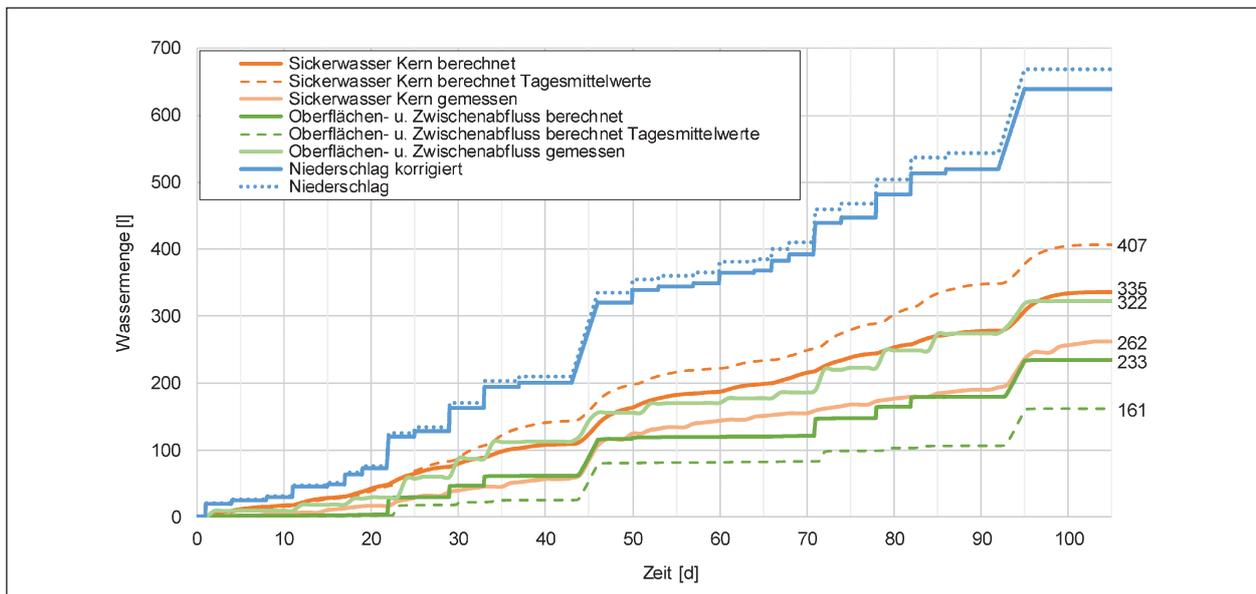


Bild 6-11: Berechnungsergebnisse mit bindigem Kern (BM 2) ohne Dränelement

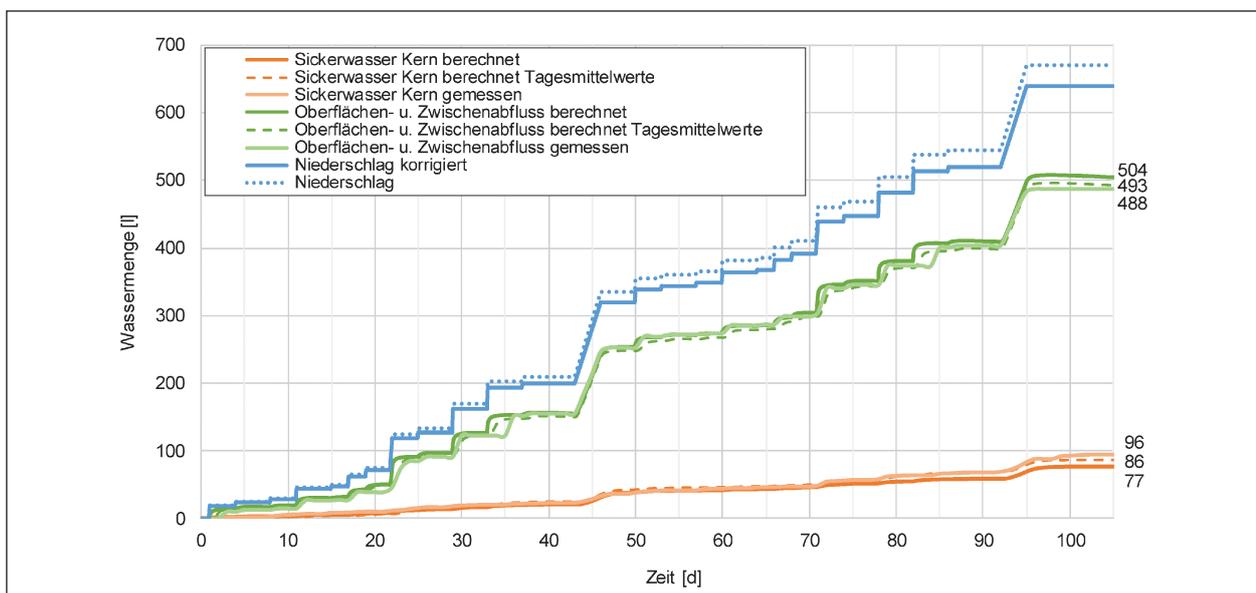


Bild 6-12: Berechnungsergebnisse mit bindigem Kern (BM 2) mit Dränelement

6.3.3 Hausmüllverbrennungsasche HMVA

Bild 6-13 zeigt die Abflusskurven des Lysimeters mit HMVA ohne Dränelement. Bei der Betrachtung wird deutlich, dass in diesem Fall die Berechnung mit Tagesmittelwerten die Ergebnisse der Messung besser abbilden kann. Durch den Kern sickern in diesem Fall 93 % der Gesamtwassermenge. Mit dem tatsächlichen Regenregime sind es 78 %.

Um einen Erklärungsansatz für die auffällig großen Unterschiede zwischen den Berechnungen mit tatsächlichen Niederschlägen und Tagesmittelwerten zu finden, wurde an drei Beobachtungspunkten unterhalb des Rollrasens vergleichend die Entwicklung der Saugspannungen über die Zeit betrachtet. Bild 6-14 a) stellt exemplarisch die Saugspannungen für einen Punkt im unteren Drittel der Böschung für die halbe Berechnungsdauer dar. Der Übersicht-

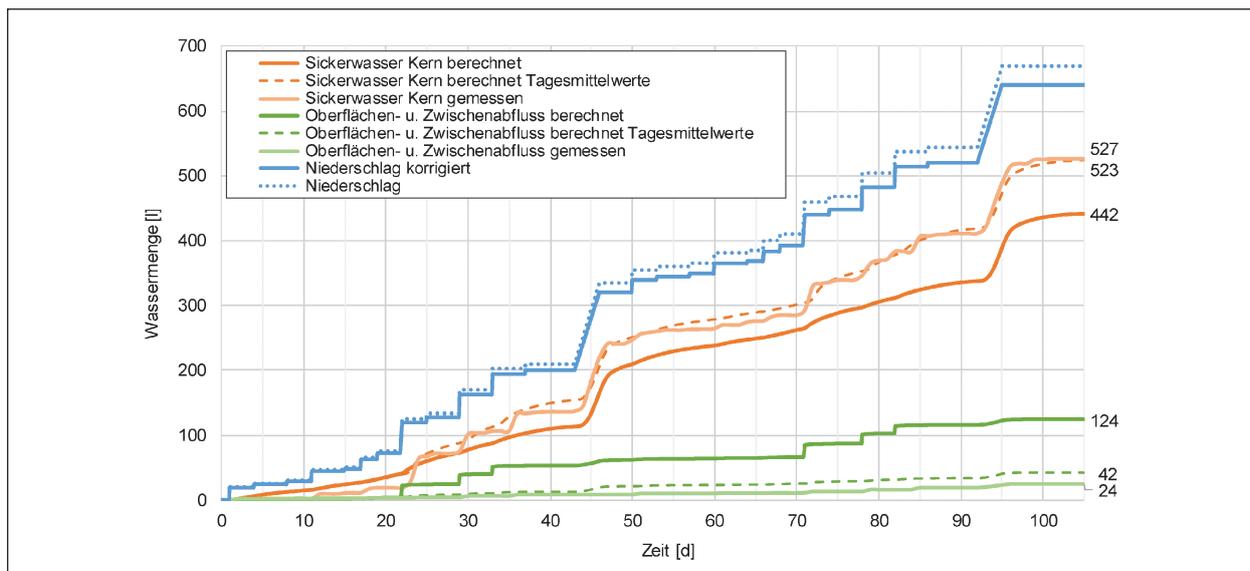


Bild 6-13: Berechnungsergebnisse für HMVA 3 ohne Dränelement

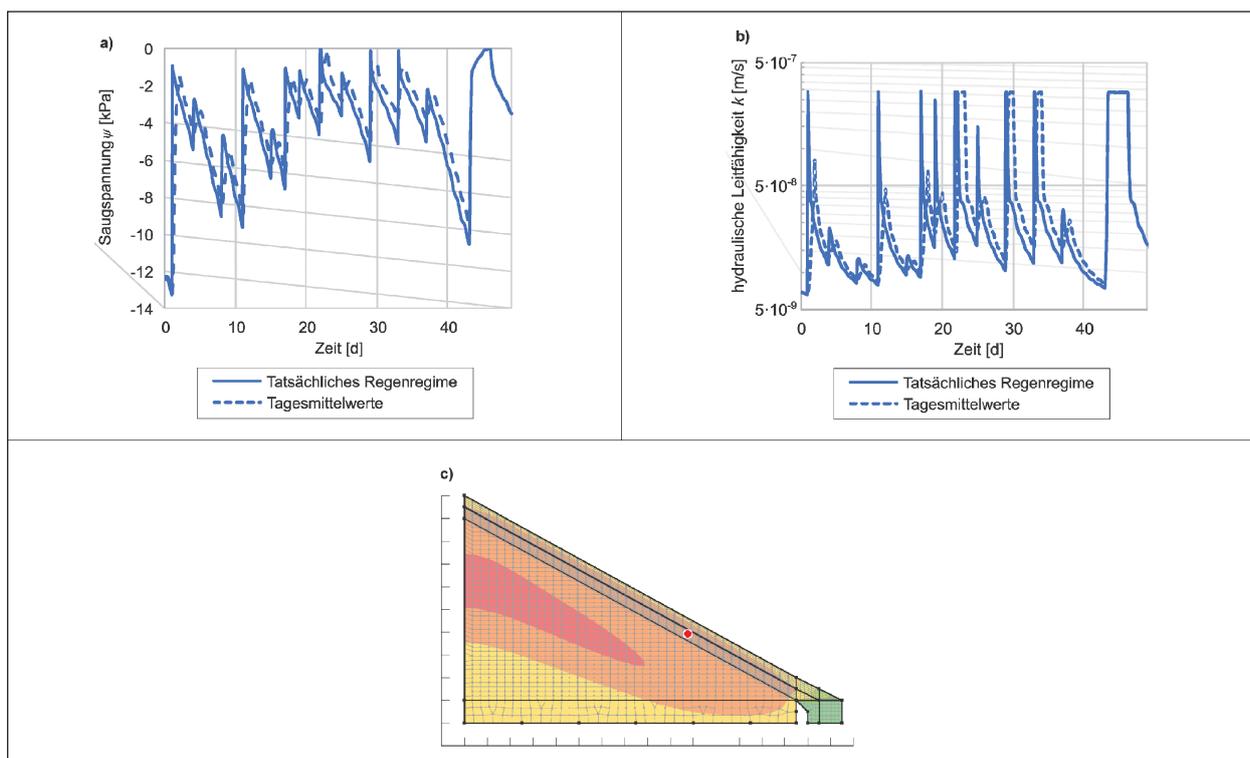


Bild 6-14: HMVA 3 ohne Dränelement: Vergleich der Entwicklung über die Zeit a) der Saugspannungen und b) der hydraulischen Leitfähigkeit an einem in c) dargestellten Beobachtungspunkt im Kernmaterial unterhalb des Rollrasens

lichkeit halber wird nur einer der Beobachtungspunkte dargestellt. Die Saugspannungen an anderen Stellen unterhalb des Rollrasens zeigten ähnliche Verläufe. Aus dem Verlauf der Saugspannungen ist zu erkennen, dass diese bei der Berechnung mit Tagesmittelwerten langsamer ansteigen und auch langsamer wieder abfallen, als bei Ansatz des tatsächlichen Regenregimes. Dadurch ist die hydraulische Leitfähigkeit des Kerns über einen längeren Zeitraum hoch (siehe Bild 6-14 b)). Auch wenn unter Ansatz von Tagesmittelwerten die Spitzenwerte der hydraulischen Leitfähigkeit nicht erreicht werden, kann Wasser vom Kern über einen längeren Zeitraum aufgenommen werden, was die gesamte Sickerwassermenge erhöht. Außerdem kommt die Kernoberfläche bei Ansatz von Tagesmittelwerten seltener nahe an den gesättigten Zustand, in dem die Wasseraufnahme im Vergleich zum ungesättigten Zustand stark herabgesetzt ist, wodurch die Menge des Oberflächenabflusses zunimmt.

Wie Bild 6-15 zu entnehmen ist, liegen beim Lysimeter mit HMVA mit Dränmatte die Berechnungen mit tatsächlichen Regenintensitäten und mit Tagesmittelwerten nah beieinander. Der Anteil des Sickerwassers beträgt hier 6 %, der mit tatsächlichen Regenintensitäten bei 4 %. Mit einer gemessenen Kerndurchsickerung von 13 % wird die Sickerwassermenge durch die Berechnung unterschätzt.

6.3.4 Recycling-Material RC

Die Berechnungen wurden zunächst mit den hydraulischen Kennwerten des RC 2 nach SCHARNAGL und DURNER (2014) ausgeführt (siehe Kapitel 5.2.1). Bei der Berechnung ohne Dränmatte zeigten sich Konvergenzprobleme. In Summe hat das Modell daher einen Wasserüberschuss von 23 l. Dennoch ist eine gute Übereinstimmung zwischen Messwerten und Berechnungsergebnissen festzuhalten (siehe Bild 6-16). Die Kerndurchsickerung liegt sowohl bei den beiden Berechnungen als auch bei der Messung bei rund 91 %. In den Berechnungen zeigt der Ausfluss aus dem Kern einen gleichmäßigeren Verlauf als der gemessene.

Wie Bild 6-17 zeigt, weichen die Berechnungen des Modells mit Dränmatte deutlich von den Messungen ab. Während die Kerndurchsickerung in der Berechnung bei rund 6 % liegt, ergeben die Messungen 51 %. Bei der Berechnung mit Dränmatte ergaben sich keine Konvergenzprobleme.

Aufgrund von Konvergenzproblemen und der großen Unterschiede zwischen Berechnung und Messung bei Ansatz der hydraulischen Eigenschaften für RC 2, wurden die Berechnungen mit den Kennwerten von RC 5 wiederholt. Dieses Material hat einen etwas höheren Feinkorn- (13 % statt 6 %) und einen höheren Sandanteil (52 % statt 39 %) als RC 2. Bild 6-18 stellt die Summenkurven für RC 5 ohne Dränmatte dar. Sickerwasser, sowie Oberflächen- und Zwischenabfluss stellen sich ähnlich dar wie

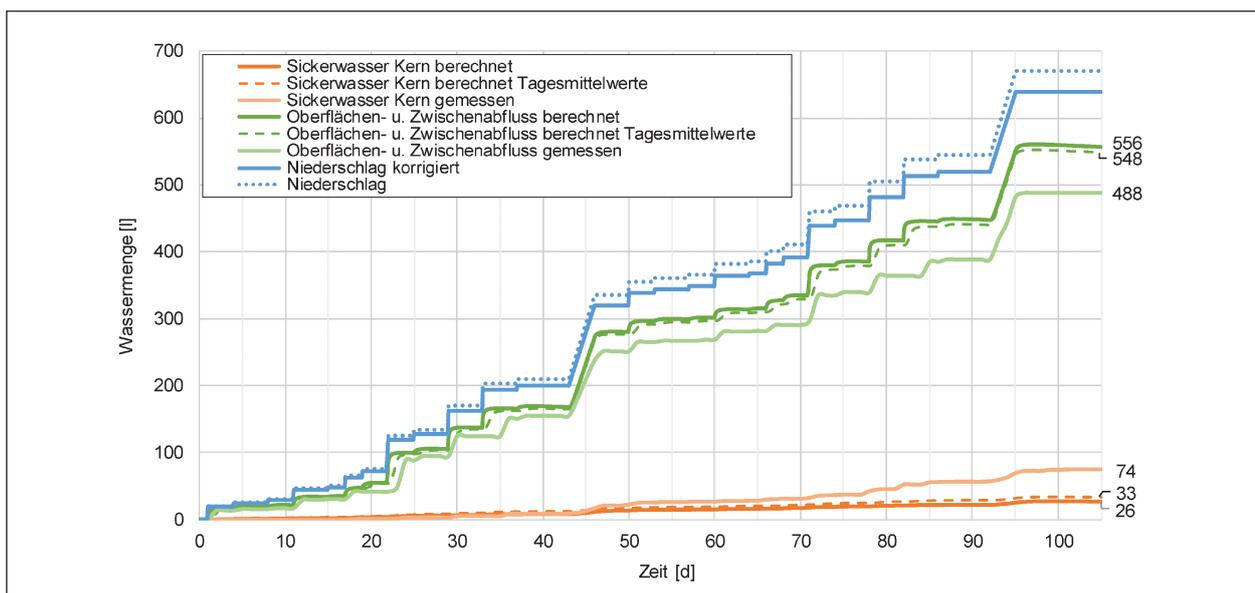


Bild 6-15: Berechnungsergebnisse für HMVA 3 mit Dränelement

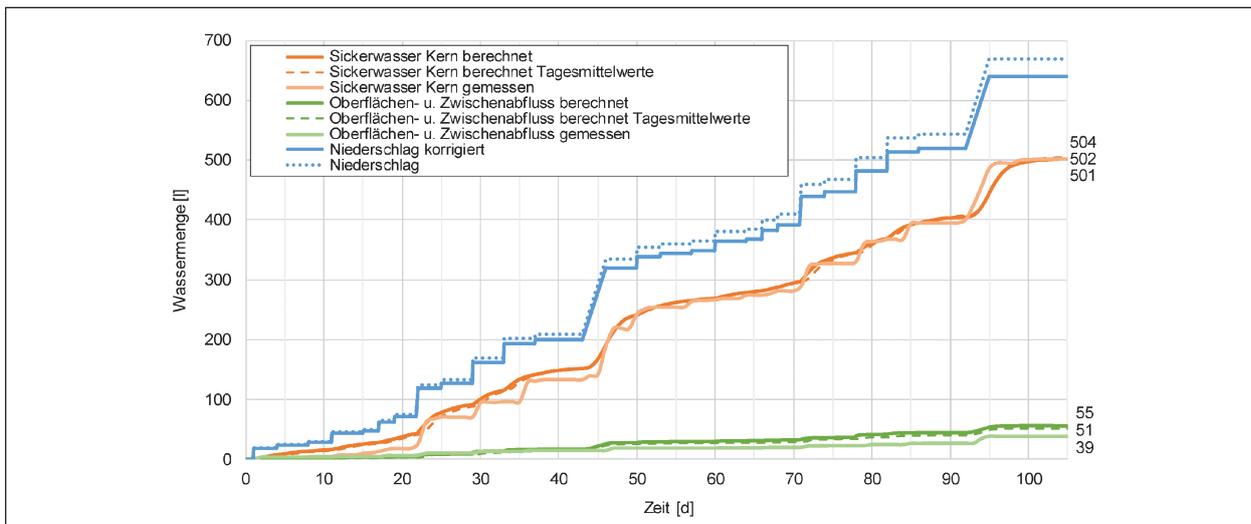


Bild 6-16: Berechnungsergebnisse für RC 2 ohne Dränelement

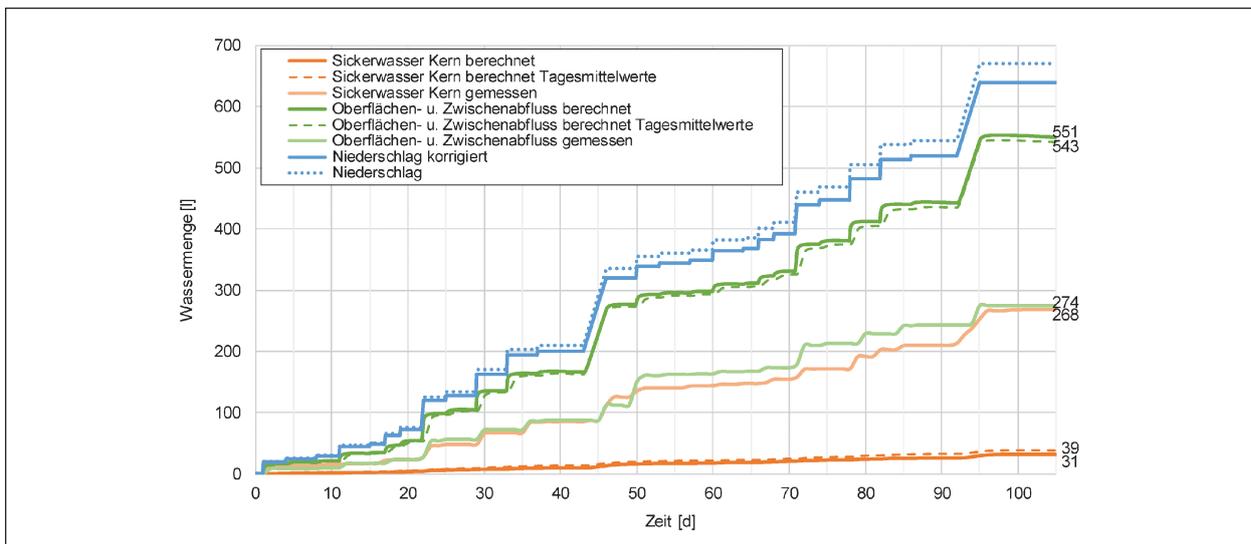


Bild 6-17: Berechnungsergebnisse für RC 2 mit Dränelement

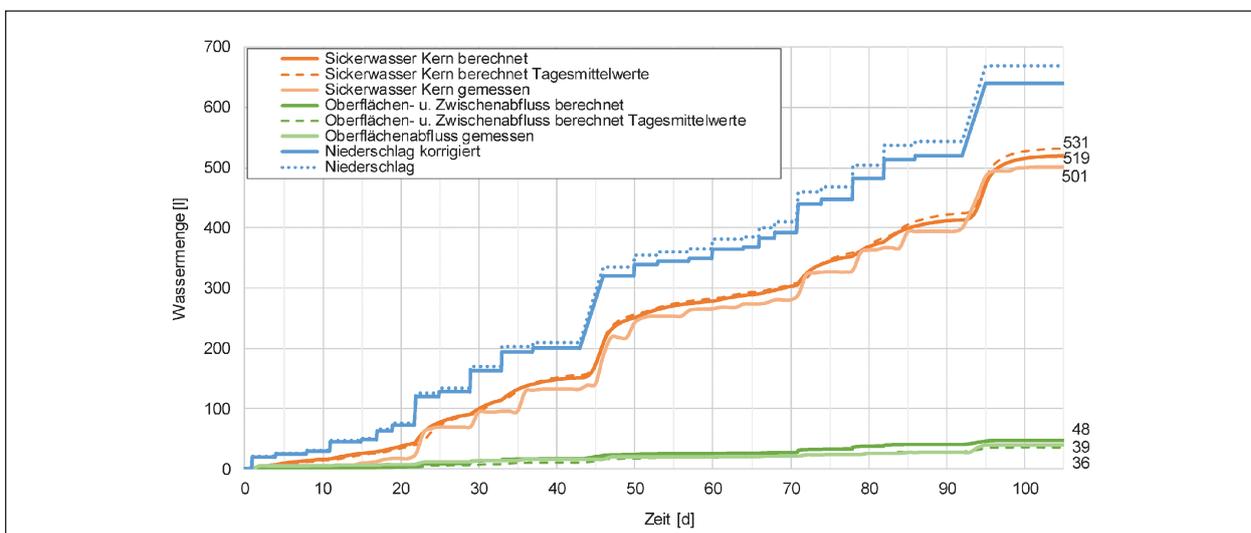


Bild 6-18: Berechnungsergebnisse für RC 5 ohne Dränelement

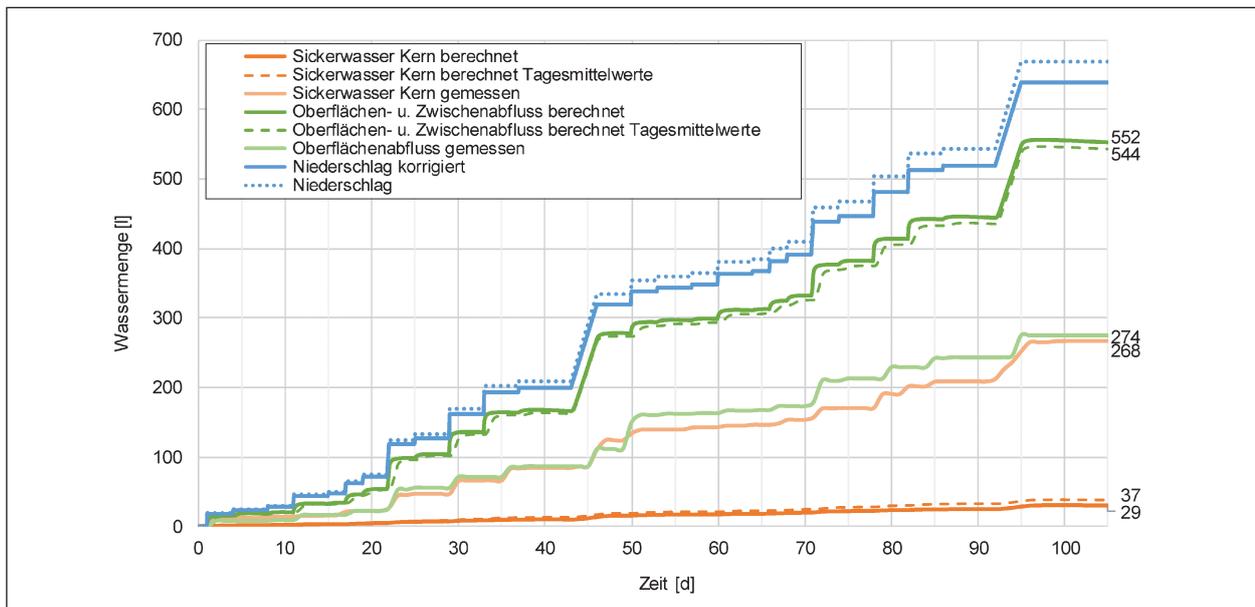


Bild 6-19: Berechnungsergebnisse für RC 5 mit Dränelement

bei den Berechnungen mit RC 2, jedoch ohne dass Konvergenzprobleme auftraten.

Die Berechnungsergebnisse mit RC 5 mit Dränelement sind in Bild 6-19 dargestellt. Obwohl sich der Verlauf der hydraulischen Leitfähigkeiten von RC 2 und RC 5 im Bereich niedriger Saugspannungen unterscheidet, sind die Berechnungsergebnisse mit Dränmatte annähernd gleich. Es scheint, als sei das Dränelement in den Berechnungen die bestimmende Größe für den Wasserhaushalt, da sich in beiden Berechnungen ein sehr großer Abfluss in der Dränschicht ergibt. Dies ist bei der experimentellen Untersuchung nicht der Fall und könnte auf Einflüsse aus der intragranularen Porenstruktur des RC-Materials zurückzuführen sein, konnte aber nicht abschließend erklärt werden.

In KELLERMANN-KINNER et al. (2017) wurde das RC-Material mit einer weiteren Dränmatte, einer Enkadrain[®]ZB (COLBOND, 2007; im Bericht als Dränmatte 3 bezeichnet) untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen mit 371 l einen deutlich höheren Zwischenabfluss als das Setup mit Dränmatte 1 mit 274 l. Die Sickerwassermenge mit Dränmatte 3 lag bei 187 l im Gegensatz zu 268 l mit Dränmatte 1. Die Messergebnisse der Untersuchung mit Dränmatte 3 sind somit deutlich näher an den Berechnungsergebnissen, die Sickerwassermenge ist dennoch auch hier deutlich höher, als die Berechnungsergebnisse.

6.3.5 Gießereirestsand GRS

Mit GRS wurden zwei Berechnungen durchgeführt. Bild 6-20 zeigt die Ergebnisse ohne Dränmatte: Dabei beträgt die Sickerwassermenge sowohl bei Ansatz des tatsächlichen Regenregimes als auch mit tagesmittelwerten 95 % des Sickerwassers. Im Experiment wurden 89 % gemessen.

Auch mit Dränelement zeigt sich kein großer Unterschied zwischen den beiden Berechnungen (siehe Bild 6-21). Im Vergleich zu den Berechnungen ohne Dränelement ist analog zu den anderen untersuchten Materialien ein deutlicher Unterschied hinsichtlich der Aufteilung der Wassermengen auf Sickerwasser und Oberflächen-/Zwischenabfluss zu erkennen. So liegt die Kerndurchsickerung bei den Berechnungen mit Dränmatte nur bei 5 % bzw. 4 % mit tatsächlichen Niederschlagsdauern und Tagesmittelwerten, während bei den Berechnungen und dem Experiment ohne Dränmatte Sickerwassermengen aus dem Kern von um die 90 % ermittelt wurden. Experimentell wurde der Aufbau mit Gießereirestsand und Dränmatte nicht untersucht.

Zusätzlich zu den Berechnungen auf der Grundlage von Datenbankwerten wurden die hydraulischen Kennwerte labortechnisch ermittelt (siehe Kapitel 5.2.1) Die Berechnungsergebnisse sind Bild 6-22 zu entnehmen. Hierbei zeigt sich eine gleichmäßigere Abgabe der Sickerwassermengen aus dem Kern als in den Hallenversuchen gemessen wurde. Die Sickerwassermengen werden relativ gut abge-

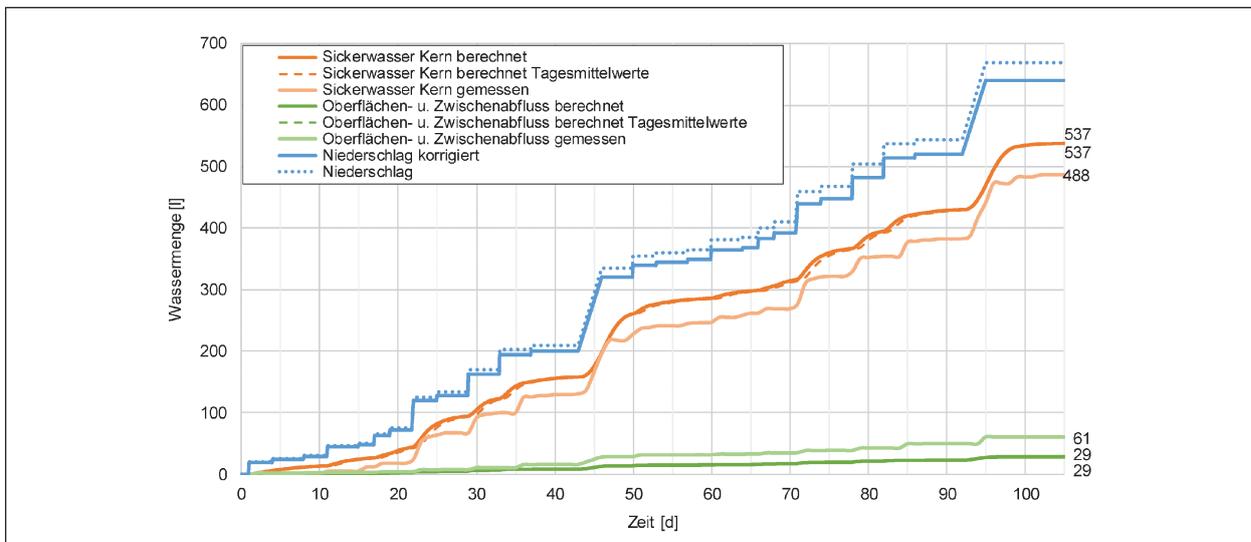


Bild 6-20: Berechnungsergebnisse für GRS mit hydraulischen Kennwerten aus der UNSODA-Datenbank ohne Dränelement

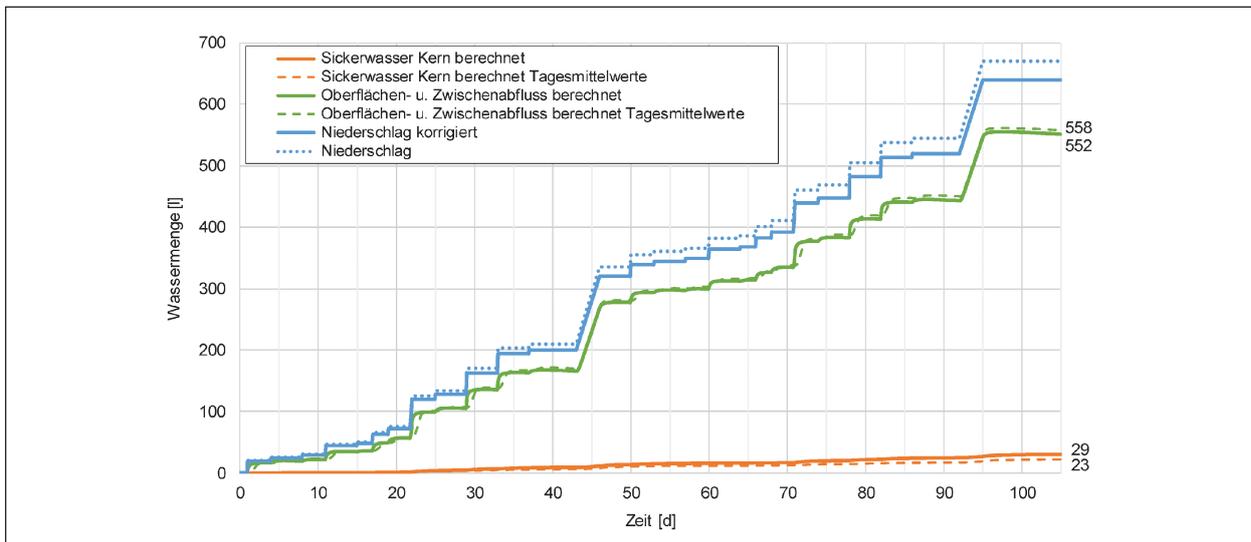


Bild 6-21: Berechnungsergebnisse für GRS mit hydraulischen Kennwerten aus der UNSODA-Datenbank mit Dränelement

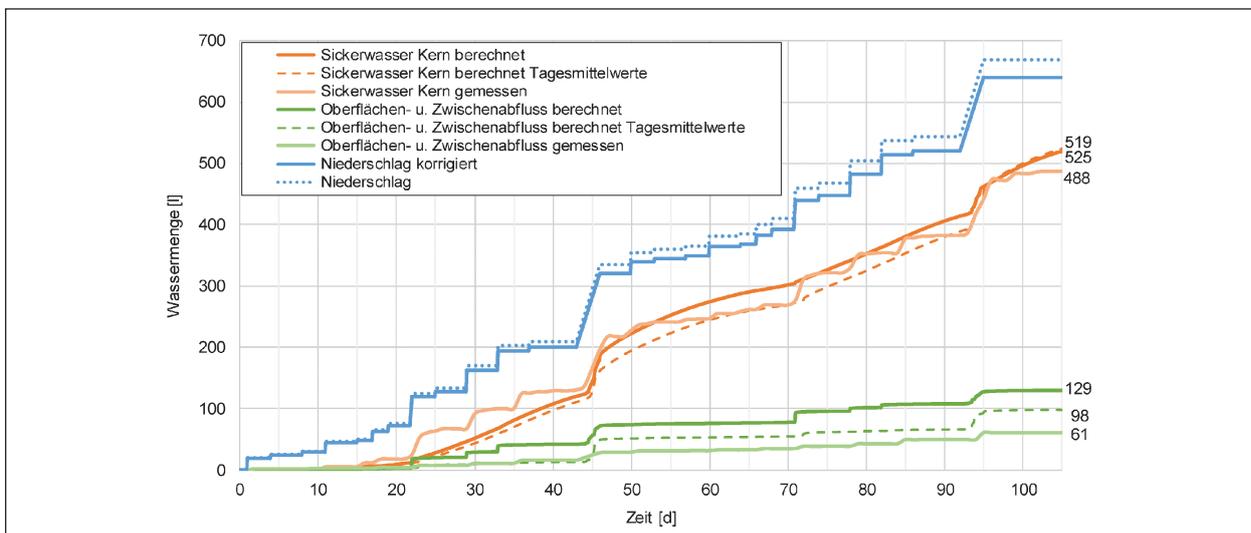


Bild 6-22: Berechnungsergebnisse für GRS-TUM mit labortechnisch bestimmten hydraulischen Kennwerten ohne Dränelement

bildet. Am Ende des Versuchs ist mit einem Anteil von 80 % am Gesamtabfluss eine leichte Überschätzung der Sickerwassermengen gegenüber der Messung mit 89 % zu verzeichnen. Im Verlauf der Berechnung ist auch zeitweise eine Unterschätzung der Sickerwassermengen zu beobachten. Dieser Effekt tritt verstärkt unter Ansatz von Tagesmittelwerten auf. Aufgrund von Konvergenzproblemen in einzelnen Berechnungsschritten gehen die Wasserbilanzen nicht vollständig auf. Das Modell weist am Ende der Berechnung einen Überschuss von rund 104 l und bei Berechnung mit Tagesmittelwerten von rund 80 l auf.

Die in Bild 6-23 dargestellte Berechnung mit Dränmatte ergibt mit knapp 1 % des Gesamtabflusses quasi keinen Sickerwasserabfluss.

6.3.6 Steinkohlenkesselasche SKA

Bild 6-24 zeigt die Berechnungen für SKA ohne Dränelement. Die berechneten Sickerwassermengen liegen bei 96 % im Vergleich zur Messung von 94 %, bezogen auf den Gesamtabfluss.

Die Berechnungen mit Dränmatte, dargestellt in Bild 6-25, ergeben ähnliche Ergebnisse wie die

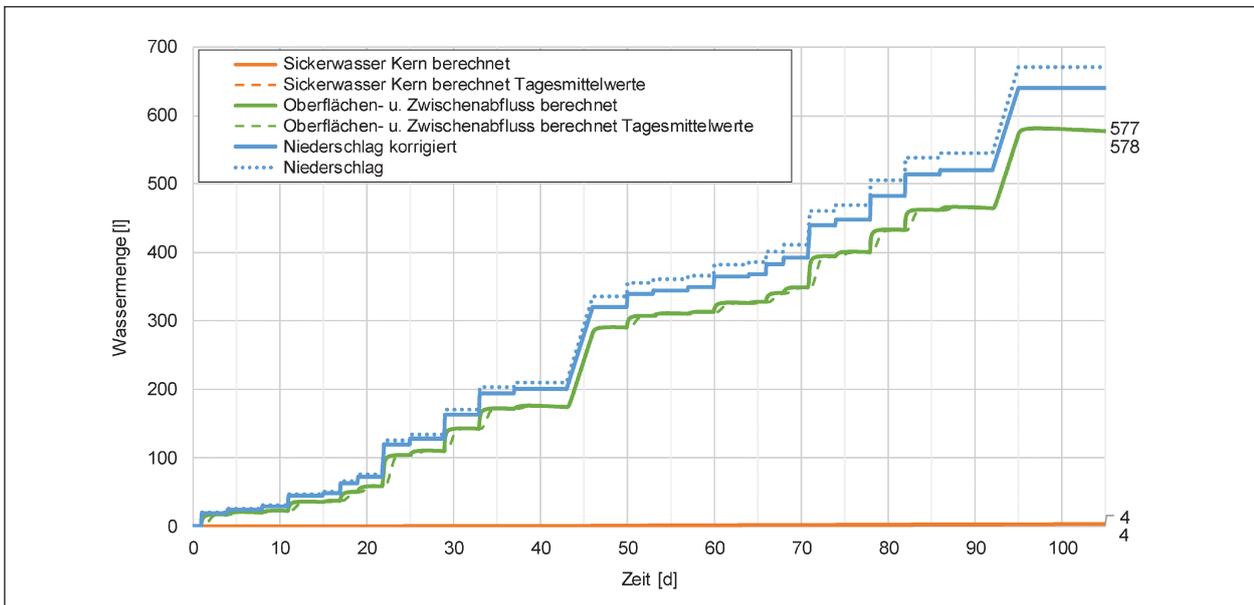


Bild 6-23: Berechnungsergebnisse für GRS-TUM mit labortechnisch bestimmten hydraulischen Kennwerten mit Dränelement

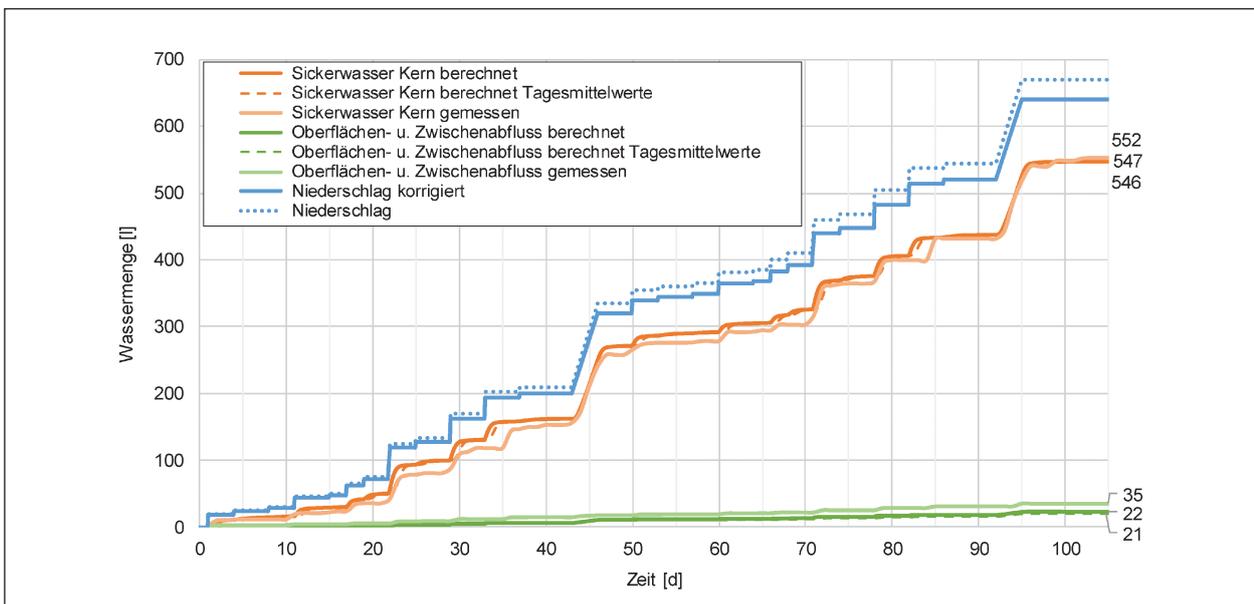


Bild 6-24: Berechnungsergebnisse für SKA mit hydraulischen Kennwerten aus der Soilvision-Datenbank ohne Dränelement

Messungen. Die Berechnung mit tatsächlichem Regenregime mit 55 % kommt der Messung von 58 % Kerndurchsickerung am nächsten. Bei der Berechnung mit Tagesmittelwerten wurde eine Sickerwassermenge von 51 % ermittelt.

Auch bei den labortechnisch ermittelten hydraulischen Kennwerten der SKA (siehe Kapitel 5.2.1) ergeben sich sehr gute Übereinstimmungen, sowohl bei Ansatz des tatsächlichen Regenregimes als auch mit Tagesmittelwerten (siehe Bild 6-26). Die

berechneten Sickerwassermengen haben jeweils einen Anteil von 95 % am Gesamtabfluss.

Die Berechnungsergebnisse des Lysimeters mit SKA mit Dränmatte (Bild 6-27) zeigen eine leichte Überschätzung der mit 58 % Anteil am Gesamtabfluss gemessenen Sickerwassermengen. Die berechnete Sickerwassermenge liegt bei 62 %, bei Ansatz von Tagesmittelwerten bei 64 %.

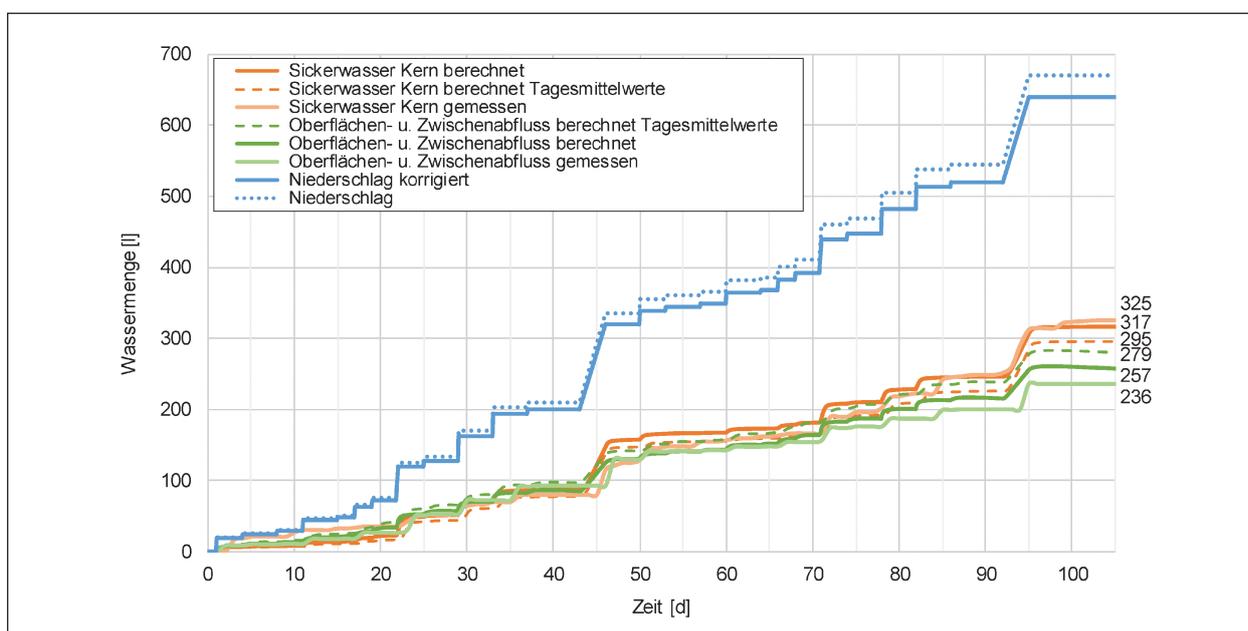


Bild 6-25: Berechnungsergebnisse für SKA mit hydraulischen Kennwerten aus der Soilvision-Datenbank mit Dränelement

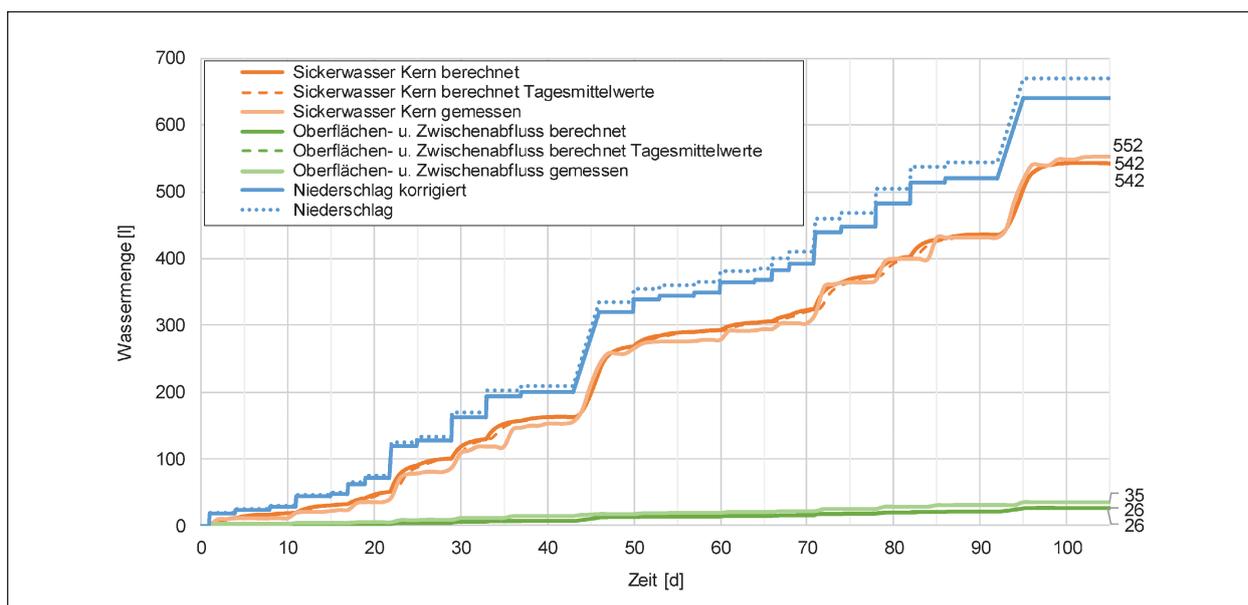


Bild 6-26: Berechnungsergebnisse für SKA-TUM mit labortechnisch bestimmten hydraulischen Kennwerten ohne Dränelement

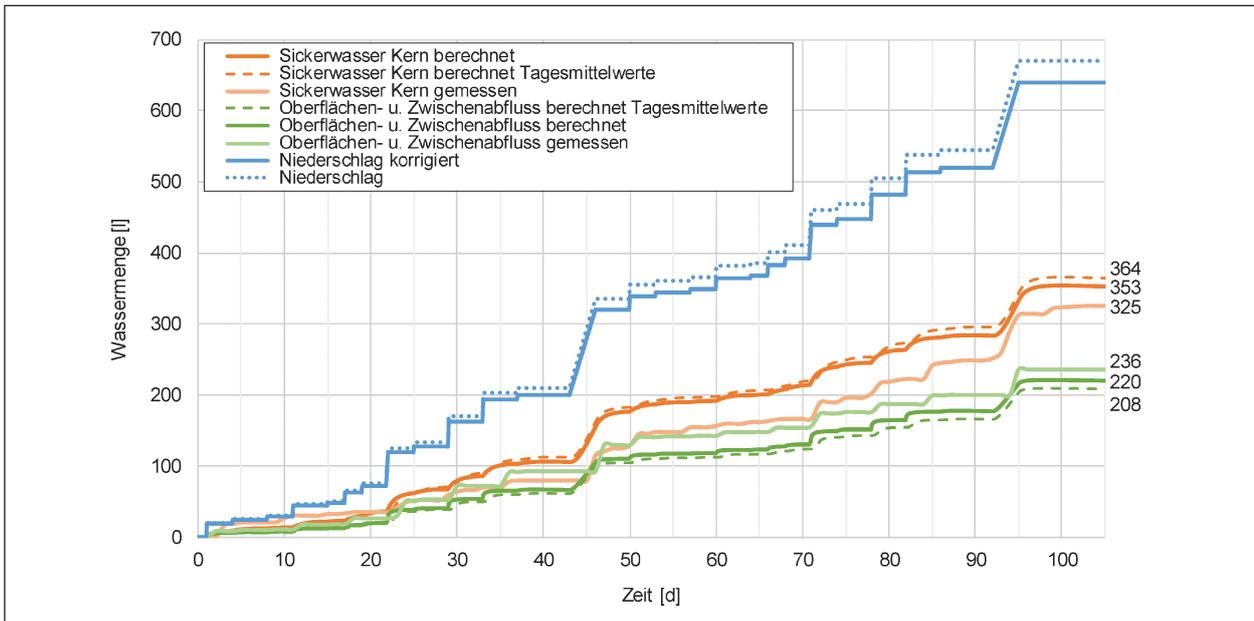


Bild 6-27: Berechnungsergebnisse für SKA-TUM mit labortechnisch bestimmten hydraulischen Kennwerten mit Dränelement

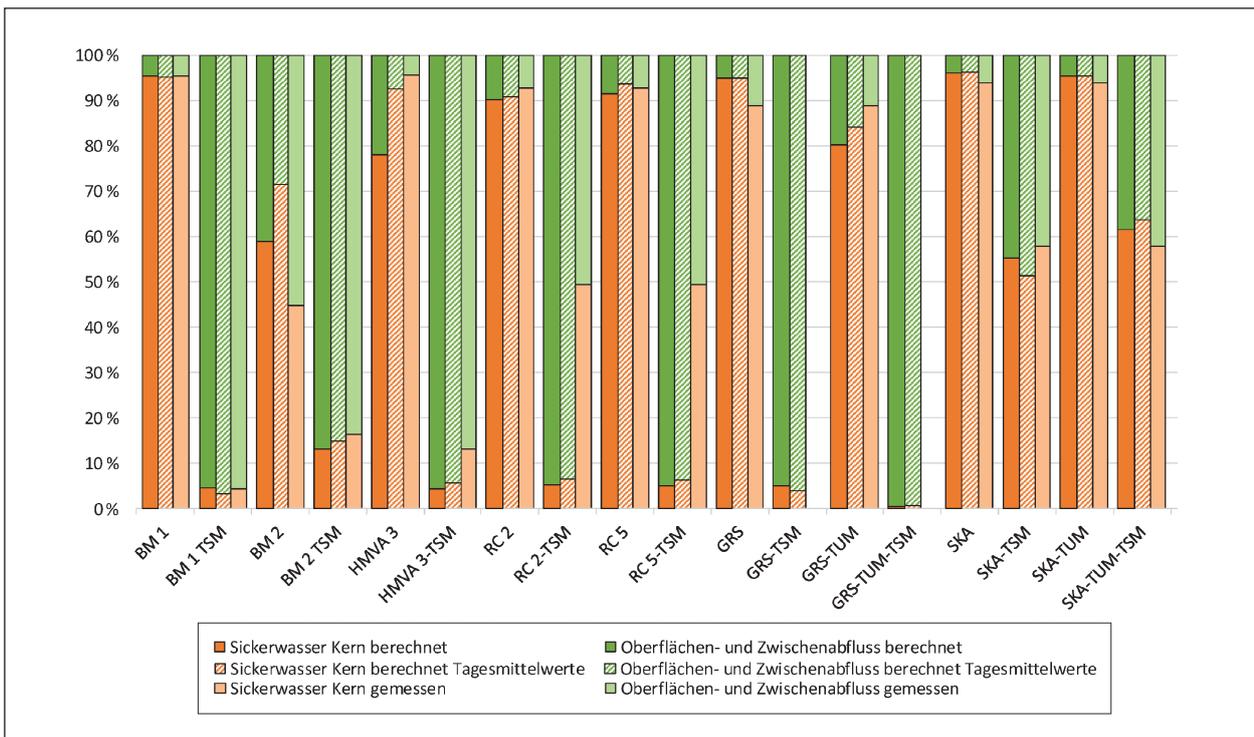


Bild 6-28: Verhältnis des aus dem Kern austretenden Sickerwasser zu Zwischen- und Oberflächenabfluss. Übersicht über Berechnungsergebnisse und Messwerte aller Lysimeter. Die Berechnungsergebnisse sind nach tatsächlichem Regenregime und Tagesmittelwerten unterschieden.

6.3.7 Vergleich der Untersuchungen

Eine Übersicht der Berechnungsergebnisse der Hallenlysimeter in Bild 6-28 zeigt das Verhältnis der Summen von aus dem Kern austretendem Sickerwasser sowie Zwischen- und Oberflächenabfluss. Dabei werden die Berechnungsergebnisse mit tatsächlichem Regenregime (linke Säule) und Tages-

mittelwerten (mittlere Säule) dargestellt. Zum Vergleich sind die gemessenen Werte in der rechten Säule dargestellt.

Die kumulierten Wassermengen von Sickerwasser sowie Oberflächen- und Zwischenabfluss sind in Tabelle 6-2 zusammengestellt.

Tabelle 6-3 zeigt die Verhältnisse der kumulierten Wassermengen von Sickerwasser zu Zwischen- und Oberflächenabfluss.

	Tatsächliches Regenregime		Tagesmittelwerte		Gemessen	
	Sickerwasser	Oberflächen- und Zwischenabfluss	Sickerwasser	Oberflächen- und Zwischenabfluss	Sickerwasser	Oberflächen- und Zwischenabfluss
	[l]	[l]	[l]	[l]	[l]	[l]
BM 1	540,52	26,81	539,70	27,20	554,51	26,55
BM 1 TSM	26,62	554,78	19,24	561,88	26,13	552,17
BM 2	335,31	233,41	407,14	161,38	261,62	322,08
BM 2 TSM	76,55	503,86	86,48	493,24	95,64	487,82
HMVA 3	441,65	124,36	523,47	42,07	526,58	23,84
HMVA 3-TSM	25,86	555,92	33,31	547,79	73,88	488,34
RC 2	502,06	55,33	504,42	51,27	501,44	39,04
RC 2-TSM	30,92	550,74	38,63	542,39	267,54	274,18
RC 5	519,31	48,20	530,72	35,71	501,44	39,04
RC 5-TSM	29,45	552,34	37,46	543,55	267,54	274,18
GRS	537,46	28,70	536,76	28,69	487,79	60,71
GRS-TSM	29,36	551,56	22,73	557,99	0,00	0,00
GRS-TUM	519,76	129,25	524,94	98,31	487,79	60,71
GRS-TUM-TSM	3,64	577,95	3,88	576,75	0,00	0,00
SKA	546,49	22,10	547,24	20,79	552,46	34,93
SKA-TSM	317,12	256,87	295,03	279,03	325,15	236,28
SKA-TUM	542,22	26,42	541,94	26,17	552,46	34,93
SKA-TUM-TSM	353,09	220,36	364,27	208,36	325,15	236,28

Tab. 6-2: Kumulierte Wassermengen von Sickerwasser sowie Oberflächen- und Zwischenabfluss der Hallenlysimeter

	Tatsächliches Regenregime		Tagesmittelwerte		Gemessen	
	Sickerwasser	Oberflächen- und Zwischenabfluss	Sickerwasser	Oberflächen- und Zwischenabfluss	Sickerwasser	Oberflächen- und Zwischenabfluss
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
BM 1	95,3	4,7	95,2	4,8	95,4	4,6
BM 1 TSM	4,6	95,4	3,3	96,7	4,5	95,5
BM 2	59,0	41,0	71,6	28,4	44,8	55,2
BM 2 TSM	13,2	86,8	14,9	85,1	16,4	83,6
HMVA 3	78,0	22,0	92,6	7,4	95,7	4,3
HMVA 3-TSM	4,4	95,6	5,7	94,3	13,1	86,9
RC 2	90,1	9,9	90,8	9,2	92,8	7,2
RC 2-TSM	5,3	94,7	6,6	93,4	49,4	50,6
RC 5	91,5	8,5	93,7	6,3	92,8	7,2
RC 5-TSM	5,1	94,9	6,4	93,6	49,4	50,6
GRS	94,9	5,1	94,9	5,1	88,9	11,1

Tab. 6-3: Verhältnisse der kumulierten Wassermengen von Sickerwasser zu Zwischen- und Oberflächenabfluss der Hallenlysimeter

	Tatsächliches Regenregime		Tagesmittelwerte		Gemessen	
	Sickerwasser	Oberflächen- und Zwischenabfluss	Sickerwasser	Oberflächen- und Zwischenabfluss	Sickerwasser	Oberflächen- und Zwischenabfluss
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
GRS-TSM	5,1	94,9	3,9	96,1		
GRS-TUM	80,1	19,9	84,2	15,8	88,9	11,1
GRS-TUM-TSM	0,6	99,4	0,7	99,3		
SKA	96,1	3,9	96,3	3,7	94,1	5,9
SKA-TSM	55,2	44,8	51,4	48,6	57,9	42,1
SKA-TUM	95,4	4,6	95,4	4,6	94,1	5,9
SKA-TUM-TSM	61,6	38,4	63,6	36,4	57,9	42,1

Tab. 6-3: Fortsetzung

7 Fazit Hallenlysimeter

Die Berechnungen der Hallenlysimeter zeigen, dass für die meisten Bodenmaterialien eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Werten erzielt werden kann. Dies ist jedoch unter dem Aspekt zu betrachten, dass die hydraulischen Parameter der Schichten der Oberfläche an ausgewählten Modellen vorab durch inverse Modellierung angepasst wurden (siehe Kapitel 5.3.1).

Die Nachrechnung der Versuchsaufbauten ohne technische Sicherungsmaßnahme zeigt bei den Materialien BM 2, GRS, SKA, SKA-TUM eine tendenzielle Überschätzung der Sickerwassermengen. Eine solche wurde auch bereits von MICHAELIDES et al. (2013) und KHIRE et al. (1997) festgestellt. Eine Unterschätzung der Sickerwassermengen ergibt sich bei der HMVA 3 und leichte Unterschätzungen bei RC 2, RC 5 und GRS-TUM.

Die Berechnungsergebnisse der Lysimeter mit Dränmatte zeigen zumeist eine leichte, bei RC 2 und RC 5 eine deutliche Unterschätzung der Sickerwassermengen, sowohl bei Ansatz des tatsächlichen Regenregimes als auch bei Ansatz von Tagesmittelwerten. Lediglich beim Kernmaterial SKA-TUM ist eine leichte Überschätzung zu verzeichnen. Der Vergleich bezieht sich jedoch auf Messwerte, die mit einem anderen Dränmattenfabrikat als bei den übrigen Lysimetern generiert wurden. Eine tendenzielle Unterschätzung der Sickerwassermengen bei Systemen mit Dränschicht wurde auch von BENSON et al. (2004) festgestellt.

Bei den experimentellen Untersuchungen mit grobkörnigen Kernmaterialien wurde beobachtet, dass

die Dränmatte die Versickerung eines Großteils des Niederschlagswassers verhindern konnte, indem das Wasser als Zwischenabfluss abgeführt wurde. Es zeigte sich hier also eine Art Kapillarsperreneffekt. Dieser war auch im Modell abbildbar. Die Modellgeometrie kann dabei einen großen Einfluss auf die Ergebnisse haben. So wurde beispielsweise in Voruntersuchungen festgestellt, dass unter bestimmten Geometrien mit grobkörnigen Kernmaterialien kein Kapillarsperreneffekt in der Dränmatte abgebildet werden konnte. In der untersuchten Geometrievariante wurde der Überlauf am rechten Modellrand weggelassen. Eine Sickerrandbedingung unmittelbar am Ende des Dränelements erwies sich als nicht ausreichend, um das lateral im Dränelement abgeführte Wasser abzuleiten.

Bei RC-Material mit Dränmatte teilten sich der experimentell ermittelte Zwischenabfluss und die Kerndurchsickerung zu etwa gleichen Teilen auf. In der Modellierung ergab sich ein Kapillarsperreneffekt in ähnlicher Größenordnung wie bei den übrigen grobkörnigen Materialien. Mit nur rund 5 % Sickerwasseranteil am Gesamtabfluss zeigt die Berechnung eine deutliche Unterschätzung der Sickerwassermengen, deren Ursache nicht abschließend geklärt werden konnte. Die in der Modellierung verwendete Entwässerungskurve der Bodenmaterialien bildet die Wasseraufnahme des Kernmaterials, also dessen Wiederbefeuchtung mit den Kennwerten der Entwässerung und damit nicht korrekt ab. Durch die aus dem Regenregime hervorgehenden zyklischen Wechsel zwischen Be- und Entwässerung würden in der Realität viele Zwischenstadien (Scanning Curves) durchfahren, die in der Simulation nicht berücksichtigt werden. Diesbezüglich wäre eine Weiterentwicklung der Software wün-

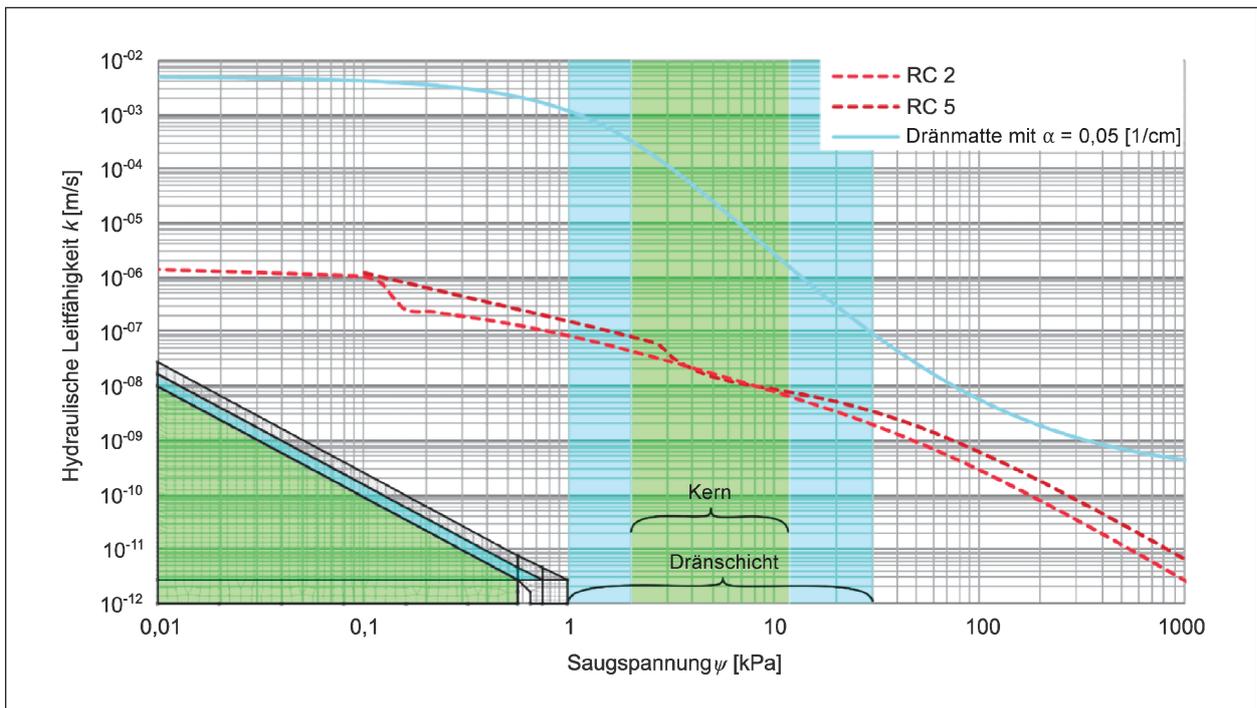


Bild 7-1: Vergleich der hydraulischen Leitfähigkeiten der Dränmatte und der RC-Materialien mit markiertem Saugspannungsbereich, der im Verlauf der Berechnungen durchfahren wird.

schenswert, um den Einfluss von Be- und Entwässerung auf das Ergebnis von Simulationen besser nachvollziehen zu können.

Die Betrachtung des Saugspannungsbereichs, der im Verlauf der Berechnung innerhalb der Dränschicht und im Dammkern durchfahren wird ist in Bild 7-1 dargestellt. Damit erklärt sich auch das sehr ähnliche Verhalten der beiden RC-Materialien, da sie im relevanten Saugspannungsbereich fast identische Verläufe zeigen. Da das Dränelement in diesem Saugspannungsbereich eine deutlich höhere Leitfähigkeit besitzt als das RC-Material, ist die Aufnahme von größeren Wassermengen in den Kern nicht zu erwarten. Bemerkenswert ist jedoch, dass in der experimentellen Untersuchung große Anteile des Niederschlagswassers unterhalb der Dränmatte, bzw. im oberen Bereich des RC-Materials abflossen. Diese wurden als Sickerwasser über die Saugplatten und nicht im Überlauf des Lysimeters erfasst. Die Auswertung der experimentellen Sickerwasseranteile an den einzelnen Saugplatten bestätigt für beide verwendeten Dränmatteprodukte, dass große Teile des Sickerwassers im vorderen Drittel am Böschungsfuß auftraten. Häufig lag die an den vorderen Saugplatten erfasste Wassermenge zwischen 40 % und 80 % des gesamten Sickerwassers. Es könnte auch zu zeitweiser Umläufigkeit an der Trennwand zwischen Überlauf und Lysime-

ter gekommen sein, wobei eine Entwässerung der Dränmatte in den Dammbereich unmittelbar vor Erreichen des Überlaufs stattgefunden haben könnte. Weitere Ursachen einer Abweichung sind auf unterschiedliche Materialeigenschaften der von SCHARNAGL und DURNER (2014) untersuchten und für die Modellierung verwendeten RC-Materialien und des für die experimentellen Untersuchungen verwendeten RC-Materials zurückzuführen.

Die Berechnungsergebnisse werden auch von den zugrundeliegenden Niederschlagsintensitäten beeinflusst. So ist bei den meisten Kernmaterialien ein geringer Unterschied zwischen dem Ansatz des tatsächlichen Regenregimes und von Tagesmittelwerten erkennbar. Die Unterschiede in den Sickerwassermengen fallen aber materialabhängig unterschiedlich stark aus. Bei kiesigem Boden (BM 1) und bei GRS war kaum ein Unterschied festzustellen, während bei bindigem Boden (BM 2) und der HMVA besonders deutliche Unterschiede von bis zu 81 l (kumuliert über die gesamte Berechnungsdauer) auftraten, was 14,5 % der gesamten Abflussmenge entspricht.

Zu den Berechnungen mit GRS und SKA lässt sich festhalten, dass die nach der Korngrößenverteilung und der Trockendichte aus Datenbanken ausgewählten Böden eine sehr gute Übereinstimmung mit

den Messergebnissen ergaben. Auch die Berechnungen mit den labortechnisch ermittelten hydraulischen Eigenschaften lagen nah an den Messergebnissen aus den Lysimeterversuchen.

Insgesamt lassen die Ergebnisse die Schlussfolgerung zu, dass sich die Größenordnung von Sickerwassermengen bei Kenntnis der hydraulischen Parameter der verwendeten Bodenmaterialien gut abschätzen lässt. Wie die Variation der hydraulischen Parameter der Dränschicht zeigt, hat die Abbildung der oberflächennahen Schichten (einschließlich der Dränschicht) einen großen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse des Wasserhaushalts des gesamten Bauwerks. Die Kenntnis der hydraulischen Parameter sowohl des Kernmaterials als auch der Schichten an der Oberfläche ist daher von zentraler Bedeutung und beeinflusst die Qualität der Berechnungsergebnisse maßgeblich.

8 Modellierung der Freilandlysimeter

8.1 Allgemeines

Die in den Untersuchungen betrachtete Freilandlysimeteranlage befindet sich in Augsburg an einer zweispurigen Straße. Hier wurden in acht Lysimeterbecken verschiedene Bauweisen von Straßendämmen realisiert. Über den Versuchszeitraum vom 17.09.2010 bis 31.03.2013 wurden die Wassermengen aus den einzelnen Lysimeterbecken erfasst, wobei entsprechend der Sickerwasserfassung zwischen der Durchsickerung des Dammkerns und dem Oberflächenabfluss unterschieden wurde. Weitere Versuchszeiträume folgten. Diese sind jedoch nicht Gegenstand dieses Berichts. Die einzelnen Bauweisen sind in Bild 8-1 zusammengestellt. Sie unterscheiden sich hinsichtlich des im Dammkern eingebauten Materials und des

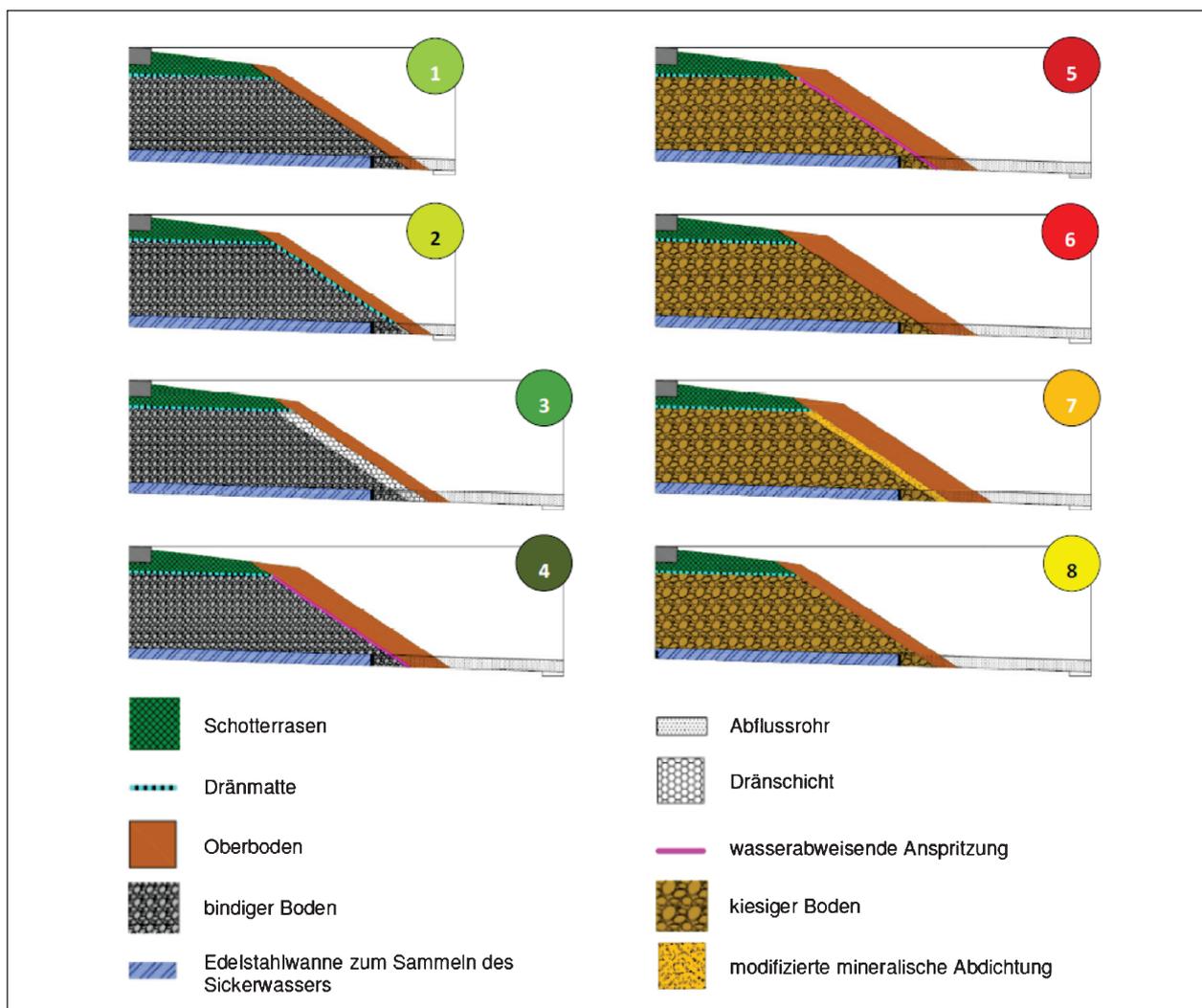


Bild 8-1: Aufbau der Lysimeter mit den realisierten technischen Sicherungsmaßnahmen (BRAND et al., 2016)

Schichtaufbau im Böschungsbereich. Die Lysimeter 1 bis 4 wurden im Dammkern aus bindigem Material und die Lysimeter 5 bis 8 aus kiesigem Material errichtet. Zwischen dem Bankettmaterial und dem Dammkern (d. h. unterhalb des Banketts) wurde in allen Lysimetern eine Dränmatte eingelegt, aber kein Abdichtungselement. Im Böschungsbereich wurde der Aufbau variiert. Teilweise wurde der Oberboden (10 cm bzw. 20 cm dick) direkt auf das Kernmaterial aufgebracht (Lysimeter 1, 6, 8), teilweise wurde unterhalb des Oberbodens eine Dränmatte bzw. Dränschicht eingebaut (Lysimeter 2, 3, 6) und teilweise wurde auf den Dammkern zunächst ein Abdichtungselement in Form einer wasserabweisenden Anspritzung (Lysimeter 4 und 5) bzw. einer modifizierten mineralischen Abdichtung (Lysimeter 7) aufgebracht (BRAND et al., 2016).

Bild 8-2 zeigt ein Foto der Lysimeteranlage.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens werden sechs der in Bild 8-1 dargestellten Lysimeterbecken mit dem Programm Vadose/W modelliert. Im Einzelnen handelt es sich dabei um die Lysimeter 1, 2, 3, 6, 7 und 8. Die Modellierung wurde in Zeitschritten von zwei Stunden über 927 Tage ausgeführt. Daraus ergeben sich 11.124 einzelne Berechnungsschritte.



Bild 8-2: Lysimeteranlage in Augsburg

8.2 Modellgeometrie

Die Modellgeometrie der Freilandlysimeter wurde weitgehend gemäß der tatsächlichen Geometrie gewählt. In Voruntersuchungen wurden Variationen mit

- einer 1,0 m mächtigen Kiesschicht unterhalb des Dammaufbaus und
- Ausrundungen an Böschungsschulter und dem Böschungsfuß

untersucht.

Für die Kiesschicht unterhalb des Dammkerns hat sich im Hinblick auf die Wasserableitung letztendlich eine 0,1 m mächtige Kiesschicht als sinnvoll erwiesen, da diese für annähernd realistische Druckverhältnisse an der Basis des Lysimeterkerns von ca. 0 kPa sorgt. Die aus numerischen Gründen in GEO-SLOPE (2014) empfohlene Ausrundung der der Steigungsänderungen der Böschung hat sich aufgrund der kleinen Dimensionen der Lysimeter bei der Ergebnisauswertung als ungünstig erwiesen. Daher wurden die Übergänge zwischen Bankett und Böschung als einfache Winkel ausgebildet. Ein darauf zurückzuführender negativer Einfluss auf die Berechnungsergebnisse wurde nicht beobachtet.

Die aufgrund der Erkenntnisse der Voruntersuchungen letztendlich gewählte Modellgeometrie ist in Bild 8-3 exemplarisch für Lysimeter 1 (Standardbauweise mit bindigem Kern) mit den nachfolgend beschriebenen Randbedingungen dargestellt. Details der übrigen Lysimeter sind dem Anhang 2 zu entnehmen.

An zwei Stellen wurden in jedem Lysimeter Mehrparametersonden M1 und M2 zur Erfassung von Bo-

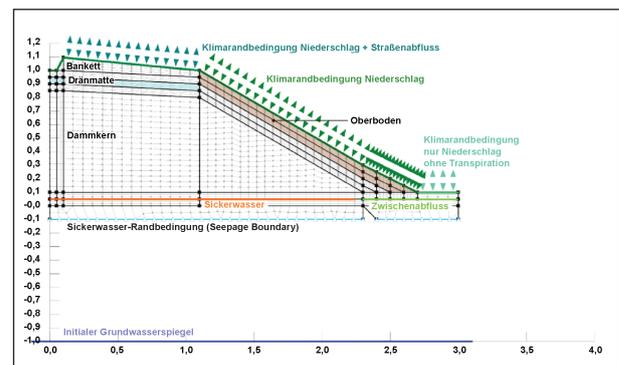


Bild 8-3: Modellgeometrie des Freilandlysimeters Nr. 1 (Standardbauweise mit bindigem Kern, nach BRAND et al., 2016) mit Angabe der Randbedingungen

denfeuchte, Bodentemperatur und elektrischer Leitfähigkeit eingebaut. Die Lage der Sonden ist Bild 8-4 zu entnehmen. Im Rahmen der Berechnungen wurde an diesen Stellen der Verlauf des volumetrischen Wassergehalts ausgewertet.

8.3 Bodenkennwerte

Als Dammbaustoffe wurden in den Freilandlysimetern die Bodenmaterialien BM 1 und BM 2 eingebaut. Entsprechend wurden dieselben hydraulischen Kennwerte wie in den Simulationen der Hallenlysimeter verwendet (siehe Kapitel 5.2.1).

Da für das Bankettmaterial und den Oberboden keine hydraulischen Kennwerte zur Verfügung standen, wurden für die Berechnungen anhand der zur Verfügung gestellten Bodenkennwerte Annahmen getroffen. Für das Bankettmaterial wurde dabei der Boden „GU 0,3“ nach EKBLAD und ISACSSON (2007), ein schluffiger Kies, verwendet. Die van

Genuchten-Parameter sind in Tabelle 8-1 aufgelistet. Der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert des Materials wurde im Proctoroptimum ($\rho_{pr} = 2,121 \text{ g/cm}^3$; $w_{pr} = 6,3 \%$) zu $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ bestimmt (BAST, 2016).

Für den Oberboden im Böschungsbereich wurden unter Berücksichtigung der Korngrößenverteilung die Kennwerte eines Lehmbodens aus Loccum-Münchehagen aus der Soilvision-Datenbank (FREDLUND, 2011) verwendet. Der Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens wurde mit $k = 8,7 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ aus der Datenbank übernommen, da die exakte Einbaudichte des Oberbodens nicht bekannt ist. Ein Vergleich der tatsächlichen Korngrößenverteilungen mit denen der Böden aus der Datenbank, bzw. der Literatur ist in Bild 8-5 gegeben.

In Lysimeter Nr. 7 wurde zwischen einer 20 cm mächtigen Oberbodenschicht und dem kiesigen Dammkern eine modifizierte mineralische Abdichtung eingebaut. Für diese wurden die von SCHANZ et al. (2004) für Trisoplast® im Proctoroptimum ermittelten van Genuchten-Parameter (siehe Tabelle 8-1) verwendet.

Die hydraulischen Kennwerte für Bankett, Oberboden und die modifizierte mineralische Abdichtung sind in Bild 8-6 und Bild 8-7 dargestellt.

Zwischen Bankett und Dammkern waren in den Lysimetern Dränmatten eingebaut. Bei Lysimeter Nr. 2 ist diese zwischen Oberboden und Dammkern bis zum Dammfuß verlängert. Für das Dränelement

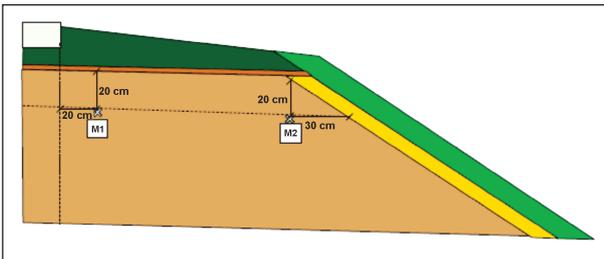


Bild 8-4: Lage der Mehrparameter-Sonden M1 und M2 (aus BRAND et al., 2016)

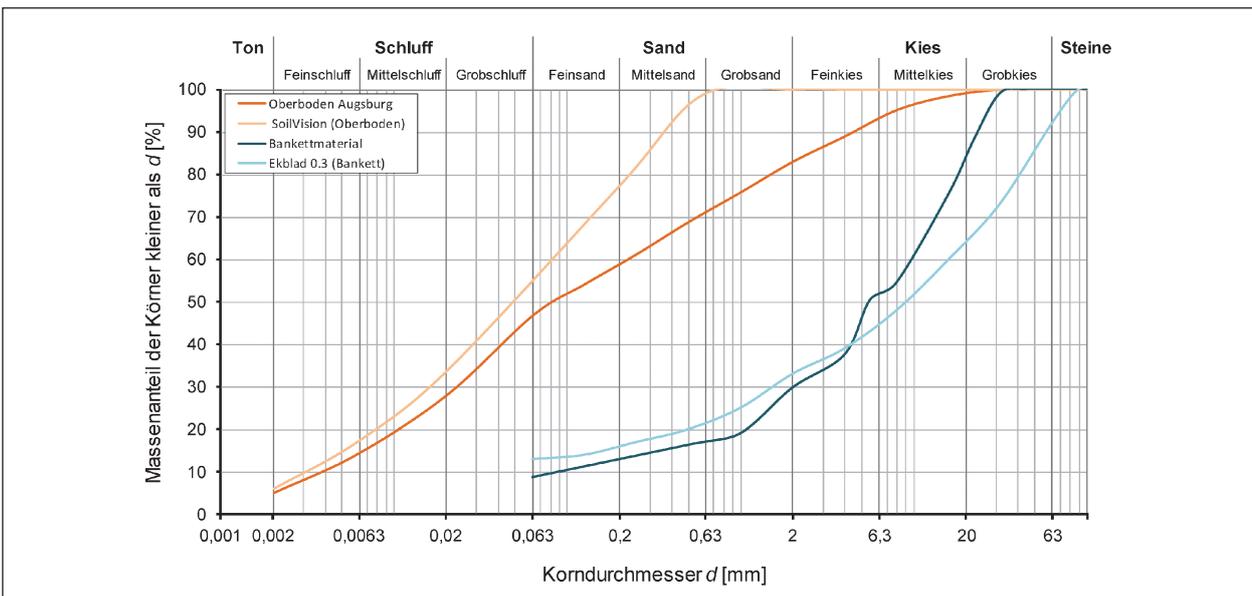


Bild 8-5: Korngrößenverteilungen des Bankettmaterials und des Oberbodens im Vergleich zu den verwendeten Böden aus der Datenbank Soilvision und aus EKBLAD und ISACSSON (2007)

DIN 18196	GU 0,3; schluffiger Kies	-
Schicht	Bankettmaterial	Modifizierte mineralische Abdichtung
k [m/s]	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-12}$
θ_s [-]	0,24	0,4234
θ_r [-]	0,024	0,0336
α [cm-1]	0,085	$4,791 \cdot 10^{-7}$
n	1,73	0,324
$m = 1 - (1/n)$	0,42	13,4

Tab. 8-1: van Genuchten-Parameter des Bodens GU 0,3 nach EKBLAD und ISACSSON (2007) für das Bankettmaterial und Trisoplast® nach SCHANZ et al. (2011) für die modifizierte mineralische Abdichtung

wurden die im Rahmen der Sensitivitätsanalyse für die Hallenlysimeter ermittelten hydraulischen Parameter des GU nach EKBLAD und ISACSSON (2007) mit $\alpha = 0,05$ [1/cm] verwendet (siehe Kapitel 6.2).

Die zur Beschreibung des Wärmetransportes verwendeten thermischen Parameter, wie die Wärmeleitfähigkeit λ_{solids} und die volumenbezogene spezifische Wärmekapazität c_p wurden für die verschiedenen Bodenschichten auf Basis der Tabellenwerte der VDI-Richtlinie 4640 (VDI, 2010) geschätzt und sind in Tabelle 8-2 aufgelistet.

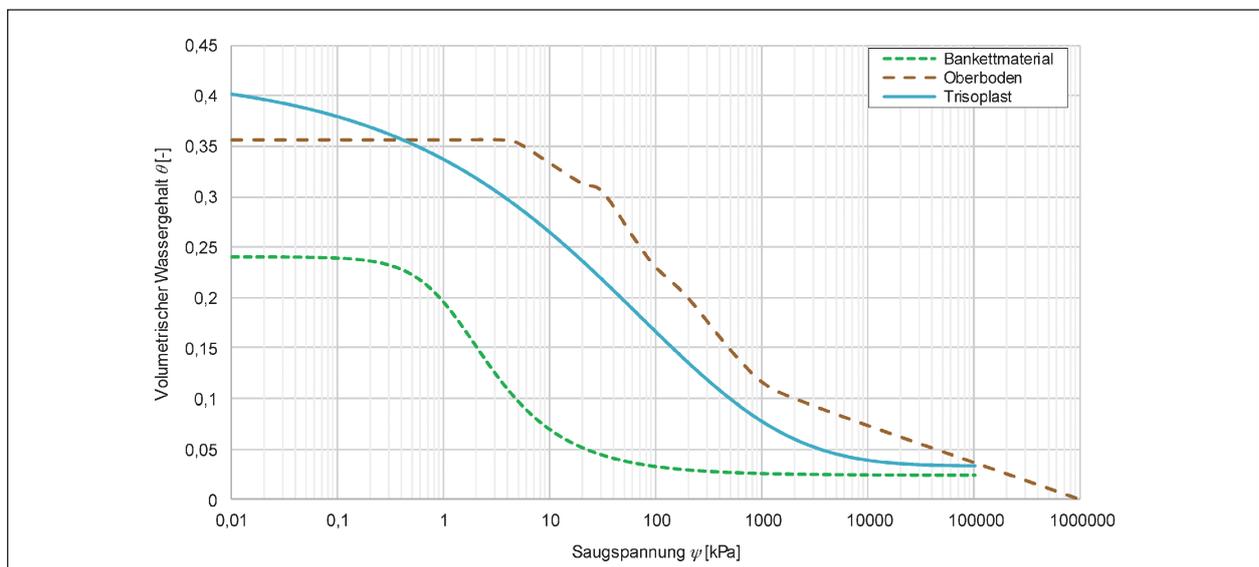


Bild 8-6: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung des Bankettmaterials, Oberbodens und der modifizierten mineralischen Abdichtung

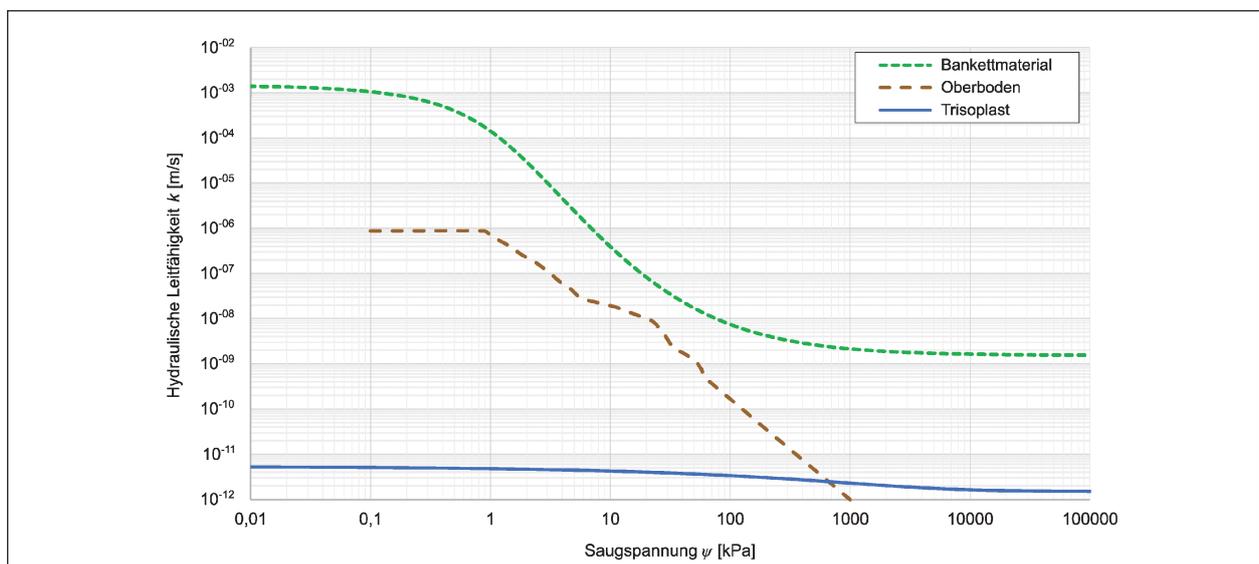


Bild 8-7: Hydraulische Leitfähigkeit des Bankettmaterials, Oberbodens und der modifizierten mineralischen Abdichtung

Schicht	BM 1 – kiesiger Boden	BM 2 – bindiger Boden	Bankett- material	Oberboden	Dränschicht	Modifizierte minera- lische Abdichtung
DIN 18196	GW	SU*	GU	-	GU	-
λ_{solids} [J/(s·m·°C)]	2,4	1,8	2,4	1,8	2,4	1,8
c_{p_solids} [kJ/(g·°C)]	$7,1 \cdot 10^{-4}$	$1,67 \cdot 10^{-3}$	$7,1 \cdot 10^{-4}$	$1,67 \cdot 10^{-3}$	$7,10 \cdot 10^{-4}$	$1,67 \cdot 10^{-3}$

Tab. 8-2: Thermische Parameter nach VDI-Richtlinie 4640 (VDI, 2010)

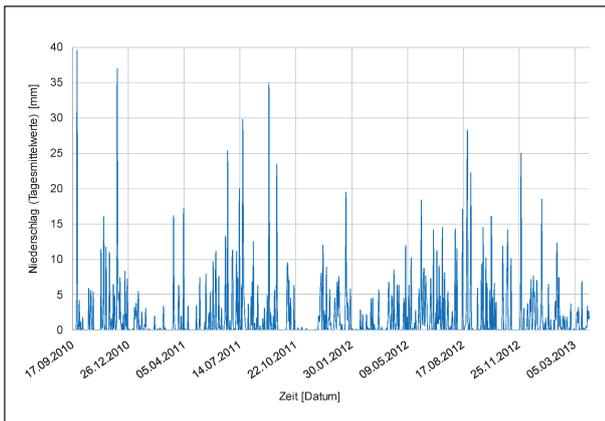


Bild 8-8: Regenregime an der Lysimeteranlage Augsburg

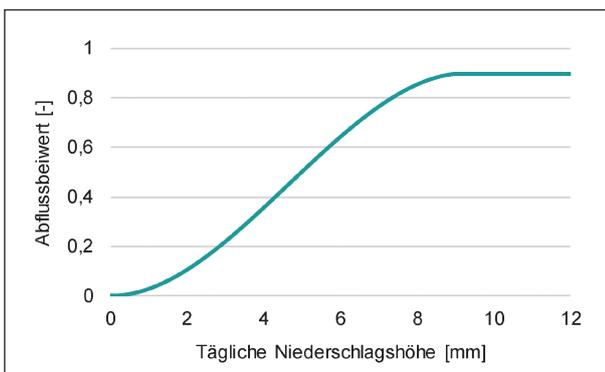


Bild 8-9: Niederschlags-Abflusskurve für Tagesniederschläge auf einer versiegelten Fläche (nach BÜRGER et al., 2008)

8.4 Hydraulische Randbedingungen

Neben der Klimarandbedingung auf der Oberfläche wurde an der Unterseite des Lysimeters eine Sickerandbedingung (Water Flux $0 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$, Potential Seepage Face Review) angesetzt, die im Falle eines positiven Gradienten einen Wasserfluss aus dem Modell heraus ermöglicht. Ein Wasserfluss von unten in das Modell hinein ist, wie in der Realität nicht möglich. An der Unterseite des Modells wurde in Variantenuntersuchungen auch die Randbedingung „Unit Gradient“ untersucht, die eine ungesättigte Wasserbewegung in Richtung der Schwerkraft zur Tiefe hin darstellt. Dieser Ansatz

wurde jedoch aufgrund numerischer Probleme verworfen. Der linke und rechte Modellrand wird als dichte Lysimeterwand angenommen. Zwischen der Auffangwanne, die das Sickerwasser aus dem Kern sammelt und der Wanne, die Zwischen- und Oberflächenabfluss auffängt, ist in der Modellgeometrie ein kleiner Bereich ausgespart, um einen Wasserfluss im Modell zwischen den beiden Auffangwannen vollständig ausschließen zu können. Die Ränder dieses Bereichs sind ebenfalls dicht.

8.5 Klima-Randbedingungen

Die Simulationen umfassen den Zeitraum vom 17.09.2010 bis zum 31.03.2013. Für die Berechnungen wurden die Klimarandbedingungen als Tagesmittelwerte angesetzt. Niederschläge, Temperaturen etc. werden dabei sinusförmig über einen Tag verteilt angenommen.

8.5.1 Niederschlag und Straßenabfluss

Im betrachteten Zeitraum wurden außer dem Niederschlag (siehe Bild 8-8) keine Klimadaten in unmittelbarer Nähe der Freilandlysimeter aufgezeichnet. Daher wurden, abgesehen vom Niederschlag, die Daten des Deutschen Wetterdienstes der Wetterstation am Augsburger Flughafen in ca. 3,85 km (Luftlinie) Entfernung herangezogen.

Neben dem Niederschlag, der auf das Lysimeter auftrifft, fließt von der Seite der Straßenabfluss den einzelnen Lysimetern zu. Die Höhe des zufließenden Straßenabflusses hängt von der Niederschlagsmenge, dem Einzugsgebiet des jeweiligen Lysimeters und der Verdunstung im Bereich der Straße ab. Letzteres kann über einen Abflussbeiwert berücksichtigt werden. Für Tagesniederschläge auf einer versiegelten Fläche geben BÜRGER et al. (2008) eine Niederschlags-Abflusskurve an. Diese stellt den empfohlenen Abflussbeiwert in Abhängigkeit von der täglichen Niederschlagshöhe dar (siehe Bild 8-9).

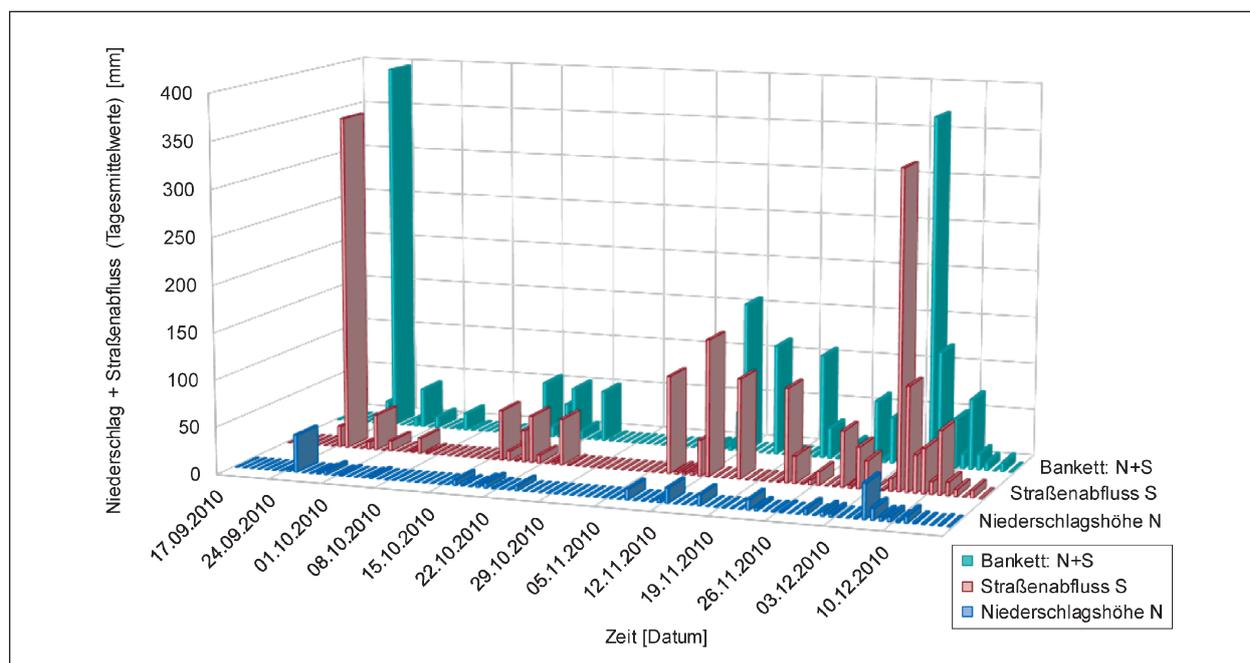


Bild 8-10: Niederschlag im Bereich des Bankettes von Lysimeter 1 als Summe aus direkt auftreffendem Niederschlag und Straßenabfluss – Darstellung der ersten drei Monate des Simulationszeitraums

Bei Kenntnis der Einzugsfläche des modellierten Bankettabschnitts kann zur Ermittlung des anfallenden Straßenabflusses die Niederschlagsmenge mit dem Abflussbeiwert multipliziert werden. Da bei der Augsburger Lysimeteranlage die Abflussverhältnisse relativ komplex sind, wurde für die vorliegenden Berechnungen auf die Verwendung eines Abflussbeiwertes nach BÜRGER et al. (2008) verzichtet. BRAND et al. (2016) stellten im Laufe der Lysimeteruntersuchungen fest, dass die Größe der Einzugsflächen der einzelnen Lysimeter sehr unterschiedlich ist und zudem in Abhängigkeit der Niederschlagsintensität variiert. Bei hohen Niederschlagsintensitäten wurde z. B. eine Busspur auf der gegenüberliegenden Straßenseite hydraulisch wirksam. Die Ermittlung der Einzugsgebiete der einzelnen Lysimeterbecken erfolgte mit unterschiedlichen Methoden und wird in BRAND et al. (2016) ausführlich diskutiert. Für die numerischen Berechnungen wurden die als Methode 7 bezeichneten, quartalsweise ermittelten Einzugsflächen verwendet. Danach wurde das jeweilige Einzugsgebiet anhand der Summen aus Sickerwasser, sowie Zwischen- und Oberflächenabfluss in Bezug zur Regenmenge in den verdunstungsarmen Monaten (Winterhalbjahr) abgeschätzt. Da die Verdunstung und das auf der Straße verbleibende Restwasser in der Bestimmung der Einzugsfläche bereits enthalten sind, wurde der Straßenabfluss nicht zusätzlich mit einem Abflussbeiwert korrigiert. Es ist aber zu beachten, dass damit die Straßenabflüsse in den Som-

mermonaten, in denen eine größere Verdunstung stattfindet, ggf. überschätzt werden. Da die Höhe der Verdunstung aber sowohl vom Klima als auch von der Niederschlagshöhe abhängt und da gemäß den Ausführungen in BRAND et al. (2016) bereits erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der ermittelten Einzugsflächen bestehen, wurde auf eine Korrektur des Straßenabflusses zugunsten einer höheren Verdunstung in den Sommermonaten verzichtet.

Im Modell wird der Straßenabfluss als zusätzlicher gleichmäßig verteilter Niederschlag im Bereich des Bankettes angesetzt. Die sich im Bereich des Bankettes daraus ergebenden Niederschläge sind exemplarisch für die ersten drei Monate des Berechnungszeitraums für Lysimeter 1 in Bild 8-10 dargestellt. Im Böschungsbereich und im Bereich der Auffangwanne wird nur der Niederschlag angesetzt.

Die Klima-Randbedingungen sind in drei Bereiche unterteilt: Bankett, Böschung und Auffangwanne. Im Bankettbereich wird dem Niederschlag der Straßenabfluss zugeschlagen, an der Böschung und im Bereich der Auffangwanne wird nur der Niederschlag angesetzt.

8.5.2 Relative Luftfeuchtigkeit

Die für die Eingabe in Vadose/W erforderlichen Werte der maximalen und minimalen täglichen Luft-

feuchtigkeit wurden aus den Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) vom Flughafen Augsburg analog zu den Untersuchungen von KOUKOU-LIDOU und BIRLE (2019) abgeleitet.

Die relative Luftfeuchtigkeit RH [%] ist definiert als:

$$RH = 100 \cdot \frac{e_a}{e_0(T)} \quad (8.1)$$

mit

e_a tatsächlicher Dampfdruck [kPa]

$e_0(T)$ Sättigungsdampfdruck [kPa]

T Lufttemperatur [°C]

Der Sättigungsdampfdruck $e_0(T)$ und der tatsächliche Dampfdruck e_a können durch die folgenden Gleichungen nach ALLEN et al. (1998) berechnet werden:

$$e_0(T) = 0,6108 \cdot e^{\frac{17,27 \cdot T}{T + 237,3}} \quad (8.2)$$

mit T in [°C] und

$$e_a = RH_{mittel} \cdot \frac{e_0(T_{max}) + e_0(T_{min})}{2} \quad (8.3)$$

mit

T_{max} maximale Tagestemperatur [°C]

T_{min} minimale Tagestemperatur [°C]

RH_{mittel} mittlere relative Luftfeuchtigkeit definiert als der Mittelwert aus minimaler und maximaler relativer Luftfeuchtigkeit

Formal entspricht die mittlere relative Luftfeuchtigkeit RH_{mittel} gemäß obiger Definition nicht der vom DWD angegebenen durchschnittlichen relativen Luftfeuchtigkeit. Der Vergleich der mittleren relativen Luftfeuchtigkeit mit dem Tagesdurchschnitt der relativen Luftfeuchtigkeit zeigt jedoch anhand von Messungen an der Lysimeteranlage aus dem Jahre 2015 keinen signifikanten Unterschied. Den Nachweis dazu erbrachte ein Zweistichproben t-Test mit abhängigen Stichproben ($P_{zweiseitig}(T \leq t) = 1,05 > 0,05$). Daher können für den Simulationszeitraum die vom DWD verfügbaren Daten der durchschnittlichen relativen Luftfeuchtigkeit zur Ermittlung des tatsächlichen Dampfdrucks e_a verwendet werden.

Die minimale relative Luftfeuchtigkeit tritt bei der maximalen Temperatur auf und die maximale Luftfeuchtigkeit bei der minimalen Temperatur. Mit den

Temperaturdaten vom DWD können die für Vadose/W erforderlichen Luftfeuchtwerte folgendermaßen abgeschätzt werden:

$$RH_{min} = 100 \cdot \frac{e_a}{e_0(T_{max})} \quad (8.4)$$

und

$$RH_{max} = 100 \cdot \frac{e_a}{e_0(T_{min})} \quad (8.5)$$

8.5.3 Nettostrahlung

Zur Berechnung der Evapotranspiration benötigt Vadose/W unter anderem die Nettostrahlung R_n . Diese wird, wie die übrigen Klimadaten als Tageswerte [MJ/(d · m²)] benötigt. An der Wetterstation am Flughafen Augsburg erfasst der DWD dafür jedoch keine Messwerte. Die Nettostrahlung kann nach ALLEN et al. (1998) auch aus den zur Verfügung stehenden Messwerten, wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Sonnenscheindauer abgeschätzt werden. Zusätzlich wurden ab dem Jahr 2015 direkt an der Lysimeteranlage Strahlungsdaten erfasst. Um eine möglichst präzise Abschätzung der Strahlungswerte für den Simulationszeitraum zu erhalten, wurden diese an den Messwerten aus 2015 kalibriert. Dabei wurde entsprechend der Vorgehensweise von KOUKOULIDOU und BIRLE (2019) vorgefahren.

Die Nettostrahlung R_n [MJ/m² · d] ist definiert als Differenz aus der von der Erdoberfläche absorbierten kurzwelligeren Sonneneinstrahlung R_{ns} und der von der Erdoberfläche emittierten langwelligen Strahlung R_{nl} :

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (8.6)$$

Die kurzwellige Solarstrahlung R_s (auch als Globalstrahlung bezeichnet) wird bei Auftreffen auf der Erdoberfläche zum Teil reflektiert und zum Teil absorbiert. Das Verhältnis ist dabei abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit, bzw. der Albedo α . Für Gras wird $\alpha = 0,23$ angegeben (ALLEN et al. 1998):

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_s \quad (8.7)$$

Die von der Erdoberfläche emittierte langwellige Strahlung R_{nl} lässt sich nach Gleichung 8.8 abschätzen:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right] (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (8.8)$$

mit

$T_{max,K}$ maximale Tagestemperatur [K]

$T_{min,K}$ minimale Tagestemperatur [K]

e_a tatsächlicher Dampfdruck [kPa]

R_s kurzwellige Solarstrahlung [$\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$]

R_{so} Strahlung bei klarem Himmel (Clear-Sky-Strahlung) [$\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$]

Die Zusammenhänge der einzelnen Strahlungen sind in Bild 8-11 vereinfacht dargestellt.

Die Clear-Sky-Strahlung R_{so} berechnet sich aus der Extraterrestrischen Strahlung R_a für eine bestimmte Höhe über dem Meeresspiegel z [mNN]:

$$R_{so} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z) \cdot R_a \quad (8.9)$$

Die extraterrestrische Strahlung R_a für einen bestimmten Standort richtet sich nach dem Breitengrad und ist definiert als:

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r \cdot (\omega_s \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s) \quad (8.10)$$

mit

G_{sc} Solarkonstante ($0,0820 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$)

d_r inverse relative Entfernung Erde-Sonne

ω_s Sonnenuntergangs-Stundenwinkel [rad]

φ Breitengrad des Standorts [rad]

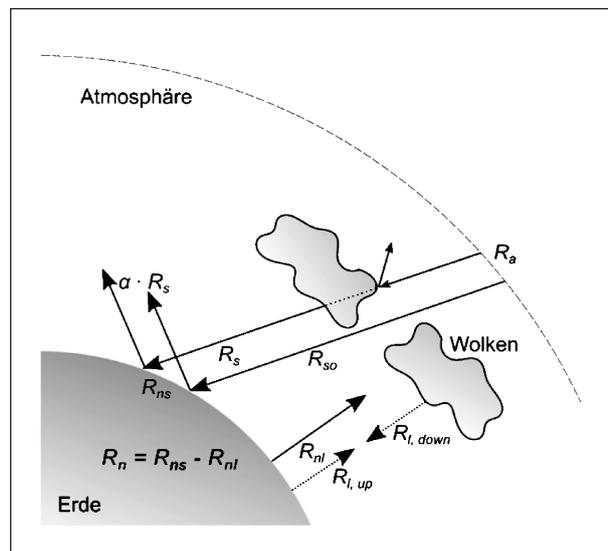


Bild 8-11: Aufteilung der extraterrestrischen Strahlung nach ALLEN et al. (1998), bzw. KOUKOULIDOU und BIRLE (2019) (Grafik angepasst)

δ jahreszeitliche Abschwächung der Sonneneinstrahlung [rad]

Die inverse relative Entfernung zwischen Erde und Sonne d_r und die solare Abschwächung δ werden wie folgt berechnet:

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (8.11)$$

$$\delta = 0,409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J - 1,39\right) \quad (8.12)$$

wobei J der Tag des Jahres zwischen 1 (1. Januar) und 365 bzw. 366 (31. Dezember) ist.

Der Stundenwinkel des Sonnenuntergangs wird folgendermaßen ermittelt:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \varphi \cdot \tan \delta) \quad (8.13)$$

Zur Bestimmung der Nettostrahlung für die Verwendung als Klimarandbedingung in numerischen Modellierungen wurden verschiedene Ansätze verwendet. MICHAELIDES et al. (2013) ermittelten die Netto-Strahlung aus der maximalen Tagestemperatur T_{max} [°C] und der täglichen Sonnenscheindauer t_{Sonne} [h] unter Einbeziehung von drei Anpassungsparametern:

$$R_n = 0,18 \cdot T_{max} \cdot 1,36^{t_{Sonne}^{0,494}} \quad (8.14)$$

ZEILER (2014) stellte einen Ansatz für die Ermittlung der kurzwelligen Solarstrahlung aus der Sonnenscheindauer t_{Sonne} [h] und der Clear-Sky-Strahlung R_{so} für den Standort Marnitz mit den Anpassungsparametern a und b vor (Gleichung 8.15):

$$R_s = R_{so} \cdot a^{b^{t_{Sonne}}} \quad (8.15)$$

Die Nettostrahlung wurde dann mithilfe der Gleichungen 8.6 bis 8.13 berechnet.

Ab dem Jahr 2015 wurde an den Lysimeterbecken in Augsburg direkt über der Bodenoberfläche die kurzwellige Solarstrahlung gemessen. Zur Ermittlung der Anpassungsparameter a und b wurde die aus den DWD-Wetterdaten nach den Gleichungen 8.6 bis 8.13 abgeleitete kurzwellige Solarstrahlung R_s mit diesen Messdaten verglichen. Zur besseren Anpassung der berechneten Werte an die Messdaten wurden entsprechend der Vorgehensweise von KOUKOULIDOU und BIRLE (2019) in Gleichung (8.15) zwei weitere Anpassungsparameter c und d eingeführt:

$$R_s = c \cdot R_{so} \cdot a^{b^{t_{Sonne}}} + d \quad (8.16)$$

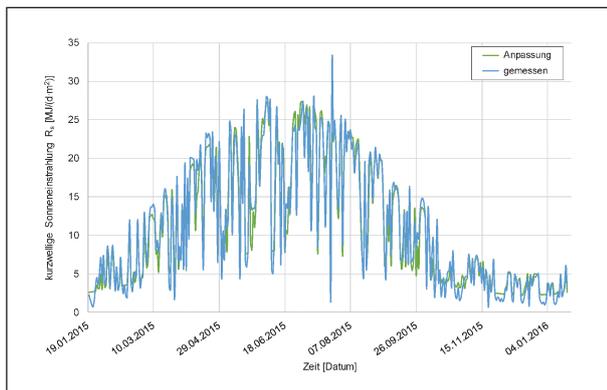


Bild 8-12: Vergleich der berechneten kurzwelligen Sonneneinstrahlung (Globalstrahlung) mit den Messwerten aus 2015

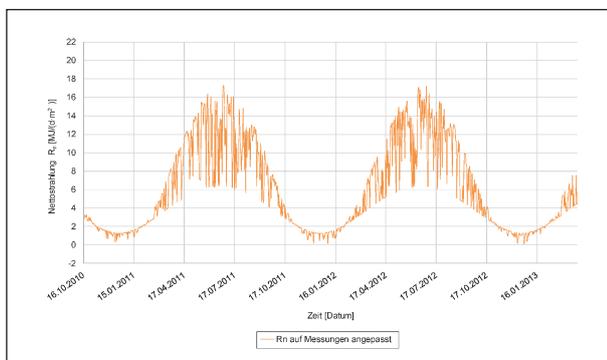


Bild 8-13: Aus Wetterdaten ermittelte Nettostrahlung für den Simulationszeitraum

Aus einem Vergleich der Messwerte der kurzwelligen Solarstrahlung an der Lysimeteranlage aus dem Jahr 2015 mit den aus den Klimadaten des Flughafens Augsburg für denselben Zeitraum ermittelten Werten wurden folgende Anpassungsparameter zur Ermittlung der Nettostrahlung abgeleitet. Die Ermittlung der Parameter erfolgte dabei mit der Methode der kleinsten Quadrate der Fehler. Dabei ergaben sich die folgenden Anpassungsparameter:

$$R_s = 0,8141 \cdot R_{so} \cdot 0,2522^{0,8224 t_{\text{Sonne}}} + 0,7708 \quad (8.17)$$

Bild 8-12 zeigt die aus den Wetterdaten nach Gleichung 8.16 berechnete Solarstrahlung (grüne Kurve) im Vergleich mit den Messwerten aus 2015 (blaue Kurve).

Für den Simulationszeitraum ergibt sich mit der kurzwelligen Solarstrahlung R_s aus Gleichung 8.17 unter Anwendung der Gleichungen 8.6 bis 8.13 die in Bild 8-13 dargestellte Nettostrahlung R_n .

8.5.4 Bewuchs

Die Bodenbedeckung der Bankettbereiche und der Böschungen der Lysimeter bestand aus Gras. Die

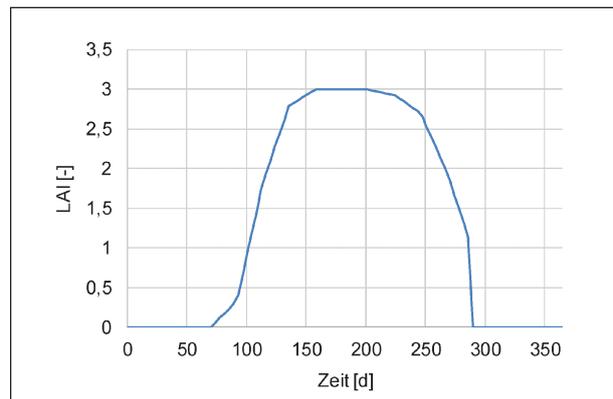


Bild 8-14: Jahresverlauf des Blattflächenindex (LAI, nach GEO-SLOPE, 2017)

Entwicklung des LAI über ein Jahr wurde entsprechend Bild 8-14 abgeschätzt (GEO-SLOPE, 2017). Dabei wurde für die Sommermonate von einem guten Grasbewuchs (LAI = 3) ausgegangen. Näheres ist auch dem Kapitel 5.3.1 zu entnehmen.

Die Plant-Moisture-Limiting Function wurde analog zu den Hallenlysimetern verwendet (siehe Bild 5-11, Kapitel 5.3.1).

Bewuchs wird sowohl auf dem Bankett als auch im Dammbereich als Randbedingung angesetzt. Im Bereich der Auffangwanne werden ausschließlich Niederschlag und Verdunstung angesetzt, da dieser Bereich stets von Bewuchs freigehalten wurde.

8.6 Anfangsbedingungen

Als Anfangsbedingung wurde für die Freilandlysimeter ein stationärer Zustand unter Berücksichtigung der sich bei einem Grundwasserspiegel von -1 m einstellenden hydrostatischen Porenwasserdruckverteilungen angenommen. Dies stellt eine für die Stabilität der numerischen Berechnung günstige Ausgangssituation dar, da sich so keine extremen Saugspannungsunterschiede zwischen den einzelnen Schichten ergeben. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Dimensionen der Lysimeter gleicht sich der Ausgangszustand nach wenigen Berechnungsschritten den tatsächlichen Verhältnissen an, ohne dabei einen großen Einfluss auf die Sickerwasserbilanz zu nehmen. Hinzu kommt, dass der Simulationszeitraum nicht unmittelbar nach dem Einbau der Lysimeter startet, weshalb anzunehmen ist, dass die Anfangsbedingungen nicht zwangsläufig den Einbaubedingungen entsprechen.

9 Berechnungsergebnisse Freilandlysimeter

9.1 Oberflächenabfluss

Aufgrund der Berücksichtigung des Straßenabflusses können, wie in Kapitel 8.5.1 erläutert, bei Starkregen in kurzer Zeit relativ große Wassermengen auf der Modelloberfläche anfallen. Können diese nicht in den Untergrund einsickern, bildet sich an der Oberfläche ein Wasserdruck. Um diesen abzubauen, wird der Druck vom Programm Vadose/W auf 0 gesetzt und die Wassermenge, die nicht in das Modell infiltrieren kann, als Oberflächenabfluss bilanziert. Eine Weitergabe des Wassers an andere Bereiche der Oberfläche erfolgt nicht. Dies kann die Bilanz des Wasserhaushalts dahingehend beeinflussen, dass Wassermengen, die das Infiltrationspotenzial im oberen Bereich der Böschung überschreiten, als Oberflächenabfluss aus dem Modell „entfernt“ werden. Im unteren Dammbereich kann es im Modell dadurch zu einer Unterschreitung der potenziellen Infiltration kommen, obwohl in der Realität noch Wasser vorhanden wäre, das einsickern könnte.

Zur Lösung dieses Problems wurde im Rahmen von Voruntersuchungen die Einführung einer fiktiven Kiesdeckschicht erörtert. Die Idee ist, den Damm mit einer virtuellen, geringmächtigen Kiesschicht zu überdecken. Diese kann im Fall der bereichsweisen Überschreitung des Infiltrationspotenzials, den Oberflächenabfluss auf tiefer gelegene Böschungsbereiche weiterleiten. Die fiktive Kiesschicht muss im Vergleich zu den darunter befindlichen Schichten des Dammes eine relativ große hydraulische Leitfähigkeit aufweisen, um anfallende Wassermengen in andere Modellbereiche weiterleiten zu können. In Trockenphasen wird ihr Wassergehalt daher schnell auf das Minimum abfallen, was im Normalfall auch zu einer geringen hydraulischen Leitfähigkeit führen würde. Bei einer hohen Niederschlags-spende würde dies zunächst zu hohen Oberflächenabflüssen führen und ein beträchtlicher Teil des Niederschlagswassers würde die eigentlichen oberflächennahen Schichten des Dammes nicht erreichen. Um diesem Problem zu begegnen, wurde die hydraulische Leitfähigkeit der fiktiven Kies-schicht als konstant, also von der Saugspannung unabhängig, angesetzt.

Um die Beeinflussung der Klima-Randbedingung durch die fiktive Kiesschicht möglichst gering zu

halten, werden die Wurzeln des Bewuchses um die Dicke der Kiesschicht verlängert.

Die Möglichkeit der Verwendung einer fiktiven Kiesdeckschicht wurde am Modell des Lysimeters 1 mit bindigem Kern (BM 2) über die ersten 100 Tage des Berechnungszeitraums untersucht. Der Schicht wurden dabei konstante Bodenkennwerte zugewiesen. Der volumetrische Wassergehalt wurde unabhängig von der Saugspannung bei 25 % festgelegt. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit wurde ebenfalls als konstant angenommen und über 4 Berechnungsläufe von $5 \cdot 10^{-4}$ m/s bis $5 \cdot 10^{-7}$ m/s um jeweils eine Zehnerpotenz reduziert. Die Berechnungsergebnisse dieser Studie sind in Bild 9-1 dargestellt.

Ab einer hydraulischen Leitfähigkeit von $5 \cdot 10^{-5}$ m/s beginnt die fiktive Kiesdeckschicht, Wasser in das Modell abzugeben, was sich in der ansteigenden Sickerwassermenge aus dem Kern äußert. Bei höheren Durchlässigkeiten wird das Wasser lateral, ähnlich wie in einer Dränschicht abgeführt. Deutlich größere Sickerwassermengen ergeben sich erst bei deutlich geringeren Durchlässigkeiten der Deckschicht. Diese liegen allerdings bereits nahe der gesättigten Leitfähigkeit des bindigen Kernmaterials. Dies steht im Widerspruch zu der ursprünglichen Annahme, dass die fiktive Kiesdeckschicht hohe Leitfähigkeiten aufweisen muss und die Güte der Ergebnisse ist daher fraglich. Außerdem ist unklar, welche hydraulische Durchlässigkeit einer fiktiven Kiesdeckschicht letztendlich zuzuweisen wäre, um plausible Ergebnisse zu erhalten. Auch eine direkte Übertragbarkeit auf Modelle mit anderen Kernmate-

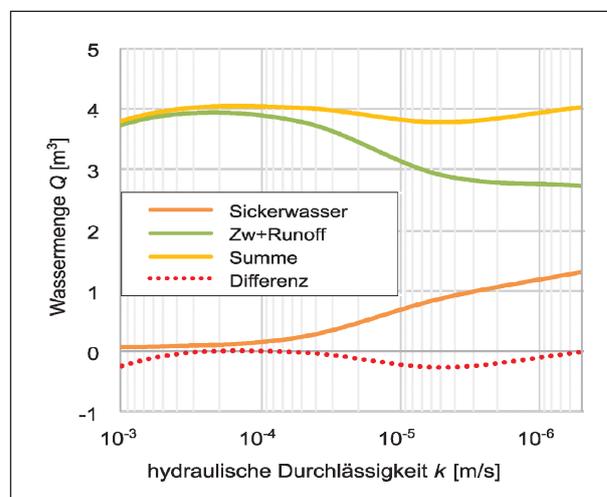


Bild 9-1: Sensitivitätsuntersuchung zur Verwendung einer fiktiven Kiesdeckschicht am Modell von Lysimeter 1

rialien und anderen Geometrien wäre nicht ohne weiteres möglich. Daher wurde die Berücksichtigung einer fiktiven Kiesdeckschicht für die Umverteilung des Oberflächenabflusses verworfen.

Ein weiterer möglicher Ansatz ist die Berechnung zweimal hintereinander auszuführen: In einem ersten Berechnungslauf wird der gesamte Straßenabfluss auf das Bankett als zusätzlicher Niederschlag aufgegeben. Kann das Bankett diese Wassermengen nicht vollständig aufnehmen, z. B. bei Starkregen, so wird der Überschuss durch das FE-Programm als Oberflächenabfluss (Runoff) bilanziert. In einem zweiten Berechnungslauf wird der Niederschlag auf das Bankett um den Runoff in diesem Bereich reduziert und stattdessen als zusätzlicher Niederschlag, nach dem folgenden Schema auf den Böschungsbereich aufgegeben:

1. Berechnungslauf:

$$q_{\text{Bankett}, 1} = N + S \quad (9.1)$$

$$q_{\text{Böschung}, 1} = N \quad (9.2)$$

2. Berechnungslauf:

$$q_{\text{Bankett}, 2} = (N+S) - R \quad (9.3)$$

$$q_{\text{Böschung}, 2} = N+R \quad (9.4)$$

mit

N Niederschlag

S Straßenabfluss

R Oberflächenabfluss (Runoff) im Bankettbereich

Bild 9-2 zeigt schematisch die Umverteilung der Wassermengen im 2. Berechnungslauf vom Bankett auf die Böschung.

Wie die in den folgenden Kapiteln ausführlich dargestellten Berechnungsergebnisse zeigen, liefert diese Herangehensweise sinnvolle Ergebnisse. Allerdings ergeben sich programmbedingt bei der

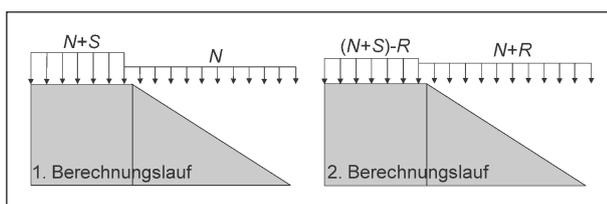


Bild 9-2: Umverteilung des Oberflächenabflusses im Bankettbereich auf die Böschung für den zweiten Berechnungslauf

Auswertung kleine Unschärfen. Dies hängt mit der Behandlung der Eckknoten an der Oberfläche, beispielsweise dem Knick zwischen Bankett und Böschung zusammen. Vadose/W summiert den Durchfluss [mm/m²] der einzelnen Knoten an der Oberfläche pro Zeitschritt auf. Bei der Auswertung wird der jeweilige Wert durch die Anzahl der Knoten geteilt und mit der Fläche (in der hier ausgeführten 2D-Modellierung der Länge des jeweiligen Bereichs) multipliziert. Der rechnerische Durchfluss eines Eckknotens bildet das Verhältnis der Wassermengen der beiden angrenzenden Bereiche. Je nachdem, bei welcher Fläche (Bankett oder Böschung) der Eckknoten bei der Auswertung berücksichtigt wird, ergeben sich unterschiedliche Wassermengen beim Oberflächenabfluss. Da sich zwischen dem ersten und dem zweiten Berechnungslauf insbesondere Unterschiede in der Niederschlagsmenge und damit auch im Oberflächenabfluss ergeben, kommt es bei einheitlicher Behandlung der Eckknoten in der Auswertung zu Unschärfen und die bilanzierten Gesamtwassermengen können geringfügig voneinander abweichen.

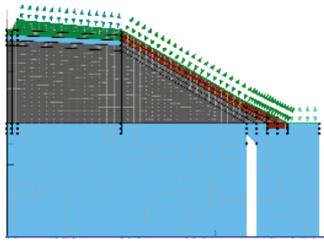
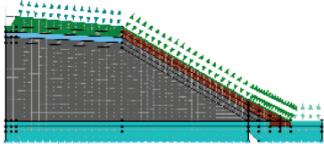
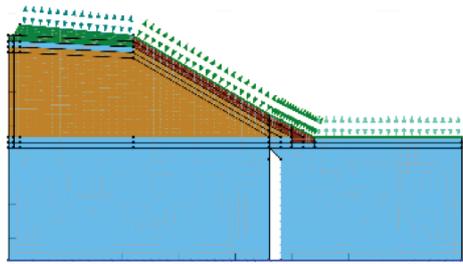
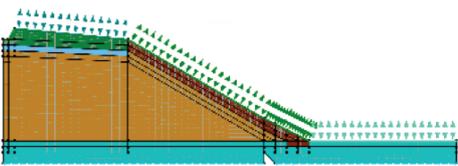
9.2 Variantenuntersuchung zur Modellgeometrie

An den Lysimetern 1 und 8 wurden Variantenuntersuchungen durchgeführt, in denen der Einfluss von Geometrie und Randbedingungen auf die Berechnungsergebnisse untersucht wurde. Die beiden Lysimeter wurden dabei ausgewählt, da sie abgesehen vom Kernmaterial denselben Aufbau aufweisen und somit eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse möglich ist. Tabelle 9-1 zeigt die untersuchten Varianten. In Spalte 3 sind für die Lysimeter 1 und 8 die Ausgangssituationen und für die übrigen Varianten die einzelnen Variationen dargestellt.

Die Ergebnisse der Variantenuntersuchungen werden im Folgenden als Vergleich mit den Messergebnissen dargestellt.

9.2.1 Lysimeter 1 – Ausgangssituation

Als Ausgangssituation wurde eine Geometrie mit einer 1,0 m mächtigen Auffangwanne mit den Bodenparametern der Dränschicht, einem GU nach EKB-LAD und ISACSSON (2007) mit $\alpha = 0,05$ [1/cm] (siehe Kapitel 6.2 und 8.3) gewählt. Für das Bankett wurde der GU 3 nach EKB-LAD und ISACSSON (2007) mit $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s verwendet, wobei am

1	2	3
Variante	Geometrie	Ausgangssituation/Variationen
Bindiger Boden (BM 2)		
1		<ul style="list-style-type: none"> • Höhe Auffangwanne 1,0 m • Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,05$ [1/cm] • Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s • Unterer Rand: Sickerrandbedingung • Dicke Oberboden: 10 cm
1.1		<ul style="list-style-type: none"> • Höhe Auffangwanne 0,1 m • Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm]
1.2		<ul style="list-style-type: none"> • Höhe Auffangwanne 0,1 m • Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm] • Unterer Rand: Unit Gradient
1.3		<ul style="list-style-type: none"> • Höhe Auffangwanne 0,1 m • Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm] • Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s
Kiesiger Boden (BM 1)		
8		<ul style="list-style-type: none"> • Höhe Auffangwanne 1,0 m • Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,05$ [1/cm] • Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s • Unterer Rand: Sickerrandbedingung • Dicke Oberboden: 10 cm
8.1		<ul style="list-style-type: none"> • Höhe Auffangwanne 0,1 m • Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm]
8.2		<ul style="list-style-type: none"> • Höhe Auffangwanne 0,1 m • Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm] • Unterer Rand: Unit Gradient
8.3		<ul style="list-style-type: none"> • Höhe Auffangwanne 0,1 m • Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm] • Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s
8.4		<ul style="list-style-type: none"> • Höhe Auffangwanne 0,1 m • Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm] • Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-6}$ m/s

Tab. 9-1: Übersicht zu den Variantenuntersuchungen der Lysimeter 1 und 8. Spalte 4 listet für die Lysimeter 1 und 8 die Ausgangssituationen und die jeweiligen Variationen auf

unteren Rand eine Sickerrandbedingung (Seepage Face Review) angesetzt wurde. Die Ergebnisse zeigen, wie in Bild 9-3 dargestellt, Sickerwassermengen von 25 % des Gesamtabflusses im Vergleich zu den Messergebnissen mit Sickerwassermengen von 10 %. Die Sickerwassermengen werden damit vom Modell überschätzt. Im 2. Berechnungslauf, der der Umverteilung des Oberflächenabflusses im Bereich des Banketts dient, liegt der Sickerwasseranteil mit 35 % erwartungsgemäß höher.

Die Überschätzung der Sickerwassermengen ist in Teilen auf die 1,0 m mächtige Kiesunterlage zurückzuführen. Durch die teilgesättigten Verhältnisse stellt diese zwar einerseits einen zuverlässigen Abfluss des Sickerwassers sicher, führt aber in Verbindung mit der Sickerrandbedingung an der Kernbasis zu einem Unterdruck von bis zu 1,0 m. Dieser sorgt für eine erhöhte Wasserabgabe aus dem Kern.

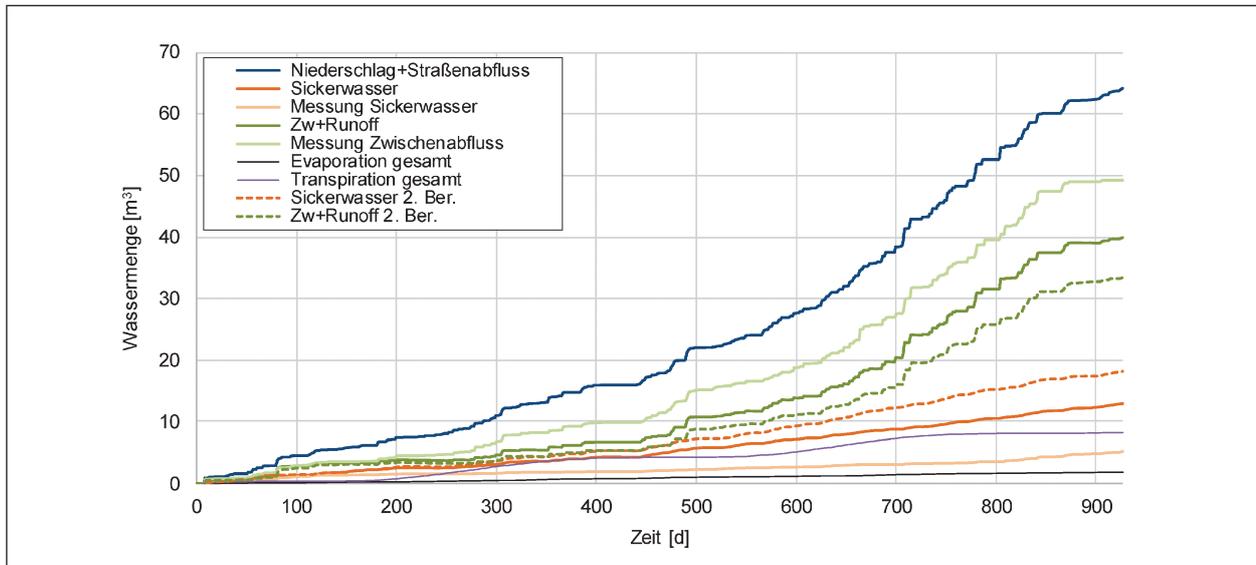


Bild 9-3: Berechnungsergebnisse Lysimeter 1 – Ausgangssituation. Höhe der Auffangwanne: 1,0 m; Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,05$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Unterer Rand: Sickerrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm

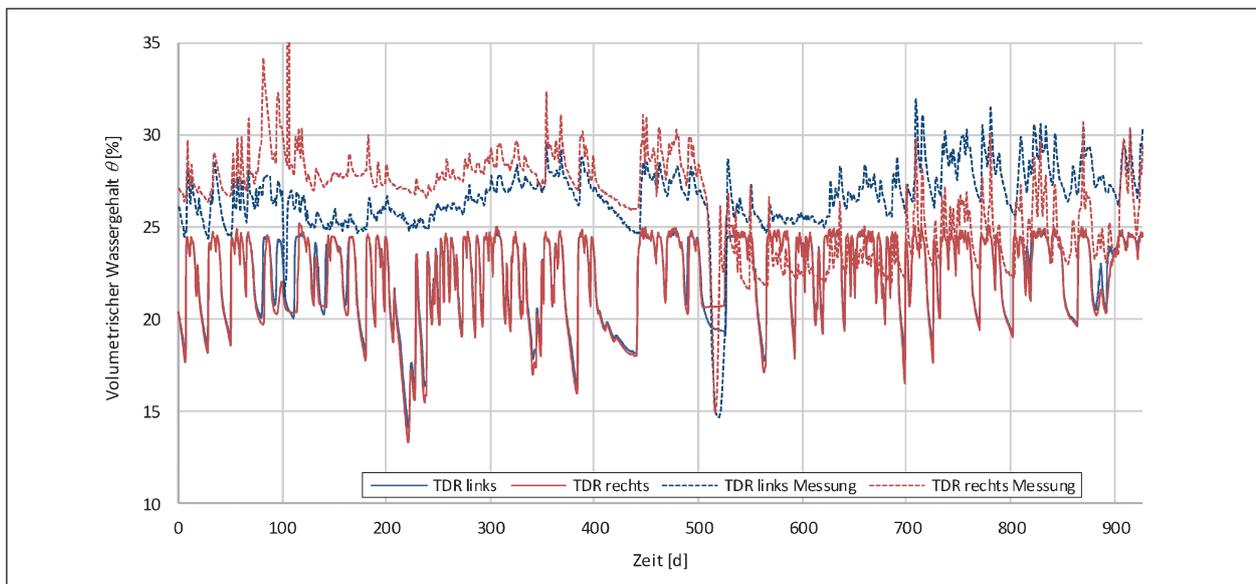


Bild 9-4: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparametersonden in Lysimeter 1 – Ausgangssituation. Höhe der Auffangwanne: 1,0 m; Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,05$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Unterer Rand: Sickerrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm

Der Vergleich der Berechnungs- und Messergebnisse der Mehrparametersonden in Bild 9-4 zeigt ähnliche Verläufe. Die berechneten volumetrischen Wassergehalte liegen jedoch unterhalb der gemessenen und erreichen maximal den durch die Saugspannungs-Wassergehaltsbeziehung vorgegebenen Sättigungswassergehalt von $\theta = 0,25$.

9.2.2 Lysimeter 1 – Variante 1

Aufgrund der Erkenntnisse aus den Berechnungen von Lysimeter 1 wird in Variante 1 die Kiesschicht zum Auffangen des Sickerwassers auf 0,1 m reduziert. Da zu Zeitpunkten großen Sickerwasserandrangs mit einem Wasseraufstieg aus der Kiesschicht in den Kern und am Böschungsfuß auch in den Oberboden zu rechnen ist, wurde der Lufttrittspunkt des Kiesel unter Anwendung von $\alpha = 0,5$ [1/cm] reduziert. Die Ergebnisse (dargestellt in Bild 9-5) zeigen, dass sich damit die Sickerwassermengen

gen aus dem Kern auf einen Anteil von 18 % reduzieren. Die Variante kommt damit den Messungen mit 10 % Sickerwasseranteil näher. Dennoch werden auch hier die Sickerwassermengen noch überschätzt, insbesondere im 2. Berechnungslauf, in dem der Sickerwasseranteil bei 22 % liegt.

Die Verläufe der Wassergehalte im Kern in Bild 9-6 zeigen einen ähnlichen Verlauf wie beim Ausgangsmodell (Bild 9-4), jedoch bleiben die Wassergehalte in Trockenphasen in Variante 1 höher, was in guter Übereinstimmung mit der geringeren Kernentwässerung steht.

9.2.3 Lysimeter 1 – Variante 2

Bei der Berechnung mit „Unit Gradient“ als unterer Randbedingung anstatt der bei den übrigen Varianten verwendeten Sickerkandbedingung konnten keine verwendbaren Ergebnisse erzielt werden, da die Berechnung abbrach. Diese Variante wird daher nicht weiter betrachtet.

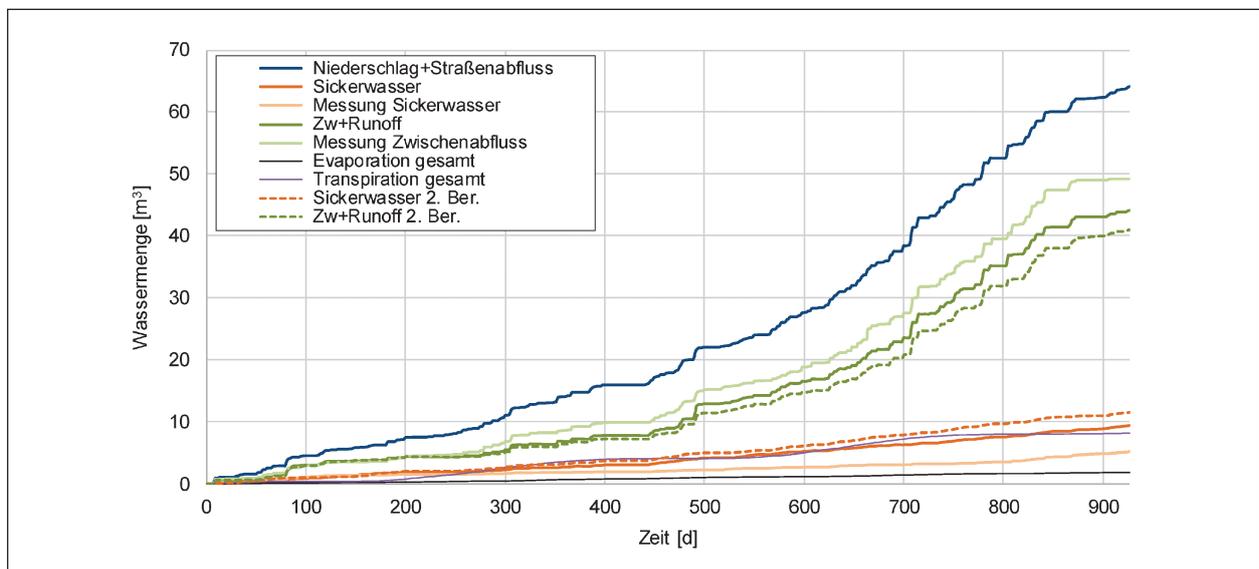


Bild 9-5: Berechnungsergebnisse Lysimeter 1 – Variante 1. Höhe der Auffangwanne: 0,1 m; Kies Auffangwanne: $GU \alpha = 0,5$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Unterer Rand: Sickerkandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm

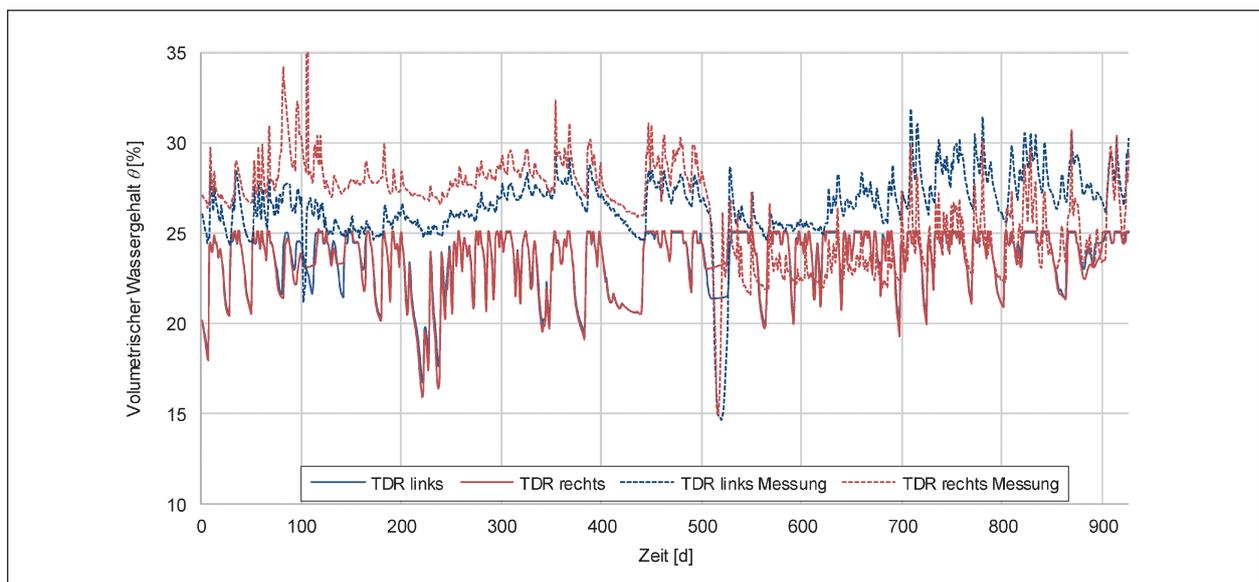


Bild 9-6: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparametersonden in Lysimeter 1 – Variante 1. Höhe der Auffangwanne: 0,1 m; Kies Auffangwanne: $GU \alpha = 0,5$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Unterer Rand: Sickerkandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm

9.2.4 Lysimeter 1 – Variante 3

Da auch Variante 1 die Sickerwassermengen überschätzt, wurde in Variante 3 die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Bankettmaterials um eine Zehnerpotenz auf $k_s = 1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s reduziert. Wie Bild 9-7 zeigt, reduziert sich die Sickerwassermenge dadurch jedoch nicht, sondern liegt genau wie bei Variante 1 bei 18 %. Auch hier führt der zweite Berechnungslauf zu einer Erhöhung des Sickerwasseranteils auf 24 %.

Auch auf die Wassergehalte im Kern hat die Reduzierung der hydraulischen Leitfähigkeit keinen entscheidenden Einfluss (Bild 9-8).

Eine signifikante Reduzierung der Sickerwassermengen ist erst zu erwarten, wenn die hydraulische Durchlässigkeit des Bankettmaterials die des Kernmaterials in berechnungsrelevanten Saugspannungsbereichen unterschreitet.

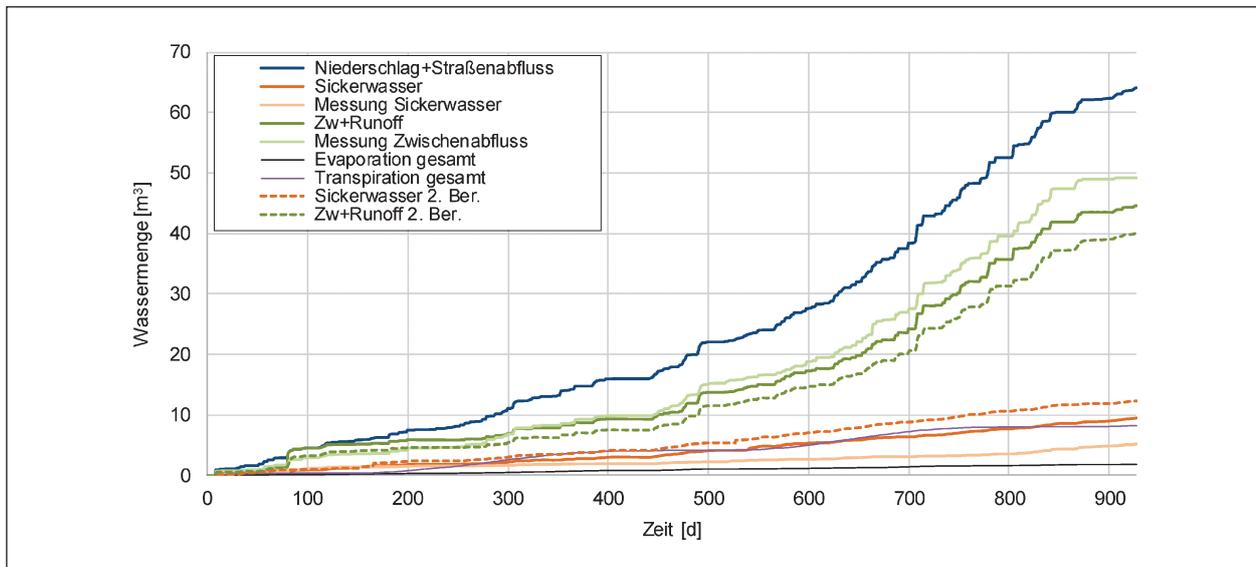


Bild 9-7: Berechnungsergebnisse Lysimeter 1 – Variante 3. Höhe der Auffangwanne: 0,1 m; Kies Auffangwanne: $GU \alpha = 0,5$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s; Unterer Rand: Sickertrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm

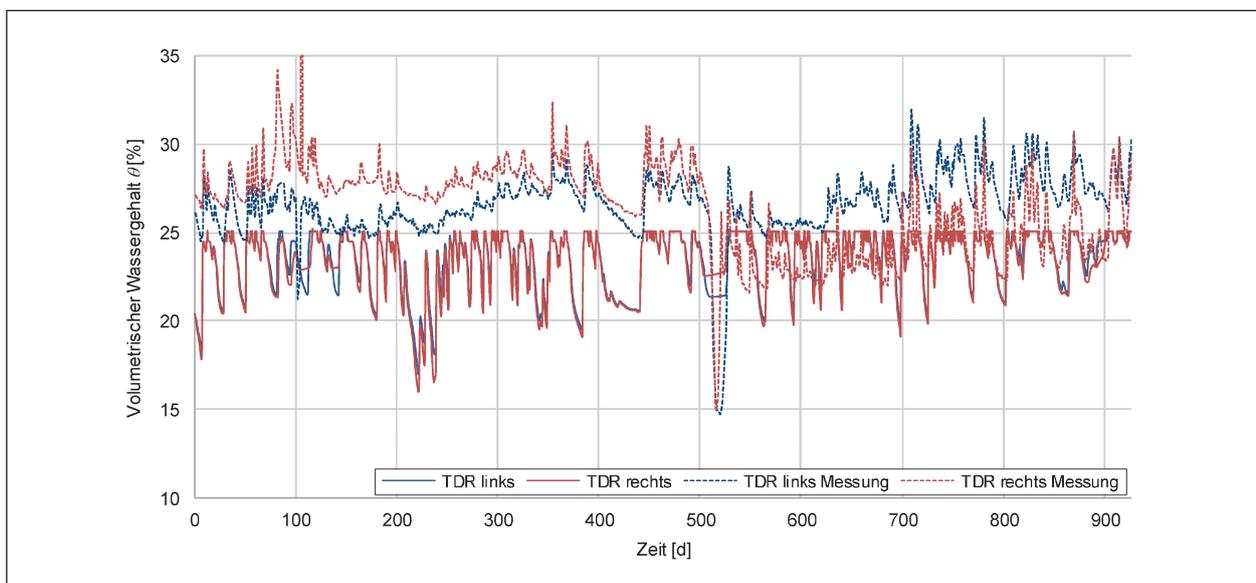


Bild 9-8: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparametersonden in Lysimeter 1 – Variante 3. Höhe der Auffangwanne: 0,1 m; Kies Auffangwanne: $GU \alpha = 0,5$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s; Unterer Rand: Sickertrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm

9.2.5 Lysimeter 8 – Ausgangssituation

Die Ausgangssituation von Lysimeter 8 wurde analog zu der von Lysimeter 1 gewählt, jedoch mit kiesigem Kern (BM 1). Die Geometrie weist eine 1,0 m mächtige Auffangwanne mit den Bodenparametern der Dränschicht, einem GU nach EKBLAD und ISACSSON (2007) mit $\alpha = 0,05$ [1/cm] (siehe Kapitel 6.2 und 8.3) auf. Bei den in Bild 9-9 dargestellten Summenkurven hat das Sickerwasser einen Anteil von 84 % am Gesamtabfluss. Gemessen wurden

nur 46 %. Hier zeigt sich im zweiten Berechnungslauf die in Kapitel 9.1 erläuterte auswertungsbedingte Unschärfe der kumulierten Gesamtwassermengen. Dabei liegt der Zwischen- und Oberflächenabfluss im zweiten Berechnungslauf leicht unter dem des ersten.

Die berechneten volumetrischen Wassergehalte im Kern zeigen eine relativ gute Übereinstimmung mit den Messwerten (Bild 9-10).

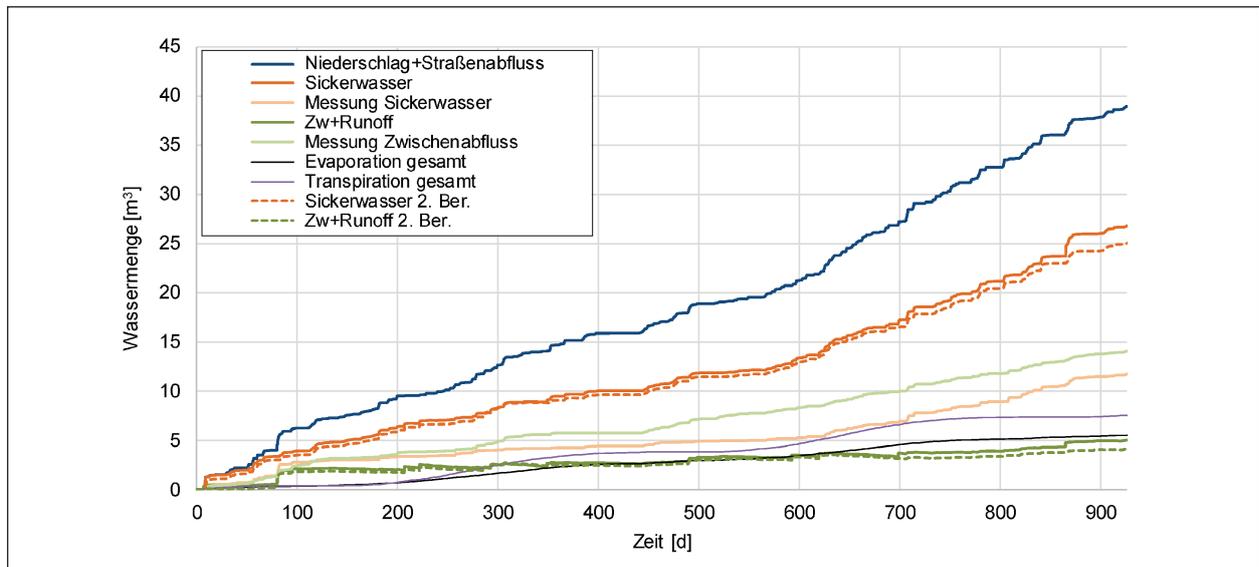


Bild 9-9: Berechnungsergebnisse Lysimeter 8 – Ausgangssituation. Höhe der Auffangwanne: 1,0 m; Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,05$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Unterer Rand: Sickerrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm

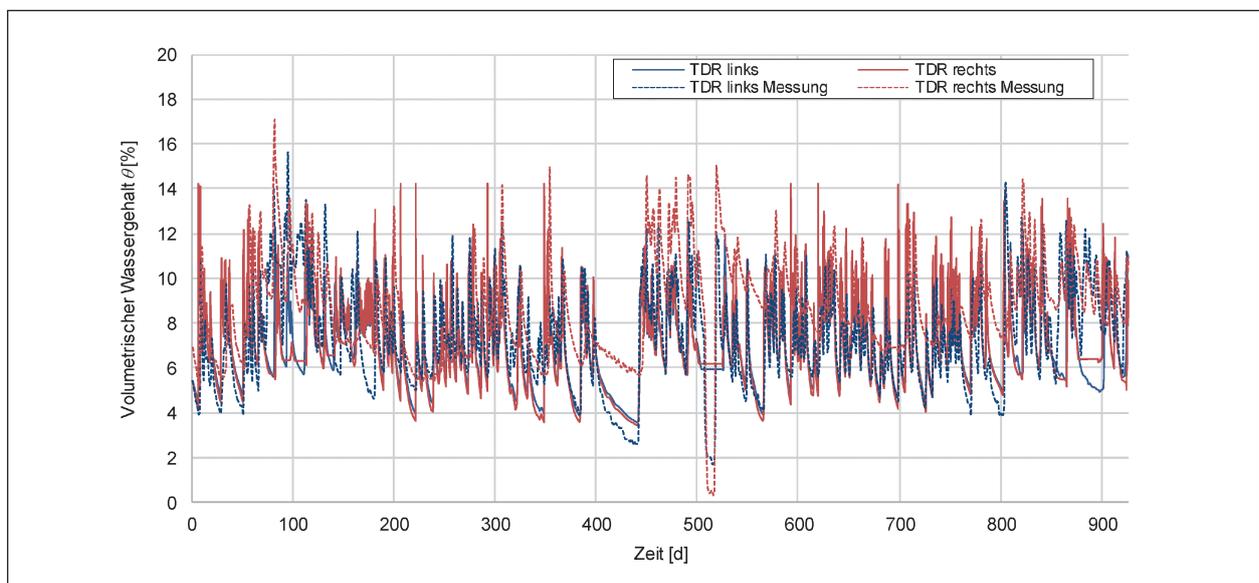


Bild 9-10: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparametersonden in Lysimeter 8 – Ausgangssituation. Höhe der Auffangwanne: 1,0 m; Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,05$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Unterer Rand: Sickerrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm

9.2.6 Lysimeter 8 – Variante 1

Wie bei Lysimeter 1 wurde auch bei Lysimeter 8 in Variante 1 die Kiesschicht an der Basis auf 0,1 m Mächtigkeit reduziert und der Lufteintrittspunkt reduziert ($\alpha = 0,5 [1/cm]$). Der Sickerwasseranteil liegt in dieser Variante bei 85 % und reduziert sich im 2. Berechnungslauf auf 81,8 % (Bild 9-11).

Bei den Wassergehalten zeigen sich im kiesigen Kern, wie erwartet keine nennenswerten Unterschiede zur Ausgangssituation (Bild 9-12).

9.2.7 Lysimeter 8 – Variante 2

Aufgrund des Abbruchs der Berechnungen mit „Unit Gradient“ als untere Randbedingung, wie bei Variante 1.2 (siehe Kapitel 9.2.3), wurde diese Variante nicht weiter behandelt.

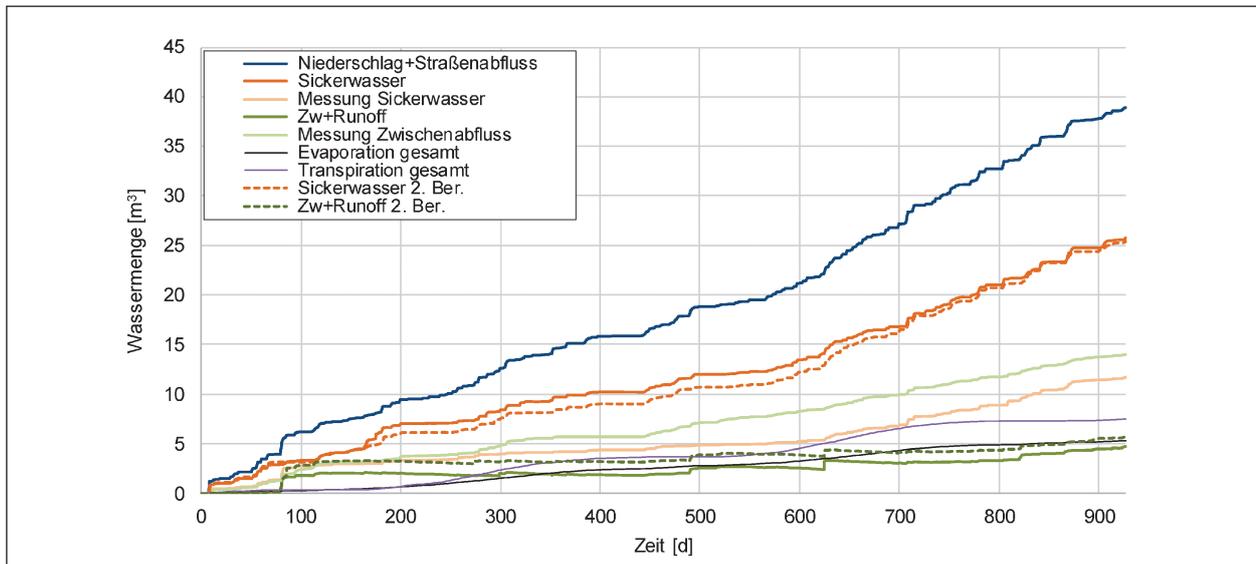


Bild 9-11: Berechnungsergebnisse Lysimeter 8 – Variante 1. Höhe der Auffangwanne: 0,1 m; Kies Auffangwanne: $GU \alpha = 0,5 [1/cm]$; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3} m/s$; Unterer Rand: Sickerrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm

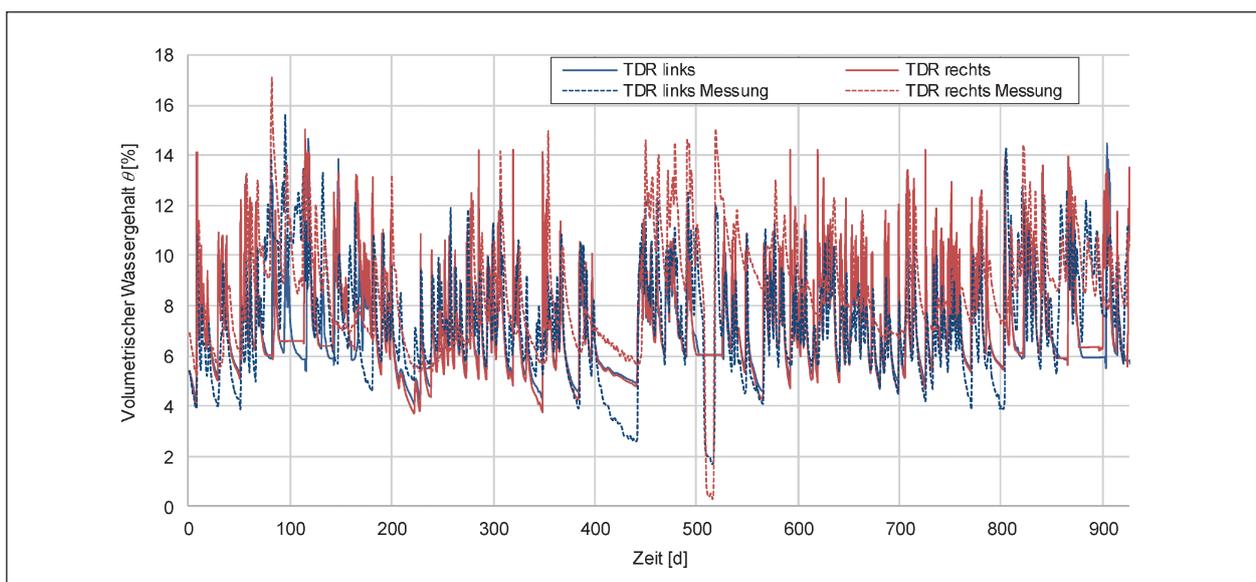


Bild 9-12: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparametersonden in Lysimeter 8 – Variante 1. Höhe der Auffangwanne: 0,1 m; Kies Auffangwanne: $GU \alpha = 0,5 [1/cm]$; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3} m/s$; Unterer Rand: Sickerrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm

9.2.8 Lysimeter 8 – Variante 3

Die Reduktion des gesättigten k-Werts des Bankettmaterials, analog zu Lysimeter 1, Variante 3 ergibt auch mit kiesigem Kern keine deutlichen Unterschiede zu Variante 1. Mit $k_s = 1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s ergibt sich ein Sickerwasseranteil von 86 % im ersten und 82 % im zweiten Berechnungslauf (Bild 9-13).

Wie Bild 9-14 zeigt, sind auch in dieser Variante die Verläufe der Wassergehalte an den Stellen der Mehrparametersonden gegenüber den anderen Varianten mit kiesigem Kern quasi unverändert.

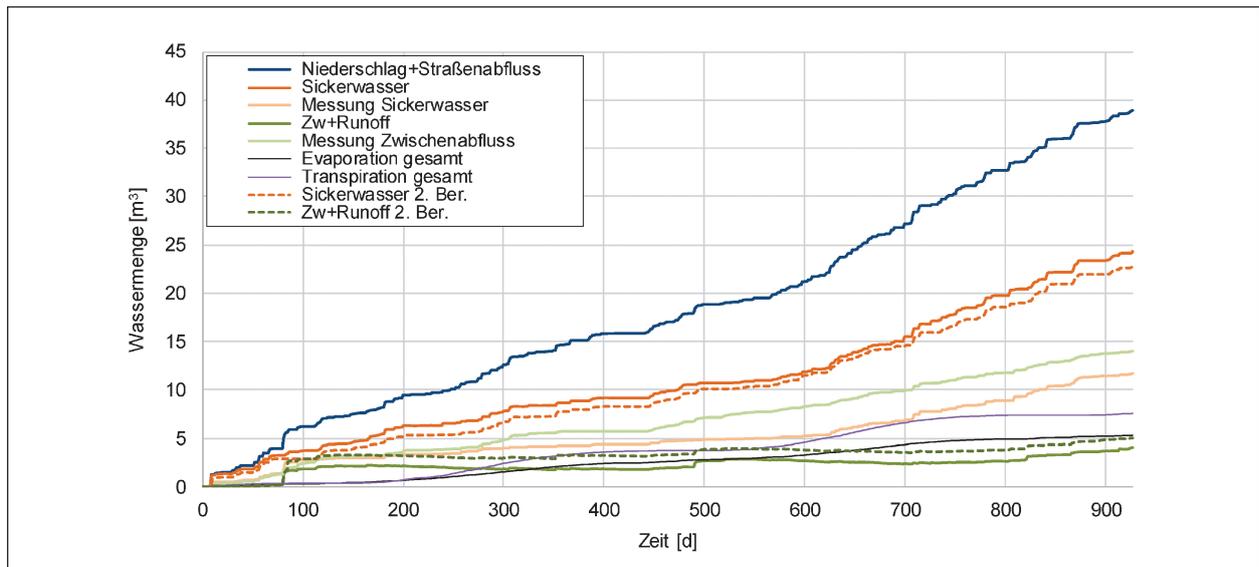


Bild 9-13: Berechnungsergebnisse Lysimeter 8 – Variante 3. Höhe der Auffangwanne: 0,1 m; Kies Auffangwanne: $GU \alpha = 0,5$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s; Unterer Rand: Sickerrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm

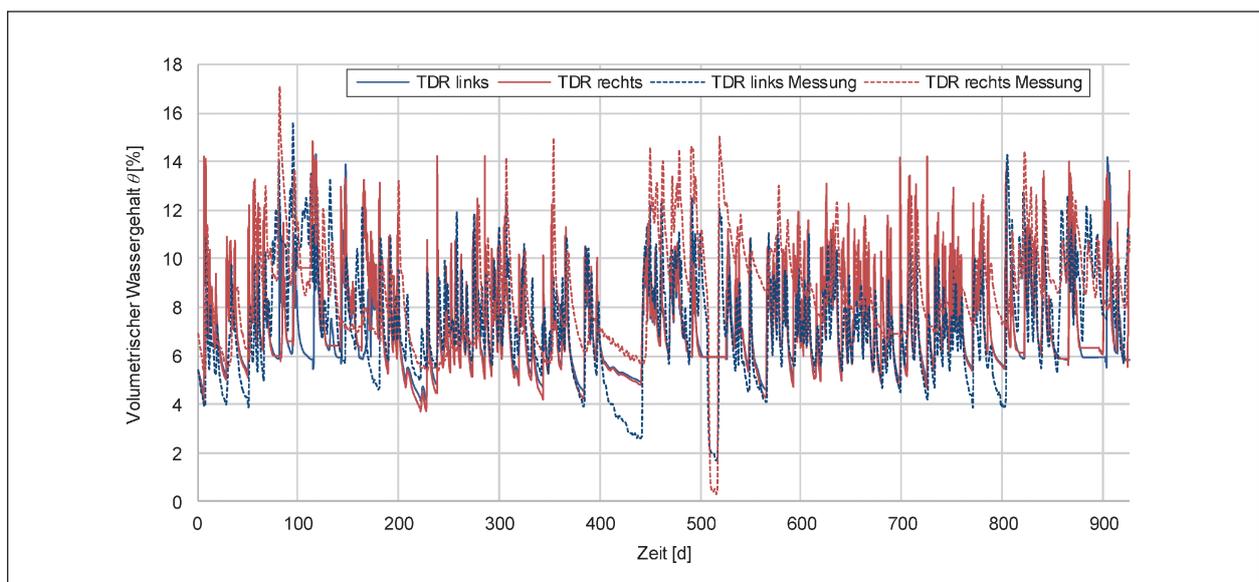


Bild 9-14: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparametersonden in Lysimeter 8 – Variante 3. Höhe der Auffangwanne: 0,1 m; Kies Auffangwanne: $GU \alpha = 0,5$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s; Unterer Rand: Sickerrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm

9.2.9 Lysimeter 8 – Variante 4

Die Reduktion der gesättigten hydraulischen Durchlässigkeit des Banketts um zwei Zehnerpotenzen gegenüber Variante 3 auf $1,5 \cdot 10^{-6}$ m/s bewirkt eine deutliche Reduktion der Sickerwassermenge um rund 6 m^3 (Bild 9-15). Der Sickerwasseranteil an der Gesamtwassermenge liegt damit bei 71 %. Die gemessene Sickerwassermenge von 46 % wird jedoch auch in dieser Variante noch deutlich überschätzt. Nach Umverteilung des Oberflächenabflusses im Bankettbereich auf die Böschung steigt der Sickerwasseranteil im zweiten Berechnungslauf auf 73 % an.

Der Anstieg der Sickerwassermenge im 2. Berechnungslauf ist durchaus plausibel, da hier eine größere Wassermenge im Böschungsbereich zur Verfügung steht, die infiltrieren kann. Der leichte Anstieg des Oberflächen- und Zwischenabflusses ist jedoch nicht nachvollziehbar. Hier wäre eine entsprechende Reduktion zu erwarten.

Die Reduktion der Sickerwassermengen zeigt sich auch in den Auswertungen der Wassergehalte an den Positionen der Mehrparametersonden (Bild 9-16). Die rechnerisch ermittelten Spitzenwerte des volumetrischen Wassergehalts im Kern liegen zeitweise unter denen in Variante 3.

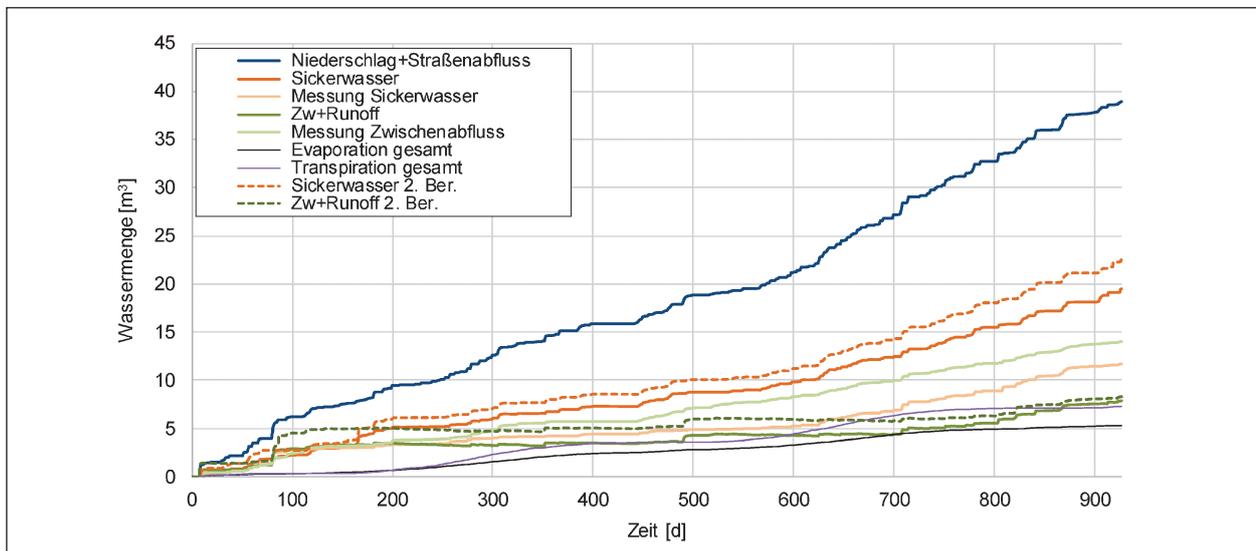


Bild 9-15: Berechnungsergebnisse Lysimeter 8 – Variante 4. Höhe der Auffangwanne: 0,1 m; Kies Auffangwanne: $\text{GU } \alpha = 0,5$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-6}$ m/s; Unterer Rand: Sickertrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm

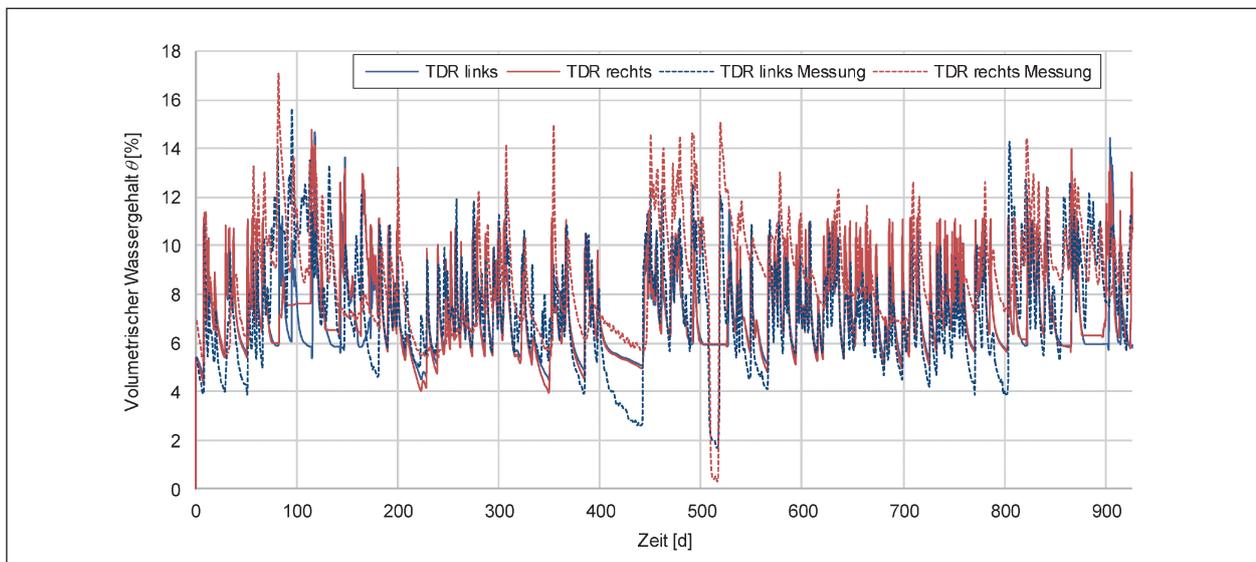


Bild 9-16: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparametersonden in Lysimeter 8 – Variante 4. Höhe der Auffangwanne: 0,1 m; Kies Auffangwanne: $\text{GU } \alpha = 0,5$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-6}$ m/s; Unterer Rand: Sickertrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm

9.3 Fazit der Variantenuntersuchungen

Die Betrachtung der Voruntersuchungen an Lysimeter 1 (BM 2 – bindiger Kern) zeigen, dass die Modellgeometrie mit einer Kiesunterlage von 10 cm Dicke im Vergleich zu den Messungen bessere Ergebnisse als mit einer 100 cm dicken Unterlage liefert. Der Lufteintrittspunkt des Kiesmaterials wurde mit $\alpha = 0,5$ [1/cm] vergleichsweise niedrig gewählt, um einen kapillaren Wasseraufstieg aus der Kieschicht in den Oberboden und das Kernmaterial weitestgehend zu unterbinden und gleichzeitig eine gute Leitfähigkeit bei Perkolation der Schichten an der Oberfläche zu gewährleisten. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Ziele mit dem gewählten Lufteintrittspunkt weitestgehend erreicht wurden.

In Bezug auf den kapillaren Wasseraufstieg ist der Lufteintrittspunkt in einer 1,0 m mächtigen Kieschicht nicht so entscheidend. Zwar hat diese aufgrund des größeren Volumens ein höheres Speichervermögen, jedoch bedingt die Höhe der Schicht auch einen Unterdruck an der Kernbasis von bis zu 10 kPa (hängende Wassersäule). Dadurch kann gespeichertes Wasser auch bei einem höheren Lufteintrittspunkt ($\alpha = 0,05$ [1/cm]) nur in geringen Mengen aufsteigen. Aufgrund des sich bei einer 1,0 m mächtigen Kiesschicht an der Kernunterseite einstellenden Unterdruckes von bis zu 1,0 m wird die Sickerwasserabgabe aus dem Kern bei den entsprechenden Berechnungen aber deutlich überschätzt, weshalb Variante 1 mit der 0,1 m mächtigen Kiesschicht für die Berechnungen der übrigen Lysimeter verwendet wurde.

Die an der Modellbasis angesetzte Sickerrandbedingung hat sich bei den Voruntersuchungen als beste Variante erwiesen. Eine Alternative mit Unit Gradient, der eine kontinuierliche Versickerung über einen ungesättigten Bodenbereich simuliert, wurde verworfen, da die Berechnung vom Programm abgebrochen wurde.

Bei den Berechnungen der Varianten 1 bis 3 von Lysimeter 8 (BM 1 – kiesiger Kern) zeigten sich nur geringe Unterschiede. Die gemessenen Sickerwassermengen aus dem Kern wurden in allen Fällen mit den Berechnungsergebnissen deutlich überschätzt. Gemäß den Angaben der BAST wurden im Laufe des Simulationszeitraums benachbarte Baumaßnahmen ausgeführt, weshalb vermutet wird, dass es zu einer ungewollten zusätzlichen Verdichtung des Bankettmaterials und evtl. auch des Ober-

bodens in Lysimeter 8 gekommen ist. Dies könnte zu einer Verringerung der hydraulischen Durchlässigkeit der oberen Schichten geführt haben. In diesem Fall wären die labortechnisch ermittelten Werte, welche in der Berechnung angesetzt wurden, nicht repräsentativ für den tatsächlichen Zustand der Schichten an der Oberfläche. Die Entscheidung für das endgültig verwendete Berechnungsmodell wurde daher hauptsächlich anhand der Ergebnisse der Variantenuntersuchungen für Lysimeter 1 getroffen.

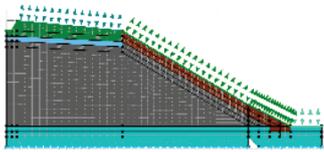
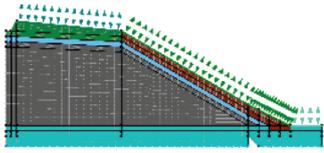
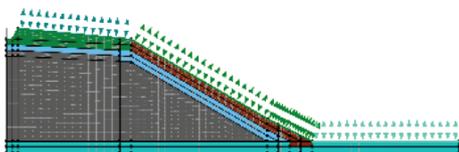
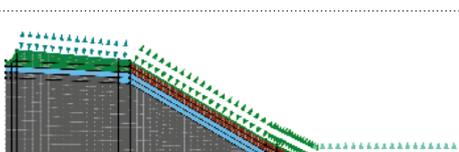
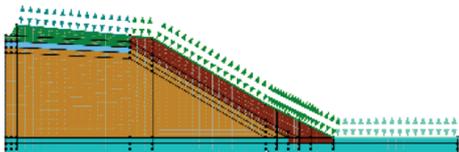
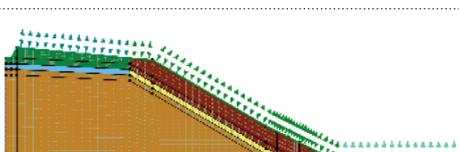
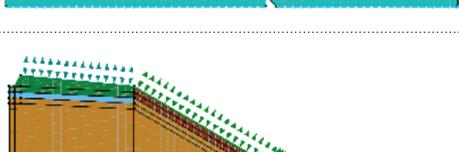
Die Variation der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit des Bankettmaterials ergab erst bei $k_s < 1,5 \cdot 10^{-6}$ m/s eine nennenswerte Verringerung der Kerndurchsickerung. Da dieser Wert drei Zehnerpotenzen unter dem labortechnisch ermittelten Wert liegt, wurde entschieden, für die Berechnungen zum Wasserhaushalt der einzelnen Lysimeter den Laborwert von $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s anzusetzen.

9.4 Ergebnisbetrachtung der Lysimeter-Berechnungen

In diesem Kapitel werden die Berechnungsergebnisse der Freilandlysimeter entsprechend Tabelle 9-2 im Vergleich mit den Messergebnissen vorgestellt. Bei den Lysimetern 3 und 6 wurden zusätzliche Varianten untersucht. In Spalte 3 sind für diese Lysimeter die einzelnen Variationen beschrieben. Allen Ergebnissen liegt eine Höhe der Auffangwanne von 10 cm und eine Sickerrandbedingung (siehe Kapitel 8.4) an der Lysimeterbasis zugrunde.

9.4.1 Lysimeter 1

Die Berechnungsergebnisse zu Lysimeter 1 wurden bereits in Kapitel 9.2.2 beschrieben.

1	2	3
Variante	Geometrie	Ausgangssituation/Variationen
Bindiger Boden (BM 2)		
1		<ul style="list-style-type: none"> • Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm]; 10 cm • Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s • Dicke Oberboden: 10 cm
2		<ul style="list-style-type: none"> • Dränmatte Böschung GU $\alpha = 0,05$ [1/cm]; 5 cm • Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm]; 10 cm • Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s • Dicke Oberboden: 10 cm
3		<ul style="list-style-type: none"> • Kiesdränschicht Böschung GU $\alpha = 0,05$ [1/cm]; 10 cm • Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm]; 10 cm • Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s • Dicke Oberboden: 10 cm
3.1		<ul style="list-style-type: none"> • Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,05$ [1/cm]
Kiesiger Boden (BM 1)		
6		<ul style="list-style-type: none"> • Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm]; 10 cm • Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s • Dicke Oberboden: 20 cm
6.1		<ul style="list-style-type: none"> • Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-5}$ m/s
6.2		<ul style="list-style-type: none"> • Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-6}$ m/s
7		<ul style="list-style-type: none"> • Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm]; 10 cm • Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s • Dicke Oberboden: 20 cm • Modifizierte mineralische Abdichtung $k_s = 5,4 \cdot 10^{-12}$ m/s; 5 cm
8		<ul style="list-style-type: none"> • Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm]; 10 cm • Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s

Tab. 9-2: Übersicht der Berechnungen der Lysimeter 2, 3, 6 und 7 mit den Varianten 3.1, 6.1 und 6.2

9.4.2 Lysimeter 2

Die Berechnungsergebnisse von Lysimeter 2 mit einer Dränschicht im Böschungsbereich über bindigem Kern (BM 2), zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen (Bild 9-17). Der Anteil des kumulierten Sickerwassers an der Gesamtmenge wurde mit 9 % berechnet. Die Messung liegt bei 8 %. Da das unterhalb des Banketts befindliche Dränelement relativ große Sickerwassermengen aus dem Bankett aufnehmen und in das in der Böschung befindliche Dränelement einleiten kann, ist der Oberflächenabfluss im Bankettbereich entspre-

chend gering. Somit kommt es nicht zu einem Wassereinstau im Bankett. Die Umverteilung im zweiten Berechnungslauf ist daher entsprechend klein und führt nur zu sehr geringen Unterschieden in der Wasserbilanz.

In den gemessenen Verläufen des Wassergehalts (Bild 9-18) sind bei der linken Sonde unterhalb des Banketts (gestrichelte blaue Linie) leichte jahreszeitliche Trends erkennbar. Diese lassen sich im Modell jedoch nicht wiedergeben. Auffällig ist auch, dass die Messwerte der beiden Sonden um ca. 5 % auseinanderliegen, was ebenfalls nicht im Modell

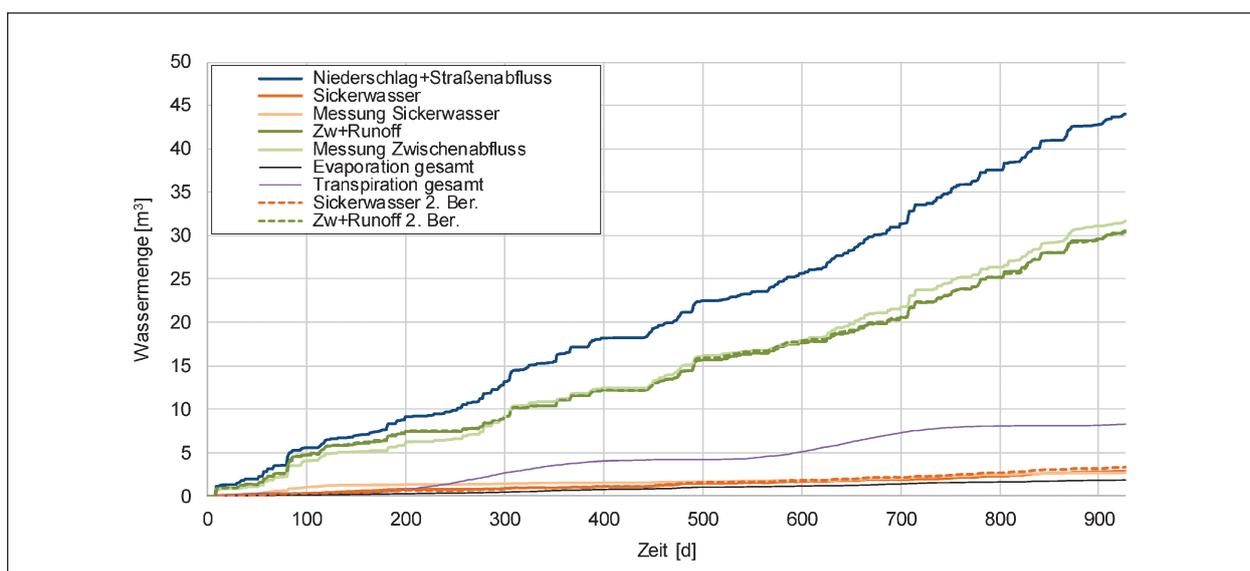


Bild 9-17: Berechnungsergebnisse Lysimeter 2. Auffangwanne: $GU \alpha = 0,5$ [1/cm], 10 cm; Dränmatte: $GU \alpha = 0,05$ [1/cm], 5 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Dicke Oberboden: 10 cm

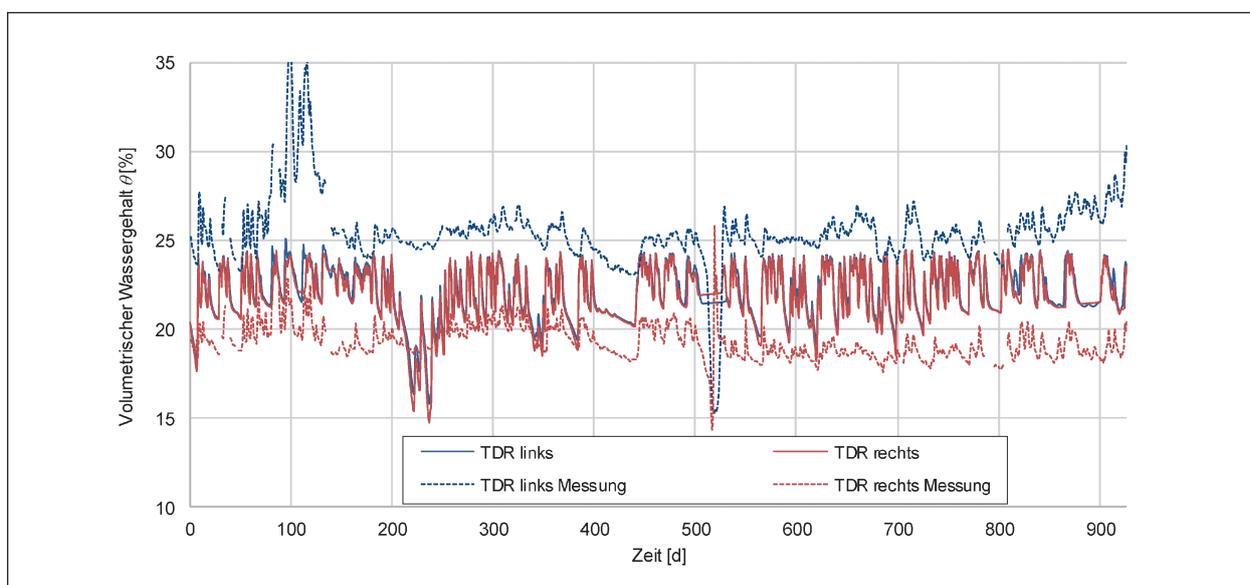


Bild 9-18: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparametersonden in Lysimeter 2. Auffangwanne: $GU \alpha = 0,5$ [1/cm], 10 cm; Dränmatte: $GU \alpha = 0,05$ [1/cm], 5 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Dicke Oberboden: 10 cm

abbildbar ist. Die berechneten Werte zeigen nur zeitweise eine geringe Differenz und liegen zwischen den Messwerten der Sonden. Abgesehen von den gemessenen Trends der linken Sonde geben die Berechnungsergebnisse den qualitativen Verlauf der Wassergehalte im Kern gut wieder.

9.4.3 Lysimeter 3

Lysimeter 3 hat eine Dränschicht aus Kies mit 10 cm Dicke über bindigem Kern (BM 2). Ansonsten ist die Bauweise mit Lysimeter 2 identisch. Im Modell wurde die Dränschicht aus Kies mit den gleichen Bodenparametern wie die Dränmatte in Lysimeter 2 modelliert. Lediglich die Mächtigkeit der Dränschicht ist um 5 cm größer. Der berechnete Sickerwasseranteil am Gesamtabfluss liegt bei 11 % und

damit etwas höher als bei Lysimeter 2 (9 %). Die leichte Erhöhung der Sickerwassermengen könnte den Grund haben, dass in Zeiten, in denen die Dränschicht Wasser führt, aufgrund der größeren Dicke der Dränschicht im Vergleich zu Lysimeter 2, ein höherer Wasserdruck auf den Kern herrscht. Der so erhöhte Gradient würde dann die Durchsickerung begünstigen. Diese Tendenz ist bei den Messergebnissen jedoch nicht erkennbar. Hier liegt der Sickerwasseranteil bei nur 4 %, während bei Lysimeter 2 8 % ermittelt wurden. Die kumulierten Wassermengen sind in Bild 9-19 dargestellt. Der zweite Berechnungslauf ergibt, wie zu erwarten nur geringfügige Unterschiede.

Die in Bild 9-20 dargestellten, rechnerisch ermittelten Wassergehalte an den Punkten der Mehrparametersonden bewegen sich in einem ähnlichen Be-

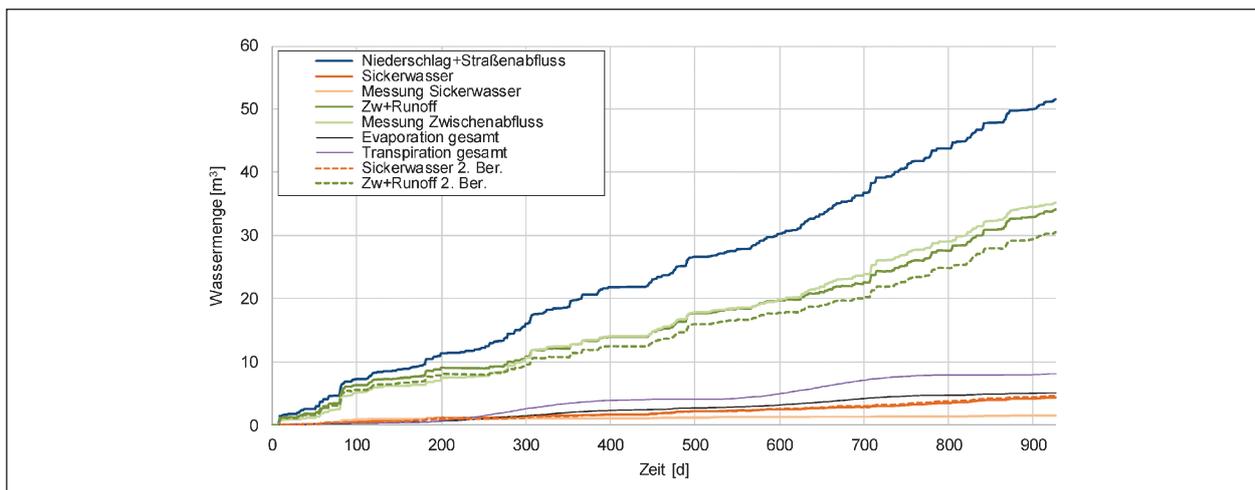


Bild 9-19: Berechnungsergebnisse Lysimeter 3. Auffangwanne: $GU \alpha = 0,5$ [1/cm], 10 cm; mineralische Dränschicht: $GU \alpha = 0,05$ [1/cm], 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Dicke Oberboden: 10 cm

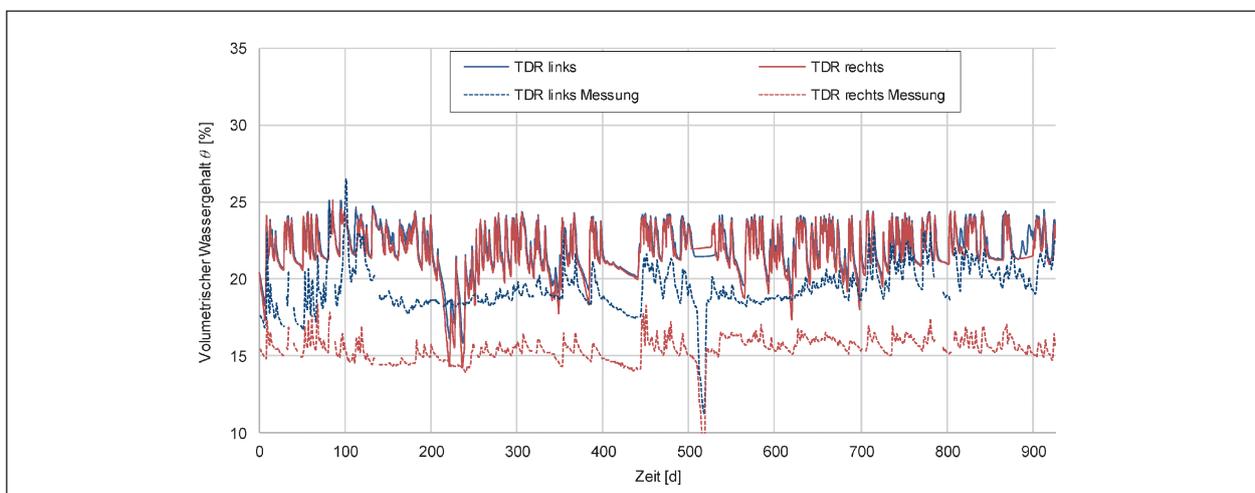


Bild 9-20: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparametersonden in Lysimeter 3. Auffangwanne: $GU \alpha = 0,5$ [1/cm], 10 cm; mineralische Dränschicht: $GU \alpha = 0,05$ [1/cm], 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Dicke Oberboden: 10 cm

reich wie bei Lysimeter 2, weisen jedoch einen geringeren Schwankungsbereich auf. Die Messwerte liegen um ca. 5 % – 7 % unterhalb den rechnerisch ermittelten. Ein ähnlicher Verlauf ist nur ansatzweise erkennbar.

9.4.4 Lysimeter 3 – Variante 1

Da die Berechnung von Lysimeter 3 die Sickerwassermengen tendenziell überschätzt, wurde eine Variante untersucht, bei der der Lufteintrittspunkt des Kiesel in der Auffangwanne dem der Dränschicht ($\alpha = 0,05 [1/cm]$) angepasst wurde. Die Vermutung, dass die erhöhten Sickerwassermengen im Kern auf einen zeitweisen Einstau im unteren Bereich

der Dränschicht zurückzuführen sind, konnte jedoch nicht bestätigt werden. Im Gegenteil wurde sogar eine deutliche Erhöhung des Sickerwasseranteils auf 21 % festgestellt, wodurch sich, wie Bild 9-21 zeigt, eine deutliche Abweichung von den Messergebnissen ergibt. Dies ist vermutlich auf einen Wasseraufstieg aus dem Kiesbett in den unteren Bereich der Dränschicht zurückzuführen. In der Dränschicht aufgestiegenes Wasser kann unter bestimmten Voraussetzungen kapillar in den Kern fließen, was im Dammfußbereich zu einem Wasserfluss im Kreis führt.

Die Wassergehalte (Bild 9-22) unterscheiden sich nicht wesentlich von den ursprünglichen Berechnungen von Lysimeter 3.

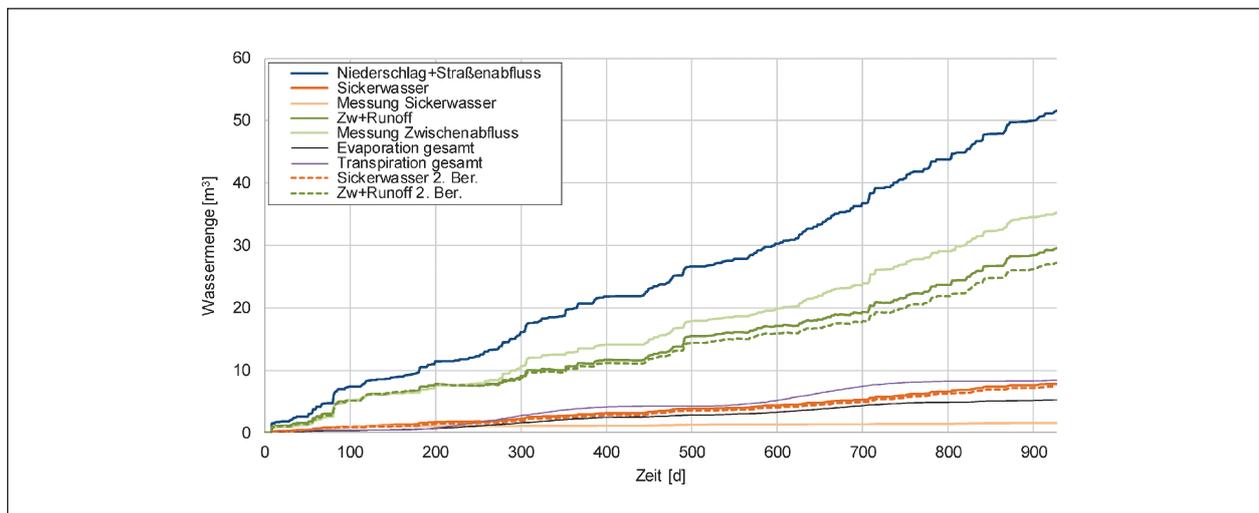


Bild 9-21: Berechnungsergebnisse Lysimeter 3 – Variante 1. Auffangwanne: $GU \alpha = 0,05 [1/cm]$, 10 cm; mineralische Dränschicht: $GU \alpha = 0,05 [1/cm]$, 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3} m/s$; Dicke Oberboden: 10 cm

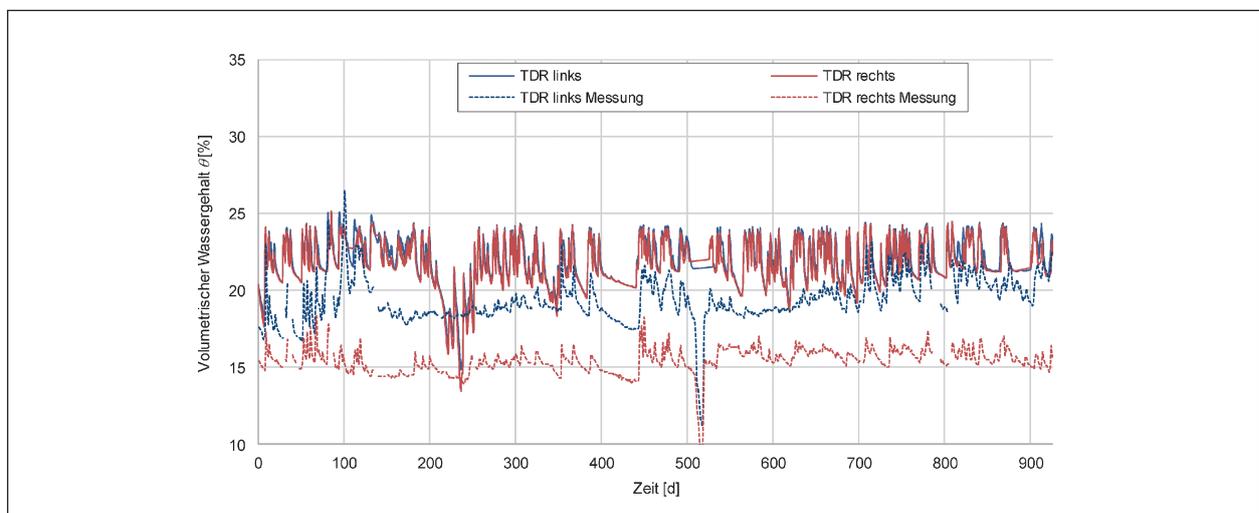


Bild 9-22: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparametersonden in Lysimeter 3 – Variante 1. Auffangwanne: $GU \alpha = 0,05 [1/cm]$, 10 cm; mineralische Dränschicht: $GU \alpha = 0,05 [1/cm]$, 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3} m/s$; Dicke Oberboden: 10 cm

9.4.5 Lysimeter 6

Der Aufbau von Lysimeter 6 besteht aus einem kiesigen Kern (BM 1) mit 20 cm Oberboden im Böschungsbereich. Die Sickerwassermengen werden in der Berechnung deutlich überschätzt. Der Sickerwasseranteil am Gesamtabfluss beträgt 88 % im ersten Berechnungslauf und 83 % im zweiten. Messtechnisch wurden nur 61 % ermittelt. Die ku-

mulierten Wassermengen werden in Bild 9-23 gezeigt. Die gemessenen Wassergehalte liegen um ca. 2 % – 5 % über den rechnerisch ermittelten. Die in Bild 9-24 gezeigten Verläufe passen qualitativ jedoch relativ gut zueinander.

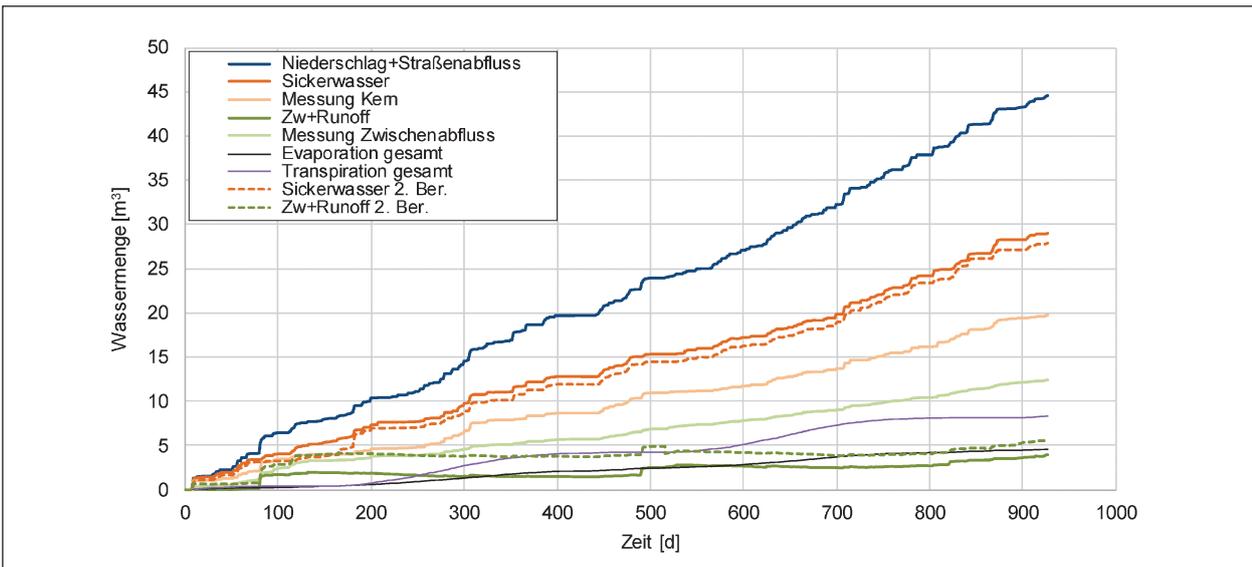


Bild 9-23: Berechnungsergebnisse Lysimeter 6. Auffangwanne: $GU \alpha = 0,5 [1/cm]$, 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3} m/s$; Dicke Oberboden: 20 cm

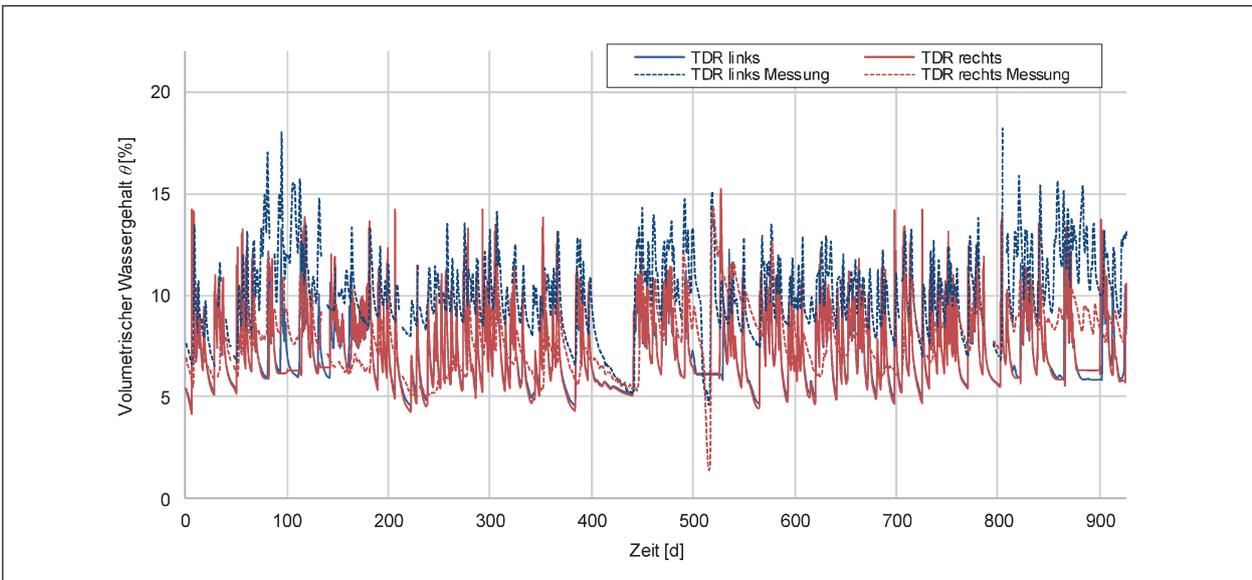


Bild 9-24: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparametersonden in Lysimeter 6. Auffangwanne: $GU \alpha = 0,5 [1/cm]$, 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3} m/s$; Dicke Oberboden: 20 cm

9.4.6 Lysimeter 6 – Variante 1

Da die für Lysimeter 6 rechnerisch ermittelten Sickerwassermengen die gemessenen deutlich übersteigen, wurde in Variante 1 die gesättigte Durchlässigkeit des Banketts um zwei Zehnerpotenzen auf $k_s = 1,5 \cdot 10^{-5}$ m/s reduziert. Das kiesige Kernmaterial (BM 1) und der 20 cm dicke Oberboden blieben dabei wie bei Lysimeter 6. Dies führt jedoch

insgesamt nur zu einer sehr geringen Reduktion des Sickerwasseranteils auf 87 % und liegt damit nach wie vor deutlich über den gemessenen Sickerwassermengen (Bild 9-25). Auf die Wassergehalte (Bild 9-26) im Kern hat die Reduktion der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit des Banketts keinen nennenswerten Einfluss.

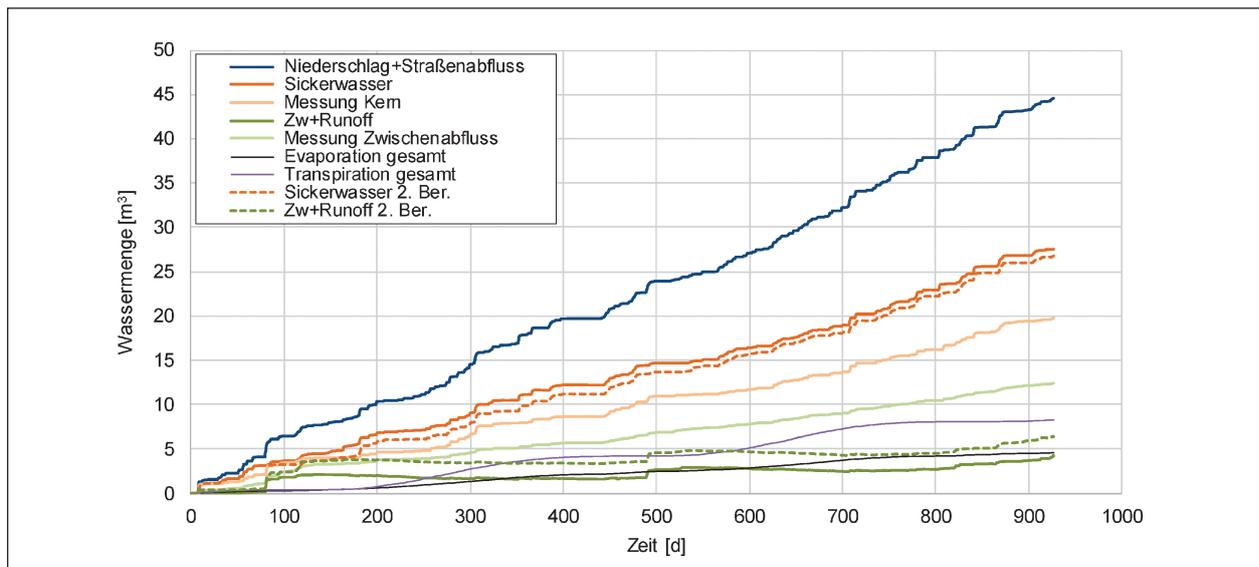


Bild 9-25: Berechnungsergebnisse Lysimeter 6 – Variante 1. Auffangwanne: $GU \alpha = 0,5$ [1/cm], 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-5}$ m/s; Dicke Oberboden: 20 cm

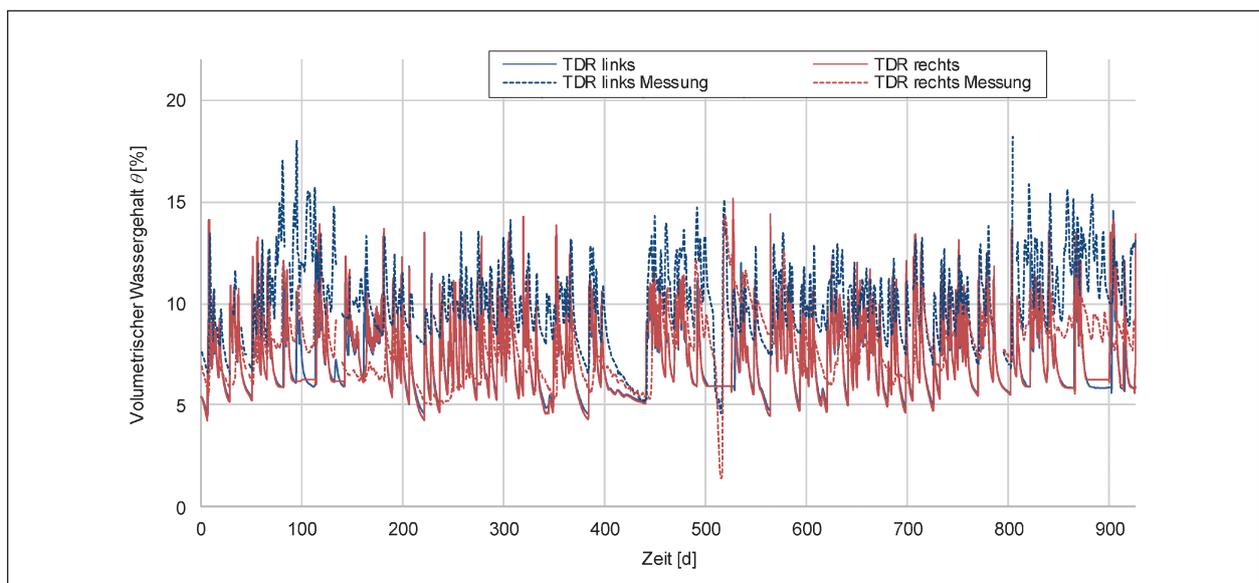


Bild 9-26: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparametersonden in Lysimeter 6 – Variante 1. Auffangwanne: $GU \alpha = 0,5$ [1/cm], 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-5}$ m/s; Dicke Oberboden: 20 cm

9.4.7 Lysimeter 6 – Variante 2

In Variante 2 von Lysimeter 6 (kiesiger Kern BM 1; 20 cm Oberboden) wurde die gesättigte Leitfähigkeit des Banketts auf $k_s = 1,5 \cdot 10^{-6}$ m/s reduziert. Dadurch zeigt sich eine deutliche Reduktion der Sickerwassermengen gegenüber Variante 1 um ca. 6 m^3 , ähnlich wie bei Lysimeter 8 Variante 4. Der Sickerwasseranteil am Gesamtabfluss liegt bei 68 % und reduziert sich damit um 18 % gegenüber Variante 1 (Bild 9-27).

Im 2. Berechnungslauf erhöht sich der Sickerwasseranteil deutlich auf 74 %. Der verhältnismäßig große Anstieg ist dadurch erklärbar, dass die um-

verteilte Wassermenge aus dem 1. Berechnungslauf deutlich größer ist als bei den Varianten mit durchlässigerem Bankett. Der gesamte Oberflächenabfluss müsste aber stärker zurückgehen, damit die Wasserbilanzen auch im 2. Berechnungslauf aufgehen. Die Summe aus Abflüssen und Evapotranspiration übersteigt damit die Summe aus Niederschlag und Straßenabfluss. Die Plausibilität der Ergebnisse des 2. Berechnungslaufs ist somit fragwürdig.

Auf die Verläufe der Bodenwassergehalte hat die Reduzierung der gesättigten Leitfähigkeit des Bankettmaterials offenbar keinen starken Einfluss (Bild 9-28).

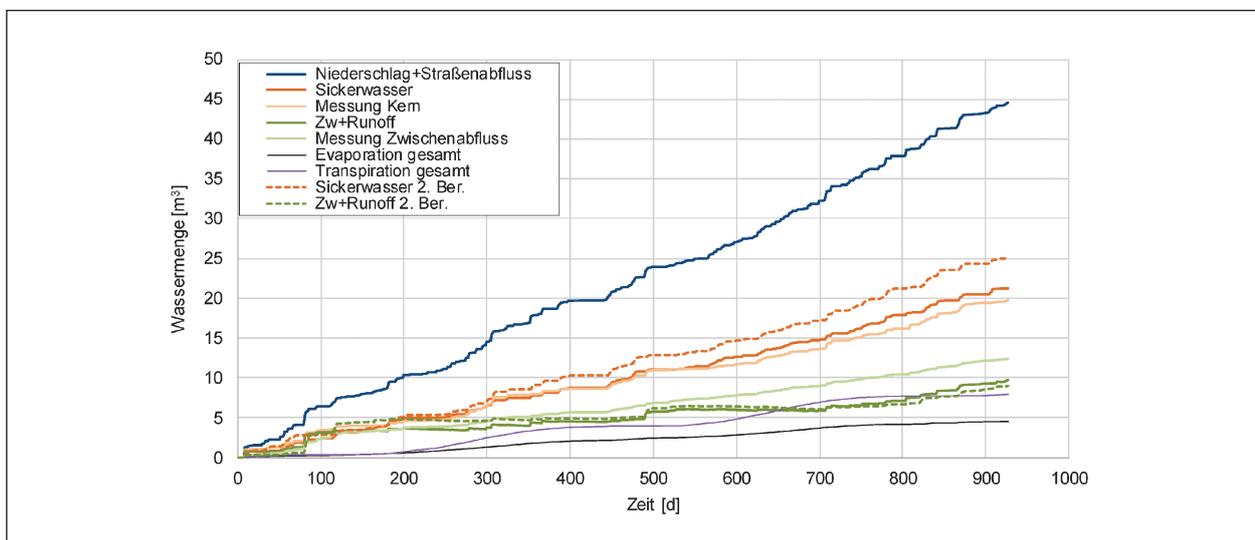


Bild 9-27: Berechnungsergebnisse Lysimeter 6 – Variante 2. Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm], 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-6}$ m/s; Dicke Oberboden: 20 cm

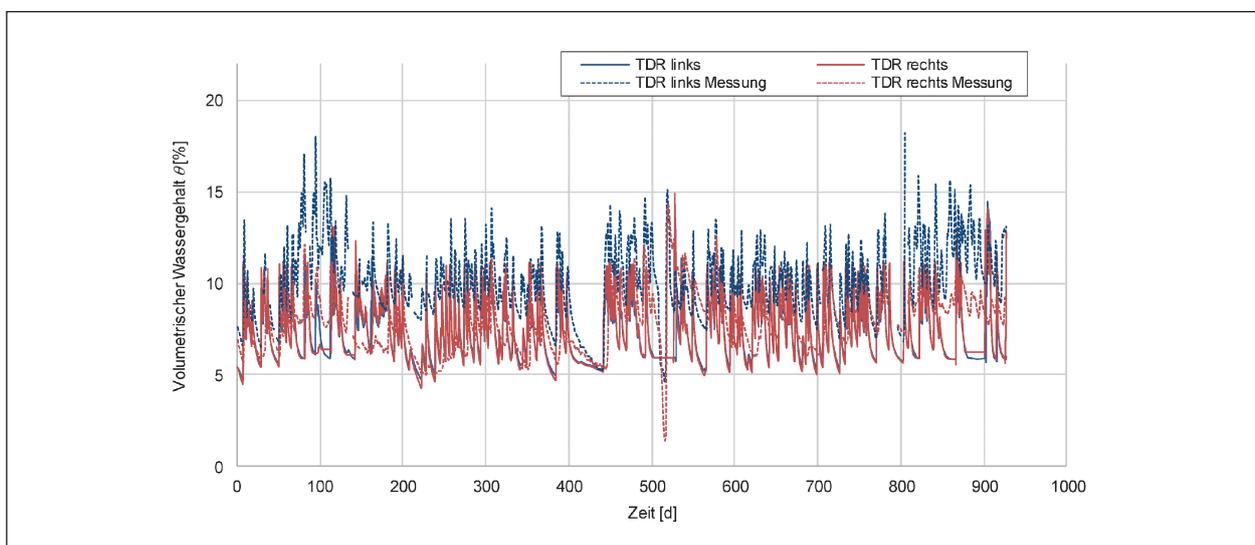


Bild 9-28: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparametersonden in Lysimeter 6 – Variante 2. Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm], 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-6}$ m/s; Dicke Oberboden: 20 cm

9.4.8 Lysimeter 7

Lysimeter 7 ist im Böschungsbereich mit einer 5 cm mächtigen modifizierten mineralischen Abdichtung versehen und weist eine Oberbodendicke von 10 cm auf. Die in Bild 9-29 dargestellten errechneten Sickerwassermengen haben einen Anteil am Gesamtabfluss von 80 % im ersten Berechnungslauf und einen Anteil von 79 % im zweiten Berechnungslauf. Diese relativ geringe Reduktion ist auf große Sickerwassermengen im Bankettbereich zurückzuführen. Daher wird für den zweiten Berechnungslauf nur eine geringe Wassermenge in den Bö-

schungsbereich verlagert, die im Bankettbereich nicht mehr zur Infiltration zur Verfügung steht und im Böschungsbereich nicht durch die Abdichtung eindringen kann. Die in Bild 9-30 gezeigten Verläufe des volumetrischen Wassergehalts im Kern ergeben eine relativ gute Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messungen.

Bei einem Vergleich der Messwerte der Lysimeter 6 und 7 fällt auf, dass die kumulierte Sickerwassermenge bei Lysimeter 7 trotz der sehr gering durchlässigen, modifizierten mineralischen Abdichtung nur geringfügig kleiner ist als bei Lysimeter 6. Dies

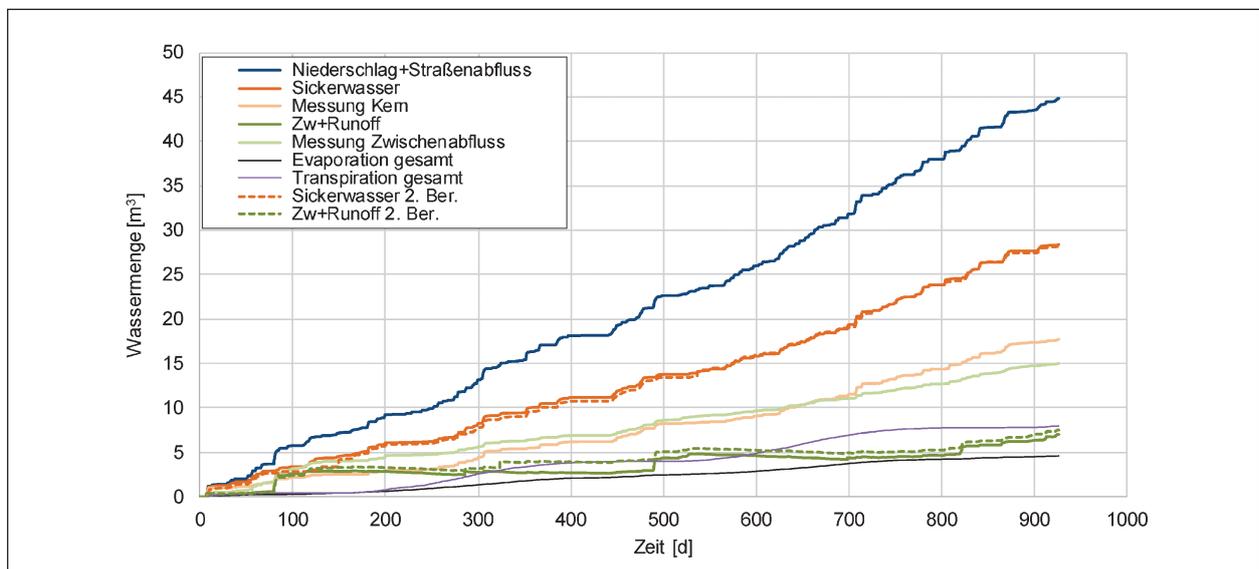


Bild 9-29: Berechnungsergebnisse Lysimeter 7. Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm], 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Dicke Oberboden: 20 cm; modifizierte mineralische Abdichtung: $k_s = 5,4 \cdot 10^{-12}$ m/s, 5 cm

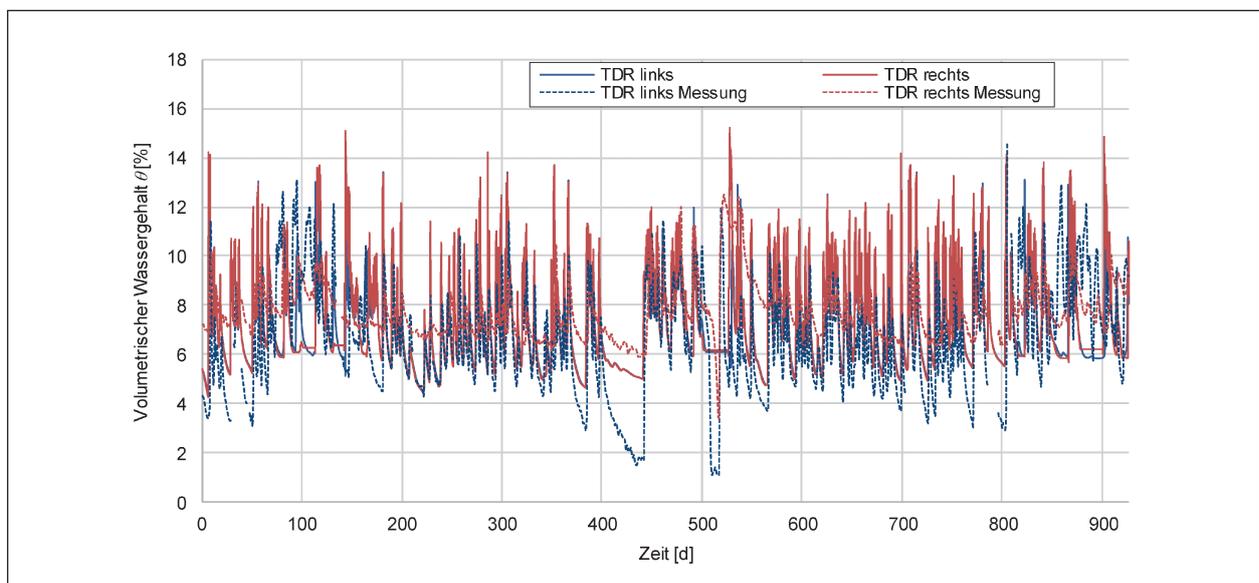


Bild 9-30: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparametersonden in Lysimeter 7. Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm], 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Dicke Oberboden: 20 cm; modifizierte mineralische Abdichtung: $k_s = 5,4 \cdot 10^{-12}$ m/s, 5 cm

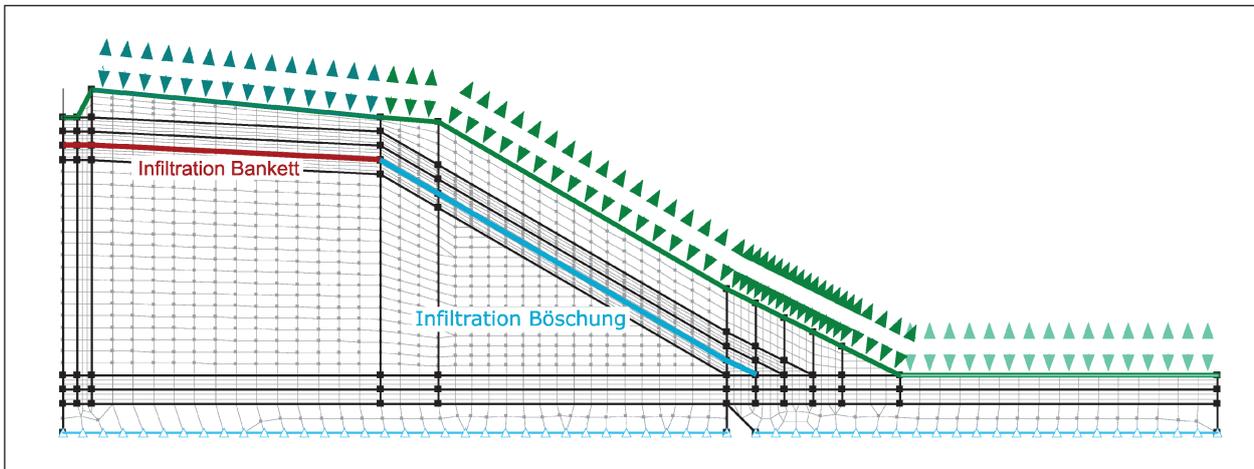


Bild 9-31: Bereiche der Auswertung der Infiltration in den Dammkern in Lysimeter 7

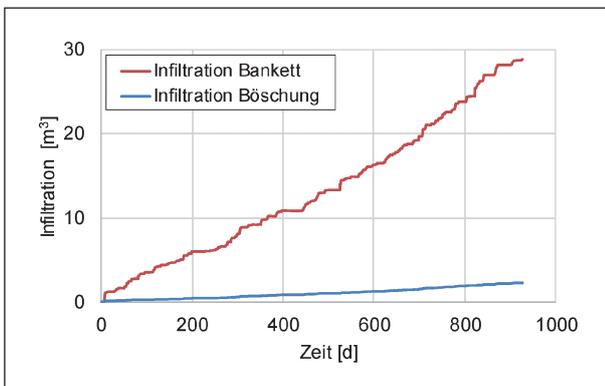


Bild 9-32: Aufteilung der Infiltration in den Kern Lysimeter 7

ist ein Hinweis darauf, dass der größte Teil der Infiltration durch das Bankett stattfindet. Zum besseren Verständnis der Aufteilung der Infiltration, wird diese an der Oberkante des Dammkerns entsprechend Bild 9-31 ausgewertet.

Die Summenkurven der Infiltration an der Oberkante des Kerns sind in Bild 9-32 dargestellt.

Die hauptsächliche Infiltration in den Kern findet im Bereich des Banketts statt. Der mit der modifizierten mineralischen Abdichtung versehene Böschungsbereich hat lediglich einen Anteil von 7 % an der Infiltration in den Kern.

9.4.9 Lysimeter 8

Die Berechnungsergebnisse zu Lysimeter 8 wurden bereits in Kapitel 9.2.6 beschrieben.

9.5 Vergleich der Untersuchungen

Bild 9-33 gibt eine Übersicht über die Berechnungsergebnisse der Freilandlysimeter.

Die kumulierten Wassermengen von Sickerwasser sowie Oberflächen- und Zwischenabfluss sind in Tabelle 9-3 zusammengestellt.

Tabelle 9-4 zeigt die Verhältnisse der kumulierten Wassermengen von Sickerwasser zu Zwischen- und Oberflächenabfluss.

Die Ergebnisse zeigen im Vergleich zu den Messergebnissen, dass die Sickerwassermengen für die meisten Lysimeter überschätzt werden. Bei den Dammkernen mit bindigem Boden (BM 2; Lysimeter 1 – 3) fällt diese Überschätzung jedoch deutlich geringer aus, als bei den Lysimetern mit kiesigem Kern (BM 1; Lysimeter 6 – 8). Die Umverteilung der Oberflächenabflüsse am Bankett in den zweiten Berechnungsläufen führt bei den bindigen Dammkernen zu einer Erhöhung der Sickerwassermengen, da so im Böschungsbereich eine größere Wassermenge zur Infiltration zur Verfügung steht.

Bei den Lysimetern mit kiesigem Kern führt die Umverteilung zumeist zu einer leichten Reduktion des Sickerwassers. Dies begründet sich bei Lysimeter 6 vermutlich in der Ausbildung einer Kapillarsperre zwischen Oberboden und Kern bei bestimmten Saugspannungen und der besseren Ausnutzung des Speichervermögens des Oberbodens mit 20 cm Dicke. Bei Lysimeter 7 kommt zu der Ausnutzung des Speichervermögens des ebenfalls 20 cm dicken Oberbodens noch die sehr gering durchläss-

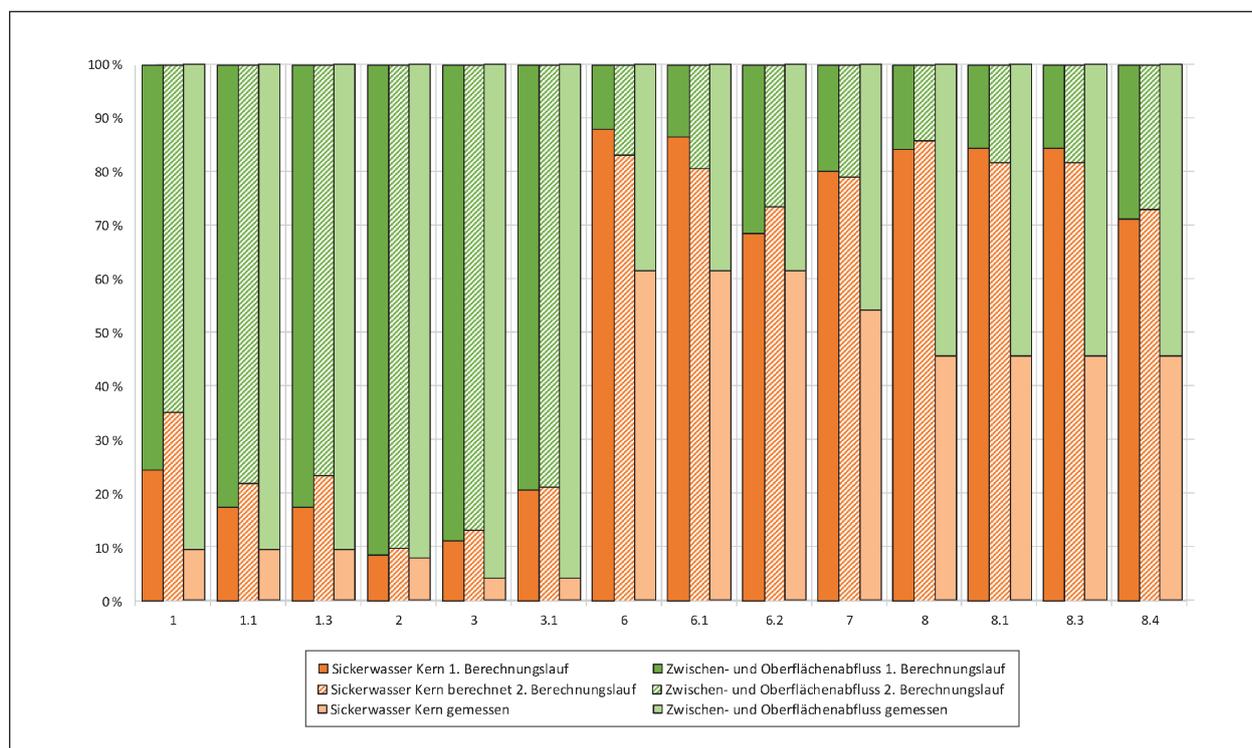


Bild 9-33: Vergleich aller Berechnungsergebnisse der ersten und zweiten Berechnungsläufe mit den Messergebnissen. Die Säulen stellen jeweils das Verhältnis von Sickerwasser, bzw. Oberflächen- und Zwischenabfluss zur Gesamtabflussmenge dar.

Lysimeter	1. Berechnungslauf		2. Berechnungslauf		Gemessen	
	Sickerwasser	Oberflächen- und Zwischenabfluss	Sickerwasser	Oberflächen- und Zwischenabfluss	Sickerwasser	Oberflächen- und Zwischenabfluss
	[m ³]	[m ³]	[m ³]	[m ³]	[m ³]	[m ³]
1	12,96	39,89	18,18	33,40	5,20	49,21
1.1	9,38	44,15	11,51	41,02	5,20	49,21
1.3	9,45	44,61	12,30	40,09	5,20	49,21
2	2,88	30,55	3,34	30,41	2,72	31,66
3	4,38	34,11	4,66	30,50	1,52	35,24
3.1	7,77	29,53	7,37	27,19	1,52	35,24
6	28,99	3,96	27,89	5,66	19,75	12,41
6.1	27,54	4,24	26,76	6,38	19,75	12,41
6.2	21,24	9,73	25,08	8,99	19,75	12,41
7	28,37	7,00	28,20	7,47	17,70	14,99
8	26,76	4,98	25,00	4,09	11,71	14,02
8.1	25,77	4,73	25,40	5,66	11,71	14,02
8.3	25,77	4,73	25,40	5,66	11,71	14,02
8.4	19,49	7,86	22,49	8,28	11,71	14,02

Tab. 9-3: Kumulierte Wassermengen von Sickerwasser sowie Oberflächen- und Zwischenabfluss der Freilandlysimeter

Lysimeter	1. Berechnungslauf		2. Berechnungslauf		Gemessen	
			Sickerwasser	Oberflächen- und Zwischenabfluss		
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	24,5	75,5	35,2	64,8	9,6	90,4
1.1	17,5	82,5	21,9	78,1	9,6	90,4
1.3	17,5	82,5	23,5	76,5	9,6	90,4
2	8,6	91,4	9,9	90,1	7,9	92,1
3	11,4	88,6	13,2	86,8	4,1	95,9
3.1	20,8	79,2	21,3	78,7	4,1	95,9
6	88,0	12,0	83,1	16,9	61,4	38,6
6.1	86,7	13,3	80,8	19,2	61,4	38,6
6.2	68,6	31,4	73,6	26,4	61,4	38,6
7	80,2	19,8	79,1	20,9	54,2	45,8
8	84,3	15,7	85,9	14,1	45,5	54,5
8.1	84,5	15,5	81,8	18,2	45,5	54,5
8.3	84,5	15,5	81,8	18,2	45,5	54,5
8.4	71,3	28,7	73,1	26,9	45,5	54,5

Tab. 9-4: Verhältnisse der kumulierten Wassermengen von Sickerwasser zu Zwischen- und Oberflächenabfluss der Freilandlysimeter

sige modifizierte mineralische Abdichtung hinzu. Durch diese führen auch größere Wassermengen in diesem Bereich nicht zu einer Erhöhung der Sickerwassermenge.

10 Fazit Freilandlysimeter

Bei den Nachrechnungen der Freilandlysimeter konnte gezeigt werden, dass die Sickerwassermengen der Größenordnung nach relativ gut abbildbar sind. Die Güte der Berechnungen hängt dabei jedoch nicht nur von den hydraulischen Kennwerten des Bodenmaterials im Dammkern ab, sondern auch von der Geometrie und den Randbedingungen. Einen noch wesentlicheren Einfluss haben die oberflächennahen Schichten auf die berechneten Wasserbilanzen. Die Wahl der Kennwerte von Oberboden, Bankettmaterial und Dränelementen kann das rechnerische Ergebnis des Wasserhaushalts maßgeblich beeinflussen.

Insbesondere bei den betrachteten Lysimeteraufbauten spielt die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Bankettmaterials eine zentrale Rolle. Dies konnte auch in Variantenuntersuchungen bestätigt werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass

der im Labor ermittelte Durchlässigkeitsbeiwert von $1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s eher zu hoch ist. Ursachen für eine Reduzierung des Durchlässigkeitsbeiwerts können die Nachverdichtung durch Betretung – dies wird insbesondere bei Lysimeter 8 aufgrund benachbarter Arbeiten angenommen – der Eintrag von Feinpartikeln wie Feinsanden und Reifenabrieb im Straßenabfluss sowie der Bewuchs sein. Der Aufbau der Lysimeter ohne Dränelement im Böschungsbereich verstärkt diese Abhängigkeit, da einmal im Bankett versickertes Wasser quasi nicht lateral abfließen kann, sondern sich im Bankettbereich und in der als Trennschicht zum Kernmaterial eingelegten Dränmatte akkumuliert. So steht über einen längeren Zeitraum, auch zu Beginn von Trockenphasen noch Wasser zur Infiltration in den Kern zur Verfügung. Große Infiltrationsmengen im Bankettbereich begründen sich auch durch die flache Neigung der Oberfläche und wurden ebenfalls von BEYER et al. (2007, 2008) beobachtet. Ein großer Einfluss des Bankettbereichs auf den Wasserhaushalt des gesamten Dammaufbaus wurde auch von NORAMBUENA-CONTRERAS et al. (2012) festgestellt.

Obwohl gerade für die Oberflächenschichten einige Materialkennwerte abgeschätzt, bzw. aus Datenbanken von ähnlichen Böden übernommen werden mussten, korrelieren die rechnerisch ermittelten Si-

ckerwassermengen ihrer Größenordnung nach mit den Messergebnissen, werden aber tendenziell überschätzt. Auch die Einzugsflächen der Lysimeter und somit die Mengen der Straßenabflüsse beruhen auf Abschätzungen. Generell wurde bei den Lysimetern mit bindigem Kern eine bessere Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung erzielt als bei den Lysimetern mit kiesigem Kern. Die Lysimeter mit Entwässerungsschichten im Böschungsbereich (Lysimeter 2 mit Dränmatte und Lysimeter 3 mit mineralischer Dränschicht) zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen. Tendenziell überschätzen alle Modelle die Sickerwassermengen. Bei Kernen mit bindigen Materialien fallen die Überschätzungen geringer aus, als bei nicht bindigen Kernen. Überschätzungen der Sickerwassermengen bei der Modellierung wurden auch von MICHAELIDES et al. (2013) und KHIRE et al. (1997) festgestellt. Letztere untersuchten den Aufbau eines Deponieoberflächenabdichtungssystems, der gut mit dem Aufbau nach Bauweise E gemäß M T S E (FGSV, 2017) vergleichbar ist.

Die Umverteilung des Oberflächenabflusses vom Bankettbereich auf die Böschung liefert größtenteils plausible Ergebnisse und ermöglicht es, den Oberflächenabfluss vergleichsweise zutreffend zu ermitteln. Durch die Einflüsse der Eckknoten sind die Ergebnisse in Vadose/W jedoch mit leichten Unschärfen behaftet. Weitere Nachteile liegen in der doppelten Rechenzeit aufgrund zweimaliger Berechnung, sowie der manuellen Datenaufbereitung zur Definition der Eingangsdaten des 2. Berechnungslaufs. Bei kiesigen Kernen macht die Anwendung der Methode daher erst bei einem gering durchlässigem Bankettmaterial Sinn, da vorher nur kleine Anteile des Straßenabflusses nicht im Bankett versickern können, die in der 2. Berechnung und auf die Böschung umverteilt werden.

Diese marginalen Änderungen im Ergebnis rechtfertigen kaum den zusätzlichen Aufwand. Für Prognoseberechnungen, bei denen Randbedingungen und Materialkennwerte abgeschätzt werden müssen, ist davon auszugehen, dass die damit verbundenen Unsicherheiten einen deutlich größeren Einfluss auf die Güte der Ergebnisse haben als die Umverteilung des Oberflächenabflusses. Ähnliche Ergebnisse wurden auch von KOUKOULIDOU und BIRLE (2019) erzielt. Ihre Untersuchungen haben gezeigt, dass bei einem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert des Bankettmaterials von $k_s = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s 90 % des Straßenabflusses im Bereich des Banketts versickern und erst bei niedrigeren Durch-

lässigkeitsbeiwerten ein nennenswerter Oberflächenabfluss im Bereich des Banketts auftritt. Gleichzeitig belegen die Ergebnisse von KOUKOULIDOU und BIRLE (2019), dass der Ansatz der Verteilung des Straßenabflusses auf Bankett und Oberboden, einen relativ geringen Einfluss auf den globalen Wasserhaushalt eines Straßendamms hat. Im Wesentlichen ändert sich nur der Bereich in dem die größte Infiltration stattfindet, die Gesamtmenge an Sickerwasser aber nur marginal. Der Einsatz von Dränelementen unterhalb des Oberbodens/Banketts führt bei bindigen Kernen zu einer weiteren Reduzierung des Einflusses der angesetzten Verteilung des Straßenabflusses auf Bankett und Oberboden, da infolge der Dränelemente nicht in den bindigen Kern infiltrierendes Sickerwasser rasch abgeführt wird. Dies konnte auch an den Berechnungen der Lysimeter 2 und 3 gezeigt werden, bei denen die Umverteilung des Straßenabflusses nur zu geringen Unterschieden führt.

Zu Zeitpunkten großer Niederschlagsintensitäten muss das Modell mit großen Wassermengen aus Niederschlag und Straßenabfluss umgehen. Dies führt dazu, dass für Knoten in bestimmten Bereichen in einzelnen Berechnungsschritten keine Konvergenz erzielt werden konnte. Solche Inkonvergenzen führen zu einer falschen Bilanzierung der Wassermengen an den betreffenden Knoten. Dies äußert sich in der Regel durch eine Überschätzung der Fließrate um mehrere Zehnerpotenzen, was dazu führt, dass die Wasserbilanz des Modells nicht aufgeht. Extreme Sprünge in den Summenkurven der einzelnen Abflüsse sind die Folge. Dadurch lassen sich die Abweichungen in den auftretenden Zeitschritten leicht erkennen und bereinigen, ohne dabei die tatsächliche Bilanz bzw. das Berechnungsergebnis zu verfälschen. Bei größeren Modellgeometrien, wie z. B. in KOUKOULIDOU und BIRLE (2019), ist von einer Minimierung der Konvergenzprobleme auszugehen, da die Wassermengen aus Straßenabfluss auf größeren Dammquerschnitten besser verteilt werden. Eine Verbesserung der Konvergenz ist auch zu erwarten, wenn die Berechnungszeitschritte um den Zeitpunkt starker Regenereignisse verfeinert werden (STRATEN, 2019). Diese Möglichkeit wurde allerdings im vorliegenden Projekt nicht weiterverfolgt, da dies die Rechenzeiten deutlich erhöht hätte und aufgrund der verhältnismäßig großen Straßenabflüsse in Augsburg im Verhältnis zur Dammhöhe und Bankettbreite, keine vollständige Verhinderung von Konvergenzproblemen zu erwarten gewesen wäre.

11 Schlussfolgerungen

11.1 Beurteilungen

Das Gesamtbild der durchgeführten Berechnungen zeigt, dass der Wasserhaushalt von Erdbauwerken aus Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen, Recyclingmaterialien und industriellen Nebenprodukten mit numerischen Methoden mit einzelnen Einschränkungen realitätsnah abgebildet werden kann. Dies zeigt sich sowohl bei den Hallen- als auch bei den Freilandlysimetern. Voraussetzung für eine realitätsnahe Abbildung ist die Kenntnis der hydraulischen Eigenschaften aller verwendeten Baustoffe. Für die durchgeführten Hallenlysimeterversuche lagen Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zu den hydraulischen Eigenschaften der verwendeten Baustoffe mit Ausnahme der geosynthetischen Dränelemente und des Rollrasens vor. Die hydraulischen Eigenschaften dieser Schichten wurden im Rahmen der Simulationsberechnungen für das Hallenlysimeter mit kiesigem Boden und bindigem Boden so festgelegt, dass zwischen Messergebnissen und Simulationsberechnungen eine bestmögliche Übereinstimmung erzielt wurde. Alle weiteren Berechnungen wurden mit den so ermittelten Kennwerten ohne weitere Anpassung der hydraulischen Eigenschaften der betrachteten Baustoffe durchgeführt.

Die relativen Abweichungen der berechneten von den gemessenen Sickerwassermengen (kumulierte Werte) lagen bei den Hallenlysimetern mit folgenden Materialien betragsmäßig unter 5 % und ergaben damit eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Experiment und numerischer Berechnung:

- Kiesiger Boden (BM 1) mit und ohne TSM (hier wurden die hydraulischen Kennwerte der Dränschicht und des Rollrasens angepasst),
- Bindiger Boden (BM 2) mit TSM,
- RC 2 und RC 5 ohne TSM,
- SKA und SKA-TUM mit und ohne TSM.

Etwas größere Abweichungen zwischen 5 % und 10 % ergaben sich bei:

- HMVA mit TSM,
- GRS und GRS-TUM ohne TSM.

Abweichungen über 10 % waren für folgende Materialien zu verzeichnen:

- Bindiger Boden ohne TSM (12,6 %),
- HMVA ohne TSM (15,4 %),
- RC 2 und RC 5 jeweils mit TSM (43,7 % und 44,0 %).

Die Hallenlysimeter zeigen gerade für die natürlichen Böden (BM1 und BM 2) eine gute Abbildbarkeit mit numerischen Berechnungen. Dies ist ein Indiz dafür, dass für solche Materialien verlässliche Sickerwasserprognosen mit numerischen Modellen erzielt werden können.

Bei den Freilandlysimetern fielen die Abweichungen zwischen messtechnisch erfassten und rechnerisch ermittelten Sickerwassermengen tendenziell höher aus als bei den Hallenlysimetern. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass das Regenregime bei der Berechnung der Hallenlysimeter genau bekannt war, während bei den Freilandlysimetern Abschätzungen in Bezug auf den Straßenabfluss zu treffen waren. Anpassungen an den hydraulischen Kennwerten der einzelnen Schichten mit dem Ziel einer besseren Wiedergabe der experimentellen Ergebnisse wurden zunächst nicht vorgenommen.

Abweichungen unter 5 % ergaben sich dabei lediglich bei Lysimeter 2 (bindiger Boden, BM 2 mit Dränmatte im Böschungsbereich). Abweichungen in den Sickerwassermengen zwischen 5 % und 10 % wurden bei der Variante 1.1 (bindiger Boden, BM 2) und Lysimeter 3 (bindiger Boden, BM 2 und 10 cm Kiesdränschicht im Böschungsbereich) ermittelt. Bei den übrigen Lysimetern waren die Abweichungen größer als 10 % mit einem Maximalwert von 58,5 % bei Lysimeter 8.

Nach Anpassung der hydraulischen Kennwerte für das Bankettmaterial konnte für die Variante 1.3 mit bindigem Boden (BM 2) eine Abweichung im Sickerwasser von 7,8 % und für die Variante 6.2 mit kiesigem Boden (BM 1) eine Abweichung von 4,6 % erzielt werden.

Auf den ersten Blick erscheinen diese Abweichungen sehr hoch. Unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen und Abschätzungen vieler Parameter und Randbedingungen sind diese Ergebnisse dennoch als gut zu bewerten. Aufgrund von Problemen bei der präzisen Quantifizierung des Zuflusses zu den Lysimetern, bzw. von deren Einzugsgebieten und den zu treffenden Annahmen für die Abbildung der Schichten an der Oberfläche im Modell, war eine genaue Übereinstimmung von Berech-

nungsergebnissen und Messdaten nicht zu erwarten. Eine Kalibrierung des Modells (Anpassung der hydraulischen Eigenschaften einzelner Schichten) durch inverse Modellierung konnte bei den Freilandlysimetern nicht wie bei den Hallenlysimetern durchgeführt werden, da jedes Freilandlysimeter ein von der Niederschlagsintensität abhängiges Einzugsgebiet hat. Die sich daraus ergebenden Unsicherheiten minimieren die Genauigkeit bei der Ermittlung des individuellen Zuflusses zu den einzelnen Lysimeterbecken. Die Anpassung der Bodenkennwerte durch inverse Modellierung wäre dadurch mit schwer abschätzbaren Unsicherheiten behaftet gewesen. Aus diesem Grund wurde eine Abschätzung der hydraulischen Kennwerte von Bankettmaterial, Oberboden und Dränelement nach bodenmechanischen Kenngrößen und Vergleich zu Datenbank- und Literaturwerten vorgenommen. Dennoch bringt auch diese Methode Unsicherheiten in das Modell, die sich überlagern bzw. gegenseitig beeinflussen können.

11.2 Zuverlässigkeit der Modellberechnungen

Der Vergleich zwischen Hallen- und Freilandlysimetern zeigt, dass die Qualität der Berechnungsergebnisse stark von der Verlässlichkeit der Eingangsparameter abhängt. Während die Berechnungen für die Hallenlysimeter in der Regel gute Ergebnisse mit geringeren Abweichungen von den Messungen lieferten, waren die Abweichungen bei den Freilandlysimetern aufgrund mehrerer zu treffender Annahmen höher. Die numerischen Modelle reagieren besonders sensitiv auf Änderungen der hydraulischen Eigenschaften der Schichten an der Oberfläche. Dies zeigte sich bereits in den Voruntersuchungen zum Rollrasen und den Dränmatten. Die Parameterstudie zur Verwendung einer fiktiven Kiesdeckschicht hat gezeigt, dass das Modell sehr sensitiv auf die Variation der gesättigten Leitfähigkeit dieser Schicht reagiert. Dazu kommen noch Verfälschungen der berechneten Wassermengen aus nicht konvergierten Knoten bei zu hohem Niederschlag bzw. Sickerwasserandrang. Aufgrund der Sensitivität der Modelle bezüglich der hydraulischen Eigenschaften der Deckschichten ist die Kenntnis der hydraulischen Eigenschaften dieser Schichten erforderlich, um verlässliche Berechnungsergebnisse zu erzielen. Daneben hängt die Durchsickerung des Damms aber auch von den Materialeigenschaften des Dammbaustoffs ab. Liegt die gesättig-

te hydraulische Leitfähigkeit des Bankettmaterials über der des Kernmaterials, so sind die Sickerwassermengen überwiegend von den Eigenschaften des Dammbaustoffs abhängig. Unterschreitet die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Bankettmaterials die des Dammbaustoffs, reduziert sich die im Bereich des Banketts infiltrierende Wassermenge entsprechend und der Oberflächenabfluss im Bankettbereich nimmt zu. Die Geometrie der Freilandlysimeter begünstigt bzw. verstärkt diesen Effekt durch die zwischen dem Kern und dem Bankett angeordnete Dränmatte. In den Lysimetern ohne Entwässerungsschicht im Böschungsbereich kann die Dränmatte seitlich nicht entwässern und speichert so zeitweise Perkolat aus dem Bankett und gibt es entsprechend der saugspannungsabhängigen Leitfähigkeit des Dammkerns an diesen zeitverzögert ab. In den Freilandlysimetern band die zwischen Bankett und Dammkern befindliche Dränmatte in den Oberboden im Böschungsbereich ein. Die Nachbildung dieser Einbindung war im Modell aus geometrischen Gründen nicht möglich. Es ist jedoch davon auszugehen, dass dieser Unterschied zwischen Experiment und Modell keinen relevanten Einfluss auf die Ergebnisse der Berechnung hat, da die Leitfähigkeit des Oberbodens im Laufe der Berechnung stets unterhalb der der Dränmatte lag. Somit war keine nennenswerte Entwässerung aus der Dränmatte in den Oberboden im Lysimeter zu erwarten.

Der Einsatz einer Dränschicht im Böschungsbereich reduziert den Einfluss des Dammbaustoffs auf die Sickerwassermenge deutlich, was auch von KOUKOULIDOU und BIRLE (2019) beobachtet wurde. Numerische Berechnungen zum Wasserhaushalt von Straßendämmen werden bei Vorhandensein eines Dränelements im Böschungsbereich zuverlässiger. So zeigten sich – bis auf eine Ausnahme bei RC-Baustoffen – sehr gute Übereinstimmungen zwischen gemessenen und berechneten Sickerwassermengen, sowohl bei den Hallen- als auch bei den Freilandlysimetern, unter Verwendung der zuvor an den Modellen der Hallenlysimeter mit bindigem und kiesigem Kern angepassten Eigenschaften des Dränelements.

Weniger empfindlich reagieren die Modelle auf die Verteilung des Niederschlags und die Verteilung des Straßenabflusses auf Teilbereiche der Modelloberfläche. Die Berechnung mit Tagesmittelwerten der Klimarandbedingung zeigte an den Hallenlysimetern bei den meisten Materialien kaum Unterschiede im Vergleich zum Ansatz der tatsächlichen

Regenintensitäten. Geringe Abweichungen zur Berechnung mit tatsächlichem Regenregime zeigten Materialien mit bindigem Anteil und HMVA. Insofern ist diese für die Freilandlysimeter gewählte Vorgehensweise aus praktischen Erwägungen durchaus sinnvoll. Zum einen ist die Menge der aufzubereitenden Eingangsdaten bei längeren Simulationszeiträumen dadurch deutlich einfacher zu handhaben, zum anderen wird der Einfluss von Starkregenereignissen mit extremen Regenintensitäten abgemindert. So können ggf. Konvergenzprobleme vermieden werden.

Zur Vermeidung numerischer Konvergenzprobleme wäre auch eine Verfeinerung der Rechenschritte, also die Verkürzung des Zeitintervalls für den Zeitraum eines Starkregenereignisses möglich. Dies ist jedoch zumeist mit hohem manuellem Aufwand verbunden. Eine automatische Anpassung der Rechenschritte (adaptive time steps) ist in Vadow/W prinzipiell möglich. Erfahrungen im Rahmen der Voruntersuchungen zeigten jedoch, dass durch die zeitweise hohen Wassermengen aus dem Straßenabfluss sich die Rechenzeiten deutlich erhöht hätten.

Bezüglich der Berücksichtigung der hydraulischen Eigenschaften der Baustoffe im Modell ist zu beachten, dass die Programme Vadose/W und Seep/W die Hysterese der SWRC nicht abbilden. Im vorliegenden Fall wurde mit den hydraulischen Eigenschaften der Entwässerung gearbeitet. Dies kann besonders bei einer Wiederbefeuchtung des Bankettmaterials und des Oberbodens nach längeren Trockenphasen zu einer Fehleinschätzung der Saugspannungen und in der Folge auch der hydraulischen Leitfähigkeit führen. Neben der Ermittlung der tatsächlichen Evapotranspiration beeinflusst dies in der Folge das rechnerisch ermittelte Verhältnis zwischen Infiltration und Oberflächenabfluss. Eine weitere Programmeinschränkung ist die fehlende Möglichkeit der automatischen Umverteilung des Oberflächenabflusses auf andere Bereiche der Oberfläche. Damit würde auch die bei der Auswertung in Vadose/W entstehende Unschärfe an den Eckknoten am Übergang zwischen Bankett und Böschung sowie am Böschungsfuß entfallen, die je nach Modellgeometrie zu leichten Verzerrungen bei den Wasserbilanzen führt.

Bei Einsatz numerischer Modelle für Prognoseberechnungen des Wasserhaushalts von Straßendämmen ist die Kenntnis der hydraulischen Eigenschaften aller Schichten erforderlich. Für bodenarti-

ge Materialien ist die experimentelle Ermittlung der hydraulischen Kennwerte der Entwässerung problemlos möglich. Die Ermittlung des Bewässerungspfades ist etwas aufwändiger. Die Einschränkung der ausschließlichen Betrachtung des Entwässerungspfades ist in Anbetracht der im vorliegenden Forschungsvorhaben erzielten Ergebnisse vertretbar, zumal eine Kombination aus Be- und Entwässerungspfad derzeit nicht von allen kommerziell verfügbaren Programmen unterstützt wird.

Die Ermittlung der hydraulischen Eigenschaften von Dränmatten gestaltet sich aufgrund von deren Dreischichtigkeit (von zwei Vlieslagen umgebener Dränkern) schwieriger. Zwar können die Eigenschaften der Vliesstoffe im Labor mit entsprechenden Verfahren untersucht werden, ergeben jedoch aufgrund der eng gestuften Porengrößenverteilung eine sehr steile Saugspannungs-Wassergehaltsbeziehung und damit eine steil abfallende hydraulische Leitfähigkeit bei geringer Erhöhung der Saugspannung. Wie Voruntersuchungen ergaben, führt dies zu Konvergenzproblemen. Des Weiteren wird damit der hochporöse, sehr gut leitfähige Dränkern bzw. die Kombination der Schichten noch nicht berücksichtigt. Einerseits wäre die Modellierung einer Dränmatte als Dreischichtsystem wünschenswert, da dies die Realität am besten wiedergeben und die Modellierung mit produktspezifischen Eigenschaften unterschiedlicher Dränmattenfabrikate ermöglichen würde. Andererseits bringt jede zusätzliche oberflächennahe Schicht auch weitere Unsicherheiten in das Modell und kann Berechnungen zum Wasserhaushalt unerwünscht verfälschen. Um Lösungsansätze zu diesem Problem zu finden, ist weiterer Forschungsbedarf notwendig.

12 Zusammenfassung und Ausblick

Die Durchsickerung von Erdbauwerken, wie Straßendämmen und Schutzwällen, ist im Zusammenhang mit dem Einsatz von Ersatzbaustoffen im Erdbau von großer Relevanz. Das Merkblatt für Technische Sicherungsmaßnahmen im Erdbau M TS E stellt dazu verschiedene Bauweisen für den technisch gesicherten Einbau von Böden mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen in Erdbauwerken vor. Die Bauweise E nimmt darin eine Sonderstellung ein: Der Dammkern besteht aus schwach durchlässigem Material, um die Durchsickerung zu minimie-

ren. Auf weitere technische Dichtungselemente wird verzichtet. Der Wasserhaushalt dieser Bauweise wurde in Variationen sowohl in Freiland- als auch in Hallenlysimetern eingehend untersucht (BRAND et al. 2016; KELLERMANN-KINNER et al. 2016, 2017). Dabei kamen natürliche Bodenmaterialien, industrielle Nebenprodukte und Recycling-Material zum Einsatz. Gegenstand des vorliegenden Forschungsvorhabens war die numerische Modellierung dieser Lysimeteruntersuchungen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnte gezeigt werden, dass sich die experimentell ermittelten Sickerwassermengen mithilfe numerischer Berechnungen mit der Finite-Elemente-Methode in ihrer Größenordnung abbilden lassen.

Im Rahmen einer Literaturrecherche wurde zunächst auf den Stand der Forschung zu Lysimeteruntersuchungen und zur numerischen Simulationen des Wasserhaushalts von Straßendämmen eingegangen. Dabei werden unter anderem Besonderheiten bei numerischen Simulationen des Wasserhaushalts betrachtet. Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass die Sickerwassermengen durch Erdbauwerke auch bei Kenntnis der hydraulischen Eigenschaften der Böden rechnerisch tendenziell überschätzt werden.

Grundlage für die durchgeführten numerischen Berechnungen bilden die Untersuchungsergebnisse der Augsburger Freilandlysimeter und der Hallenlysimeter der BAST. Die Lysimeter wurden entsprechend ihres Aufbaus in zweidimensionalen Modellberechnungen untersucht. Die Geometrie der Modelle wurde dabei, soweit aus Gründen der Abbildbarkeit in einem Finite-Elemente-Modell erforderlich, geringfügig angepasst. Des Weiteren wurden Anfangs- und Randbedingungen definiert. In den verwendeten Programmen Vadose/W und Seep/W können durch Definition einer Klima-Randbedingung Prozesse an der Oberfläche wie Evaporation, Transpiration, Infiltration und Oberflächenabfluss in Abhängigkeit von den zeitlich variablen klimatischen Verhältnissen abgebildet werden.

Die Festlegung der verwendeten Bodenkennwerte erfolgte bei den Kernmaterialien auf der Grundlage vorhandener Untersuchungsergebnisse bzw. durch Abschätzung anhand von Datenbanken. Auch die Kennwerte der Schichten an der Oberfläche, wie Rollrasen und Entwässerungsschicht wurden zunächst abgeschätzt und in umfangreichen Voruntersuchungen an zwei Modellen der Hallenlysimeter durch inverse Modellierung angepasst. Die bei

den experimentellen Untersuchungen verwendeten Dränmatten besitzen in der Realität eine Dicke von ca. 1 – 2 cm, was im Modell aus Gründen der Netzgenerierung aber nur bedingt abbildbar ist. Stattdessen wurde die Dränmatte im Modell als poröses Medium mit einer Dicke von ca. 5 cm abgebildet. Für die Berechnungen der Hallenlysimeter wurde zunächst eine Sensitivitätsuntersuchung unter Variation der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung von Vliesstoffen und auch von Bodenmaterialien der Dränschicht durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die Parameter der Dränschicht die Sickerwassermengen im Dammkern maßgeblich beeinflussen.

Die Berechnungsergebnisse der Hallenlysimeter zeigen bei den meisten verwendeten Böden und Baustoffen eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen. Sowohl bei der Verwendung von bindigen als auch von nichtbindigen Materialien führte das Dränelement in den Berechnungen wie auch bei den Experimenten zu einer signifikanten Reduzierung der Kerndurchsickerung. Baustoffe mit intragranularer Porenstruktur, wie z. B. Recyclingbaustoffe mit Betonbruch zeigen ohne Dränmatte eine gute Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung. Größere Abweichungen zwischen berechneten Werten und Messergebnissen zeigten sich bei diesen Materialien jedoch mit darüber liegender Dränmatte: Hier ergab die Berechnung deutlich geringere Sickerwassermengen im Dammkern als in der Realität gemessen wurden. Dies kann mehrere Ursachen, wie z. B. eine Randumläufigkeit in den Experimenten im Dammfußbereich, erhöhte Wasseraufnahme aufgrund osmotischen Potenzials oder des dualen Porensystems haben. Insbesondere sind bei der intragranularen Porosität Abweichungen zwischen verwendetem Material und den Eingangsparametern der Simulation denkbar. Eine genaue Eingrenzung der Ursachen war im Rahmen der Berechnungen nicht möglich.

Ein weiterer Aspekt war die Modellierung der Niederschlagsereignisse mit Tagesmittelwerten. In vielen Fällen waren dabei nur geringfügige Unterschiede zu den Berechnungen mit tatsächlichem Regenregime zu verzeichnen. Etwas größere Abweichungen zeigten sich bei Materialien mit Feinkornanteil und bei Hausmüllverbrennungssasche.

Bei den Freilandlysimetern haben Voruntersuchungen gezeigt, dass eine weitere wichtige Fragestellung die Abbildung des Straßenabflusses im Modell

betrifft. Dieser führt in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität zu vergleichsweise großen Wassermengen, die im Bankettbereich auftreten und in der Realität zu einem Oberflächenabfluss führen, was im Modell aber nicht bzw. nur eingeschränkt wiedergegeben werden kann. Stattdessen ist für die Modellberechnungen eine Annahme zu treffen, welcher Anteil des Straßenabflusses im Bankett- und Böschungsbereich infiltriert. In Voruntersuchungen wurde die Möglichkeit der Verteilung des Straßenabflusses mithilfe einer fiktiven Kiesschicht auf der Modelloberfläche erörtert. Die Ergebnisse zeigten jedoch, dass diese Schicht einen zu großen Einfluss auf den gesamten Wasserhaushalt des Lysimeters hat. In einer Variante die letztendlich zum Einsatz kam wurde der Straßenabfluss in Form von Niederschlag zunächst nur im Bankettbereich aufgegeben. In diesem Bereich bilanzierter Oberflächenabfluss wurde in einem zweiten Berechnungslauf auf den Böschungsbereich umverteilt. Diese Umverteilung führte bei den betrachteten Lysimeteraufbauten letztendlich jedoch zu vergleichsweise geringen Veränderungen bezüglich des Wasserhaushaltes und insbesondere der Sickerwassermengen.

Weitere Variantenuntersuchungen wurden in Bezug auf die Modellgeometrie und die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Bankettmaterials durchgeführt. Bei dem Aufbau der Freilandlysimeter hat die hydraulische Leitfähigkeit im Bankettbereich einen deutlichen Einfluss auf die Sickerwassermengen im Kern. Eine deutliche Reduzierung der Sickerwassermengen tritt allerdings erst auf, wenn die hydraulische Leitfähigkeit des Banketts unter der des Kernmaterials liegt.

Die Berechnung der Freilandlysimeter erfolgte über einen Zeitraum von etwa 2,5 Jahren unter Ansatz der Klimadaten mit Tagesmittelwerten. Die Berechnungsergebnisse zeigen eine gute Abbildbarkeit der experimentellen Untersuchungen. Insbesondere bei bindigen Materialien und bei Einsatz einer Dränmatte oder einer mineralischen Entwässerungsschicht lassen sich gute Übereinstimmungen erzielen. Sowohl bei bindigen als auch bei kiesigen Kernmaterialien werden die Sickerwassermengen in den Berechnungen jedoch tendenziell überschätzt.

Wie auch die Untersuchungen von KOUKOULIDOU und BIRLE (2019) haben die vorliegenden Untersuchungen gezeigt, dass die hydraulischen Eigenschaften der oberen Schichten den Wasser-

haushalt von Straßendämmen maßgeblich beeinflussen und für Prognoseberechnungen entsprechende Informationen vorliegen sollten. Prognoseberechnungen zum Wasserhaushalt von Straßendämmen sind auch bei Kenntnis der hydraulischen Eigenschaften der Baustoffe mit Unsicherheiten behaftet, wobei die zu erwartenden Sickerwassermengen rechnerisch tendenziell überschätzt werden.

Um die Verlässlichkeit und Präzision von Prognoseberechnungen zu erhöhen, werden weitere Erkenntnisse zu verschiedenen Aspekten der Modelle benötigt. Besonders wichtig ist die Entwicklung eines Modells, das die Eigenschaften einer Dränmatte verlässlich abbildet. Ideal wäre die Modellierung der Dränmatte als Dreischichtsystem. Dies würde vor allem die Abbildung unterschiedlicher Dränmattefabrikate mit verschiedenen Eigenschaften der einzelnen Schichten ermöglichen. Da eine größere Anzahl an Schichten jedoch zusätzliche Unsicherheiten in ein Modell bringt ist in weiteren Studien zu untersuchen, wie die einzelnen Schichten einer Dränmatte und deren hydraulische Eigenschaften in ein Modell bestmöglich implementiert werden sollten. Dabei sind sowohl die Benetzungseigenschaften der verwendeten Vlies-Materialien als auch deren Modifikation durch Avivagen zu berücksichtigen.

Eine automatische Umverteilung des Oberflächenabflusses von einem Modellbereich auf einen anderen über die Klimarandbedingung wäre wünschenswert. Hierzu sind Weiterentwicklungen der Programme erforderlich. Auch die Berücksichtigung der Hysterese, also der Unterschiede zwischen Be- und Entwässerungspfad auf Programmseite würde zu einer Erhöhung der Präzision der Berechnungsergebnisse beitragen.

Im Hinblick auf weiterführende experimentelle Untersuchungen sind Hallenlysimeteruntersuchungen aus wissenschaftlicher Sicht aussagekräftiger als die durchgeführten Feldlysimeterversuche. In weiterführenden Untersuchungen wäre dabei die Erfassung zusätzlicher Messwerte hilfreich. So könnten Messergebnisse von Saugspannungen an unterschiedlichen Stellen eines Lysimeters einerseits Aufschluss über die Sickerpfade geben und andererseits zur Kalibrierung numerischer Modelle verwendet werden. Eine separate Erfassung von Oberflächen-, Oberboden- und Dränmattenabflüssen ergäbe zusätzliche Einsicht in die Wasserbewegungen in den Schichten nahe der Oberfläche. Damit

könnten ggf. auch Unzulänglichkeiten in den Modellierungen in Bezug auf die Sensitivität der oberflächennahen Schichten besser erkannt werden. Zur näheren Untersuchung des Kapillarsperreneffekts ist auch eine separate Erfassung des in den drei Schichten der Dränmatte lateral transportierten Wassers denkbar. Am Dammfuß des verwendeten Hallenlysimeters ist die Minimierung des Randeinflusses der flachen Trennwand, die den Damm vom Überlaufbecken trennt, empfehlenswert. Dies kann z. B. durch Einlage von Blechen geschehen, um eine mögliche Randumläufigkeit ausschließen zu können.

Für die Baupraxis ist die messtechnische Erfassung des Wasserhaushalts von Straßendämmen und Lärmschutzwällen aufgrund bauartspezifischer Besonderheiten empfehlenswert. Die Lysimeteruntersuchungen und deren Vergleich mit den Berechnungsergebnissen haben gezeigt, dass stets bauwerks- und herstellungsbedingte spezielle Parameter und Aspekte vorliegen, die den Wasserhaushalt beeinflussen können. Ohne Erfassung und Analyse von in-situ gewonnenen Messergebnissen bleiben bestimmte Einflussgrößen in Berechnungen ggf. unberücksichtigt.

Literatur

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. (1998): Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO irrigation and drainage paper 56, <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e07.htm>, Zugriff am 10.08.2018
- APUL, D. S.; GARDNER, K. H.; EIGHMY, T. T. (2007): Modeling hydrology and reactive transport in roads: The effect of cracks, the edge, and the contaminant properties. In: Waste Management, Vol. 27, pp. 1465-1475
- ARYA, L. M.; PARIS, J. F. (1981): A Physioempirical Model to Predict the Soil Moisture Characteristic from Particle-Size Distribution and Bulk Density Data. In: Soil Science and Society of America Journal, Vol. 45, pp. 1023-1030
- BARBOUR, S. L.; FREDLUND, D. G.; GAN, J. K.-M.; WILSON, G. W. (1992): Prediction of Moisture Movement in Highway Subgrade Soils. Proceedings of the 45th Annual Canadian Geotechnical Conference, Toronto, Canada
- BAST (2016): Prüfbericht – Nr. LA13.101-02 Analyse Bankettmaterial Augsburg. Bundesanstalt für Straßenwesen, Abteilung Straßenbautechnik, Bergisch Gladbach, 11.05.2016
- BENSON, C. H.; BOHNHOFF, G. L.; APINWANTRAGOON, P.; OGORZALEK, A. S.; SHACKELFORD, C. D.; ALBRIGHT, W. H. (2004): Comparison of model predictions and field data for an ET cover. Tailings and Mine Waste '04, London
- BEYER, C.; KONRAD, W.; RÜGNER, H.; BAUER, S.; HEE, P. C.; LIEDL, R.; GRATHWOHL, P. (2007): Modellbasierte Sickerwasserprognose für die Verwertung von Recycling-Baustoff in technischen Bauwerken. In: Grundwasser, Band 12, S. 94-107
- BEYER, C.; KONRAD, W.; RÜGNER, H.; BAUER, S.; LIEDL, R.; GRATHWOHL, P. (2008): Model-based predictions of long-term leaching of contaminants from secondary materials in road constructions and noise protect dams. In: Waste Management, Vol. 23, No. 2, S. 839-850
- BIGL, S. R.; BERG, R. L. (1996): Testing of Materials from the Minnesota Cold Regions Pavement Research Test Facility, CRREL: 38
- BOLLER, M.; KAUFMANN, P.; OCHSENBEIN, U.; STEINER, M.; LANGBEIN, S.; SCHEIWILLER, E.; BRACHER, M. (2005): Bankette bestehender Straßen. Forschungsauftrag VSS 2001/202 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Straßen- und Verkehrsfachleute (VSS)
- BOUAZZA, A.; ZORNBERG, J. G.; McCARTNEY, J. S.; NAHLAWI, H. (2006): Significance of Unsaturated Behaviour of Geotextiles in Earthen Structures. In: Australian Geomechanics, Vol. 41, No. 3, pp. 133-142
- BRAND, M.; TIFFERT, A.; ENDRES, M.; SCHNELL, M.; MARKS, T.; KOCHER, B. (2016): Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Untersuchungen von Bauweisen in Freilandlysimetern. Teil 1 Untersuchungszeitraum 2010 – 2013. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau Heft S 103

- BROOKS, R.; COREY, A. (1964): Hydraulic properties of porous media, Hydrology Papers Colorado State University
- BÜRGER, M.; KOCHER, B.; MARKS, T.; HILLMANN, R. (2008): Ersatzbaustoffverordnung: Modellannahmen für Straßenbauwerke. Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen
- COLBOND (2007): Enkadrain®ZB Produktbeschreibung. Colbond Geosynthetics GmbH, Obernburg, Stand 09.2007
- CUI, Y. J.; GAO, Y. B.; FERBER, V. (2010): Simulating the water content and temperature changes in an experimental embankment using meteorological data. In: Engineering Geology, Vol. 114, pp. 456-471
- DANE, J. H.; HRUSKA, S. (1983): In-situ determination of soil hydraulic properties during drainage. In: Soil Science Society of America, Vol. 47, No. 4
- EDLEFSEN, N. E.; ANDERSON, A. B. C. (1943): Thermodynamics of Soil Moisture, Hilgardia, Vol. 15, pp. 31-298, zitiert in GEO-SLOPE (2014)
- EKBLAD, J.; ISACSSON, U. (2007): Time domain reflectometry measurements and soil-water characteristic curves of coarse granular materials used in road pavements. In: Canadian Geotechnical Journal, Vol. 44, No. 7, pp. 858-872
- FGSV (1998): Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigung von Verkehrsflächen, FGSV Verlag, Köln
- FGSV (2017): Merkblatt über Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau, FGSV Verlag, Köln
- FREDLUND, D. G.; XING, A. (1994): Equations of the soil suction from the soil-water characteristic curve. In: Canadian Geotechnical Journal, Vol. 48, No. 2, pp. 186-198
- FREDLUND, M. (2011): Soilvision User's Manual. Soilvision Systems Ltd.
- GEO-SLOPE (2014): Vadose Zone Modeling with Vadose/W; April 2014 Edition. Geo-Slope International Ltd. Calgary, Alberta, Canada
- GEO-SLOPE (2017): Heat and mass transfer modeling with GeoStudio 2018. Geo-Slope International Ltd. Calgary, Alberta, Canada
- GERLACH, A.; GIURGEA, V.; HÖTZL, H. (2003): Übertragung von Lysimetermessungen auf ein größeres Umfeld unter besonderer Berücksichtigung der numerischen Wasserhaushaltsmodellierungen mit HELP. Lehrstuhl für Angewandte Geologie Universität Karlsruhe
- HANSSON, K.; LUNDIN, L.-C.; SIMUNEK, J. (2005a): Modeling Water Flow Patterns in Flexible Pavements. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1936, pp. 133-141
- HANSSON, K. (2005b): Water and Heat Transport in Road Structures. Development of Mechanistic Models. Dissertation from the Faculty of Science and Technology, Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala
- HENNINGS, V. (2000): Methodendokumentation Bodenkunde, Auswertungsmethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden, in Geologisches Jahrbuch, Sonderheft, Reihe G, Heft 1, 2. Auflage, mit Ergänzungsseite der Verknüpfungsregel 1.18
- HEYER, D.; RÖDL, P.; BAUER, A.; RANIS, D. (2004): Filter- und Dränwirksamkeit von Abdichtungssystemen von Deponien mit oder ohne Geotextilien. Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau, Schlussbericht zum BayFORREST Forschungsvorhaben F58(F)
- IRYO, T.; ROWE, R. K. (2003): On the hydraulic behaviour of unsaturated nonwoven geotextiles. In: Geotextiles and Geomembranes 21 (2003), pp. 381 – 404
- KELLERMANN-KINNER, CH.; BÜRGER, M.; MARKS, T. (2016): Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen
- KELLERMANN-KINNER, CH.; BÜRGER, M.; MARKS, T. (2017): Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen Teil 2: Recycling-Baustoff und industrielle Nebenprodukte. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (bisher unveröffentlicht)

- KHIRE, M.; BENSON, C.; BOSSCHER, J. (1997): Water Balance Modeling of Earthen Final Covers". In: *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, Vol. 123 (8), pp. 744 – 754
- KOUKOULIDOU, A.; BIRLE, E. (2019): Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen. Schlussbericht zu FE-Nr. 05.0192/2015/AGB. Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau. Technische Universität München
- KRAHN, J. (2004): *Vadose Zone Modeling with VADOSE/W*, first edition, Mai 2004, GEO-SLOPE International, Canada
- LEIJ, F. J.; ALVES, W. J.; VAN GENUCHTEN, M. Th.; WILLIAMS, J. R. (1996): *The UNSODA Unsaturated Soil Hydraulic Database. User's Manual Version 1.0*. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio
- LORENZ, D. (2010): Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit von Naturrasenflächen an Sportplätzen. Diplomarbeit Universität für Bodenkultur Wien
- MICHAELIDES, G.; KOUKOULIDOU, A.; BIRLE, E.; HEYER, D. (2013): Strömungsmodelle zur Simulation der Durchsickerung von Straßenbauwerken mit Implementierung hydrologischer Parameter. Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau, Schlussbericht zum Forschungsvorhaben FE 84.105 der Bundesanstalt für Straßenwesen
- MISHRA, S.; PARKER, J. C.; SINGHAL, N. (1989): Estimation of soil hydraulic properties and their uncertainty from particle size distribution data. In: *Journal of Hydrology*, Vol. 108, pp. 1-18
- MONTEITH, J. L. (1981): Evaporation and surface temperature. In: *Quarterly Journal of the royal Meteorological Society*, 107: 1-27, zitiert in GEO-SLOPE (2017)
- MUALEM, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. In: *Water Resources Research*, Vol. 12, pp. 513-522
- NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; ARBAT, G.; GARCÍA NIETO, P. J.; CASTRO-FRESNO, D. (2012): Nonlinear numerical simulation of rainwater infiltration through road embankments by FEM. In: *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 219, pp. 1843-1852
- NGUYEN, Q.; FREDLUND, D. G.; SAMARASEKERA, L.; MARJERISON, B. L. (2010): Seasonal Pattern of matric suction in highway subgrades. In: *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 47, pp. 267-280
- PENMAN, H. L. (1948): Natural Evapotranspiration from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London Ser. A*. 193: 120-145, zitiert in GEO-SLOPE (2014)
- PIGUET, P.; PARRIAUX, A.; BENSIMON, M. (2008): The diffuse infiltration of road runoff: An environmental improvement. *Science of the Total Environment* 397, pp. 13 – 23
- PICKLES, C. B.; ZORNBERG, J. G. (2012): Hydraulic classification of unsaturated nonwoven geotextiles for use in capillary barriers. *Proceeding of GeoAmericas 2012, the Second Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition*, Lima, Péru, pp. 408-420
- RICHARDS, L.A. (1931): Capillary Conduction of Liquids through Porous Mediums. In: *Physics*, Vol.1, pp. 318-333, zitiert in GEO-SLOPE (2014)
- SCHANZ, T.; AGUS, S. S.; TSCHESCHLOK, G. (2004): Hydraulisch-mechanische Eigenschaften einer polymerverbesserten Sand-Bentonit-Mischung beim Einsatz im Deponiebau. In: *Geotechnik* 2004, Nr. 4, S. 344-355
- SCHARNAGL, B.; DURNER, W. (2014): Bestimmung von Wassergehalts-Saugspannungsfunktionen für Böden, RC-Baustoffe und HMVA. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt FE 05.0162/2011/LRB, Bundesanstalt für Straßenwesen
- SCHUH, W. M.; CLINE, R. L.; SWEENEY, M. D. (1991): Unsaturated soil hydraulic properties and parameters for the Oakes area, Dickey County, North Dakota. *Water Resources Investigation No. 18*. North Dakota State Water Commission 1991

- SCHWEIZER, S. (2018): Simulation of water movement in geosynthetic drainage elements with the FE-program Seep/W. Study-Project am Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau, Technische Universität München unveröffentlicht
- SCHWELLER, G.; BIRLE, E.; HEYER, D. (2009): Geohydraulische Bewertung technischer Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau. Lehrstuhl und Prüfam für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau, Schlussbericht zum Forschungsvorhaben FE 05.147/2007/CGB vom Oktober 2009
- SIEMENS, G.; BATHURST, R. J. (2010): Numerical parametric investigation of infiltration in one-dimensional sand-geotextile columns. In: Geotextiles and Geomembranes 28 (2010) pp. 460 – 474
- STRATEN, E. (2019): FE-Berechnungen zum Wasserhaushalt eines Erdbauwerks aus organogemem Ton. Masterarbeit am Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau, Technische Universität München. Unveröffentlicht
- TENCATE (2010): Megadrain – Drainage Mats. Produktdatenblatt, Tencate Geosynthetics Austria GmbH, Linz; Stand 04.2010
- TIFFERT, A.; ENDRES, M.; BRAND, M.; KOCHER, B.; MARKS, T.; SCHNELL, M. (2014): Untersuchungen an der Lysimeteranlage Augsburg – Verdichtung der Beprobungsintervalle. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen
- van GENUCHTEN, M. TH. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. In: Soil Science Society of America Journal, Vol. 44, pp. 892-898
- VDI (2010): VDI-Richtlinie 4640 Blatt 1, Juni 2010: Thermische Nutzung des Untergrunds. Verein Deutscher Ingenieure – Gesellschaft Energie und Umwelt
- WERKENTHIN, M.; KLUGE, B.; WESSOLEK, G. (2017): Schwermetallrückhalt standfester Bankette. Straße und Autobahn 5/2017, S. 366 – 371
- WILSON, G. W. (1990): Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems, Dissertation, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, zitiert in GEOSLOPE (2014)
- YAO, Y.-S.; ZHENG, J.-L.; CHEN, Z.-S.; ZHANG, J.-H.; LI, Y. (2016): Field Measurements and Numerical Simulations of Temperature and Moisture in Highway Engineering Using a Frequency Domain Reflectometry Sensor. In: Sensors, Vol. 16, pp. 857-874
- Zentrum Geotechnik (2019): Prüfbericht; Bestimmung hydraulischer Kennwerte von Gießereirestsand und Steinkohlenkesselasche. 24.05.2019. Prüfam für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau, Technische Universität München
- ZEILER, D. (2014): Numerische Berechnungen zur zeitlichen und räumlichen Variabilität der Kapillarspannungen und des Sättigungsgrades in Eisenbahndämmen. Masterarbeit, Technische Universität München, Zentrum Geotechnik, München. Unveröffentlicht

Bilder

- Bild 5-1: Schematische Darstellung der Hallenlysimeter und der hydraulischen Prozesse (KELLERMANN-KINNER et al., 2016)
- Bild 5-2: Schematische Darstellung der Saugplatten in den Hallenlysimetern – Draufsicht (KELLERMANN-KINNER et al. 2016)
- Bild 5-3: Modellgeometrie der Hallenlysimeter
- Bild 5-4: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung der Bodenmaterialien nach SCHARNAGL und DURNER (2014)
- Bild 5-5: Hydraulische Leitfähigkeit der Bodenmaterialien nach SCHARNAGL und DURNER (2014)
- Bild 5-6: Korngrößenverteilung der Kernmaterialien GRS und SKA und der verwendeten Böden aus den Datenbanken UNSODA und Soilvision

- Bild 5-7: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung des GRS und der SKA, bzw. GRS-TUM und SKA-TUM
- Bild 5-8: Hydraulische Leitfähigkeit des GRS und der SKA, bzw. GRS-TUM und SKA-TUM
- Bild 5-9: Regenregime der Hallenlysimeterversuche für 49 Tage nach KELLERMANN-KINNER et al. (2016). Das Szenario wird ab Tag 50 einmalig wiederholt. Die Vergrößerung verdeutlicht beispielhaft die unterschiedliche Dauer der einzelnen Regenereignisse
- Bild 5-10: Regenregime der Hallenlysimeterversuche für 49 Tage mit Tagesmittelwerten nach KELLERMANN-KINNER et al. (2016). Das Szenario wird ab Tag 50 einmalig wiederholt.
- Bild 5-11: Wasseraufnahme (PML-Fn). Die Vergrößerung zeigt den konventionellen Wert der Feldkapazität bei $\psi = 6,3$ kPa
- Bild 5-12: Darstellung der Randbedingungen am Modell des Hallenlysimeters
- Bild 6-1: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung eines mechanisch verfestigten Vliesstoffs nach BOUAZZA et al. (2006) unter Variation des Lufteintrittspunktes
- Bild 6-2: Hydraulische Leitfähigkeit eines mechanisch verfestigten Vliesstoffs nach BOUAZZA et al. (2006) unter Variation des Lufteintrittspunktes
- Bild 6-3: Konvergenzprobleme des Modells bei einem Sechs-Stunden-Regen mit einer Niederschlagsmenge von $Q = 44$ mm. Kernmaterial: bindiger Boden (BM 2). Dränelement GT 3 mit $\alpha = 0,1569/\text{cm}$ nach BOUAZZA et al. (2006).
- Bild 6-4: Kumulierte Abflussmengen nach 105 Tagen Simulationszeitraum am Modell mit kiesigem Kern (BM 1) und Dränmatte GT 3 nach BOUAZZA et al. (2006) mit $\alpha = 0,1569$ [1/cm] bei konstanter hydraulischer Leitfähigkeit. Reduktion des Durchlässigkeitsbeiwerts k in halben Zehnerpotenzschritten. Negative Differenzwerte bedeuten eine Wasserspeicherung im Modell, positive Differenzen
- bedeuten eine Erhöhung der Gesamtwassermenge
- Bild 6-5: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung des GU nach EKBLAD und ISACSSON (2007) unter Variation des Lufteintrittspunktes zur Verwendung als Dränelement
- Bild 6-6: Hydraulische Leitfähigkeit des GU nach EKBLAD und ISACSSON (2007) unter Variation des Lufteintrittspunktes zur Verwendung als Dränelement
- Bild 6-7: Variation des Lufteintrittspunktes in der Dränschicht. Berechnungsergebnisse mit kiesigem Kern (BM 1)
- Bild 6-8: Variation des Lufteintrittspunktes in der Dränschicht. Berechnungsergebnisse mit bindigem Kern (BM 2). Bei Verwendung der Dränmatte mit $\alpha = 1$ [1/cm] traten Konvergenzprobleme auf (zu hoher Oberflächen- und Zwischenabfluss mit 496 l)
- Bild 6-9: Berechnungsergebnisse mit kiesigem Kern (BM 1) ohne Dränelement
- Bild 6-10: Berechnungsergebnisse mit kiesigem Kern (BM 1) mit Dränelement
- Bild 6-11: Berechnungsergebnisse mit bindigem Kern (BM 2) ohne Dränelement
- Bild 6-12: Berechnungsergebnisse mit bindigem Kern (BM 2) mit Dränelement
- Bild 6-13: Berechnungsergebnisse für HMVA 3 ohne Dränelement
- Bild 6-14: HMVA 3 ohne Dränelement: Vergleich der Entwicklung über die Zeit a) der Saugspannungen und b) der hydraulischen Leitfähigkeit an einem in c) dargestellten Beobachtungspunkt im Kernmaterial unterhalb des Rollrasens
- Bild 6-15: Berechnungsergebnisse für HMVA 3 mit Dränelement
- Bild 6-16: Berechnungsergebnisse für RC 2 ohne Dränelement
- Bild 6-17: Berechnungsergebnisse für RC 2 mit Dränelement

- Bild 6-18: Berechnungsergebnisse für RC 5 ohne Dränelement
- Bild 6-19: Berechnungsergebnisse für RC 5 mit Dränelement
- Bild 6-20: Berechnungsergebnisse für GRS mit hydraulischen Kennwerten aus der UN-SODA-Datenbank ohne Dränelement
- Bild 6-21: Berechnungsergebnisse für GRS mit hydraulischen Kennwerten aus der UN-SODA-Datenbank mit Dränelement
- Bild 6-22: Berechnungsergebnisse für GRS-TUM mit labortechnisch bestimmten hydraulischen Kennwerten ohne Dränelement
- Bild 6-23: Berechnungsergebnisse für GRS-TUM mit labortechnisch bestimmten hydraulischen Kennwerten mit Dränelement
- Bild 6-24: Berechnungsergebnisse für SKA mit hydraulischen Kennwerten aus der Soilvision-Datenbank ohne Dränelement
- Bild 6-25: Berechnungsergebnisse für SKA mit hydraulischen Kennwerten aus der Soilvision-Datenbank mit Dränelement
- Bild 6-26: Berechnungsergebnisse für SKA-TUM mit labortechnisch bestimmten hydraulischen Kennwerten ohne Dränelement
- Bild 6-27: Berechnungsergebnisse für SKA-TUM mit labortechnisch bestimmten hydraulischen Kennwerten mit Dränelement
- Bild 6-28: Verhältnis des aus dem Kern austretenden Sickerwasser zu Zwischen- und Oberflächenabfluss. Übersicht über Berechnungsergebnisse und Messwerte aller Lysimeter. Die Berechnungsergebnisse sind nach tatsächlichem Regenregime und Tagesmittelwerten unterschieden
- Bild 7-1: Vergleich der hydraulischen Leitfähigkeiten der Dränmatte und der RC-Materialien mit markiertem Saugspannungsbereich, der im Verlauf der Berechnungen durchfahren wird.
- Bild 8-1: Aufbau der Lysimeter mit den realisierten technischen Sicherungsmaßnahmen (BRAND et al. 2016)
- Bild 8-2: Lysimeteranlage in Augsburg
- Bild 8-3: Modellgeometrie des Freilandlysimeters Nr. 1 (Standardbauweise mit bindigem Kern, nach BRAND et al. 2016) mit Angabe der Randbedingungen
- Bild 8-4: Lage der Mehrparameter-Sonden M1 und M2 (aus BRAND et al. 2016)
- Bild 8-5: Korngrößenverteilungen des Bankettmaterials und des Oberbodens im Vergleich zu den verwendeten Böden aus der Datenbank Soilvision und aus EKB-LAD und ISACSSON (2007)
- Bild 8-6: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung des Bankettmaterials, Oberbodens und der modifizierten mineralischen Abdichtung
- Bild 8-7: Hydraulische Leitfähigkeit des Bankettmaterials, Oberbodens und der modifizierten mineralischen Abdichtung
- Bild 8-8: Regenregime an der Lysimeteranlage Augsburg
- Bild 8-9: Niederschlags-Abflusskurve für Tagesniederschläge auf einer versiegelten Fläche (nach BÜRGER et al. 2008)
- Bild 8-10: Niederschlag im Bereich des Bankettes von Lysimeter 1 als Summe aus direkt auftreffendem Niederschlag und Straßenabfluss. Darstellung der ersten drei Monate des Simulationszeitraums
- Bild 8-11: Aufteilung der extraterrestrischen Strahlung nach ALLEN et al. (1998), bzw. KOUKOULIDOU und BIRLE (2019), (Grafik angepasst)
- Bild 8-12: Vergleich der berechneten kurzwelligen Sonneneinstrahlung (Globalstrahlung) mit den Messwerten aus 2015
- Bild 8-13: Aus Wetterdaten ermittelte Nettostrahlung für den Simulationszeitraum
- Bild 8-14: Jahresverlauf des Blattflächenindex (LAI, nach GEO-SLOPE, 2017)
- Bild 9-1: Sensitivitätsuntersuchung zur Verwendung einer fiktiven Kiesdeckschicht am Modell von Lysimeter 1
- Bild 9-2: Umverteilung des Oberflächenabflusses im Bankettbereich auf die Böschung für den zweiten Berechnungslauf

- Bild 9-3: Berechnungsergebnisse Lysimeter 1 – Ausgangssituation. Höhe der Auffangwanne: 1,0 m; Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,05$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Unterer Rand: Sickerrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm
- Bild 9-4: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparameter sonden in Lysimeter 1 – Ausgangssituation. Höhe der Auffangwanne: 1,0 m; Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,05$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Unterer Rand: Sickerrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm
- Bild 9-5: Berechnungsergebnisse Lysimeter 1 – Variante 1. Höhe der Auffangwanne: 0,1 m; Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Unterer Rand: Sickerrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm
- Bild 9-6: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparameter sonden in Lysimeter 1 – Variante 1. Höhe der Auffangwanne: 0,1 m; Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Unterer Rand: Sickerrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm
- Bild 9-7: Berechnungsergebnisse Lysimeter 1 – Variante 3. Höhe der Auffangwanne: 0,1 m; Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s; Unterer Rand: Sickerrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm
- Bild 9-8: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparameter sonden in Lysimeter 1 – Variante 3. Höhe der Auffangwanne: 0,1 m; Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s; Unterer Rand: Sickerrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm
- Bild 9-9: Berechnungsergebnisse Lysimeter 8 – Ausgangssituation. Höhe der Auffangwanne: 1,0 m; Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,05$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Unterer Rand: Sickerrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm
- Bild 9-10: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparameter sonden in Lysimeter 8 – Ausgangssituation. Höhe der Auffangwanne: 1,0 m; Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,05$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Unterer Rand: Sickerrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm
- Bild 9-11: Berechnungsergebnisse Lysimeter 8 – Variante 1. Höhe der Auffangwanne: 0,1 m; Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Unterer Rand: Sickerrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm
- Bild 9-12: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparameter sonden in Lysimeter 8 – Variante 1. Höhe der Auffangwanne: 0,1 m; Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Unterer Rand: Sickerrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm
- Bild 9-13: Berechnungsergebnisse Lysimeter 8 – Variante 3. Höhe der Auffangwanne: 0,1 m; Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s; Unterer Rand: Sickerrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm
- Bild 9-14: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparameter sonden in Lysimeter 8 – Variante 3. Höhe der Auffangwanne: 0,1 m; Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s; Unterer Rand: Sickerrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm
- Bild 9-15: Berechnungsergebnisse Lysimeter 8 – Variante 4. Höhe der Auffangwanne: 0,1 m; Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-6}$ m/s; Unterer Rand: Sickerrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm
- Bild 9-16: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparameter sonden in Lysimeter 8 – Variante 4. Höhe der Auffangwanne: 0,1 m; Kies Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm]; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-6}$ m/s; Unterer

Rand: Sickerrandbedingung; Dicke Oberboden: 10 cm

kett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Dicke Oberboden: 20 cm

- Bild 9-17: Berechnungsergebnisse Lysimeter 2. Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm], 10 cm; Dränmatte: GU $\alpha = 0,05$ [1/cm], 5 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Dicke Oberboden: 10 cm
- Bild 9-18: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparametersonden in Lysimeter 2. Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm], 10 cm; Dränmatte: GU $\alpha = 0,05$ [1/cm], 5 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Dicke Oberboden: 10 cm
- Bild 9-19: Berechnungsergebnisse Lysimeter 3. Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm], 10 cm; mineralische Dränschicht: GU $\alpha = 0,05$ [1/cm], 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Dicke Oberboden: 10 cm
- Bild 9-20: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparametersonden in Lysimeter 3. Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm], 10 cm; mineralische Dränschicht: GU $\alpha = 0,05$ [1/cm], 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Dicke Oberboden: 10 cm
- Bild 9-21: Berechnungsergebnisse Lysimeter 3 – Variante 1. Auffangwanne: GU $\alpha = 0,05$ [1/cm], 10 cm; mineralische Dränschicht: GU $\alpha = 0,05$ [1/cm], 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Dicke Oberboden: 10 cm
- Bild 9-22: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparametersonden in Lysimeter 3 – Variante 1. Auffangwanne: GU $\alpha = 0,05$ [1/cm], 10 cm; mineralische Dränschicht: GU $\alpha = 0,05$ [1/cm], 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Dicke Oberboden: 10 cm
- Bild 9-23: Berechnungsergebnisse Lysimeter 6. Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm], 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Dicke Oberboden: 20 cm
- Bild 9-24: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparametersonden in Lysimeter 6. Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm], 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Dicke Oberboden: 20 cm
- Bild 9-25: Berechnungsergebnisse Lysimeter 6 – Variante 1. Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm], 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-5}$ m/s; Dicke Oberboden: 20 cm
- Bild 9-26: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparametersonden in Lysimeter 6 – Variante 1. Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm], 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-5}$ m/s; Dicke Oberboden: 20 cm
- Bild 9-27: Berechnungsergebnisse Lysimeter 6 – Variante 2. Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm], 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-6}$ m/s; Dicke Oberboden: 20 cm
- Bild 9-28: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparametersonden in Lysimeter 6 – Variante 2. Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm], 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-6}$ m/s; Dicke Oberboden: 20 cm
- Bild 9-29: Berechnungsergebnisse Lysimeter 7. Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm], 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Dicke Oberboden: 20 cm; modifizierte mineralische Abdichtung: $k_s = 5,4 \cdot 10^{-12}$ m/s, 5 cm
- Bild 9-30: Verlauf des volumetrischen Wassergehalts an den Messpunkten der Mehrparametersonden in Lysimeter 7. Auffangwanne: GU $\alpha = 0,5$ [1/cm], 10 cm; Bankett: $k_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; Dicke Oberboden: 20 cm; modifizierte mineralische Abdichtung: $k_s = 5,4 \cdot 10^{-12}$ m/s, 5 cm
- Bild 9-31: Bereiche der Auswertung der Infiltration in den Dammkern in Lysimeter 7
- Bild 9-32: Aufteilung der Infiltration in den Kern Lysimeter 7
- Bild 9-33: Vergleich aller Berechnungsergebnisse der ersten und zweiten Berechnungsläufe mit den Messergebnissen. Die Säulen stellen jeweils das Verhältnis von Sickerwasser, bzw. Oberflächen- und Zwischenabfluss zur Gesamt-abflussmenge dar

Tabellen

- Tab. 5-1: Zusammenstellung der relevanten Hallenlysimeteruntersuchungen (grüne Markierung) mit Kennzeichnung der durchgeführten Berechnungen (nach KELLERMANN-KINNER et al. 2016, 2017)
- Tab. 5-2: van Genuchten-Parameter der Bodenschicht Su2 nach HENNINGS (2000) für den Rollrasen und GU nach EKBLAD und ISACSSON (2007) für das Dränelement (mit Modifikationen)
- Tab. 5-3: Thermische Parameter nach VDI-Richtlinie 4640 (VDI, 2010) und KRAHN (2004)
- Tab. 6-1: van Genuchten-Parameter des mechanisch verfestigten Vliesstoffs GT3 (BOUAZZA et.al., 2006)
- Tab. 6-2: Kumulierte Wassermengen von Sickerwasser sowie Oberflächen- und Zwischenabfluss der Hallenlysimeter
- Tab. 6-3: Verhältnisse der kumulierten Wassermengen von Sickerwasser zu Zwischen- und Oberflächenabfluss der Hallenlysimeter
- Tab. 8-1: van Genuchten-Parameter des Bodens GU 0,3 nach EKBLAD und ISACSSON (2007) für das Bankettmaterial und Trisoplast® nach SCHANZ et al. (2011) für die modifizierte mineralische Abdichtung
- Tab. 8-2: Thermische Parameter nach VDI-Richtlinie 4640 (VDI, 2010)
- Tab. 9-1: Übersicht zu den Variantenuntersuchungen der Lysimeter 1 und 8. Spalte 4 listet für die Lysimeter 1 und 8 die Ausgangssituationen und die jeweiligen Variationen auf
- Tab. 9-2: Übersicht der Berechnungen der Lysimeter 2, 3, 6 und 7 mit den Varianten 3.1, 6.1 und 6.2
- Tab. 9-3: Kumulierte Wassermengen von Sickerwasser sowie Oberflächen- und Zwischenabfluss der Freilandlysimeter
- Tab. 9-4: Verhältnisse der kumulierten Wassermengen von Sickerwasser zu Zwischen- und Oberflächenabfluss der Freilandlysimeter

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2017

S 105: Untersuchungen zur Überprüfung des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung bei feinkörnigen Böden und bindigen Mischböden

Lypp, Birle, Heyer, Vogt € 20,50

S 106: Zusammenhang zwischen Bitumenchemie und straßenbautechnischen Eigenschaften

Radenberg, Nytus, Gehrke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 107: Baustoffe für standfeste Bankette

Koukoulidou, Birle, Heyer € 15,50

S 108: Neue Wege zur Finanzierung des Straßenbaus – Entwicklungen des europäischen Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2015 in Bonn

Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 109: RIVA – Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels

Korn, Leupold, Mayer, Kreienkamp, Spekat € 15,50

S 110: Vergleichbarkeit der Auslaugraten von Materialien mit und ohne Sandzumischung nach dem Säulenkurzverfahren (DIN 19528)

Lin, Linnemann, Vollpracht € 16,50

S 111: Bitumenextraktion aus Asphalt mit dem nachwachsenden Rohstoff Octansäuremethylester(Kokosester)

Alisov, Wistuba

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 112: Nachweis der flächendeckenden Verdichtungskontrolle von Asphalt

Zander, Buch, Birbaum

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 113: Einfluss der Temperatur auf die Probekörperherstellung bei Niedrigtemperaturgussasphalt im Rahmen der Kontrollprüfungen

Schellenberg

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 114: Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischten Kaltbauweisen – Asphalt

Mollenhauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2018

S 115: Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxisgerechten Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes

Wistuba, Isailović

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 116: Weiterführende Untersuchungen zur Beurteilung des Adhäsionsverhaltens zwischen Bitumen und Gestein

Radenberg, Nytus, Boetcher, Diedel, Miehl

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 117: Bauzeitenverkürzung durch optimierten Asphaltbau

Böhm, Tielmann, Ulrich, Verges, Muschalla

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 118: Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte

Renken, Wistuba

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 119: Grundfragen des straßenrechtlichen Nutzungsregimes – Straßenrecht im Zeichen des Klimawandels

Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 120: Temperaturuntersuchungen am und im Mobile Load Simulator MLS30 – Analyse des Temperatureinflusses während eines Dauerversuchs für weitere Versuchsprogramme

Wacker, Scherkenbach, Jansen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 121: Repräsentative Ermittlung der performance-relevanten Asphalteeigenschaften als Grundlage neuer Vertragsbedingungen

Roos, Plachkova-Dzhurova, Grafmüller, Milch, Hase, Schindler

Schröter, Zumsande, Wörner, Kazakova, Patzak

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 122: Ermittlung neuer Zuordnungswerte zur Einteilung bindiger Böden in Fest- und Lockergesteine

Möller, Bundschuh, Birle, Heyer

€ 18,50

S 123: Bindemitteldesign für Asphaltstraßen – Definition eines chemisch-rheologischen Anforderungsprofils

Stephan, Weigel

€ 19,00

S 124: Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte

Müller, Schulte-Schrepping, Benra, Ludwig, Breitenbücher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 125: Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie

Radenberg, Manke, Steeb, Jänicke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 126: Bau und Messungen an einer Versuchsstrecke mit optimierter Kiestragschicht unter der Betondecke

Freudenstein, Neudert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 127: **Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton**
Villaret, Kiehne, Riwe, Villaret

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 128: **Reduzierung der Schwindverformungen des Straßenbetons durch den Einsatz neuartiger Schwindreduzierer**

Breitenbücher, Penttilä, Schulte-Schrepping

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2019

S 129: **Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt**

Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 130: **Entwicklung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt (PMA)**

Radenberg, Holzwarth

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 131: **Einfluss viskositäts- verändernder Zusätze auf den Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe**

Radenberg, Gehrke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 132: **Temperierte Straße Untersuchungen zur Realisierung eines Demonstrators auf dem duraBAST**

Oeser, Carreño, Renken, Kemper, Kneer, Höfler,

Al-Sibai, Hess, Gouya, zu Dohna, Steins € 15,50

S 133: **Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw – Stufe 2: Nacherhebung**

Wolf, Uhlig

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 134: **Temperatureinfluss auf die Sichtbarkeit von Substanzmerkmalen (Oberfläche)**

Skakuj, Balck, Beckedahl, Schrödter, Koppers, Ramadan

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 135: **Eignung von Boden-Bindemittel-Gemischen als Baustoff für den Hinterfüllbereich von Bauwerken**

Botor, Tost

€ 15,50

S 136: **KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Asphalt**

Augter, Kayser

€ 16,50

S 137: **Ressourcenschonung Bedingungen für die Verwendung organogener und weicher Böden sowie von Sekundärbaustoffen als Massenbaustoffe im Erdbau**

Cudmani, Heyer, Engel, Schoenherr

€ 22,50

S 138: **Entwicklung eines scannenden Prüfgeräts zur Detektion von Delaminationen in Betonfahrbahndecken**

Groschup, Große, Eger, Freudenstein

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 139: **Unterhaltung und Sanierung des Straßennetzes – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 17. und 18. September 2018 in Bonn**

Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 140: **Erfahrungssammlung Bitumendaten – Frischbitumen**

Radenberg, Flottmann, Drewes

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 141: **Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummimodifiziertem Bindemittel**

Radenberg, Manke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2020

S 142: **Untersuchungen zur Verbesserung der Methode zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen**

Beckedahl, Koppers, Schrödter

€ 15,50

S 143: **s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch**

Bräu, Vogt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 144: **Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen**

Radenberg, Staschkiewicz

€ 17,50

S 145: **Schadenskategorie-spezifische Bewertung von AKR-Prüfverfahren**

Weise, Werner, Maier, Wilsch

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 146: **Untersuchungen zur Möglichkeit der Verarbeitung von Gussasphalt bei maximal 230 °Celsius ohne viskositätsverändernde Zusätze**

Radenberg, Gehrke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2021

S 147: **Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST**

Birle, Cudmani, Melsbach

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG

Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen

Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

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

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.