

# **Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Neben- produkten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 149**



**bast**

# **Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Neben- produkten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen**

von

Andromachi Koukoulidou

Emanuel Birle

Roberto Cudmani

Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik,  
Felsmechanik und Tunnelbau  
Technische Universität München

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 149**

**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 05.0192**  
Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen

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

ISSN 0943-9323  
ISBN 978-3-95606-565-1

Bergisch Gladbach, März 2021

## Kurzfassung – Abstract

### Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen

Mithilfe von Simulationsberechnungen wurde der Wasserhaushalt von Straßendämmen, die mit technischen Sicherungsmaßnahmen gemäß der Bauweise E nach MTSE (2009) und ohne technische Sicherungsmaßnahmen errichtet werden, untersucht. Bei den zu sichernden Baustoffen wurden dabei sowohl Böden als auch Ersatzbaustoffe (RC-Materialien und industrielle Nebenprodukte) betrachtet. Außerdem wurde im Rahmen der Simulationsberechnungen durch gezielte Parametervariationen herausgearbeitet, wie unterschiedliche Materialien für das Bankett den Wasserhaushalt von Straßendämmen beeinflussen.

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass die Verwendung einer Dränschicht oberhalb des Kernmaterials auch bei durchlässigen Kernmaterialien zu einer signifikanten Reduktion des Sickerwassers aus dem Kern führt. So beträgt der Kernabfluss bei den Materialien mit einem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert  $k \geq 1 \cdot 10^{-8}$  m/s abgesehen von einer Berechnung mit einer Stahlwerksschlacke zwischen 3,6 % und 10,8 % des Niederschlags. Bei den Modellen ohne Dränschicht dagegen wurden rechnerisch Sickerwassermengen zwischen 29 % und 39 % ermittelt, solange der Durchlässigkeitsbeiwert des Kernmaterials  $k \geq 1 \cdot 10^{-8}$  m/s ist. Erst bei einem Durchlässigkeitsbeiwert  $k \leq 1 \cdot 10^{-8}$  m/s nimmt die Sickerwassermenge aus dem Kern deutlich ab.

Die Berechnung mit dem organischen Ton als Kernmaterial (OT) ergab aufgrund des sehr geringen gesättigten Durchlässigkeitsbeiwertes ( $k_{\text{sat}} = 1 \cdot 10^{-8}$  m/s) des Tones erwartungsgemäß eine sehr geringe Durchsickerung des Kerns und bestätigt damit die Eignung der Bauweise E nach MTSE zur Minimierung der Durchsickerung von Böden bzw. Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen. Mit zunehmendem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert des Kernmaterials nimmt die Durchsickerung des Kerns aber nicht in gleicher Weise zu. Die Wirksamkeit der Dränschicht und der sich ergebende Kernabfluss werden dagegen maßgeblich von der hydraulischen Leitfähigkeit des Kernmaterials im ungesättigten Zustand beeinflusst.

### Investigation of the seepage flow in embankments with technical safeguards built of recycled materials and industrial by-products

Soils and recycled materials with environmentally relevant constituents can be used for earth works if specified contaminant concentrations are not exceeded and if technical safeguards are considered in the design. Technical safeguards are necessary for reasons of soil and groundwater protection. The German Association for Research on Road Construction and Traffic Affairs (FGSV) developed various construction methods for the use of such materials (MTSE, 2018). The design principle of such earth structures is to minimize the seepage water from the soils or recycled materials with environmentally relevant constituents.

Within the scope of the research project FE 05.192 numerical simulations were carried out to analyze the water balance of road embankments, which are constructed with technical safeguards according to the construction method E of the recommendation MTSE (2018) and others which are constructed in the common way without technical safeguards. The building materials considered included both soils and recycled materials/industrial by-products. Within the scope of the research project additional simulations were carried out to study how different materials for the road shoulder influence the water balance of road embankments.

The calculation results show that the use of a drainage layer above the core material leads to a significant reduction of the seepage water from the core even in case of high permeable core materials. For materials with a saturated permeability coefficient  $k \geq 1 \cdot 10^{-8}$  m/s the calculated core outflow is in most cases between 3.6 % and 10.8 % of the precipitation, if a drainage layer is assumed between the core and topsoil. In the models without drainage layer, on the other hand, seepage water quantities between 29 % and 39 % were calculated, as long as the permeability coefficient of the core material  $k$  is larger than  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s. For the models without a drainage layer a significant decrease of the seepage water quantity is noticeable only if the coefficient of permeability of the core material is smaller than  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s.



The calculation with the organic clay as core material (OT) gave, as expected, a very low seepage quantity from the core due its very low saturated permeability coefficient ( $k_{\text{sat}} = 1 \cdot 10^{-8}$  m/s). This confirms the suitability of construction method E according to MTSE for minimising the seepage water rate from soils or recycled materials with environmentally relevant constituents. In addition, the calculations show that the seepage water quantity for materials with a permeability coefficient  $k \geq 1 \cdot 10^{-8}$  m/s is not directly dependent on the saturated k-value of the core material, but is rather dependent on the hydraulic conductivity of the core material in the unsaturated state.

## Summary

### Investigation of the seepage flow in embankments with technical safeguards built of recycled materials and industrial by-products

## 1 Introduction

The recommendation MTSE published by the German Association for Research on Road Construction and Traffic Affairs (FGSV) describes various construction methods with technical safeguards for the use of soils and recycled materials with environmentally relevant constituents. The investigation of the effectiveness of these construction methods was topic of the research projects FE 05.147 (SCHWELLER et al., 2009) and FE 84.105 (MICHAELIDES et al., 2013). Based on numerical simulations of the water balance for such earth structures SCHWELLER et al. (2009) could show that the construction methods with sealings layers (methods A, B and C) as well as the method D, where the soil/recycled material is placed only in the core of the embankment (beneath the pavement), are suitable to reduce the seepage flow through the soils/recycled materials with environmentally relevant constituents. MICHAELIDES et al. (2013) focussed in their investigations on the water balance of earth structures which are build according to method E of the recommendation MTSE. Compared to the other methods no additional sealing element is provided for method E to protect the core against infiltrating water. For minimization of the seepage flow the slightly contaminated soil/recycled material should be of low permeability and is to be covered by a drainage layer to drain infiltrating seepage water. Within their investigations MICHAELIDES et al. (2013) could demonstrate that method E is as effective as the methods A to D if the coefficient of permeability of the core fulfills the requirement  $k \leq 1 \cdot 10^{-8}$  m/s.

However, the calculations carried out in connection with construction method E did not consider recycled materials and industrial by-products, as no reliable data on their hydraulic properties were available at the time of the calculations. Compared to mineral soils recycled materials and industrial by-products show significant differences with regard to their

hydraulic properties, which can be attributed to the porosity of the individual grains. After SCHARNAGL and DURNER (2014) had carried out experimental investigations on the hydraulic properties of recycled materials and industrial by-products and determined parameters for the unsaturated hydraulic conductivity and the soil-water retention curve, reliable parameters were now available as input parameters for numerical simulations of the water balance.

Since recycled materials and industrial by-products represent a significant material flow and are well suitable for the use in earthworks due to their generally good mechanical properties, similar investigations to those done by MICHAELIDES et al. on the water balance and seepage water flow also should be carried out for such materials.

Thus, within the scope of the research project FE 05.192 it should be analyzed by numerical simulations under which conditions soils or building materials with environmentally relevant constituents can be used without technical safeguards (e. g. sealing liners) and when technical safeguards according to the recommendation MTSE are required. In addition, it should be elaborated how recycled materials and industrial by-products differ from natural soils in terms of seepage flow.

## 2 Methodology

On basis of numerical simulations, the water balance of road embankments constructed according to construction method E of the recommendation MTSE (2009) and without technical safeguards was investigated. With regard to the building materials, the simulations considered both soils and recycled materials/industrial by-products. In addition, simulations were carried out to specify how different materials for the road shoulder influence the water balance of road embankments.

## 3 Modelling

The calculations were carried out with the finite element software VADOSE/W from GEO-SLOPE. The program is able to describe the flow of water in saturated and unsaturated media under stationary as well as under instationary conditions. The

processes taking place at the soil surface (surface runoff, evaporation, transpiration, infiltration) are modelled by VADOSE/W under consideration of the climatic boundary conditions and the state-dependent properties of the soil (water content, suction). In VADOSE/W, both the water flow in the liquid phase and the vapour phase can be considered.

The simulations were carried out for a 4 m high road embankment. The dam height to the surface of the substructure (planum) is 3.2 m and the height of the superstructure is 80 cm (54 cm frost protection layer and gravel base layer as well as 26 cm bound layers).

Based on the geometry described above, two basic models were created. In basic model 1, technical safeguards were taken into account in accordance with construction method E. The drainage mat between the core material and the top soil was modelled as a 20 cm thick drainage layer. The geometry of the basic model 1 is shown in figure 1. The geometry of basic model 2 differs from that of basic model 1 only in that the drainage layer between topsoil and core is omitted (see figure 2).

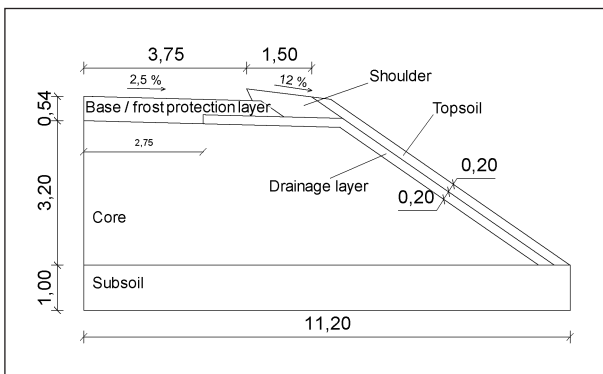


Fig. 1: Geometry of basic model 1

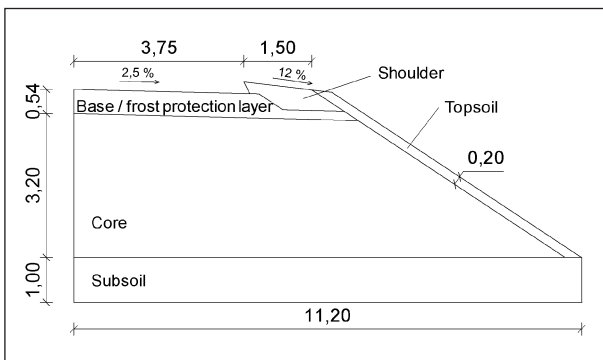


Fig. 2: Geometry of basic model 2

The finite element mesh consists of 4,648 mainly square elements, being refined in the area of the shoulder, the topsoil and the drainage layer, since the largest variations of the water content were to be expected in these areas. In addition, the mesh was refined in the area of layer boundaries, as the hydraulic properties of the materials can change significantly there.

The boundary conditions for both basic models are shown in figure 3. A boundary condition of the first type (potential boundary condition) of -1 m was applied to the bottom of the model. It corresponds to the position of the assumed highest groundwater level and allows free drainage of the core. The right and left model boundaries and the road surface were considered impermeable.

On the shoulder and the topsoil a climatic boundary condition was applied. It requires the definition of precipitation, minimum and maximum temperature, minimum and maximum humidity, average wind speed and net radiation for each time step. Similar to the investigations in the research project FE 84.105, meteorological data (daily values) of the Munich Airport for the period from October 1, 1992 to December 31, 2002, which are provided by the German Meteorological Service (DWD), were used.

The road runoff was taken into account in the model as additional precipitation in the area of the shoulder and the topsoil, with a distribution half on the shoulder and half on the topsoil.

The hydraulic parameters of the shoulder material, the topsoil and the frost protection layer/base layer were held constant in the series investigations on the influence of different core materials on the water balance. For the shoulder material, the soil „BM 5“ tested by SCHARNAGL and DURNER was used.

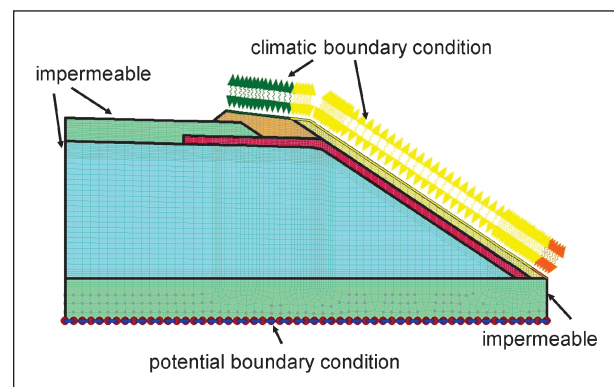


Fig. 3: Boundary conditions

This is a very silty gravel (GU\* according to DIN 18196, fines content approx. 20%) with a saturated permeability coefficient of  $7.5 \cdot 10^{-6}$  m/s.

The soil „BM 1“, which is a very sand gravel (GW according to DIN 18196) and also investigated by Scharnagl and Durner, was taken for the frost protection layer.

For the topsoil, the values according to Hennings (2000) were used for a silty sand (Su2), which were taken from the pedological mapping guidelines and can be regarded as representative for non-compacted soils in natural state. The saturated permeability of the topsoil was estimated to be  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s.

The hydraulic parameters for the drainage layer were chosen according to the results obtained within the research project FE 05.185 „Numerical modelling of the lysimeter investigations of the BAST“. (MELSBACH et al., 2018) by recalculating the results of lysimeter tests. These values are a modification of the soil parameters determined by EKBLAD and ISACSSON (2007) on a slightly silty gravel (GU according to DIN 18196). The saturated permeability coefficient is  $5 \cdot 10^{-3}$  m/s.

For the core, the following materials by SCHARNAGL and DURNER were considered:

- soil „BM 1“: a very sandy gravel (GW according to DIN 18196) with a saturated k-value of  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s.

- soil „BM 2“: a soil tested by Scharnagl and Durner and described as a very sandy silt, which according to DIN 18196 is, however, a very silty gravel (GU\*). The coefficient of saturated permeability is  $6.6 \cdot 10^{-8}$  m/s.
- Recycled material „RC 2“: a soil tested by Scharnagl and Durner and described as a practical mixture, which is probably an „RC mix“. The coefficient of saturated permeability is  $1.8 \cdot 10^{-6}$  m/s.
- Recycled material „RC 5“: silty gravel (GU according to DIN 18196) with a saturated k-value of  $1.2 \cdot 10^{-6}$  m/s.
- Municipal solid waste incineration ash „HMVA 1“: GW according to DIN 18196 with a k-value of  $6.4 \cdot 10^{-5}$  m/s.
- Municipal solid waste incineration ash „HMVA 3“: a silty gravel (GU according to DIN 18196 with a k-value of  $6.3 \cdot 10^{-8}$  m/s.
- Steel slag „SWS“: a silty gravel (GU according to DIN 18196) with a k-value of  $1.2 \cdot 10^{-6}$  m/s.

In addition, a calculation was carried out using the clay with organic content (OT according to DIN 18196) with a saturated permeability of  $1.0 \cdot 10^{-8}$  m/s which was already considered in the research project FE 84.105. The soil-water retention curve and the hydraulic conductivity functions of the core materials are shown in figure 4 and figure 5.

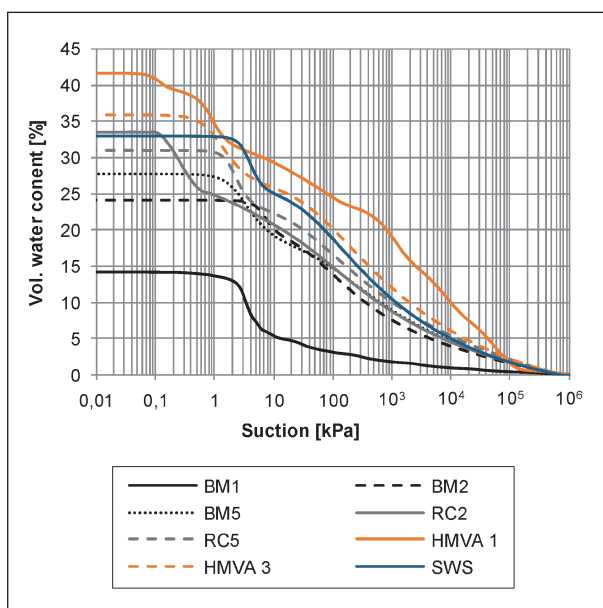


Fig. 4: Soil-water retention curves of the core materials

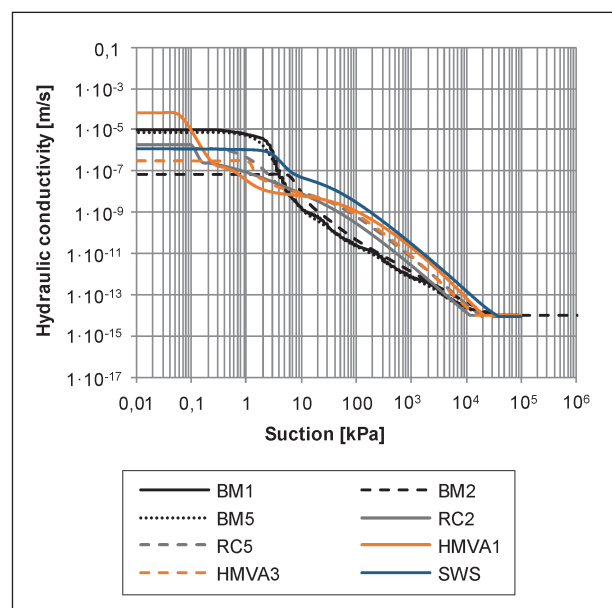


Fig. 5: Hydraulic conductivity functions of the core materials

In addition, six calculations were carried out to study the influence of the shoulder material on the water balance. For the shoulder, materials with different hydraulic properties ( $k_{\text{sat}} = 1,0 \cdot 10^{-5}$  m/s,  $k_{\text{sat}} = 7,5 \cdot 10^{-6}$  m/s,  $k_{\text{sat}} = 1,0 \cdot 10^{-6}$  m/s) were used. Further simulations were carried out to reproduce the surface runoff in the model as realistic as possible.

## 4 Results

Figure 6 shows the calculation results of the basic models 1 and 2.

The following can be derived from the calculation results:

- The seepage water quantity from the core of the embankment for the models without drainage layer (basic model 2) is in the range of approx. 29% to 39% (based on precipitation), as long as the permeability coefficient of the core material is  $k \geq 1 \cdot 10^{-8}$  m/s. A significant decrease of the seepage water quantity is noticeable only if the coefficients of permeability of the core are smaller than  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s. In addition, the calculations show that the seepage water quantity for materials with a permeability coefficient  $k \geq 1 \cdot 10^{-8}$  m/s is not directly dependent on the k-value of the core material.
- The use of a drainage layer above the core material (basic model 1) leads to a significant

reduction of the seepage water from the core. For example, the calculated core outflow is between 3.6% and 10.8% of the precipitation for core materials with  $k \geq 1 \cdot 10^{-8}$  m/s, except for the model with steel slag. If the embankment is built of steel slag (SWS), the calculation gives a core outflow of 20.8% of the precipitation. The calculation with the organic clay (OT) as core material ( $k_{\text{sat}} = 1 \cdot 10^{-8}$  m/s) resulted in a core outflow of 1.4%.

- The calculation results obtained on the models with drainage layer demonstrate that the saturated permeability coefficient of the core material for the predominantly permeable materials considered here is not a suitable indicator for predicting the amount of core seepage. Due to the very low saturated permeability coefficient of the organic clay OT (less than  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s according to the requirements of MTSE) the calculation with the organic clay (OT) as core material (OT) results, as expected, in a very low quantity of seepage water. Thus, it confirms the suitability of construction method E according to MTSE for minimising the quantity of seepage water from building materials with environmentally relevant constituents. But also, if the saturated permeability coefficient of the core material increases, the quantity of seepage water from the core does not increase in the same way. This can be seen most clearly from the calculation with HMVA1. Although this has the highest saturated permeability of all investigated core

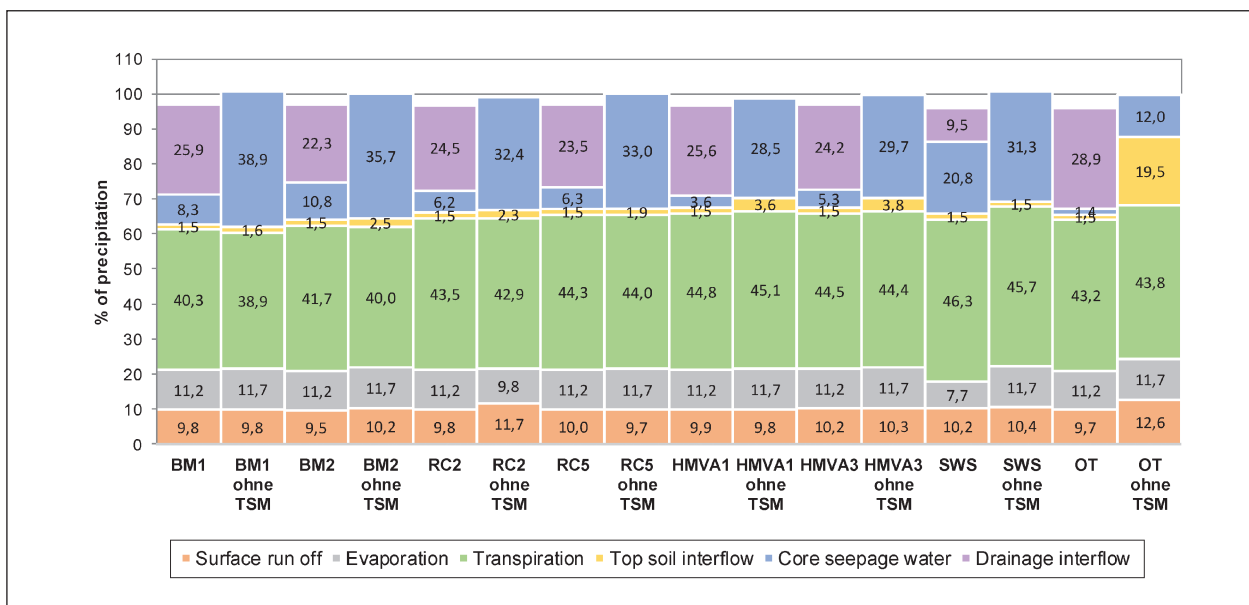


Fig. 6: Results of simulations for basic model 1 (with drainage layer) and basic model 2 (without drainage layer – „ohne TSM“)

materials with  $k_{\text{sat}} = 6.4 \cdot 10^{-5}$  m/s, the determined core outflow of 3.6% of the precipitation is very low. The effectiveness of the drainage layer and the resulting core outflow are strongly influenced by the hydraulic conductivity of the core material in the unsaturated state. In particular the hydraulic conductivity, which corresponds to the soil suction, that arises in the core material at the upper boundary to the drainage layer is of importance.

- The additional calculations which were carried out to study the influence of different shoulder materials on the water balance show that in case of a well permeable shoulder material ( $k_{\text{sat}} \geq 1.0 \cdot 10^{-5}$  m/s) approx. 90% of the road runoff infiltrate in the area of the road shoulder. For lower permeable shoulder materials ( $k_{\text{sat}} = 1.0 \cdot 10^{-6}$  m/s), which are required by ZTV E-StB 2017, it can be assumed that approx. 65% infiltrate in the area of the road shoulder and 35% flow over the surface of the road shoulder to the slope.
- Based on the results for future calculations the following can be recommended regarding the surface runoff from the road: For shoulder materials with a coefficient of permeability  $k_{\text{sat}} \geq 1.0 \cdot 10^{-5}$  m/s, the road runoff in the model can be fully applied to the shoulder without significant inaccuracies with regard to the water balance being to be expected. For shoulder materials with a coefficient of permeability in the range of  $k_{\text{sat}} = 1.0 \cdot 10^{-6}$  m/s, it is recommended to apply approx. 2/3 of the road runoff to the road shoulder and approx. 1/3 to the topsoil in the slope area. For shoulder materials with a coefficient of permeability between  $k_{\text{sat}} \geq 1.0 \cdot 10^{-6}$  m/s and  $k_{\text{sat}} \leq 1.0 \cdot 10^{-5}$  m/s, depending on the k-value, a calculation with an approach of 65% to 100% of the road runoff in the shoulder area and the remainder in the topsoil area is assessed as sufficiently realistic. However, it should be noted that the amount of the road runoff depends directly on the amount and distribution of precipitation and that the above percentages of infiltration apply only to the investigated conditions (average annual precipitation 828 mm/a).
- The distribution of road runoff half to the shoulder and half to the topsoil in the slope area realized in this research project leads to slightly lower seepage rates from the core compared to the approach with 100% of road runoff distributed on the shoulder.
- Especially in the case of low permeable shoulder materials, on which part of the road runoff flows off superficially and does not infiltrate, the topsoil also has a significant influence on the water balance. The calculations carried out show that the surface runoff depends very strongly on the minimum conductivity of the topsoil at low water contents, which can arise during dry periods. In order to avoid unrealistically high surface runoff, a minimum hydraulic conductivity should therefore be defined being not less than approx.  $k_{\text{sat}} = 1.0 \cdot 10^{-8}$  m/s.
- The drainage layer has a significant influence on the water balance of road embankments. In this project the hydraulic parameters of the drainage layer were chosen according to the findings of the research project FE 05.185 (MELSBACH et al., 2018), where hydraulic parameters of geosynthetic drainage mats were derived from modelling and simulation of experimental investigations.





## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	13	5.3.3 Modell 3.3 BM1 100 % Bankett .....	47
<b>2</b>	<b>Zielsetzung</b> .....	15	5.3.4 Modell 3.4 BM1 Bankett-1/3 Oberboden .....	48
2.1	Ziel der Untersuchungen .....	15	5.3.5 Modell 3.5 BM4 100 % Bankett .....	48
2.2	Vorgehensweise .....	15	5.3.6 Modell 3.6 BM4 Bankett-1/3 Oberboden .....	48
<b>3</b>	<b>Literaturauswertung</b> .....	16	5.4 Vergleich der Modellberechnungen ...	49
3.1	Modellierung des Wasserhaushaltes von Straßenbauwerken .....	16	<b>6 Zusammenfassung und Ausblick</b> ...	50
3.2	Hydraulische Eigenschaften von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten .....	18	<b>Literatur</b> .....	53
<b>4</b>	<b>Berechnungen zum Wasser- haushalt der Bauweise E</b> .....	20	<b>Bilder</b> .....	56
4.1	Modellbildung .....	21	<b>Tabellen</b> .....	58
4.1.1	Modellgeometrie .....	21		
4.1.2	Randbedingungen .....	22		
4.1.3	Anfangsbedingungen .....	26		
4.1.4	Bodenkennwerte .....	26		
4.2	Übersicht über die durchgeführten Berechnungen .....	30		
4.3	Berechnungsergebnisse .....	30		
4.3.1	Voruntersuchungen .....	30		
4.3.2	Grundmodell 1 .....	32		
4.3.3	Grundmodell 2 .....	35		
4.3.4	Vergleich der Berechnungen .....	38		
4.3.5	Vergleich mit den Ergebnissen des Forschungsvorhabens FE 84.105 ....	43		
<b>5</b>	<b>Berechnungen zum Einfluss des Bankettmaterials auf den Wasser- haushalt</b> .....	45		
5.1	Übersicht der Berechnungen .....	45		
5.2	Bodenkennwerte .....	46		
5.3	Berechnungsergebnisse .....	46		
5.3.1	Modell 3.1 BM5 100 % Bankett .....	46		
5.3.2	Modell 3.2 BM5 Bankett-1/3 Oberboden .....	46		





## 1 Einführung

Der Wasserhaushalt von Erdbauwerken ist von besonderem Interesse, sofern Ersatzbaustoffe, beispielsweise RC-Baustoffe oder industrielle Nebenprodukte als Baustoffe im Erdbau zum Einsatz kommen sollen und dabei aus Gründen des Grundwasserschutzes eine Durchsickerung dieser Stoffe minimiert werden soll. Im Merkblatt über Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen im Erdbau werden verschiedene Bauweisen vorgestellt, mit denen eine Durchsickerung der damit errichteten Erdbauwerke möglichst minimiert werden kann. Die Bauweisen können dabei in Bauweisen mit Abdichtungsschichten oberhalb des Ersatzbaustoffes (Bauweisen A bis C) und in Bauweisen ohne zusätzliche Abdichtungsschichten (Bauweisen D und E) unterteilt werden. Bei der Bauweise E wird oberhalb des Ersatzbaustoffes eine Dränschicht (z. B. ein geosynthetisches Dränelement) zur Ableitung des eindringenden Niederschlagswassers angeordnet (siehe Bild 1). Die Abdichtungswirkung ergibt sich aus dem Zusammenspiel der Dränschicht mit dem darunterliegenden Ersatzbaustoff, der entsprechend den Vorgaben des MTSE eine geringe Durchlässigkeit ( $k < 1 \cdot 10^{-8}$  m/s) aufweisen soll.

Zur Überprüfung der Wirksamkeit der im Merkblatt MTSE (FGSV, 2009) vorgestellten Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen wurden bereits von SCHWELLER et al. (2009) sowie MICHAELIDES et al. (2013) im Rahmen der vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) geförderten Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FE 05.147 und FE 84.105 Berechnungen durchgeführt. Dazu wurden SCHWELLER et al. (2009) zunächst Untersuchungen zur Durchsickerung von Straßendämmen, die hinsichtlich ihres Aufbaus den Bauweisen A, B, D und E des Merkblattes MTSE entsprachen, unter Ansatz von zeitabhängig konstanten Infiltrationsraten durchgeführt. Auf Basis dieser Berechnungen konnten die Bauweisen hinsichtlich ihrer Sickerwassermengen untereinander verglichen werden, die Ermittlung von absoluten, realitätsnahen Wassermengen war jedoch nicht möglich, da die bei den durchgeführten

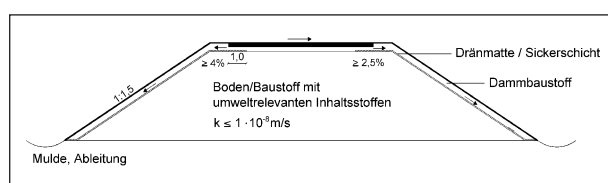


Bild 1: Bauweise E nach MTSE

Berechnungen als Randbedingung aufgebrauchten 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 Dichtungselement oberhalb der Böden bzw. Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen verzichtet wird, dabei aber an die Böden bzw. Baustoffe mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen mit einem Anforderungswert an den gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert  $k \leq 1 \cdot 10^{-7}$  m/s (gemäß MTSE – Ausgabe 2009) eine geringe Durchlässigkeit gefordert wird. 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 rechnerisch immer noch zu vergleichsweise großen Sickerwassermengen aus den Böden bzw. 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 a ange setzt. 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 Berechnungen, bei denen ober-

halb 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 Bauweise dar, da im Vergleich zu den Bauweisen A, B und C keine Dichtungselemente zum Einsatz kommen, die ggf. infolge von Austrocknung oder durch das Einbringen von konstruktiven Bauteilen in Mitleidenschaft gezogen werden können.

Maßgeblichen Einfluss auf die Wirksamkeit der Bauweise E haben aber die hydraulischen Eigenschaften der zu sichernden Böden bzw. Baustoffe mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen. Im Besonderen sind dies die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung der Materialien, die auch als soil-water retention curve (SWRC), Retentionskurve oder pF-WG-Beziehung bezeichnet wird, sowie die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit. Beide Eigenschaften werden maßgeblich von der Porenstruktur der Baustoffe beeinflusst und sind dementsprechend sowohl von der Art des Baustoffes als auch vom Einbauzustand abhängig.

Bei den im Rahmen der Forschungsvorhaben 05.147 und 84.105 durchgeführten Simulationsberechnungen wurden im Hinblick auf die hydraulischen Eigenschaften der Böden bzw. Baustoffe mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen Kennwerte für unterschiedliche Böden aus der Literatur herangezogen. Für RC-Baustoffe und industrielle Nebenprodukte, die ebenfalls als Baustoffe bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen in Frage kommen, lagen zum Zeitpunkt der Berechnungen keine belastbaren Daten vor, weshalb auf die Abbildung dieser Stoffe in den durchgeführten Forschungsvorhaben verzichtet wurde. Da diese Materialien aber einen nennenswerten Stoffstrom darstellen und aufgrund ihrer in der Regel sehr guten erdbautechnischen Eigenschaften für einen Einsatz im Erdbau prädestiniert sind, sollten auch für diese Stoffe Untersuchungen zur Durchsickerung beim Einsatz in Straßendämmen durchgeführt werden. Im Vergleich zu mineralischen Böden weisen diese Stoffe aber deutliche Unterschiede im Hinblick auf ihre hydraulischen und erdbautechnischen Eigenschaften auf, die im Vergleich zu mineralischen Böden mit vergleichbaren Korngrößenverteilungen zu einem deutlich unterschiedlichen Verhalten führen können. So weisen RC-Baustoffe (z. B. Betonbruch und RC-Mix), und industrielle Nebenprodukte (Hausmüllverbrennungaschen – HMVA, Eisenhütenschlacken – EHS) häufig eine bimodale Poren-

struktur auf, die durch Porensysteme zwischen den einzelnen Feststoffpartikeln und in den Feststoffpartikeln gekennzeichnet ist (BAUMGÄRTEL et al., 2006; HENZINGER et al., 2016). Von SCHARNAGL und DURNER (2014) wurden experimentelle Untersuchungen zu den hydraulischen Eigenschaften von Ersatzbaustoffen durchgeführt und Kennwerte für die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit und die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung ermittelt (siehe auch Kapitel 3.2). Damit liegen nunmehr belastbare Kennwerte vor, um mithilfe von Simulationsberechnungen die Wirksamkeit der Bauweise E gemäß dem Merkblatt MTSE auch bei der Verwendung von Ersatzbaustoffen zu überprüfen.

Bei der Bewertung von rechnerisch ermittelten Sickerwassermengen ist zu beachten, dass der Wasserhaushalt von Straßendämmen und Schutzwällen maßgeblich von den an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozessen (Oberflächenabfluss, Evapotranspiration) abhängt und in diesem Zusammenhang insbesondere die hydraulischen Eigenschaften des Bankettmaterials und des Oberbodens von Relevanz sind. Ergebnisse von Forschungsvorhaben zur Tragfähigkeit und zum Schadstoffrückhalt von Bankettmaterialien (KOUKOULIDOU et al., 2014; WERKENTHIN et al., 2014) belegen, dass Bankettmaterialien prinzipiell einen möglichst großen Feinkornanteil zum Schadstoffrückhalt aufweisen sollten, aus Gründen der Tragfähigkeit der Feinkornanteil aber in der Regel auf maximal ca. 15 % beschränkt werden sollte. In der neuen ZTV E-StB 2017 werden als Bankettbaustoffe deshalb Kies-Schluff-Gemische bzw. Kies-Ton-Gemische (GU bzw. GT nach DIN 18196) mit einem Feinkornanteil im eingebauten Zustand von 8 – 12 % gefordert. Gemäß den Ergebnissen von KOUKOULIDOU et al. (2014) und STALTER et al. (2013) hängt der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert derartiger Stoffe abgesehen vom Verdichtungsgrad maßgeblich von der Kornabstufung und dem Feinkornanteil ab. Entsprechend ihren Untersuchungen sind für die gemäß ZTV E-StB 2017 geforderten Bankettmaterialien gesättigte Durchlässigkeitsbeiwerte im Bereich von  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s bis ca.  $1 \cdot 10^{-7}$  m/s möglich. Inwiefern sich unterschiedliche Durchlässigkeiten von Bankettmaterialien in der genannten Bandbreite auf den Wasserhaushalt von Straßendämmen auswirken, ist bisher noch weitgehend unerforscht.

## 2 Zielsetzung

### 2.1 Ziel der Untersuchungen

Mithilfe von Simulationsberechnungen soll der Wasserhaushalt von Straßendämmen, die mit technischen Sicherungsmaßnahmen gemäß der Bauweise E nach MTSE (2009) und ohne technische Sicherungsmaßnahmen errichtet werden, untersucht werden. Bei den zu sichernden Baustoffen sollen dabei sowohl Böden als auch Ersatzbaustoffe (RC-Materialien und industrielle Nebenprodukte) betrachtet werden. Außerdem soll im Rahmen der Simulationsberechnungen durch gezielte Parametervariationen herausgearbeitet werden, wie unterschiedliche Materialien für den Oberboden und das Bankettmaterial den Wasserhaushalt von Straßendämmen beeinflussen.

Die Berechnungen tragen damit wesentlich dazu bei, beurteilen zu können, unter welchen Randbedingungen technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden bzw. Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen gemäß den Bauweisen des Merkblattes MTSE erforderlich werden und unter welchen Umständen auf zusätzliche Abdichtungselemente verzichtet werden kann. Außerdem soll anhand der Untersuchungen herausgearbeitet werden, inwiefern sich RC-Baustoffe und industrielle Nebenprodukten gegenüber natürlichen Böden im Hinblick auf eine Durchsickerung unterscheiden.

### 2.2 Vorgehensweise

Es wurden auf Grundlage einer Literaturrecherche zunächst die neben den Untersuchungen von SCHWELLER et al. (2009) und MICHAELIDES et al. (2013) vorliegenden Erkenntnisse zum Wasserhaushalt von Straßendämmen und zu den hydraulischen Eigenschaften von Ersatzbaustoffen zusammengetragen.

Anschließend wurden Simulationsberechnungen zum Wasserhaushalt von Straßendämmen an einem 4 m hohen Straßendamm durchgeführt, wobei zwei Situationen unterschieden wurden:

- Grundmodell 1: Straßendamm mit einer technischen Sicherungsmaßnahme entsprechend der Bauweise E nach MTSE (2009), siehe auch Bild 1.
- Grundmodell 2: Straßendamm ohne technische Sicherungsmaßnahmen (TSM).

Die Berechnungen wurden mit der Finite-Elemente-Software VADOSE/W durchgeführt. Damit können sowohl die Wasserbewegung im ungesättigten wie auch im gesättigten Boden als auch die an der Bodenoberfläche stattfindenden Vorgänge (Verdunstung, Infiltration, Oberflächenabfluss) abgebildet werden. Einschränkungen sind hierbei jedoch bei der Abbildung des Oberflächenabflusses vorhanden. So wird im Fall, dass es rechnerisch zu einem Oberflächenabfluss kommt, d. h., dass der auf die Oberfläche auftretende Niederschlag nicht vollständig in den Oberboden versickern kann, die entsprechende Wassermenge vom Programm direkt entnommen und als Oberflächenabfluss bei der Auswertung gekennzeichnet. Ein Abfließen des Oberflächenabflusses auf der Böschungsoberfläche kann nicht abgebildet werden.

Es wurden für beide Grundmodelle jeweils sieben Berechnungen durchgeführt, wobei jeweils die im Straßenunterbau eingesetzten Materialien (Böden bzw. Baustoffe mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen – Buml) variiert wurden. Es wurden dabei zwei Böden, zwei RC-Baustoffe, zwei Hausmüllverbrennungsaschen (HMVA) und eine Stahlwerksschlacke (SWS) betrachtet. Mit den gewählten Baustoffen wurde eine große Stoffgruppe von mittel bis gering durchlässigen Materialien abgedeckt.

Um die Berechnungsergebnisse mit den im Rahmen des Forschungsvorhabens FE 84.105 erzielten Ergebnissen vergleichen zu können, wurden ergänzende Berechnungen durchgeführt. Diese waren erforderlich, da im Forschungsvorhaben FE 84.105 für das Bankett und die Frostschuttschicht Materialien mit anderen hydraulischen Eigenschaften berücksichtigt wurden. In der ergänzenden Simulationsberechnung wurde als Material für den Straßenunterbau der im Forschungsvorhaben FE 84.105 betrachtete organische Ton (OT nach DIN 18196) mit einem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert  $k_{\text{sat}} = 1 \cdot 10^{-8}$  m/s betrachtet. Die Ergebnisse dieser Berechnung wurden mit den Ergebnissen aus dem Forschungsvorhaben FE 84.105 verglichen, um damit die Auswirkung der im vorliegenden Forschungsvorhaben berücksichtigten Bankett- und Frostschuttschichtmaterialien zu ermitteln.

Außerdem wurde anhand von sechs Berechnungen der Einfluss unterschiedlich durchlässiger Bankettmaterialien sowie unterschiedlicher Verteilungen des Straßenabflusses auf den Wasserhaushalt der untersuchten Straßendämme herausgearbeitet. Dazu wurden Berechnungen mit drei unterschied-



lichen Bankettmaterialien und jeweils zwei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen im Bereich des Banketts und der Böschung durchgeführt.

Auf Basis der Berechnungsergebnisse wird abschließend beschrieben, inwiefern die ermittelten Sickerwassermengen von den hydraulischen Eigenschaften der den Berechnungen zugrunde gelegten Baustoffe beeinflusst werden.

### 3 Literaturlauswertung

#### 3.1 Modellierung des Wasserhaushaltes von Straßenbauwerken

Simulationsberechnungen zur Modellierung des Wasserhaushaltes von Straßendämmen wurden insbesondere im Zusammenhang mit der Verwendung von Ersatzbaustoffen bzw. schadstoffbelasteten Böden 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 Asphalt-schicht, einer 30 cm dicken 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 Asphalt-schicht 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 Asphalt-schicht ein Wassergehaltsgleichgewicht 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) untersuchte die Wasserströmung in einem gemäß den schwedischen Richtlinien erstellten Straßendamm 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 abgeflossen ist, solange es nicht infiltrieren konnte. Die verwendeten Parameter zur Beschreibung der hydraulischen Eigenschaften gemäß den Modellen 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 Zuständen 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 Kapillarsperrereffekte durch die grobkörnigen Schichten beobachtet wurden. Bei hohen Niederschlagsraten nahm der Oberflächenabfluss zu und es traten keine Kapillarsperrereffekte auf. Da bei hohen Infiltrationsraten die Wasseraufnahmekapazität der Risse und des Banketts übertroffen werden, nimmt die Fläche, auf der eine Infiltration in den Straßendamm auftritt, zu. D. h. zunehmend findet eine 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 Ihrer Arbeit wurden die Durchsickerung und der Schadstofftransport in einem Straßendamm mit befestigter Fahrbahn und Bankett, einer Tragschicht aus Ersatzbaustoffen und einem homogenen Böschung- und Kernbereich modelliert. Hinsichtlich der hydraulischen Eigenschaften der Schichten wurden für die Böschung und den Kern van Genuchten-Parameter für sandige Böden von 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 die Randbedingung eines zeitlich variablen Zuflusses („flux“-Randbedingung) angesetzt wurden. Der gemessene Niederschlag in Maplewood, Minnesota (USA) in 1998 (720 mm/a) wurde dazu in Form von 15-min-Werten angesetzt

und zur Abbildung von 20 Jahren 20-mal wiederholt. Es wurden in verschiedenen Berechnungen unterschiedliche Fahrbahnqualitäten untersucht. Die Asphalttschicht 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 Schadstofftransport im Mittelpunkt der Ergebnisse steht, haben die Berechnungen gezeigt, dass sowohl der asphaltierte Rand als auch die Fahrbahnrisse eine große Wirkung 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. Da in der Literatur keine Angabe hinsichtlich der hydraulischen Eigenschaften von Sekundärbaustoffen im Straßenbau vorlagen, wurden die Parameter unter Verwendung der empirischen Funktion von ARYA und PARIS (1981) bzw. MISHRA et al. (1989) unter Berücksichtigung der Korngrößenverteilung, des Porenanteils und der Lage-

ungsdichte ermittelt. 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.

NORAMBUENA-CONRERAS 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 van Genuchten-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 Asphalttschicht 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 Autobahndammes vor und nach seiner Erweiterung mittels FDR Proben (Frequency Domain Reflectometry Sensors) aufgezeichnet. Unter Berücksichtigung von Klimadaten einer auf dem Damm errichteten Klimastation 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 Dammes 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 Monaten in einem Versuchsdamms 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 Niederschlages und der Evaporation auf den Wassergehalt nur bis in geringe Tiefe von ca. 10 cm begrenzt ist. Die Saugspannungen verändern sich im Gegenteil dazu bis in größere Tiefe.

ALONSO (1998) (zitiert in DAWSON, 2008) hat mit einem hydraulisch-mechanisch gekoppeltem Modell sowohl den Wasser- und Wärmetransport als auch das Spannungs-Verformungs-Verhalten von Straßendämmen untersucht. Im Rahmen seiner Arbeit wurde ein Straßendamm unter Mittelmeerklimabedingungen betrachtet. ALONSO et al. (2002) (zitiert in DAWSON, 2008) haben auch Berechnungen durchgeführt, um die optimale Anordnung von Dränagen zur Entwässerung des Straßenoberbaus festzustellen. Unterschiedliche Klimabedingungen (tropisch, Mittelmeer, subalpin) wurden untersucht. Dazu wurden Messdaten von Niederschlag, Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit für einen Zeitraum von fünf Jahren angesetzt. Ergebnisse zum Wasserhaushalt bezüglich des Straßenabflusses und der Infiltration in den Straßendamm werden nicht explizit dargestellt.

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

- Die Ergebnisse von Messungen und Simulationsberechnungen zeigen, dass der Wassergehalt in Straßendämmen nur in oberflächennahen Bereichen signifikant durch Niederschläge und Evaporation bzw. Transpiration beeinflusst wird.
- 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 Kapillareffekten 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.
- Es lassen sich keine quantitativen Werte für den Anteil des im Bereich des Bankettes und der Böschung versickernden Straßenabflusses ableiten.

Es ist festzustellen, dass bis dato nur vergleichsweise wenige Informationen zum Wasserhaushalt von Straßendämmen vorliegen. Zum Wasserhaushalt von Straßendämmen mit technischen Sicherungsmaßnahmen (Dränschichten, Abdichtungsschichten) liegen die eingangs beschriebenen Ergebnisse von SCHWELLER et al. (2009) sowie MICHAELIDES et al. (2013) vor. Diese beziehen sich aber wie erläutert auf Berechnungsergebnisse unter Berücksichtigung von natürlichen Böden/Baustoffen, sodass insbesondere für Erdbauwerke, die aus RC-Baustoffen errichtet werden, noch ein erheblicher Forschungsbedarf besteht.

### 3.2 Hydraulische Eigenschaften von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten

Mit dem zunehmenden Einsatz von rezyklierten Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Straßen- und Erdbau wurden vermehrt Untersuchungen zu den hydraulischen Eigenschaften solcher Materialien durchgeführt.



GUPTA et al. (2009) haben die Eignung von vier Ersatzbaustoffen (RC-Beton, Ausbauasphalt, Flugasche, Gießereisand) und ihren Mischungen mit natürlichen Gesteinskörnungen für ihre Anwendung im Straßenbau (Tragschichten) nachgewiesen. Zur Ermittlung der hydraulischen Eigenschaften wurden die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen von 17 Ersatzbaustoffen bzw. ihre Mischungen mittels eines Drucktopfextraktors (Achsen-Translation-Technik) bestimmt. Es wurden damit Werte im Saugspannungsbereich von 3 kPa bis 1.500 kPa gemessen. Die ermittelten Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen weisen eine S-Form auf und konnten mit den Modellen nach van Genuchten und Fredlund-Xing gut angepasst werden. Im Vergleich zu natürlichen Gesteinskörnungen mit vergleichbaren Korngrößenverteilungen zeigen die Ersatzbaustoffe nur geringe Abweichungen.

RAHARDJO et al. (2010) haben die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung von drei RC-Baustoffen, drei Ausbauasphalten und einer Kupferschlacke mittels Achsen-Translation-Technik (Tempe Pressure Cells) im Saugspannungsbereich von 0 kPa bis 100 kPa ermittelt. Die Laborergebnisse wurden mit dem Modell von Fredlund-Xing unter Berücksichtigung eines Korrekturfaktors  $C(\psi) = 1$  (LEONG und RAHARDJO, 1997) angepasst. Die gesättigte Durchlässigkeit der verschiedenen Materialien wurde anhand von Laborversuchen bestimmt. Basierend auf den Laborergebnissen wurden die hydraulischen Leitfähigkeitsfunktionen durch Anpassung bestehender Modelle ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass Sekundärbaustoffe mit hohem Kiesanteil höhere Porositäten, höhere gesättigte Durchlässigkeiten und niedrigere Lufteintrittspunkte aufweisen. Die ermittelten Retentionskurven von diesen Baustoffen sind relativ steil, die Lufteintrittspunkte sind niedriger als 1 kPa und die Entwässerung erfolgt schnell. Der Lufteintrittspunkt der RC-Baustoffe lag zwischen 0,04 kPa und 22 kPa und der von RC-Asphalt zwischen 0,01 kPa und 0,03 kPa. Die gesättigte Durchlässigkeit nimmt in der Regel mit zunehmendem Kiesanteil zu, sie ist aber nicht nur von der Porosität, sondern auch von der Tortuosität und der stofflichen Zusammensetzung der Sekundärbaustoffe abhängig.

Ähnliche Ergebnisse wurden auch von AZAM et al. (2014) veröffentlicht. Im Rahmen ihrer Forschung wurden die Retentionskurven von sieben RC-Baustoffen und einer natürlichen Gesteinskörnung untersucht. Es wurden RC-Beton der Körnung 0/20 mm und Mischungen aus RC-Beton mit 10 %, 20 %

und 30 % RC-Ziegel der Körnung 0/20 mm verwendet, die gemäß der australischen Department for Planning, Transport and Infrastructure (2011) für Tragschichten geeignet sind. Die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen wurden mittels der Filterpapier- und der Unterdruckmethode ermittelt. Alle Kurven weisen die typische S-Form auf und der Lufteintrittspunkt variiert für RC-Beton zwischen 8 kPa und 9 kPa und für die Mischungen mit RC-Ziegel zwischen 5 kPa und 18 kPa. Im Vergleich zur natürlichen Gesteinskörnung weisen die rezyklierten Materialien höhere Saugspannungen bei den entsprechenden Wassergehalten auf. Die Modelle von van Genuchten, Fredlund-Xing und GOULD et al. (2012) ermöglichen eine gute Anpassung zu den gemessenen Werten. Das Modell von HOUSTON et al. (2006) wurde als ungeeignet für die untersuchten Materialien bewertet.

NOKKAEW et al. (2012) haben die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung und die gesättigte Durchlässigkeit von drei Ausbauasphalten und drei RC-Beton-Baustoffen, die als Tragschichtmaterialien verwendet werden könnten, ermittelt. Da sich bei grobkörnigen Materialien nur vergleichsweise geringe Saugspannungen einstellen, wurde für die Bestimmung der Retentionskurven die Unterdruckmethode verwendet. Außerdem wurde die gesättigte Durchlässigkeit der untersuchten Materialien experimentell bestimmt. Um die Feldbedingungen nachzubilden, wurden die Proben bei 95 % des Proctoroptimums verdichtet. Die gesättigte Durchlässigkeit der Ausbauasphalte variiert zwischen  $3,8 \cdot 10^{-5}$  m/s und  $3,7 \cdot 10^{-4}$  m/s und die von RC-Beton zwischen  $1,6 \cdot 10^{-5}$  m/s und  $1,9 \cdot 10^{-5}$  m/s. Die ermittelten Retentionskurven weisen, ähnlich wie bei RAHARDJO et al. (2010), die typische S-Form auf und konnten mit dem Modell von Fredlund-Xing gut angepasst werden. Die Lufteintrittspunkte der Ausbauasphalte liegen zwischen 0,1 kPa und 1,1 kPa und die der RC-Beton zwischen 0,5 kPa und 3,0 kPa.

GOMEZ et al. (2014) haben die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung eines RC-Baustoffs ermittelt, der aus dem Abbruchmüll des Nationalen Fußballstadions in Brasilia stammte. Im Zuge der Materialaufbereitung wurde das Material auf eine Korngrößenverteilung gebracht, welche gemäß den brasilianischen Richtlinien für Tragsichten von Straßen mit mittlerem bis hohem Verkehrsaufkommen geeignet ist. Versuche mit dem Drucktopfextraktor (Achsen-Translation-Technik) und der Filterpapiermethode wurden verwendet, um die Retentionskur-



ve über einen möglichst großen Saugspannungsbereich zu ermitteln. Die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung wurde an drei Proben gemessen, die bei unterschiedlichem Wassergehalt (Proctoroptimum, nasse Seite, trockene Seite) mit Proctor-Energie verdichtet wurden. Gemäß den ermittelten Kurven weist das Material eine multimodale Porenverteilung mit drei dominanten Porengrößenbereichen auf: Poren zwischen den groben Körnern, Poren zwischen den feinen Körnern und Hohlräume innerhalb der Einzelkörner. Einflüsse aus dem Verdichtungswassergehalt auf die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung wurden nur im niedrigen Saugspannungsbereich beobachtet. Mit zunehmendem Verdichtungswassergehalt nimmt der Lufteintrittspunkt zu.

Multimodale Retentionskurven für Ersatzbaustoffe wurde auch von SCHARNAGL und DURNER (2014) festgestellt. In Rahmen ihrer Forschungsarbeit wurden 15 Materialien (fünf Böden, vier HMVA, fünf RC-Baustoffe und eine Stahlwerksschlacke) hinsichtlich ihrer hydraulischen Eigenschaften untersucht. Es wurden verschiedene Methoden verwendet, um einen große Saugspannungsbereich abzudecken. Verdunstungsexperimente wurden durchgeführt, um die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung und die ungesättigte Leitfähigkeitsfunktion im feuchten Bereich zu ermitteln. Im trockenen Bereich wurden Saugspannungsuntersuchungen mithilfe der Taupunkt-Methode durchgeführt. Zusätzlich wurde die gesättigte Durchlässigkeit der untersuchten Materialien nach der Methode mit konstantem Überstau bestimmt. Die untersuchten HMVA weisen im Vergleich zu den untersuchten Böden eine höhere Porosität auf. Drei von ihnen zeigen eine hohe Makroporosität, die aus einem steilen Abschnitt der Retentionskurven im niedrigen Saugspannungsbereich erkennbar ist. Das führt zu einer bimodalen Form der Kurve und zu niedrigen Lufteintrittswerten, die bei allen HMVA niedriger als 5 kPa sind. Die gesättigte Durchlässigkeit liegt für drei HMVA bei  $6,4 \cdot 10^{-5}$  m/s und für eine bei  $6,3 \cdot 10^{-8}$  m/s. Die RC-Baustoffe (RC-Beton, RC-Ziegel, RC-Mix) weisen multimodale Retentionskurven auf, die auf die Makroporosität der Materialien zurückzuführen sind. Die gesättigte Durchlässigkeit variiert von  $1,2 \cdot 10^{-6}$  m/s bis  $6,8 \cdot 10^{-4}$  m/s. Die gesättigte Durchlässigkeit der Stahlwerksschlacke liegt bei  $1,2 \cdot 10^{-6}$  m/s. Die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung weist eine Bimodalität auf, es ist jedoch keine Makroporosität erkennbar. Da die untersuchten Materialien eine

multimodale Porosität aufweisen und die Retentionsdaten nicht der typischen S-Form folgen, ist das klassische Modell von van Genuchten ungeeignet, um eine gute Anpassung in dem ganzen Feuchtigkeitsbereich zu erzielen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die genannten Untersuchungen zu den hydraulischen Eigenschaften von Ersatzbaustoffen (RC-Baustoffe, Ausbauasphalt, HMVA, Flugaschen und Stahlwerksschlacken) zum Teil widersprüchliche Ergebnisse liefern:

- Gemäß den Untersuchungen von GUPTA et al. (2009), RAHARDJO et al. (2010), NOKKAEW et al. (2010) und AZAM et al. (2014) weisen Ersatzbaustoffe ähnliche Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen wie natürliche Gesteinskörnungen mit vergleichbarer Korngrößenverteilung auf und können die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen von Ersatzbaustoffen gut mit den Modellen nach van Genuchten und Fredlund-Xing angepasst werden.
- Dagegen zeigen die Untersuchungen von GOMEZ et al. (2014) und SCHARNAGL und DURNER (2014), die in ihren Untersuchungen sowohl den niedrigen als auch hohen Saugspannungsbereich der SWRC abgedeckt haben, große Unterschiede zwischen den SWRC von Ersatzbaustoffen und Böden: So weisen Ersatzbaustoffe häufig multimodale Porengrößenverteilungen auf und können dementsprechend mit dem Modell nach van Genuchten nur unbefriedigend abgebildet werden.

## 4 Berechnungen zum Wasserhaushalt der Bauweise E

Die Sickerwasserberechnungen werden mit der Finite-Elemente-Software VADOSE/W der Firma GEO-SLOPE durchgeführt. Das Programm ermöglicht es, unter stationären wie auch unter instationären Bedingungen Sickerwasserströmungen im gesättigten wie ungesättigten Medium abzubilden. Die an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse (Evaporation, Transpiration, Infiltration) werden von VADOSE/W unter Berücksichtigung der klimatischen Randbedingungen und der zustandsabhängigen Eigenschaften des Bodens (Wassergehalt, Saugspannung) abgebildet. In VADOSE/W

können sowohl die Wasserbewegungen in der flüssigen Phase als auch der dampfförmige Wassertransport betrachtet werden. Als Gleichung für die Wasserbewegung in der flüssigen Phase verwendet das Programm die Richards-Gleichung. Da die Wasserbewegung in der dampfförmigen Phase stark temperaturabhängig ist, ist außerdem die Gleichung für den differentiellen Wärmetransport zu betrachten. Zur Lösung der Gleichungssysteme muss der Zusammenhang zwischen dem Dampfdruck, dem Wasserdruck und der Temperatur beschrieben werden. Dies erfolgt in VADOSE/W über die von EDLEFSEN und ANDERSON (1943) modifizierte Kelvin-Gleichung. Die Berechnungen der Verdunstung erfolgt im Programm mit dem von WILSON (1990) modifizieren Ansatz nach PENMAN (1956).

## 4.1 Modellbildung

### 4.1.1 Modellgeometrie

Für die Simulationsberechnungen wurde ein 4 m hoher Straßendamm betrachtet. Die Dammhöhe bis zum Planum beträgt 3,2 m und die Höhe des Oberbaus 80 cm (54 cm Frostschutzschicht und Schottertragschicht sowie 26 cm gebundene Schichten). Das Bankett hat eine Breite von 1,5 m und eine Neigung von 12 %. Die Neigung der Dammböschung beträgt 1:1,5 und die Dicke des Oberbodens 20 cm. Um die Berechnungsdauer zu reduzieren, wurde der Straßendamm nicht komplett abgebildet, sondern es wurde nur die entwässernde Hälfte betrachtet. Da die gebundenen Schichten als wasserundurchlässig betrachtet werden, wurden sie ebenso zur Vereinfachung im Modell nicht abgebildet.

Unter Zugrundelegung der oben beschriebenen Geometrie wurden zwei Grundmodelle erstellt. In Grundmodell 1 wurden technische Sicherungsmaßnahmen entsprechend der Bauweise E berücksichtigt. Die oberhalb des Kernmaterials vorgesehene Dränmatte wurde im Modell als 20 cm dicke Drän-schicht abgebildet. Die Geometrie des Grundmodells 1 ist in Bild 2 dargestellt.

Die Geometrie des Grundmodells 2 kann Bild 3 entnommen werden. In diesem Fall wurde der Straßendamm ohne technische Sicherungsmaßnahmen abgebildet.

Die FE-Modelle bestehen aus 4.648 hauptsächlich quadratischen Elementen, wobei das Netz (Bild 4) im Bereich des Bankettes, des Oberbodens und der Dränschicht verfeinert wurde, da in diesen Bereichen die größte Wasserbewegung zu erwarten ist. Außerdem wurde das Netz im Bereich von Schichtgrenzen verfeinert, da dort die hydraulischen Eigenschaften der Materialien stark wechseln können.

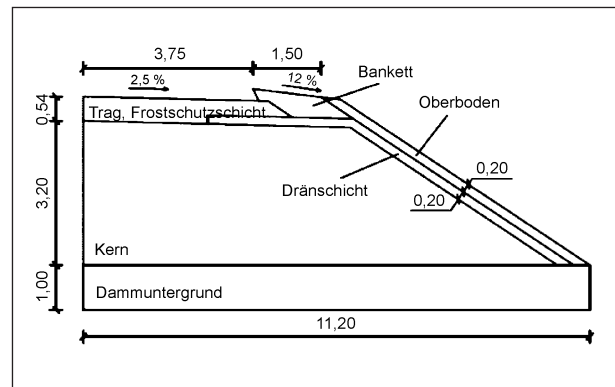


Bild 2: Geometrie von Grundmodell 1

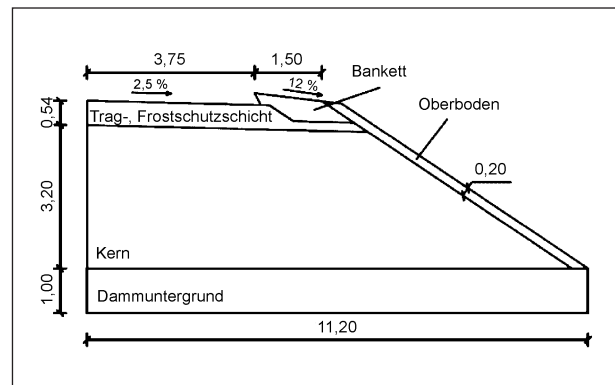


Bild 3: Geometrie von Grundmodell 2

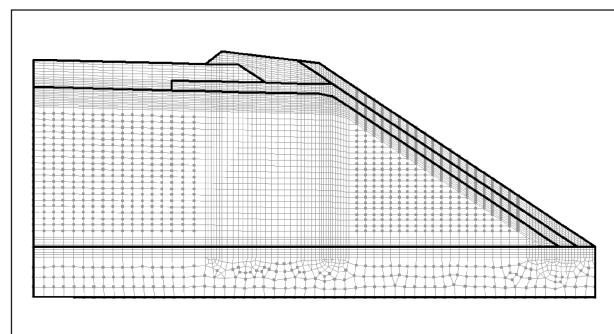


Bild 4: Finite-Elemente Netz

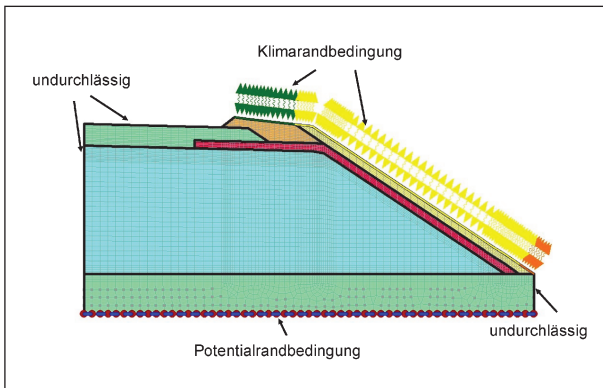


Bild 5: Randbedingungen

#### 4.1.2 Randbedingungen

Die für beide Grundmodelle verwendeten Randbedingungen sind in Bild 5 dargestellt.

##### Hydraulische Randbedingungen

An der Modellunterseite wurde eine Randbedingung der ersten Art (Potentialrandbedingung) von -1 m angesetzt. Sie entspricht der Lage des angenommenen höchsten Grundwasserspiegels und ermöglicht die freie Entwässerung des Kerns. Die rechte und linke Seite des Damms sowie die Fahrbahnoberfläche wurden als undurchlässig betrachtet.

##### Klimarandbedingungen

Auf dem Bankett und dem Oberboden wurde eine Klimarandbedingung angesetzt. Diese umfasst für jeden Zeitschritt Angaben zur Niederschlagsmenge, zur minimalen und maximalen Temperatur, zur minimalen und maximalen Luftfeuchtigkeit, zur mittleren Windgeschwindigkeit und zur Nettostrahlung. Ähnlich wie bei den Untersuchungen im Forschungsvorhaben 84.105 wurden zur Ermittlung der Klimarandbedingung Daten vom Deutschen Wetterdienst (DWD) für den Flughafen München für den Zeitraum von 01.10.1992 bis 31.12.2002 herangezogen. Diese beinhalten Tageswerte für den Niederschlag (Bild 6), die durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit, die mittlere Windgeschwindigkeit, minimale und maximale Temperatur, Sonnenscheindauer und Bewölkung.

- Relative Luftfeuchtigkeit

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

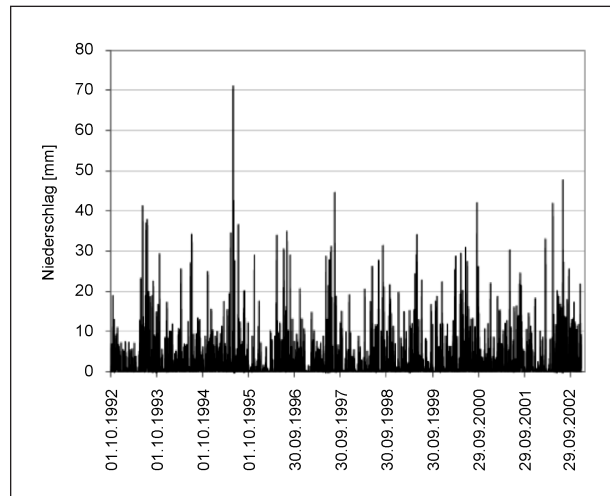


Bild 6: Niederschlagstageswerte von DWD für München Flughafen von 01.10.1992 bis 31.12.2002

feuchtigkeit wurden aus den verfügbaren Klimadaten nach MICHAELIDES et al. (2013) wie nachfolgend beschrieben abgeleitet.

Die relative Luftfeuchtigkeit RH ist definiert als:

$$RH = 100 \cdot \frac{e_a}{e_0(T)} \quad [\%] \quad (\text{Gl. 1})$$

wobei

$e_a$  tatsächlicher Dampfdruck [kPa]

$e_0(T)$  Sättigungsdampfdruck [kPa]

$T$  Lufttemperatur

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

$$e_0(T) = 0,6108 \cdot e^{\frac{17,27 \cdot T}{T + 237,3}} \quad [\text{kPa}] \quad (\text{Gl. 2})$$

mit  $T$  in [°C] und

$$e_a = RH_{\text{mittel}} \cdot \frac{e_0(T_{\text{max}}) + e_0(T_{\text{min}})}{2} \quad [\text{kPa}] \quad (\text{Gl. 3})$$

wobei

$T_{\text{max}}$  maximale Tagestemperatur [°C]

$T_{\text{min}}$  minimale Tagestemperatur [°C]

$RH_{\text{mittel}}$  mittlere relative Luftfeuchtigkeit definiert als der Mittelwert aus minimaler und maximaler relativen Luftfeuchtigkeit

Obwohl die mittlere relative Luftfeuchtigkeit gemäß der oben genannten Definition formal nicht der vom

DWD angegebenen durchschnittlichen relativen Luftfeuchtigkeit entspricht, ergaben Messungen der minimalen und maximalen relativen Luftfeuchtigkeit am München Flughafen für den Zeitraum 2008 bis 2010 keine signifikanten Unterschiede zwischen den mittleren und durchschnittlichen Werten. Deshalb können die vom DWD verfügbaren Daten zur Ermittlung des tatsächlichen Dampfdrucks herangezogen 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 Luftfeuchtigkeitswerte folgendermaßen abgeschätzt werden:

$$RH_{\min} = 100 \cdot \frac{e_a}{e_0(T_{\max})} [\%] \quad (\text{Gl. 4})$$

und

$$RH_{\max} = 100 \cdot \frac{e_a}{e_0(T_{\min})} [\%] \quad (\text{Gl. 5})$$

- Nettostrahlung

Die Nettostrahlung ist definiert als der Differenz der einfallenden kurzwelligeren Sonneneinstrahlung und der von der Erdoberfläche emittierten langwelligeren Strahlung:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (\text{Gl. 6})$$

wobei

$R_n$  Nettostrahlung

$R_{ns}$  kurzwellige Strahlung

$R_{nl}$  langwellige Strahlung

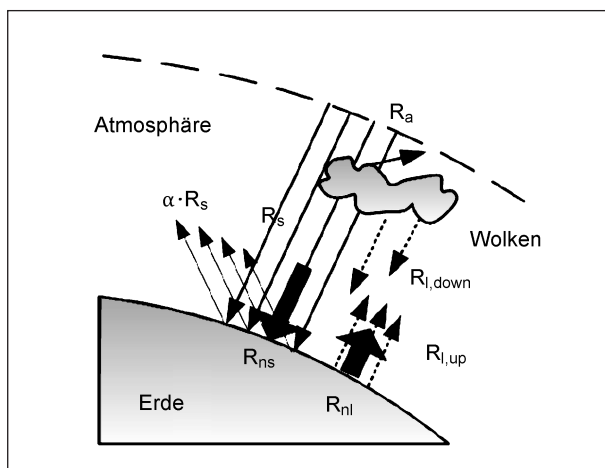


Bild 7: Anteile der Strahlung nach ALLEN et al. (1998)

Die kurzwellige Strahlung  $R_{ns}$  ist nach ALLEN et al. (1998) wie folgende Gleichung definiert:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_s \quad [\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d}] \quad (\text{Gl. 7})$$

mit

$R_s$  kurzwellige Sonneneinstrahlung, die auf die Erdoberfläche auftrifft  $[\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d}]$

$\alpha$  Albedo (= 0,23 für Gras)

Die langwellige Strahlung  $R_{nl}$  lässt sich nach Gleichung 8 abschätzen:

$$R_{nl} = \sigma \cdot \left[ \frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right] \cdot (0,34 - 0,14 \cdot \sqrt{e_a}) \cdot \left( 1,35 \cdot \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad [\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d}] \quad (\text{Gl. 8})$$

mit

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

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

$e_a$  tatsächlicher Dampfdruck [kPa]

$R_s$  kurzwellige Sonneneinstrahlung, die auf die Erdoberfläche auftrifft  $[\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d}]$

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

$\sigma$  Boltzmann-Konstante:  $4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ} \cdot \text{K}^{-4} / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$

Die Clear-Sky-Strahlung  $R_{so}$  lässt sich mithilfe von Gleichung 9 berechnen:

$$R_{so} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z) \cdot R_a \quad [\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d}] \quad (\text{Gl. 9})$$

wobei

$z$  Höhe über dem Meeresspiegel [m]

$R_a$  kurzwellige extraterrestrische Strahlung  $[\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d}]$

Die extraterrestrische Strahlung  $R_a$  ist definiert als:

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r \cdot (\omega_s \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s) \quad [\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d}] \quad (\text{Gl. 10})$$

mit

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

$d_r$  inverse relative Entfernung Erde-Sonne

- $\omega_s$  Sonnenuntergangs-Stundenwinkel [rad]  
 $\varphi$  Breitengrad des Standorts [rad]  
 $\delta$  jahreszeitliche Abschwächung der Sonneneinstrahlung [rad]

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

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (\text{Gl. 11})$$

$$\delta = 0,409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (\text{Gl. 12})$$

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

Der Stundenwinkel des Sonnenuntergangs berechnet sich wie folgt:

$$\omega_s = \cos^{-1} \cdot (-\tan \varphi \cdot \tan \delta) \quad (\text{Gl. 13})$$

Da der DWD keine Messwerte für der Nettostrahlung liefert, wurden die für VADOSE/W benötigten Werte von den verfügbaren Klimadaten abgeschätzt.

Im Forschungsvorhaben 84.105 wurde die Nettostrahlung nach dem Ansatz von MICHAELIDES et al. (2013) aus der maximale Tagestemperatur  $T_{\max}$  (°C) und der täglichen Sonnenscheindauer  $t_{\text{Sonne}}$  (h) bestimmt (Gleichung 14).

$$R_n = 0,18 \cdot T_{\max} \cdot 1,36^{t_{\text{Sonne}}^{0,494}} \quad [\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d}] \quad (\text{Gl. 14})$$

ZEILER (2014) hat einen Ansatz für die Ermittlung der Globalstrahlung aus der Sonnenscheindauer  $t_{\text{Sonne}}$  (h) und der Strahlung bei unbedecktem Him-

mel (Clear-Sky-Strahlung)  $R_{s0}$  ( $\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d}$ ) für den Standort Marnitz vorgestellt (Gleichung 15). Die Nettostrahlung wurde dann mithilfe der Gleichungen 6 bis 13 berechnet.

$$R_s = R_{s0} \cdot a^{b^{t_{\text{Sonne}}}} \quad [\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d}] \quad (\text{Gl. 15})$$

wobei a und b Anpassungsparameter [-].

Unter Berücksichtigung der an der Versuchsschüttung am Münchner Flughafen im Zeitraum zwischen Oktober 2008 und Dezember 2010 gemessenen Werten der Nettostrahlung und der vom DWD für diesen Zeitraum angegebenen Klimadaten wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens passende Werte für die Parameter a und b der Gleichung 15 für den Flughafen München bestimmt. Im Vergleich zur Gleichung von MICHAELIDES et al. (2013) bietet der Ansatz von ZEILER (2014) eine bessere Anpassung der Messwerte im Frühjahr und Herbst (Bild 8).

Im Rahmen dieser Forschung wurden neben dem Ansatz nach Zeiler weitere Gleichungen zur Berechnung der Globalstrahlung aus der Clear-Sky-Strahlung, der Sonnenscheindauer und der maximalen Temperatur herangezogen und auf ihre Eignung geprüft. Die beste Anpassung der berechneten Werte der Nettostrahlung an die Messdaten des Flughafen Münchens wurde mit der Gleichung 16 erzielt (Bild 8). Diese wurde nachfolgend angesetzt, um die Nettostrahlung für den Zeitraum der vorgesehenen Berechnungen aus den vorhandenen Klimadaten abzuleiten.

$$R_s = c \cdot R_{s0} \cdot a^{b^{t_{\text{Sonne}}}} + d \quad [\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d}] \quad (\text{Gl. 16})$$

wobei

a, b, c, d Anpassungsparameter [-]

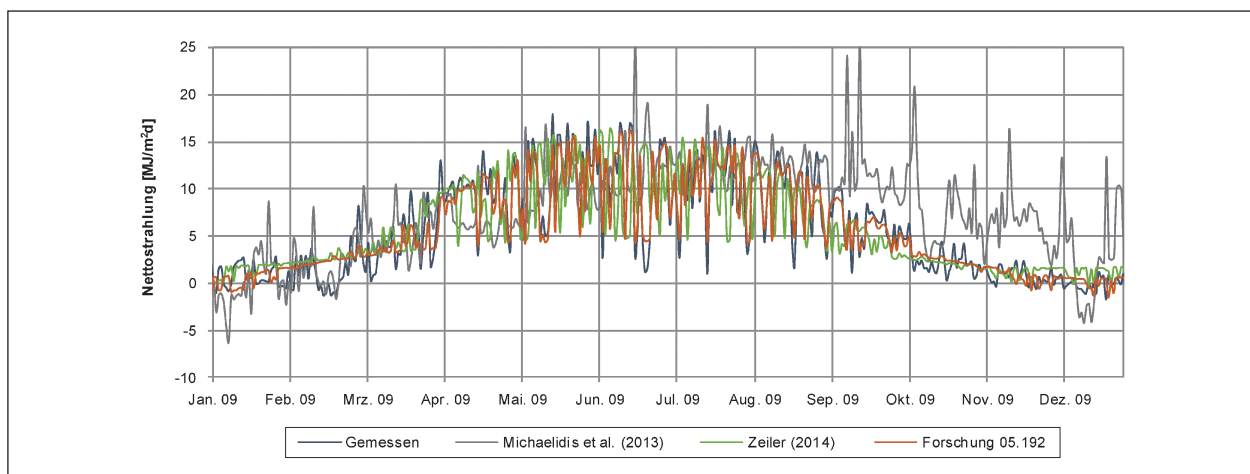


Bild 8: Vergleich der berechneten Nettostrahlung mit den gemessenen Werten für den Flughafen München



Die Werte der Anpassungsparameter für den Flughafen München sind in Gleichung 17 enthalten:

$$R_s = 0,898 \cdot R_{so} \cdot 0,078^{0,796 t_{\text{Sonne}}} + 2,539 \quad (\text{Gl. 17})$$

- **Fahrbahnabfluss**

Ein Oberflächenabfluss kann mit VADOSE/W nur bedingt abgebildet werden. Das Programm berechnet in Abhängigkeit von den zustandsabhängigen Eigenschaften der Dammoberfläche und den klimatischen Bedingungen, ob es zu einem Oberflächenabfluss kommt oder nicht. Sofern es rechnerisch zu einem Oberflächenabfluss kommt, da der auf die Oberfläche auftretende Niederschlag nicht vollständig versickern kann, wird die entsprechende Wassermenge vom Programm direkt entnommen und als Oberflächenabfluss bei der Auswertung gekennzeichnet. Ein Abfließen des Oberflächenabflusses auf der Böschungsoberfläche kann nicht abgebildet werden. Auf die Abbildung der gebundenen Deckschichten kann deshalb verzichtet werden und es wird der auf die Fahrbahn auftreffende Niederschlag direkt als zusätzlicher Niederschlag im Bereich des Bankettes und des Oberbodens abgebildet. Dabei ist zu beachten, dass es auch im Bereich der Fahrbahn zu einer Verdunstung kommt und in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität und -dauer nur ein Teil des Niederschlages als Straßenabfluss das Bankett erreicht. Zur Ermittlung des Fahrbahnabflusses, der in Form eines zusätzlichen Niederschlages im Bereich des Bankettes und des Oberbodens berücksichtigt wird, werden die von BÜRGER et al. (2008) angegebenen Abflusskurven herangezogen (Bild 9). Da ein Teil des Straßenabflusses von der Fahrbahn als Spritzwasser direkt den Oberboden erreicht, wurde sowohl im Bereich des Bankettes als auch im Bereich des Oberbodens

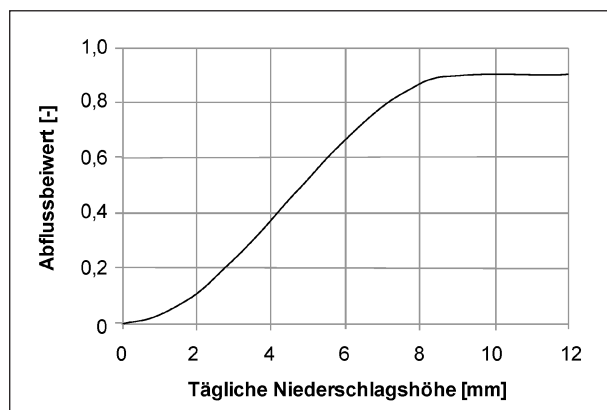


Bild 9: Niederschlags-Abflusskurve für Tagesniederschläge auf einer versiegelten Fläche (BÜRGER et al., 2008)

ein zusätzlicher Niederschlag infolge des Straßenabflusses berücksichtigt. Die Aufteilung des Straßenabflusses auf Bankett und Oberboden für die durchzuführenden Berechnungen wurde im Rahmen von Voruntersuchungen festgelegt (siehe Kapitel 4.3.1).

- **Vegetationsparameter**

Für die Berücksichtigung der Transpiration sind der Blattflächenindex (LAI), das Wasseraufnahmevermögen (PML) und die Wurzeltiefe zu definieren.

Der Blattflächenindex LAI bestimmt das Verhältnis und der Bodenfläche und steuert die Aufteilung der Sonnenstrahlung auf die Bodenfläche (Evaporation) und die Vegetationsschicht (Transpiration). Für den jährlichen Verlauf wird die in Bild 10 dargestellte Blattflächenindexfunktion, die für einen guten Graswuchs gilt, angesetzt.

Die PML-Funktion beschreibt das Verhältnis von tatsächlicher zu potenzieller Transpiration. Die für die Berechnungen verwendete Funktion ist in Bild 11 dargestellt. Solange die Saugspannungen im Boden die Feldkapazität (6 kPa nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung – Ad-Hoc-AG Boden, 2005) nicht überschreiten, entspricht die tatsächliche Transpiration der potenziellen Transpiration. Ab der Feldkapazität nimmt der PML-Wert linear bis auf null bei einer Saugspannung von 1.500 kPa ab. Es wird davon ausgegangen, dass die Pflanzen bei 1.500 kPa den permanenten Welkepunkt erreichen und kein Wasser aus dem Boden mehr aufgenommen werden kann.

Als Wurzeltiefe soll ein Wert von 18 cm konstant über die ganze Berechnungsdauer berücksichtigt werden.

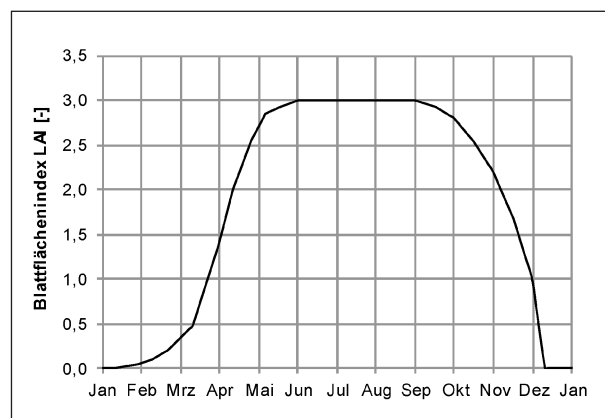


Bild 10: Blattflächenindexfunktion (VADOSE/W, 2014)

### 4.1.3 Anfangsbedingungen

Wie bei den im Rahmen des Forschungsvorhabens 84.105 durchgeführten Berechnungen (MICHAELIDES et al., 2013) wurde als Anfangsbedingung eine hydrostatische Potenzialverteilung im Straßendamm angesetzt, die sich bei dem vorgegebenen Grundwasserspiegel einstellen würde, sofern keine Verdunstung und Infiltration in den Straßendamm auftreten.

### 4.1.4 Bodenkennwerte

#### Hydraulische Eigenschaften

Die hydraulischen Kennwerte des Bankettmaterials, des Oberbodens und der Frostschuttschicht sollen in allen durchführenden Berechnungen gleich angesetzt werden. Eine Übersicht der verwendeten Böden ist in Tabelle 1 dargestellt. Für die Kennwerte des Bankettmaterials und der Frostschuttschicht wurde im Gegensatz zu den im Rahmen des Forschungsvorhabens FE 84.105 angesetzten Kennwerten, die aus der bodenkundlichen Kartieranleitung abgeleitet wurden, auf Messdaten von SCHARNAGL und DURNER zurückgegriffen. Diese werden im Vergleich zu den aus der bodenkundlichen Kartieranleitung entnommenen Werten als zutreffender betrachtet, da die Versuche von SCHARNAGL und DURNER an Bodenmaterial unter Berücksichtigung typischer erdbautechnischer Verdichtungsgrade ermittelt wurden. Für das Bankettmaterial wurde der von SCHARNAGL und DURNER untersuchte Boden „BM5“ herangezogen. Bei diesem handelt es sich um einen stark schluffigen Kies (GU\* nach DIN 18196, Feinkornanteil ca. 20 %) mit einem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert von  $7,5 \cdot 10^{-6}$  m/s. Für die Frostschuttschicht wurde der von SCHARNAGL und DURNER untersuchte Boden „BM1“, bei dem es sich um einen stark sandigen Kies (GW nach DIN 18196) mit einer gesättigten Durchlässigkeit von  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s handelt, herangezogen. Da die Oberbodenschicht nicht verdichtet wird, wurden für

	Klassifizierung nach DIN 18196	$k_{\text{sat}}$ [m/s]
Oberboden	SU/SU*	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Bankett	GU*	$7,5 \cdot 10^{-6}$
Frostschuttschicht	GW	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Dränschicht	(GU)	$5,0 \cdot 10^{-3}$

Tab. 1: Übersicht über die verwendeten Materialien für Oberboden, Bankett, Frostschuttschicht und Dränschicht

den Oberboden die auch im Rahmen des Forschungsvorhabens FE 84.105 verwendeten Werte nach HENNINGS (2000) für einen schluffigen Sand (Su2), die aus der bodenkundlichen Kartieranleitung stammen und für nicht verdichtete Böden in natürlicher Lagerung als repräsentativ angesehen werden können, verwendet. Die gesättigte Durchlässigkeit des Oberbodens wurde mit  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s abgeschätzt. Die hydraulischen Eigenschaften des Oberbodens wurden mithilfe des Modells nach van Genuchten-Mualem beschrieben (Tabelle 2). Die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen und die Leitfähigkeitsfunktionen für Oberboden, Bankett und Frostschuttschicht sind in Bild 12 und Bild 13 dargestellt.

Die hydraulischen Kennwerte für die Dränschicht wurden entsprechend den Ergebnissen, die im Rahmen des Forschungsvorhabens 05.185 „Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST“ (MELSBACH et al., 2018) durch Nachrechnung der Ergebnisse der Hallenlysimeter ermittelt wurden, angesetzt. Dabei handelt es sich um eine Modifikation der von EKBLAD und ISACSSON (2007) an einem schwach schluffigen Kies (GU

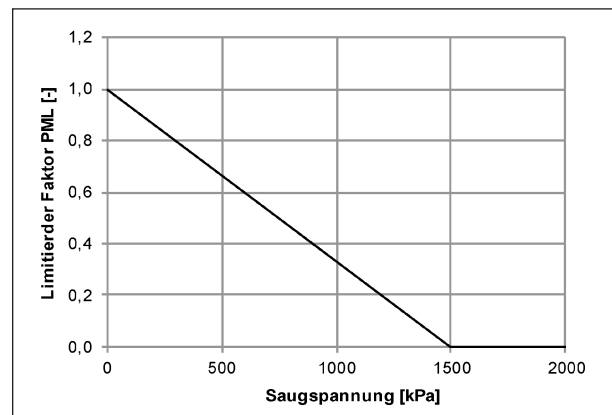


Bild 11: Verhältnis der tatsächlichen Evapotranspiration zur potenziellen Evapotranspiration in Abhängigkeit von der Saugspannung

	Oberboden SU/SU*	Dränschicht	Kernmaterial OT
$k_{\text{sat}}$ [m/s]	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-8}$
$\theta_{\text{sat}}$ [-]	0,38	0,23	0,65
$\theta_{\text{res}}$ [-]	0,02	0,01	0,00
A [ $\text{m}^{-1}$ ]	6,80	5,00	0,14
n [-]	1,43	1,79	1,30
m [-]	0,30	0,44	0,23

Tab. 2: van Genuchten-Parameter für den Oberboden, die Dränschicht und den organischen Ton (OT)

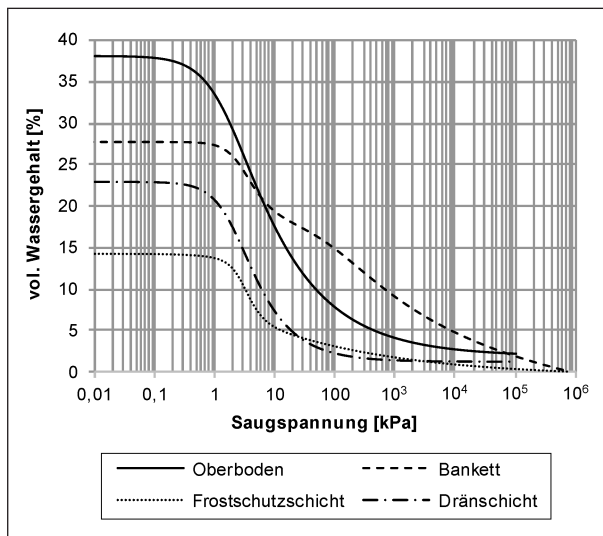


Bild 12: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen von Oberboden, Bankett, Frostschuttschicht und Dränschicht

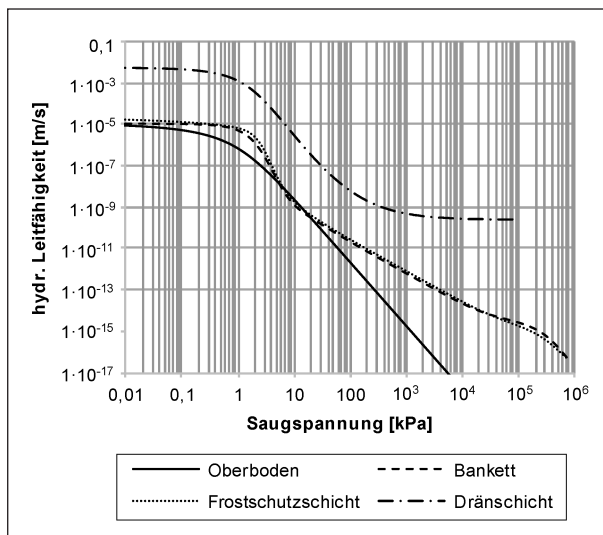


Bild 13: Hydraulische Leitfähigkeitsfunktionen von Oberboden, Bankett, Frostschuttschicht und Dränschicht

nach DIN 18196) ermittelten Bodenkennwerte (Tabelle 2). Der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert beträgt  $5 \cdot 10^{-3}$  m/s. Die entsprechende Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung und die Leitfähigkeitsfunktion sind ebenfalls in Bild 12 und Bild 13 dargestellt.

Für den Kern wurden die folgenden Materialien von SCHARNAGL und DURNER betrachtet (Tabelle 3):

- Boden „BM1“: stark sandiger Kies (GW nach DIN 18196) mit einem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  von  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s.
- Boden „BM2“: ein von SCHARNAGL und DURNER als stark sandiger Schluff bezeichnete

	Material im Kern	Klassifizierung nach DIN 18196	$k_{\text{sat}}$ [m/s]
Modell 1	Boden (BM1)	GW	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Modell 2	Boden (BM2)	GU*	$6,6 \cdot 10^{-8}$
Modell 3	RC-Mix (RC2)	SU	$1,8 \cdot 10^{-6}$
Modell 4	RC-Baustoff (RC5)	GU	$1,2 \cdot 10^{-6}$
Modell 5	HMVA (HMVA1)	GU	$6,4 \cdot 10^{-5}$
Modell 6	HMVA (HMVA3)	GW	$6,3 \cdot 10^{-8}$
Modell 7	SWS	GU	$1,2 \cdot 10^{-6}$
Modell 8	Organischer Boden	OT	$1,0 \cdot 10^{-8}$

Tab. 3: Übersicht über die Materialien im Dammkern

ter Boden, bei dem es sich nach DIN 18196 aber um einen stark schluffigen Kies (GU\*) handelt. Der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  beträgt  $6,6 \cdot 10^{-8}$  m/s.

- RC-Baustoff „RC2“: ein von SCHARNAGL und DURNER als „Praxisgemisch“ bezeichneter Baustoff, bei dem es sich um einen RC-Mix handeln dürfte. Der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  beträgt  $1,8 \cdot 10^{-6}$  m/s.
- RC-Baustoff „RC5“: schluffiger Kies (GU nach DIN 18196) mit einem gesättigten  $k$ -Wert von  $1,2 \cdot 10^{-6}$  m/s.
- Hausmüllverbrennungssasche „HMVA1“: GW nach DIN 18196 mit einem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  von  $6,4 \cdot 10^{-5}$  m/s.
- Hausmüllverbrennungssasche „HMVA3“: GU nach DIN 18196 mit einem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  von  $6,3 \cdot 10^{-8}$  m/s.
- Stahlwerksschlacke „SWS“: GU nach DIN 18196 mit einem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  von  $1,2 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Zusätzlich wurde eine Berechnung mit dem im Forschungsvorhaben FE 84.105 betrachteten organischen Ton (OT nach DIN 18196) mit einer gesättigten Durchlässigkeit von  $1,0 \cdot 10^{-8}$  m/s durchgeführt. Dieses Material sowie der Boden BM 2 und die Hausmüllverbrennungssasche HMVA 3 erfüllen die Anforderung an Böden bzw. Baustoffe mit umweltrelevanten Inhaltstoffen bei der Bauweise E von  $k \leq 1 \cdot 10^{-7}$  m/s gemäß dem Merkblatt MTSE (Ausgabe, 2009). Die übrigen Baustoffe weisen einen größeren gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert auf. Das aktuelle Merkblatt MTSE (Ausgabe 2017) fordert für die Bauweise E einen Durchlässigkeitsbeiwert  $k \leq 1 \cdot 10^{-8}$  m/s, was nur vom organischen Ton erfüllt wird.



Die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen und die hydraulischen Leitfähigkeitsfunktionen für die unterschiedlichen Kernmaterialien sind in Bild 14 und Bild 15 dargestellt. Die hydraulischen Eigenschaften des organischen Tons wurden mithilfe des Modells nach van Genuchten-Mualem beschrieben (Tabelle 2). Für die übrigen Materialien wurden die von SCHARNAGL und DURNER ermittelten Zusammenhänge angesetzt.

Bei der Abbildung der experimentellen Daten mit einem flexiblen Modell für die SWRC und die hydrau-

lische Leitfähigkeit wurde von SCHARNAGL und DURNER der Makroporenbereich (Bereich nahe vollständiger Sättigung) ausgespart. Für die durchzuführenden Berechnungen mussten deshalb die von SCHARNAGL und DURNER vorgestellten Funktionen im Bereich nahe der Vollsättigung erweitert werden. Die entsprechend modifizierten Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen und ihre hydraulischen Leitfähigkeitsfunktionen sind in Bild 16 und Bild 17 dargestellt. Um die Entstehung von unrealistisch niedrigen Durchlässigkeiten zu vermeiden, wurden alle hydraulische Leitfähigkeits-

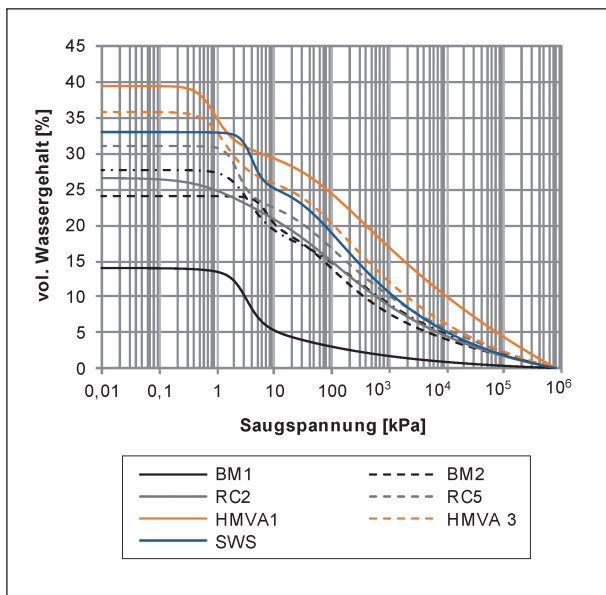


Bild 14: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen der unterschiedlichen Kernmaterialien gemäß SCHARNAGL und DURNER

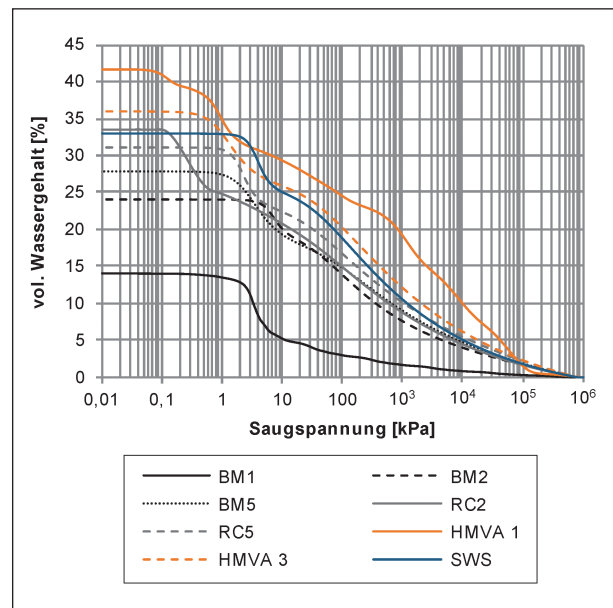


Bild 16: Für die Modellierung verwendete Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen

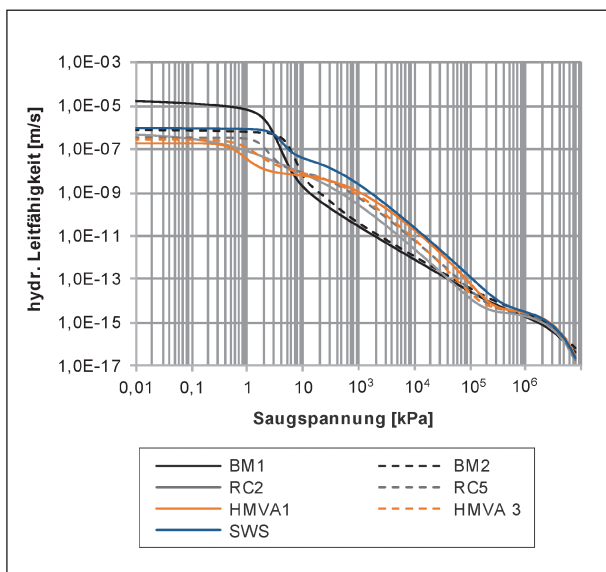


Bild 15: Hydraulische Leitfähigkeitsfunktionen der unterschiedlichen Kernmaterialien gemäß SCHARNAGL und DURNER

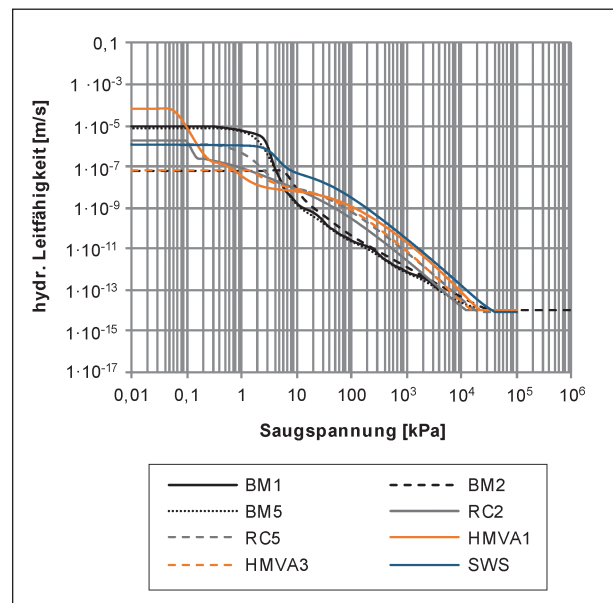


Bild 17: Für die Modellierung verwendete hydraulische Leitfähigkeitsfunktionen

funktionen im trockenen Bereich, d. h. bei hohen Saugspannungen, auf einen minimalen  $k$ -Wert von  $1 \cdot 10^{-14}$  m/s begrenzt.

### Thermische Eigenschaften

Zur Beschreibung des Wärmetransportes sind für alle Materialien die Wärmeleitfähigkeitsfunktionen sowie die Wärmekapazitätsfunktionen festzulegen. Die in den Berechnungen verwendeten thermischen Eigenschaften der unterschiedlichen Materialien sind in Tabelle 4 dargestellt.

Zur Beschreibung der Wärmeleitfähigkeitsfunktion im Programm ist die Angabe der Wärmeleitfähigkeit der Mineralstoffe  $\lambda_{\text{solids}}$  erforderlich. Für die betrachteten Böden wurde die Wärmeleitfähigkeit der Mi-

neralstoffe nach JOHANSEN (1975) berechnet. Dazu wurden Werte der Wärmeleitfähigkeit bei Sättigung und in trockenem Zustand der Richtlinie VDI 4640 – Teil 1 entnommen. Für die Sekundärbaustoffe wurden die erforderlichen Werte der Wärmeleitfähigkeit der Mineralstoffe  $\lambda_{\text{solids}}$  unterschiedlich berechnet (siehe Tabelle 4).

Für die Wärmekapazität wurde eine lineare Abhängigkeit vom Sättigungsgrad vorausgesetzt, weshalb für jedes Material die entsprechenden Werte bei trockenem  $c_{\text{dry}}$  bzw. gesättigtem  $c_{\text{sat}}$  Zustand vorgegeben wurden. Für die verwendeten Böden wurden die Werte der Richtlinie VDI 4640 – Teil 1 entnommen. Für die übrigen Baustoffe wurden die Werte nach JOHNSTON et al. (1981) berechnet (siehe Tabelle 4).

	$\lambda_{\text{solids}}$ [KJ/d · m · °C]	$\lambda_{\text{dry}}$ [KJ/d · m · °C]	$c_{\text{dry}}$ [KJ/m <sup>3</sup> · °C]	$c_{\text{sat}}$ [KJ/m <sup>3</sup> · °C]
Oberboden (SU/SU*)	394,8 <sup>(1)</sup>	38,9 <sup>(2)</sup>	1.500 <sup>(2)</sup>	2.100 <sup>(2)</sup>
BM1 (GW)	186,6 <sup>(1)</sup>	34,6 <sup>(2)</sup>	1.450 <sup>(2)</sup>	2.400 <sup>(2)</sup>
BM2 (GU*)	250,6 <sup>(1)</sup>	38,9 <sup>(2)</sup>	1.500 <sup>(2)</sup>	2.400 <sup>(2)</sup>
BM5 (GU*)	250,6 <sup>(1)</sup>	38,9 <sup>(2)</sup>	1.500 <sup>(2)</sup>	2.400 <sup>(2)</sup>
RC2 (SU)	134,9 <sup>(3)</sup>	35,3 <sup>(4)</sup>	1.505 <sup>(5)</sup>	2.908 <sup>(5)</sup>
RC5 (GU)	151,2 <sup>(6)</sup>	29,6 <sup>(4)</sup>	1.575 <sup>(5)</sup>	2.873 <sup>(5)</sup>
HMVA1 (GW)	198,7 <sup>(7)</sup>	20,2 <sup>(4)</sup>	1.610 <sup>(5)</sup>	3.410 <sup>(5)</sup>
HMVA3 (GU)	198,7 <sup>(7)</sup>	24,5 <sup>(4)</sup>	1.730 <sup>(5)</sup>	3.312 <sup>(5)</sup>
SWS (GU)	86,4 <sup>(8)</sup>	27,4 <sup>(4)</sup>	1.470 <sup>(5)</sup>	2.880 <sup>(5)</sup>
OT	1.234 <sup>(1)</sup>	43,2 <sup>(2)</sup>	898 <sup>(9)</sup>	3.618 <sup>(9)</sup>

(1) Nach JOHANSEN (1975) auf Basis der gesättigten Wärmeleitfähigkeit nach der Richtlinie VDI 4640 – Teil 1 und der Porosität des Bodens:

$$\lambda_{\text{sat}} = \lambda_{\text{w}}^n \cdot \lambda_{\text{solids}}^{(1-n)}$$

mit  $\lambda_{\text{sat}}$  gesättigte Wärmeleitfähigkeit  
 $\lambda_{\text{w}}$  Wärmeleitfähigkeit vom Wasser (0,59 W/m · °C)  
 $n$  Porosität [-]

(2) Nach VDI 4640 – Teil 1

(3) Berechnet auf Basis der stofflichen Zusammensetzung. Die Werte für die unterschiedlichen Teile wurden der Richtlinie VDI 4640 – Teil 1 und der Engineering Toolbox entnommen.

(4) Berechnet von VADOSE/W nach JOHANSEN (1975)

(5) Nach JOHNSTON et al. (1981):

$$c_{\text{dry}} = \gamma_d \cdot c_{\text{solids}}$$

$$c_{\text{sat}} = \gamma_d \cdot (c_{\text{solids}} + c_w \cdot w_{\text{sat}})$$

mit  $\gamma_d$  Trockendichte  
 $c_s$  volumetrische Wärmekapazität der Mineralstoffe  
 $c_w$  volumetrische Wärmekapazität des Wassers  
 $w_{\text{sat}}$  Wassergehalt bei Sättigung

Für RC2 wurde die Wärmekapazität der Mineralstoffe nach der stofflichen Zusammensetzung berechnet.

Für RC5 wurde für die Wärmekapazität der Mineralstoffe die vom Beton angesetzt. Die Werte für die unterschiedlichen Stoffe wurden der Richtlinie VDI 4640 – Teil 1 und der Engineering Toolbox entnommen.

Für die HMVA wurde der Wert für Mergelstein (1 KJ/kg · °C) benutzt.

Für die SWS wurde der von DEMOND et al. (2016) angegebene Wert verwendet.

(6) Wärmeleitfähigkeit vom Beton nach der Richtlinie VDI 4640 – Teil 1

(7) Parameter von Mergelstein nach der Richtlinie VDI 4640 – Teil 1

(8) Wert von DEMOND et al. (2016)

(9) Berechnet von VADOSE/W nach de Vries für  $c_{\text{solids}} = 0,95$  KJ/kg · °C

Tab. 4: Thermische Eigenschaften der unterschiedlichen Materialien

## 4.2 Übersicht über die durchgeführten Berechnungen

Die durchgeführten Berechnungen sind in Tabelle 5 aufgelistet. Darin nicht enthalten sind zusätzliche Berechnungen zum Einfluss des Bankettmaterials auf den Wasserhaushalt (siehe Kapitel 5).

## 4.3 Berechnungsergebnisse

### 4.3.1 Voruntersuchungen

#### Untersuchungen zur hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion des Oberbodens

Für den Oberboden wurden in den Berechnungen wie in Kapitel 4.1.4 beschrieben die Bodenkennwerte für einen schluffigen Sand entsprechend den Angaben in der bodenkundlichen Kartieranleitung angesetzt. Die Werte basieren auf dem Modell nach van Genuchten, welches für die hydraulische Leitfähigkeit eine lineare Abnahme mit zunehmender Saugspannung im doppellogarithmischen Maßstab ergibt. Dadurch stellen sich rechnerisch in trockenen Phase jedoch sehr niedrige Durchlässigkeiten

des Oberbodens ein, die zu unrealistisch hohen Oberflächenabflüssen und daneben zu numerischen Problemen führen können. Um dies zu verhindern, sollte nach Rücksprache mit dem Programm der Fa. Geoslope die hydraulische Leitfähigkeitsfunktion des Oberbodens auf einen minimalen k-Wert begrenzt werden. Überschreiten die Saugspannungen den zugehörigen Grenzwert, wird die hydraulische Leitfähigkeit als konstant bei diesem minimalen Wert angenommen. Zur Festlegung der Größe des minimalen k-Wertes wurden Voruntersuchungen durchgeführt. Dazu wurde in vier Simulationsberechnungen untersucht, wie sich unterschiedlich große minimale k-Werte auf den Wasserhaushalt des Straßendamms auswirken. Die Berechnungen wurden für das Modell 2.1 für einen Zeitraum von 365 Tagen durchgeführt, wobei die Leitfähigkeitsfunktion bei  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s,  $1 \cdot 10^{-10}$  m/s,  $1,8 \cdot 10^{-11}$  m/s (50 kPa) bzw.  $6,3 \cdot 10^{-12}$  m/s (70 kPa) gekappt wurde. Der Straßenabfluss wurde bei diesen Berechnungen gleichmäßig als zusätzliche Niederschlag auf Bankett und Oberboden verteilt. Die Ergebnisse sind in Bild 18 zu sehen.

Der Wasserhaushalt an der Dammoberfläche wird stark von der minimalen Leitfähigkeit des Oberbo-

Modell-geometrie	Modell	Oberboden	Dränschicht	Bankett	Frostschutzschicht	Kern
Grundmodell 1	Modell 1.1	SU <sup>(1)</sup>	GU <sup>(4)</sup>	BM5 <sup>(2)</sup>	BM1 <sup>(2)</sup>	BM1 <sup>(2)</sup>
	Modell 1.2					BM2 <sup>(2)</sup>
	Modell 1.3					RC2 <sup>(2)</sup>
	Modell 1.4					RC5 <sup>(2)</sup>
	Modell 1.5					HMVA1 <sup>(2)</sup>
	Modell 1.6					HMVA3 <sup>(2)</sup>
	Modell 1.7					SWS <sup>(2)</sup>
	Modell 1.8					OT <sup>(3)</sup>
Grundmodell 2	Modell 2.1	SU <sup>(1)</sup>	-	BM5 <sup>(2)</sup>	BM1 <sup>(2)</sup>	BM1 <sup>(2)</sup>
	Modell 2.2					BM2 <sup>(2)</sup>
	Modell 2.3					RC2 <sup>(2)</sup>
	Modell 2.4					RC5 <sup>(2)</sup>
	Modell 2.5					HMVA1 <sup>(2)</sup>
	Modell 2.6					HMVA3 <sup>(2)</sup>
	Modell 2.7					SWS <sup>(2)</sup>
	Modell 2.8					OT <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Bodenkennwerte nach HENNINGS (2000)

<sup>(2)</sup> Bodenkennwerte nach SCHARNAGL und DURNER (2014)

<sup>(3)</sup> Bodenkennwerte nach Zentrum Geotechnik der TUM (2008)

<sup>(4)</sup> Bodenkennwerte nach EKBLAD und ISACSSON (2007), modifiziert

Tab. 5: Übersicht über die durchgeführten Berechnungen

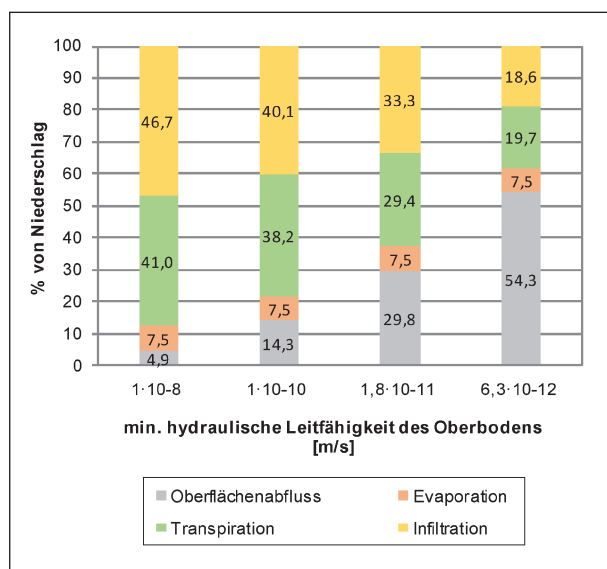


Bild 18: Berechnungsergebnisse der an der Oberfläche stattfindenden Prozesse für unterschiedliche minimale Durchlässigkeiten des Oberbodens

dens beeinflusst. Der Oberflächenabfluss variiert zwischen 4,9 % und 54,3 % und die Infiltration zwischen 46,7 % und 18,6 % für eine Kappung bei  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s bzw.  $6,3 \cdot 10^{-12}$  m/s. Tendenziell führt eine Kappung bei relativ hohem k-Wert zu einem niedrigen Oberflächenabfluss, einer hohen Infiltration und folglich zu einer hohen Transpiration. Eine Reduzierung der minimalen hydraulischen Leitfähigkeit verursacht einen höheren Oberflächenabfluss und eine niedrigere Infiltration. Die Evaporation bleibt bei allen Berechnungen unbeeinflusst.

Für die Durchsickerung des Dammkerns ist der ungünstigste Zustand (d. h. die größte Durchsickerung) bei einer hohen Infiltration in den Oberboden zu erwarten. Für die durchzuführenden Berechnungen wurde deshalb auf der sicheren Seite liegend der entsprechende Fall herangezogen, der bei einer Kappung der hydraulischen Leitfähigkeit des Oberbodens bei einem Wert von  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s erreicht wurde.

### Straßenabfluss

Im Hinblick auf die Verteilung des Straßenabflusses auf das Bankett und den Oberboden wurden drei verschiedenen Aufteilungen untersucht. Als erstes wurde ähnlich wie beim Forschungsvorhaben 84.105 eine gleichmäßige Verteilung des Fahrbahnabflusses auf Bankett und Oberboden angenommen. Darüber hinaus wurden Berechnungen mit folgenden Ansätzen zur Verteilung des Straßenabflusses auf Bankett und Oberboden durchgeführt:

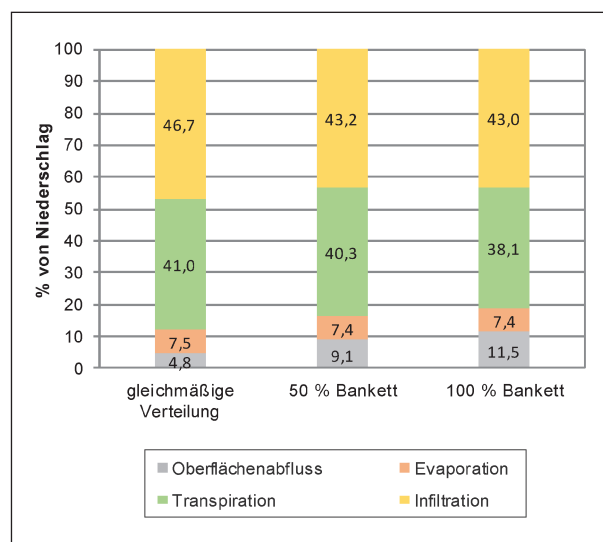


Bild 19: Vergleich der Ergebnisse für die unterschiedlichen Fahrbahnabflussverteilungen (Wasserbilanz)

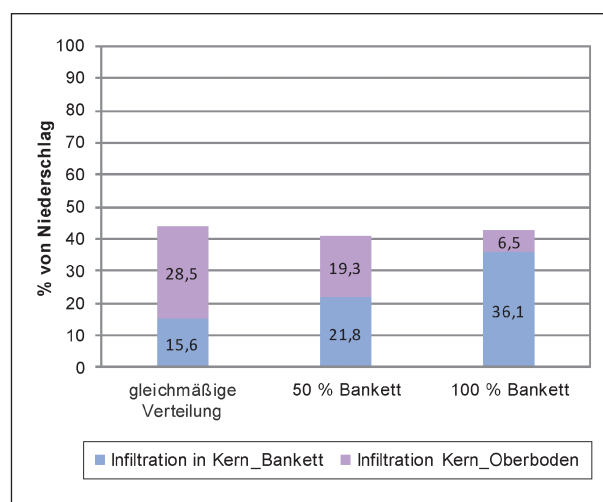


Bild 20: Vergleich der Ergebnisse für die unterschiedlichen Fahrbahnabflussverteilungen (Infiltration)

- 50 % des Straßenabflusses gleichmäßig auf das Bankett verteilt und 50 % gleichmäßig auf den Oberboden verteilt (50 % Bankett),
- 100 % des Straßenabflusses gleichmäßig auf das Bankett verteilt (100 % Bankett).

Der in der Realität auftretende Straßenabfluss wurde im Modell über eine entsprechende Erhöhung des im Bereich des Banketts und Oberbodens auftretenden Niederschlages abgebildet. Die Berechnungen wurden für Modell 2.1 für einen Zeitraum von 365 Tagen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 20 dargestellt.

Abhängig von der Fahrbahnabflussverteilung variiert der Oberflächenabfluss zwischen 4,8 % für die gleichmäßige Verteilung, 9,1 % für die 50%-Ban-

kett-Verteilung und 11,5 % für die 100%-Bankett-Verteilung. Die Infiltration beträgt dabei 46,7 %, 43,2 % bzw. 43,0 %. Es zeigt sich, dass die Verteilung des Straßenabflusses einen vergleichsweise geringen Einfluss auf den Wasserhaushalt hat. Unterschiede ergeben sich aber bezüglich der Bereiche, in denen das Wasser infiltriert. So ergibt sich für die 100%-Bankett-Verteilung eine größere Infiltration in den Kern im Bereich des Banketts verglichen zu den übrigen Berechnungen, bei denen eine verstärkte Infiltration in den Kern über den Oberboden zu verzeichnen ist (Bild 20). Für die durchzuführenden Berechnungen wurde die 50%-Bankett-Verteilung angesetzt.

### 4.3.2 Grundmodell 1

#### Allgemeines

In den nachfolgenden Abschnitten ist die Wasserbilanz für die einzelnen Modelle beschrieben. Der über die Randbedingung (Klimadaten von Oktober 1992 bis Dezember 2002) aufgebrachte Niederschlag betrug bei allen Modellen 7.160 mm. Die Unterschiede zwischen der effektiven Infiltration und der Summe der Abflüsse aus Oberboden, Kern und Dränschicht resultieren aus der Wasserspeicherung im jeweiligen Modell. Diese ist im Vergleich zu den genannten Abflüssen aber sehr gering und wurde deshalb bei der Darstellung der Ergebnisse in den nachfolgenden Abschnitten nicht abgebildet.

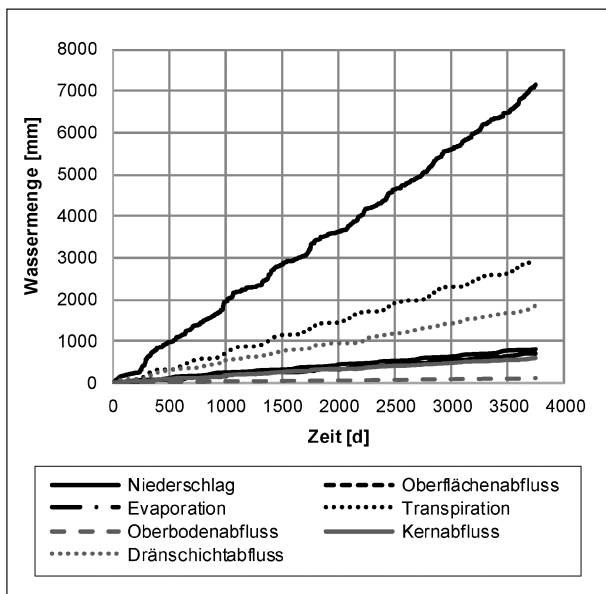


Bild 21: Wasserbilanz des Modells 1.1 (BM1 Bauweise E)

#### Modell 1.1 BM1

Das Bild 21 stellt die Wasserbilanz in Abhängigkeit von der Zeit für das Modell 1.1 dar. Von insgesamt 7.160 mm Niederschlag sind 701 mm (ca. 9,8 %) als Oberflächenabfluss abgelaufen, 804 mm (ca. 11,2 %) wurden durch Evaporation an die Atmosphäre abgegeben und 2.888 mm (40,3 %) wurden durch die Vegetation als Transpiration aufgenommen. Die effektive Infiltration, welche aus der Differenz zwischen dem Niederschlag und der Summe aus Oberflächenabfluss, Evaporation und Transpiration berechnet wurde, beträgt 2.767 mm, was ca. 38,6 % des Gesamtniederschlages entspricht.

Die Abflüsse aus dem Oberboden, dem Kern und der Dränschicht liegen bei 109 mm, 598 mm bzw. 1.856 mm, was 4,0 %, 21,6 % bzw. 67,1 % der effektiven Infiltration bedeuten. Bezogen auf den Gesamtniederschlag betragen die Abflüsse aus Oberboden, Kern und Dränschicht 1,5 %, 8,4 % bzw. 25,9 %.

#### Modell 1.2 BM2

In Bild 22 ist die Wasserbilanz für Modell 1.2 dargestellt. Der Oberflächenabfluss beträgt bei diesem Modell 683 mm (9,5 %), die Evaporation 804 mm (11,2 %) und die Transpiration 2.987 mm (41,7 %). Die effektive Infiltration mit 2.686 mm entspricht 37,5 % des gesamten Niederschlages.

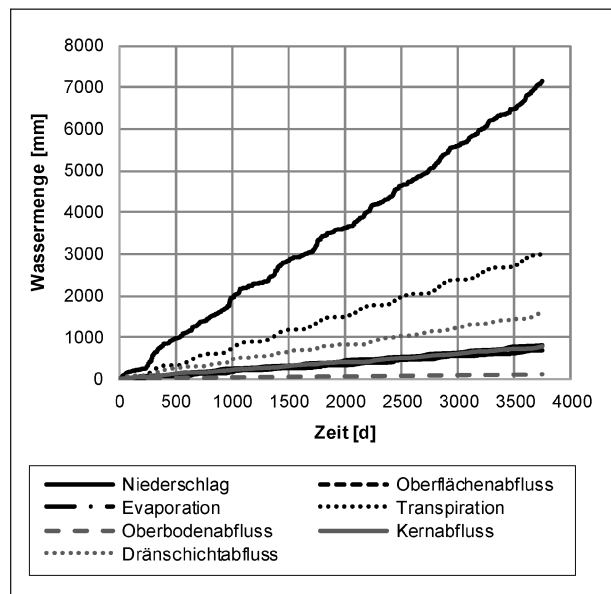


Bild 22: Wasserbilanz des Modells 1.2 (BM2 Bauweise E)

Die Abflüsse von Oberboden, Kern und Dränschicht liegen bei 108 mm, 776 mm bzw. 1.598 mm, was 4,0 %, 28,9 % bzw. 59,5 % der effektiven Infiltration entspricht. Bezogen auf den Gesamtniederschlag betragen die Abflüsse aus Oberboden, Kern und Dränschicht 1,5 %, 10,8 % und 22,3 %.

### Modell 1.3 RC2

Bild 23 stellt die Wasserbilanz in Abhängigkeit von der Zeit für das Modell 1.3 dar. Am Ende der Berechnungszeit beträgt der Oberflächenabfluss 703 mm (9,8 %). Durch die Evaporation und die Transpiration wurden 804 mm (11,2 %) bzw. 3.115 mm (43,5 %) aufgenommen. Die effektive Infiltration liegt bei 2.538 mm, was 35,4 % des Niederschlages entspricht.

Die Abflüsse aus dem Oberboden, dem Kern und der Dränschicht liegen bei 109 mm, 446 mm und 1.752 mm, was 4,3 %, 17,6 % und 69,1 % der effektiven Infiltration entspricht. Bezogen auf die gesamte Niederschlagsmenge betragen die Abflüsse 1,5 %, 6,2 % und 24,5 %.

### Modell 1.4 RC5

In Bild 24 ist die Wasserbilanz für das Modell 1.4 dargestellt. Von den 7.160 mm Niederschlag sind 715 mm (10,0 %) auf die Oberfläche abgelaufen, 804 mm (11,2 %) wurden durch Evaporation an die Atmosphäre abgegeben und 3.175 mm (44,3 %) wurden durch die Vegetation als Transpiration auf-

genommen. Die effektive Infiltration beträgt 2.466 mm (34,4 %).

Der Oberboden-, Kern- und Dränschichtabfluss liegen am Ende der Berechnungszeit 109 mm (1,5 %), 452 mm (6,3 %) bzw. 1.683 mm (23,5 %), was 4,4 %, 18,3 % bzw. 68,2 % der effektiven Infiltration entspricht.

### Modell 1.5 HMVA1

Bild 25 stellt die Wasserbilanz für das Modell 1.5 dar. Der Oberflächenabfluss beträgt am Ende der

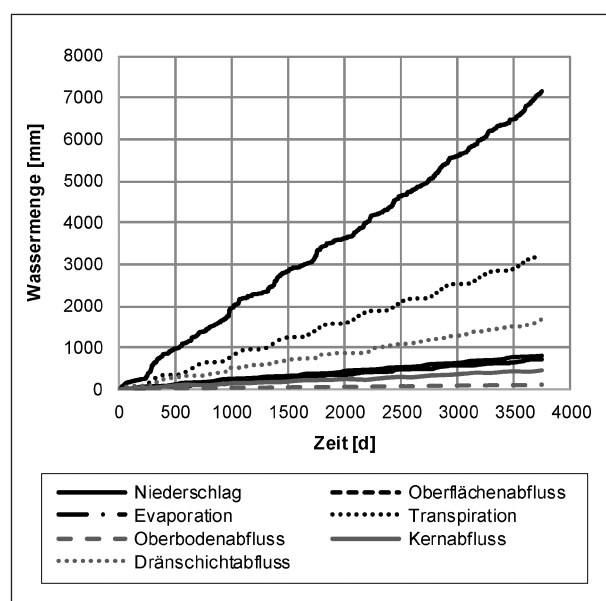


Bild 24: Wasserbilanz vom Modell 1.4 (RC5 Bauweise E)

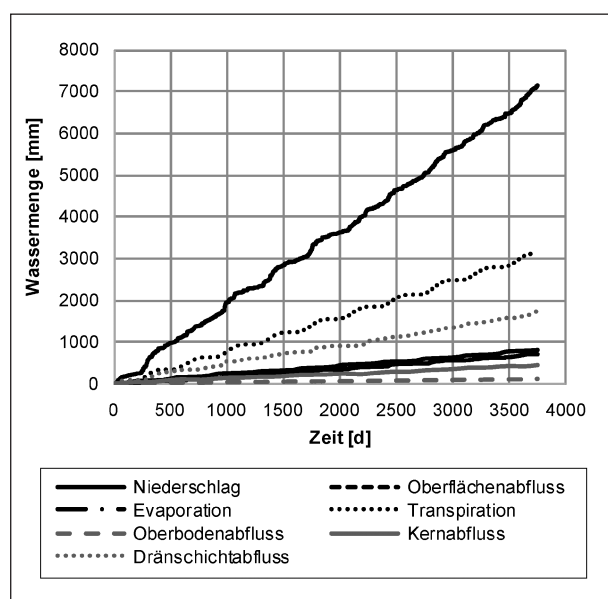


Bild 23: Wasserbilanz vom Modell 1.3 (RC2 Bauweise E)

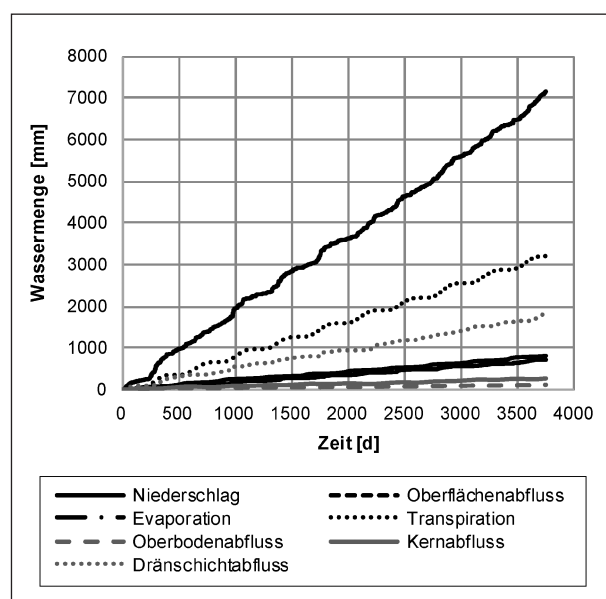


Bild 25: Wasserbilanz des Modells 1.5 (HMVA1 Bauweise E)



Berechnungszeit 708 mm (9,9 %). Durch die Evaporation wurden 804 mm (11,2 %) an die Atmosphäre angegeben und durch die Vegetation wurden 3.205 mm (44,8 %) aufgenommen. Die effektive Infiltration liegt bei diesem Modell bei 2.443 mm (34,1 %).

Die Abflüsse aus dem Oberboden, dem Kern und der Dränschicht betragen am Ende der zehn Jahre 109 mm (1,5 %), 260 mm (3,6 %) bzw. 1.836 mm (25,6 %), was 4,5 %, 10,6 % bzw. 75,2 % der effektiven Infiltration bedeutet.

**Modell 1.6 HMVA3**

In Bild 26 ist die Wasserbilanz für Modell 1.6 dargestellt. Am Ende der zehn Jahre sind 727 mm (10,2 %) auf die Oberfläche abgelaufen. Durch die Evaporation und die Transpiration sind 804 mm (11,2 %) bzw. 3.189 mm (44,5 %) aufgenommen. Die effektive Infiltration entspricht mit 2.440 mm 34,1 % der gesamten Niederschlagsmenge.

Der Oberboden-, Kern- und Dränschichtabfluss betragen 109 mm (1,5 %), 376 mm (5,3 %) und 1.732 mm (24,2 %), die 4,5 %, 15,4 % bzw. 71,0 % der effektiven Infiltration entsprechen.

**Modell 1.7 SWS**

Die Wasserbilanz für das Modell 1.7 ist in Bild 27 dargestellt. Von den 7.160 mm des Niederschlages sind 728 mm (10,2 %) auf die Oberfläche abgelaufen. Durch die Evaporation sind 550 mm (7,7 %) an die Atmosphäre angegeben und durch die Vegetati-

on wurden 3.316 mm (46,3 %) als Transpiration aufgenommen. Die effektive Infiltration entspricht mit 2.566 mm 35,8 % des gesamten Niederschlages.

Die Abflüsse aus dem Oberboden, dem Kern und der Dränschicht liegen am Ende der Berechnungszeit bei 106 mm (1,5 %), 1.491 mm (20,8 %) und 682 mm (9,5 %). Bezogen auf die effektive Infiltration entsprechen sie 4,1 %, 58,1 % bzw. 26,6 %.

**Modell 1.8 OT**

Bild 28 stellt die Wasserbilanz in Abhängigkeit von der Zeit für das Modell 1.8 dar. Von den insgesamt

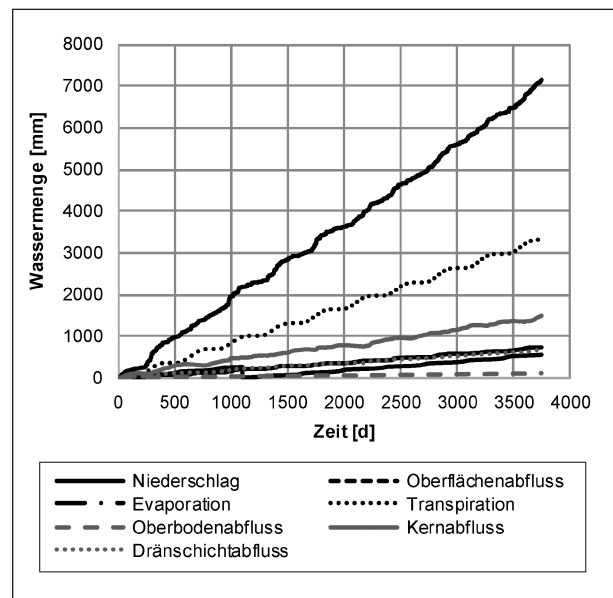


Bild 27: Wasserbilanz des Modells 1.7 (SWS Bauweise E)

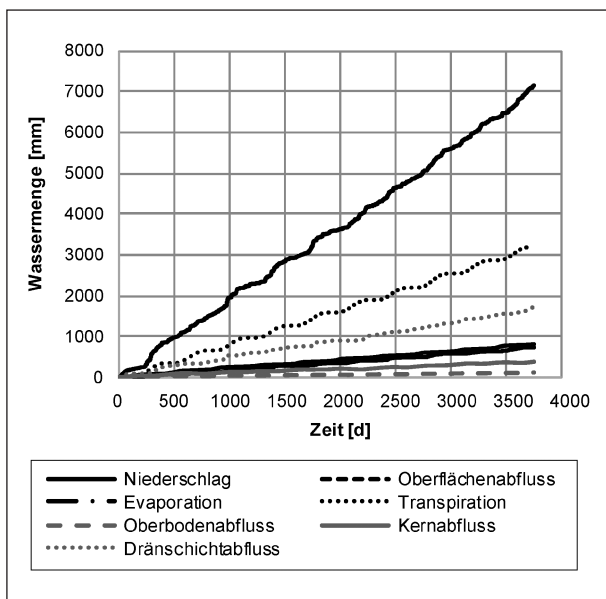


Bild 26: Wasserbilanz des Modells 1.6 (HMVA3 Bauweise E)

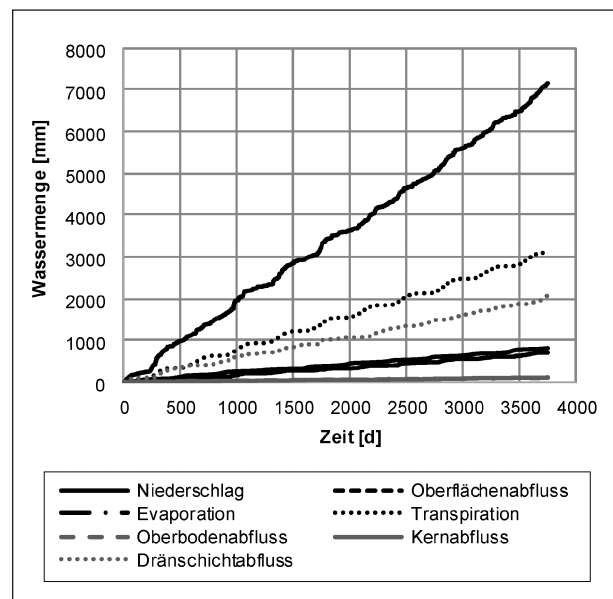


Bild 28: Wasserbilanz des Modells 1.8 (OT Bauweise E)

7.160 mm Niederschlag sind 696 mm (9,7 %) als Oberflächenabfluss abgelaufen, 804 mm (11,2 %) wurden durch die Evaporation und 3.093 mm (43,2 %) durch die Vegetation als Transpiration aufgenommen. Die effektive Infiltration beträgt 2.567 mm, was 35,9 % des gesamten Niederschlages entspricht.

Die Abflüsse aus Oberboden, Kern und Dränschicht liegen bei 109 mm (1,5 %), 100 mm (1,4 %) bzw. 2.068 mm (28,9 %), was 4,3 %, 3,9 % bzw. 80,6 % der effektiven Infiltration entsprechen.

### 4.3.3 Grundmodell 2

#### Allgemeines

Wie für das Grundmodell 1 wird in den nachfolgenden Abschnitten die Wasserbilanz für die einzelnen Modelle des Grundmodells 2 beschrieben. Der über die Randbedingung (Klimadaten von Oktober 1992 bis Dezember 2002) aufgebrachte Niederschlag betrug bei allen Modellen 7.160 mm. Die Unterschiede zwischen der effektiven Infiltration und der Summe der Abflüsse aus Oberboden, Kern und Dränschicht resultieren aus der Wasserspeicherung im jeweiligen Modell. Diese ist im Vergleich zu den genannten Abflüssen aber sehr gering und wurde deshalb bei der Darstellung der Ergebnisse in den nachfolgenden Abschnitten nicht abgebildet.

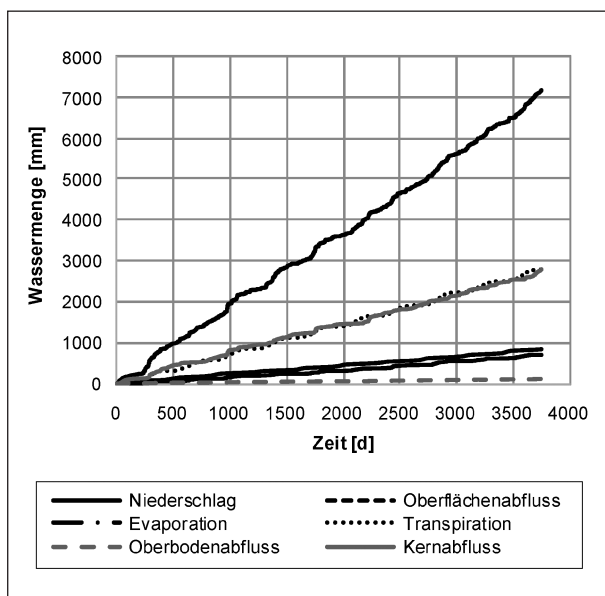


Bild 29: Wasserbilanz des Modells 2.1 (BM1 ohne TSM)

#### Modell 2.1 BM1

In Bild 29 ist die Wasserbilanz für das Modell 2.1 dargestellt. Der Oberflächenabfluss beträgt bei diesem Modell 701 mm (9,8 %), die Evaporation 837 mm (11,7 %) und die Transpiration 2.781,9 mm (38,9 %). Die effektive Infiltration mit 2.840 mm entspricht 39,7 % des Niederschlages.

Im Zeitraum von zehn Jahren fließen 111 mm aus dem Oberboden und 2.784 mm aus dem Kern ab, was ca. 3,9 % und 98,0 % der effektiven Infiltration bzw. 1,6 % und 38,9 % des Gesamtniederschlages entspricht.

#### Modell 2.2 BM2

Bild 30 stellt die Wasserbilanz in Abhängigkeit von der Zeit für das Modell 2.2 dar. Am Ende der Berechnungszeit beträgt der Oberflächenabfluss 731 mm (ca. 10,2 %). Durch die Evaporation und die Transpiration wurden 837 mm (ca. 11,7 %) bzw. 2.863 mm (ca. 40 %) aufgenommen. Die effektive Infiltration entspricht mit 2.729 mm 38,1 % des Niederschlages.

Die Abflüsse von Oberboden und Kern liegen bei 175 mm bzw. 2.555 mm, was ca. 6,4 % und 93,6 % der effektiven Infiltration (2.729 mm) bzw. 2,5 % und 35,7 % des Gesamtniederschlages entspricht.

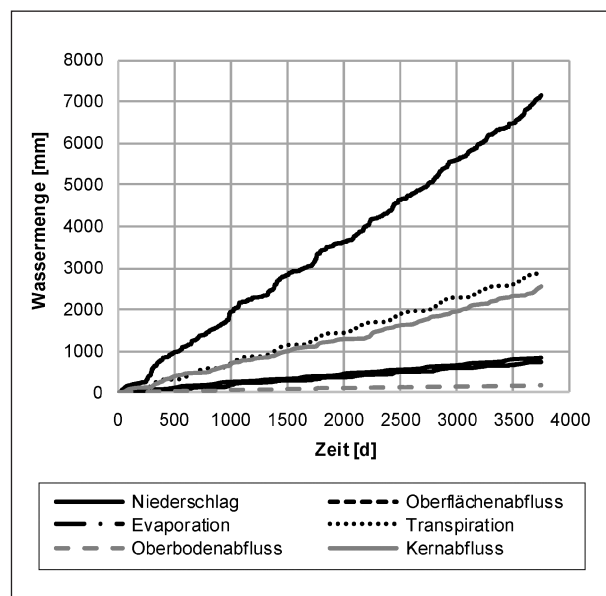


Bild 30: Wasserbilanz des Modells 2.2 (BM2 ohne TSM)



**Modell 2.3 RC2**

Die Wasserbilanz für das Modell 2.3 ist in Bild 31 dargestellt. Von insgesamt 7.160 mm des Niederschlages sind 702 mm (ca. 9,8 %) an der Oberfläche des Modells abgelaufen. Die Evaporation mit 837 mm entspricht ca. 11,7 % der Gesamtwasser- menge. 3.068 mm (ca. 42,8 %) wurden über Tran- spiration aufgenommen. Die effektive Infiltration be- trägt bei diesem Modell 2.552 mm (ca. 35,6 %).

Die akkumulierten Abflüsse von Oberboden und Kern am Ende der Berechnung liegen bei 164 mm bzw. 2.322 mm, was 6,4 % bzw. 91,0 % der effekti- ven Infiltration und 2,3 % bzw. 32,4 % des Gesam- niederschlages entspricht.

**Modell 2.4 RC5**

In Bild 32 ist die Wasserbilanz des Modells 2.3 ab- gebildet. Der Oberflächenabfluss, die Evaporation und die Transpiration entsprechen mit 693 mm, 837 mm bzw. 3.147 mm 9,7 %, 11,7 % bzw. 44,0 % des Niederschlages.

Der Oberboden- und der Kernabfluss betragen 5,4 % bzw. 95,0 % der effektiven Infiltration bzw. 1,9 % und 33,0 % des Gesamtniederschlages.

**Modell 2.5 HMVA1**

Das Bild 33 stellt die Wasserbilanz des Modells 2.5 dar. Von insgesamt 7.160 mm Niederschlag sind

702 mm (ca. 9,8 %) an der Oberfläche abgelaufen, 837 mm (ca. 11,7 %) wurden durch die Evaporation an die Atmosphäre abgegeben und 3.231 mm (ca. 45,1 %) wurden über Transpiration aufgenommen. Die effektive Infiltration entspricht dementspre- chend 33,4 % des Gesamtniederschlages.

Die Oberboden- und Kernabflüsse liegen am Ende der Berechnungszeit bei 260 mm bzw. 2.043 mm, was 10,9 % bzw. 85,5 % der effektiven Infiltration und 3,6 % bzw. 28,5 % des Gesamtniederschlages entspricht.

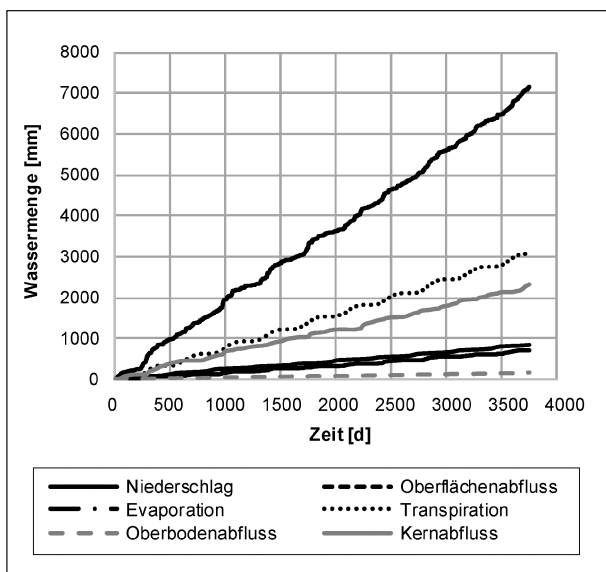


Bild 31: Wasserbilanz des Modells 2.3 (RC2 ohne TSM)

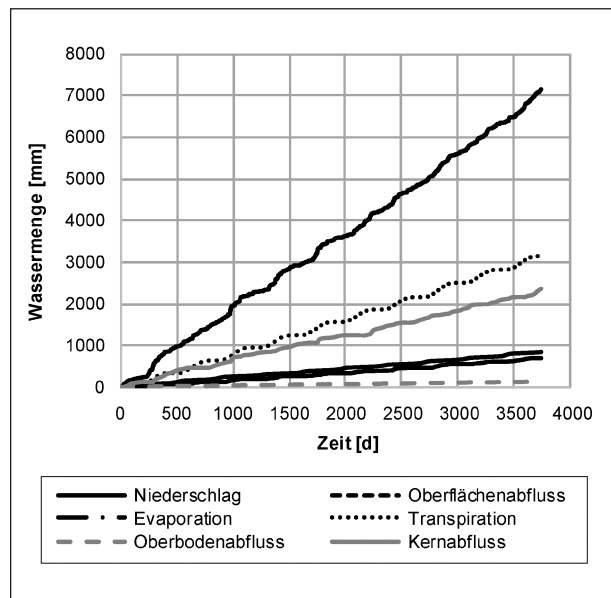


Bild 32: Wasserbilanz des Modells 2.4 (RC5 ohne TSM)

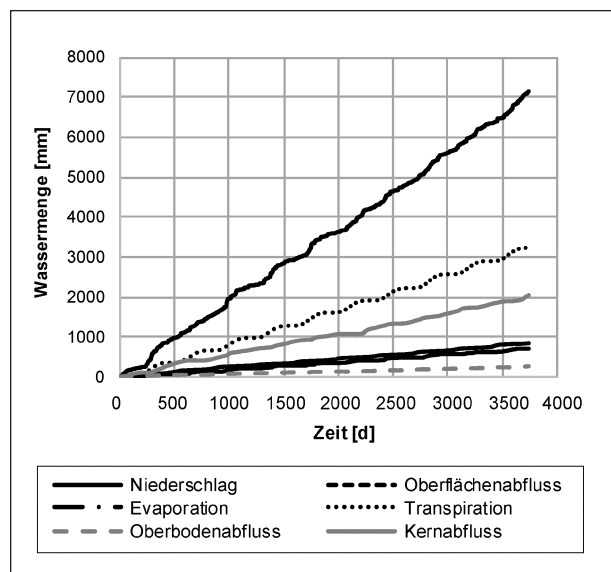


Bild 33: Wasserbilanz des Modells 2.5 (HMVA1 ohne TSM)

### Modell 2.6 HMVA 3

Das Bild 34 stellt die Wasserbilanz für das Modell 2.6 dar. Der Oberflächenabfluss, die Evaporation und die Transpiration betragen bei diesem Modell 740 mm (ca. 10,3 %), 837 mm (ca. 11,7 %) und 3.182 mm (ca. 44,4 %). Die effektive Infiltration mit 2.401 mm entspricht ca. 33,5 % des Niederschlages von Oktober 1992 bis Dezember 2002.

Der Oberboden- und der Kernabfluss am Ende der Berechnungszeit entsprechen mit 269 mm bzw. 2.128 mm ca. 11,2 % bzw. 88,6 % der effektiven Infiltration und 3,8 % bzw. 29,7 % des Gesamtniederschlages.

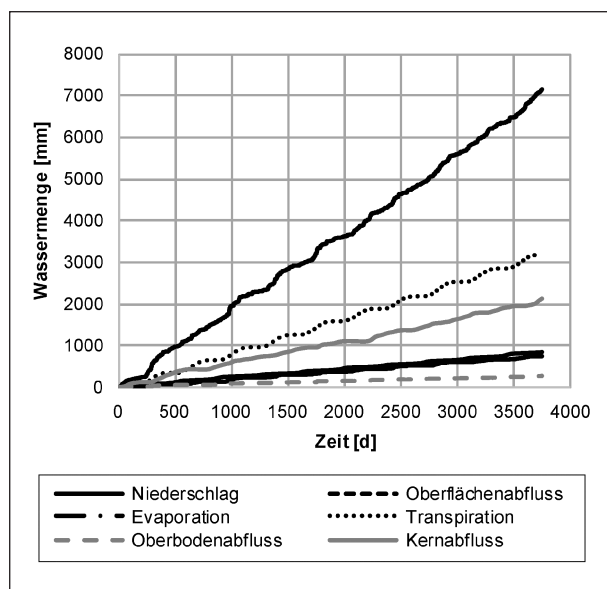


Bild 34: Wasserbilanz des Modells 2.6 (HMVA3 ohne TSM)

### Modell 2.7 SWS

In Bild 35 ist die Wasserbilanz des Modells 2.7 in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Ähnlich wie bei den vorherigen Modellen liegen der Oberflächenabfluss, die Evaporation und die Transpiration am Ende der Berechnung bei 746 mm (ca. 10,4 %), 837 mm (ca. 11,7 %) bzw. 3.273 mm (ca. 45,7 %). Die effektive Infiltration beträgt 2.303 mm, was 32,2 % der Gesamtwassermenge entspricht. Der Oberboden- und der Kernabfluss betragen 108 mm bzw. 2.240 mm. Dies entspricht 4,7 % bzw. 97,3 % der effektiven Infiltration und 1,5 % bzw. 31,3 % des Gesamtniederschlages.

### Modell 2.8 OT

In Bild 36 ist die Wasserbilanz für das Modell 2.8 dargestellt. Am Ende der Berechnungszeit beträgt der Oberflächenabfluss 903 mm (12,6 %). Durch die Evaporation und die Transpiration wurden 838 mm (11,7 %) bzw. 3.137 mm (43,8 %) aufgenommen und die effektive Infiltration liegt bei 2.283 mm (31,9 %).

Die Abflüsse von Oberboden und Kern liegen bei diesem Modell bei 1.393 mm (19,5 %) bzw. 861 mm (12,0 %). Bezogen auf die effektive Infiltration betragen die Abflüsse 61,0 % und 37,7 %. Der Unterschied zwischen der effektiven Infiltration und der Summe der Abflüsse entspricht der Wasserspeicherung im Modell. Diese ist im Vergleich zu den genannten Abflüssen wie eingangs beschrieben sehr gering und wurde deshalb nicht abgebildet.

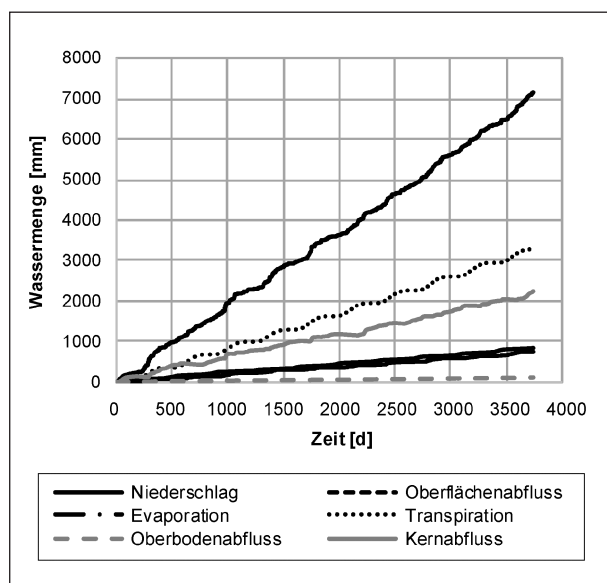


Bild 35: Wasserbilanz des Modells 2.7 (SWS ohne TSM)

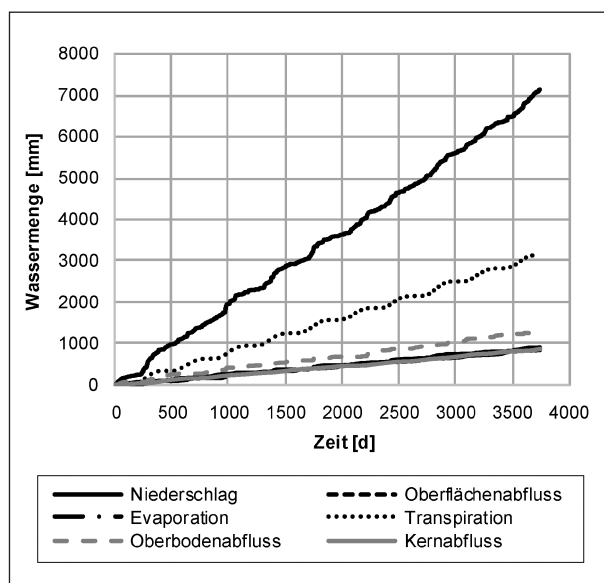


Bild 36: Wasserbilanz des Modells 2.8 (OT ohne TSM)

### 4.3.4 Vergleich der Berechnungen

In Bild 37 sind die Ergebnisse der Modellberechnungen für das Grundmodell 1 (Geometrie entsprechend der Bauweise E nach MTSE) zusammengefasst. Da das Bankett, der Oberboden und die Frostschuttschicht bei allen Modellen in gleicher Weise abgebildet wurden, zeigen alle Modelle ein ähnliches Verhalten hinsichtlich der Oberflächenprozesse (Oberflächenabfluss, Evaporation, Transpiration). Der Oberflächenabfluss liegt bei allen Modellen bei ca. 10 %. Die Evapotranspiration als Summe aus Evaporation und Transpiration übt einen maßgeblichen Einfluss auf den Wasserhaushalt von Straßendämmen aus und beträgt bei allen Modellen zwischen ca. 51 % und 55 % des angesetzten Niederschlages.

Die effektive Infiltration, welche der Summe aus Oberbodenabfluss, Dränschichtabfluss, Kernabfluss und Speicherung entspricht, liegt bei allen Modellen in einer ähnlichen Größenordnung, zwischen 34,0 % und 38,6 % des Niederschlages.

Der Oberbodenabfluss ist mit 1,5 % bei allen Berechnungen gleich groß. Der Kernabfluss variiert abgesehen vom Modell mit Stahlwerksschlacke im Kern zwischen 1,4 % (OT) und 10,8 % (BM2). Beim Ansatz der Stahlwerksschlacke (SWS) als Kernmaterial beträgt der Kernabfluss 20,8 %. In ähnlicher Weise zeigt sich die Funktion der Dränschicht über den Dränschichtabfluss. Außer dem Modell mit SWS liegen die Abflüsse zwischen ca. 22 % und 29 %, womit die Dränschicht maßgeblich zur Reduzierung der Kerndurchsickerung beiträgt. Nur beim Modell mit SWS als Kernmaterial ist der Dränschichtabfluss mit 9,5 % deutlich geringer.

Zur Analyse des auf den ersten Blick auffallend großen Kernabflusses bei der Berechnung mit SWS wurden die Saugspannungen ein paar Zentimeter unterhalb des Überganges zwischen Dränschicht und Kern in einem Abstand von 1 m ausgewertet. In Bild 38, Bild 39 und Bild 40 sind die Ergebnisse für die Modelle 1.6 (HMVA3), 1.7 (SWS – größter Kernabfluss) bzw. 1.8 (OT – niedrigster Kernabfluss) dargestellt. Die Saugspannungen variieren für Modell HMVA3 zwischen -0,5 und 415 kPa, für SWS zwischen 2,8 und 460 kPa und für OT zwischen -1,7 und 171 kPa. Betrachtet man nur die nassen Phasen liegen die Saugspannungen bei allen Modellen hauptsächlich zwischen 6 kPa und 30 kPa. Entsprechend den angesetzten hydraulischen Eigenschaften (Bild 41) ist für Saugspannungen größer als 6 kPa die hydraulische Leitfähigkeit der SWS höher als die der anderen Materialien, woraus der höhere Kernabfluss resultiert.

Die Berechnungsergebnisse belegen, dass der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert des Kernmaterials für die hier betrachteten, überwiegend durchlässigen Materialien kein geeigneter Indikator ist, um die Höhe der Kerndurchsickerung zu prognostizieren. In Bild 42 ist dazu das Verhältnis zwischen dem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert des Kerns und dem Kernabfluss dargestellt. Die Berechnung mit dem Ton mit organischen Beimengungen als Kernmaterial (OT) ergibt aufgrund des sehr geringen gesättigten Durchlässigkeitsbeiwertes des Tones (kleiner als  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s entsprechend den Anforderungen nach MTSE) zwar erwartungsgemäß eine sehr geringe Durchsickerung des Kerns, mit zunehmendem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert des Kernmaterials nimmt die Durchsickerung aber zunächst

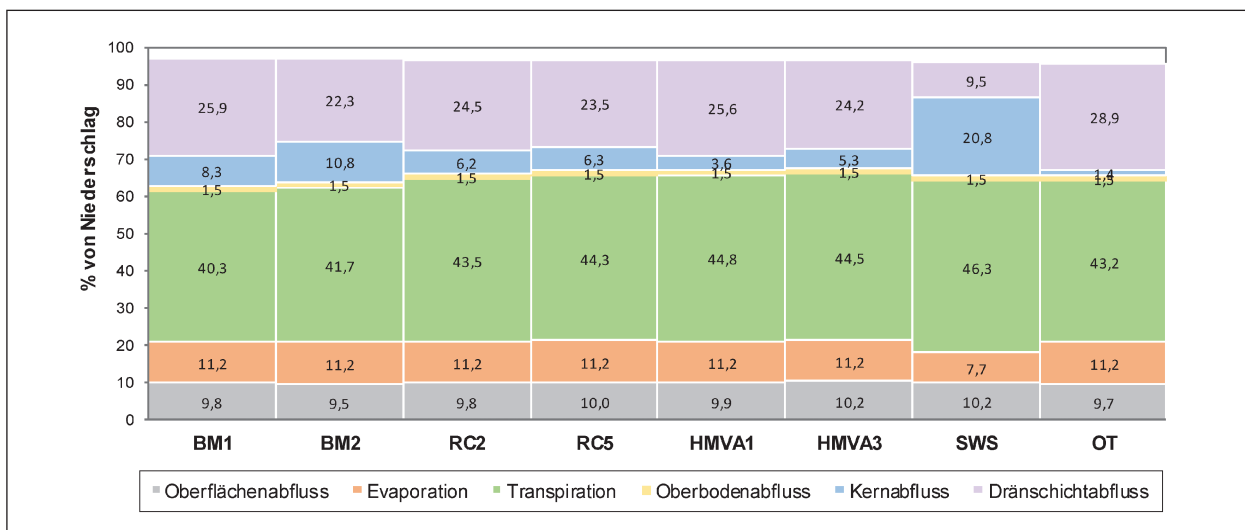


Bild 37: Vergleich der Modelle mit Dränschicht (Grundmodell 1)

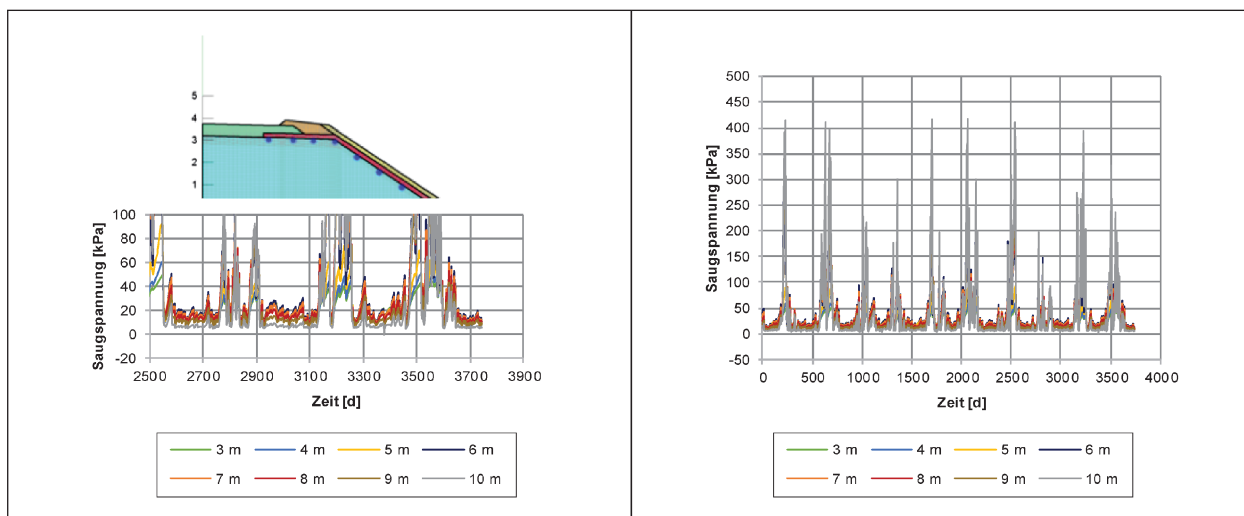


Bild 38: Saugspannungen in Abhängigkeit von der Zeit an unterschiedlichen Positionen im oberen Teil des Kerns für Modell 1.6 (HMVA 3)

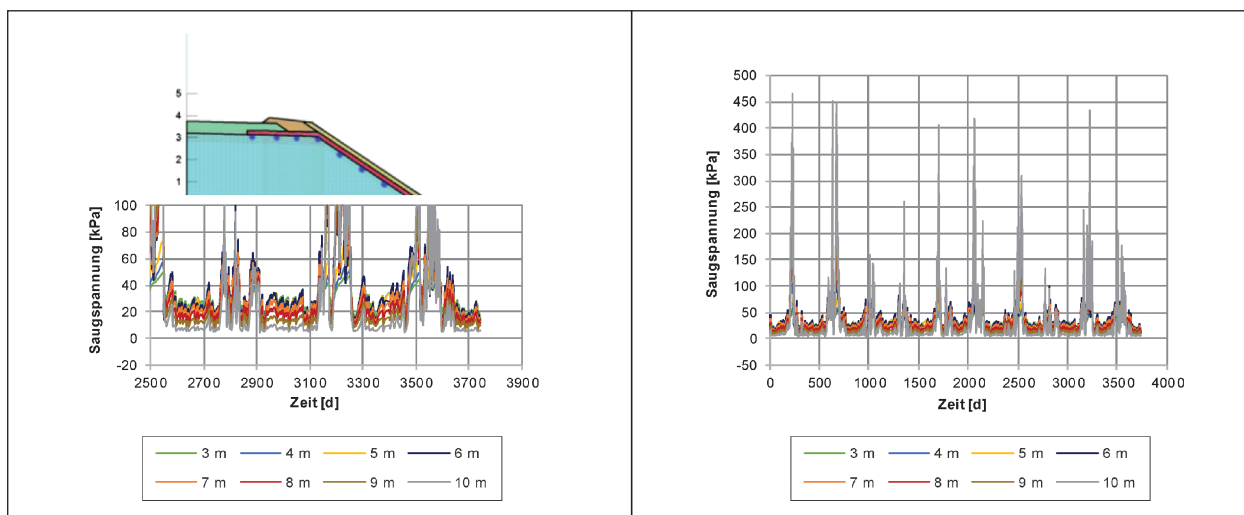


Bild 39: Saugspannungen in Abhängigkeit von der Zeit an unterschiedlichen Positionen im oberen Teil des Kerns für Modell 1.7 (SWS)

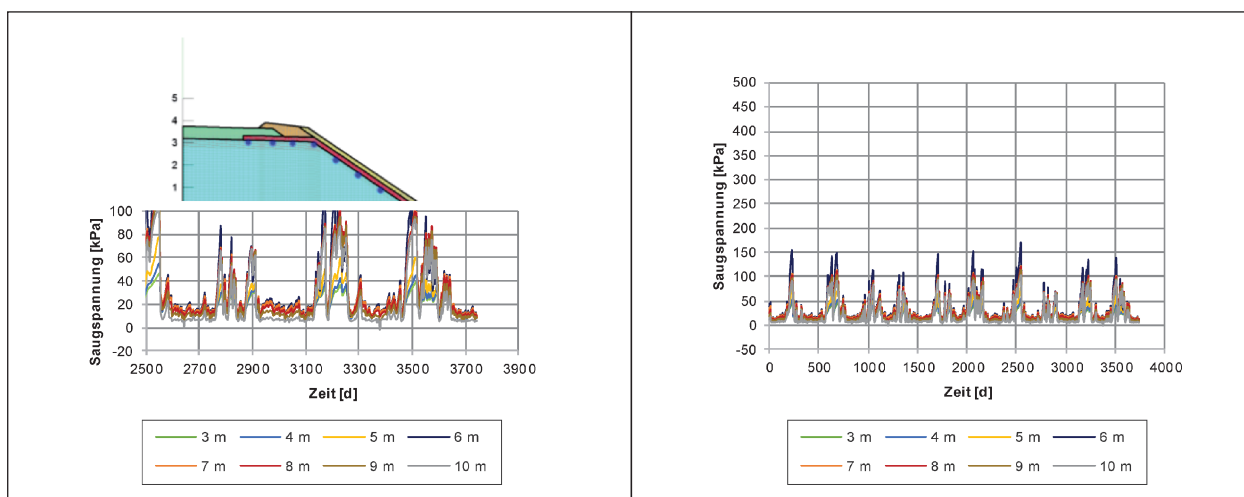


Bild 40: Saugspannungen in Abhängigkeit von der Zeit an unterschiedlichen Positionen im oberen Teil des Kerns für Modell 1.8 (OT)

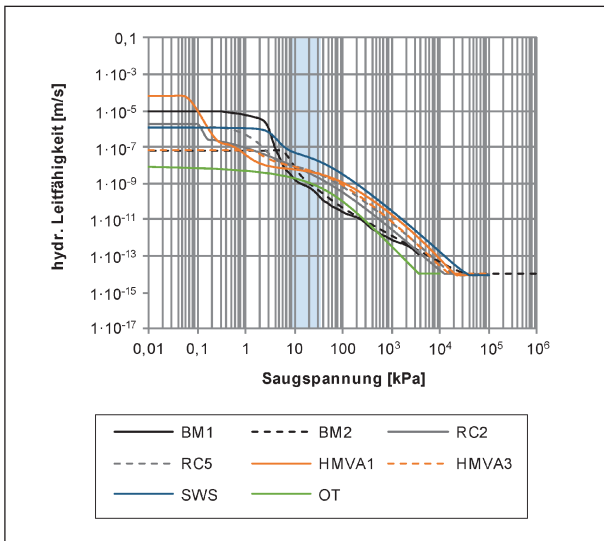


Bild 41: Schwankungsbereich der Saugspannungen (blauer Bereich) im oberen Teil des Kerns für Grundmodell 1

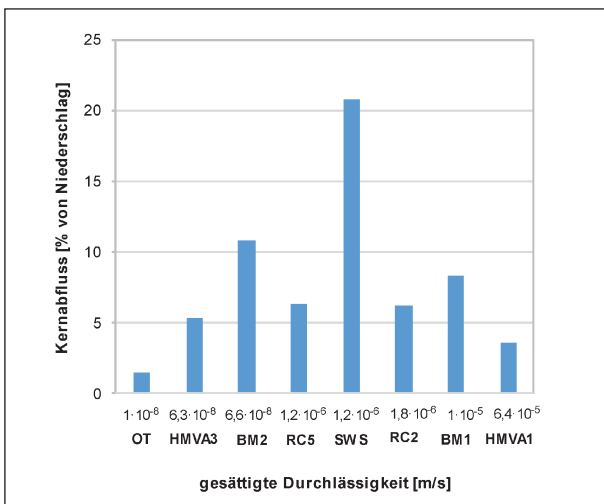


Bild 42: Verhältnis zwischen gesättigter Durchlässigkeit des Kerns und Kernabfluss für Grundmodell 1

nicht in gleicher Weise zu. Dies ist besonders am Modell 1.5 mit der HMVA 1 als Kernmaterial zu erkennen. Obwohl dieses Material mit  $6,4 \cdot 10^{-5}$  m/s die höchste gesättigte Durchlässigkeit aller untersuchten Kernmaterialien aufweist, ist der ermittelte Kernabfluss mit 3,6 % des Niederschlages sehr niedrig. Die Wirksamkeit der Dränschicht und der sich ergebende Kernabfluss werden dagegen maßgeblich von der hydraulischen Leitfähigkeit des Kernmaterials im ungesättigten Zustand, und dabei besonders im Bereich der sich einstellenden Saugspannungen an der Grenze zwischen Dränschicht und Kern, beeinflusst.

In Bild 43 sind die Ergebnisse der Modelle ohne technische Sicherungsmaßnahmen (Grundmodell 2) zusammengefasst. Die Oberflächenprozesse unterscheiden sich auch bei diesen Modellen nicht sehr stark. Der Oberflächenabfluss variiert zwischen 9,7 % und 12,6 %, die Evaporation liegt fast bei allen Modellen bei 11,7 % und die Transpiration variiert zwischen 38,9 % und 45,7 %. Die effektive Infiltration variiert zwischen 31,9 % bei OT und 39,7 % bei BM1. Der Oberbodenabfluss ist abgesehen vom Modell mit OT als Kernmaterial bei allen Modellen sehr ähnlich und variiert zwischen 1,6 % und 3,7 %. Ähnliches zeigt sich für den Kernabfluss, der bei allen Modellen außer OT im Bereich zwischen 28,5 % und 38,9 % liegt. Größere Unterschiede sind bei dem Modell mit OT festzustellen. Bei diesem Modell ist der Kernabfluss mit 19,4 % des Niederschlages deutlich geringer und der Oberbodenabfluss mit 19,5 % deutlich größer als bei den übrigen Modellen.

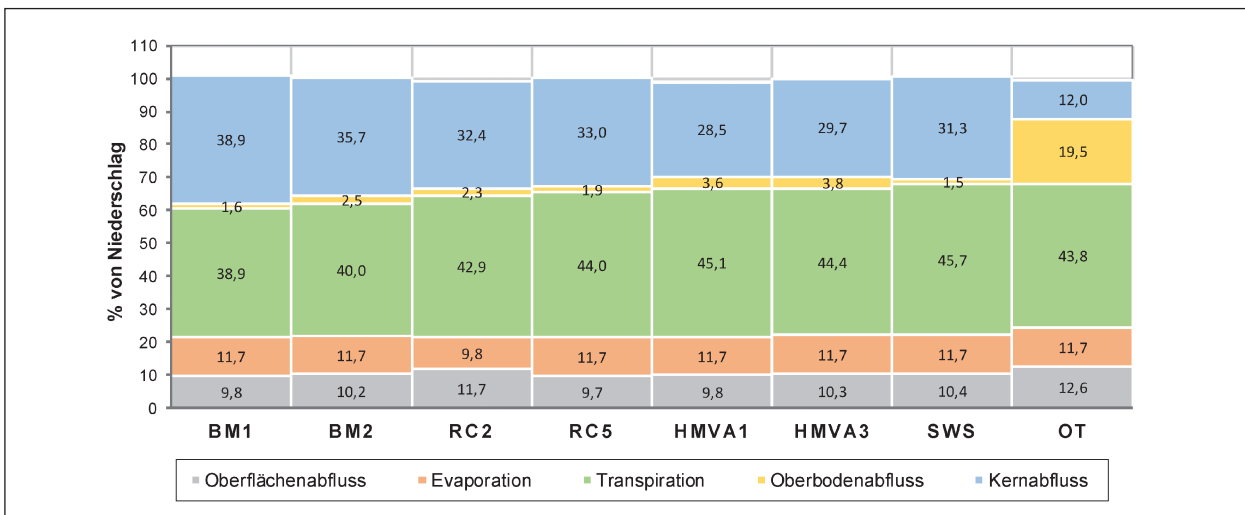


Bild 43: Vergleich der Modelle ohne technische Sicherungsmaßnahmen (Grundmodell 2)

In Bild 44, Bild 45 und Bild 46 ist der Verlauf der Saugspannungen mit der Zeit ein paar Zentimeter

unterhalb des Überganges zwischen Frostschutzkies und Kern bzw. Oberboden und Kern in einem

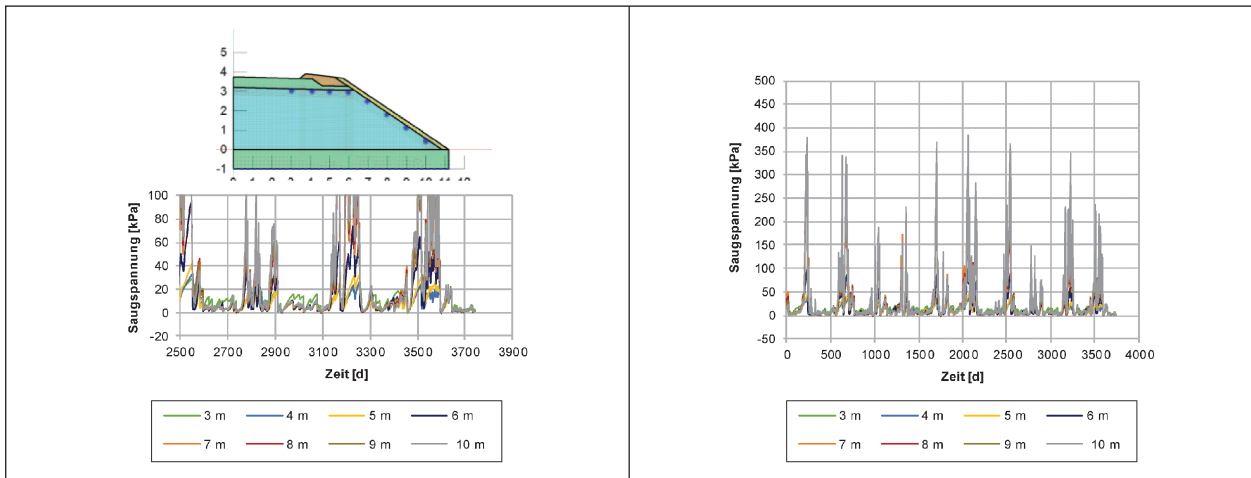


Bild 44: Saugspannungen in Abhängigkeit von der Zeit an unterschiedlichen Positionen im oberen Teil des Kerns für Modell 2.6 (HMVA 3)

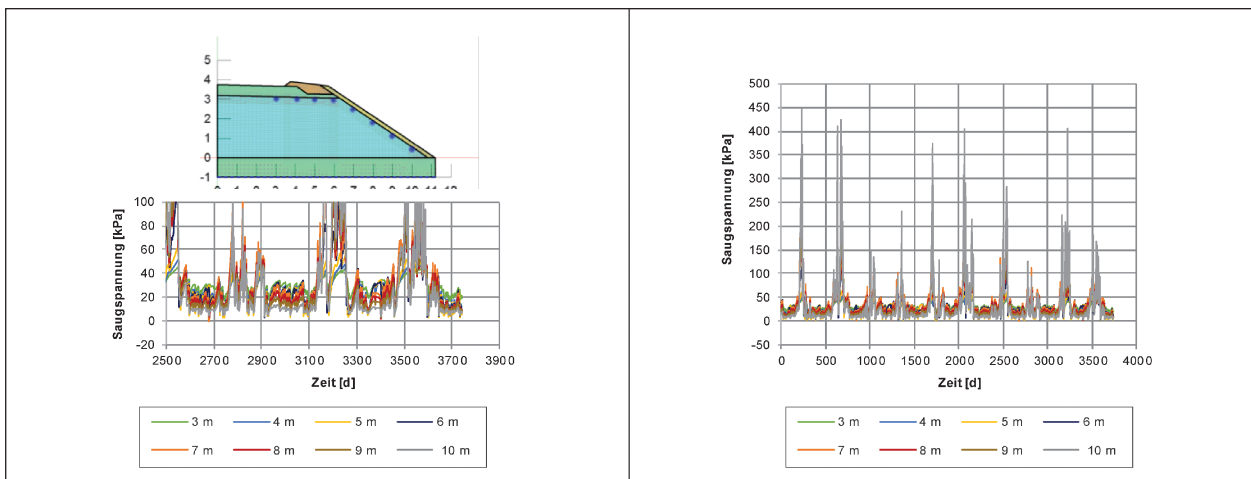


Bild 45: Saugspannungen in Abhängigkeit von der Zeit an unterschiedlichen Positionen im oberen Teil des Kerns für Modell 2.7 (SWS)

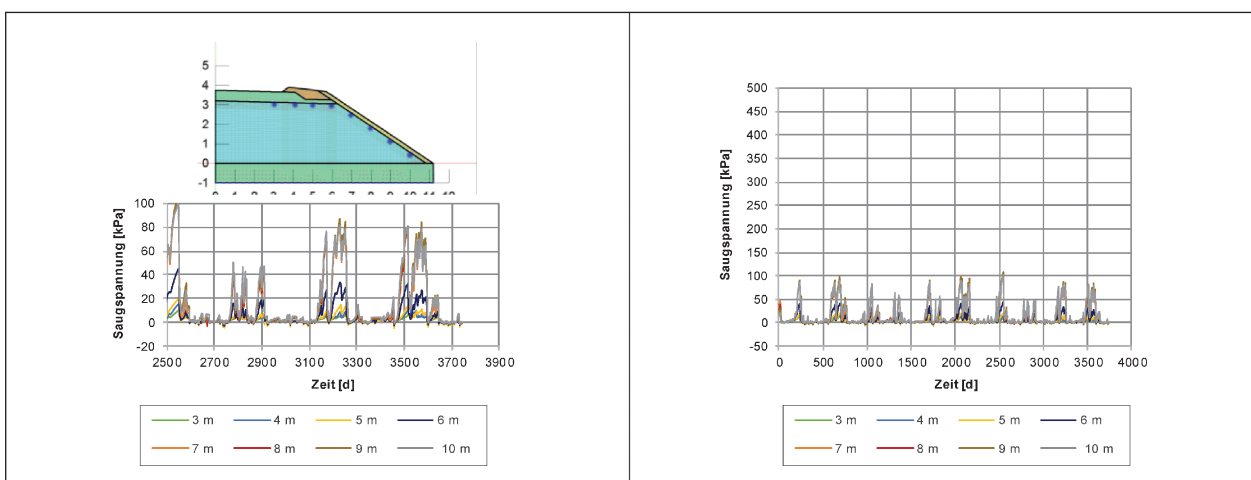


Bild 46: Saugspannungen in Abhängigkeit von der Zeit an unterschiedlichen Positionen im oberen Teil des Kerns für Modell 2.8 (OT)



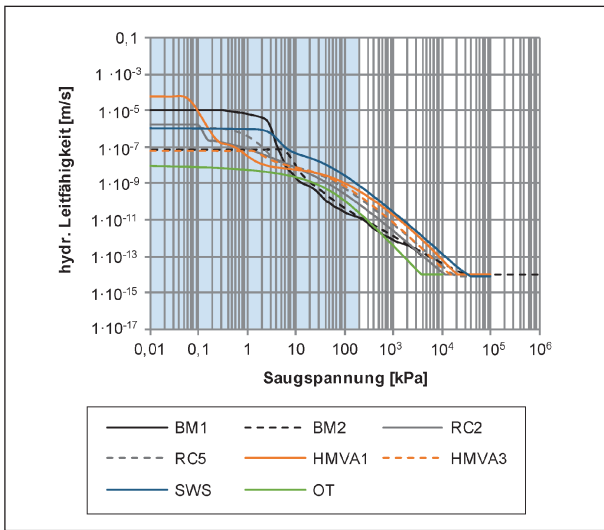


Bild 47: Schwankungsbereich der Saugspannungen (blauer Bereich) im oberen Teil des Kerns für Grundmodell 2

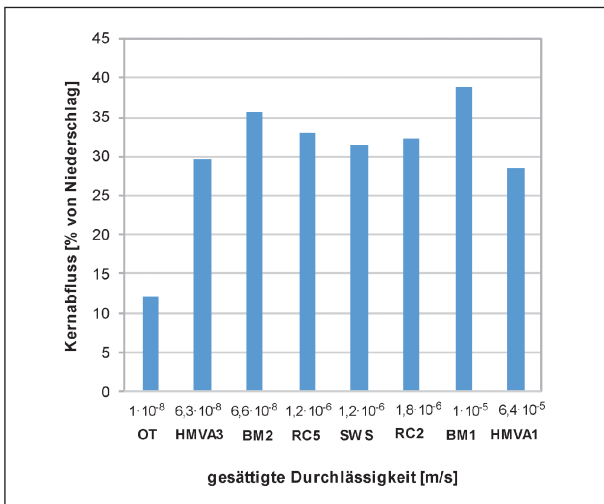


Bild 48: Verhältnis zwischen gesättigter Durchlässigkeit des Kerns und Kernabfluss für Grundmodell 2

Abstand von 1 m (in Böschungsrichtung) für die Modelle 2.6 (HMVA3), 2.7 (SWS) und 2.8 (OT) dargestellt. Aufgrund der fehlenden Dränschicht zwischen dem Oberboden und dem Kern ist bei Grundmodell 2 die Infiltration in den Kern im Vergleich zu Grundmodell 1 deutlich größer. Dies führt zu zeitweise sehr niedrigeren Saugspannungen und einer fast vollständigen Sättigung des Kerns im oberen Bereich.

In Bild 48 ist das Verhältnis zwischen der gesättigten Durchlässigkeit des Kerns und dem Kernabfluss dargestellt. Da der Schwankungsbereich der Saugspannungen im Kern bei Grundmodell 2 näher an der Sättigung liegt, hat der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert eine entscheidendere Rolle hinsichtlich des Kernabflusses als wie es bei den Berechnungen am Grundmodell 1 der Fall war. Ein vergleichsweise niedriger Abfluss wurde nur bei der Berechnung mit dem OT aufgrund des niedrigen gesättigten Durchlässigkeitsbeiwertes des Tons mit organischen Beimengungen von  $k_{sat} = 1 \cdot 10^{-8}$  m/s festgestellt.

In Bild 49 werden die Ergebnisse von Grundmodell 1 und 2 miteinander verglichen. Die Dränschicht führt zu einer signifikanten Reduzierung des Kernabflusses von 10,5 % bei SWS bis 30,6 % beim Boden BM1 bezogen auf den Niederschlag. In Bild 50 ist die absolute Veränderung des Kernabflusses dargestellt. Für alle Materialien wird durch die Verwendung der Dränschicht eine Reduzierung der Durchsickerung von mindestens 30 % erreicht. Ähnliche Ergebnisse sind von KELLERMANN-KINNER et al. (2016, 2017) berichtet. Im Rahmen ihrer experimentellen Untersuchungen wurde der Was-

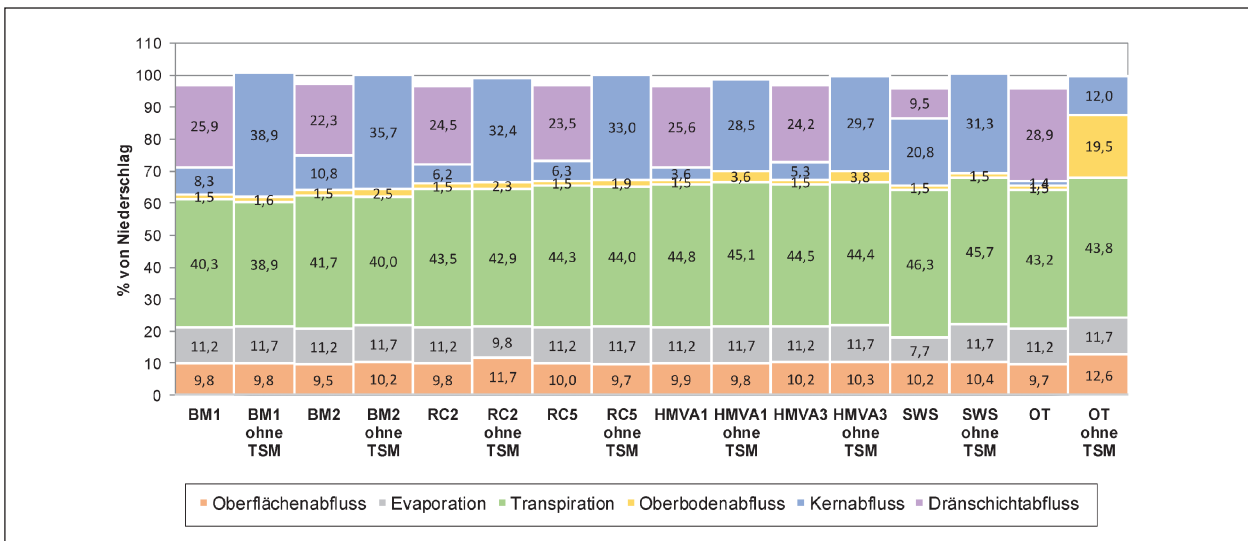


Bild 49: Vergleich der Modelle ohne (Grundmodell 1) und mit Dränschicht (Grundmodell 2)

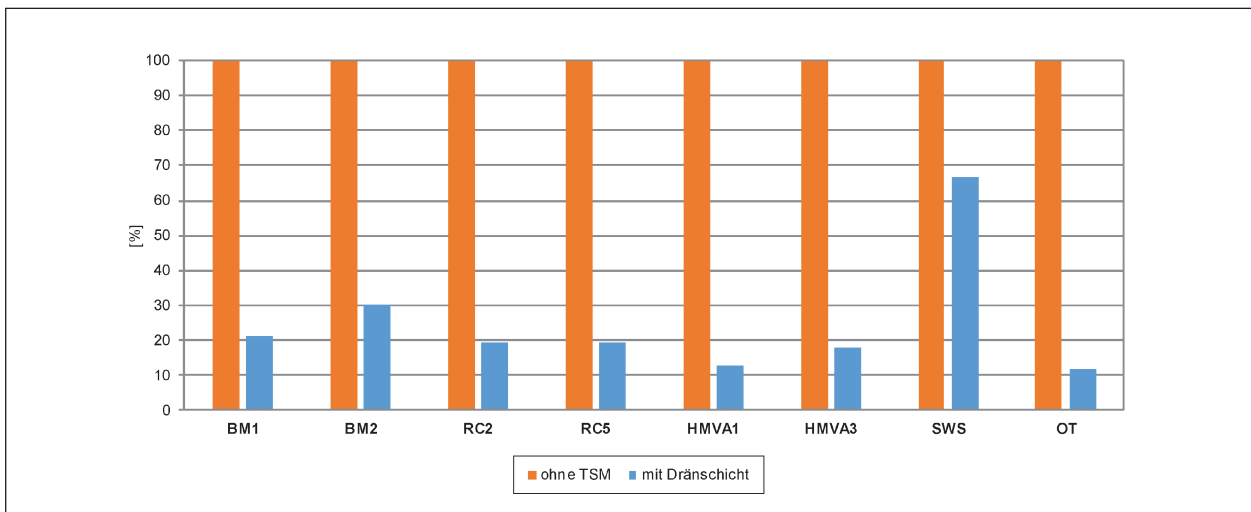


Bild 50: Kernabflüsse bei Bauweisen mit Dränschicht bezogen auf Kernabflüsse bei Bauweisen ohne Dränschicht

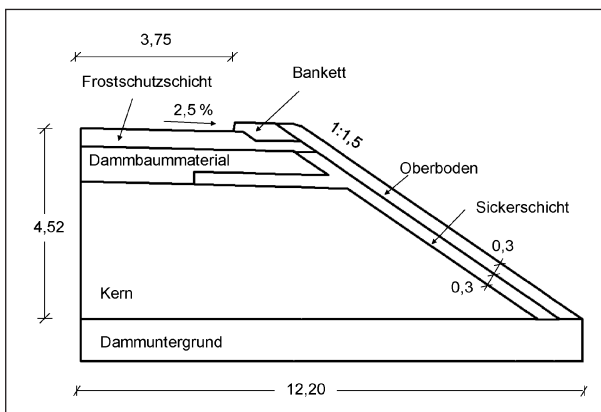


Bild 51: Geometrie des Modells im Rahmen des Forschungsvorhabens FE 84.105

serhaushalt von Straßenböschungen mit und ohne Verwendung von Dränschichten anhand von Hallenlysimetern untersucht, wobei allerdings nur der Böschungsbereich ohne Bankette und ohne Straßenabfluss betrachtet wurde. Die Ergebnisse zeigen bei diesen Versuchen eine Reduktion des Sickerwassers bei der Verwendung von Dränmatten von mindestens 40 %.

#### 4.3.5 Vergleich mit den Ergebnissen des Forschungsvorhabens FE 84.105

Im Rahmen des Forschungsvorhabens 84.105 wurden Berechnungen zu Bauweise E mit zeitlich variablen Randbedingungen durchgeführt. Die Geometrie des verwendeten Modells ist in Bild 51 zu sehen. Der Oberboden besitzt bei diesem Modell eine Dicke von 30 cm, die Dränschicht wurde als eine 30 cm dicke Kiesschicht modelliert. Die Dicke des

Kerns beträgt 3,25 m und ist im Vergleich zu Grundmodell 1 damit geringer.

Wie beim Grundmodell 1 wurden bei dem im Rahmen des Forschungsvorhabens 84.105 erstellten Modells für die Klimarandbedingung Klimadaten für den Flughafen München von 01.10.1992 bis 31.12.2002 verwendet. Die Nettostrahlung wurde dabei mit der Gleichung nach MICHAELIDES et al. (2013) berechnet. Der Fahrbahnabfluss wurde gleichmäßig auf das Bankett und den Oberboden verteilt. Anders als beim Grundmodell 1 wurden hinsichtlich der Vegetationsparameter der Blattflächenindex LAI über den Berechnungszeitraum konstant mit 2,88 und die Wurzeltiefe konstant mit 30 cm angenommen.

Die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung und die hydraulische Leitfähigkeitsfunktion für die verwendeten Materialien sind in Bild 52 und Bild 53 dargestellt. Die Kennwerte des Oberbodens entsprechen den in den vorliegenden Untersuchungen verwendeten Werten. Für die Leitfähigkeitsfunktion wurde aber keine Begrenzung durch Definition einer minimalen Leitfähigkeit vorgenommen. Für das Bankett wurden die Bodenkennwerte eines Sand-Schluff-Gemisches (SU\*) nach HENNINGS (2000) herangezogen. Der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert wurde mithilfe des Ansatzes von BEYER (1964) mit  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s abgeschätzt. Für die Dränschicht, das Frostschutzmaterial und das Kiesplanum wurden im F&E 84.105 die von EKBLAD und ISACSSON (2007) an einem schwach schluffigen Kies (6 % Feinkornanteil, GU nach DIN 18196) ermittelten Bodenkennwerte angesetzt. Der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert lag bei  $5 \cdot 10^{-5}$  m/s.

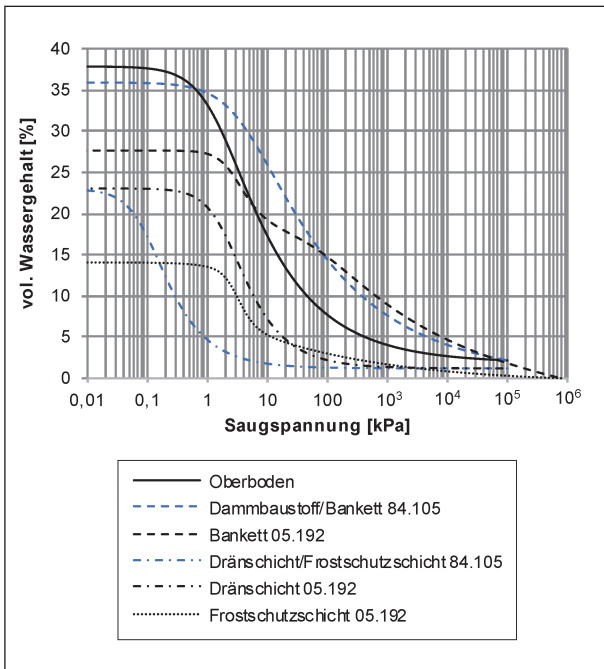


Bild 52: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen für die unterschiedlichen Materialien

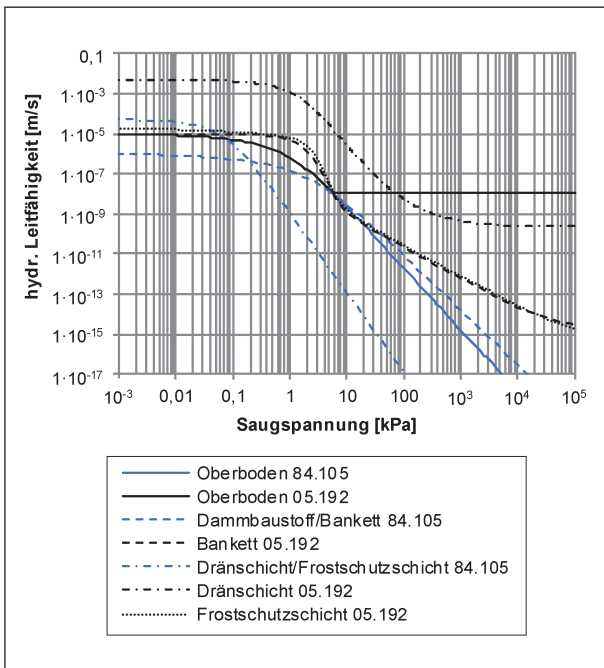


Bild 53: Hydraulische Leitfähigkeitsfunktionen für die unterschiedlichen Materialien

Die Ergebnisse dieses Modells sind zusammen mit den Ergebnissen des Modells 1.8 in Bild 54 dargestellt. Der Oberflächenabfluss und die Transpiration betragen beim Modell des Forschungsvorhabens 84.105 10,5 % und 46,8 %. Wegen dem hohen Blattflächenindex ist die berechnete Evaporation sehr gering. Die effektive Infiltration liegt bei 42,6 % des Niederschlages. Die Oberboden-, Kern bzw.

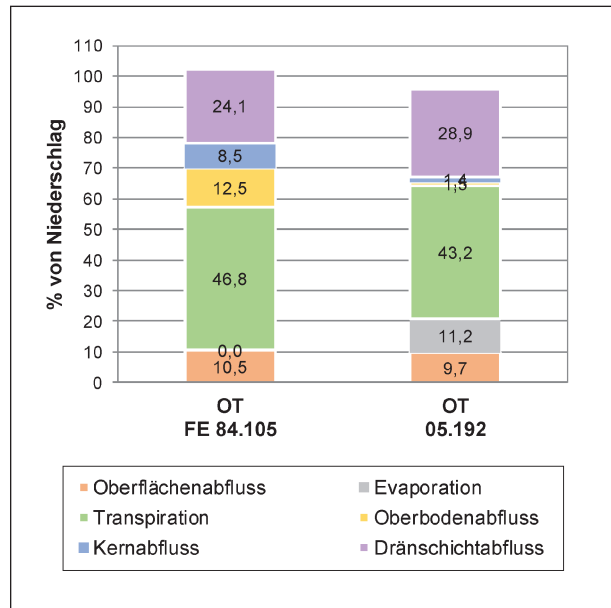


Bild 54: Vergleich der Ergebnisse des Modells 1.8 mit den Ergebnissen aus FE 84.105

Dränschichtabflüsse liegen am Ende der zehn Jahre bei 12,5 %, 8,5 % bzw. 24,1 % des gesamten Niederschlages.

Die zwei Modelle weisen große Unterschiede hinsichtlich der Geometrie und der Vegetationsparameter auf, weshalb ein Vergleich der Modelle hinsichtlich des Einflusses der unterschiedlichen hydraulischen Kennwerte für das Bankett, die Frostschutzschicht und die Dränschicht auf den Wasserhaushalt nicht möglich ist. Der höhere Oberflächenabfluss beim Modell 84.105 ist vermutlich auf die niedrigere Durchlässigkeit des Banketts zurückzuführen. Da der Blattflächenindex im Modell 84.105 über das ganze Jahr sehr hoch ist (unrealistisch für Winter), ist die berechnete Transpiration beim Modell 84.105 höher als beim Modell 1.8. Gleichzeitig ergibt sich daraus aber eine sehr niedrige Evaporation, wodurch die Evapotranspiration als Summe aus Transpiration und Evaporation beim Modell 84.105 niedriger ist als beim Modell 1.8. In der Folge ergibt sich für das Modell 84.105 daraus eine höhere effektive Infiltration und auch eine höhere Kerndurchsickerung. Der höhere Oberbodenabfluss beim Modell 84.105 ist zum Einen auf die unterschiedliche Verteilung des Straßenabflusses (deutlich größere Wassermenge im Bereich des Oberbodens bei FE 84.105) und zum Anderen auf die geringere hydraulische Leitfähigkeit der Dränschicht beim Modell 84.105 zurückzuführen.

## 5 Berechnungen zum Einfluss des Bankettmaterials auf den Wasserhaushalt

### 5.1 Übersicht der Berechnungen

Ergänzend zu den in Kapitel 4 vorgestellten Berechnungen wurden sechs Berechnungen zur Ermittlung des Einflusses des Bankettes auf den Wasserhaushalt durchgeführt. Bei den in Kapitel 4 vorgestellten Berechnungen wurde das Bankett mit einer gesättigten Durchlässigkeit von  $7,5 \cdot 10^{-6}$  m/s (Boden BM5) abgebildet und der Straßenabfluss wurde als zusätzlicher Niederschlag halb auf Bankett (50 % gleichmäßig verteilt) und halb auf den Oberboden (50 % gleichmäßig verteilt) aufgebracht. Um eine realistische Verteilung des Straßenabflusses bzw. eine realistische Abbildung des Oberflächenabflusses im Modell zu erhalten und um den Einfluss unterschiedlicher hydraulischer Eigenschaften des Bankettmaterials auf den Wasserhaushalt herauszuarbeiten, wurden die folgenden Berechnungen durchgeführt:

- Berechnung 3.1: als Bankettmaterial wurde wie bei den bisherigen Berechnungen der Boden BM5 (SCHARNAGL und DURNER, 2014) mit  $k_{\text{sat}} = 7,5 \cdot 10^{-6}$  m/s verwendet. Der Straßenabfluss wurde zu 100 % gleichmäßig auf das Bankett verteilt (BM5 100 % Bankett).
- Berechnung 3.2: als Bankettmaterial wurde der Boden BM5 (SCHARNAGL und DURNER, 2014) mit  $k_{\text{sat}} = 7,5 \cdot 10^{-6}$  m/s verwendet. Der Straßenabfluss bzw. der Niederschlag auf das Bankett und den Oberboden wurden entsprechend den Ergebnissen aus Berechnung 3.1 angepasst. Das bedeutet, dass im Vergleich zu Berechnung 3.1 auf dem Bankett nur noch die Wassermenge angesetzt wurde, die in Berechnung 3.1 dort in-

filtrieren konnte. Der Rest, der in Berechnung 3.1 als Oberflächenabfluss ausgewiesen worden war, wurde in Berechnung 3.2 auf dem oberen Drittel des Oberbodens als Niederschlag aufgebracht (BM5 Bankett-1/3 Oberboden).

- Berechnung 3.3: als Bankettmaterial wurde der Boden BM1 (SCHARNAGL und DURNER, 2014) mit  $k_{\text{sat}} = 1,0 \cdot 10^{-5}$  m/s verwendet. Der Straßenabfluss wurde zu 100 % gleichmäßig auf das Bankett verteilt (BM1 100 % Bankett).
- Berechnung 3.4: als Bankettmaterial wurde der Boden BM1 (SCHARNAGL und DURNER, 2014) mit  $k_{\text{sat}} = 1,0 \cdot 10^{-5}$  m/s verwendet. Der Straßenabfluss bzw. der Niederschlag auf das Bankett und den Oberboden wurden entsprechend den Ergebnissen aus Berechnung 3.3 angepasst (BM1 Bankett-1/3 Oberboden).
- Berechnung 3.5: als Bankettmaterial wurde der Boden BM4 (SCHARNAGL und DURNER, 2014) mit einer modifizierten gesättigten Durchlässigkeit von  $k_{\text{sat}} = 1,0 \cdot 10^{-6}$  m/s verwendet. Der Straßenabfluss wurde zu 100 % gleichmäßig auf das Bankett verteilt (BM4 100 % Bankett).
- Berechnung 3.6: als Bankettmaterial wurde der Boden BM4 (SCHARNAGL und DURNER, 2014) mit einer modifizierten gesättigten Durchlässigkeit von  $k_{\text{sat}} = 1,0 \cdot 10^{-6}$  m/s verwendet. Der Straßenabfluss bzw. der Niederschlag auf das Bankett und den Oberboden wurden entsprechend den Ergebnissen aus Berechnung 3.5 angepasst (BM4 Bankett-1/3 Oberboden).

Die Berechnungen wurden für das Grundmodell 1 (Straßendamm nach Bauweise E) durchgeführt. Als Kernmaterial wurde bei allen sechs Berechnungen der Boden BM1 (SCHARNAGL und DURNER, 2014) verwendet. Eine Übersicht der Berechnungen ist in Tabelle 6 dargestellt.

	Bankettmaterial	Bankett $k_{\text{sat}}$ [m/s]	Kernmaterial	Straßenabfluss- bzw. Oberflächenabflussverteilung
Modell 3.1	Boden BM5	$7,5 \cdot 10^{-6}$	Boden BM1	100 % Bankett
Modell 3.2	Boden BM5	$7,5 \cdot 10^{-6}$		Bankett und 1/3 Oberboden entsprechend Modell 3.1
Modell 3.3	Boden BM1	$1,0 \cdot 10^{-5}$		100 % Bankett
Modell 3.4	Boden BM1	$1,0 \cdot 10^{-5}$		Bankett und 1/3 Oberboden entsprechend Modell 3.3
Modell 3.5	Boden BM4	$1,0 \cdot 10^{-6}$		100 % Bankett
Modell 3.6	Boden BM4	$1,0 \cdot 10^{-6}$		Bankett und 1/3 Oberboden entsprechend Modell 3.5

Tab. 6: Übersicht über die zusätzlichen Berechnungen

## 5.2 Bodenkennwerte

Die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen und die hydraulischen Leitfähigkeitsfunktionen für die drei unterschiedlichen Bankettmaterialien sind in Bild 55 bzw. in Bild 56 dargestellt. Bei der Leitfähigkeitsfunktion von Boden BM4 handelt es sich um eine Modifikation der von SCHARNAGL und DURNER ermittelten Kurve. Die gesättigte Durchlässigkeit wurde von  $1,8 \cdot 10^{-7}$  m/s auf  $1,0 \cdot 10^{-6}$  m/s angepasst.

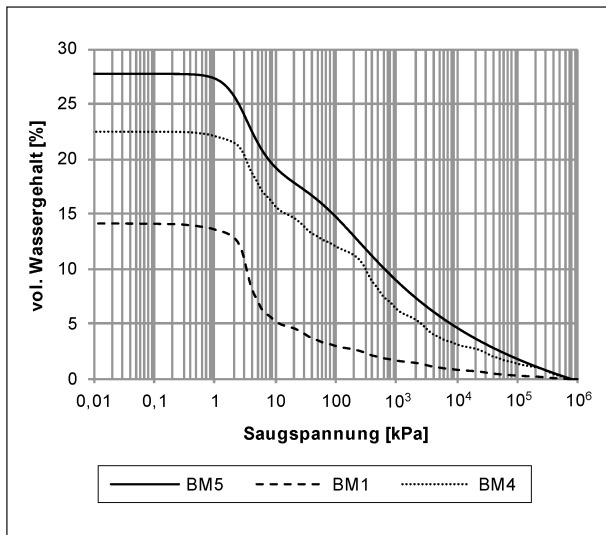


Bild 55: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen für die unterschiedlichen Bankettmaterialien

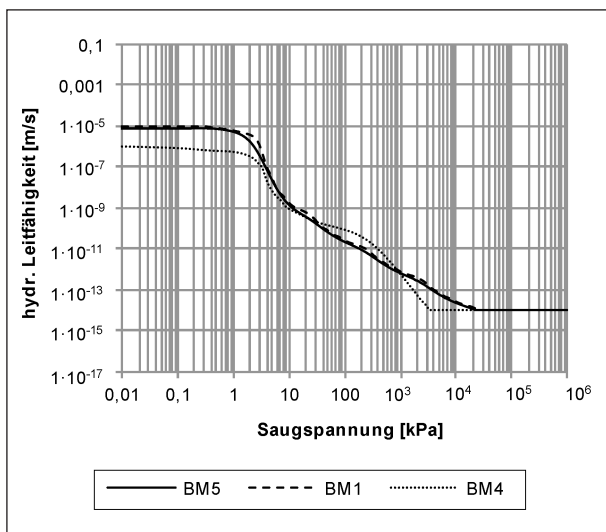


Bild 56: Hydraulische Leitfähigkeitsfunktionen für die unterschiedlichen Bankettmaterialien

## 5.3 Berechnungsergebnisse

### 5.3.1 Modell 3.1 BM5 100 % Bankett

In Bild 57 ist die Wasserbilanz des Modells 3.1 in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Der Oberbodenabfluss beträgt bei diesem Modell 799 mm (11,4 %), die Evaporation 733 mm (10,4 %) und die Transpiration 2.761 mm (39,4 %). Die effektive Infiltration mit 2.722 mm entspricht 38,8 % des gesamten Niederschlages.

Die Abflüsse aus dem Oberboden, dem Kern und der Dränschicht liegen bei 34 mm, 847 mm bzw. 1.657 mm, was 0,6 %, 12,1 % bzw. 23,6 % des gesamten Niederschlages entspricht. Bezogen auf die effektive Infiltration betragen die Abflüsse aus Oberboden, Kern und Dränschicht 1,4 %, 31,1 % und 60,9 %. Der Unterschied zwischen der effektiven Infiltration und der Summe der Abflüsse entspricht der Wasserspeicherung in Modell. Diese ist im Vergleich zu den genannten Abflüssen aber sehr gering und wurde deshalb in Bild 57 nicht abgebildet.

### 5.3.2 Modell 3.2 BM5 Bankett-1/3 Oberboden

Bild 58 stellt die Wasserbilanz in Abhängigkeit von der Zeit für das Modell 3.2 dar. Am Ende der Berechnungszeit beträgt der Oberflächenabfluss 565 mm (7,8 %). Durch die Evaporation und die Transpiration werden 803 mm (11,1 %) bzw. 2.953 mm (40,9 %) aufgenommen. Die effektive Infiltration liegt bei 2.893 mm, was 40,1 % des Niederschlages entspricht.

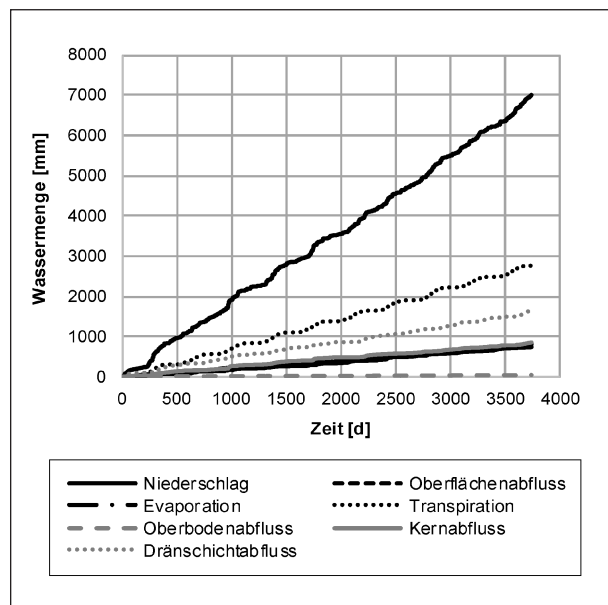


Bild 57: Wasserbilanz des Modells 3.1 (BM5 100 % Bankett)



Der Oberboden-, Kern- und Dränschichtabfluss betragen 30 mm (0,4 %), 814 mm (11,3 %) bzw. 1.849 mm (25,6 %), was 1,0 %, 28,1 % bzw. 63,9 % der effektiven Infiltration entsprechen.

Da der berechnete Oberflächenabfluss immer noch vergleichsweise hoch ist und hauptsächlich (ca. 95 %) im Bankettbereich stattfindet, wurde eine neue Berechnung durchgeführt (BM5 Bankett-1/3 Oberboden\_2), bei dem der Bankettoberflächenabfluss des Modells 3.2 gleichmäßig als zusätzlicher Niederschlag auf dem obersten Drittel des Oberbo-

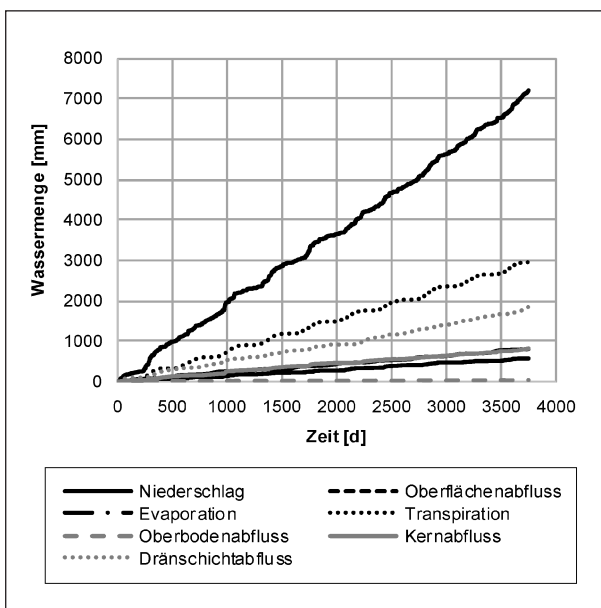


Bild 58: Wasserbilanz des Modells 3.2 (BM5 Bankett-1/3 Oberboden)

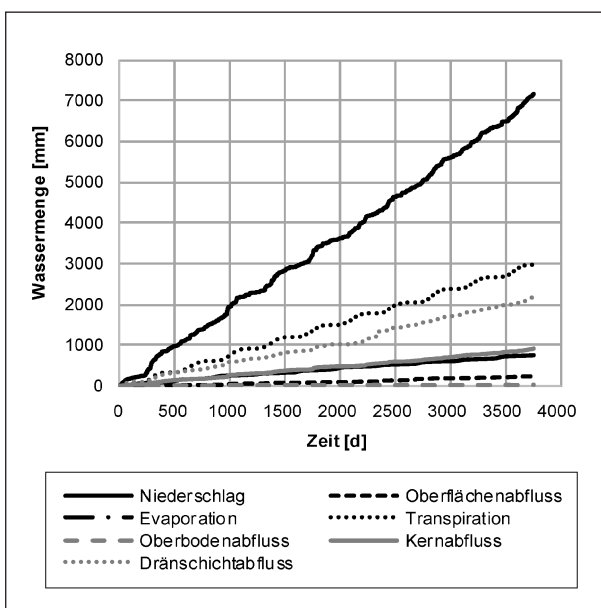


Bild 59: Wasserbilanz des modifizierten Modells 3.2 (BM5 Bankett-1/3 Oberboden\_2)

dens aufgebracht wird. Der Bankettniederschlag wird entsprechend reduziert. Die Ergebnisse des neuen Modells sind in Bild 59 dargestellt.

Der Oberflächenabfluss, die Evaporation und die Transpiration entsprechen bei dem neuen Modell mit 228 mm, 747 mm bzw. 2.971 mm, 3,2 %, 10,4 % bzw. 41,4 % des gesamten Niederschlages. Die effektive Infiltration liegt bei 3.231 mm (45,0 %).

Die Abflüsse aus Oberboden, Kern und Dränschicht am Ende der zehn Jahre betragen 22 mm, 910 mm und 2.187 mm bzw. 0,3 %, 12,7 % und 30,5 % bezogen auf den Niederschlag. Bezieht man die Abflüsse auf die effektive Infiltration, liegen sie bei 0,7 %, 28,2 % bzw. 67,7 %.

### 5.3.3 Modell 3.3 BM1 100 % Bankett

In Bild 60 ist die Wasserbilanz für das Modell 3.3 dargestellt. Am Ende der zehn Jahre sind 340 mm (4,9 %) auf der Oberfläche abgelaufen. Als Evaporation wurden 686 mm (9,8 %) an die Atmosphäre abgegeben und als Transpiration durch die Vegetation 2.866 mm (40,9 %) aufgenommen. Die effektive Infiltration beträgt 3.120 mm, was 44,5 % des gesamten Niederschlages entspricht.

Die Abflüsse aus Oberboden, Kern und Dränschicht liegen bei 33 mm, 1.091 mm bzw. 1.868 mm, was 0,5 %, 15,6 % bzw. 26,6 % bezogen auf den Niederschlag bedeuten. Bezogen auf die effektive Infiltration betragen die Abflüsse 1,1 %, 35,0 % bzw. 59,9 %.

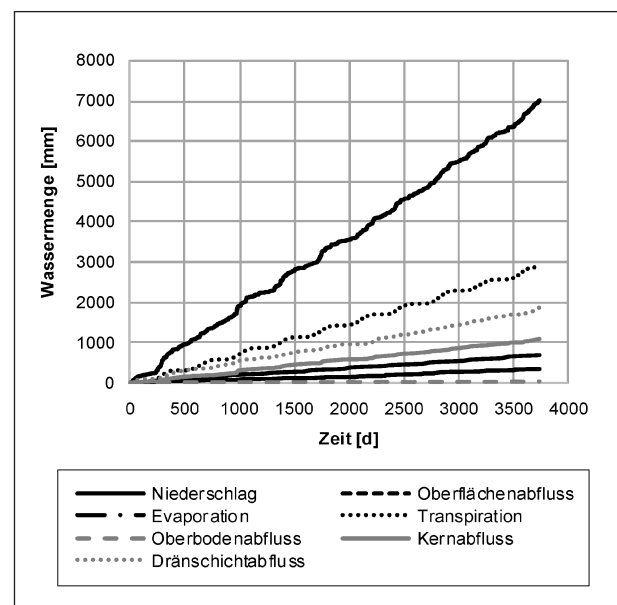


Bild 60: Wasserbilanz des Modells 3.3 (BM1 100 % Bankett)



**5.3.4 Modell 3.4 BM1 Bankett-1/3 Oberboden**

In Bild 61 ist die Wasserbilanz des Modells 3.4 dargestellt. Am Ende der Berechnungszeit beträgt der Oberflächenabfluss 227 mm (3,2 %). Durch die Evaporation und die Transpiration wurden 833 mm (11,6 %) bzw. 2979 mm (41,5 %) aufgenommen. Die effektive Infiltration liegt bei 3.141 mm (43,7 %).

Die Abflüsse von Oberboden, Kern und Dränschicht entsprechen bei diesem Modell mit 31 mm, 1.035 mm bzw. 1.944 mm 0,4 %, 14,4 % bzw. 27,1 % des Niederschlages. Bezogen auf die effektive Infiltration betragen diese 1,0 %, 33,0 % bzw. 61,9 %.

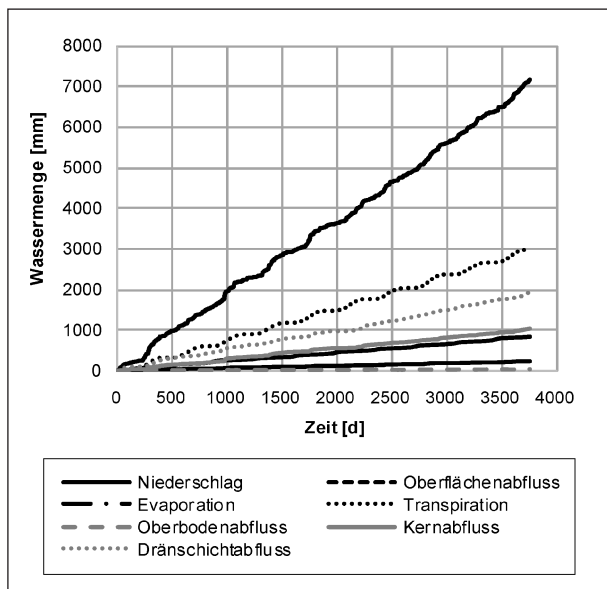


Bild 61: Wasserbilanz des Modells 3.4 (BM1 Bankett 1/3 Oberboden)

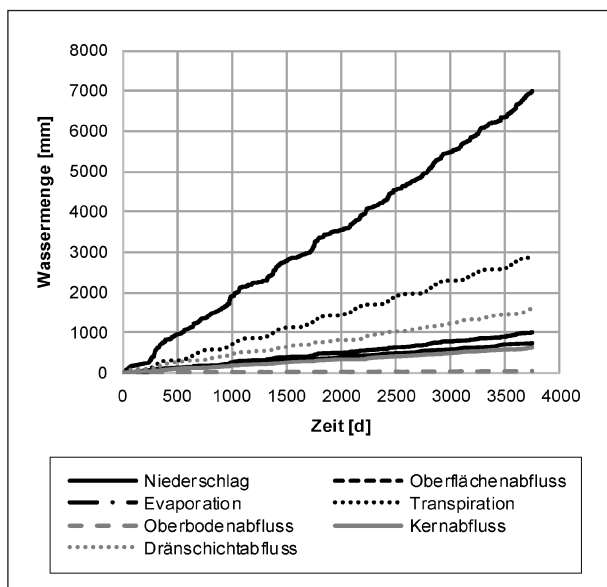


Bild 62: Wasserbilanz des Modells 3.5 (BM4 100 % Bankett)

**5.3.5 Modell 3.5 BM4 100 % Bankett**

In Bild 62 ist die Wasserbilanz für das Modell 3.4 dargestellt. Der Oberflächenabfluss beträgt bei diesem Modell 999 mm (14,2 %), die Evaporation 734 mm (10,5 %) und die Transpiration 2.857 mm (40,7 %). Die effektive Infiltration entspricht mit 2.422 mm 34,5 % des gesamten Niederschlages.

Der Oberboden-, Kern- und Dränschichtabfluss mit 39 mm, 627 mm, bzw. 1.614 mm entsprechen 0,6 %, 8,9 % bzw. 23,0 % des Niederschlages, was 1,6 %, 25,9 % bzw. 66,7 % der effektiven Infiltration bedeuten.

**5.3.6 Modell 3.6 BM4 Bankett-1/3 Oberboden**

Die Wasserbilanz für das Modell 3.6 ist in Bild 63 dargestellt. Der akkumulierte Oberflächenabfluss beträgt am Ende der Berechnungszeit 228 mm, was 3,2 % des Niederschlages entspricht. Die Evaporation und die Transpiration liegen bei 837 mm (11,8 %) bzw. 3.043 mm (42,7 %). Die effektive Infiltration beträgt bei diesem Modell 3.013 mm, was 42,3 % des Niederschlages entspricht.

Die Abflüsse aus Oberboden, Kern und Dränschicht liegen am Ende der berechneten zehn Jahre bei 31 mm, 810 mm und 1.980 mm bzw. 0,4 %, 11,4 % und 27,8 des Niederschlages. Bezogen auf die effektive Infiltration entsprechen sie 1,0 %, 26,9 % bzw. 65,7 %.

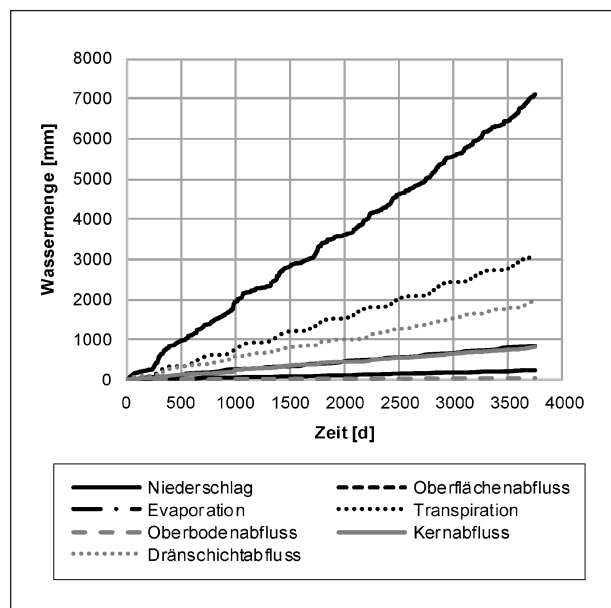


Bild 63: Wasserbilanz des Modells 3.6 (BM4 Bankett-1/3 Oberboden)

## 5.4 Vergleich der Modellberechnungen

In Bild 64 sind die Ergebnisse der Modelle 3.1 bis 3.6 zusammengefasst. Zusätzlich sind die Ergebnisse des Modells 1.1 (BM5 50 % Bankett) dargestellt, um eine bessere Übersicht zum Einfluss der Straßenabflussverteilung auf die Wasserbilanz zu erhalten.

Aus dem Vergleich der Modelle 1.1 (BM5 50 % Bankett) und 3.1 (BM5 100 % Bankett) wird deutlich, dass die geringere Wassermenge auf dem Bankett beim Modell 1.1 (50 % des Straßenabflusses auf dem Bankett) zu einem geringeren Oberflächenabfluss gegenüber dem Modell 3.1 führt, bei dem der gesamte Straßenabfluss im Bereich des Banketts aufgebracht wurde. Gleichzeitig stellt sich beim Modell 1.1 aber eine größere Evapotranspiration als Summe aus Evaporation und Transpiration ein, da dem Oberboden mehr Wasser zur Verfügung steht als beim Modell 3.1. Damit ergeben sich für beide Modelle ähnliche Werte für die effektive Infiltration (= Niederschlag abzüglich Oberflächenabfluss und Evapotranspiration). Demnach wären für beide Modelle auch ähnliche Werte des Dränschichtabflusses und des Kernabflusses zu erwarten. Da in den Modellen 1.1 und 3.1 die Verteilung der Infiltration des Straßenabflusses auf Bankett und Oberboden aber unterschiedlich sind, ergeben sich diesbezüglich Unterschiede. So führt die größere Infiltration im

Bereich des Banketts beim Modell 3.1 rechnerisch zu einem größeren Kernabfluss und zu einem geringeren Dränschichtabfluss.

Aus dem Vergleich der Berechnungen mit 100%-Bankett und Bankett-1/3 Oberboden zeigt sich, dass unabhängig vom Bankettmaterial die Verteilung des Niederschlages, der nicht vom Bankett aufgenommen werden kann, auf das obere Drittel des Oberbodens erwartungsgemäß zu einer Reduzierung des Oberflächenabflusses führt. Dennoch verbleibt ein Oberflächenabfluss von ca. 3,2 %. Dieser resultiert fast vollständig aus dem Bereich des Banketts. Theoretisch könnte in weiteren iterativen Berechnungen dieser Anteil wieder auf den Oberboden umverteilt werden und damit der Oberflächenabfluss weiter reduziert werden. Jedoch ist in diesem Zusammenhang zu beachten, dass die Berechnungen unter Ansatz von Tageswerten des Niederschlages durchgeführt wurden, was zu niedrigeren Niederschlagsintensitäten und einer höheren Infiltration im Vergleich zu den tatsächlichen Niederschlagsereignissen führt. Der noch rechnerisch ermittelte Oberflächenabfluss von 3,2 % wird deshalb bereits als sehr niedrig angenommen und es wurde eine weitere Berechnung unter Umverteilung des Oberflächenabflusses als nicht zielführend erachtet. Weiter ist aus einem Vergleich der Modelle zu erkennen, dass sich trotz der höheren Infiltration bei den modifizierten Modellen (Bankett-1/3 Oberboden) der Kernabfluss nur geringfügig erhöht.

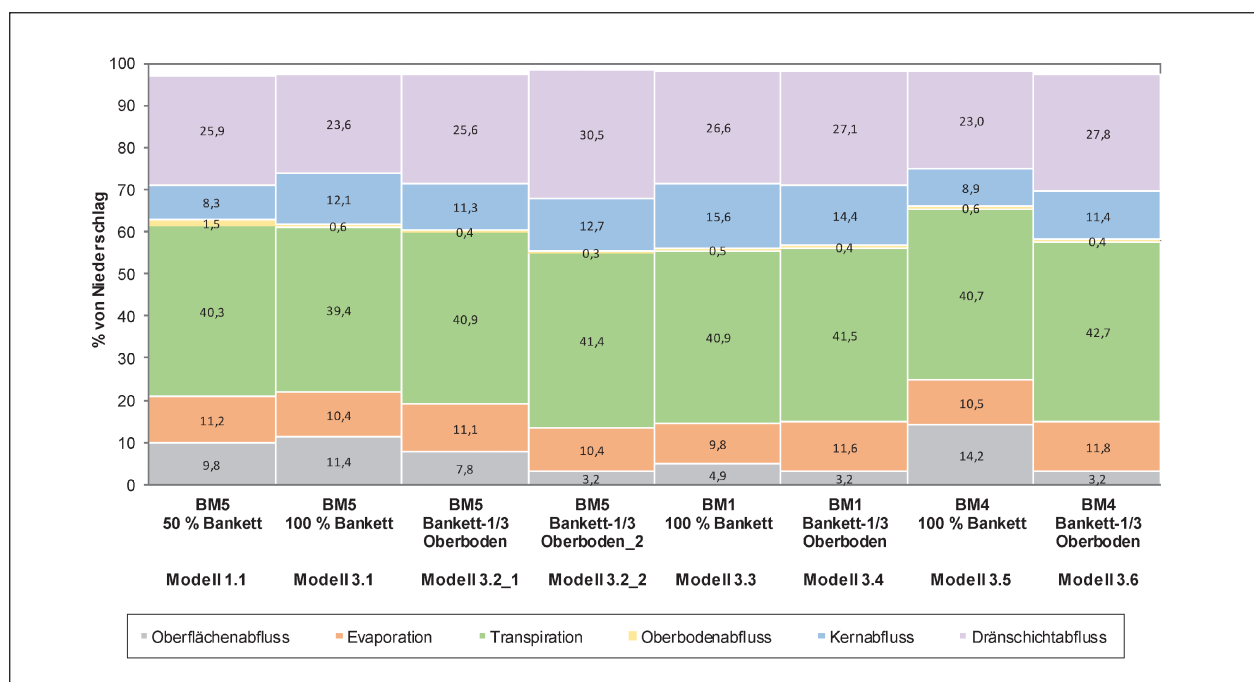


Bild 64: Vergleich der Modelle mit unterschiedlichen Bankettmaterialien bzw. unterschiedlicher Straßenabflussverteilung

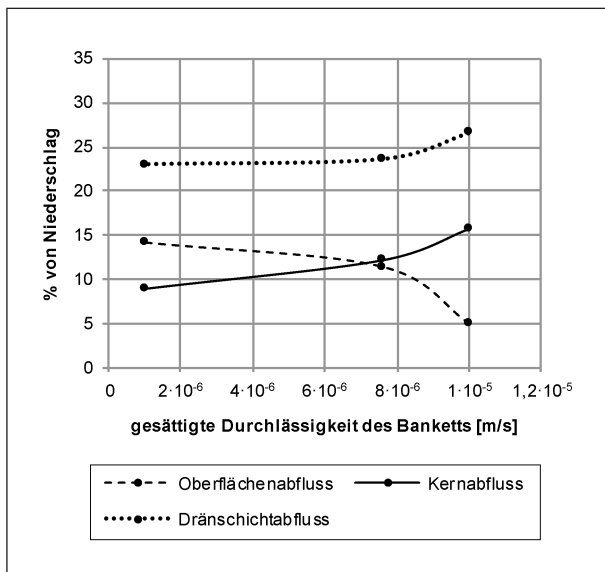


Bild 65: Abflüsse in Abh. von der gesättigten Durchlässigkeit des Banketts bei den Berechnungen in denen der Straßenabfluss vollständig auf das Bankett aufgebracht wurde

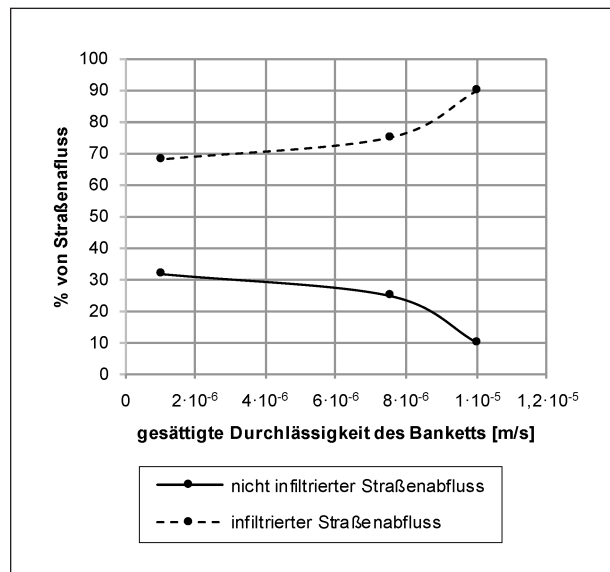


Bild 66: Einfluss der gesättigten Durchlässigkeit des Banketts auf die Versickerung des Straßenabflusses bei den Berechnungen in denen der Straßenabfluss vollständig auf das Bankett aufgebracht wurde

Dies liegt daran, dass ein Teil des zusätzlich infiltrierenden Niederschlages als Evapotranspiration wieder an die Atmosphäre abgegeben wird bzw. als Zwischenabfluss in der Dränschicht abgeführt wird.

Um den Einfluss des gesättigten Durchlässigkeitsbeiwertes des Banketts auf die Wasserbilanz des Straßendammes zu beurteilen, wurden die 100%-Bankett-Modelle miteinander verglichen. In Bild 65 ist der Zusammenhang zwischen dem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert und dem Oberflächen-, Kern- und Dränschichtabfluss dargestellt. Da der Oberflächenabfluss bei allen drei Modellen ähnlich ist, wurde er nicht abgebildet. Mit zunehmender Durchlässigkeit nimmt der Oberflächenabfluss erwartungsgemäß ab und nehmen gleichzeitig Kern- und Dränschichtabfluss zu. Die Auswertung in Bild 66 stellt dar, welcher Anteil des Straßenabflusses im Bereich des Banketts infiltriert. Es ist zu erkennen, dass bei einem Durchlässigkeitsbeiwert des Banketts von  $k_{\text{sat}} \geq 1,0 \cdot 10^{-5}$  m/s mehr als 90 % des Straßenabflusses im Bereich des Banketts versickern und weniger als 10 % als Oberflächenabfluss abfließen. Bei einem Bankettmaterial, das den Anforderungen der ZTV E-StB 2017 hinsichtlich des Durchlässigkeitsbeiwertes erfüllt (gering durchlässiges Bankettmaterial, d. h.  $k_{\text{sat}} \leq 1,0 \cdot 10^{-6}$  m/s) kann davon ausgegangen werden, dass ca. 35 % des Straßenabflusses über das Bankett oberflächlich abfließt.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden auf Grundlage einer Literaturrecherche zunächst die neben den Untersuchungen von SCHWELLER et al. (2009) und MICHAELIDES et al. (2013) vorliegenden Erkenntnisse zum Wasserhaushalt von Straßendämmen und zu den hydraulischen Eigenschaften von Ersatzbaustoffen zusammengetragen.

Anschließend wurden Simulationsberechnungen zum Wasserhaushalt von Straßendämmen an einem 4 m hohen Straßendamm durchgeführt, wobei zwei Situationen unterschieden wurden:

- Grundmodell 1: Straßendamm mit einer technischen Sicherungsmaßnahme (Dränschicht) in Anlehnung an Bauweise E nach MTSE (2009).
- Grundmodell 2: Straßendamm ohne technische Sicherungsmaßnahme (Dränschicht).

Die Berechnungen wurden mit der Finite-Elemente-Software VADOSE/W durchgeführt. Es wurden für beide Grundmodelle zunächst jeweils sieben Berechnungen durchgeführt, wobei jeweils die im Straßendamm (Unterbau) eingesetzten Materialien (Böden bzw. Baustoffe mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen – Bum!) variiert wurden. Als Materialien für den Straßendamm wurden zwei Böden, zwei RC-Baustoffe, zwei Hausmüllverbrennungssaschen (HMVA) und eine Stahlwerksschlacke (SWS) be-

trachtet. Mit den gewählten Baustoffen wurde eine große Stoffgruppe von mittel bis gering durchlässigen Materialien abgedeckt.

Um die Berechnungsergebnisse mit den im Rahmen des Forschungsvorhabens FE 84.105 erzielten Ergebnissen vergleichen zu können, wurde eine ergänzende Berechnung mit einem organischen Ton (OT nach DIN 18196) mit einem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert  $k = 1 \cdot 10^{-8}$  m/s als Baustoff für den Straßendamm durchgeführt.

Außerdem wurden sechs ergänzende Berechnungen zur Auswirkung der Eigenschaften des Bankettmaterials bzw. zum Einfluss der Verteilung des Straßenabflusses auf den Wasserhaushalt der untersuchten Straßendämme vorgestellt. Dazu wurden Berechnungen mit drei unterschiedlichen Bankettmaterialien und jeweils zwei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen im Bereich des Banketts und der Böschung durchgeführt. Die Niederschlagsverteilungen berücksichtigen sowohl den direkt auf das Bankett und den Oberboden auftreffenden Niederschlag als auch die infolge des Straßenabflusses in den jeweiligen Bereichen anfallende zusätzliche Wassermenge.

Aus den Berechnungsergebnissen lässt sich Folgendes ableiten:

- Die Sickerwassermenge aus dem Straßendamm (Kernabfluss) liegt bei den Modellen ohne Dränschicht im Bereich von ca. 29 % bis 39 % (bezogen auf den Niederschlag), solange der Durchlässigkeitsbeiwert des Kernmaterials  $k \geq 1 \cdot 10^{-8}$  m/s ist. Erst bei einem Durchlässigkeitsbeiwert  $k \leq 1 \cdot 10^{-8}$  m/s nimmt die Sickerwassermenge aus dem Kern deutlich ab. Außerdem zeigen die Berechnungen, dass die Sickerwassermenge bei den Materialien mit einem Durchlässigkeitsbeiwert  $k \geq 1 \cdot 10^{-8}$  m/s nicht in eine direkte Abhängigkeit vom gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert des Kernmaterials gebracht werden kann. Bei der Beurteilung der genannten Werte ist zu beachten, dass die Berechnungen nur für die Seite des Straßendamms durchgeführt wurden, auf der infolge des Straßenabflusses mit einer höheren Sickerwassermenge zu rechnen ist. Für den gesamten Straßendamm würden sich deshalb geringere Sickerwassermengen ergeben.
- Die Verwendung einer Dränschicht oberhalb des Kernmaterials führt zu einer signifikanten Reduktion des Sickerwassers aus dem Kern. So beträgt der Kernabfluss abgesehen vom Modell mit Stahlwerksschlacke bei den Materialien mit einem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert  $k \geq 1 \cdot 10^{-8}$  m/s zwischen 3,6 % und 10,8 % des Niederschlags. Bei Ansatz der Stahlwerksschlacke (SWS) als Kernmaterial liegt der Kernabfluss bei 20,8 %. Die Berechnung mit dem organischen Ton als Kernmaterial ( $k_{\text{sat}} = 1 \cdot 10^{-8}$  m/s) ergab einen Kernabfluss von 1,4 %.
- Die Berechnungsergebnisse am Modell mit Dränschicht belegen, dass der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert des Kernmaterials für die hier betrachteten, überwiegend durchlässigen Materialien kein geeigneter Indikator ist, um die Höhe der Kerndurchsickerung zu prognostizieren. Die Berechnung mit dem Ton mit organischen Beimengungen als Kernmaterial (OT) ergibt aufgrund des sehr geringen gesättigten Durchlässigkeitsbeiwertes des Tones (kleiner als  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s entsprechend den Anforderungen nach MTSE) erwartungsgemäß eine sehr geringe Durchsickerung des Kerns und bestätigt damit die Eignung der Bauweise E nach MTSE zur Minimierung der Durchsickerung von Böden bzw. Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen. Mit zunehmendem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert des Kernmaterials nimmt die Durchsickerung des Kerns aber nicht in gleicher Weise zu. Dies zeigt sich am deutlichsten an der Berechnung mit der HMVA1. Obwohl diese mit  $k_{\text{sat}} = 6,4 \cdot 10^{-5}$  m/s die höchste gesättigte Durchlässigkeit aller untersuchten Kernmaterialien aufweist, ist der ermittelte Kernabfluss mit 3,6 % des Niederschlages sehr niedrig. Die Wirksamkeit der Dränschicht und der sich ergebende Kernabfluss werden dagegen maßgeblich von der hydraulischen Leitfähigkeit des Kernmaterials im ungesättigten Zustand, und dabei besonders im Bereich der sich einstellenden Saugspannungen an der Grenze zwischen Dränschicht und Kern, beeinflusst.
- Die zusätzlichen Berechnungen zum Einfluss des Bankettmaterials zeigen, dass bei einem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert des Bankettmaterials von  $k_{\text{sat}} \geq 1,0 \cdot 10^{-5}$  m/s der Straßenabfluss zu 90 % im Bereich des Banketts versickern kann. Bei dem gemäß den ZTV E-StB 2017 geforderten gering durchlässigen Bankettmaterial ( $k_{\text{sat}} = 1,0 \cdot 10^{-6}$  m/s) kann davon ausgegangen werden, dass ca. 65 % im Bankettbereich versickern und 35 % des Straßenabflusses über das Bankett oberflächlich abfließt.

- Die zusätzlichen Berechnungen zur Verteilung des Straßenabflusses auf Bankett und Oberboden zeigen, dass die Verteilung des Straßenabflusses auf Bankett und Oberboden im Modell insbesondere bei gering durchlässigen Bankettmaterialien einen Einfluss auf die Sickerwassermenge und den Dränschichtabfluss hat. Für Bankettmaterialien mit einem Durchlässigkeitsbeiwert  $k_{\text{sat}} \geq 1,0 \cdot 10^{-5}$  m/s kann vereinfachend der Straßenabfluss im Modell zu 100 % auf das Bankett aufgebracht werden, ohne dass dadurch signifikante Ungenauigkeiten hinsichtlich des Wasserhaushaltes zu erwarten wären. Bei Bankettmaterialien mit einem Durchlässigkeitsbeiwert im Bereich von  $k_{\text{sat}} = 1,0 \cdot 10^{-6}$  m/s wird für zukünftige Berechnungen empfohlen, ca. 2/3 des Straßenabflusses auf dem Bankettbereich und ca. 1/3 im Bereich des Oberbodens aufzubringen. Für Bankettmaterialien mit einem Durchlässigkeitsbeiwert zwischen  $k_{\text{sat}} \geq 1,0 \cdot 10^{-6}$  m/s und  $k_{\text{sat}} \leq 1,0 \cdot 10^{-5}$  m/s wird dementsprechend je nach k-Wert eine Berechnung mit einem Ansatz von 65 % bis 100 % des Straßenabflusses im Bereich des Banketts und dem Rest im Bereich des Oberbodens als ausreichend realitätsnah beurteilt. Allerdings ist diesbezüglich zu beachten, dass die Größe des Straßenabflusses direkt von der Niederschlagshöhe und -verteilung abhängt und die genannten Anteile der Versickerung nur für die untersuchten Verhältnisse gelten (durchschnittlicher Jahresniederschlag 828 mm/a). Prinzipiell bestätigen die Ergebnisse der Simulationsberechnungen damit aber auch die publizierten Ergebnisse zum Wasserhaushalt von Straßendämmen, wonach sich die Infiltration des Straßenabflusses bei geringen Niederschlagsintensitäten im Wesentlichen auf den Bankettbereich von Straßenböschungen beschränkt.
  - Die bei Grundmodell 1 und 2 zugrunde gelegte Verteilung des Straßenabflusses halb auf Bankett und halb auf Oberboden führt tendenziell zu etwas geringeren Sickerwassermengen aus dem Kern vergleichen zum Ansatz von 100 % des Straßenabflusses auf dem Bankett. Dennoch wird der Einfluss aus den unterschiedlichen Verteilungen des Straßenabflusses im Vergleich zu anderen Einflussfaktoren (beispielsweise den hydraulischen Eigenschaften der Dränschicht) als nicht maßgeblich für den Wasserhaushalt der betrachteten Straßendämme erachtet.
  - Insbesondere bei gering durchlässigen Bankettmaterialien, auf denen ein Teil des Straßenabflusses oberflächlich abfließt und nicht infiltriert, hat auch der Oberboden einen maßgeblichen Einfluss auf den Wasserhaushalt. Die im Rahmen der Voruntersuchungen durchgeführten Berechnungen zeigen, dass der Oberflächenabfluss sehr stark von der minimalen Leitfähigkeit des Oberbodens bei niedrigen Wassergehalten bzw. hohen Saugspannungen, die beispielsweise nach längeren Trockenperioden vorliegen können, abhängt. Mit dem häufig verwendeten Modell nach van Genuchten-Mualem nimmt die hydraulische Leitfähigkeit mit abnehmendem Wassergehalt stark ab und führt bei niedrigen Wassergehalten zu sehr geringen Werten der hydraulischen Leitfähigkeit. Die durchgeführten Berechnungen zeigen, dass diese Abnahme der Leitfähigkeit begrenzt werden sollte, indem eine minimale hydraulische Leitfähigkeit festgelegt wird. Gemäß den durchgeführten Untersuchungen sollte diese im Bereich von ca.  $k_{\text{sat}} = 1,0 \cdot 10^{-8}$  m/s liegen.
  - Einen wesentlichen Einfluss auf den Wasserhaushalt von Straßendämmen hat die Dränschicht. In den Modellberechnungen wurde diese mit hydraulischen Kennwerten einer Kieschicht belegt, wobei die Kennwerte dem Forschungsvorhaben 05.185 „Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST“ (MELSBACH et al., 2018) entnommen worden waren. Darin wurden die hydraulischen Kennwerte der verwendeten Dränmatte aus einer Nachrechnung von experimentellen Untersuchungen abgeleitet.
- Die Berechnungen zeigen, dass die Bauweise E nach MTSE, welche an das Kernmaterial eine Anforderung an den Durchlässigkeitsbeiwert  $k_{\text{sat}} \leq 1,0 \cdot 10^{-8}$  m/s stellt, geeignet ist, um die Durchsickerung von Böden/Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen zu minimieren. Gleichzeitig ist aus den Berechnungen erkennbar, dass auch für deutlich durchlässigere Materialien mit der Verwendung einer Dränmatte die Sickerwassermengen maßgeblich reduziert werden können. Trotz der Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben FE 05.185 bestehen aber noch erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich des Ansatzes der hydraulischen Eigenschaften von geosynthetischen Dränelementen (Dränmatten) in numerischen Berechnungen. Es sollten deshalb zusätzliche Untersuchungen durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass Dränmatten in nume-



rischen Berechnungen zutreffend abgebildet werden. Dazu sollte untersucht werden, inwieweit die Wasserbewegung in Dränmatten im ungesättigten Zustand in Modellberechnungen basierend auf der Richards-Gleichung abgebildet werden kann und mit welchen hydraulischen Kennwerten (Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung und ungesättigte hydraulischen Leitfähigkeit) Dränmatten belegt werden sollten.

## Literatur

- Ad-hoc-AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5 Aufl., Hannover, S. 345
- 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 13.11.2017
- ALONSO, E. (1998): Suction and moisture regimes in roadway bases and subbases. In: Proceedings of the International Symposium in Roadway Pavements and Subgrades, Granada, Spain, pp. 3-56, 56-104, zitiert in DAWSON (2008)
- ALONSO, E.; CAÑETE, A.; OLIVELLA, S. (2002): Moisture transfer and deformation behaviour of pavements: effects of climate, materials and drainage. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Unsaturated Soils, Recife, Brazil, Vol. 2, pp. 671-678, zitiert in DAWSON (2008)
- 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
- AZAM, A. M.; CAMERON, D. A.; GABR, A. G.; RAHMAN, M. M. (2014): Matric Suction in Recycled Unbound Granular Materials. In: Geotechnical Special Publication, pp. 1367-1376
- BARBOUR, S. L.; FREDLUND, D. G.; GAN, J. K.-M.; WILSON, G. W. (1992): Prediction of Moisture Movement in Highway Subgrade Soils. In: Proceedings of the 45th Annual Canadian Geotechnical Conference, Toronto, Canada
- BAUMGÄRTEL, T.; HEYER, D.; STIEGELER, R. (2006): Aufbereitung und Einbau veränderlich fester Gesteine, Forschung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (FGSV), Heft Nr. 931
- 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, pp. 839-850
- BEYER, W. (1964): Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve. WWT 14, S. 165-168, Berlin
- BIGL, S. R.; BERG, R. L. (1996): Testing of Materials from the Minnesota Cold Regions Pavement Research Test Facility, CRREL: 38
- BÜRGER, M.; KOCHER, B.; MARKS, T.; HILLMANN, R. (2008): Arbeitsentwurf der Ersatzbaustoffverordnung: Modellannahmen für Straßenbauwerke – Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen von Juli 2008
- 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
- DEMOND, D.; MIELKE, T.; BIALUCHA, R.; LUPASCHU, D. C. (2016): Verknüpfung von Emissionsminderung und Ressourcenschonung durch innovatives Asphaltmischgut mit industriellen Nebenprodukten. Schlussbericht zum AiF Forschungsvorhaben FV 18237

- DAWSON, A. (2008): *Water in Road Structures: Movement, Drainage and Effects*. Springer Verlag, S. 263-264
- Department of Planning, Transport and Infrastructure (DPTI) (2011): Part 215 Pavement Materials. Master specification. Division 2, Road Works
- Deutscher Wetter Dienst: [www.dwd.de](http://www.dwd.de)
- EDLEFSEN, N. E.; ANDERSON, A. B. C. (1943): Thermodynamics of Soil Moisture, *Hilgardia*, Vol. 15, S. 31-298, zitiert in FREDLUND und RAHARDJO (1993)
- 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
- Engineering Toolbox: <https://www.engineeringtoolbox.com>, Zugriff am 28.09.2018
- FGSV (1998): Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigung von Verkehrsflächen, FGSV Verlag, Köln
- FGSV (2009): Merkblatt über Bauweisen für Technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltstoffen im Erdbau, FGSV Verlag, Köln
- FGSV (2017): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTV E-StB), FGSV Verlag, Köln
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. (1993): *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons, Inc.
- 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
- GOMEZ, A. M. J.; MUNIZ, M. F.; NETO, M. P. C.; CALLE, I. F. O. (2014): Water Retention Curve and Particle Breakage of Aggregates Recycled from Demolition Waste. In: *Journal of Civil Engineering and Architecture*, Vol. 8, No. 9, pp. 1194-1203
- GOULD, S.; RAJEEV, P.; KODIKARA, J.; ZHAO, X.; BURN, S.; MARLOW, D. (2012): A new method for developing equations applied to the water retention curve. In: *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 6, No. 3, pp. 806-814
- GUPTA, S. C.; KANG, D. H.; RANAIVOSOON, A. (2009): *Hydraulic and Mechanical Properties of Recycled Materials*. Final Report Nr. 2009-32, Minnesota Department of Transportation, Research Service Section
- 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
- HENZINGER et al. (2016): Ressourcenschonung – Bedingungen für die Verwendung organogener und weicher Böden sowie von Sekundärbaustoffen als Massenbaustoffe im Erdbau, Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau. Schlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FE 05.0166/2011/ERB vom Juni 2016 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen
- HOUSTON, W. N.; DYE, H. B.; ZAPATA, C. E.; PERERA, Y. Y.; HARRAZ, A. (2006): Determination of SWCC using one point suction measurement and standard curves. *ASCE Geotechnical Special Publication*, Vol. 147, pp. 1482-1493
- JOHANSEN, O. (1975): *Thermal Conductivity of Soils*. Ph.D. Thesis, Trondheim, Norway. (CRREL Draft Translation 637, 1977), ADA044002, zitiert in TEMP/W (2014)

- JOHNSTON, G. H.; LADANYI, B.; MORGENSTERN, N. R., PENNER, E. (1981): Engineering Characteristics of Frozen and Thawing Soils. Permafrost Engineering Design and Construction. Edited by Johnston, G.H. John Wiley & Sons, zitiert in TEMP/W (2014)
- KELLERMANN-KINNER, C.; BÜRGER, M.; MARKS, T. (2016): Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen. Teil 1: Bodenmaterial. Bericht im Antrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen
- KELLERMANN-KINNER, C.; BÜRGER, M.; MARKS, T. (2017): Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen. Teil 2: Recycling Baustoff und industrielle Nebenprodukte. Bericht im Antrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen
- KOUKOULIDOU, A; BIRLE, E.; HEYER, D. (2014): Baustoffe für standfeste Bankette, Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau. Schlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FE 05.177 vom Oktober 2014 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen
- LEONG, E. C.; RAHARDJO, H. (1997): Review of Soil-Water Characteristic Curve Equations. In: Journal for Geotechnical und Geoenvironmental Engineering, Vol. 123, No. 12, pp. 1106-1117
- MELSBACH, M.; BIRLE, E.; HEYER, D. (2018): Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST. Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau. 2. Zwischenbericht zu FE 05.185/2014/CRB im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen
- MICHAELIDES, G.; KOUKOULIDOU, A.; BIRLE, E.; HEYER, D. (2013): Strömungsmodelle zur Simulation der Durchsickerung von Straßenbauwerken mit Implementierung hydrologischer Parameter. Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau, Forschungsbericht zu FE 84.105/2009 vom August 2013 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die 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
- MUALEM, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, Vol. 12, pp. 513-522
- NGUYEN, Q.; FREDLUND, D. G.; SAMARASEKERA, L., MARJERISON, B. L. (2010): Seasonal Pattern of matric suction in highway subgrades. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 47, pp. 267-280
- NOKKAEW, K; TINJUM, J. M.; BENSON, C. H. (2012): Hydraulic Properties of Recycled Asphalt Pavement and Recycled Concrete Aggregate. GeoCongress, ASCE, Geotechnical Special Publication, No. 225, pp. 1476-1485
- NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; ARBAT, G.; GARCIA NIETO, P. J.; CASTRO-FRESNO, D. (2012): Nonlinear numerical simulation of rainwater infiltration through road embankments by FEM. Applied Mathematics and Computation, Vol. 219, pp. 1843-1852
- PENMAN, H. L. (1956): Estimating Evaporation. Trans. Amer. Geophys. Union 37, pp. 43-46
- RAHARDJO, H.; VILAYVONG, K.; LEONG, E. C. (2010): Water Characteristic Curves of Recycled Materials. In: Geotechnical Testing Journal, Vol. 34, No. 1, pp. 1-8
- SCHARNAGL, B.; DURNER, W. (2014): Abschlussbericht zum Forschungsprojekt „Bestimmung von Wassergehalts-Saugspannungsfunktionen für Böden, RC-Baustoffe und HMVA“. Schlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FE 05.162/2011/LRB im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen

- SCHWELLER, G.; BIRLE, E.; HEYER, D. (2009): Geohydraulische Bewertung technischer Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltstoffen im Erdbau. Lehrstuhl und Prüfamft für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau, Schlussbericht zum Forschungsvorhaben FE 05.147/2007/CGB vom Oktober 2009 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen
- STALTER, S.; BIRLE, E.; HEYER, D.; VOGT, N. (2013): Untersuchungen zur Verdichtbarkeit von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltstoffen im Hinblick auf die Erzielung möglichst gering durchlässiger Erdbaukörper. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1098
- TEMP/W (2014): Thermal Modeling with TEMP/W, Edition September 2014, GEO-SLOPE International Ltd., Canada
- VADOSE/W (2014): Vadose Zone Modeling with VADOSE/W, edition, April 2014, GEO-SLOPE International Ltd., Canada
- VAN GENUCHTEN, M. T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. In: Journal of Soil Science Society of America, 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. (2014): Untersuchungen zur Optimierung von Schadstoffrückhalt und Standfestigkeit von Banketten, Technische Universität Berlin FG Standortkunde Bodenschutz, Schlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FE-Nr. 05.160
- WILSON, G. W. (1990): Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems, Dissertation, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, zitiert in VADOSE/W (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
- 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
- Zentrum Geotechnik der TU München (2008): Prüfbericht Proj.Nr. 7200/570/213 mit den Ergebnissen der im Zuge der Eignungsprüfungen im Rahmen des F&E Vorhabens durchgeführten bodenmechanischen Untersuchungen mit Datum vom 12.12.2008. Unveröffentlichter Bericht

## Bilder

- Bild 1: Bauweise E nach MTSE
- Bild 2: Geometrie von Grundmodell 1
- Bild 3: Geometrie von Grundmodell 2
- Bild 4: Finite-Elemente Netz
- Bild 5: Randbedingungen
- Bild 6: Niederschlagstageswerte von DWD für München Flughafen von 01.10.1992 bis 31.12.2002
- Bild 7: Anteile der Strahlung nach ALLEN et al. (1998)
- Bild 8: Vergleich der berechneten Nettostrahlung mit den gemessenen Werten für den Flughafen München
- Bild 9: Niederschlags-Abflusskurve für Tagesniederschläge auf einer versiegelten Fläche (BÜRGER et al., 2008)
- Bild 10: Blattflächenindexfunktion (VADOSE/W, 2014)
- Bild 11: Verhältnis der tatsächlichen Evapotranspiration zur potenziellen Evapotranspiration in Abhängigkeit von der Saugspannung

- Bild 12: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen von Oberboden, Bankett, Frostschuttschicht und Dränschicht
- Bild 13: Hydraulische Leitfähigkeitsfunktionen von Oberboden, Bankett, Frostschuttschicht und Dränschicht
- Bild 14: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen der unterschiedlichen Kernmaterialien gemäß SCHARNAGL und DURNER
- Bild 15: Hydraulische Leitfähigkeitsfunktionen der unterschiedlichen Kernmaterialien gemäß SCHARNAGL und DURNER
- Bild 16: Für die Modellierung verwendete Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen
- Bild 17: Für die Modellierung verwendete hydraulische Leitfähigkeitsfunktionen
- Bild 18: Berechnungsergebnisse der an der Oberfläche stattfindenden Prozesse für unterschiedliche minimale Durchlässigkeiten des Oberbodens
- Bild 19: Vergleich der Ergebnisse für die unterschiedlichen Fahrbahnabflussverteilungen (Wasserbilanz)
- Bild 20: Vergleich der Ergebnisse für die unterschiedlichen Fahrbahnabflussverteilungen (Infiltration)
- Bild 21: Wasserbilanz des Modells 1.1 (BM1 Bauweise E)
- Bild 22: Wasserbilanz des Modells 1.2 (BM2 Bauweise E)
- Bild 23: Wasserbilanz vom Modell 1.3 (RC2 Bauweise E)
- Bild 24: Wasserbilanz vom Modell 1.4 (RC5 Bauweise E)
- Bild 25: Wasserbilanz des Modells 1.5 (HMVA1 Bauweise E)
- Bild 26: Wasserbilanz des Modells 1.6 (HMVA3 Bauweise E)
- Bild 27: Wasserbilanz des Modells 1.7 (SWS Bauweise E)
- Bild 28: Wasserbilanz des Modells 1.8 (OT Bauweise E)
- Bild 29: Wasserbilanz des Modells 2.1 (BM1 ohne TSM)
- Bild 30: Wasserbilanz des Modells 2.2 (BM2 ohne TSM)
- Bild 31: Wasserbilanz des Modells 2.3 (RC2 ohne TSM)
- Bild 32: Wasserbilanz des Modells 2.4 (RC5 ohne TSM)
- Bild 33: Wasserbilanz des Modells 2.5 (HMVA1 ohne TSM)
- Bild 34: Wasserbilanz des Modells 2.6 (HMVA3 ohne TSM)
- Bild 35: Wasserbilanz des Modells 2.7 (SWS ohne TSM)
- Bild 36: Wasserbilanz des Modells 2.8 (OT ohne TSM)
- Bild 37: Vergleich der Modelle mit Dränschicht (Grundmodell 1)
- Bild 38: Saugspannungen in Abhängigkeit von der Zeit an unterschiedlichen Positionen im oberen Teil des Kerns für Modell 1.6 (HMVA 3)
- Bild 39: Saugspannungen in Abhängigkeit von der Zeit an unterschiedlichen Positionen im oberen Teil des Kerns für Modell 1.7 (SWS)
- Bild 40: Saugspannungen in Abhängigkeit von der Zeit an unterschiedlichen Positionen im oberen Teil des Kerns für Modell 1.8 (OT)
- Bild 41: Schwankungsbereich der Saugspannungen (blauer Bereich) im oberen Teil des Kerns für Grundmodell 1
- Bild 42: Verhältnis zwischen gesättigter Durchlässigkeit des Kerns und Kernabfluss für Grundmodell 1
- Bild 43: Vergleich der Modelle ohne technische Sicherungsmaßnahmen (Grundmodell 2)
- Bild 44: Saugspannungen in Abhängigkeit von der Zeit an unterschiedlichen Positionen im oberen Teil des Kerns für Modell 2.6 (HMVA 3)



- Bild 45: Saugspannungen in Abhängigkeit von der Zeit an unterschiedlichen Positionen im oberen Teil des Kerns für Modell 2.7 (SWS)
- Bild 46: Saugspannungen in Abhängigkeit von der Zeit an unterschiedlichen Positionen im oberen Teil des Kerns für Modell 2.8 (OT)
- Bild 47: Schwankungsbereich der Saugspannungen (blauer Bereich) im oberen Teil des Kerns für Grundmodell 2
- Bild 48: Verhältnis zwischen gesättigter Durchlässigkeit des Kerns und Kernabfluss für Grundmodell 2
- Bild 49: Vergleich der Modelle ohne (Grundmodell 1) und mit Dränschicht (Grundmodell 2)
- Bild 50: Kernabflüsse bei Bauweisen mit Dränschicht bezogen auf Kernabflüsse bei Bauweisen ohne Dränschicht
- Bild 51: Geometrie des Modells im Rahmen des Forschungsvorhabens FE 84.105
- Bild 52: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen für die unterschiedlichen Materialien
- Bild 53: Hydraulische Leitfähigkeitsfunktionen für die unterschiedlichen Materialien
- Bild 54: Vergleich der Ergebnisse des Modells 1.8 mit den Ergebnissen aus FE 84.105
- Bild 55: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen für die unterschiedlichen Bankettmaterialien
- Bild 56: Hydraulische Leitfähigkeitsfunktionen für die unterschiedlichen Bankettmaterialien
- Bild 57: Wasserbilanz des Modells 3.1 (BM5 100 % Bankett)
- Bild 58: Wasserbilanz des Modells 3.2 (BM5 Bankett-1/3 Oberboden)
- Bild 59: Wasserbilanz des modifizierten Modells 3.2 (BM5 Bankett-1/3 Oberboden\_2)
- Bild 60: Wasserbilanz des Modells 3.3 (BM1 100 % Bankett)
- Bild 61: Wasserbilanz des Modells 3.4 (BM1 Bankett 1/3 Oberboden)

- Bild 62: Wasserbilanz des Modells 3.5 (BM4 100 % Bankett)
- Bild 63: Wasserbilanz des Modells 3.6 (BM4 Bankett-1/3 Oberboden)
- Bild 64: Vergleich der Modelle mit unterschiedlichen Bankettmaterialien bzw. unterschiedlicher Straßenabflussverteilung
- Bild 65: Abflüsse in Abh. von der gesättigten Durchlässigkeit des Banketts bei den „100 % Bankett“-Berechnungen
- Bild 66: Einfluss der gesättigten Durchlässigkeit des Banketts auf die Versickerung des Straßenabflusses

## Tabellen

- Tab. 1: Übersicht über die verwendeten Materialien für Oberboden, Bankett, Frostschuttschicht und Dränschicht
- Tab. 2: van Genuchten-Parameter für den Oberboden, die Dränschicht und den organischen Ton (OT)
- Tab. 3: Übersicht über die Materialien im Dammkern
- Tab. 4: Thermische Eigenschaften der unterschiedlichen Materialien
- Tab. 5: Übersicht über die durchgeführten Berechnungen
- Tab. 6: Übersicht über die zusätzlichen Berechnungen

## 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 Verdichtungsrolle 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, Miehlung

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, Scherckenbach, 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**

Dumer

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.

S 148: **Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken**

Freudenstein, Eger, Pichottka, Riwe, K. Villaret, S. Villaret, Frohböse

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

S 149: **Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen**

Koukoulidou, Birle, Cudmani

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

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