

# **Strömungsmodelle zur Simulation der Durchsickerung von Straßenbauwerken mit Implementierung hydrologischer Parameter**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 176**

**bast**

# **Strömungsmodelle zur Simulation der Durchsickerung von Straßenbauwerken mit Implementierung hydrologischer Parameter**

von

Gabriele Michaelides  
Andromachi Koukoulidou  
Emanuel Birle  
Dirk Heyer  
Norbert Vogt

Lehrstuhl und Prüfamnt für  
Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau  
TU München

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 176**

**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 84.0105**

Strömungsmodelle zur Simulation der Durchsickerung von Straßenbauwerken mit Implementierung hydrologischer Parameter

### **Fachbetreuung**

Roderich Hillmann

### **Referat**

Nachhaltigkeit, Ressourcenschutz und Erdbaustoffe im Straßenbau

### **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 978-3-95606-678-8

Bergisch Gladbach, März 2022

## Kurzfassung – Abstract

### **Strömungsmodelle zur Simulation der Durchsickerung von Straßenbauwerken mit Implementierung hydrologischer Parameter**

Bei Verwendung von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen (BumI) in Erdbauwerken sind gegebenenfalls technische Sicherungsmaßnahmen zu ergreifen, um in umweltspezifischer und wasserwirtschaftlicher Hinsicht einen verantwortungsvollen Einsatz dieser Materialien zu gewährleisten. Die technischen Sicherungsmaßnahmen sind dabei so zu gestalten, dass eine Durchsickerung der Böden und Baustoffe mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen und damit ein möglicher Austrag von Schadstoffen auf ein verträgliches Maß minimiert werden.

Das Merkblatt über Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau (MTS E) stellt insgesamt sechs unterschiedliche Bauweisen für Straßendämme, die entsprechend auch auf andere Erdbauwerke (z.B. Lärm- und Sichtschutzwälle) übertragbar sind, vor. Diese können prinzipiell in Bauweisen mit Abdichtungen (Bauweisen A, B, C), Bauweisen mit gering durchlässigem Körper aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen (Bauweise E) und Kernbauweisen ohne Abdichtungen (Bauweise D) unterschieden werden.

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bau, Verkehr und Stadtentwicklung geförderten Forschungsvorhabens wurden am Zentrum Geotechnik der TU München von SCHWELLER ET AL. (2009) Berechnungen zur Bewertung der Wirksamkeit der Bauweisen durchgeführt. Anhand dieser Berechnungen konnte die prinzipielle Wirksamkeit der Bauweisen A, B und D belegt werden. Für die Bauweise E ergaben sich vergleichsweise große Sickerwassermengen. Die Berechnungen wurden allerdings mit einem Durchschnittswert des Niederschlages, der aus dem Gesamtjahresniederschlag verteilt auf 365 Tage ermittelt wurde, durchgeführt. Dadurch kommt es rechnerisch zu konstanten kleinen Infiltrationsmengen in den Straßendamm ohne Ausbildung eines Oberflächenabflusses. Damit verbunden sind unrealistisch hohe Sickerwassereintritte in die Ersatzbaustoffe. Die Wirksamkeit der Bauweise E konnte deshalb im Rahmen der Untersuchungen von Schweller et al. nicht abschließend bewertet werden.

Basierend auf den am Zentrum Geotechnik der TU München von Schweller et al. durchgeführten Untersuchungen wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens FE 84.105 Berechnungen zur Durchsickerung der Bauweise E unter Ansatz von Tageswerten des Niederschlages, der Evapotranspiration und des Oberflächenabflusses durchgeführt. Die mit VADOSE/W durchgeführten Berechnungen zeigen, dass die Vergleichmäßigung der Infiltration bei einer Berechnung mit Durchschnittswerten der Infiltration zu ca. 1,7-fach größeren Sickerwassermengen als beim Ansatz von Tageswerten führt. Die mit Tageswerten der Klimadaten für einen Zeitraum von 10 Jahren durchgeführten Berechnungen ergaben für die Bauweise E bei einem Durchlässigkeitsbeiwert des Kerns von  $k = 1 \cdot 10^{-8}$  m/s eine mittlere Sickerwassermenge aus dem Kern von ca. 60 mm/a.

## **Simulation of seepage flow in earth constructions under consideration of hydrologic data**

Contaminated soils and recycled materials 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 (M TS E, 2008). The design principle of such earth structures is to minimize the seepage water from the contaminated soils or recycled material.

The construction methods presented by the German Association for Research on Road Construction and Traffic Affairs (FGSV) can be divided in construction methods with and without the application of a sealing system (mineral liners, geomembranes, geosynthetic clay liners). If the contaminated soils or recycled materials are of low permeability or if they are placed in areas that are protected against seepage (e.g. beneath the pavement), the use of additional sealing clay liners or geomembranes is not necessary.

Investigations of the effectiveness of the construction methods described by MTSE were performed by Schweller et al. (2009). The effectiveness of the construction methods A, B and D could be demonstrated by calculations. For the construction method E comparatively high seepage quantities were calculated. The interactions between atmosphere and soil (precipitation, evapotranspiration, surface run off) were though strongly simplified in the simulations of Schweller et al. As upper boundary condition a constant infiltration was defined and surface run off was neglected. Due to these the seepage was overestimated.

Based on the investigations of Schweller et al. calculations for the construction method E were performed taking into account the effects of evapotranspiration and surface run off. The simulations were performed with the software VADOSE/W under consideration of daily values for climate conditions. Additional simulations with a 10-year average infiltration rate were conducted. The results show that the calculations with average values of infiltration rate give seepage quantities that are 1.7 times larger than seepage quantities calculated with daily values for climate conditions. Considering for the construction method E a permeability for the core material of  $k = 1 \cdot 10^{-8}$  m/s and daily values for the climate conditions, seepage quantities of 60 mm/a were determined.

---

## Summary

### Simulation of seepage flow in earth constructions under consideration of hydrologic data

#### 1 Research scope

Contaminated soils and recycled materials 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 (M TS E, 2008). The design principle of such earth structures is to minimize the seepage water from the contaminated soils or recycled material.

The construction methods presented by the German Association for Research on Road Construction and Traffic Affairs (FGSV) can be divided in construction methods with and without the application of a sealing system (mineral liners, geomembranes, geosynthetic clay liners). Especially interesting is the construction method E according to which embankments of low permeability are constructed with contaminated soils and recycled materials without any additional sealing clay liners or geomembranes covering them.

Investigations of the effectiveness of the construction methods described by MTSE have been performed by Schweller et al. (2009). Thereby a constant precipitation equal to the annual average (the total precipitation over a period of one year was divided by 365 days) has been applied as upper boundary condition. That resulted in constant small infiltration rates in the embankments, without any surface runoff. The amount of seepage has been therefore overestimated. Especially for the construction method E where low permeability materials are used without any additional sealing systems, no realistic seepage values have been computed and the effectiveness of the method could not be proved.

Based on the investigations by Schweller et al., calculations have been carried out, considering a more realistic intensity and distribution for the precipitation and taking into account the effects of evapotranspiration. Based on the results the effectiveness of the construction method E is evaluated and optimized.

#### 2 Research Approach

Aim of the investigations is the realistic simulation of seepage through embankments with technical safeguards. Therefore, all the interactions taking place in the soil surface between the atmosphere and the soil are analyzed and simple approaches for the estimation of evapotranspiration are applied. Moreover, a literature review has been carried out to verify if there are any existing studies on the surface processes of surface runoff, infiltration and evapotranspiration for the cases of embankments and protective barriers.

For a project carried out by TU Munich at the Munich airport valuable information regarding the water balance of a test fill constructed according to the construction method E of MTSE has been gained. As this study is of special interest, the findings published by Birle et al. (2010), Birle (2012) and Birle and Heyer (2012) have been summarized in the present research.

As a next step calculations have been performed with the software FEFLOW and VADOSE/W to verify if the water balance of the aforementioned embankment could be simulated. Simulations have been carried out considering both average and daily values for the precipitation and the evapotranspiration.

As the calculations for construction method E by Schweller et al. overestimated the seepage quantities, calculations have been carried out for this research to verify the influence of the applied climate boundary conditions on the water balance of the embankments constructed according to method E. Simulations have been performed with the software FEFLOW; as well as, with VADOSE/W. Based on the results of these calculations and of the calculations by Schweller et al. the effectiveness of the construction method is evaluated and the influence of different precipitation distributions on the amount of seepage is demonstrated.

### **3 Results**

#### Results of the Literature Review

The literature review regarding the water balance of road embankments and protective barriers constructed according to the method described by MTSE has shown that apart from the project carried out at Munich airport by TU Munich, no other field studies are known. A few investigations regarding the stability of slopes and the water balance of landfill covers and flat roofs that take into consideration the processes of surface runoff, evapotranspiration and infiltration are available. However, the findings are not applicable on road embankments, as compared to waste disposal sites the embankments have larger inclination and compared to naturally built slopes their layer composition is completely different.

#### Water balance calculations of a test fill in Munich Airport

Calculations show that the field measurements regarding the water balance of the test fill (wet compaction conditions) can be only partially reproduced both with the software FEFLOW and VADOSE/W.

With FEFLOW, the infiltration rate, which depends on the precipitation, the evapotranspiration and the surface runoff, should be defined and applied as boundary condition beforehand. This has the main disadvantage that the processes taking place on the soil surface (evaporation, infiltration, surface runoff) cannot be coupled with the soil state. Based on the large amount of available field data, the evapotranspiration could be computed for the period of measurements. Regarding the surface runoff no measurements have been conducted and for simplified reasons it was neglected for the calculations. The infiltration was therefore computed as the difference between precipitation and evapotranspiration. Due to this assumption, the calculations with FEFLOW resulted in high infiltration quantities and compared to the field measurements to high interflow and seepage quantities.

With VADOSE/W, the soil surface processes are determined taking into account the soil conditions and steady state calculations considering daily values for the climate conditions are



possible. However, simulations of the test fill with daily values overestimate the amount of seepage compared to the measurements, while the amount of flow in the drainage layer is underestimated. These differences could be the result of differences between the permeability value applied in the model and the one achieved in-situ. Also the fact that the software cannot take into account the hysteresis of the soil-water retention curve could result in overestimating the amount of seepage from the base of the embankment.

#### Calculations for the construction method E

For determining the effectiveness of the construction method E simulations with FEFLOW, as well as with VADOSE/W have been carried out. The model set up in VADOSE/W is illustrated in Figure 3.1. Compared to the calculations by Schweller et al., the water balance of the embankment could be determined for an annual average infiltration rate, as well as, for daily precipitation and evaporation values. For the soil properties, the parameter values defined by Schweller et al. are also applied in this model. However, since the calculations by Schweller et al. considering a core permeability of  $k = 1 \cdot 10^{-7}$  m/s overestimated the amount of seepage at the base of the core, for the research a reduced value of  $k = 1 \cdot 10^{-8}$  m/s is used. The boundary conditions have been defined based on the climate conditions at Munich airport provided by the Deutsche Wetter Dienst (DWD - German Meteorological Service) for a period of ten years (1992 – 2002).

Due to the inability to couple the surface processes with the soil condition, the calculations with FEFLOW often resulted in the termination of the simulations. Therefore, no meaningful results could be obtained for transient boundary conditions.

In general, the use of software like FEFLOW that do not account for the coupling of the processes taking place on the soil surface with the soils state, is not recommended in case daily values for precipitation, evapotranspiration and surface runoff are applied. Such programs are suitable for simulations where average infiltration rates are considered.

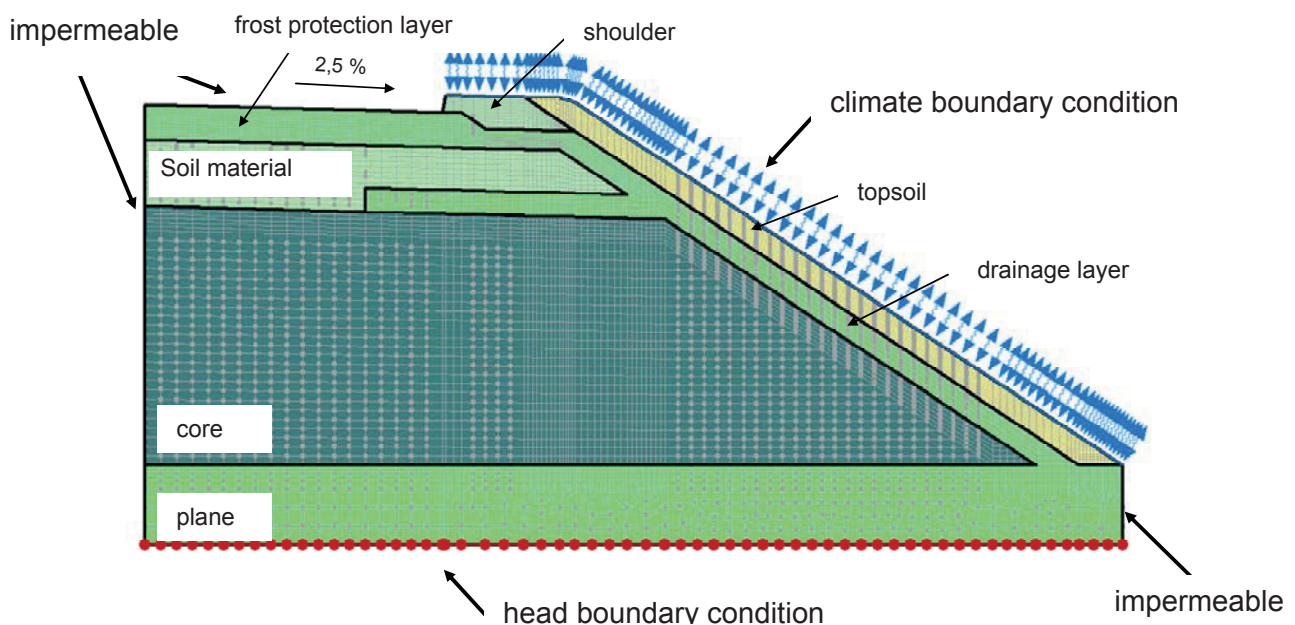


Figure 3.1: Model in VADOSE/W with boundary conditions

The simulations performed for construction method E with VADOSE/W show that the application of average values for the infiltration results in seepage quantities approximately 1.7 times higher



compared to those obtained when daily values for climate conditions are used. Considering a permeability for the core material equal to  $k = 1 \cdot 10^{-8}$  m/s, an average seepage rate of 60 mm/a is determined (Figure 3.2)

Additional simulations have been performed with VADOSE/W to investigate a possible reduction in the amount of seepage, by constructing an additional clay layer on the surface of the core. The results show that such a measure causes only a slight reduction. A significant improvement of the effectiveness of the construction method E is to be expected in case the coefficient of permeability of the core is reduced to  $k = 5 \cdot 10^{-9}$  m/s. This value corresponds to that of the test fill at Munich airport, where a seepage lower than 20 mm/a has been determined by means of experiments and numerical simulations. With a coefficient of permeability of the core  $k = 5 \cdot 10^{-9}$  m/s, the construction method E is similar to the method B, where an additional clay liner with a coefficient of permeability of  $k \leq 5 \cdot 10^{-9}$  m/s is placed above the core. The effectiveness of the construction method B has been already verified by means of numerical calculations within the scope of the research FE 05.147 (Schweller et al., 2009).

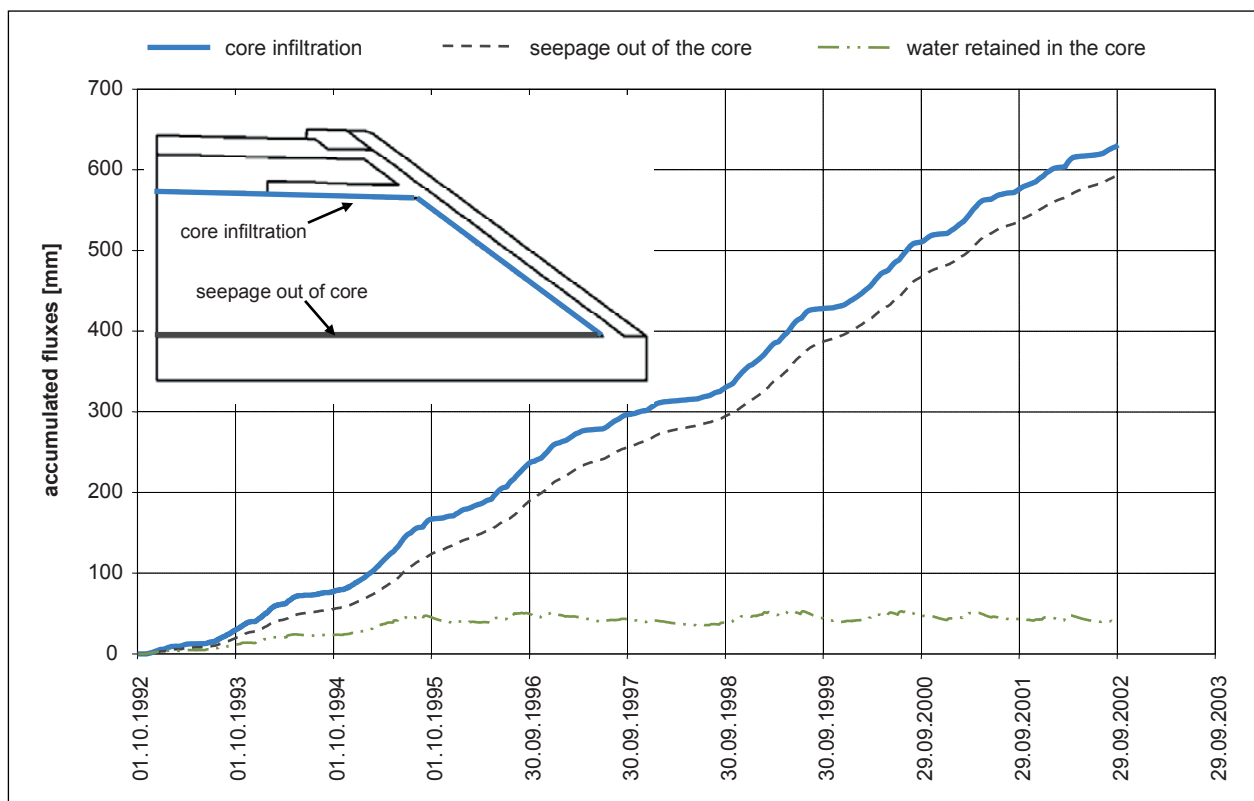


Figure 3.2: Accumulated infiltration in the core and seepage out of the core for the construction method E computed with VADOSE/W

#### 4 Outlook

Until now it is not clear, to what degree the application of daily precipitation values, which are generated by averaging the in reality shorter and of higher intention precipitation events, affects the computed amount of seepage. Moreover, the comparison of the computed results with the field measurements shows that the calculations could only partially reproduce the water balance of the embankments. Ambiguity exists regarding the magnitudes of the evaporation and the surface runoff and the impact of hysteresis of the soil-water retention curves on the water

balance. It is therefore recommended to verify the effectiveness of the different construction methods, and especially of method E, with in-situ investigations on embankments. Thus investigation fields should be constructed in order to determine the water balance of embankments with technical safeguards. Calculations should be carried out to determine the water balance and the results should be compared to the values obtained in the field.



## Inhalt

	Seite
<b>BEZEICHNUNGEN .....</b>	<b>13</b>
<b>1 EINFÜHRUNG.....</b>	<b>15</b>
<b>2 ZIELSETZUNG UND KONZEPTION .....</b>	<b>17</b>
<b>3 WASSERHAUSHALT VON ERDDÄMMEN .....</b>	<b>18</b>
3.1 NIEDERSCHLAG.....	18
3.2 INFILTRATION AN DER BODENOBERFLÄCHE UND OBERFLÄCHENABFLUSS .....	19
3.3 EVAPOTRANSPIRATION .....	19
3.3.1 Allgemeines .....	19
3.3.2 Ansatz nach Haude.....	20
3.3.3 Ansatz nach Penman-Monteith .....	21
3.3.4 FAO-Grasreferenzverdunstung .....	23
3.3.5 Potentielle Evapotranspiration auf geeigneten Flächen.....	24
3.3.6 Tatsächliche Evapotranspiration .....	24
3.4 WASSER IM BODEN.....	25
<b>4 VORLIEGENDE FELDSTUDIEN ZUM WASSERHAUSHALT VON ERDBAUWERKEN.....</b>	<b>32</b>
4.1 UNTERSUCHUNGEN AN STRAßENDÄMMEN, EINSCHNITTSBÖSCHUNGEN, DEPONIEEN UND FLACHDÄCHERN .23	
4.2 GROßMAßSTÄBLICHE VERSUCHSSCHÜTTUNG AM MÜNCHNER FLUGHAFEN .....	37
4.2.1 Hintergrund .....	37
4.2.2 Böden.....	37
4.2.3 Aufbau der Versuchsschüttung .....	41
4.2.4 Messungen .....	48
<b>5 BERECHNUNGEN ZUM WASSERHAUSHALT DER VERSUCHSSCHÜTTUNG – FEFLOW .....</b>	<b>61</b>
5.1 VORGEHENSWEISE .....	62
5.2 MODELLBILDUNG .....	62
5.2.1 Modellgeometrie .....	62
5.2.2 Randbedingungen.....	64
5.2.3 Anfangsbedingung .....	66
5.2.4 Bodenkennwerte .....	67
5.2.5 Berechnungshilfen in FEFLOW .....	70
5.3 ÜBERSICHT ÜBER DIE DURCHGEFÜHRTEN BERECHNUNGEN .....	72
5.4 BERECHNUNGSERGEBNISSE.....	73
5.4.1 Sickerwassermengen bei zeitlich konstanten Niederschlägen ohne Berücksichtigung der Evapotranspiration .....	73
5.4.2 Sickerwassermengen unter Berücksichtigung der Evapotranspiration.....	77
5.5 VERGLEICH BERECHNUNGSMODELL – VERSUCHSSCHÜTTUNG .....	93
5.6 BEWERTUNG DER BERECHNUNGSERGEBNISSE.....	99
<b>6 BERECHNUNGEN ZUM WASSERHAUSHALT DER VERSUCHSSCHÜTTUNG – VADOSE/W .....</b>	<b>102</b>

---

6.1	VORGEHENSWEISE .....	102
6.2	MODELLBILDUNG .....	102
6.2.1	Modellgeometrie .....	102
6.2.2	Randbedingungen.....	103
6.2.3	Anfangsbedingung .....	105
6.2.4	Bodenkennwerte .....	105
6.2.5	Berechnungshilfen in VADOSE/W .....	108
6.3	BERECHNUNGSERGEBNISSE.....	108
6.4	ZUSAMMENFASSUNG .....	113
6.5	VERGLEICH DER ERGEBNISSE FÜR DEN ABFLUSS AUS DEM KERN – FEFLOW / VADOSE .....	114
<b>7</b>	<b>BERECHNUNGEN ZUM WASSERHAUSHALT DER BAUWEISE E – FEFLOW .....</b>	<b>115</b>
7.1	VORGEHENSWEISE .....	115
7.2	MODELLBILDUNG .....	115
7.2.1	Modellgeometrie .....	115
7.2.2	Randbedingungen.....	116
7.2.3	Anfangsbedingung .....	119
7.2.4	Bodenkennwerte .....	120
7.2.5	Übersicht über die durchgeführten Berechnungen .....	121
7.3	BERECHNUNGSERGEBNISSE.....	121
7.3.1	Sickerwassermengen bei einem Durchschnittswert der Infiltration.....	121
7.3.2	Sickerwassermengen bei zeitlich variablen Niederschlagsverteilungen unter Berücksichtigung der Evapotranspiration .....	123
<b>8</b>	<b>BERECHNUNGEN ZUM WASSERHAUSHALT DER BAUWEISE E – VADOSE/W.....</b>	<b>125</b>
8.1	VORGEHENSWEISE .....	125
8.2	MODELLBILDUNG .....	125
8.2.1	Modellgeometrie .....	125
8.2.2	Randbedingungen.....	127
8.2.3	Anfangsbedingung .....	131
8.2.4	Bodenkennwerte .....	131
8.3	BERECHNUNGSERGEBNISSE.....	133
8.3.1	Sickerwassermengen bei Tageswerten der Infiltration/Verdunstung .....	133
8.3.2	Sickerwassermengen bei einem Durchschnittswert der Infiltration.....	135
8.3.3	Berechnungen mit modifizierten Parametern/Abmessungen.....	138
8.3.4	Vergleich der Ergebnisse .....	143
8.4	VERGLEICH DER ERGEBNISSE – FEFLOW / VADOSE.....	143
<b>9</b>	<b>BEWERTUNG DER WIRKSAMKEIT DER BAUWEISE E .....</b>	<b>145</b>
<b>10</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>146</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>149</b>
	<b>TABELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>153</b>
	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>153</b>

## Bezeichnungen

### Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Benennung
A	M <sup>2</sup>	Querschnittsfläche
C	1/m	Kapillarkapazität
c <sub>p</sub>	kJ/(g · °C)	Wärmekapazität
d	M	Verdrängungshöhe des Bewuchses nach <i>Monteith</i>
d	M	Dicke
e <sub>a</sub>	kN/m <sup>2</sup>	Tatsächlicher Dampfdruck
e <sub>0</sub>	kN/m <sup>2</sup>	Sättigungsdampfdruck
f	mm/hPa	Haude-Faktor
ET <sub>a</sub>	Mm	Tatsächliche Evapotranspiration
ET <sub>p</sub>	mm	Potentielle Evapotranspiration
g	m/s <sup>2</sup>	Erdbeschleunigung
G	MJ/(m <sup>2</sup> · s)	Bodenwärmestrom
h	m	Höhe des Bewuchses
H	m	Hydraulisches Potential
H <sub>g</sub>	m	Gravitationspotential
H <sub>m</sub>	m	Matrixpotential
i	-	Hydraulischer Gradient
k	-	Karman-Konstante
k, k <sub>f</sub>	m/s	Durchlässigkeitsbeiwert bzw. hydraulische Leitfähigkeit des Bodens
k <sub>s</sub>	m/s	Wasserdurchlässigkeit im gesättigten Zustand
L	MJ/kg	Latente Verdunstungswärme
LAI	-	Blattflächenindex
m	-	Parameter der Beziehung nach <i>van Genuchten</i>
n	-	Porenanteil
n	-	Parameter der Beziehung nach <i>van Genuchten</i>
p	kPa	Druck
p	kPa	Partialdruck des Wasserdampfes
p <sub>0</sub>	kPa	Sättigungsdampfdruck des Wasserdampfes über reinem Wasser
p <sub>f</sub>	kPa	Luftdruck
p <sub>s</sub>	kPa	Sättigungsdampfdruck
p <sub>t</sub>	kPa	Druck der trockenen Luft
Q	m <sup>3</sup> /s	Durchfluss
r	-	Parameter nach <i>Disse</i>
R	J/(kg · K)	Universelle Gaskonstante
r <sub>a</sub>	s/m	Aerodynamischer Widerstand nach <i>Monteith</i>
R <sub>d</sub>	J/(kg · K)	Gaskonstante für Wasserdampf

rh, RH	-	Relative Luftfeuchtigkeit
$R_n$	MJ/(m <sup>2</sup> · s)	Nettostrahlung
$r_s$	s/m	Oberflächenwiderstand nach <i>Monteith</i>
s	kN/(m <sup>2</sup> · °C)	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve
$S_e$	-	Effektiver Sättigungsgrad
Sr	-	Sättigungsgrad
t	s	Zeit
T	K	Absolute Temperatur
v	m/s	Windgeschwindigkeit
v	m/s	Filtergeschwindigkeit nach <i>Darcy</i>
$Z_m$	m	Höhe über der Bodenoberfläche, in der die Windgeschwindigkeit gemessen wird
$Z_{oh}$	m	Rauhigkeitslänge für Wärme und Dampf nach <i>Monteith</i>
$Z_{om}$	m	Aerodynamische Rauhigkeitslänge nach <i>Monteith</i>

### Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Benennung
$\alpha$	1/kPa	Parameter der Beziehung nach <i>van Genuchten</i>
$\gamma$	kN/(m <sup>2</sup> · °C)	Psychrometerkonstante
$\varepsilon$	-	Verhältnis der Molgewichte des Wasserdampfes und der trockenen Luft
$\theta$	-	Volumetrischer Wassergehalt
$\theta_{FK}$	-	Volumetrischer Wassergehalt bei der Feldkapazität
$\theta_{PWP}$	-	Volumetrischer Wassergehalt beim permanenten Welkepunkt
$\lambda$	kJ/(d · m · °C)	Wärmeleitfähigkeit
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte der Luft
$\rho_f$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte der feuchten Luft
$\rho_t$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte der trockenen Luft
$\rho_w$	g/cm <sup>3</sup>	Dichte von Wasser
$\tau$	-	Tortuositätsfaktor nach <i>Mualem</i>
$\psi$	kPa	Matrixspannung bzw. Saugspannung / totale Saugspannung



## 1 Einführung

Bei Verwendung von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen (BumI) in Erdbauwerken sind gegebenenfalls technische Sicherungsmaßnahmen zu ergreifen, um in umweltspezifischer und wasserwirtschaftlicher Hinsicht einen verantwortungsvollen Einsatz dieser Materialien zu gewährleisten. Die technischen Sicherungsmaßnahmen sind dabei so zu gestalten, dass eine Durchsickerung der Böden und Baustoffe mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen und damit ein möglicher Austrag von Schadstoffen auf ein verträgliches Maß minimiert werden.

Das Merkblatt über Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau (MTS E) stellt insgesamt sechs unterschiedliche Bauweisen für Straßendämme, die entsprechend auch auf andere Erdbauwerke (z.B. Lärm- und Sichtschutzwälle) übertragbar sind, vor. Diese können prinzipiell in Bauweisen mit Abdichtungen, Bauweisen mit gering durchlässigem Körper aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen und Kernbauweisen ohne Abdichtungen unterschieden werden. Eine besondere Stellung nimmt die Bauweise mit gering durchlässigem Körper aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen (Bauweise E) ein, da dabei auf ein zusätzliches Abdichtungselement oberhalb der Böden bzw. Baustoffe mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen verzichtet wird.

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bau, Verkehr und Stadtentwicklung geförderten Forschungsvorhabens wurden am Zentrum Geotechnik der TU München von SCHWELLER ET AL. (2009) Berechnungen zur Bewertung der Wirksamkeit der Bauweisen durchgeführt. Dabei wurde der am oberen Modellrand definierte Niederschlag als konstant angesetzt, indem der Gesamtjahresniederschlag auf 365 Tage verteilt wurde. Dies führt jedoch zu konstanten kleinen Infiltrationsmengen in den Straßendamm ohne Ausbildung eines Oberflächenabflusses. Damit verbunden sind unrealistisch hohe Sickerwassereintritte in die Ersatzbaustoffe. Insbesondere bei Bauweisen aus gering durchlässigen Ersatzbaustoffen ohne zusätzliche Dichtungsschicht ergeben sich damit keine realistischen Sickerwassermengen. Deshalb konnte die Wirksamkeit der Bauweisen im Rahmen der Untersuchungen von Schweller et al. nicht abschließend bewertet werden.

In der Realität treten Niederschläge mit zeitlich begrenzter Dauer und in unterschiedlichen Intensitäten auf. Im Falle von Starkniederschlägen kommt es zu einem Oberflächenabfluss. Gleichzeitig wird ein Teil des Niederschlages durch Verdunstung (Evaporation) direkt wieder in die Atmosphäre abgegeben. Bereits in den Oberboden eingedrungener Niederschlag wird zum Teil durch den Bewuchs wieder aufgenommen (Transpiration).

Transpiration und Evaporation werden von den klimatischen Verhältnissen (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Strahlung) und von den Eigenschaften des Bewuchses gesteuert. In den von Schweller et al. durchgeführten Berechnungen wurden Modelle verwendet, die sich auf die Abbildung der Sickerströmung in der gesättigten und ungesättigten Bodenzone beschränken („Sickerwassermodelle“). Die durch Evapotranspiration abgegebene Wassermenge lässt sich aus diesen Modellen nicht ermitteln, sondern muss getrennt davon abgeschätzt werden und bei der Definition der Randbedingungen berücksichtigt werden. Neben der zeitlichen Verteilung der Niederschläge blieben in den von Schweller et al. durchgeführten Berechnungen auch die Effekte der Evapotranspiration unberücksichtigt.

Basierend auf den am Zentrum Geotechnik der TU München von Schweller et al. durchgeführten Untersuchungen sollen im Rahmen des aktuellen Forschungsvorhabens eine realitätsnahe Verteilung und Intensität der Niederschläge sowie die Effekte der Evapotranspiration in den Modellberechnungen berücksichtigt werden.

## 2 Zielsetzung und Konzeption

Ziel der Untersuchungen ist es, die Durchsickerung von Straßenbauwerken mit unterschiedlichen technischen Sicherungsmaßnahmen anhand von Modellberechnungen realitätsnah abzubilden. Dazu werden zunächst die an der Bodenoberfläche stattfindenden Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Boden analysiert und verschiedene Ansätze zur Abschätzung der Evapotranspiration zusammengetragen. Anhand einer Literaturrecherche wurde außerdem geprüft, inwieweit für die Situation eines Straßendamms bzw. Schutzwalles bereits Untersuchungen zu den an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozessen des Oberflächenabflusses, der Infiltration und der Evapotranspiration vorliegen.

Die Berechnungen wurden mit der Finite-Elemente-Software Vadose/W durchgeführt. Im Vergleich zu dem von SCHWELLER ET AL. (2009) verwendeten Grundwassermodell können die an der Bodenoberfläche stattfindenden Vorgänge damit abgebildet werden und müssen nicht extern ermittelt werden. Außerdem wird dabei berücksichtigt, dass die an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse (Verdunstung, Infiltration, Oberflächenabfluss) von den zustandsabhängigen Eigenschaften des Oberbodens abhängen. Prinzipiell ist bei diesen Programmen deshalb eine höhere Qualität der Berechnungsergebnisse zu erwarten. Um zu überprüfen, inwieweit der Wasserhaushalt von Erdbauwerken mit dem verwendeten Programm abgebildet werden kann, wurden die vom Zentrum Geotechnik der TU München (2010) am Münchner Flughafen an einer Versuchsschüttung gewonnen Messergebnisse herangezogen und der Wasserhaushalt der Versuchsschüttung mit dem Programm Vadose/W nachgerechnet.

Da die Untersuchungen von Schweller et al. insbesondere für die Bauweise E unerwartet große Sickerwassermengen ergaben, wurde im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens anschließend untersucht, wie sich eine realitätsnahe Abbildung der klimatischen Verhältnisse auf den Wasserhaushalt eines Straßendamms, der in Anlehnung an die Bauweise E nach dem Merkblatt für technische Sicherungsmaßnahmen im Erdbau (MTSE) errichtet wurde, auswirkt. Dazu wurden Berechnungen sowohl mit dem Grundwassermodell FEFLOW als auch mit dem Programm Vadose/W durchgeführt. Auf Basis dieser Ergebnisse sowie der von Schweller et al. durchgeführten Untersuchungen wird die Wirksamkeit der Bauweise E für technische Sicherungsmaßnahmen bewertet und wird dargestellt, wie sich der Ansatz von unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen auf die Sickerwassermengen auswirkt.

### 3 Wasserhaushalt von Erddämmen

Der Wasserhaushalt eines bewachsenen Erdkörpers mit seinen wichtigsten Komponenten ist vereinfacht in Abbildung 3.1 dargestellt. Infolge von Niederschlägen kommt es an der Bodenoberfläche zu Oberflächenabflüssen und zur Versickerung von Niederschlagswasser in den Boden (Infiltration). Gleichzeitig wird einem Erdkörper über die Bodenoberfläche in Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen und der Vegetation Wasser durch Evaporation und Transpiration der Pflanzen entzogen. Diese beiden Komponenten werden in der Regel in Form der Evapotranspiration gemeinsam erfasst. Bilanziert man die einzelnen Zu- und Abflüsse muss im stationären Zustand gelten, dass der Niederschlag gleich der Summe aus Oberflächenabfluss, Versickerung und Evapotranspiration ist. Im instationären Zustand muss zusätzlich im Boden eine Änderung des Wassergehaltes berücksichtigt werden. (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL, 2002)

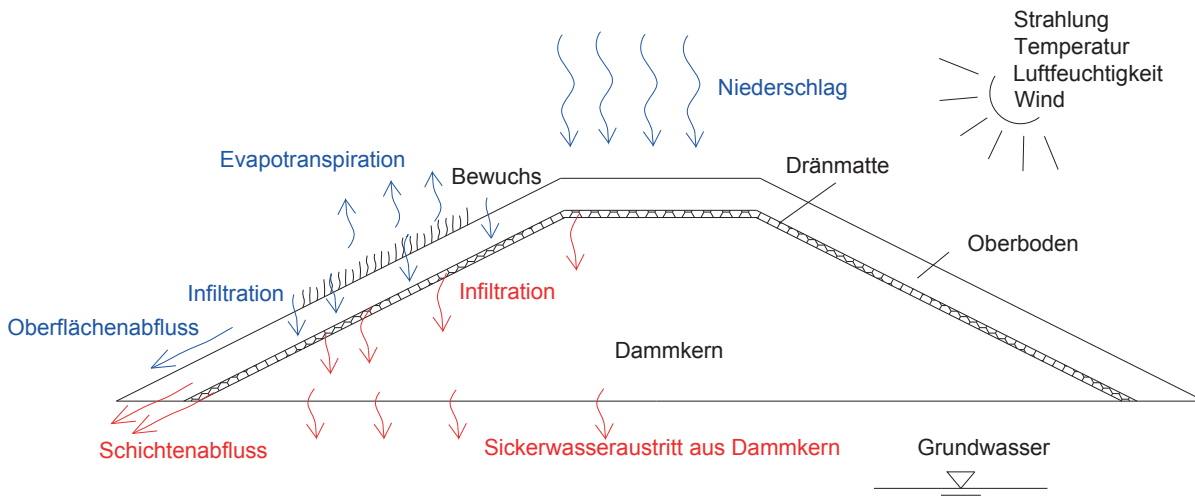


Abbildung 3.1: Wasserhaushalt eines Erddammes mit technischen Sicherungselementen

Im Boden selbst wird Wasser sowohl in flüssiger als auch in gasförmiger Phase bewegt. Die wesentlichen Ursachen für eine Wasserbewegung in flüssiger Phase sind hydraulische Gradienten und Temperaturgradienten. Die Wasserbewegung in der gasförmigen Phase resultiert aus Feuchte- und Temperaturgradienten. (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL, 2002)

Im Folgenden werden die im Oberboden und an der Bodenoberfläche auftretenden Vorgänge der Evaporation, Transpiration der Pflanzen, des Oberflächenabflusses und der Versickerung infolge von Niederschlägen näher dargestellt.

#### 3.1 Niederschlag

Für die vorliegende Fragestellung der Wasserbewegung in verdichteten feinkörnigen Böden sind die klimatischen Verhältnisse von herausragender Bedeutung. Infolge von Niederschlägen kommt es zu einer Infiltration von Wasser in den Boden und damit zu einer Wasserbewegung im Boden.

Bei trockener Witterung kommt es zu einer Wasserabgabe infolge von Evaporation und Transpiration. Die Intensität und Verteilung der Niederschläge hat dadurch maßgebenden Einfluss auf die Höhe der Infiltration in den Boden. Bei starken kurzen Niederschlagsereignissen stellen sich ein vergleichsweise großer Oberflächenabfluss und eine geringe Infiltration ein. Lang anhaltende Niederschlagsereignisse geringer Intensität dagegen führen zu geringen Oberflächenabflüssen und hohen Infiltrationsraten. Zur Ermittlung von Sickerwassermengen aus Erddämmen ist der Ansatz der Verteilung und Intensität der Niederschläge deshalb von großer Bedeutung.

### **3.2 Infiltration an der Bodenoberfläche und Oberflächenabfluss**

Sofern durch Niederschläge mehr Wasser auf die Bodenoberfläche auftrifft als vom Boden aufgenommen werden kann, kommt es zur Erstehung von Oberflächenwasser. Auf geneigten Flächen wie im Falle des in Abbildung 3.1 dargestellten Erddammes fließt dieses auf der Böschung ab und wird als Oberflächenabfluss bezeichnet. Die Größe des Oberflächenabflusses hängt von der Intensität der Niederschläge, der Neigung der Bodenoberfläche, den Eigenschaften der Vegetation und von der Größe der Infiltration ab. Letztere wird von den hydraulischen Eigenschaften des Oberbodens maßgeblich beeinflusst. Diese hängen nicht nur von der Art, Zusammensetzung und Dichte des Bodens ab, sondern werden maßgeblich vom Sättigungsgrad beeinflusst. Generell gilt, dass sich bei einem Boden im ungesättigten Zustand infolge von Kapillarspannungen eine höhere Infiltrationsrate an der Bodenoberfläche einstellt als im gesättigten Zustand (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL, 2002). Infolge der Vielzahl der Einflussparameter und der Abhängigkeiten dieser zueinander stellt die Ermittlung der in den Boden infiltrierenden Wassermenge eine äußerst komplexe Aufgabe dar. Bei der Untersuchung des Wasserhaushaltes von Erddämmen mit Hilfe von Strömungsmodellen auf Basis der Richards-Gleichung ist die Infiltration in die Bodenoberfläche aber als Randbedingung vorzugeben, was eine vorherige Bestimmung des Oberflächenabflusses erfordert.

### **3.3 Evapotranspiration**

#### **3.3.1 Allgemeines**

Die Gesamtverdunstung setzt sich zusammen aus der Evaporation, der Transpiration und der Interzeptionsverdunstung. Die Evaporation umfasst die Verdunstung des unbewachsenen Bodens sowie die Wasserflächenverdunstung. Unter Transpiration wird die Wasseraufnahme aus dem Boden durch die Vegetation verstanden. Die Interzeptionsverdunstung berücksichtigt die Verdunstung des von den Pflanzen aufgefangenen, nicht zu Boden gelangenden Wassers (DYCK, 1980). Die Gesamtverdunstung (Evapotranspiration) wird sowohl von atmosphärischen Bedingungen als auch vom Boden und der Vegetation beeinflusst.

Unter der potentiellen Verdunstung (Evaporation) wird die in Abhängigkeit von den atmosphärischen Bedingungen mögliche maximale Verdunstung bei einer vollen Sättigung des Bodens verstanden. Nimmt der Sättigungsgrad des Bodens im Zuge der Verdunstung ab, reduziert sich auch die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit. Dies führt zu einer Abnahme der Evaporation gegenüber der potentiellen Evaporation. Man spricht dann von der tatsächlichen Evaporation. Ähnliches

gilt für die Wasseraufnahme durch die Pflanzen (Transpiration). Mit abnehmender Wasserleitfähigkeit des Bodens kann von den Pflanzen weniger Wasser aufgenommen werden.

Für die Verdunstung von Wasser als Änderung vom flüssigen oder festen Aggregatzustand in den gasförmigen ist ein Energieeintrag aus Strahlung oder Wärme erforderlich. Die Verdunstung ist damit sowohl in der Energiebilanz als auch in der Wasserbilanz der Erdoberfläche zu berücksichtigen. Zur Berechnung der Verdunstung wurden vielfältige Methoden entwickelt, die zumeist auf dem Energiebilanzverfahren oder auf einem aerodynamischen Ansatz beruhen. Ein aerodynamischer Ansatz wurde 1801 von DALTON dargestellt. Dabei wird die Verdunstung einer Wasseroberfläche als Funktion der Windgeschwindigkeit und des Sättigungsdefizites zwischen der Wasseroberfläche und der Luft beschrieben. Beim Energiebilanzverfahren wird die Verdunstung als Element der Wärmehaushaltsgleichung ermittelt. Dazu müssen allerdings alle anderen, am Energieumsatz beteiligten Größen bekannt sein. SVERDRUP (1936) stellte eine entsprechende Gleichung zur Ermittlung des Verdunstungswärmestromes vor.

Durch Kombination des Energiebilanzverfahrens mit dem aerodynamischen Ansatz nach DALTON (1801) stellte PENMAN (1956) eine empirische Gleichung zur Ermittlung der potentiellen Evaporation auf. Sein Ansatz ermöglicht es, die Verdunstung einer Wasserfläche bzw. einer stets feuchten Bodenoberfläche in Abhängigkeit von der Strahlung, der Temperatur, der Windgeschwindigkeit und der Luftfeuchtigkeit zu bestimmen. Die Übertragung dieses Ansatzes auf die Verdunstung von bewachsenen Landflächen gelang MONTEITH (1965), der die Gleichung nach PENMAN (1956) weiterentwickelte und um zwei Bewuchs-abhängige Verdunstungswiderstände ergänzte. Dabei handelt es sich um den aerodynamischen Widerstand, der von der Windgeschwindigkeit und von der Pflanzenart abhängt, sowie um den sogenannten Stomata-Widerstand, der die Wasserversorgung der Pflanzen berücksichtigt. Im Vergleich zu anderen Verfahren (z.B. HAUDE, 1955, oder THORNTHWAITE, 1948) ist die Gleichung nach Penman-Monteith vergleichsweise komplex und erfordert die Bestimmung einer Vielzahl an Parametern. Dementsprechend kommt dieser Ansatz bisher überwiegend nur in Forschungsarbeiten zur Anwendung. Wie bereits genannt wurden daneben weitere Ansätze (z.B. HAUDE, 1955, THORNTHWAITE, 1948) zur Bestimmung der potentiellen Evapotranspiration entwickelt. Diese beruhen auf statistisch-empirischen Methoden und ermöglichen es, die potentielle Evapotranspiration auf Grundlage von vergleichsweise wenigen Parametern zu bestimmen. Einen umfassenden Überblick über die verschiedenen Ansätze zur Beschreibung der Evapotranspiration gibt das DVWK Merkblatt 238/1996 (DVWK, 1996). Im Folgenden wird kurz der in Deutschland weit verbreitete Ansatz nach HAUDE (1955) dargestellt. Außerdem wird auf das komplexe Verfahren nach Penman-Monteith und die auf diesem basierende FAO-Grasreferenzverdunstung eingegangen.

### 3.3.2 Ansatz nach Haude

Die von HAUDE (1955) vorgestellte Gleichung zur Ermittlung von Monatswerten der potentiellen Evapotranspiration beruht auf dem aerodynamischen Ansatz nach DALTON (1801) und wurde in die DIN 19685 aufgenommen:

$$ET_p = f \cdot (e_s(T) - e)_{14} \leq 7 \text{ mm/d} \quad (3.1)$$

Dabei stellt  $f$  den sogenannten Haude-Faktor dar [mm/hPa]. Der Term  $(e_s(T) - e)_{14}$  beschreibt das Sättigungsdefizit der Luft mit Wasserdampf [hPa] zum Mittagstermin um 14:30 MEZ und lässt sich aus der um diese Uhrzeit gemessene relative Luftfeuchtigkeit  $rh_{14}$  [%] und der Temperatur  $T_{14}$  bestimmen:

$$(e_s(T) - e)_{14} = e_s(T_{14}) \cdot \left(1 - \frac{rh_{14}}{100}\right) \quad (3.2)$$

Einen Tageswert der potentiellen Evapotranspiration erhält man durch Multiplikation des Sättigungsdefizites nach Gleichung (3.2) mit dem Haude-Faktor  $f_t$  für Tagessummen (siehe Tabelle 3.1). Der Monatswert der potentiellen Evapotranspiration ergibt sich aus der Summe der für die einzelnen Tage ermittelten Werte. In Einzelfällen kann die potentielle Evapotranspiration 7 mm/d überschreiten, was aus Energiegründen aber nicht möglich ist. Dementsprechend wurde in Gleichung (3.1) eine obere Grenze von 7 mm/d ergänzt.

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
$f_t$	0,22	0,22	0,22	0,29	0,29	0,28	0,26	0,25	0,23	0,22	0,22	0,22
$f_m$	6,82	6,22	6,82	8,70	8,99	8,40	8,06	7,75	6,90	6,82	6,60	6,82

Tabelle 3.1: Haude-Faktoren (nach DIN 19685)

### 3.3.3 Ansatz nach Penman-Monteith

Die Gleichung nach Penman-Monteith zur Ermittlung der potentiellen Evapotranspiration  $ET_p$  einer horizontalen Fläche lautet: (DYCK UND PESCHKE, 1995; SHUTTLEWORTH, 1993)

$$ET_p = \frac{1}{L} \cdot \frac{s \cdot (R_n - G) + \rho \cdot c_p \cdot \frac{p_s - p}{r_a}}{s + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad [\text{mm}] \quad (3.3)$$

Dabei ist  $L$  die latente Verdunstungswärme [MJ/kg],  $s$  die Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve [kN/(m<sup>2</sup> · °C)],  $R_n$  die Nettostrahlung [MJ/(m<sup>2</sup> · d)],  $G$  der Bodenwärmestrom [MJ/(m<sup>2</sup> · d)],  $\rho$  die Dichte der Luft [kg/m<sup>3</sup>],  $c_p$  die spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck [MJ/(kg · °C)],  $p_s$  der Sättigungsdampfdruck [kN/m<sup>2</sup>],  $p$  der Dampfdruck [kN/m<sup>2</sup>],  $\gamma$  die Psychrometerkonstante [kN/(m<sup>2</sup> · °C)],  $r_a$  der aerodynamische Widerstand [s/m] und  $r_s$  der Oberflächenwiderstand [s/m].

Der Sättigungsdampfdruck  $p_s$  [kN/m<sup>2</sup>] lässt sich näherungsweise aus der Lufttemperatur  $T$  [°C] mit Hilfe der empirischen Magnus-Formel berechnen:

$$p_s = 0,6112 \cdot e^{\left(\frac{17,3 \cdot T}{237,3 + T}\right)} \quad (3.4)$$

Aus der Differentiation dieser Gleichung erhält man die Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve  $s$  [kN/(m<sup>2</sup> · °C)]:



$$s = p_s(T) \cdot \frac{4098}{(T + 237,3)^2} \quad (3.5)$$

Der Dampfdruck  $p$  [kN/m<sup>2</sup>] der Luft lässt sich aus dem Sättigungsdampfdruck und der relativen Luftfeuchtigkeit  $rh$  [-] bestimmen:

$$p = p_s \cdot rh \quad (3.6)$$

Die latente Verdunstungswärme  $L$  beschreibt die Energiemenge [MJ/kg], die benötigt wird um 1 kg Wasser an einem Tag zu verdampfen. Diese ist von der Lufttemperatur  $T$  [°C] abhängig und errechnet sich aus

$$L = 2,501 - 0,002361 \cdot T \quad (3.7)$$

Die Psychrometerkonstante  $\gamma$  [kN/(m<sup>2</sup> · °C)] berechnet sich folgendermaßen:

$$\gamma = \frac{c_p \cdot p_f}{\varepsilon \cdot L} \quad (3.8)$$

Dabei bezeichnen  $p_f$  den Luftdruck [kN/m<sup>2</sup>],  $\varepsilon$  das Verhältnis zwischen den Molgewichten des Wasserdampfes und der trockenen Luft ( $\varepsilon = 0,622$  [-]), und  $c_p$  die spezifische Wärmekapazität von Luft bei 100 % Luftfeuchtigkeit ( $c_p = 0,001013$  [MJ/(kg · °C)]).  $L$  [MJ/kg] stellt die latente Verdunstungswärme entsprechend Gleichung (3.7) dar.

Die Nettostrahlung  $R_n$  [MJ/(m<sup>2</sup> · d)] bezeichnet die Differenz zwischen der auf die Bodenoberfläche auftreffenden und der von der Bodenoberfläche abgegebenen lang- und kurzwelligigen Strahlung. Der Bodenwärmestrom  $G$  [MJ/(m<sup>2</sup> · d)] gibt die Energiemenge an, die zur Bodenerwärmung führt. In den Nachtstunden findet eine Abkühlung statt. Vereinfachend lässt sich der Bodenwärmestrom getrennt für die Tag- und Nachtstunden folgendermaßen abschätzen (ALLEN ET AL., 1998):

$$G = 0,1 \cdot R_n \quad (\text{tagsüber}) \quad (3.9)$$

$$G = 0,5 \cdot R_n \quad (\text{nachts}) \quad (3.10)$$

Betrachtet man die Luft näherungsweise als ideales Gas, lässt sich ihre Dichte  $\rho_t$  [kg/m<sup>3</sup>] aus dem Luftdruck  $p_t$  [N/m<sup>2</sup>], der Lufttemperatur  $T$  [°C] und der Gaskonstanten  $R = 287,058$  J/(kg · K) folgendermaßen berechnen:

$$\rho_t = \frac{p_t}{R \cdot T} = \frac{p_t}{1,01 \cdot (T + 273) \cdot 0,287} \quad (3.11)$$

Diese Betrachtungsweise ist für trockene Luft zutreffend. Zur exakten Bestimmung der Luftdichte muss jedoch ihre Feuchtigkeit berücksichtigt werden. Unter Verwendung der Gaskonstanten für Wasserdampf  $R_d = 461,51$  J/(kg · K) lässt sich die Luftdichte [kg/m<sup>3</sup>] in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit  $rh$  [-], dem Sättigungsdampfdruck  $p_s$  [N/m<sup>2</sup>] und dem vorhandenen Luftdruck  $p_f$  [N/m<sup>2</sup>] bestimmen:

$$\rho_f = \frac{1}{(T + 273)} \cdot \left( \frac{p_f}{R} - rh \cdot p_s \cdot \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{R_d} \right) \right) \quad (3.12)$$

Bei den von MONTEITH (1965) eingeführten vegetationsspezifischen Parametern handelt es sich um den aerodynamischen Widerstand und den Oberflächenwiderstand der Vegetation (Bestandeswiderstand). Mit Hilfe dieser beiden Widerstände konnte er die von Penman entwickelte Gleichung zur Beschreibung der potentiellen Evaporation um die aus der Transpiration der Pflanzen resultierenden Effekte erweitern. Der aerodynamische Widerstand  $r_a$  [s/m] beschreibt den Einfluss der Vegetation auf die Windgeschwindigkeit. Er lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_m - d}{z_{om}}\right) \cdot \ln\left(\frac{z_m - d}{z_{oh}}\right)}{k^2 \cdot v} \quad (3.13)$$

Dabei sind  $z_m$  die Höhe, in der die Windgeschwindigkeit gemessen wird [m],  $d$  die Verdrängungshöhe [m],  $z_{om}$  die aerodynamische Rauigkeitslänge [m],  $z_{oh}$  die Rauigkeitslänge [m] für Wärme und Dampf,  $k$  die Karman-Konstante (0,41 [-]) und  $v$  die Windgeschwindigkeit [m/s].

Der Bestandeswiderstand (Stomatawiderstand) beschreibt die Wasseraufnahme durch die Vegetation. Er stellt damit den entscheidenden Parameter zur Bestimmung der tatsächlichen Evapotranspiration dar. Die Ermittlung des Bestandeswiderstandes ist jedoch mit erheblichen Unsicherheiten verbunden, da dieser u. a. von der Pflanzenart – und -entwicklung (Blattfläche), dem Sättigungsgrad des Bodens und von Umwelteinflüssen abhängt. Es wurden jedoch brauchbare Näherungen zur Ermittlung des minimalen Bestandeswiderstandes bei ausreichender Wasserversorgung aufgestellt. Weit verbreitet ist eine einfache Näherung nach SHUTTLEWORTH (1993):

$$r_s = \frac{200}{LAI} \text{ [s/m]} \quad (3.14)$$

Der Blattflächenindex LAI gibt dabei das Verhältnis zwischen der Blattfläche und der Bodenfläche wieder. Für Gras lässt er sich folgendermaßen abschätzen (ALLEN ET AL., 1998):

$$LAI = 24 \cdot h \quad \text{mit } h: \text{ Höhe des Bewuchses [m]} \quad (3.15)$$

### 3.3.4 FAO-Grasreferenzverdunstung

Von der FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nations) wurde eine Referenzoberfläche definiert, für die eine Referenzverdunstung berechnet werden kann. Diese kann zur Kalibrierung von empirischen Gleichungen zur Ermittlung der potentiellen Evapotranspiration herangezogen werden. Als Referenzoberfläche wurde Grasbewuchs mit einer Graslänge von 0,12 m festgelegt. Die Ermittlung der Grasreferenzverdunstung erfolgt mit dem Ansatz nach Penman-Monteith (Gleichung (3.3)), wobei für den Grasbewuchs ein Stomatawiderstand von 70 s/m, ein aerodynamischer Widerstand  $r_a = 208/v$  gemäß Gleichung (3.13) und eine Albedo als Verhältnis der auf die Bodenoberfläche auftreffenden und der von der Bodenoberfläche abgegebenen lang- und kurzwelligen Strahlung definiert wird.

ligen Strahlung von 0,23 festgelegt. Vernachlässigt man näherungsweise die Temperaturabhängigkeit der latenten Verdunstungswärme, lässt sich für Gleichung (3.7) schreiben:  $L = 2,45$  [MJ/kg]. In dem man zusätzlich die Luft als ideales Gas entsprechend Gleichung (3.11) betrachtet, kann die Gleichung nach Penman-Monteith zur Bestimmung der potentiellen Evapotranspiration der Gras-Referenzfläche folgendermaßen dargestellt werden (ALLEN ET AL., 1998):

$$ET_p = \frac{0,408 \cdot s \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot v \cdot p_s - p}{s + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot v)} \quad [\text{mm}] \quad (3.16)$$

Zur Ermittlung der Gras-Referenzverdunstung nach Gleichung (3.16) sind Messdaten zur Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Nettostrahlung und Windgeschwindigkeit erforderlich. Die Nettostrahlung lässt sich ggf. aus der effektiven Sonnenscheindauer ableiten. Näheres dazu kann ALLEN ET AL. (1998) sowie WENDLING (1995) entnommen werden.

### 3.3.5 Potentielle Evapotranspiration auf geneigten Flächen

Es ist zu beachten, dass sich auf geneigten Flächen andere Verdunstungsraten ergeben als auf horizontalen Flächen. Dies beruht zum einen auf der unterschiedlichen Strahlungsexposition und zum anderen auf der größeren Fläche der geneigten Oberfläche im Vergleich zu einer horizontalen Fläche. Der Energieeintrag infolge der Sonneneinstrahlung hängt dabei von der Neigung und der Himmelsrichtung der Fläche ab. Die beschriebenen Verfahren nach Haude und Penman-Monteith zur Ermittlung der potentiellen Evapotranspiration setzen eine horizontale Bezugsfläche voraus. Zur Berücksichtigung einer Neigung kann die damit ermittelte potentielle Evapotranspiration beispielsweise mit Hilfe der von GOLF (1981) aufgestellten Diagramme korrigiert werden.

### 3.3.6 Tatsächliche Evapotranspiration

Wie bereits eingangs beschrieben nimmt die Wasseraufnahme durch die Vegetation bei einer Abnahme des Bodenwassergehaltes gegenüber der potentiellen Evapotranspiration bei vollständiger Sättigung des Bodens ab. Man spricht in diesem Fall von der tatsächlichen Evapotranspiration. Sowohl mit dem Verfahren nach HAUDE (1950) als auch mit dem dargestellten Ansatz nach Penman-Monteith wird nur die potentielle vegetationsspezifische Evapotranspiration ermittelt. Zur Bestimmung der tatsächlichen Evapotranspiration muss die Abhängigkeit der Wasseraufnahme durch die Vegetation vom Bodenwassergehalt berücksichtigt werden. Dazu kann der Ansatz nach DISSE (1999) herangezogen werden:

$$ET_a = \frac{1 - e^{-r \cdot \frac{\theta - \theta_{PWP}}{\theta_{FK} - \theta_{PWP}}}}{1 - 2 \cdot e^{-r} + e^{-r \cdot \frac{\theta - \theta_{PWP}}{\theta_{FK} - \theta_{PWP}}}} \cdot ET_p \quad (3.17)$$

Dabei ist  $r$  [-] ein vegetationsspezifischer Parameter,  $\theta$  der aktuelle volumetrische Wassergehalt,  $\theta_{PWP}$  der volumetrische Wassergehalt beim permanenten Welkepunkt und  $\theta_{FK}$  der volumetrische

Wassergehalt bei der Feldkapazität. Der permanente Welkepunkt wird dabei bei einer Saugspannung von 1500 kPa angenommen.

### 3.4 Wasser im Boden

Ein wesentlicher Bestandteil des Wasserhaushaltes von Erddämmen stellt die Wasserbewegung im Boden und eine daraus resultierende Änderung des Wassergehaltes dar. Die Wasserbewegung im Boden wird zum einen von der Schwerkraft, zum anderen von den hydraulischen Eigenschaften des Bodens beeinflusst. Darüber hinaus können Temperatur- und Feuchtegradienten zu einer Wasserbewegung beitragen. Im Falle von mehrschichtigen Erddämmen mit unterschiedlich durchlässigen Schichten kann es zu einer verstärkten Wasserbewegung in durchlässigeren Schichten kommen. Dies betrifft beispielsweise Dränschichten in technischen Erdbauwerken, die zur gezielten Ableitung des Sickerwasserwassers auf geringer durchlässigen Schichten angeordnet werden (siehe dazu Abbildung 3.1). Derartige Abflüsse werden als Zwischenabfluss bzw. Interflow bezeichnet.

Eine Wasserbewegung im Boden in flüssiger Phase kann sowohl durch hydraulische Gradienten als auch durch Temperaturgradienten verursacht werden. Im Vergleich zum hydraulischen Gradienten ist der Einfluss von Temperaturgradienten jedoch gering. Nachfolgend werden die mathematischen Grundlagen zur Beschreibung der Wasserbewegung infolge von hydraulischen Gradienten dargestellt.

Nach DARCY (1856) besteht in einem gesättigten Boden ein linearer Zusammenhang zwischen der durchströmenden Wassermenge und dem hydraulischen Gradienten, was durch den stoffspezifischen Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  ausgedrückt werden kann. Im eindimensionalen Fall lässt sich das Gesetz von Darcy folgendermaßen darstellen:

$$k = \frac{Q}{A} \cdot \frac{d}{\Delta H} \quad (3.18)$$

Dabei ist  $d$  die Dicke des Bodens [L] und  $\Delta H$  [L] die Differenz des hydraulischen Potentials zwischen einströmender und ausströmender Seite. Mit der Filtergeschwindigkeit  $v$  [L/T] als Quotient aus der durchströmenden Wassermenge  $Q$  [L<sup>3</sup>] und der durchströmten Fläche  $A$  [L<sup>2</sup>] wird aus Gleichung (6.1):

$$k = v \cdot \frac{d}{\Delta H} \quad (3.19)$$

Mit Einführung des hydraulischen Gradienten  $i = d/\Delta H$  ergibt sich:

$$k = \frac{v}{i} \quad (3.20)$$

In einem homogenen, isotropen Boden lautet das Gesetz von Darcy allgemein:

$$v = -k \cdot \text{grad}(H) \quad (3.21)$$

Dabei stellt  $H$  [L] das hydraulische Potential dar. BUCKINGHAM (1907) erweiterte das Gesetz von Darcy auf Wasserströmungen in ungesättigten Böden. Dabei ist zu beachten, dass im ungesättigten Zustand nicht alle Poren mit Wasser gefüllt sind und sich der Sättigungsgrad im Boden bei Wasserbewegungen verändert und dementsprechend keine stationären Strömungsverhältnisse vorliegen. Bei niedrigen Sättigungsgraden wird die Wasserbewegung im Boden durch die darin befindliche Luft behindert. Mit zunehmendem Sättigungsgrad nimmt der Luftanteil ab, der Sättigungsgrad zu und damit der Strömungswiderstand ab. Das bedeutet, dass der Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  vom Sättigungsgrad bzw. volumetrischen Wassergehalt des Bodens abhängig ist. Zusätzlich zum Durchlässigkeitsbeiwert wird im ungesättigten Zustand auch der hydraulische Gradient vom Sättigungsgrad beeinflusst, da im Falle von nicht vollständig gefüllten Poren Saugspannungen infolge von Kapillar- und Adsorptionskräften entstehen. Diese werden als Matrixpotential im Gesamtpotential  $H$  berücksichtigt. Nach BUCKINGHAM (1907) lässt sich die Filtergeschwindigkeit damit folgendermaßen ausdrücken:

$$v = -k(\theta) \cdot \text{grad}(H) \quad (3.22)$$

Dabei stellt  $k(\theta)$  [L/T] den vom volumetrischen Wassergehalt abhängigen Durchlässigkeitsbeiwert dar;  $H$  bezeichnet das Gesamtpotential [L], das der Arbeit entspricht die verrichtet werden muss, um Wasser von einem vorgegebenen Punkt zum Bezugspunkt des betrachteten Kraftfeldes zu bewegen. Das Gesamtpotential wird in der Regel in folgende messbare Teilpotentiale aufgeteilt:

- Das **Gravitationspotential**  $H_g$  berücksichtigt den Einfluss des Schwerfeldes der Erde und erscheint als geodätische Höhe  $z$ .
- Das **Matrixpotential**  $H_m$  umfasst den Einfluss der Bodenmatrix auf das Wasser infolge von Kapillar- und Adsorptionskräften.
- Das **osmotische Potential**  $H_o$  entspricht der Arbeit, die verrichtet werden muss, um eine Einheitsmenge Wasser durch eine semipermeable Membran aus der Bodenlösung zu ziehen. Das osmotische Potential ist dementsprechend stark von der Menge der gelösten Salze abhängig.

Vereinfachend wird das osmotische Potential häufig vernachlässigt, so dass sich das Gesamtpotential als Summe aus dem Gravitations- und Matrixpotential zusammensetzt:

$$H = H_m + H_g \quad (3.23)$$

Prinzipiell muss bei einer Wasserbewegung im Boden die Erhaltung der Masse, ausgedrückt durch die Kontinuitätsbedingung gelten. Diese lässt sich am einfachsten anhand des in Abbildung 3.2 dargestellten Volumenelementes mit den daran auftretenden Filtergeschwindigkeiten ableiten.

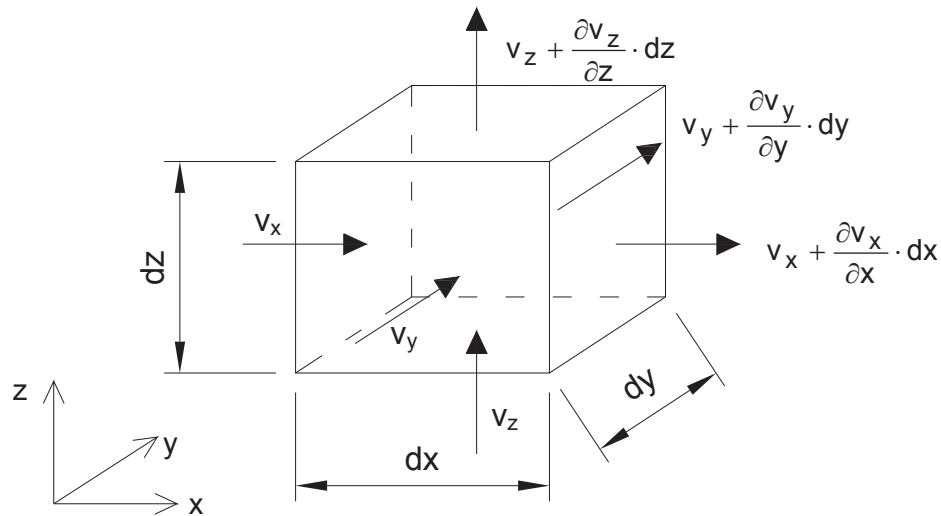


Abbildung 3.2: Volumenelement mit Filtergeschwindigkeiten

Für den stationären Zustand, in dem die einströmende Wassermenge gleich der ausströmenden Wassermenge ist, kann geschrieben werden:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (3.24)$$

Dabei bezeichnen  $v_x$ ,  $v_y$  und  $v_z$  die Filtergeschwindigkeiten in x-, y- und z-Richtung. Im instationären Zustand entspricht die Summe aus einströmender und ausströmender Wassermenge der zeitabhängigen Änderung des volumetrischen Wassergehaltes  $\theta$  und Gleichung (3.24) nimmt folgende Form an:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3.25)$$

Durch Kombination des Fließgesetzes nach Darcy-Buckingham (Gleichung (3.22)) mit der Kontinuitätsbedingung (Gleichung (3.25)) erhält man nach einigen Umformungen die sogenannte Richards-Gleichung:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k(\theta) \cdot \frac{\partial H_m}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k(\theta) \cdot \frac{\partial H_m}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(\theta) \cdot \frac{\partial H_m}{\partial z} + 1 \right] = C(H_m) \frac{\partial H_m}{\partial t} \quad (3.26)$$

$$\text{mit } C(H_m) = \frac{\partial \theta}{\partial H_m} \quad (3.27)$$

$C(H_m)$  [1/L] wird als Kapillarkapazität bezeichnet und gibt die Neigung der Beziehung zwischen dem volumetrischen Wassergehalt und dem Matrixpotential wieder.

Bei der Richards-Gleichung handelt es sich um eine nicht-lineare partielle Differentialgleichung, die in der Regel nur mit numerischen Verfahren gelöst werden kann. Zur Lösung der Differentialgleichung ist eine mathematische Beschreibung der Zusammenhänge zwischen dem Matrixpotential bzw. der Matrixspannung und dem volumetrischen Wassergehalt sowie der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und dem volumetrischen Wassergehalt erforderlich. Beide Beziehungen sind nicht nur von der Bodenart sondern auch vom Bodenzustand abhängig. Das bedeutet, dass die Dichte des Bodens bzw. bei feinkörnigen Böden zusätzlich die Poren- und Aggregatstruktur einen Einfluss auf die Beziehung zwischen Matrixpotential und Wassergehalt und auf die Durchlässigkeitseigenschaften ausüben.

Das Matrixpotential  $H_m$  [L] und die Matrixspannung  $\psi$  [M/(T<sup>2</sup> · L)], die auch als Saugspannung bezeichnet wird und üblicherweise in der Einheit kN/m<sup>2</sup> angegeben wird, stehen in folgendem Zusammenhang:

$$H_m = \frac{\psi}{\rho \cdot g} \quad (3.28)$$

Darin bezeichnen  $\rho$  [M/L<sup>3</sup>] die Dichte von Wasser und  $g$  [L/T<sup>2</sup>] die Erdbeschleunigung.

Die Abbildung 3.3 zeigt die prinzipielle Form einer Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung. Sie zeigt einen hysteretischen Verlauf, der davon abhängt, ob der Boden be- oder entwässert wird. Die bei gleichem Wassergehalt feststellbaren höheren Saugspannungen bei Entwässerung beruhen auf dem sogenannten Flaschenhalseffekt bei zusammenhängenden Porensystemen sowie einem unterschiedlichen Benetzungswinkel bei Be- oder Entwässerung und möglichen Lufteinschlüssen.

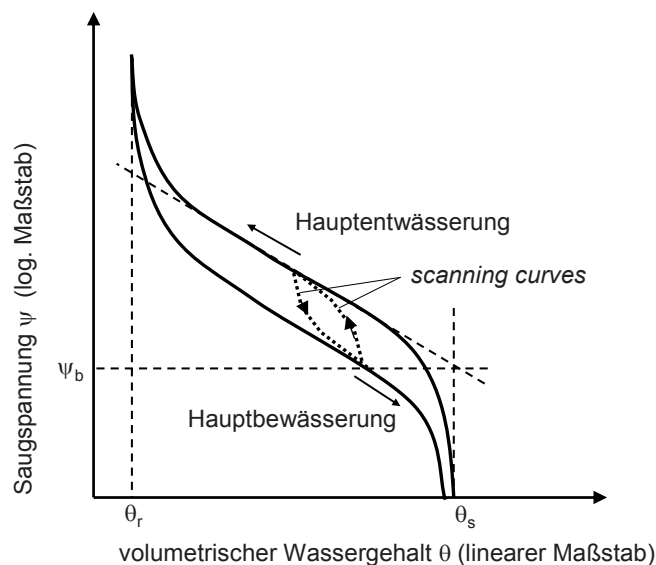


Abbildung 3.3: Typische Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung (entnommen aus BIRLE, 2011)

Aus dem Kurvenverlauf einer Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung können in der Regel einige charakteristische Punkte abgeleitet werden:



- Der Sättigungswassergehalt  $\theta_s$  (siehe Abbildung 3.3) beschreibt den Wassergehalt, bei welchem der Boden vollständig gesättigt ist und stellt in der Regel den Ausgangszustand für die Ermittlung der Entwässerungskurve dar.
- Aus dem Schnittpunkt zweier an die Entwässerungskurve angelegter Tangenten kann der sogenannte Lufteintrittspunkt  $\psi_b$  abgeleitet werden (siehe Abbildung 3.3). Mit diesem kann abgeschätzt werden, bei welcher Saugspannung Luft in den Boden eindringt und eine Entwässerung beginnt.
- Bei sehr geringen Wassergehalten steigen die Saugspannungen sehr stark an, was sich an einem steilen Kurvenverlauf äußert. Legt man daran eine Tangente an, kann der sogenannte Restwassergehalt  $\theta_r$  bestimmt werden (siehe Abbildung 3.3).

Die Abbildung 3.4 stellt die prinzipielle Form der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung für unterschiedliche Böden als Entwässerungskurve unter Vernachlässigung des hysteretischen Verhaltens dar. Es ist erkennbar, dass der Lufteintrittspunkt, welcher der passiven kapillaren Steighöhe entspricht, mit zunehmendem Feinkornanteil zunimmt. Sandige Böden mit geringem Feinkornanteil zeigen außerdem eine starke Entwässerung bei Saugspannungen oberhalb des Lufteintrittspunktes, was aus dem sehr flachen Kurvenverlauf in Abbildung 3.4 deutlich wird.

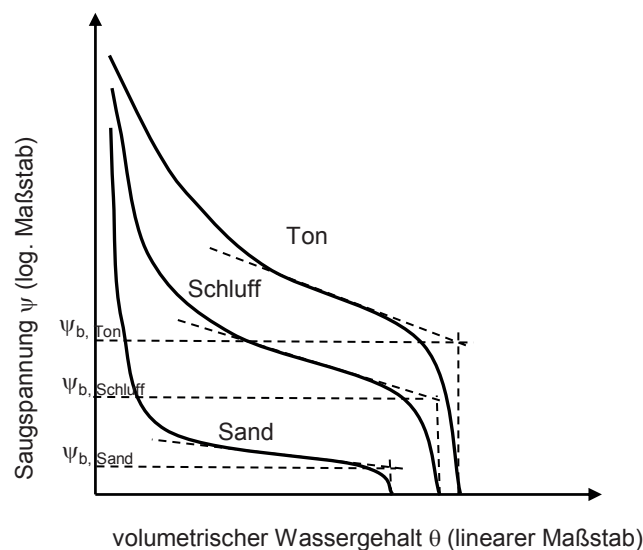


Abbildung 3.4: Typische Beziehung zwischen Saugspannung und volumetrischen Wassergehalt für unterschiedliche Böden (entnommen aus BIRLE, 2011)

Die experimentelle Bestimmung der Beziehung zwischen der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und dem volumetrischen Wassergehalt ist mit sehr großem Aufwand verbunden. Deshalb wurden Ansätze entwickelt, um diese Funktion aus der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung abzuleiten. Eines der am weitesten verbreiteten Modelle zur Beschreibung dieser Zusammenhänge geht auf VAN GENUCHTEN (1980) und MUALEM (1976) zurück. VAN GENUCHTEN (1980) entwickelte den von BROOKS UND COREY 1964 vorgestellten Ansatz weiter und schlug folgendes dreiparametrische Modell vor:

$$S_e = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha \cdot \psi)^n} \right]^m \quad (3.29)$$

Dabei sind  $n$  [-],  $m$  [-] und  $\alpha$  [1/L] die an einen messtechnisch ermittelten Verlauf einer Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung anzupassenden Parameter. Der Parameter  $\alpha$  kann dabei in Zusammenhang mit dem Lufttrittspunkt gebracht werden;  $n$  beeinflusst die Neigung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung im mittleren Bereich. Mit dem Parameter  $m$  kann die Form der Kurve insgesamt angepasst werden. Zur Reduzierung der Parameteranzahl wird der Parameter  $m$  aufgrund eines empirisch gefundenen Zusammenhangs häufig in folgende Beziehung zu  $n$  gesetzt:

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (3.30)$$

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

$$k_r(\theta) = \frac{k(\theta)}{k_s} = S_e^\tau \left[ \frac{\int_0^\theta \frac{d\theta}{\psi}}{\int_0^{\theta_s} \frac{d\theta}{\psi}} \right]^2 \quad (3.31)$$

Dabei sind:

$k_r$ : relativer Durchlässigkeitsbeiwert [-]

$k$ : absoluter Durchlässigkeitsbeiwert [L/T]

$k_s$ : gesättigter Durchlässigkeitsbeiwert [L/T]

$\tau$ : Tortuositätsfaktor [-]

$$S_e: \text{effektiver Sättigungsgrad [-], } S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \text{ bzw. } S_e = \frac{S - S_r}{S_s - S_r} \quad (3.32)$$

MUALEM (1976) verglich seinen Ansatz mit 45 unterschiedlichen Böden, für die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen und die Beziehung zwischen der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und dem Sättigungsgrad experimentell bestimmt wurden. Die beste Anpassung an die gemessenen Werte erhielt er mit dem Tortuositätsfaktor  $\tau = 0,5$ . Verknüpft man die Gleichung von MUALEM (1976) mit dem Ansatz von VAN GENUCHTEN (1980) erhält man bei Verwendung des Tortuositätsfaktors  $\tau = 0,5$ :

$$k_r(\psi) = \frac{k(\psi)}{k_s} \cdot \frac{\left[ 1 - (\alpha|\psi|)^{n-1} \cdot \left[ 1 + (\alpha|\psi|)^n \right]^{-m} \right]^2}{\left[ 1 + (\alpha|\psi|)^n \right]^{\frac{m}{2}}} \quad (3.33)$$

Unter Verwendung des relativen Sättigungsgrades  $S_e$  wird aus Gleichung (3.33):

$$k(S_e) = k_s \cdot S_e^{0,5} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - S_e \frac{1}{m} \right)^m \right]^2 \quad (3.34)$$

Mit Gleichung (3.34) lässt sich die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit direkt aus dem Matrixpotential unter Verwendung der Parameter  $\alpha$ ,  $n$  und  $m$  entsprechend dem Modell nach VAN GENUCHTEN (1980) ermitteln. Der Parameter  $m$  ist dabei nicht unabhängig, sondern entsprechend Gleichung (3.30) mit  $n$  verknüpft.

Das bedeutet, dass die Beziehungen zwischen Saugspannung und Wassergehalt sowie der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und dem Wassergehalt in geschlossener Form aus den Gleichungen (3.29) und (3.34) ermittelt werden können. Die zu bestimmenden Eingangsparameter sind der volumetrische Wassergehalt bei Sättigung  $\theta_s$  bzw. der Sättigungsgrad bei Vollsättigung  $S_s$ , der volumetrische Restwassergehalt  $\theta_r$  bzw. der Sättigungsgrad beim Restwassergehalt  $S_r$ , der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert  $k_s$ , sowie die Parameter  $\alpha$  und  $n$ . Der volumetrische Wassergehalt und der Sättigungsgrad sind über den Porenanteil miteinander verknüpft.

#### **4 Vorliegende Feldstudien zum Wasserhaushalt von Erdbauwerken**

Zum Wasserhaushalt von Erdbauwerken wie z. B. Straßendämme, Lärm- und Sichtschutzhügel oder Geländeaufschüttungen, bei denen schadstoffbelastete Böden zum Einsatz kamen, sind den Autoren abgesehen von den in Abschnitt 4.2 vorgestellten Untersuchungen bisher keine Feldstudien bekannt. Gegenwärtig werden Untersuchungen von der BAST in Zusammenarbeit mit der FH Augsburg zur Durchsickerung von Straßenböschungen mit Hilfe einer Lysimeteranlage durchgeführt. Ergebnisse dazu liegen aber derzeit noch nicht vor.

Jedoch wurden verschiedene Untersuchungen zum Wasserhaushalt von Erdbauwerken im Zusammenhang mit folgenden Fragestellungen durchgeführt:

- Wassergehaltsänderungen in Tragschichten und im Straßenunterbau und damit verbundene Sackungserscheinungen
- Standsicherheit von Böschungen in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad der Deckschichten
- Wasserhaushalt von Oberflächenabdichtungen bei Deponien
- Regenwasserabflüsse bei Grünflächen auf Dächern

Im Abschnitt 4.1 werden die in diesem Zusammenhang durchgeführten Untersuchungen kurz dargestellt und die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst. Im Abschnitt 4.2 werden die vom Zentrum Geotechnik der TU München an einer Versuchsschüttung am Münchner Flughafen gewonnenen Erkenntnisse beschrieben.

##### **4.1 Untersuchungen an Straßendämmen, Einschnittsböschungen, Deponien und Flachdächern**

NGUYEN ET AL. (2010) führten Untersuchungen zur Wasserbewegung in einem Straßendamm in Kanada durch. Mit Hilfe von Temperaturleitfähigkeitssensoren ermittelten sie die Saugspannungen im Straßendamm bis in eine Tiefe von 2,5 m. Die unterhalb der Fahrbahn eingebrachten Sensoren zeigten dabei keine signifikante Veränderung der Saugspannungen. Dagegen beobachteten sie im Bereich unterhalb des Banketts deutliche Veränderungen der Saugspannungen in Abhängigkeit von den klimatischen Verhältnissen. Mit zunehmender Tiefe der Sensoren nimmt die Schwankungsbreite dabei deutlich ab. Insgesamt ist ein starker jahreszeitlicher Einfluss feststellbar. In einzelnen Monaten kann die Evapotranspiration die Niederschlagsmenge übersteigen. Da keine Wetterstation vor Ort installiert wurde und weder der Oberflächenabfluss noch Sickerwassermengen gefasst wurden, konnten diesbezüglich keine Angaben gemacht werden.

CARDOSO ET AL. (2010) führten experimentelle Untersuchungen an einem aus gebrochenem Mergel errichteten Straßendamm in Portugal durch. Aufgrund der veränderlich festen Eigenschaften des Mergels besteht bei einer Wasseraufnahme prinzipiell die Gefahr von Sackungen bzw. Quellerscheinungen. Im Zuge der Herstellung des Straßendamms wurden deshalb Feuchtesensoren zur Messung des Wassergehaltes in unterschiedlichen Tiefen in den Damm eingebaut. Die Messergebnisse belegen unmittelbar nach Einbau des Materials entsprechend der natürlichen Inhomogenität des Materials geringe Schwankungen im Wassergehalt. Die Messungen zeigen, dass der Boden einem Gleichgewichtszustand entgegenstrebt, wobei die Wassergehaltsänderungen aufgrund

der geringen Durchlässigkeit im ungesättigten Zustand sehr langsam stattfinden. So war zum Ende der Messungen nach 9 Monaten noch kein Gleichgewichtszustand feststellbar. Da die Messungen nur in tiefen Bereichen des Damms zwischen 5 m und 10 m unterhalb der Bodenoberfläche durchgeführt wurden, wurden keine witterungsbedingten Wassergehaltsänderungen festgestellt. Zu den Witterungsverhältnissen und der damit verbundenen Interaktion zwischen Atmosphäre und Boden (Evapotranspiration, Infiltration, Niederschlag, Oberflächenabfluss) wurden keine Angaben gemacht.

NELSON UND OVERTON (2010) führten Untersuchungen zum Wassergehalt von Tragschichten unterhalb gebundener Deckschichten durch. Sie stellten fest, dass es am Fahrbahnrand zu deutlichen Veränderungen im Wassergehalt kommen kann, wenn keine ausreichende Drainage des von der Fahrbahn abgeleiteten Oberflächenwassers vorhanden ist. Bei ausreichenden Dränmöglichkeiten kommt es nur zu geringen Wassergehaltsänderungen.

Im Zusammenhang mit der Standsicherheit von Hängen wurden umfangreiche Feldstudien durchgeführt. Diese fokussieren jedoch überwiegend auf die Messung des Sättigungsgrades und der Saugspannungen im Oberboden in Abhängigkeit von den klimatischen Verhältnissen (z.B. NG ET AL. 2003). Eine quantitative Analyse der in die Böschungen infiltrierenden Wassermenge und des Oberflächenabflusses findet sich nur vereinzelt. RAHARDJO ET AL. (2005) führten experimentelle Untersuchungen an einem verwitterten Boden in Singapur vor. Dabei wurde untersucht, wie sich unterschiedliche Niederschlagsintensitäten auf den Wasserhaushalt der untersuchten, ca. 26° steilen Böschung auswirken. Sie stellten dabei fest, dass die in den Boden infiltrierende Wassermenge wesentlich von der Niederschlagsintensität abhängt. Der Sättigungsgrad des Bodens bei Beginn des Niederschlagsereignisses hat dagegen keinen maßgebenden Einfluss auf die Infiltrationsmenge. Er hat aber Auswirkungen auf den zeitlichen Verlauf der Infiltrationsrate. So wurde bei einem geringen Sättigungsgrad des Bodens zu Beginn des Regenereignisses zunächst eine sehr starke Zunahme des Oberflächenabflusses festgestellt; mit zunehmendem Sättigungsgrad des Bodens nimmt dieser aber anschließend wieder stark ab. Insbesondere bei kurzen Niederschlagsereignissen kann der Sättigungsgrad des Bodens vor Beginn des Niederschlagsereignisses deshalb einen signifikanten Einfluss auf die infiltrierende Wassermenge nehmen. Ihre Ergebnisse zeigen bei Niederschlägen bis ca. 10 mm eine vollständige Versickerung des Niederschlages im Boden. Bei höheren Niederschlägen stellen sich geringere Infiltrationsraten ein, wobei etwa von einer linearen Abnahme auf eine Infiltrationsrate von 40 % bei einem Niederschlag von ca. 60 mm/d ausgegangen werden kann. Der Durchlässigkeitsbeiwert der Oberbodenschicht (mittelplastischer Ton nach DIN 18196) betrug  $5 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Ähnliche experimentelle Untersuchungen wurden von THIELEN (2008) an einem Hang in der Schweiz durchgeführt. Die Hangneigung betrug zwischen 17° und 27°. Das Versuchsfeld wurde messtechnisch so ausgestattet, dass neben den klimatischen Verhältnissen vor Ort auch der Oberflächenabfluss gemessen werden konnte. Die Evapotranspiration wurde auf Basis der Klimadaten mit Hilfe der FAO-Grasreferenzverdunstungsmethode ermittelt. Die Ergebnisse zeigen ähnlich wie die von RAHARDJO ET AL. (2005) durchgeführten Untersuchungen einen direkten Zusammenhang zwischen dem Oberflächenabfluss und dem Niederschlag.

Im Zusammenhang mit Oberflächenabdichtungen von Deponien sind einige Felduntersuchungen zum Wasserhaushalt der Abdichtungsschichten durchgeführt worden. MELCHIOR ET AL. (2002) haben anhand eines Großlysimeters den Wasserhaushalt von Oberflächenabdichtungssystemen auf

der Deponie Hamburg-Georgswerder untersucht. Dabei wurden unter anderem Abdichtungssysteme bestehend aus einer Rekultivierungsschicht, einer Entwässerungsschicht und einer mineralischen Dichtungsschicht mit darunter liegenden Drän- und Ausgleichsschichten betrachtet. Die Neigung der Oberfläche betrug 1:5. Die Messungen zeigen im Mittel einen sehr geringen Oberflächenabfluss von ca. 1 % des Niederschlages und eine Verdunstung von ca. 53 % des Niederschlages. Damit infiltriert etwa ein Anteil von 46 % des Niederschlages in die Rekultivierungsschicht und wird als Zwischenabfluss in der Dränschicht abgeführt bzw. durchsickert die mineralische Dichtung. Aufgrund von Rissbildung in der mineralischen Dichtung wurde ca. 4 Jahre nach Herstellung der Abdichtung eine Zunahme der Durchsickerung der mineralischen Dichtungsschicht von 2 % auf ca. 20 % festgestellt.

Ähnlich geringe Oberflächenabflüsse wurden von WAGNER UND SCHNATMEYER (2002) im Rahmen eines Großversuches auf einer Deponie in Luxemburg festgestellt. Die Neigung des Oberflächenabdichtungssystems betrug dabei 5 % (1:20). Die Verdunstung lag bei ca. 60 % des Niederschlages.

Ergebnisse von Testfeldern auf einer Schlickdeponie in Hamburg, die von GRÖNGRÖFT ET AL. (2002) veröffentlicht wurden, zeigen für das untersuchte Oberflächenabdichtungssystem mit einer Neigung von 8% ebenfalls einen vernachlässigbar geringen Oberflächenabfluss.

HENKEN-MELLIES (2002) stellte anhand eines Großlysimeters auf einer Deponie in Nordbayern bei einer Neigung des Abdichtungssystems von 20 % einen auf den Niederschlag bezogenen Oberflächenabfluss von ca. 11 % fest.

NYHAN ET. AL. (1997) untersuchten die Wirksamkeit von 4 unterschiedlich ausgebildeten Abdeckungen von Deponien in der semiariden Region von Los Alamos. Sie studierten die Auswirkungen der Oberflächenneigung auf den Wasserhaushalt, wobei die Neigung zwischen 5 % und 25 % variierte. Auf den Versuchsflächen wurden der Oberflächenabfluss, der Schichtenabfluss, die Durchsickerung und der Niederschlag gemessen. Darüber hinaus wurden TDR-Sonden installiert, um die Änderungen des Wassergehalts verfolgen zu können. Die Verdunstung (die Versuchsflächen wurden nicht begrünt) wurde aus der Wasserbilanz berechnet. Für den betrachteten Zeitraum von 4 Jahren konnte kein systematischer Zusammenhang zwischen der Oberflächenneigung und dem Oberflächenabfluss festgestellt werden, wobei der Oberflächenabfluss zwischen 1 % und 3 % des Niederschlages betrug. Die Verdunstung erwies sich als wichtigste Komponente des Wasserhaushaltes. Sie betrug etwa 86 % bis 91 % des Niederschlages, wobei sich die höheren Werte bei größeren Neigungen aufgrund der höheren Strahlungsintensität einstellten. Die Durchsickerung und der Zwischenabfluss nahmen mit zunehmender Neigung ab.

WARREN ET. AL. (1996) untersuchten den Wasserhaushalt von vier unterschiedlich ausgebauten Deckschichten auf Deponien in einem semiariden Standort im Norden von Utah, wo ca. 40 % des Niederschlages als Schnee anfallen. Es wurden der Oberflächenabfluss, der Schichtenabfluss, die Durchsickerung, Veränderungen des Wassergehaltes und die klimatischen Bedingungen messtechnisch erfasst. Basierend auf den über einen Zeitraum von 45 Monaten gesammelten Daten stellt die Verdunstung die wichtigste Komponente des Wasserhaushaltes dar. Sie beträgt in diesem Zeitraum zwischen 70 % und 86 % des Niederschlages. Der Oberflächenabfluss dagegen war mit einem Anteil von maximal 3 % des Niederschlages relativ unbedeutend. Die Durchsickerung



schwankt je nach Aufbau der Oberflächenabdeckung zwischen weniger als 1 % und 15 % der Niederschlagsmenge.

HJELMAR ET. AL. (2006) bewerteten für die Verwendung von Müllverbrennungssasche im Straßenbau das Verhalten von sechs Konstruktionsweisen, in denen Müllverbrennungssaschen im Unterbau verwendet wurden. Es wurden unterschiedliche Arten von Deckschichten (Asphalt, Steinplatten und Kiesel) untersucht. Nach zwei Jahren der Überwachung zeigte sich für die Bauweise mit der Asphaltdeckschicht, dass nur etwa 3,5 % des Niederschlages die Asphaltdeckschicht durchsickerten und die größte Menge des als Oberflächenabfluss über die Fahrbahn abgeführten Wassers seitlich versickert. Die Ergebnisse weisen auch darauf hin, dass der Zwischenabfluss auf der Oberfläche der Tragschichten, welche aus Müllverbrennungssaschen hergestellt wurden, eine bedeutende Rolle für den Wasserhaushalt spielt.

DWYER (2003) führte in den USA im Bundesstaat New Mexico einen groß angelegten Feldversuch durch, um die Effizienz unterschiedlicher Deponieabdeckungen zu untersuchen. Es wurden hierfür nebeneinander sechs verschiedene Bauweisen für Deponieabdeckungen hergestellt und von 1997 bis 2002 überwacht. Es wurden messtechnisch Informationen zur Bodenfeuchte, zum Sickerwasser, zu Zwischenabflüssen, zum Oberflächenabfluss und zu den klimatischen Bedingungen wie Niederschlag, Sonneneinstrahlung, Temperatur, Windgeschwindigkeit, Windrichtung sowie Luftfeuchtigkeit gewonnen. Die Evapotranspiration wurde aus der Wasserbilanz abgeleitet und es zeigte sich, dass die Verdunstung erneut den beherrschenden Prozess darstellte. Eine Versickerung wurde vor allem bei Gewittern oder nach einer Anreihung von Niederschlagsereignissen festgestellt. Messungen der Zwischenabflüsse zeigten, dass dieser Prozess mit nur 0,01 % bis 0,56 % vom Gesamtniederschlag unbedeutend ist.

KHIRE ET. AL. (1997) verglichen die Effizienz einer Deponieabdeckung unter verschiedenen klimatischen Bedingungen durch den Bau von zwei Versuchsfeldern, einer im relativ feuchten Live Oak, Atlanta, und einer in der trockenen Region von East Wenatchee. Die Testfelder wurden mit Instrumenten für die Überwachung der klimatischen Bedingungen, des Oberflächenabflusses, der Veränderungen im Wassergehalt des Bodens und der Versickerung ausgestattet. Dazu wurden u. a. Lysimeter installiert. Die Versuchsergebnisse zeigen eine Durchsickerung der Deponieabdeckung zwischen 2,5 % und 8 % des gemessenen Niederschlages, je nach Zustand der Deckschicht.

ALBRIGHT ET. AL. (2004) untersuchten den Wasserhaushalt von 18 Deponieabdeckungen, die in verschiedenen Gebieten der USA ausgeführt wurden. Zu diesem Zweck wurden Lysimeter mit Abmessungen von 10 m auf 20 m verwendet. Es wurden der Oberflächenabfluss, die Wasserspeicherung, Zwischenabflüsse sowie die Versickerung zusammen mit meteorologischen Parametern an allen Standorten messtechnisch erfasst. Laut der in 4 Jahren gewonnenen Daten betrug der Oberflächenabfluss 0 bis 10 % des Niederschlages und war weitgehend unabhängig von den klimatischen Bedingungen, der Neigung und der Art der Deckschicht. Ebenso stellt die seitliche Entwässerung mit durchschnittlich nur 2 % einen sehr kleinen Bruchteil der Niederschlagsmenge dar. Die Durchsickerungsmenge war stark abhängig von der Art des Oberflächenabdichtungssystems und lag zwischen 0,4 % und 18 % des gesamten Niederschlages.

Untersuchungen zum Regenwasserabfluss auf Dachbegrünungen zeigen, dass der Jahresabflussbeiwert und der Abflussbeiwert für einen Bemessungsregen maßgeblich von der Dicke und der Art der Vegetationsschichten abhängen. Für eine extensive Dachbegrünung werden von HOFFMANN



UND FABRY (1999) bei einer Dachneigung von ca. 5 % Jahresabflussbeiwerte zwischen 0,38 (bei einer Dicke von 8 cm) und 0,16 (bei einer Dicke von 35 cm) genannt. Diese Werte liegen etwas oberhalb der bei flach geneigten Oberflächenabdichtungssystemen gemessenen Oberflächenabflüsse. Dies ist aber plausibel, da die Jahresabflussbeiwerte bei Gründächern sowohl den Oberflächenabfluss als auch den Sickerwasserabfluss des Gründaches beinhalten.

Für den auf einen Bemessungsregen bezogenen Abflussbeiwert von Gründächern werden von der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. bei Dachneigungen bis 5 % Abflussbeiwerte von 0,7 (bei Dicken < 4 cm) bis 0,1 (bei Dicken > 50 cm) genannt (nach Hoffmann und Fabry, 1999).

Der Literaturüberblick zeigt, dass der Wasserhaushalt von Erdbauwerken wie bereits in Abschnitt 3.2 beschrieben sowohl von den klimatischen Verhältnissen als auch von den Eigenschaften des Hanges (Neigung, Bodenart, Bodenzustand, Vegetation) abhängt. Zur Quantifizierung des Oberflächenabflusses und der Infiltrationsrate sind deshalb stets ort- und bodenspezifische Untersuchungen erforderlich. Es lassen sich aus dem Literaturüberblick allerdings einige Tendenzen erkennen:

- Die im Zusammenhang mit Oberflächenabdichtungen von Deponien durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass der Oberflächenabfluss bei geringen Böschungsneigungen bis ca. 8 % ( $4,6^\circ$ ) bei einem bewachsenen Hang vernachlässigt werden kann.
- Aus den von RAHARDJO ET AL. (2005) und THIELEN (2008) zur Standsicherheit von Hängen durchgeführten Untersuchungen ist zu erkennen, dass die Oberflächenabflüsse bei entsprechend steil geneigten Hängen eine starke Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität aufweisen. Bei geringen Niederschlägen stellt sich fast eine vollständige Versickerung in den Oberboden ein. Mit zunehmenden Niederschlägen nimmt der Oberflächenabfluss etwa proportional zum Niederschlag zu.
- Die von CARDOSO ET AL. (2010) dargestellten Messungen zeigen, dass der Wassergehalt einer verdichteten Erdschüttung unmittelbar nach Einbau entsprechend der Variabilität des Einbauwassergehaltes lokale Schwankungen aufweist und sich in der Folge aufgrund des Strebens nach einem Gleichgewichtszustand Wasserbewegungen einstellen. Diese können insbesondere bei trocken verdichteten Böden aufgrund der geringen Wasserleitfähigkeit zeitlich sehr lange andauern.
- Aus den Untersuchungen von NGUYEN ET AL. (2010) und CARDOSO ET AL. (2010) ist zu erkennen, dass oberflächennahe Bereiche einer Erdschüttung in Abhängigkeit von den klimatischen Verhältnissen signifikante Änderungen im Wassergehalt erfahren. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Intensität der Bodenreaktion jedoch stark ab und es sind nur bei Betrachtung größerer Zeitintervalle nennenswerte Wassergehaltsänderungen festzustellen.
- Die Untersuchungen von NYHAN ET. AL. (1997), WARREN ET. AL. (1996) und DWYER (2003) zeigen, dass die Evapotranspiration einen maßgeblichen Anteil am Wasserhaushalt von Oberflächenabdichtungssystemen insbesondere an trockenen Standorten hat.

## 4.2 Großmaßstäbliche Versuchsschüttung am Münchner Flughafen

### 4.2.1 Hintergrund

Im Zuge der Planungen einer 3. Start- und Landebahn am Münchner Flughafen wurden umfangreiche Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwendung von organischen Böden in Geländeanschüttungen durchgeführt. Es war geplant, die im Bereich der 3. Start- und Landebahn liegenden und im Zuge des Baus anfallenden organischen Böden u. a. für Lärm- und Sichtschutzhügel zu verwenden. Dabei war zu beachten, dass die betreffenden organischen Böden natürlich bedingt einen erhöhten Anteil an Arsen aufweisen und dadurch technische Sicherungsmaßnahmen erforderlich werden, um eine Durchsickerung dieser Böden zu vermeiden. Da die im Bereich der 3. Start- und Landebahn vorliegenden organogenen Tone im verdichteten Zustand bereits einen sehr geringen Durchlässigkeitsbeiwert aufweisen, sollten die aus diesen Böden zu errichtenden Lärm- bzw. Sichtschutzwälle gemäß der Bauweise E des Merkblatts unter Verzicht auf eine zusätzliche Dichtungsschicht errichtet werden.

Im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsvorhabens wurden die konkreten Grenzen der Einsatzbarkeit der Böden ermittelt sowie die Einbautechnologien zur Erzielung einer hohen Verdichtung und möglichst geringen Durchlässigkeit untersucht. Im Mittelpunkt der in diesem Zusammenhang durchgeführten Feld- und Laboruntersuchungen stand eine großmaßstäbliche Versuchsschüttung, die zur Erfassung des Wasserhaushaltes sowie der Wasserbewegung im Boden messtechnisch umfangreich ausgestattet wurde. Die Ergebnisse des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens sind in den unveröffentlichten Berichten des Zentrum Geotechnik (Zentrum Geotechnik der TU München, 2010 und 2011), in BIRLE ET AL. (2010), in BIRLE (2012) und in BIRLE UND HEYER (2012) dargestellt. Im Folgenden wird auf den Aufbau der Versuchsschüttung eingegangen und werden die daran erzielten Erkenntnisse zum Wasserhaushalt beschrieben.

### 4.2.2 Böden

#### 4.2.2.1 Klassifikation

Gemäß DIN 18196 handelt es sich bei dem näher untersuchten und für die Versuchsschüttung verwendeten Boden (im Folgenden als Kernboden bezeichnet) um einen organogenen Ton mit einem durchschnittlichen Wassergehalt an der Fließgrenze  $w_L = 124$  %, einem durchschnittlichen Wassergehalt an der Ausrollgrenze  $w_P = 44$  % und einem Glühverlust von ca. 27 %. Der Tonanteil beträgt ca. 5 %. Die Verdichtungseigenschaften wurden anhand von Proctorversuchen untersucht. Im Gegensatz zu mineralischen Böden konnte dabei kein ausgeprägtes Proctor-Optimum festgestellt werden. Vielmehr wurde eine Trockendichte von ca.  $0,8 \text{ g/cm}^3$  bei einem Wassergehalt zwischen 55 % und 75 % erzielt. (siehe Abbildung 4.1).

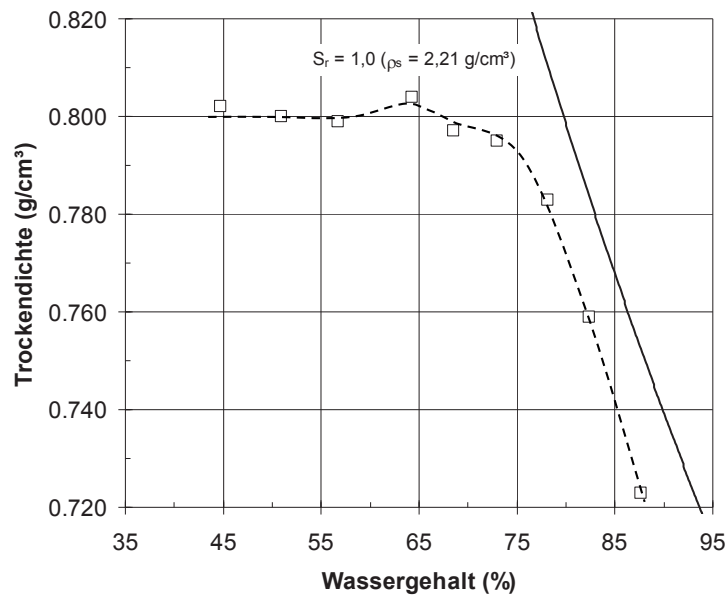


Abbildung 4.1: Proctorkurve des organogenen Tones (BIRLE, 2012)

Der für die Andeckung der Versuchsschüttung verwendete Boden (Im Folgenden als Oberboden bezeichnet) weist ähnliche Eigenschaften wie der Kernboden auf. Mit einer Fließgrenze  $w_L = 93,3\%$  und einer Ausrollgrenze  $w_P = 56,3\%$  handelt es sich nach DIN 18196 um einen Ton mit organischen Beimengungen bzw. organogenen Ton (OT). Der Glühverlust beträgt im Mittel  $V_{GL} = 25,3\%$ .

#### 4.2.2.2 Durchlässigkeit im gesättigten Zustand

Der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert der Böden hängt stark vom Einbauwassergehalt und von der Einbaudichte ab. An verdichteten Proben des Kernbodens wurde bei einer Trockendichte von jeweils  $0,8\text{ g/cm}^3$  für einen Einbauwassergehalt von  $55\%$  ein Durchlässigkeitsbeiwert  $k = 5 \cdot 10^{-8}\text{ m/s}$  und für einen Einbauwassergehalt von  $75\%$  ein Durchlässigkeitsbeiwert  $k = 5 \cdot 10^{-9}\text{ m/s}$  festgestellt.

An Proben des Oberbodens wurden nach Einbau in der Versuchsschüttung Durchlässigkeitsbeiwerte von im Mittel  $k = 5 \cdot 10^{-8}\text{ m/s}$  bestimmt.

#### 4.2.2.3 Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung

Zur Beschreibung der Wasserbewegung im ungesättigten Zustand ist die Kenntnis der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung von herausragender Bedeutung. Die Grundlagen dazu sind in Abschnitt 3.4 beschrieben. Die im Zuge des Forschungsvorhabens durchgeführten experimentellen Untersuchungen sind ausführlich bei BIRLE (2012) beschrieben und werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt.

Für den Kernboden wurde die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung an Proben, die bei einem Wassergehalt von  $59\%$  sowie  $73\%$  verdichtet wurden, ermittelt. Der Oberboden wurde an Proben mit einem Einbauwassergehalt von  $75\%$  untersucht. Zur Ermittlung des Saugspannungsbereiches bis  $500\text{ kPa}$  kamen Saugspannungskontrollierte Oedometerzellen zum Einsatz; der hohe Saugspannungsbereich über  $500\text{ kPa}$  wurde mit Hilfe eines Feuchtigkeitsmessgerätes nach der

Taupunktmethode untersucht. Teilweise wurden die Proben zudem mit Hilfe von Tensiometern untersucht.

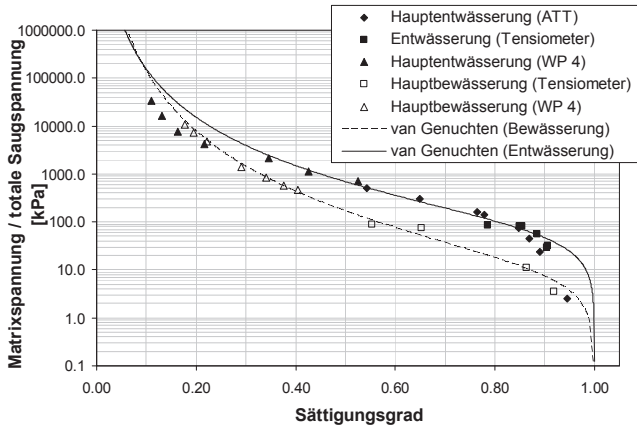
Die Saugspannungs-kontrollierte Oedometerzelle beruht auf dem Prinzip der Achsen-Translations-Technik (ATT). Danach wird die Saugspannung (Matrixspannung  $\psi_m$ ) als Differenz zwischen dem Luftdruck  $u_a$  und dem Wasserdruck  $u_w$  eingestellt:

$$\psi_m = u_a - u_w \quad (4.1)$$

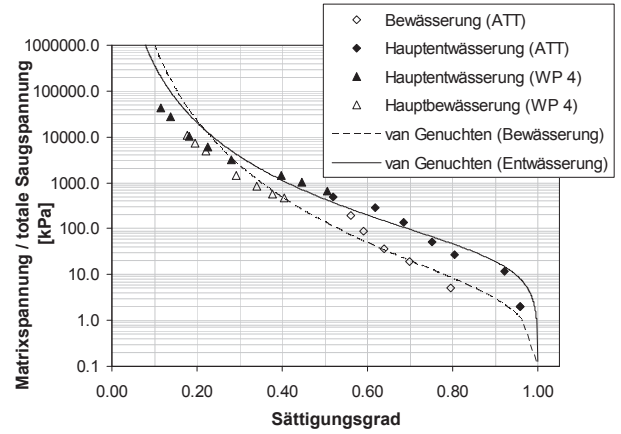
Die Bodenproben wurden nach Einbau in die Oedometerzellen zunächst schrittweise durch Reduzierung des Luftdruckes bei konstantem Wasserdruck bis zu einer Saugspannung  $\psi_m < 10$  kPa aufgesättigt und anschließend durch stufenweise Erhöhung des Luftdruckes entwässert. Der sich bei den einzelnen Saugspannungsstufen einstellende Wassergehalt des Bodens wurde durch eine Quantifizierung der abgegebenen bzw. aufgenommenen Wassermenge bestimmt. Gleichzeitig kann mit den verwendeten Zellen das Verformungsverhalten der Proben untersucht werden. Dieses ist prinzipiell von der Auflastspannung aus äußeren Lasten sowie von der Saugspannung im Boden abhängig. Entsprechend den Verhältnissen in den geplanten Erdbauwerken wurde die Auflastspannung im Versuch konstant gehalten (30 kPa). Infolge der Veränderung der Saugspannung und der daraus resultierenden Wasseraufnahme bzw. Wasserabgabe kommt es zu einer Volumenänderung der Proben (Quellen, Sacken oder Schrumpfen). Ein radiales Schrumpfen kann dabei versuchsbedingt nicht bestimmt werden. Nach Erreichen einer Saugspannung von 500 kPa wurden die Prüfkörper ausgebaut. Zur Untersuchung des Saugspannungsbereiches über 500 kPa wurde aus dem Prüfkörper eine Teilprobe herausgearbeitet und im Feuchtigkeitsmessgerät nach der Taupunktmethode untersucht. Am Rest der Probe wurde der Ausbauwassergehalt mittels Ofentrocknung bestimmt.

Das Feuchtigkeitsmessgerät nach der Taupunktmethode (WP 4 der Firma Decagon) nutzt den thermodynamischen Zusammenhang zwischen der Bodenluftfeuchtigkeit und der totalen Saugspannung (Summe aus Matrixspannung und osmotischer Saugspannung) nach Kelvin. Durch Bestimmung der Bodenluftfeuchtigkeit lässt sich damit die totale Saugspannung bestimmen. Der Spannungszustand infolge von äußeren Lasten kann dabei jedoch nicht vorgegeben werden, ebenso kann das Volumen nicht bestimmt werden. Zur Ermittlung des Sättigungsgrades wurde dieses als konstant angenommen.

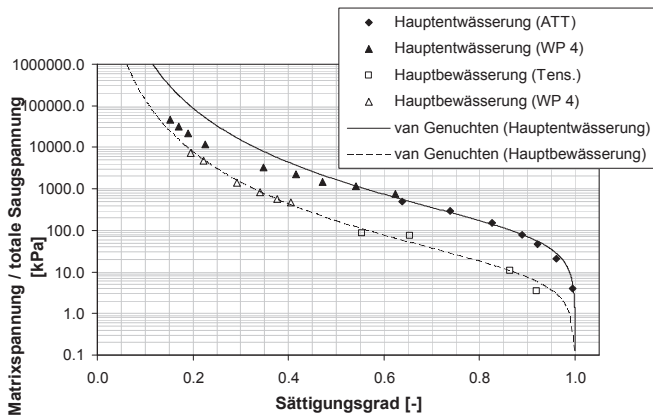
Zusätzlich zum Entwässerungspfad wurde mit Hilfe des Feuchtigkeitsmessgerätes auch der Hauptbewässerungspfad untersucht. Dazu wurden Bodenproben bei einem Wassergehalt von 59 % bzw. 73 % verdichtet, anschließend auf einen Sättigungsgrad  $S_r \approx 0,1$  luftgetrocknet und danach wieder befeuchtet. Die ermittelten Beziehungen zwischen Saugspannung und Wassergehalt für die bei einem Wassergehalt von 59 % und 73 % verdichteten Proben des Kernbodens sowie für den Oberboden sind in Abbildung 4.2 dargestellt.



Kernboden,  $w_a = 73 \%$



Kernboden,  $w_a = 59 \%$



Oberboden

Abbildung 4.2: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen

Für numerische Berechnungen müssen die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen funktio-  
 nell beschrieben werden. Dazu wurden sie mit Hilfe der Gleichung nach VAN-GENUCHTEN (1980)  
 parametrisiert (siehe Abbildung 4.2). Da der Sättigungsgrad im Feld in einem Bereich zwischen 0,5  
 und 1,0 zu erwarten ist, wurde die Parametrisierung unter dem Aspekt einer bestmöglichen Anpas-  
 sung der in diesem Bereich vorliegenden Messwerte durchgeführt. Die Parametrisierung erfolgte  
 sowohl für den Hauptentwässerungsast als auch den Hauptbewässerungsast. Die für die einzelnen  
 Böden ermittelten Parameter sind in der Tabelle 4.1 angegeben.

		Porenanteil [-]	$S_{min}$ [-]	$S_{max}$ [-]	$\alpha$ [1/cm]	$n$ [-]	$m = 1-1/n$ [-]
Kernboden nass	Hauptentwässerung	0,65	0	1	0,0014	1,3	0,231
	Hauptbewässerung		0	1	0,01	1,24	0,194
Kernboden- trocken	Hauptentwässerung	0,65	0	1	0,004	1,24	0,194
	Hauptbewässerung		0	1	0,032	1,18	0,153
Oberboden	Hauptentwässerung	0,63	0	1	0,0011	1,24	0,194
	Hauptbewässerung		0	1	0,01	1,24	0,194

Tabelle 4.1: van Genuchten – Parameter

### 4.2.3 Aufbau der Versuchsschüttung

Die Versuchsschüttung ist im Grundriss und Schnitt in Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4 dargestellt. Der Probehügel hat eine Grundfläche von ca. 25 m x 30 m und eine Höhe von ca. 5 m und ist in zwei Bereiche aufgeteilt (West und Ost), in denen der beschriebene Boden mit unterschiedlichem Einbauwassergehalt eingebracht wurde. Der natürliche Wassergehalt des organischen Bodens im Abtragsbereich lag, je nach vorangegangenen Witterungsverhältnissen, zwischen 57,5 % und 98,7 %, i. M. um 80,7 %. Unter Berücksichtigung der im Zuge der Eignungsprüfungen durchgeführten Laboruntersuchungen wurde der Boden mit dem aus erdbautechnischer und bodenmechanischer Sicht höchsten und niedrigsten vertretbaren Wassergehalt von 75 % bzw. 55 % eingebaut. Um das Kernmaterial für die trockene Einbaubedingung auf den vorgegebenen Wassergehalt von  $w \cong 55\%$  zu trocknen, wurde es auf einer befestigten Fläche bei trockener Witterung mit einem Radlader mit Hilfe einer Separatorschaufel lagenweise verteilt (siehe Abbildung 4.5). Der Wassergehalt des ausgebreiteten Materials wurde visuell überprüft. Sobald das ausgebreitete Bodenmaterial den gewünschten Wassergehalt aufwies, wurde es zusammen geschoben und wieder auf Miete gelagert und mit Folien gegen Witterungseinflüsse abgedeckt. Durch die Bearbeitung des Materials im Zuge der Ausbreitung mit der Separatorschaufel fand gleichzeitig eine Zerkleinerung und Homogenisierung des Materials statt. Das Bodenmaterial für die nasse Einbaubedingung ( $w \cong 75\%$ ) wurde über die Separatorschaufel des Radladers zerkleinert und homogenisiert (siehe Abbildung 4.6).

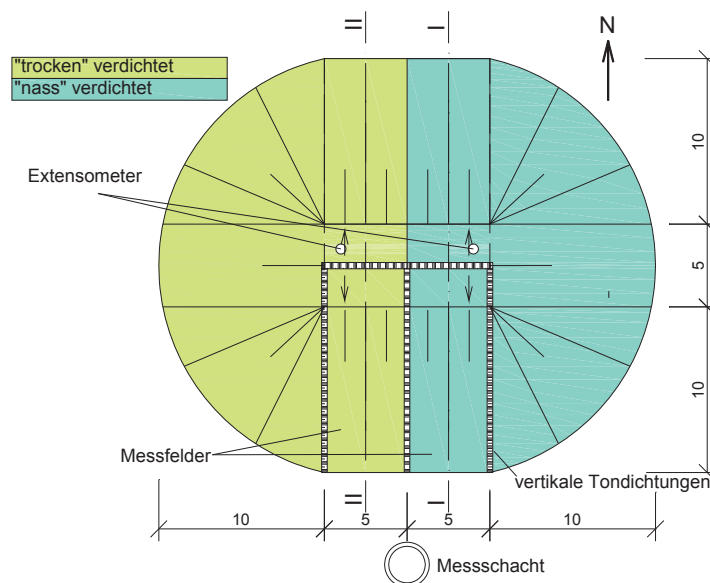


Abbildung 4.3: Grundriss der Versuchsschüttung (Prinzipdarstellung)



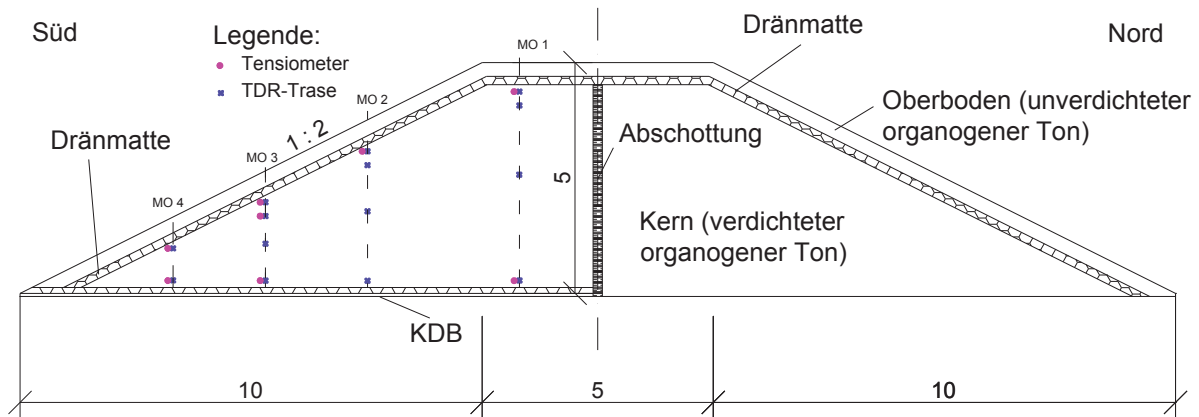


Abbildung 4.4: Schnitt durch die Versuchsschüttung (Prinzipdarstellung) (Schnitt II – II)



Abbildung 4.5: Ausbreiten des organischen Kernmaterials zum Trocknen



Abbildung 4.6: Homogenisieren des organischen Kernmaterials

Der Probehügel erhielt eine Nord/Süd-Ausrichtung. In der Südhälfte des Probehügels wurden zwei je ca. 5 m breite und ca. 12 m lange Messfelder angelegt (siehe Abbildung 4.3). Um die Sickerwassermenge durch das Kernmaterial erfassen zu können, wurden die beiden Versuchsabschnitte in der Aufstandsfläche mit einer Kunststoffdichtungsbahn (KDB) versehen, auf der eine geotextile Dränmatte als Kontrolldränage aufgebracht wurde. Die KDB wurde mit einem trichterförmigen Gefälle von ca. 2,5% nach Innen errichtet. An der tiefsten Stelle wurde die KDB an ein Abflussrohr angeschlossen, das das gesammelte Wasser zum Messschacht führt. Zur Aufnahme von Spreizkräften und zur Vermeidung des Eintrages von Zugspannungen in die Kunststoffdichtungsbahn ist oberhalb dieser Dränmatte in der Breite der beiden Versuchsabschnitte in Nord-Süd-Richtung ein Geogitter verlegt worden (siehe Abbildung 4.7).

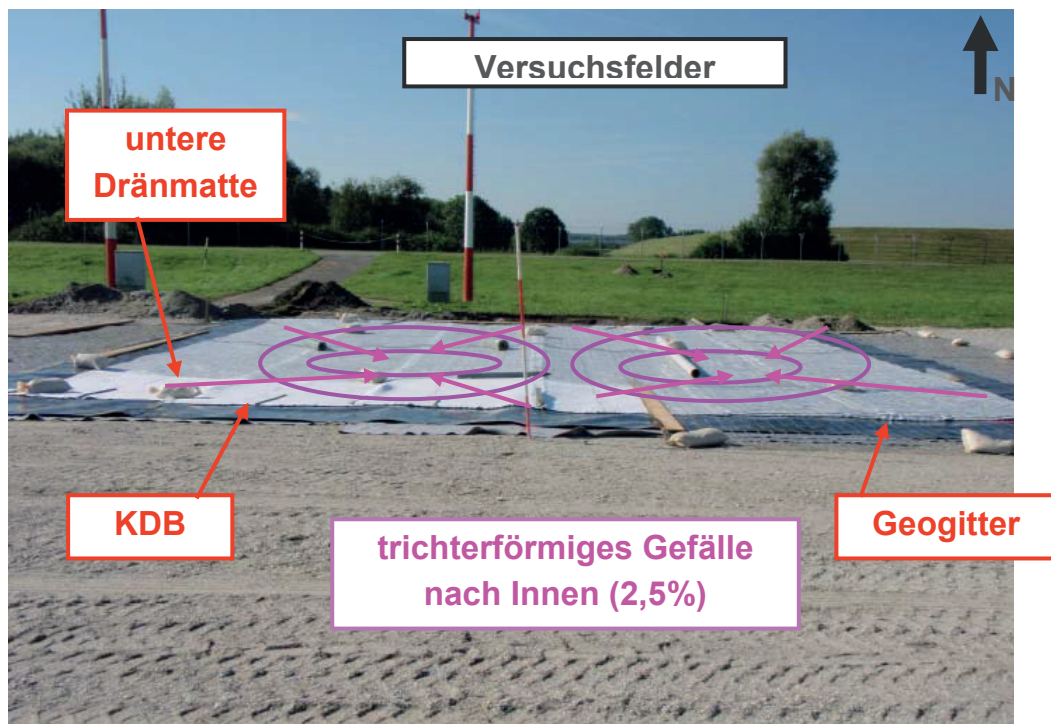


Abbildung 4.7: Aufbau der Versuchsfelder in der Aufstandsfläche

Das in der Kontrolldränage anfallende Wasser wird getrennt nach den beiden Versuchsabschnitten gefasst, in einem Kontrollschacht gesammelt und mit Hilfe von Kippwaagen quantifiziert (siehe Abbildung 4.8).



Abbildung 4.8: Anschlüsse in der Aufstandsfläche der Versuchsschüttung



Die Verdichtung des organischen Bodens erfolgte mit einer 25-t-Walze, die über eine Polygonbandage verfügt. Durch die Nachverdichtung mit einer Glattmantelwalze konnten die oberflächennahen Auflockerungen, die durch die Polygonbandage entstanden sind, behoben werden (siehe Abbildung 4.9 und Abbildung 4.10). Um ein Aufsättigen des getrockneten Kernmaterials infolge von Niederschlägen zu vermeiden, wurde das relativ trocken eingebaute Material in Schlechtwetterphasen mit Plastikfolien abgedeckt.



Abbildung 4.9: Polygonwalze (25t)



Abbildung 4.10: Glattmantelwalze

Die beiden Versuchsabschnitte wurden voneinander und zu benachbarten Dammbereichen mit vier Dichtwänden vertikal abgeschottet. Diese wurden aus einem mittelplastischen Ton mit einem Durchlässigkeitsbeiwert im verdichteten Zustand  $k \leq 5 \cdot 10^{-10}$  m/s hergestellt. Der Einbau des Tons erfolgte lagenweise im Zuge des Hügelaufbaus (siehe Abbildung 4.11).



Abbildung 4.11: Einbau und Verdichtung der Dichtwände aus Ton

Die Dichtwände enden unterhalb der oberen Dränmatte. Der beschriebene Bodenkörper sowie die Dichtwände wurden komplett mit einer Dränmatte zur Ableitung des eingedrungenen Niederschlagswassers abgedeckt (siehe Abbildung 4.12). Entsprechend den Planvorgaben weist die

Dränmatte im Kronenbereich dabei eine Neigung von 5 % auf. Abflüsse in der oberen Dränmatte werden ebenfalls im Messschacht am südseitigen Böschungsfuß in einem Rinnenkörper getrennt für die beiden Versuchsabschnitte gefasst und mit Hilfe von Rohrleitungen in den Messschacht geführt (siehe Abbildung 4.13). Auch hier sorgen Kippzähler für eine Quantifizierung der Wassermengen. Vom Messschacht wird das Wasser anschließend in einen Drainageschacht gepumpt und an der Ostseite des Hügels über eine Sickerleitung versickert (siehe Abbildung 4.14).



Abbildung 4.12: Verlegen der oberen Dränmatte



Abbildung 4.13: Rinnenkörper und Anschluss an Messschacht

Oberhalb der genannten Dränmatte bildet eine ca. 40 cm bis 60 cm mächtige unverdichtete Oberbodenschicht den oberen Abschluss des Probehügels. Diese wurde aus organischem Bodenmaterial erstellt, das wie bereits beschrieben aus dem östlichen Teil des Abtragsbereichs stammt. Der Oberboden wurde vom Bagger locker auf die Dränmatte geschoben (siehe Abbildung 4.15).



Abbildung 4.14: Herstellen der Sickerleitung



Abbildung 4.15: Aufbringen des Oberbodens





Abbildung 4.17: Verlegen der Leerrohre



Abbildung 4.16: Kabelanschluss

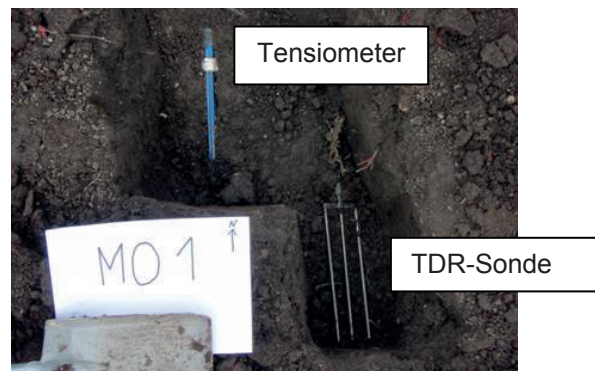


Abbildung 4.18: Einbau eines Tensiometers und einer TDR-Sonde

Zur Ermittlung und späteren Modellierung des Wasserhaushaltes werden die klimatischen Verhältnisse, das in der oberen Dränmatte und an der Basis anfallende Sickerwasser sowie Feuchte- und Saugspannungsänderungen im Probehügel messtechnisch erfasst. Dazu wurden von Mitarbeitern des Zentrums Geotechnik in beide Versuchsabschnitte insgesamt 28 TDR-Sonden zur Erfassung der Wassergehaltsänderungen und 18 Tensiometer zur Ermittlung von Saugspannungsänderungen eingebaut. Die genaue Lage der Messgeber wurde durch eine geodätische Einmessung nach Einbau ermittelt. Für die Verlegung der Kabel der TDR-Sonden bzw. der Tensiometer, wurden Gräben ausgehoben, in denen die Kabel in Leerrohren zum Messschacht geführt wurden (siehe Abbildung 4.17). Vor Einbau der Messtechnik wurden an den dafür vorgesehenen Stellen im Rahmen der Einbauprüfungen Bodenproben mittels Ausstechzylinder entnommen. Die Tensiometer wurden mit einer Neigung von  $15^\circ$  eingebaut. Die TDR-Sonden wurden horizontal verlegt (siehe Abbildung 4.16 und Abbildung 4.18). Das entnommene Erdreich wurde oberhalb der Sensoren von Hand eingebaut und verdichtet.

Im Zuge der Begrünung des beschriebenen Oberbodens wurden im Südwesten und Nordosten des Probehügels Erosionsmatten verlegt. Außerdem wurde eine Saatgutmischung im Anspritzverfahren auf den gesamten Hügel aufgebracht (siehe Abbildung 4.19, Abbildung 4.20 und Abbildung 4.21).



Abbildung 4.19: Erosionsmatten



Abbildung 4.20: Anspritzbegrünung



Abbildung 4.21: Probehügel nach Anspritzbegrünung

Zur Ermittlung der klimatischen Verhältnisse wurde eine Klimastation in der Nähe des Probehügels errichtet. Sie besteht aus einem Strahlungsbilanzgeber, einem Windgeschwindigkeitsmesser, einem Windrichtungsmesser und einem Luftfeuchte- und Temperaturfühler (siehe Abbildung 4.22). Darüber hinaus wurde ein Niederschlagssammler südlich des Probehügels bodengleich eingebaut (siehe Abbildung 4.23). Über den Datenlogger im Messschacht werden die entsprechenden meteorologischen Daten halbstündlich erfasst.

Zusätzlich wird die Verteilung des Niederschlages auf dem Versuchsdamm über insgesamt vier über den Damm verteilte Niederschlagssammler erfasst (siehe Abbildung 4.24). Die damit gesammelte Wassermenge wird in der Regel einmal pro Woche durch Wägung quantifiziert.

Windrichtungssensor



KLIMASTATION



Luftfeuchte- und Lufttemperatursensor



Strahlungssensor



Windgeschwindigkeitssensor



Abbildung 4.22: Klimastation

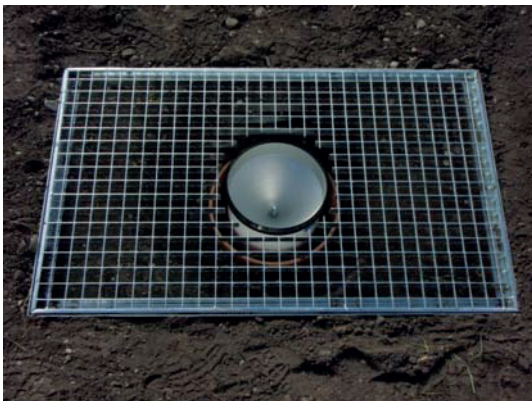


Abbildung 4.23: Bodengleich eingebauter Niederschlagsammler (Quantifizierung über Kippwaage)



Abbildung 4.24: Niederschlagsammler

#### 4.2.4 Messungen

Die Abbildung 4.25 stellt den Wasserhaushalt des Probehügels schematisch dar. Der Niederschlag wird zum Teil als Oberflächenabfluss abgeführt, zum Teil infiltriert er in den Oberboden und zum



Teil verdunstet er direkt. Das in den Oberboden eingedrungene Wasser kann dort gespeichert oder wieder abgegeben werden. Dies geschieht zum Teil über Verdunstung (Evaporation) und über die Aufnahme durch Pflanzen (Transpiration) und zum Teil über einen Abfluss in der Oberbodenschicht (Zwischenabfluss) und als Wasseraustritt in die Dränmatte. Das Sickerwasser, welches die Dränmatte erreicht, wird zum Einen vom verdichteten organischen Boden aufgenommen, zum Anderen fließt es in der Dränmatte ab. Das Sickerwasser, das in den verdichteten organischen Boden eindringt, kann von diesem gespeichert werden, was sich in einer Änderung des Wassergehaltes äußert, kann zu einem Sickerwasseraustritt an der Basis führen und kann theoretisch über Verdunstung in die Dränmatte abgegeben werden. Aufgrund der kapillarbrechenden Wirkung der Dränmatte kann das Wasser des verdichteten organischen Bodens von flachwurzeln Pflanzen nicht erreicht werden.

Mit Hilfe von Kippwaagen wird das in der oberen Dränmatte abfließende Sickerwasser sowie das an der Basis aus dem verdichteten organischen Material austretende Sickerwasser getrennt für die beiden Einbaubedingungen quantifiziert. Über die eingebauten TDR-Sonden und Tensiometer können Rückschlüsse über Wassergehaltsänderungen im unverdichteten Oberboden und im verdichteten organischen Boden gewonnen werden.

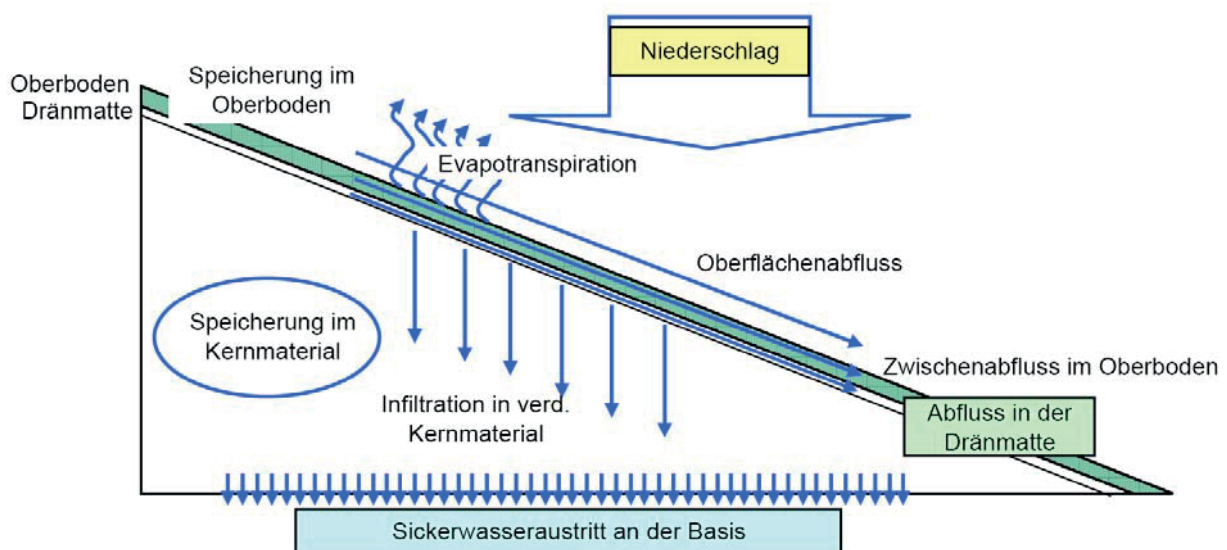


Abbildung 4.25: Schematische Darstellung des Wasserhaushaltes des Probehügels

Nachfolgend werden die Messergebnisse beschrieben und erläutert.

#### 4.2.4.1 Niederschlag

In der Abbildung 4.26 sind die Tageswerte des Niederschlages zwischen November 2008 und Juli 2010 dargestellt. Sehr vereinzelt kam es zu Problemen mit dem Datenerfassungssystem. In derartigen Fällen, wenn keine oder nur eingeschränkt verwertbare Daten des eigenen Niederschlagsammlers vorlagen, wurde auf die Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für den Flughafen München zurückgegriffen. Zur besseren Übersichtlichkeit sind in Abbildung 4.27

zusätzlich die Monatswerte des Niederschlages für den Zeitraum zwischen November 2008 und Juli 2010 angegeben.

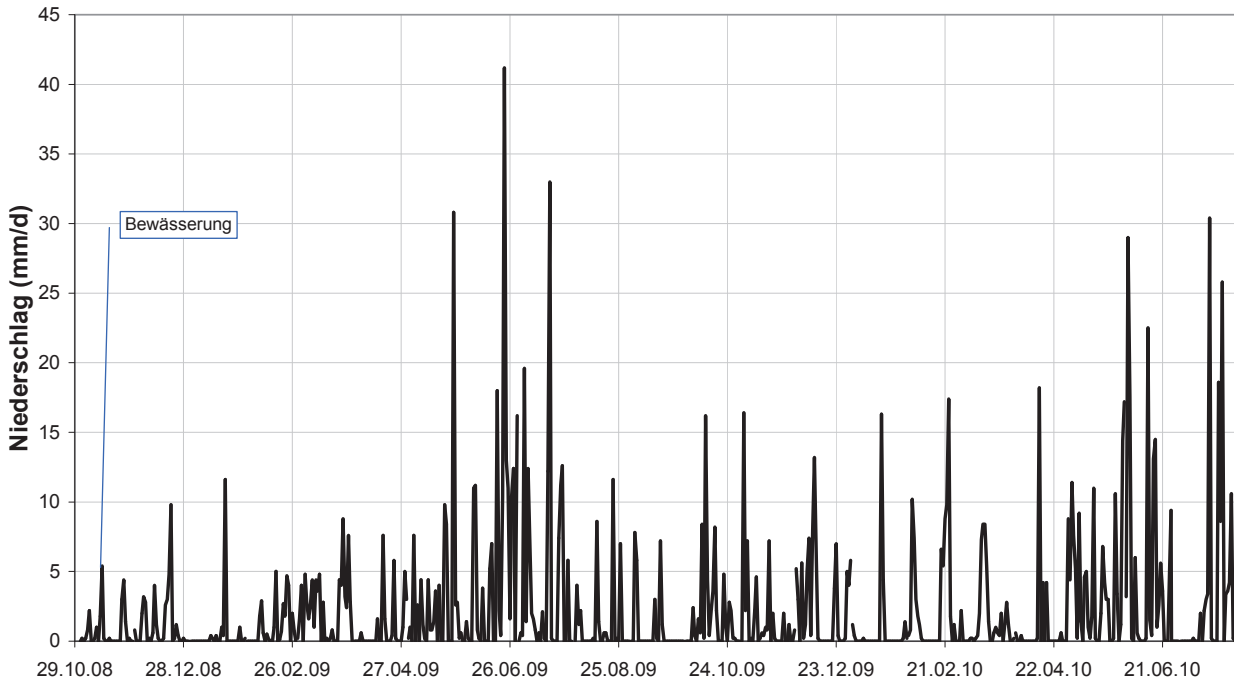


Abbildung 4.26: Am Probehügel aufgezeichnete Tageswerte des Niederschlages

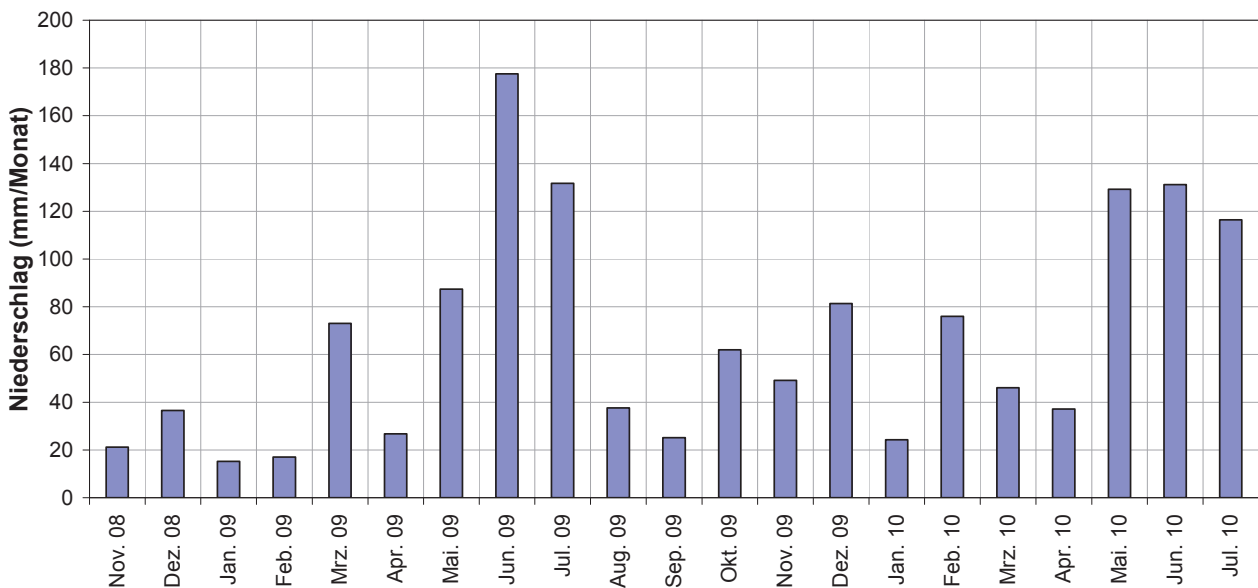


Abbildung 4.27: Am Probehügel aufgezeichnete Monatswerte des Niederschlages

**4.2.4.2 Sickerwassermengen**

In Abbildung 4.29 und Abbildung 4.30 sind die Tages- bzw. Monatsmittelwerte der an der Basis gesammelten Sickerwassermengen getrennt für die beiden Einbaubedingungen dargestellt. Auf der nassen Seite wurden bereits während der Herstellung des Probehügels infolge der Verdichtung des

eingebauten organischen Bodens Sickerwasseraustritte beobachtet und quantifiziert (siehe Abbildung 4.28). Diese betragen während des Baus Anfang September 2008 ca. 0,5 mm/d und nahmen anschließend stetig ab. Zu Beginn der kontinuierlichen Aufzeichnungen Anfang November 2008 wurden Sickerwassermengen von ca. 0,2 mm/d bzw. 5 mm/Monat gemessen. Diese nehmen bis Ende April 2009 auf einen Wert von ca. 0,05 mm/d bzw. 1,6 mm/Monat und im weiteren Verlauf bis Ende März 2010 auf einen Wert von ca. 0,01 mm/d bzw. 0,3 mm/Monat ab. Seit März 2010 liegen die an der Basis der nassen Seite gefassten Sickerwassermengen zwischen 0,005 mm/d und 0,01 mm/d. Als Monatswerte wurden seit März 2010 Werte zwischen 0,13 mm und 0,26 mm ermittelt.

Auf der trockenen Seite wurde während der Herstellung des Probehügels kein Sickerwasser und ab Beginn der kontinuierlichen Aufzeichnung Anfang November 2008 nur ein sehr geringer Sickerwasseranfall aufgezeichnet. Dieser betrug anfänglich ca. 0,01 mm/d und hat bis Ende November 2009 auf etwa 0,001 mm/d abgenommen. Seitdem wurden Sickerwassermengen zwischen 0,0005 mm/d und 0,001 mm/d aufgezeichnet.

Die zu Beginn vergleichsweise hohen Sickerwassermengen an der Basis der nassen Seite sind auf die Entstehung von Porenwasserüberdrücken infolge der Verdichtung des Bodens zurückzuführen. Diese bauen sich im Zuge der beobachteten Konsolidierung durch die Abgabe von Porenwasser langsam ab. Dieses Verhalten ist gut erkennbar an den Messergebnissen des Tensiometers MO1A, das sich etwa in der Mitte des Versuchshügels 15 cm oberhalb der unteren Dränmatte in der nassen Seite befindet. Infolge der Verdichtung des organischen Bodens zeigt das Tensiometer während des Einbaus im August 2008 Wasserdrücke von bis zu 300 hPa. Diese bauen sich bis Ende April 2009 auf einen konstanten Wert von ca. 10 hPa ab. Es kann demnach von einer annähernd vollständigen Sättigung des nass verdichteten organogenen Tons in diesem Bereich ausgegangen werden.

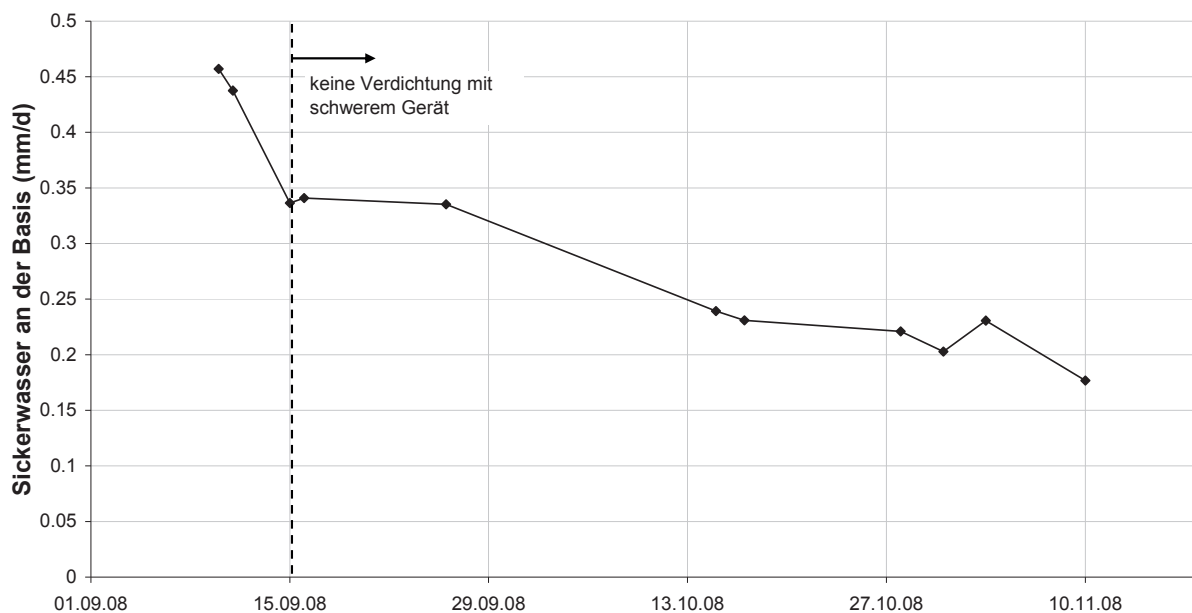


Abbildung 4.28: Tagesmittelwerte des Sickerwassers an der Basis der nassen Seite im Zeitraum zwischen September und November 2008 (Einbau)



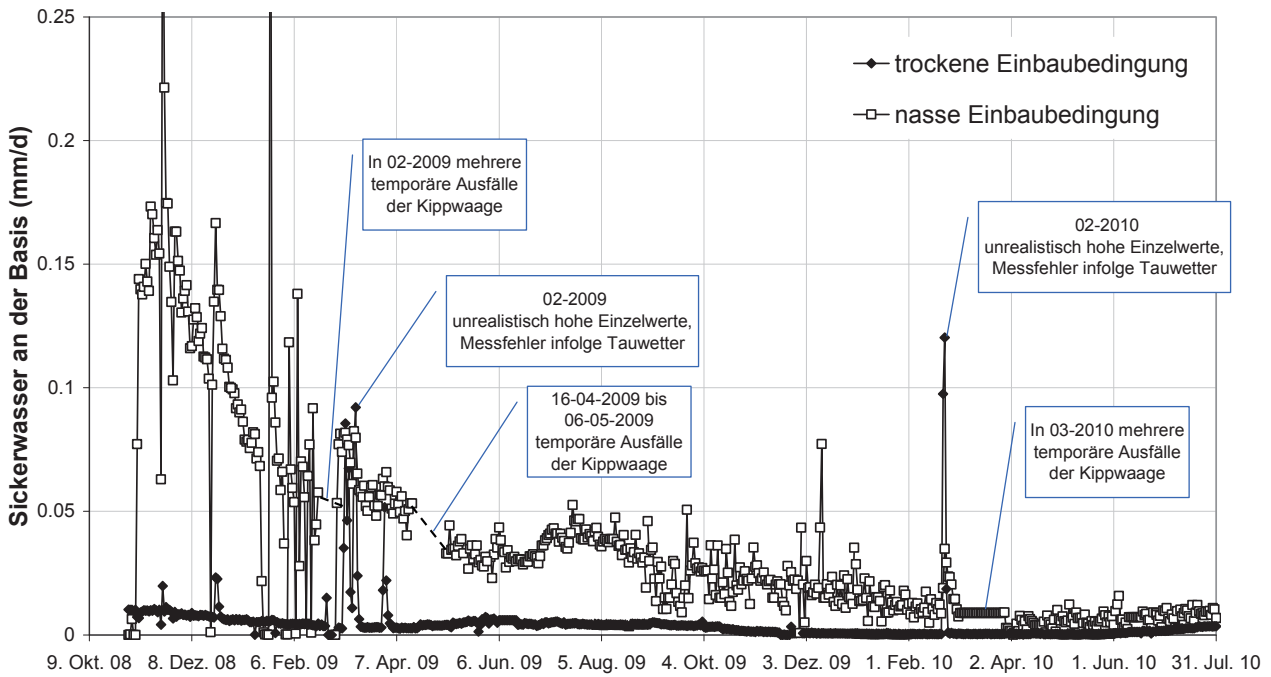


Abbildung 4.29: Tagesmittelwerte des Sickerwassers an der Basis im Zeitraum zwischen November 2008 und Juli 2010

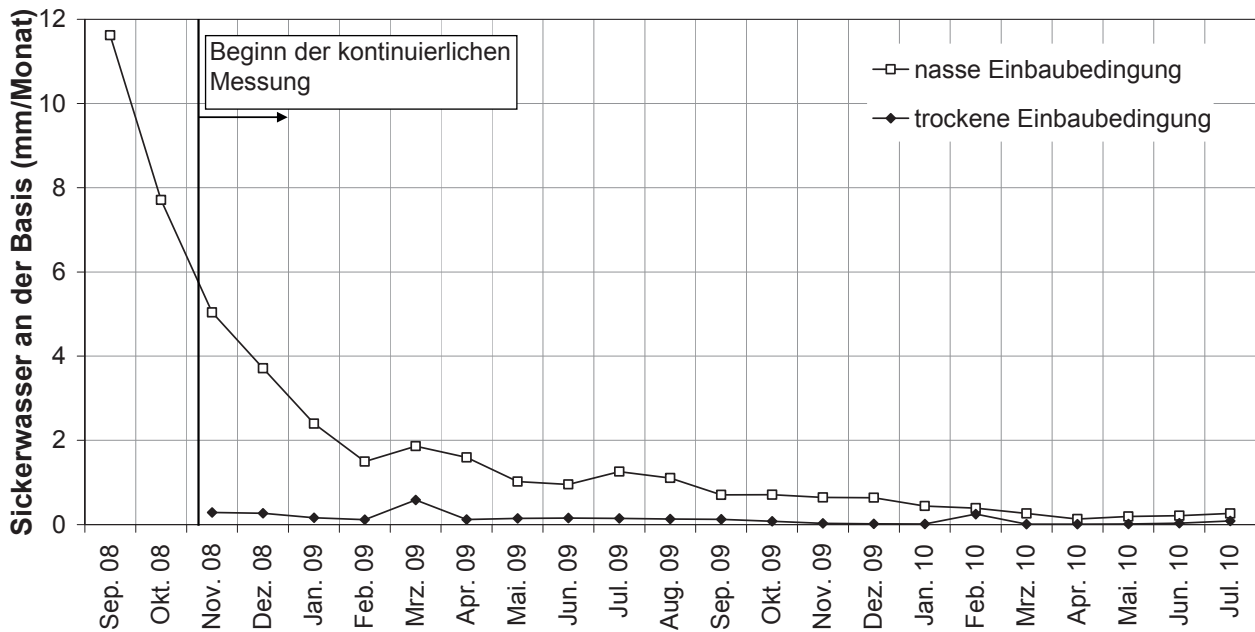


Abbildung 4.30: Monatsmittelwerte des Sickerwassers an der Basis im Zeitraum zwischen September 2008 und Juli 2010

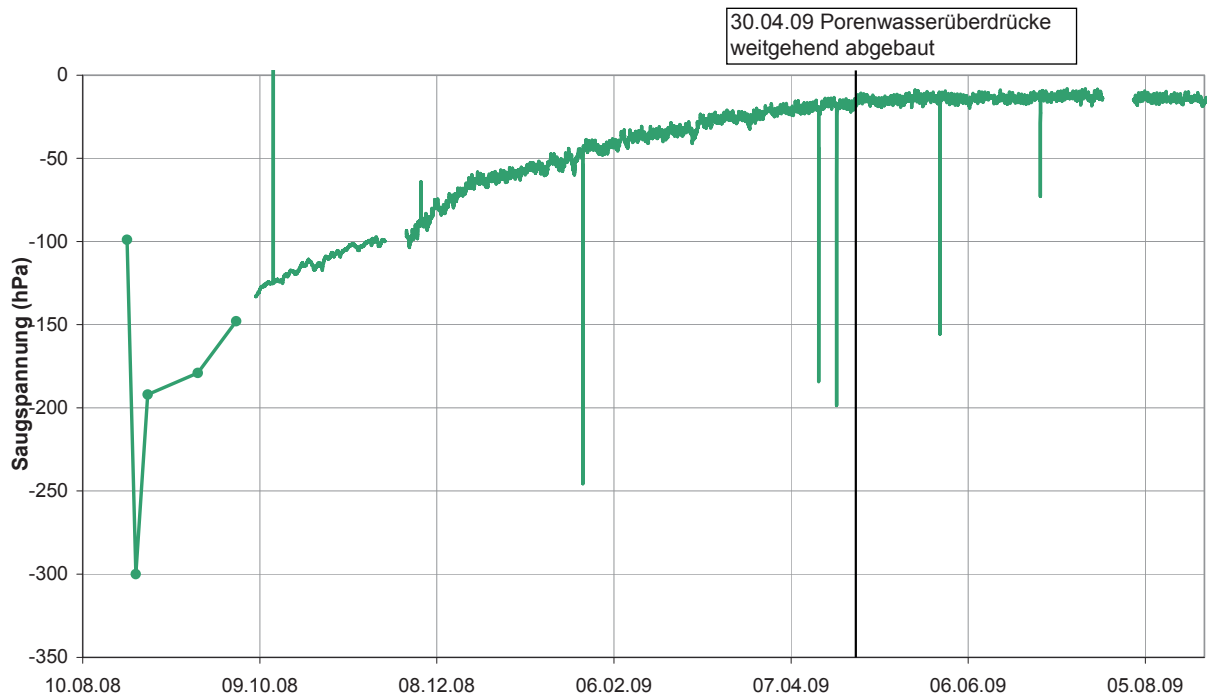


Abbildung 4.31: Saugspannungsmessungen für das Tensiometer MO1A (Basis nass) im Zeitraum zwischen August 2008 und August 2009

Die aus der oberen Dränmatte im Bereich der nassen und trockenen Einbaubedingung gefassten Sickerwassermengen sind in der Abbildung 4.32 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass insbesondere in den ersten Monaten nach Herstellung des Probehügels vergleichsweise regelmäßig Sickerwasser anfiel. Ab Ende April 2009 wurden nur zeitweise nennenswerte Sickerwassermengen aus den oberen Dränmatten gefasst. Vergleicht man den zeitlichen Verlauf der Sickerwassermengen mit den im Oberboden gemessenen Wassergehalten, ist zu erkennen, dass ein Sickerwasseranfall in der Dränmatte nur bei fast vollständiger Sättigung des Oberbodens stattfindet. Dies ist deutlich am Verlauf des Wassergehaltes im Bereich der TDR-Sonde MW4C in Abbildung 4.33 zu erkennen. Diese befindet sich ca. 0,5 m unterhalb der Böschungsoberfläche und damit nur ca. 10 cm oberhalb der Dränmatte. Erst wenn auch in dieser Tiefe ein volumetrischer Wassergehalt entsprechend einer fast vollständigen Sättigung des Oberbodens vorliegt, findet eine Sickerwasserabgabe in die Dränmatte statt.

Aus Abbildung 4.32 ist weiter zu erkennen, dass in der oberen Dränmatte oberhalb der trockenen Einbaubedingung weniger Wasser abgeführt wird als im Bereich der nassen Einbaubedingung. Dies beruht auf den kapillaren Eigenschaften des trocken verdichteten organischen Tons. Aufgrund von Saugspannungen wird das in der oberen Dränmatte abfließende Sickerwasser überwiegend vom trocken verdichteten Boden aufgenommen und gespeichert.

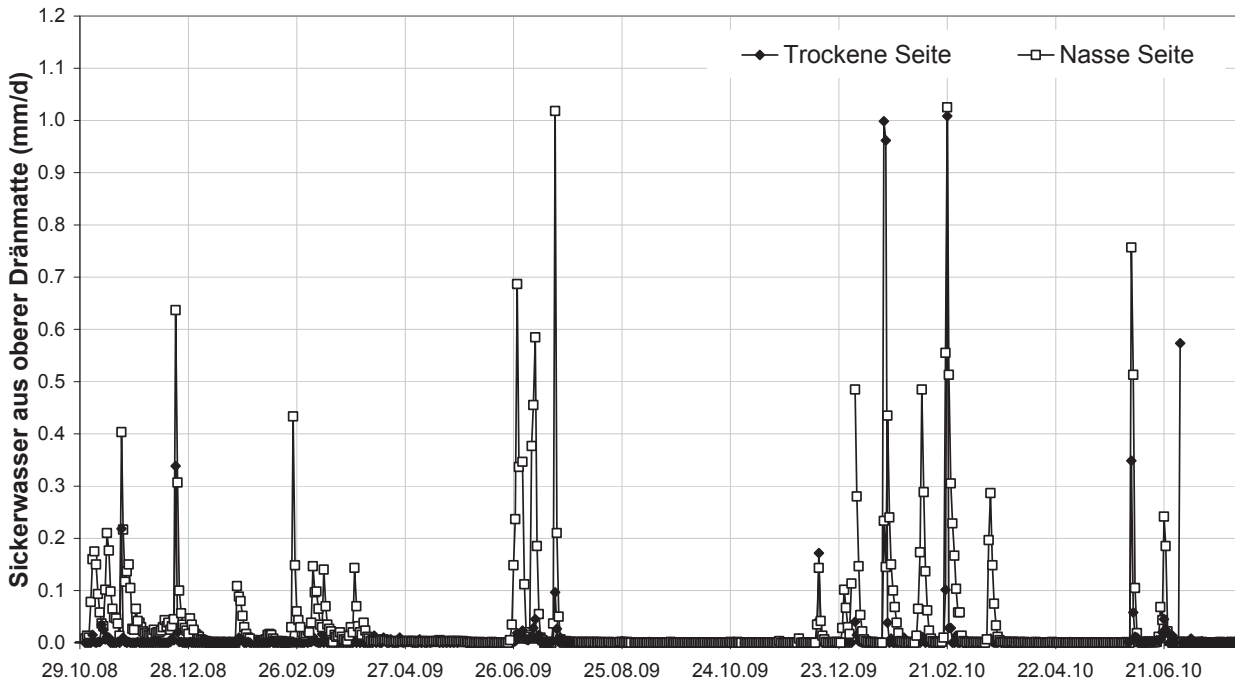


Abbildung 4.32: Tagesmittelwerte des Sickerwassers aus der oberen Dränmatte

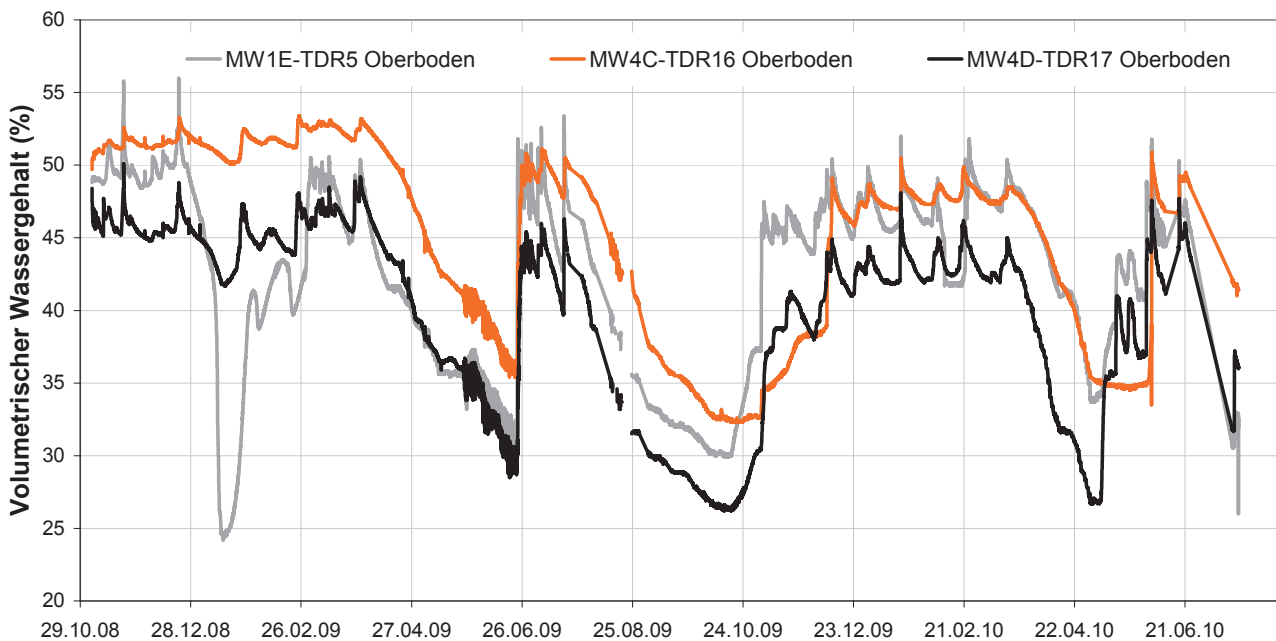


Abbildung 4.33: Wassergehalte in den Messpunkten MW1E, MW4C und MW4D im Oberboden

In der Abbildung 4.34 sind die akkumulierten Werte für den Niederschlag, den Sickerwasserabfluss an der Basis und aus der oberen Dränmatte für die beiden Einbaubedingungen für den Zeitraum zwischen November 2008 und Juli 2010 dargestellt. Der akkumulierte Niederschlag beträgt ca. 1200 mm. Als Sickerwasser an der Basis der nassen Einbaubedingung wurden im betrachteten Zeitraum ca. 23 mm gefasst. Nicht enthalten sind darin die unmittelbar nach Herstellung der Versuchsschüttung im September und Oktober aufgetretenen Sickerwassermengen (19 mm). Das ak-

kumulierte Sickerwasser aus der oberen Dränmatte der nassen Seite ist mit 24 mm ähnlich gering wie das Sickerwasser an der Basis.

An der Basis der trockenen Seite wurden im betrachteten Zeitraum insgesamt nur 2,7 mm gefasst. Das akkumulierte Sickerwasser aus der oberen Dränmatte oberhalb der trockenen Einbaubedingung beträgt 6,5 mm.

Betrachtet man nur die nach Abklingen der Konsolidationsvorgänge seit Mai 2009 angefallenen Wassermengen, ergeben sich für die nasse Einbaubedingung akkumulierte Sickerwassermengen an der Basis von ca. 9 mm und für die obere Dränmatte von ca. 16,2 mm. Im Bereich der trockenen Einbaubedingung wurden im betrachteten Zeitraum an der Basis akkumulierte Werte von 1,2 mm und aus der oberen Dränmatte von 5,5 mm gemessen. Der im betrachteten Zeitraum zwischen Mai 2009 und Juli 2010 aufgetretene Niederschlag beträgt ca. 1000 mm. Bezieht man für diesen Zeitraum die Sickerwasserabflüsse auf den Niederschlag, erhält man für die nasse Einbaubedingung an der Basis einen Sickerwasseranfall von ca. 1 % und aus der oberen Dränmatte von ca. 1,6 % des Niederschlages. Für die trockene Einbaubedingung betragen die Abflüsse an der Basis und aus der oberen Dränmatte 0,12 % bzw. 0,55 % des Niederschlages.

Für den Zeitraum zwischen Mai 2009 und Juli 2010 erhält man damit für die nasse Einbaubedingung eine mittlere monatliche Sickerwasserabgabe an der Basis von 0,6 mm. Dies entspricht einem Wert von  $2,3 \cdot 10^{-10}$  m/s. Dabei ist zu beachten, dass die Sickerwasserabgabe im betrachteten Zeitraum weiterhin abgenommen hat und Ende Juli 2010 eine monatliche Sickerwasserabgabe von ca. 0,25 mm vorlag, was einem Wert von  $1,0 \cdot 10^{-10}$  m/s entspricht. Prinzipiell ist aus dem sehr gleichmäßigen Verlauf der Sickerwasserabgabe an der Basis zu erkennen, dass diese weitgehend unabhängig von Niederschlagsereignissen ist und in ihrem Verlauf wesentlich vom Einbauzustand abhängt.

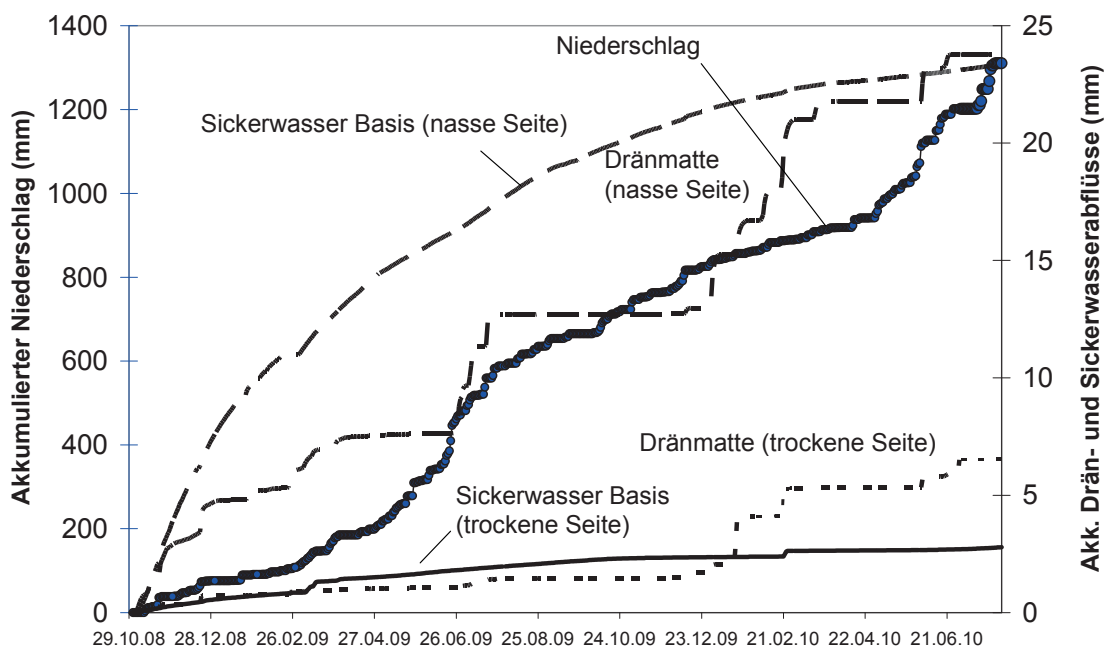


Abbildung 4.34: Akkumulierte Wassermengen des Niederschlages, des Sickerwassers an der Basis und des Sickerwassers aus der oberen Dränmatte

#### 4.2.4.3 Tensiometer- und TDR-Messungen

Maßgebliche Änderungen des Wassergehaltes und der Saugspannungen wurden insbesondere im Oberboden sowie im verdichteten organischen Kernmaterial in Bereichen nahe der oberen Dränmatte beobachtet. Der Wassergehalt im Oberboden wird wesentlich von den klimatischen Verhältnissen beeinflusst. Infolge von Niederschlagsereignissen kommt es zu einer Infiltration in den Oberboden und damit zu einer Zunahme des Wassergehaltes. Zusätzlich kommt es zu einer Wasserabgabe aus dem Oberboden infolge einer Verdunstung an der Oberfläche sowie einer Wasseraufnahme durch den Bewuchs (Transpiration). Die Höhe der Evaporation und Transpiration hängt u. a. von der Sonneneinstrahlung, der Windgeschwindigkeit, der Lufttemperatur und der Luftfeuchtigkeit ab. Im Sommerhalbjahr ist sie deutlich ausgeprägter als im Winterhalbjahr. Der in Abbildung 4.33 dargestellte zeitliche Verlauf des Wassergehaltes an den im Oberboden befindlichen TDR-Sonden zeigt für das Sommerhalbjahr zwischen April und Oktober prinzipiell starke Schwankungen. Im Vergleich dazu ändert sich der Wassergehalt zwischen November und März nur geringfügig. Dies resultiert u.a. aus dem im Sommerhalbjahr sehr starken Einfluss der Evapotranspiration auf den Wassergehalt des Oberbodens. So nimmt der Wassergehalt in trockenen Phasen sehr stark ab, kann jedoch in niederschlagsreichen Phasen auch innerhalb kurzer Zeit wieder deutlich ansteigen. Entsprechend den Messdaten kann die monatliche Abnahme des Wassergehaltes im Oberboden im Sommerhalbjahr bis zu 10 % betragen.

Im verdichteten Kernmaterial wurden Änderungen des Wassergehaltes und der Saugspannungen sowohl für die trockene Einbaubedingung als auch für die nasse Einbaubedingung besonders ausgeprägt in den oberen Bereichen nahe der oberen Dränmatte beobachtet, da diese Bereiche bei Wasserzutritt aus der Dränmatte als erstes Wasser aufnehmen und bei fehlender Wasserzufuhr Wasser an tiefer liegende Bereiche bzw. an die Dränmatte über Verdunstung abgeben.

Die nahe an der Basis gelegenen TDR-Sonden dagegen zeigen für die nasse Einbaubedingung keine wesentliche Änderung des Wassergehaltes im Zeitraum zwischen dem Einbau im August 2008 und Juli 2010. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass diese Bodenbereiche annähernd wassergesättigt sind. Wasserbewegungen können unter gesättigten Verhältnissen stattfinden, ohne dass Änderungen des Wassergehaltes bzw. der Saugspannungen erkennbar sind.

Die an der Basis des trocken verdichteten Materials gelegenen Sonden weisen eine geringe Zunahme des Wassergehaltes im Untersuchungszeitraum von ca. 3 % auf. Dies deutet darauf hin, dass das trocken verdichtete Material eingedrungenes Sickerwasser speichert.

#### 4.2.4.4 Evapotranspiration

Mit der an der Versuchsschüttung installierten Klimastation werden neben den Niederschlägen, die Nettostrahlung, die Windrichtung, die Windgeschwindigkeit, die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit gemessen. Diese Daten wurden verwendet, um den zeitlichen Verlauf der Evapotranspiration für die Versuchsfelder des Probehügels abzuschätzen. Die potentielle Evapotranspiration  $ET_p$  einer horizontalen Fläche wurde dabei mit Hilfe der in Abschnitt 3.3.3 beschriebenen Methode nach Penman-Monteith ermittelt. Im Zusammenhang mit der Ermittlung des von MONTEITH (1965) eingeführten aerodynamischen Widerstandes wurde für den mit Gras bewachsenen Versuchshügel eine Bewuchshöhe von 15 cm angenommen. Für den Blattflächenindex LAI ergibt sich daraus bei An-

satz der Abschätzung nach ALLEN ET AL. (1998) ein Wert von 3,6. Der Bestandeswiderstand  $r_s$  wurde damit zu 56 s/m abgeschätzt.

Zur Berücksichtigung der Neigung der Versuchsfelder wurde die nach Penman-Monteith ermittelte potentielle Evapotranspiration  $b$  mit Hilfe der von GOLF (1981) aufgestellten Diagramme korrigiert (siehe Abschnitt 3.3.5). Für die südseitig ausgerichteten, unter  $26,5^\circ$  geneigten Versuchsfelder wurde dabei ein Korrekturfaktor  $f_h = 2,0$  für das Winterhalbjahr und  $f_h = 1,25$  für das Sommerhalbjahr abgelesen. Durch Multiplikation dieses Faktors mit der nach Gleichung (3.3) ermittelten potentiellen Evapotranspiration wurde die auf die Horizontalprojektion der Versuchsfelder bezogene potentielle Evapotranspiration bestimmt.

Zur Bestimmung der tatsächlichen Evapotranspiration wurde der in Abschnitt 3.3.6 beschriebene Ansatz nach DISSE (1999) herangezogen. Der Parameter  $r$  wurde dabei unter Berücksichtigung des Grasbewuchses der Versuchsschüttung nach DISSE (1999) mit  $r = 4$  angenommen. Der volumetrische Wassergehalt beim permanenten Welkepunkt und bei der Feldkapazität wurde aus der für den Oberboden ermittelten Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung ermittelt. Nach SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL (2002) wurde angenommen, dass der permanente Welkepunkt bei einer Matrixspannung von 1500 kPa liegt. Die Feldkapazität wurde aus den im Frühjahr 2010 zu Beginn der Vegetationsperiode gemessenen Wassergehalten im Oberboden ermittelt.

Der pflanzenverfügbare, aktuelle volumetrische Wassergehalt im Oberboden wurde aus den Feldmessdaten unter Heranziehung der ca. 40 cm unter der Geländeoberfläche im Böschungsbereich befindlichen TDR-Sonde MW4C (siehe Abbildung 4.33) bestimmt.

In Abbildung 4.35 und Abbildung 4.36 sind die Tageswerte bzw. Monatswerte der so ermittelten tatsächlichen Evapotranspiration für den Zeitraum zwischen Oktober 2008 und Juli 2010 dargestellt.

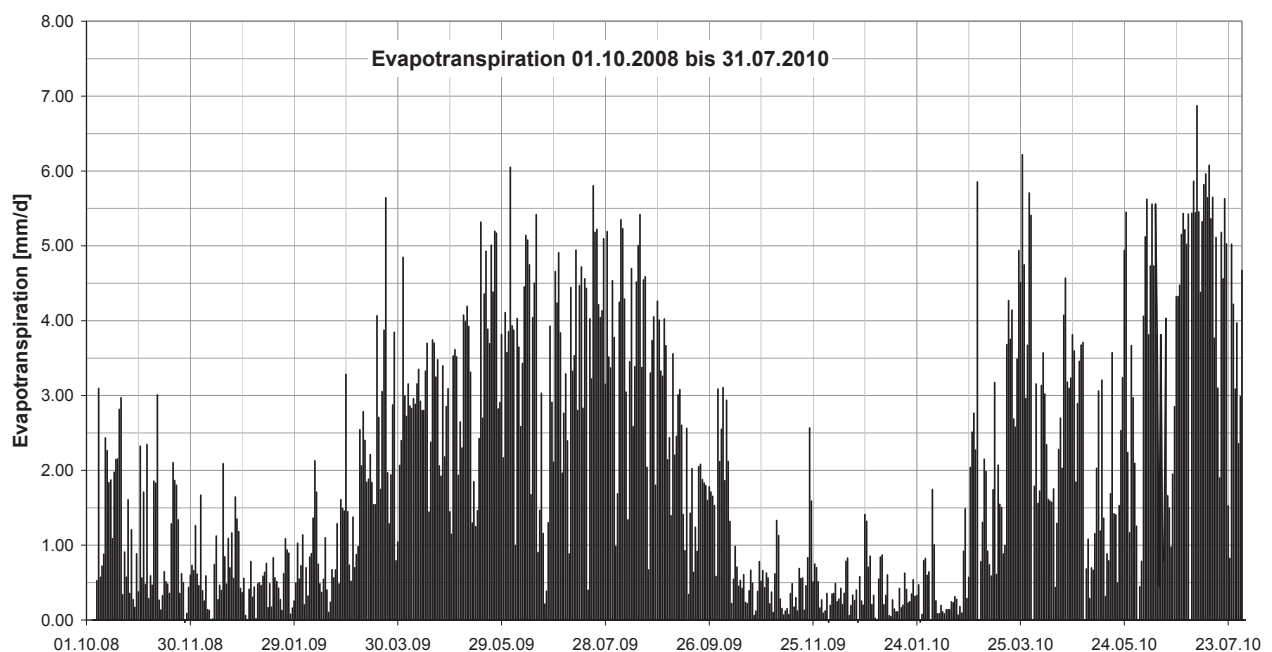


Abbildung 4.35: Tageswerte der tatsächlichen Evapotranspiration abgeschätzt nach Penman-Monteith

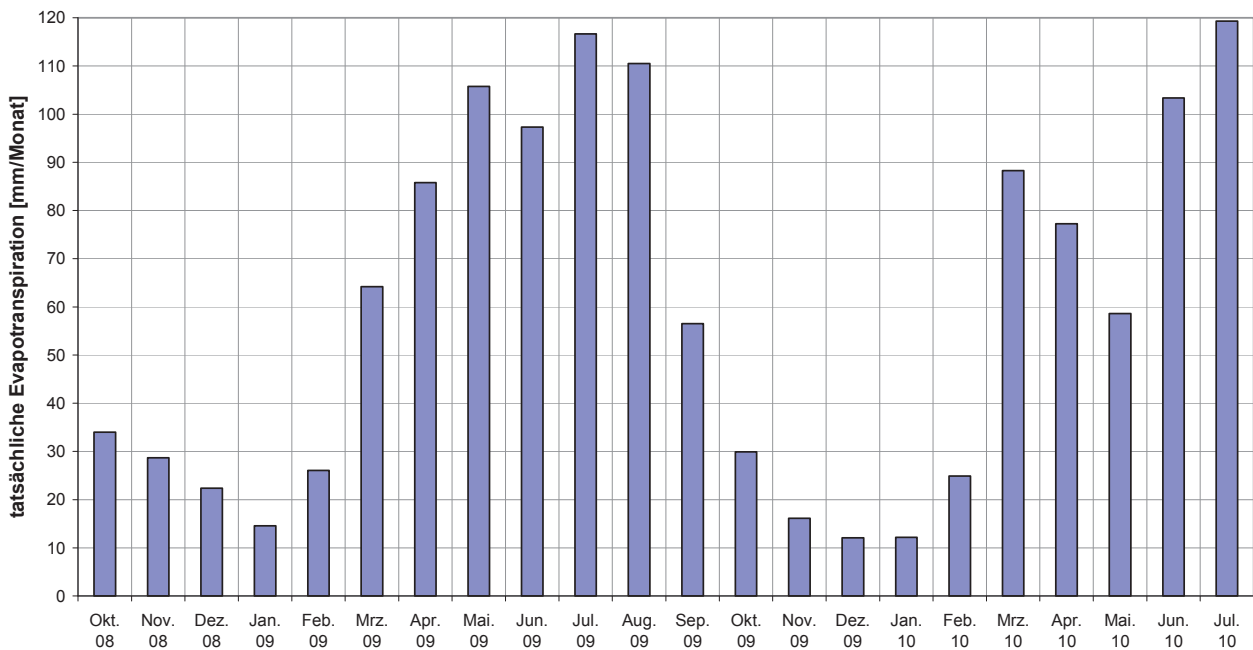


Abbildung 4.36: Monatswerte der tatsächlichen Evapotranspiration abgeschätzt nach Penman-Monteith

Für den Zeitraum zwischen Oktober 2008 und Juli 2010 erhält man daraus eine gesamte tatsächliche Evapotranspiration von ca. 1300 mm. Dem steht ein gemessener Gesamtniederschlag von 1420 mm gegenüber. Damit ergibt sich ein auf den Niederschlag bezogener Anteil der Evapotranspiration von ca. 91 %.

#### 4.2.4.5 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich anhand der Messergebnisse für die nasse Einbaubedingung Folgendes feststellen:

- Im Bereich der nassen Einbaubedingung wurden im Zuge der Verdichtung Porenwasserüberdrücke erzeugt, die zu einer Konsolidation des verdichteten organischen Tons geführt haben. Entsprechend einem Konsolidationsvorgang hat die Sickerwassermenge an der Basis der nassen Seite im zeitlichen Verlauf stark abgenommen. Auf Basis der gemessenen Wasserdrücke kann davon ausgegangen werden, dass die Konsolidation Ende April 2009 weitgehend abgeklungen war. Dennoch wurden darüber hinaus bis Ende Juli kontinuierlich abnehmende Sickerwassermengen beobachtet.
- Für den Zeitraum zwischen dem Einbau des nass verdichteten Materials im August 2008 und dem Ende der Konsolidationsphase im April 2009 wurden Sickerwassermengen an der Basis der nassen Seite von ca. 35 mm gemessen.
- Für den Zeitraum nach Abklingen der Konsolidation Ende April 2009 bis Juli 2010 wurde eine Gesamtsickerwassermenge an der Basis der nassen Seite von 9 mm gemessen. Dies entspricht einer monatlichen Sickerwassermenge von ca. 0,6 mm bzw. einem Wert von  $2,3 \cdot 10^{-10}$  m/s. Bezogen auf den in diesem Zeitraum aufgetretenen Niederschlag ergibt sich eine Sickerwasserrate an der Basis der nassen Einbaubedingung von ca. 1 % des Niederschlages. Dabei ist zu beachten, dass die Sickerwassermengen zwischen Mai 2009 und Juli 2010 weiterhin eine abnehmen-



de Tendenz aufweisen. Betrachtet man nur den Zeitraum zwischen März 2010 und Juli 2010, ergibt sich eine Sickerwasserrate an der Basis der nassen Einbaubedingung von ca. 0,5 % bzw. eine monatliche Sickerwasserrate von ca. 0,3 mm.

- Zwischen dem zeitlichen Verlauf der an der Basis der nassen Einbaubedingung gemessenen Sickerwasserraten und den gemessenen Niederschlagsereignissen besteht kein unmittelbarer Zusammenhang.
- Im Bereich der nassen Einbaubedingung wurden in der oberen Dränmatte im Zeitraum zwischen November 2008 und Juli 2010 Gesamtsickerwassermengen von 24 mm gemessen. Der zeitliche Verlauf der Sickerwassermengen aus der oberen Dränmatte ist nicht unmittelbar an Niederschlagsereignisse gekoppelt; in nennenswerter Größenordnung wird Sickerwasser in der Dränmatte nur in Phasen abgeführt, in denen der Oberboden sehr hohe Wassergehalte aufweist.

Für die trockene Einbaubedingung lassen sich aus den Messungen folgende Ergebnisse festhalten:

- An der Basis der trockenen Einbaubedingung wurde im gesamten Messzeitraum eine Gesamtsickerwassermenge von 3 mm gemessen. Der zeitliche Verlauf zeigt dabei eine abnehmende Tendenz. Zu Beginn der Messungen im November 2008 betrug die Sickerwasserrate ca. 0,3 mm/Monat. Seit Ende November 2009 wurden monatliche Wassermengen von i. M. 0,05 mm gemessen.
- Aus der oberen Dränmatte im Bereich der trockenen Einbaubedingung wurden Sickerwassermengen von 7 mm gemessen. Wie auch für die nasse Einbaubedingung bereits beschrieben, traten nennenswerte Sickerwasserabflüsse dabei nur in Phasen auf, in denen im Oberboden sehr hohe Wassergehalte vorlagen.
- Die Messungen der TDR-Sonden zeigen, dass der trocken verdichtete organische Ton aus der Dränmatte Wasser aufnimmt und speichert. Entsprechend den Messungen der TDR-Sonden sowie den durchgeführten Bohrungen hat der Wassergehalt seit Einbau i. M. um etwa 3 % zugenommen.

Die Messergebnisse und die auf Basis der Klimadaten abgeschätzte Evapotranspiration zeigen, dass vom Oberboden bezogen auf den Niederschlag nur sehr wenig Sickerwasser an die darunter liegende Dränmatte abgegeben wird. Dies beruht zum einen auf dem großen Speichervermögen des Oberbodens und der großen Wasseraufnahme durch den Bewuchs. Zum anderen wird dies unterstützt durch die zwischen dem Oberboden und dem verdichteten organogenen Ton gelegene Dränmatte. Diese wirkt als Kapillarsperre und unterbindet damit einen kapillaren Wassertransport vom Oberboden in den verdichteten Kernbereich. Eine Wasserabgabe aus dem Oberboden in die Dränmatte kann dadurch erst bei einer fast vollständigen Sättigung des Oberbodens erfolgen. Damit trägt die Dränmatte zu einer Reduzierung des in den verdichteten Kern eindringenden Sickerwassers bei, auch wenn in dieser nur wenig Sickerwasser abgeführt wird. Durch ihre Wirkung als Kapillarsperre unterbindet die Dränmatte allerdings auch einen bezüglich der Sickerwassermengen an der Basis günstigen kapillaren Wassertransport vom verdichteten Kern in den Oberboden.

Die Sickerwasserabgabe aus dem verdichteten organischen Boden ist nicht direkt abhängig von einzelnen Niederschlagsereignissen. Einen großen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Sickerwassermengen hat der Einbauwassergehalt. Bei hohen Einbauwassergehalten kann es im Zuge der Verdichtung zur Entstehung von Porenwasserüberdrücken kommen, was einen Konsolidati-



onsvorgang verbunden mit einer Porenwasserabgabe nach sich zieht. Unabhängig von einem möglichen Konsolidationsvorgang strebt der Boden prinzipiell einen Wassergehalt an, den er unter den vorgegebenen Randbedingungen gegen die Schwerkraft zurückhalten kann. Dieser ist jedoch von verschiedenen Parametern, u. a. der Poren- und Aggregatstruktur des Bodens abhängig. Für die nasse Einbaubedingung kann entsprechend den Messergebnissen davon ausgegangen werden, dass sich im verdichteten organogenen Ton seit etwa Januar 2010 näherungsweise ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Dabei ist zu beachten, dass ein vollkommener Gleichgewichtszustand aufgrund der stets variablen klimatischen Verhältnisse nicht möglich ist. Entsprechend den durchgeführten Bohrungen hat der gravimetrische Wassergehalt des nass verdichteten organogenen Tons im September 2009 im Mittel etwa 65 % betragen. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der TDR-Sonden wird angenommen, dass sich der Wassergehalt im Mittel seither nicht wesentlich verändert hat. Die Sickerwasserrate an der Basis der nassen Seite ist seit Januar 2010 äußerst gering, da wie beschrieben prinzipiell nur ein geringer Anteil des Niederschlages vom Oberboden an die Dränmatte abgegeben wird und der überwiegende Teil des abgegebenen Wassers in der Dränmatte abgeführt wird.

Im Bereich der trockenen Einbaubedingung liegt der Wassergehalt, den der trocken verdichtete organische Boden gegen die Schwerkraft zurück halten kann, über dem Einbauwassergehalt. Dementsprechend kommt es im trocken verdichteten organogenen Ton zu einer Speicherung des über die Dränmatte aufgenommenen Wassers. Dieser Prozess ist jedoch äußerst langsam, da insgesamt nur sehr wenig Wasser in der Dränmatte abgeführt wird und vom verdichteten organogenen Ton aufgenommen werden kann.

## 5 Berechnungen zum Wasserhaushalt der Versuchsschüttung – FEFLOW

Die Untersuchungen wurden mit dem Grundwassermodell FEFLOW der DHI Wasy GmbH, Berlin, durchgeführt. Damit kann die Wasserbewegung in der gesättigten wie auch ungesättigten Zone unter stationären und instationären Bedingungen beschrieben werden. Durch die Wahl eines Grundwassermodells beschränkt man sich bei der Abbildung der Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Boden auf die Simulation des in den Boden eindringenden Sickerwassers infolge von Niederschlagsereignissen. Die Wasserbewegung im Boden wird auf Grundlage der in Abschnitt 3.4 dargestellten Richards-Gleichung beschrieben. Die partielle, nichtlineare Differentialgleichung wird unter Anwendung der Finite-Elemente-Methode numerisch gelöst. Die Beziehungen zwischen der Saugspannung und dem volumetrischen Wassergehalt sowie der ungesättigten hydraulischen Durchlässigkeit und dem volumetrischen Wassergehalt werden mit dem in Abschnitt 3.4 dargestellten geschlossenen Ansatz nach VAN GENUCHTEN (1980) und MUALEM (1976) beschrieben.

Dadurch, dass das verwendete Sickerwassermodell nur die Wasserbewegung im Boden abbilden kann, bringt es gegenüber den in der Realität stattfindenden Prozessen einige Vereinfachungen mit sich. So lassen sich die durch Evapotranspiration abgegebene Wassermenge und die als Oberflächenwasser abgeführte Wassermenge aus diesen Modellen nicht ermitteln, sondern müssen getrennt davon abgeschätzt werden und bei der Ermittlung der in den Boden infiltrierenden Wassermenge berücksichtigt werden. Dies ist jedoch mit Schwierigkeiten verbunden, da die Evapotranspiration, der Oberflächenabfluss und die Infiltration nicht nur von den klimatischen Verhältnissen (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Strahlung) abhängen, sondern auch durch die zustandsabhängigen Eigenschaften des Bodens (Sättigungsgrad) beeinflusst werden und die Vorgänge an der Bodenoberfläche damit mit der Wasserbewegung im Boden gekoppelt sind. Bei Ansatz von realitätsnahen zeitlich variablen Randbedingungen sind derartige Sickerwassermodelle daher nur eingeschränkt geeignet. Für diesen Fall stehen sogenannte hydrologische Modelle zur Verfügung. Diese besitzen den Anspruch, zusätzlich zur Wasserbewegung im Boden auch die an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse des Oberflächenabflusses, der Infiltration und der Evapotranspiration korrekt abzubilden. Allerdings erfordern diese die Definition weiterer Parameter, wie z.B. Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Strahlung, was die Komplexität der Berechnungen erhöht.

Da das vorliegende Forschungsvorhaben auf den Ergebnissen des F&E-Vorhabens 05.147 aufbaut und zunächst der Einfluss der stark vereinfachten Randbedingung eines zeitlich konstanten Niederschlages auf die Sickerwassermengen analysiert werden soll, wurden die bisher durchgeführten und im Folgenden vorgestellten Untersuchungen mit dem beschriebenen Grundwassermodell, das auch im Rahmen des F&E-Vorhabens 05.147 zum Einsatz kam, durchgeführt. Im Hinblick auf die an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse mussten dazu einige Vereinfachungen getroffen werden, auf die im Detail im Folgenden eingegangen wird.

## 5.1 Vorgehensweise

Zunächst wurde die Geometrie der Versuchsschüttung unter Berücksichtigung der Funktion der einzelnen Schichten entsprechend den Modellanforderungen modifiziert. Danach wurde das FE-Netz generiert und wurden Bodenkennwerte und Randbedingungen zugewiesen. Zur Analyse des Wasserhaushaltes der Versuchsschüttung wurden zunächst Berechnungen unter Ansatz eines zeitlich konstanten Niederschlages bei Vernachlässigung des Oberflächenabflusses und der Evapotranspiration durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass die stark nichtlineare partielle Differenzialgleichung bei dem vorliegenden mehrschichtigen geometrischen Aufbau nur unter Diskretisierung der einzelnen Zeitschritte trotz der zeitlich konstanten Randbedingung nur instationär gelöst werden kann. Die Berechnung wurde deshalb von einem definierten Anfangszustand ausgehend gestartet und bis zum Erreichen eines quasi-stationären Zustandes durchgeführt. Anschließend wurden Berechnungen unter Ansatz von zeitlich variablen Randbedingungen unter Berücksichtigung der Evapotranspiration durchgeführt. Die Höhe der Evapotranspiration wurde wie in Abschnitt 4.2.4.4 dargestellt nach dem Modell von Penman-Monteith abgeschätzt. Über den Oberflächenabfluss lagen keine Messdaten vor. Da dieser auch nicht anhand einfacher Formeln abgeschätzt werden konnte, wurde vereinfachend angenommen, dass kein Oberflächenabfluss stattfindet. Der auf der Modelloberfläche definierte Zu- bzw. Abfluss ergibt sich demnach als Differenz aus dem gemessenen Niederschlag und der abgeschätzten Evapotranspiration. Zur Ermittlung des Einflusses unterschiedlich stark vereinfachter Randbedingungen wurden instationäre Berechnungen unter Ansatz von Tageswerten, Wochenwerten und Monatswerten des Niederschlages und der Evapotranspiration durchgeführt. Wie sich im Zuge der Berechnungen gezeigt hat, hat der Anfangszustand der Böden einen sehr großen Einfluss auf die sich einstellende Wasserbewegung in der Versuchsschüttung. Aus diesem Grund wurden zusätzlich instationäre Berechnungen ohne Niederschlag und ohne Verdunstung durchgeführt, um eine mögliche Wasserabgabe der Versuchsschüttung infolge eines hohen Anfangswassergehaltes ermitteln zu können.

## 5.2 Modellbildung

### 5.2.1 Modellgeometrie

Allen Berechnungen liegt die in Abbildung 5.1 dargestellte Modellgeometrie des Versuchshügels zugrunde.

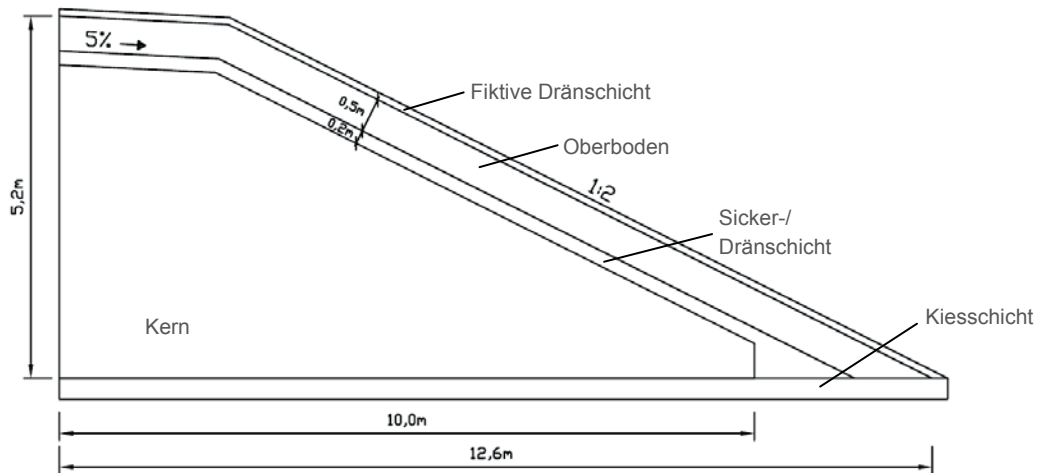


Abbildung 5.1: Modellgeometrie

Für die stationären Berechnungen wurde eine, auf der eigentlichen Bodenoberfläche befindliche fiktive Dränschicht definiert, um einen Wasserabfluss auf dem Damms im Sinne eines Oberflächenabflusses zu ermöglichen. Der auf das Modell aufgebrachte Niederschlag kann so entweder in den Damms infiltrieren oder auf der Oberfläche über die fiktive Dränschicht abfließen. Für die instationären Berechnungen mit zeitlich variablen Randbedingungen musste aufgrund von numerischen Schwierigkeiten auf die Definition der fiktiven Dränschicht verzichtet werden.

Der Oberboden des Versuchshügels wurde in einer Mächtigkeit von 50 cm ausgeführt. Die zwischen Oberboden und Kernmaterial eingebrachte Dränmatte wurde aus Gründen der Modellierbarkeit als 20 cm dicke Kiesschicht modelliert. Sehr dünne Elemente bereiten Schwierigkeiten bei der Generierung des Finite-Elemente-Netzes und können zu erheblichen numerischen Problemen führen.

Die FE-Modelle bestehen aus ca. 47.000 Dreieckselementen. Im Bereich der Oberboden- und der Sickerschicht, in denen die größte Wasserbewegung zu erwarten ist, wurde das Netz jeweils lokal verfeinert (siehe Abbildung 5.2).

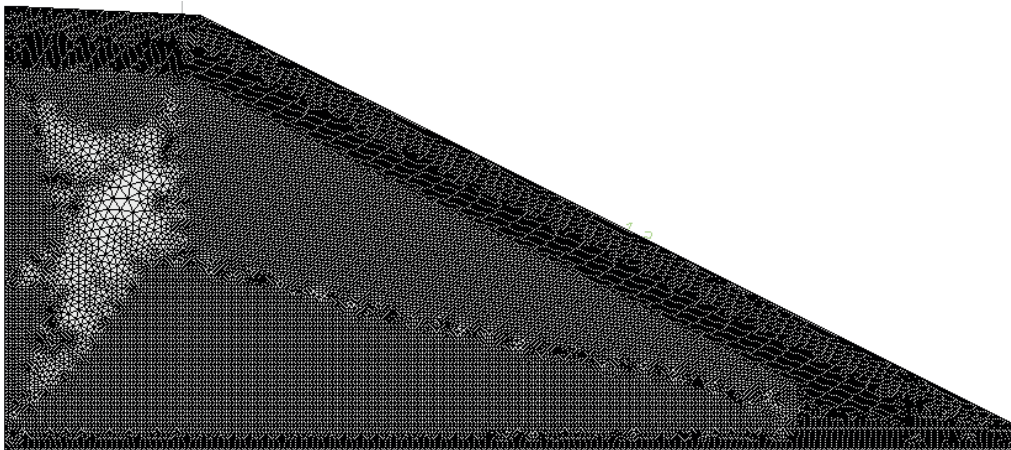


Abbildung 5.2: Finite-Elemente-Netz

### 5.2.2 Randbedingungen

Mit dem gewählten Berechnungsmodell kann wie bereits einführend beschrieben prinzipiell nur die Wasserbewegung im Boden abgebildet werden. Die an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse der Evapotranspiration, des Oberflächenabflusses und der Infiltration müssen dabei vorab quantifiziert und über die Randbedingung definiert werden. Die Infiltration ergibt sich prinzipiell aus der Differenz zwischen dem Niederschlag und dem Oberflächenabfluss abzüglich der Verdunstung an der Bodenoberfläche. Der Niederschlag wurde entsprechend den mit der Klimastation gewonnenen Messdaten angesetzt. Die Evapotranspiration wurde wie in Abschnitt 4.2.4.4 beschrieben anhand der Messdaten mit dem Modell nach Penman-Monteith ermittelt. Zum Oberflächenabfluss liegen keine Messdaten vor. Für die stationären Berechnungen mit zeitlich konstanten Randbedingungen konnte die fiktive Dränschicht definiert werden, wodurch die Ausbildung eines Oberflächenabflusses im Modell ermöglicht wurde. Für die instationären Berechnungen musste auf die fiktive Dränschicht verzichtet werden. Da der sich einstellende Oberflächenabfluss wie in Abschnitt 3.2 beschrieben von vielen Faktoren abhängt, konnten diesbezüglich keine gesicherten Annahmen getroffen werden. Auf der sicheren Seite liegend wurde deshalb angenommen, dass sich kein Oberflächenabfluss ausbildet. An der Oberfläche der fiktiven Dränschicht wurde dementsprechend als Randbedingung die Differenz zwischen dem Niederschlag und der nach Penman-Monteith abgeschätzten Evapotranspiration angesetzt.

Die ersten Modellberechnungen wurden vereinfachend unter Vernachlässigung der Evapotranspiration und unter Ansatz eines zeitlich konstanten Niederschlages durchgeführt. Dazu wurde der zwischen Oktober 2008 und Mai 2010 gemessene Gesamtniederschlag gleichmäßig auf den Messzeitraum verteilt. Damit erhält man eine konstante Niederschlagsmenge von etwa 2,0 mm/d. Unter Berücksichtigung der Böschungsneigung von 1:2 wurde der Niederschlag im Böschungsbereich dabei entsprechend der Neigung auf 1,79 mm/d abgemindert. Aufgrund der Vernachlässigung der Evapotranspiration werden die Sickerwassermengen damit deutlich überschätzt.

Im nächsten Schritt wurde der für den Zeitraum zwischen Oktober 2008 und Mai 2010 gemessene Gesamtniederschlag um den für diesen Zeitraum ermittelten Wert der Evapotranspiration abgemindert. Da die Höhe der Evapotranspiration u. a. von der Geländeneigung abhängt, wurden der Kronen- und der Böschungsbereich dabei getrennt voneinander betrachtet. Für den Kronenbereich wurde aus der Differenz zwischen dem Niederschlag und der Evapotranspiration eine konstante Infiltrationsrate von 0,8 mm/d ermittelt. Für den Böschungsbereich ist diese aufgrund der südseitigen Ausrichtung und der infolge der Neigung erhöhten Strahlungsintensität deutlich geringer. Die ermittelte konstante Infiltrationsrate beträgt in diesem Bereich 0,08 mm/d.

Zur Ermittlung des Einflusses der unterschiedlichen Randbedingungen wurden zusätzlich zu den Berechnungen mit einem zeitlich konstanten Zufluss Berechnungen mit zeitlich veränderlichen Randbedingungen durchgeführt. Dabei wurden aus den zwischen Oktober 2008 bis Mai 2010 gemessenen Niederschlagsdaten und aus abgeleiteten Verdunstungsraten Tageswerte, Wochenwerte und Monatswerte der Infiltration gebildet. Die sich dafür ergebenden unterschiedlichen Verteilungen der Infiltrationsrate sind in Abbildung 5.3 dargestellt.

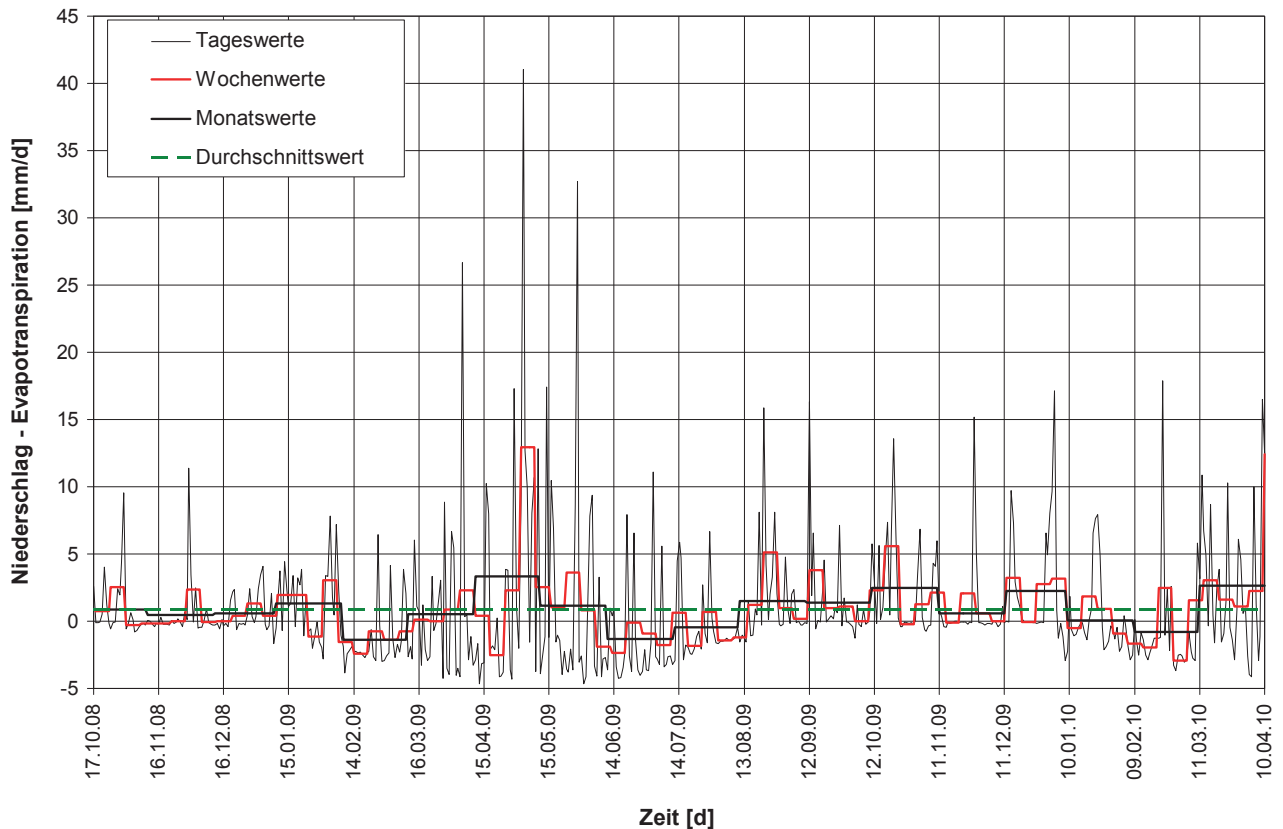


Abbildung 5.3: Tageswerte, Wochenwerte, Monatswerte und Durchschnittswert des Niederschla- ges abzüglich der Evapotranspiration für die Dammkrone

Die Böschungsneigung von 1:2 berücksichtigend wird der Niederschlag im Böschungsbereich ent- sprechend abgemindert und der Einfluss der Strahlung und damit der Verdunstung berücksichtigt.

An der Modellunterseite wurde die Situation eines freien Ausflusses modelliert. Dies geschieht über die Definition eines Potentials entsprechend der geodätischen Höhe. Diese Definition führt dazu, dass Wasser nur im Falle voller Sättigung ausströmen kann, da entsprechend Gleichung (3.23) das Gesamtpotential  $H$  der Summe aus Matrixpotential  $H_m$  und Gravitationspotential  $H_g$  entspricht:

$$H = H_m + H_g$$

und im Falle von  $H = H_g$  das Matrixpotential  $H_m$  gleich Null ist.

Der linke Modellrand ist undurchlässig und bildet damit eine feste Berandung. In Abbildung 5.4 ist das verwendete Modell mit den Randbedingungen dargestellt. Durch die Modellierung einer Kies- schicht unterhalb des Dammes konnte eine Wasseraufnahme über die Modellunterseite aufgrund der kapillarbrechenden Eigenschaften der Kiesschicht weitgehend minimiert werden.



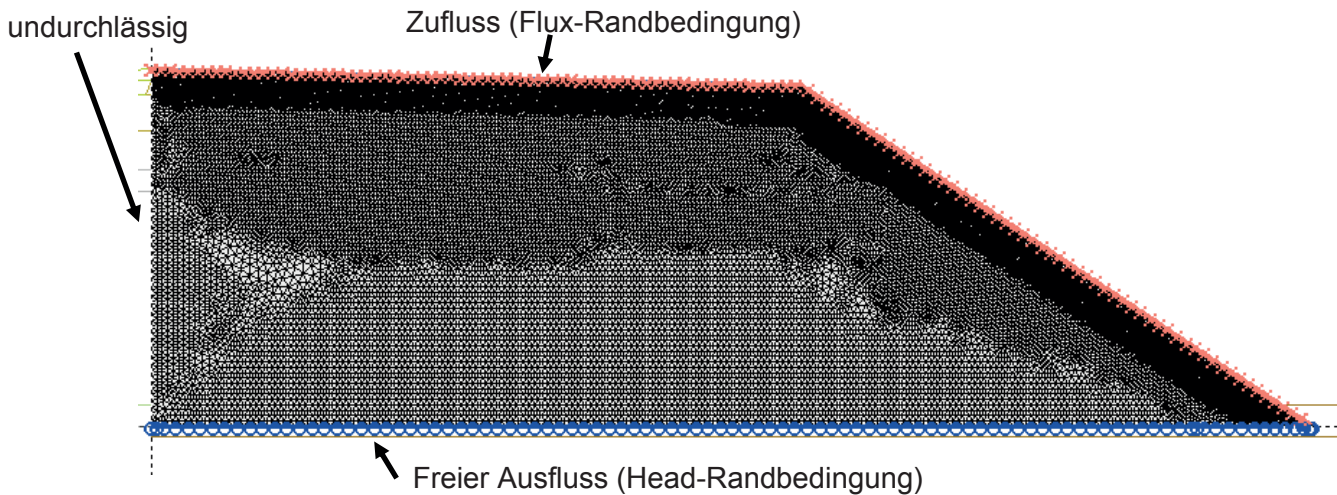


Abbildung 5.4: Modell mit Randbedingungen

### 5.2.3 Anfangsbedingung

Im Zuge der Herstellung der Versuchsschüttung wurde das Kernmaterial in der Osthälfte mit einem durchschnittlichen Wassergehalt von ca. 75 % und in der Westhälfte mit einem durchschnittlichen Wassergehalt von ca. 55 % eingebaut. Dies entspricht Sättigungsgraden von ca. 98 % in der Osthälfte und ca. 66 % in der Westhälfte. Der Wassergehalt des Oberbodens betrug beim Einbau ca. 50 %, der Sättigungsgrad ca. 65 %. Damit liegt im Einbauzustand im Probehügel kein Gleichgewichtszustand vor, da entsprechend den Sättigungsgraden und den Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen im Einbauzustand im Oberboden und im Kernmaterial unterschiedliche Matrixpotentiale vorliegen. Dadurch kommt es im Bestreben eines Potentialausgleiches zu Wasserbewegungen im Hügel. Den Modellberechnungen konnte dieser Zustand nicht als Anfangsbedingung zugrunde gelegt werden, da in den Modellberechnungen von einem derartigen Zustand ausgehend kein rechnerisch stabiler Zustand gefunden werden konnte. Vereinfachend wurde daher im gesamten Modell ein konstantes Matrixpotential angesetzt. Dieses wurde so gewählt, dass im Kernmaterial im Anfangszustand ein Sättigungsgrad von 66 % (trocken) bzw. 98 % (nass) vorlag (siehe Abbildung 5.5 und Abbildung 5.6). Für die nasse Einbaubedingung ergab sich daraus eine Matrixspannung von -3 kPa, für die trockene Einbaubedingung von -35 kPa. Im Oberboden führten diese zu Sättigungsgraden von 79 % bzw. 98 %. Insbesondere für die nasse Einbaubedingung wurde der Anfangssättigungsgrad des Oberbodens im Modell damit deutlich überschätzt.

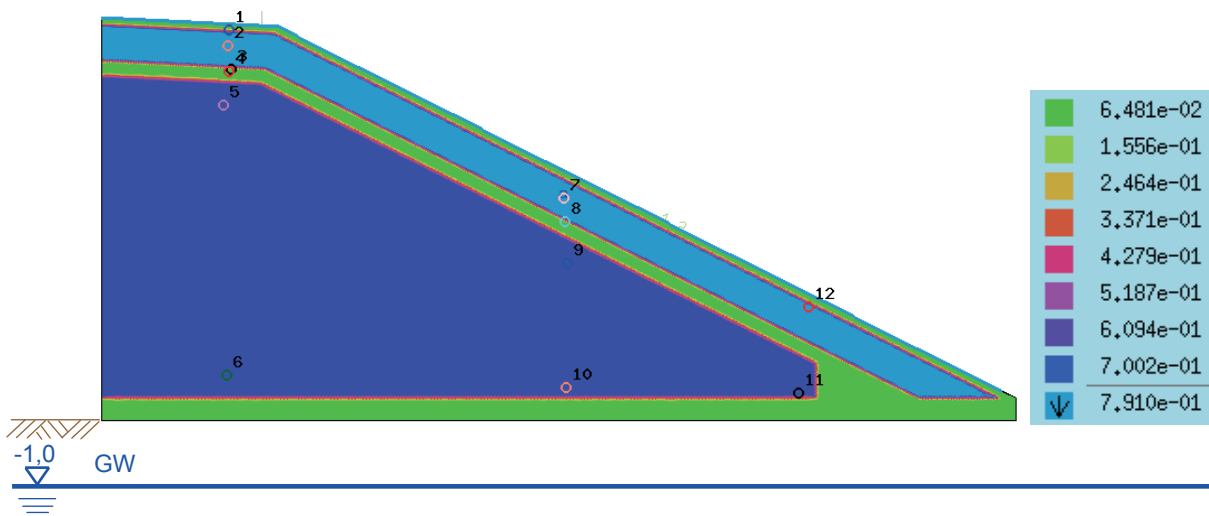


Abbildung 5.5: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für die trockene Seite

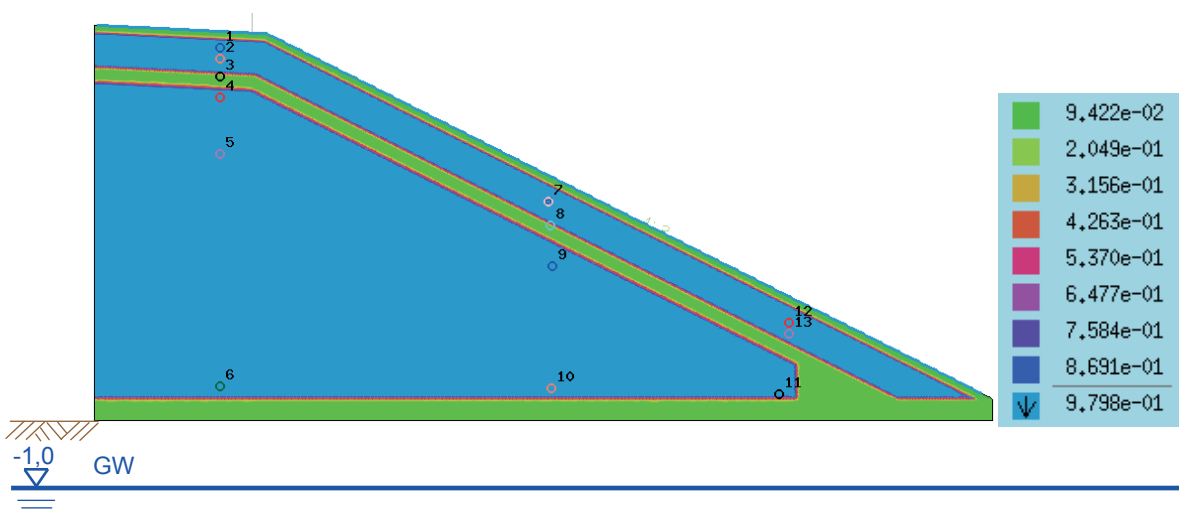


Abbildung 5.6: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für die nasse Seite

#### 5.2.4 Bodenkennwerte

Die Bodenkennwerte für das Kernmaterial und den Oberboden wurden entsprechend den Ergebnissen der durchgeführten Laboruntersuchungen angenommen (siehe Abschnitt 4.2.2.3). Die Hysterese der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung wird in FEFLOW mit einem Ansatz nach SCOTT (1983) beschrieben. Die van Genuchten – Parameter für den Hauptbewässerungs- und Hauptentwässerungsast sind in Tabelle 5.1 für das Kernmaterial und den Oberboden zusammenfassend dargestellt. Als Durchlässigkeitsbeiwerte im gesättigten Zustand wurden für den trocken verdichteten organischen Boden  $k = 5 \cdot 10^{-8}$  m/s und für den nass verdichteten organischen Boden  $k = 5 \cdot 10^{-9}$  m/s angesetzt. Für den Oberboden wurde zunächst ein Durchlässigkeitsbeiwert im gesättigten Zustand von  $k = 5 \cdot 10^{-8}$  m/s angenommen. Dabei kam es jedoch zu numerischen Schwierigkeiten, da die auf der Dammoberfläche definierte Infiltrationsrate vom Oberboden nicht aufge-



nommen werden konnte. Dies ist darauf zurück zu führen, dass in der Realität ein Teil des Niederschlages insbesondere bei hohen Niederschlagsintensitäten als Oberflächenabfluss abgeführt wird, bei den Modellberechnungen für die Definition der Infiltrationsrate aber davon ausgegangen wurde, dass kein Oberflächenabfluss stattfindet. Zur Vermeidung der numerischen Probleme wurde der Durchlässigkeitsbeiwert des Oberbodens bei den Berechnungen mit zeitlich variablen Randbedingungen deshalb auf  $k = 5 \cdot 10^{-7}$  m/s erhöht. Damit konnte die über die Randbedingung definierte Infiltrationsrate vom Boden vollständig aufgenommen werden.

Für die Dränschicht wurden die von EKBLAD UND ISACSSON (2007) an einem schwach schluffigen Kies (6 % Feinkornanteil, GU nach DIN 18196) ermittelten Bodenkennwerte angesetzt. Da Ekblad und Isacsson keine Durchlässigkeitsbeiwerte für die von Ihnen untersuchten Böden angeben, wurde dieser für den betreffenden aufgrund von Erfahrungswerten zu  $k = 5 \cdot 10^{-3}$  m/s abgeschätzt.

Für die in den stationären Berechnungen modellierte fiktive Dränschicht wurden dieselben van Genuchten - Parameter wie für die Dränschicht nach EKBLAD UND ISACSSON (2007) angesetzt.

Der unterhalb des Kernmaterials modellierten Kiesschicht wurden ebenfalls die Parameter nach Ekblad und Isacsson (2007) zugewiesen. Um eine mögliche Wasseraufnahme im Zuge der Modellberechnungen zu minimieren, wurde der Durchlässigkeitsbeiwert im gesättigten Zustand dabei auf  $k = 5 \cdot 10^{-5}$  m/s verringert.

DIN 18196	OT		OT		OT		GW
	Oberboden		Kernboden – trocken		Kernboden - nass		
Schicht	Bewässerung	Entwässerung	Bewässerung	Entwässerung	Bewässerung	Entwässerung	
$k_r$ -Wert [m/s]	$5 \cdot 10^{-8} / 5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8} / 5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-3} / 5 \cdot 10^{-5}$
$S_s$	1	1	1	1	1	1	1
$S_r$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.048
$\alpha$ [ $m^{-1}$ ]	1	0.11	3.2	0.4	1	0.14	46
$n$	1.24	1.24	1.18	1.24	1.24	1.3	1.79
$m = 1-(1/n)$	0.19	0.19	0.15	0.19	0.19	0.23	0.44
Porenanteil	0.63	0.63	0.65	0.65	0.65	0.65	0.23

*fett und kursiv gedruckt: abgeschätzte Werte*

Tabelle 5.1: Bodenkennwerte

In der Abbildung 5.7, der Abbildung 5.10 und der Abbildung 5.9 sind die Saugspannungs-Sättigungsgrad-Beziehungen der einzelnen Böden in der parametrisierten Form nach van Genuchten dargestellt.

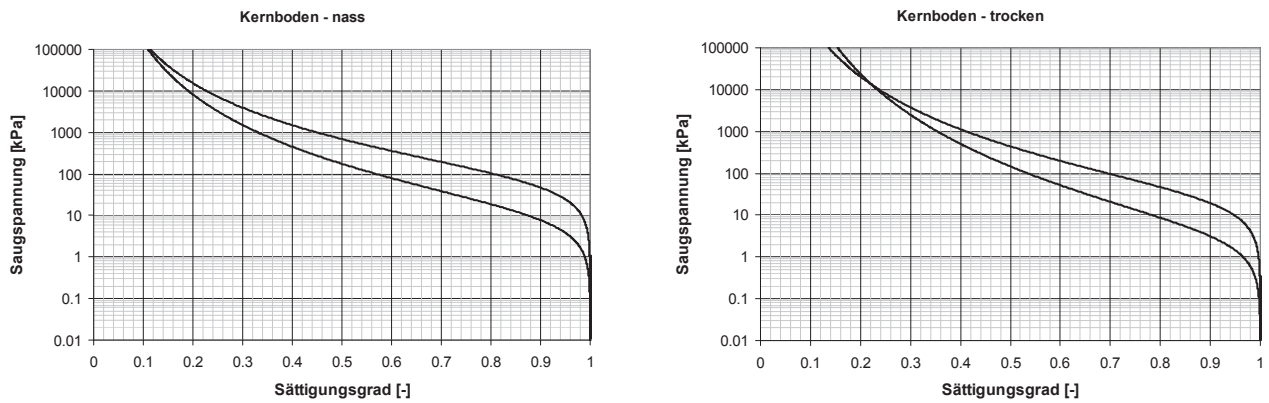


Abbildung 5.7: Saugspannungs-Sättigungsgrad-Beziehung für den Kernboden

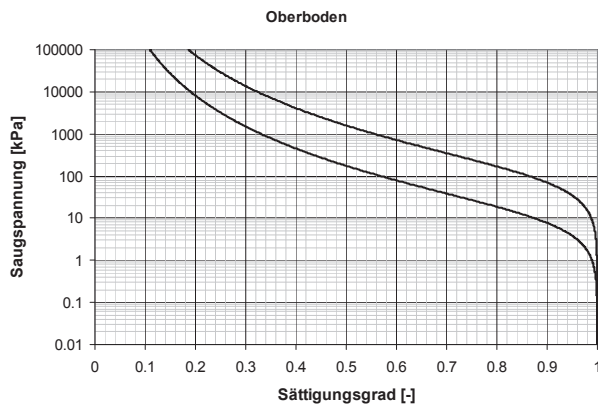


Abbildung 5.8: Saugspannungs-Sättigungsgrad-Beziehung für den Oberboden

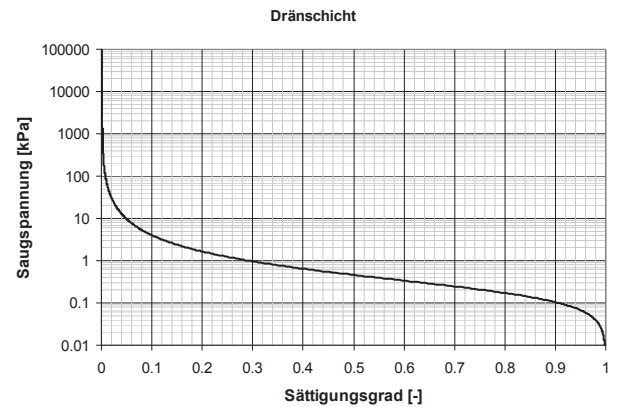


Abbildung 5.9: Saugspannungs-Sättigungsgrad-Beziehung für die Dränschicht

In der Abbildung 5.10 sind die Beziehungen zwischen der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und dem Sättigungsgrad für den Kernboden und dem Oberboden entsprechend dem Ansatz nach van Genuchten und Mualem dargestellt. Für den Oberboden wird dabei der Fall für einen Durchlässigkeitsbeiwert im gesättigten Zustand von  $k = 5 \cdot 10^{-7}$  m/s abgebildet.

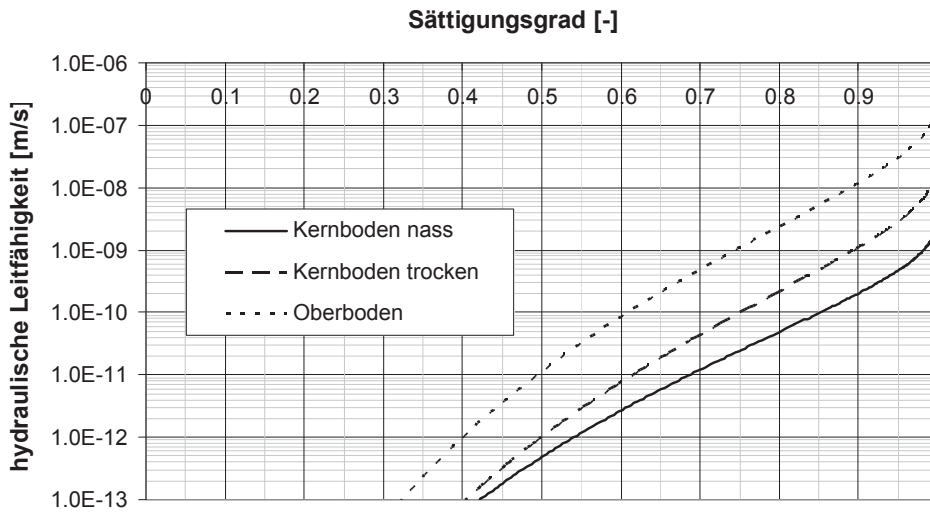


Abbildung 5.10: ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit für den Kernboden und den Oberboden modelliert mit Ansatz nach van Genuchten und Mualem

### 5.2.5 Berechnungshilfen in FEFLOW

#### 5.2.5.1 Observation single points

Anhand von observation single points kann der Berechnungsablauf in FEFLOW beobachtet werden. Observation single points werden vor Beginn der Simulation an beliebigen Stellen des Dammes – vorzugsweise jeweils in den unterschiedlichen Schichten – eingefügt (siehe Abbildung 5.11). An diesen Punkten wird im Laufe der Berechnung das hydraulische Potential als Summe aus geodätischer Höhe und Druckhöhe in Abhängigkeit von der Zeit aufgezeichnet, wie aus dem Diagramm in Abbildung 5.12 hervorgeht.

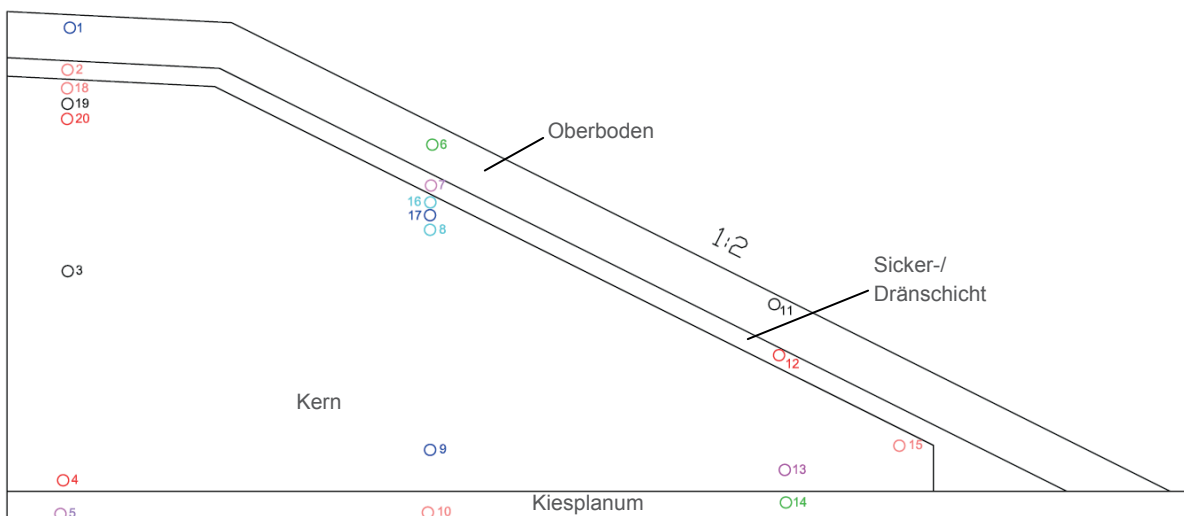


Abbildung 5.11: observation single points

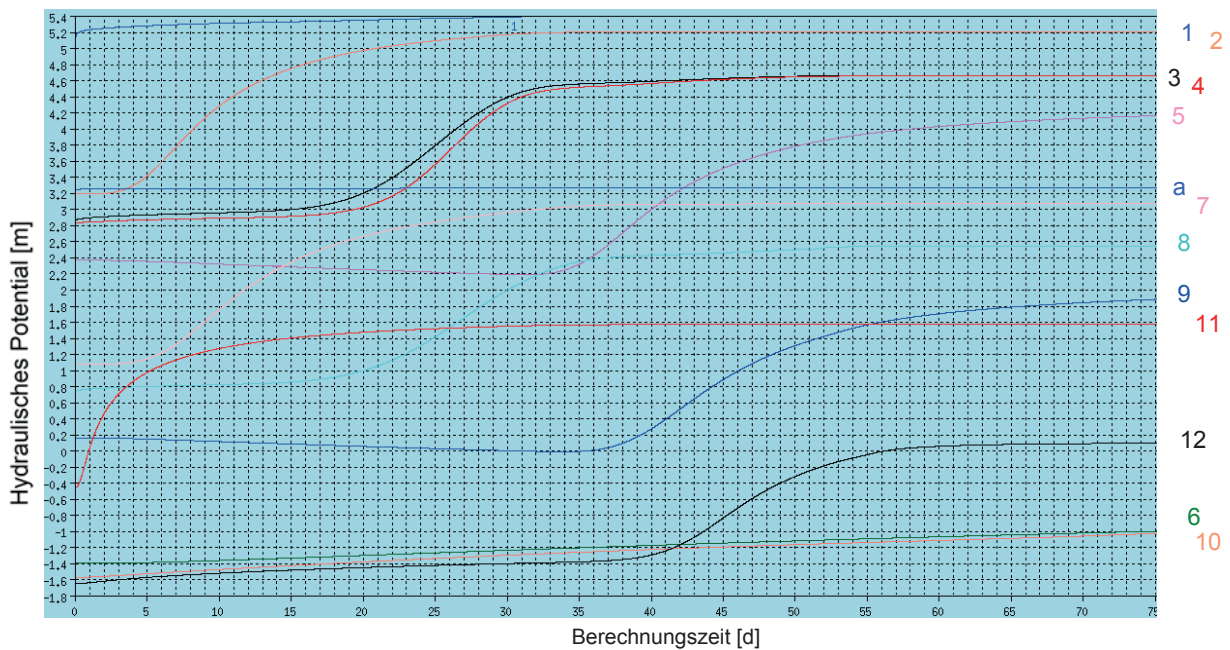


Abbildung 5.12: hydraulisches Potential an observation single points in Abhängigkeit von der Zeit

### 5.2.5.2 Fluid-Flux-Analyzer

Ähnlich wie bei den observation single points wird die Position der Fluid-Flux-Linien innerhalb des Rechenmodells vom Programm benutzer eingegeben (siehe Abbildung 5.13). Über den Fluid-Flux-Analyzer ist es möglich, diejenige Wassermenge zu ermitteln, die den durch die Fluid-Flux-Linie vorgegebenen Querschnitt durchströmt. Der Fluid-Flux-Analyzer ermittelt den Durchfluss aus einer Nachlaufrechnung unter Berücksichtigung der an den Knoten ermittelten Potentialhöhen und den für die einzelnen Elemente ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerten.

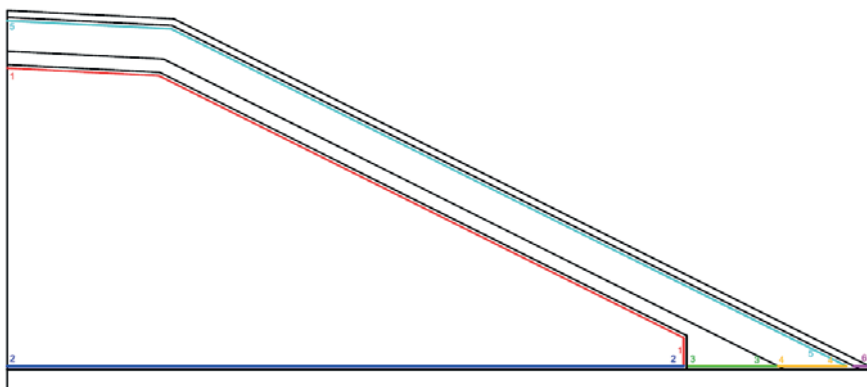


Abbildung 5.13: Fluid-Flux-Linien zur Ermittlung der Wasserbewegung im Modell

### 5.3 Übersicht über die durchgeführten Berechnungen

Zunächst wurden sowohl für die trockene wie auch für die nasse Seite Berechnungen mit einem über die Zeit konstanten Niederschlag von 2,0 mm/d durchgeführt. Dabei wurde eine auf dem Oberboden befindliche fiktive Dränschicht modelliert. Dies ermöglicht die Simulation eines eventuell stattfindenden Oberflächenabflusses des Niederschlagwassers.

Bei den Berechnungen mit veränderlichen Niederschlägen kam es in Verdunstungsphasen jedoch zu Problemen bei der Abbildung der fiktiven Dränschicht. Daher wurde bei diesen Berechnungen auf die fiktive Dränschicht verzichtet. Da die Niederschlagsspitzen vom Oberboden bei Ansatz eines Durchlässigkeitsbeiwertes von  $k = 5 \cdot 10^{-8}$  m/s nicht aufgenommen werden konnten, wurde der Durchlässigkeitsbeiwert des Oberbodens für alle Berechnungen auf  $k = 5 \cdot 10^{-7}$  m/s vergrößert, so dass der gemessene Niederschlag vollständig in den Oberboden infiltrieren konnte.

Außerdem wurde in einzelnen Berechnungen der Durchlässigkeitsbeiwert des Kernbodens auf der trockenen Seite von  $k = 5 \cdot 10^{-8}$  m/s auf  $k = 1 \cdot 10^{-7}$  m/s erhöht und der Durchlässigkeitsbeiwert des Kernbodens auf der nassen Seite von  $k = 5 \cdot 10^{-9}$  m/s auf  $k = 1 \cdot 10^{-9}$  m/s reduziert. Auf die Gründe dafür wird im Detail bei der Auswertung der Berechnungsergebnisse eingegangen. Die übrigen Bodenkennwerte wurden nicht verändert und können der Tabelle 5.1 entnommen werden. Zur Ermittlung der Auswirkung unterschiedlicher Niederschläge wurden die Berechnungen mit veränderlichen Niederschlägen unter Ansatz von Tageswerten, Wochenwerten und Monatswerten des gemessenen Niederschlages durchgeführt. Eine Übersicht über die durchgeführten Berechnungen und die dabei angesetzten Durchlässigkeitsbeiwerte im gesättigten Zustand gibt Tabelle 5.2.

Über die Druckhöhe im Anfangszustand wurde der Sättigungsgrad des Kernbodens im Anfangszustand definiert. Bei der nassen Seite ergibt sich der Anfangssättigungsgrad im Kernboden aus der Druckhöhe von -3 kPa zu 98 %. Der trockenen Seite wurde über die Druckhöhe von -35 kPa ein Sättigungsgrad des Kernbodens im Anfangszustand von 66 % zugeordnet.

Modell		Oberboden	Kernboden trocken	Kernboden nass	Drän-/Sicker-/Kiesschicht	Anfangssättigungsgrad im Kernboden [%]	Druckhöhe im Anfangszustand [kPa]
MUC nass_2.0	DIN 18196	OT		OT	GW	98	-3
	$k_f$ -Wert [m/s]	$5 \cdot 10^{-8}$		$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-3} / 5 \cdot 10^{-5}$		
MUC trocken_2.0	DIN 18196	OT	OT		GW	66	-35
	$k_f$ -Wert [m/s]	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$		$5 \cdot 10^{-3} / 5 \cdot 10^{-5}$		
MUC nass	DIN 18196	OT		OT	GW	98	-3
	$k_f$ -Wert [m/s]	$5 \cdot 10^{-7}$		$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-3} / 5 \cdot 10^{-5}$		
MUC trocken	DIN 18196	OT	OT		GW	66	-35
	$k_f$ -Wert [m/s]	$5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$		$5 \cdot 10^{-3} / 5 \cdot 10^{-5}$		
MUC 2012 nass	DIN 18196	OT		OT	GW	98	-3
	$k_f$ -Wert [m/s]	$5 \cdot 10^{-7}$		$1 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-3} / 5 \cdot 10^{-5}$		

Tabelle 5.2: Übersicht über die angepassten Durchlässigkeitsbeiwerte

Die nachfolgende Tabelle 5.3 gibt einen Überblick über die durchgeführten Berechnungen und deren Berechnungszeiten.

Niederschlag Modell	2,0 mm/d	Durchschnitts-NS	Monats-NS	Wochen-NS	Tages-NS
MUC nass	935 d	1290 d	602 d	602 d	602 d
MUC trocken	510 d	1200 d	602 d	602 d	602 d
MUC nass 2012					662 d

Tabelle 5.3: Übersicht über die untersuchten Berechnungsdauern in Tagen für die einzelnen Modelle

Um den Einfluss des Niederschlages auf die Höhe der aus dem Kern ausfließenden Sickerwassermengen zu ermitteln, wurde anhand von Berechnungen ohne Niederschlag und Verdunstung für die nasse Seite untersucht, inwieweit die Anfangsbedingungen die Sickerwassermengen an der Basis beeinflussen. In der Tabelle 5.4 sind der Durchlässigkeitsbeiwert des Kernmaterials, der Anfangssättigungsgrad bzw. die Druckhöhe im Anfangszustand sowie die Berechnungszeiten für diese Berechnungsreihe aufgelistet. Farblich unterlegt sind alle im Vergleich zu den Berechnungen mit unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen veränderten Parameter.

Modell	k-Wert des Kernmaterials [m/s]	Anfangs- sättigungsgrad [%]	Druckhöhe im Anfangszustand [kPa]	Berechnungs- dauer [d]
MUC nass	$5 \cdot 10^{-9}$	98	-3	1288
MUC nass	$5 \cdot 10^{-8}$	98	-3	1200
MUC nass	$5 \cdot 10^{-8}$	78	-25	1200
MUC nass	$5 \cdot 10^{-8}$	92	-10	1200
MUC nass	$1 \cdot 10^{-8}$	98	-3	1200

Tabelle 5.4: Übersicht über die durchgeführten Berechnungen ohne Niederschlag und deren Berechnungsdauern

## 5.4 Berechnungsergebnisse

### 5.4.1 Sickerwassermengen bei zeitlich konstanten Niederschlägen ohne Berücksichtigung der Evapotranspiration

Das in Abbildung 5.14 dargestellte Diagramm zeigt die auf die Länge des Hügels bezogenen Sickerwassermengen im Berechnungsmodell für die trockene Seite. Ausgewertet wurden dabei die Infiltration in den Oberboden, die Infiltration in den Kern, der Oberflächenabfluss sowie die Abflüsse

aus der Sickerschicht, aus dem Oberboden und aus dem Kernmaterial. Die Auswertung erfolgte über die in Abbildung 5.13 dargestellten Fluid-Flux-Linien.

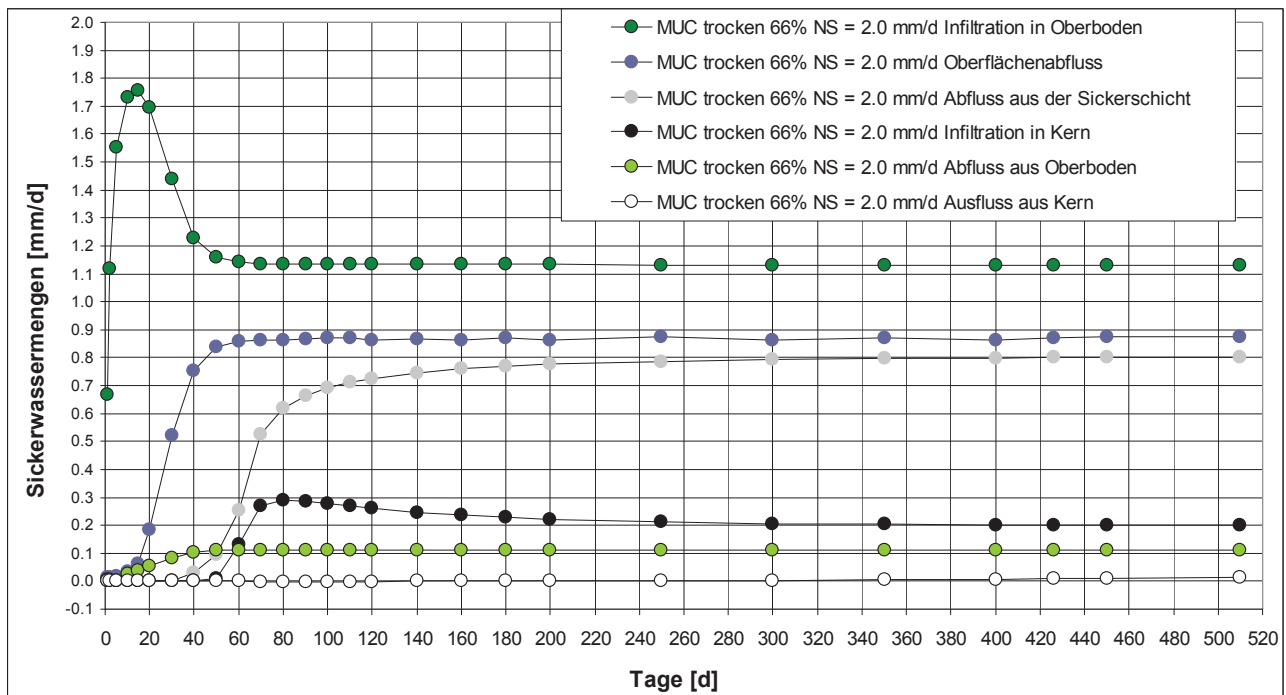


Abbildung 5.14: Sickerwassermengen für die trockene Seite bei einem Niederschlag von 2,0 mm/d

Die Infiltration in den Oberboden nimmt innerhalb der ersten 18 Berechnungstage auf den Maximalwert von 1,76 mm/d zu, um dann auf einen konstanten Wert von 1,13 mm/d abzufallen. Auch die Infiltration in das Kernmaterial nimmt zunächst auf einen Maximalwert von etwa 0,3 mm/d zu, bevor sie einen konstanten Wert von 0,2 mm/d annimmt. Die Kurven für die Abflüsse aus dem Modell nehmen über die Zeit stetig zu und verbleiben bis zum Berechnungsende auf dem Höchstwert. Mit 0,87 mm/d im stationären Zustand fließt ein Großteil des aufgebrachtten Niederschlages als Oberflächenabfluss in der fiktiven Dränschicht ab, wie auch die Strömungslinien in Abbildung 5.16 zeigen. Aus der Sickerschicht treten im stationären Zustand 0,80 mm/d aus. Der Abfluss aus dem Oberboden an der Modellunterseite beträgt 0,11 mm/d. Für die Sickerwassermenge aus dem Kern konnte bis zum Berechnungsende nach 510 Tagen kein stationärer Zustand erreicht werden. Es fließen lediglich 0,01 mm/d aus dem Kernmaterial. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich der Kern – wie die Verteilung des Sättigungsgrades nach 610 Tagen aus Abbildung 5.15 zeigt – noch im Aufsättigungsprozess befindet. Für den stationären Fall ist für den Ausfluss aus dem Kern die gleiche Sickerwassermenge, die in den Kern infiltriert, zu erwarten.



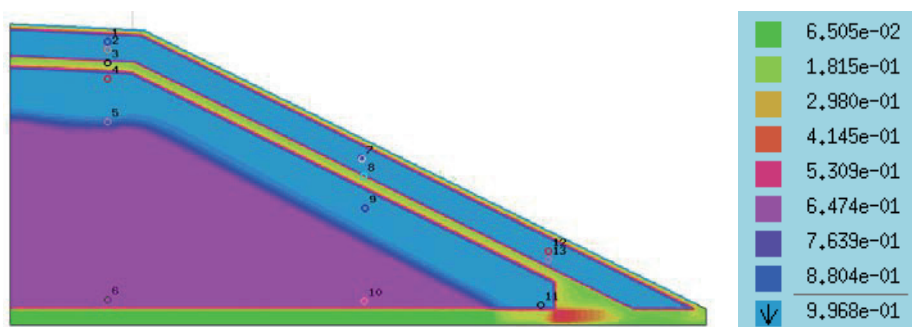


Abbildung 5.15: Verteilung des Sättigungsgrades nach 510 Tagen für die trockene Seite

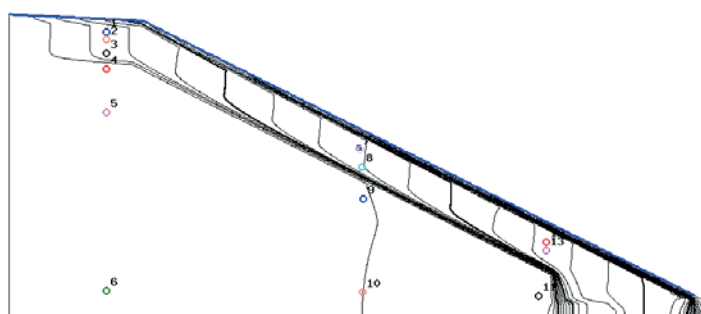


Abbildung 5.16: Strömungslinien nach 510 Tagen für die trockene Seite

In Abbildung 5.17 sind die auf die Länge des Hügels bezogenen Sickerwassermengen im Berechnungsmodell für die nasse Seite dargestellt. Die Ermittlung der Sickerwassermengen erfolgte in gleicher Weise wie für die trockene Seite.

Mit 0,71 mm/d wird im stationären Zustand etwa ein Drittel des angesetzten Niederschlages als Oberflächenabfluss in der fiktiven Dränschicht abgeführt. Der Rest des Niederschlages von 1,29 mm/d infiltriert in den Oberboden. Davon fließt mit 1,04 mm/d ein Großteil in der Sickerschicht ab. 0,09 mm/d dringen in den Kern ein und treten mit Erreichen des stationären Zustandes nach etwa 800 Tagen auch wieder aus dem Kern aus. Im Oberboden wird eine Sickerwassermenge von 0,13 mm/d abgeführt.

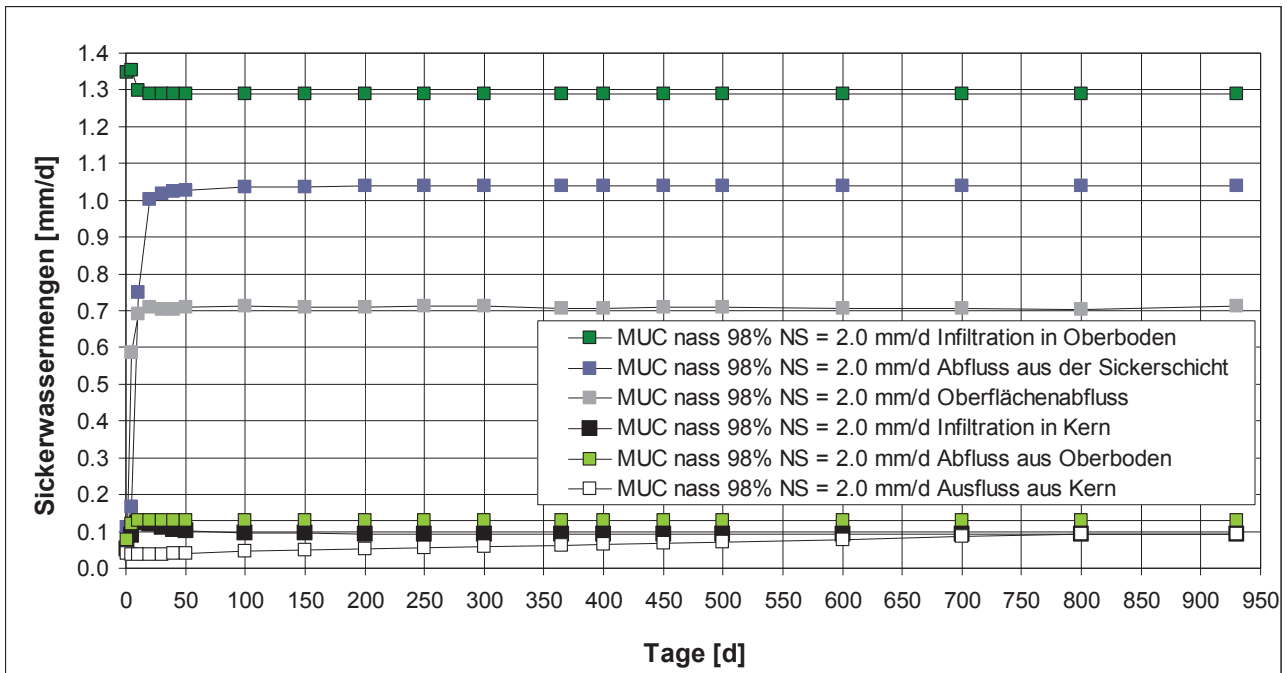


Abbildung 5.17: Sickerwassermengen für die nasse Seite bei einem Niederschlag von 2,0 mm/d

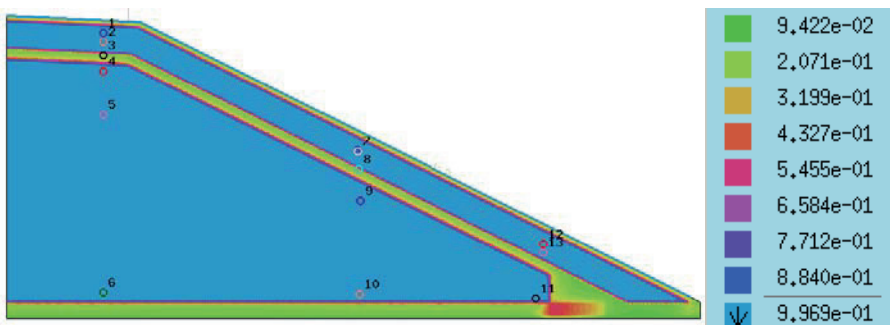


Abbildung 5.18: Verteilung des Sättigungsgrades nach 935 Tagen für die nasse Seite – zeitlich konstanter Niederschlag

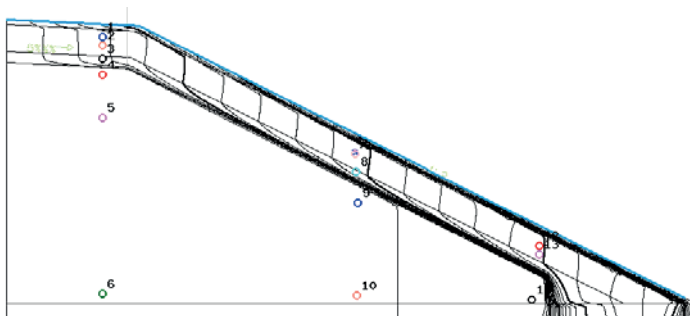


Abbildung 5.19: Strömungslinien nach 935 Tagen für die nasse Seite – zeitlich konstanter Niederschlag

Die Abbildung 5.18 zeigt für den stationären Zustand eine im Kernmaterial homogene Verteilung des Sättigungsgrades von annähernd 100 %. Anhand der Strömungslinien aus Abbildung 5.19 sind Oberflächenabfluss und der Abfluss in der Sickerschicht für den stationären Zustand gut zu erkennen.

#### 5.4.2 Sickerwassermengen unter Berücksichtigung der Evapotranspiration

Für die Berechnungen mit unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen unter Berücksichtigung der Evapotranspiration musste wie bereits in Abschnitt 5.2.2 beschrieben auf die fiktive Dränschicht verzichtet werden, wodurch kein Oberflächenabfluss mehr abgebildet werden konnte. Da vereinfachend angenommen wurde, dass kein Oberflächenabfluss stattfindet, wurde der Durchlässigkeitsbeiwert des Oberbodens wie in Abschnitt 5.3 beschrieben erhöht, um die gesamte Niederschlagsmenge aufnehmen zu können. In Abbildung 5.20 ist die Modellgeometrie für die Berechnungen mit zeitlich variablen Niederschlagsverteilungen dargestellt.

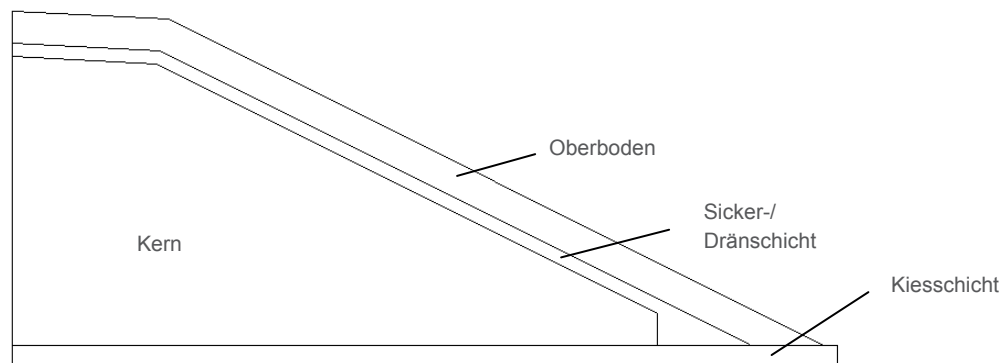


Abbildung 5.20: Modellgeometrie ohne fiktive Dränschicht

##### 5.4.2.1 Durchschnittsniederschlag

Für den Durchschnittsniederschlag wurde der Mittelwert des an der Versuchsschüttung zwischen dem 16.10.2008 und dem 15.5.2010 gemessenen Niederschlages und der für diesen Zeitraum ermittelten Evapotranspiration gebildet. Daraus ergibt sich für die Krone ein durchschnittlicher Niederschlag von 0,84 mm/d und für die Böschung von 0,08 mm/d.

In der Abbildung 5.21 sind die auf die Länge des Hügel bezogenen Sickerwassermengen auf der nassen Seite für den Durchschnittsniederschlag dargestellt. Bis zum Berechnungsende nach 1290 Tagen stellt sich kein stationärer Zustand ein. Die Infiltration in den Kern beträgt am Ende der Berechnung 0,07 mm/d mit fallender Tendenz. Die Ausflussmenge aus dem Kern nimmt bis zum Tag 800 leicht ab, steigt jedoch daraufhin an und erreicht nach 1290 Tagen einen Wert von 0,08 mm/d. Der Sickerwasserabfluss aus der Sickerschicht fällt kurz nach Berechnungsbeginn stark ab, um dann wieder rasch auf einen relativ konstanten Wert von 0,16 mm/d anzusteigen. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass der Oberboden infolge des aufgebrachtten Niederschlages relativ langsam aufsättigt und dadurch erst nach einigen Tagen Sickerwasser in der Dränschicht ankommt und abgeführt werden kann. Innerhalb des Oberbodens wird die über die Zeit konstante Sickerwassermenge von 0,015 mm/d abgeleitet.

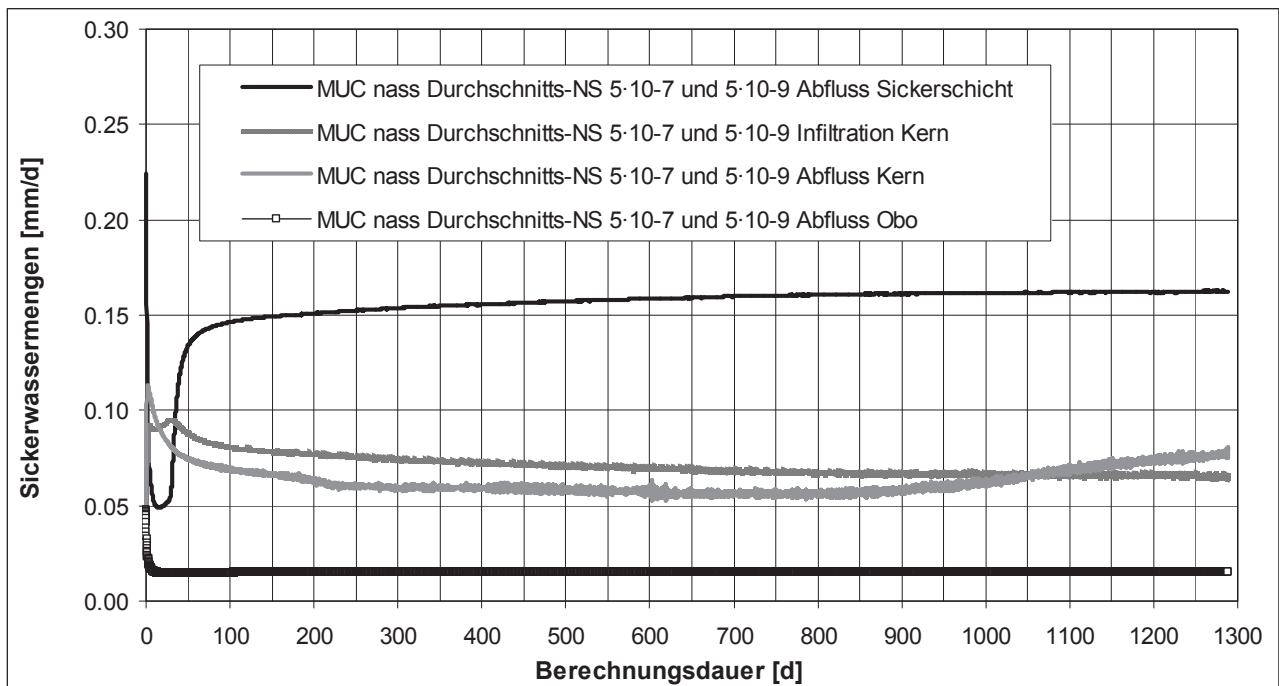


Abbildung 5.21: Sickerwassermengen für die nasse Seite – Durchschnittsniederschlag

In der Abbildung 5.22 sind die auf die Länge des Hügels bezogenen Sickerwassermengen für den Durchschnittsniederschlag auf der trockenen Seite dargestellt. Bis zum Zeitpunkt des Berechnungsendes nach 602 Tagen stellt sich kein stationärer Zustand im Modell ein. Die Infiltration in das Kernmaterial beginnt nach etwa 50 Berechnungstagen und steigt stetig auf einen Wert von 0,15 mm/d. Das mit einem Anfangssättigungsgrad von 66 % relativ trockene Kernmaterial nimmt also zunächst das aus dem Oberboden anfallende Sickerwasser vollständig auf und sättigt dabei nach und nach auf. Erst nach 400 Tagen kommt es zu einem Sickerwassertransport in der Dränschicht. Zum selben Zeitpunkt setzt auch ein geringer Sickerwasseraustritt aus dem Oberbodenmaterial ein. Ein Sickerwasserausfluss aus dem Kernmaterial ist nicht zu beobachten, sondern es findet sogar eine geringe Wasseraufnahme durch das Kernmaterial über das Kiesplanum statt.

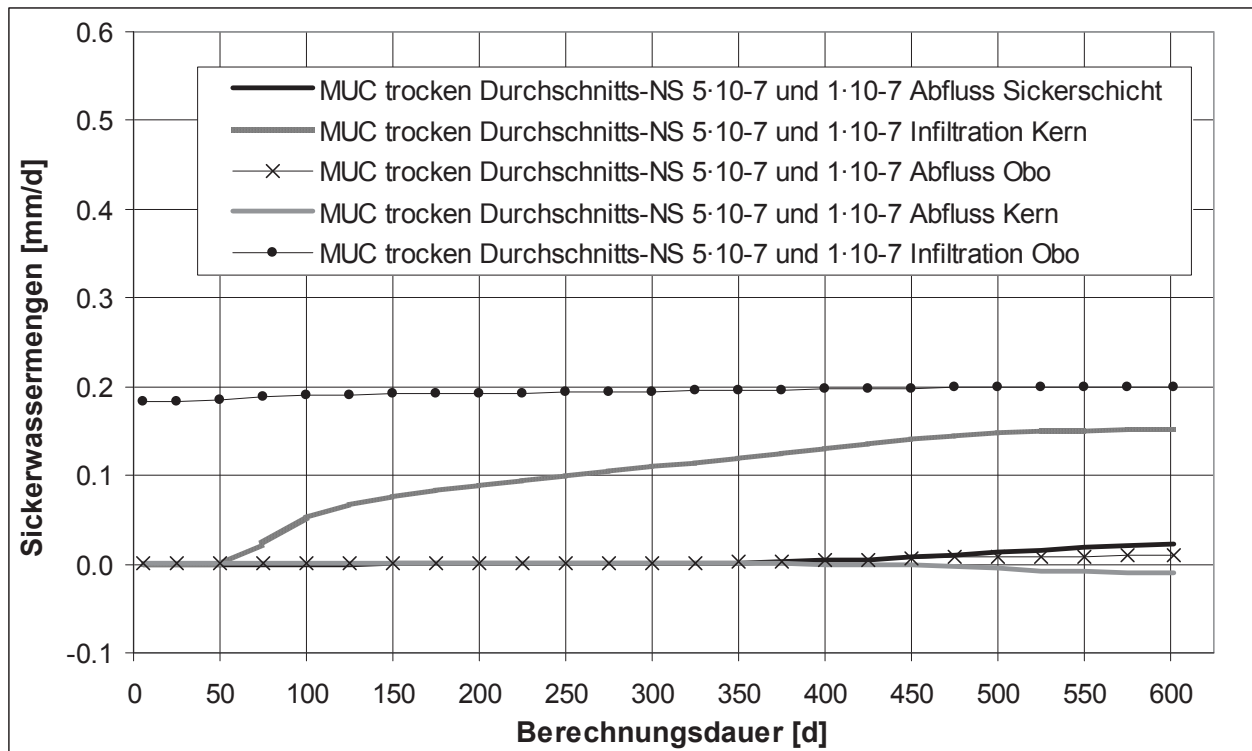


Abbildung 5.22: Sickerwassermengen für die trockene Seite – Durchschnittsniederschlag

#### 5.4.2.2 Monatsniederschlag

Im nächsten Schritt wurden die an der Versuchsschüttung im Zeitraum vom 16.10.2008 bis zum 15.05.2010 gemessenen Niederschläge unter Berücksichtigung der für diesen Zeitraum abgeschätzten Evapotranspiration über die einzelnen Monate gemittelt. Wie aus der Abbildung 5.23 ersichtlich wird, ergeben sich vereinzelt Monate mit stärkerem Niederschlag und auch Monate, in denen nur eine Wasserabgabe durch Evapotranspiration stattfindet.

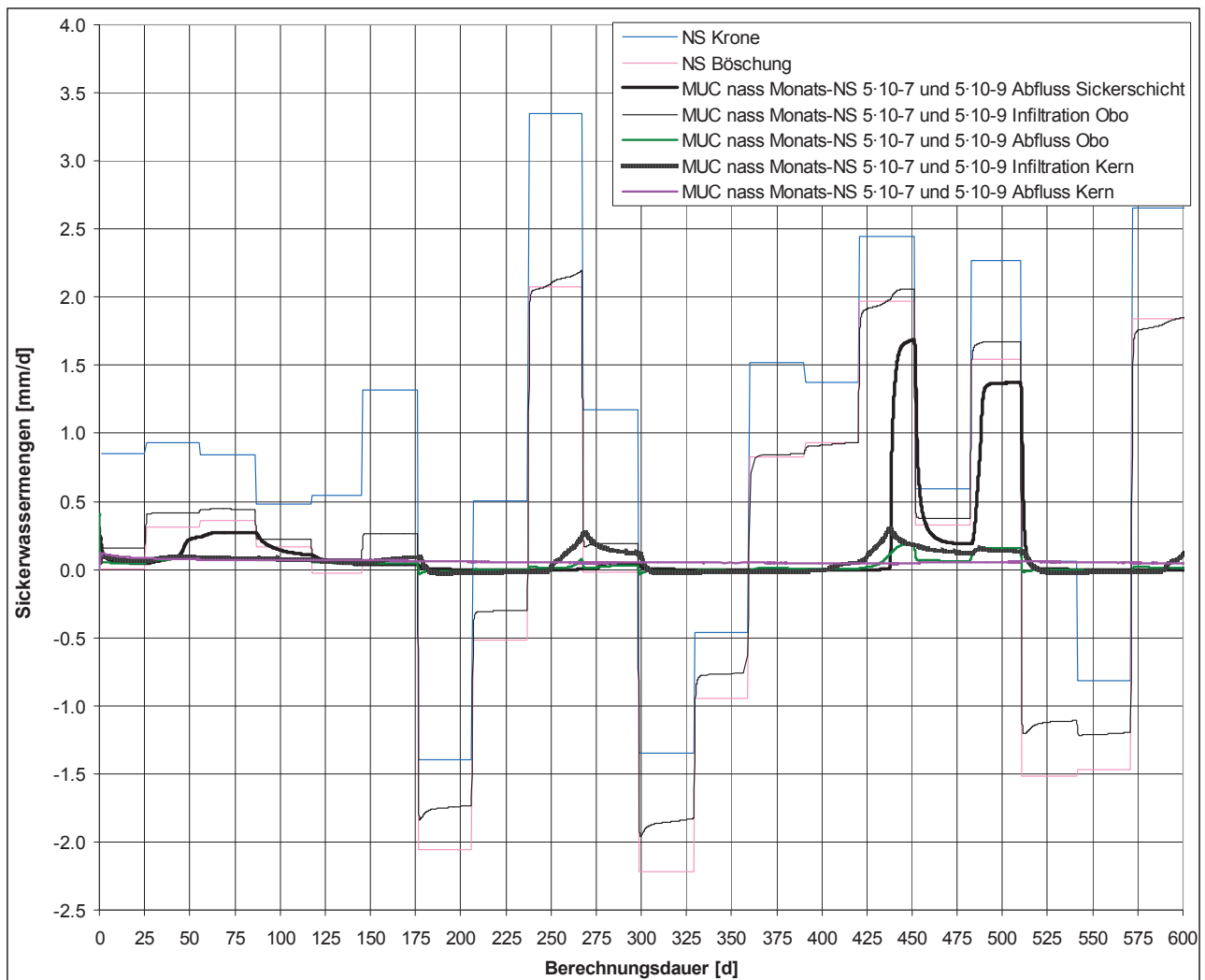


Abbildung 5.23: Sickerwassermengen für die nasse Seite – Monatsniederschlag

Der Abfluss aus der Sickerschicht und dem Oberboden sowie die Infiltration in den Kern stehen in einer direkten Abhängigkeit zur Niederschlagsmenge, wie die Verläufe der rechnerisch ermittelten Sickerwassermengen aus Abbildung 5.23 zeigen. Der Sickerwasseraustritt aus dem Kern hingegen verläuft weitestgehend unabhängig vom Niederschlag. Er nimmt über die Berechnungszeit von 602 Tagen langsam ab und beträgt beim Berechnungsende 0,05 mm/d.

In Abbildung 5.24 ist der Sättigungsgrad in Abhängigkeit von der Zeit für observation points aus dem Oberboden und dem Kern dargestellt. Die observation points 1 und 11 liegen im Oberboden, die observation points 16 und 18 im Kernmaterial wenige Zentimeter unterhalb der Dränschicht und der observation point 3 liegt im Zentrum des Kerns. Die exakte Lage aller untersuchten observation points ist in der Abbildung 5.11 dargestellt.

In Abbildung 5.23 sind drei Phasen mit erhöhtem Sickerwasseraustritt aus der Dränschicht zu erkennen; nach etwa 75, 450 und 500 Tagen. Zu diesen Zeitpunkten ist, wie der Sättigungsverlauf für die observation points 1 und 11 aus Abbildung 5.24 zeigt, der Oberboden aufgesättigt und wird daher infolge des Niederschlages durchsickert. Dieses Sickerwasser wird teilweise direkt im Ober-



boden bis zum Dammfuß abgeführt und infiltriert teilweise in die Dränschicht. Von dort wird es zum Großteil als Schichtwasser in der Dränschicht abgeführt und nur ein geringer Teil infiltriert in den Kern.

In Monaten, in denen die Verdunstung größer als der Niederschlag ist, sinkt der Sättigungsgrad des Oberbodens signifikant wie die Abbildung 5.24 zeigt. Nach 300 Tagen beispielsweise liegt der Sättigungsgrad an den observation points 1 und 11 bei etwa 98,5 % bzw. 96 %. Dieser sinkt nach zwei Monaten, in denen die Evapotranspiration den Niederschlag übersteigt, auf 79 % bzw. 67 %. Der daraufhin auftretende Niederschlag wird nun vollständig vom Oberboden aufgenommen bis dieser aufgesättigt ist. Erst dann tritt eine Sickerwasserabgabe aus dem Oberboden in die Dränschicht ein. Dies trifft wie die Abbildung 5.23 zeigt für den vorliegenden Fall nach 75 Tagen (Berechnungstag 433) zu. Auch der Sättigungsgrad des Kernmaterials nahe der Dränschicht ist abhängig von der Niederschlagsverteilung. In Monaten überwiegender Verdunstung nimmt der Sättigungsgrad von 100 % auf bis zu 97,5 % ab.

Für den observation point 3, der im Kern etwa 1,5 m unterhalb der Sickerschicht liegt, sind keine unmittelbaren Veränderungen des Sättigungsgrades infolge der Niederschlagsverteilung zu erkennen. Allerdings beginnt der Sättigungsgrad nach 475 Berechnungstagen von 98 % auf 99,5 % aufgrund der Infiltration von Sickerwasser in das Kernmaterial anzusteigen.

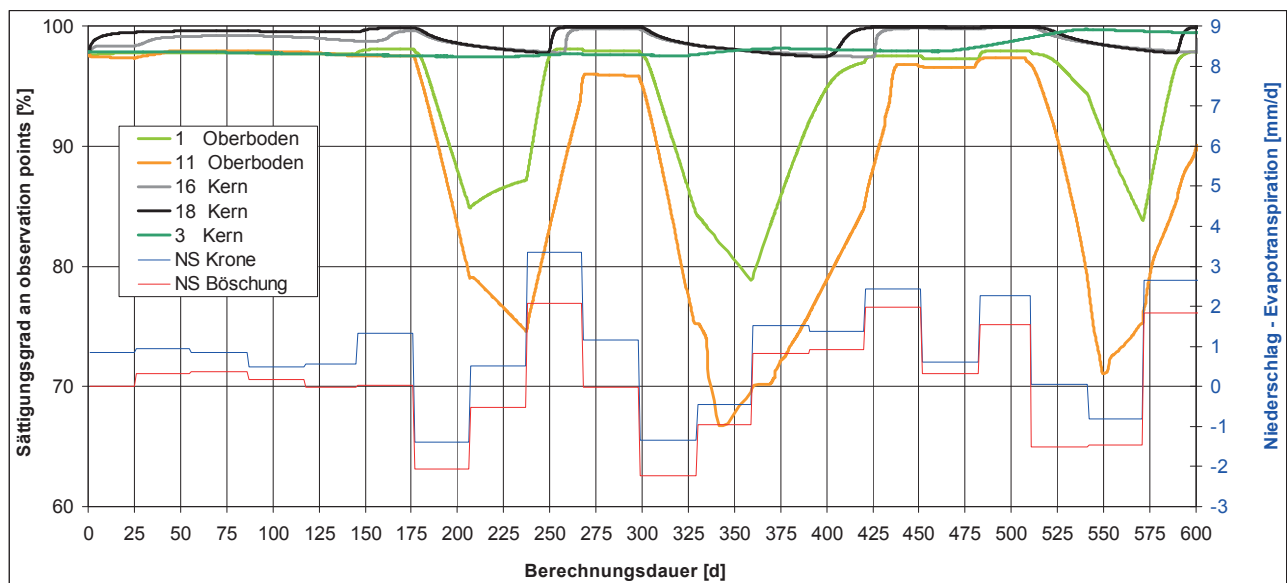


Abbildung 5.24: Sättigungsgrad an den observation points 1, 3, 11, 16 und 18 für die nasse Seite – Monatsniederschlag

Die Abbildung 5.25 stellt die bei Ansatz von Monatswerten für den Niederschlag und die Evapotranspiration für die trockene Seite ermittelten Sickerwassermengen dar. Wie daraus hervorgeht, stehen der Abfluss aus der Sickerschicht und der Abfluss aus dem Oberboden sowie die Infiltration in den Kern in einer direkten Abhängigkeit zur Niederschlagsmenge. Ein Sickerwasserabfluss aus dem Kern findet über die gesamte Berechnungszeit von 600 Tagen nicht statt. Im Vergleich zur Berechnung für die nasse Seite infiltriert insgesamt eine größere Sickerwassermenge in das Kernmaterial und der Abfluss in der Dränschicht ist geringer.

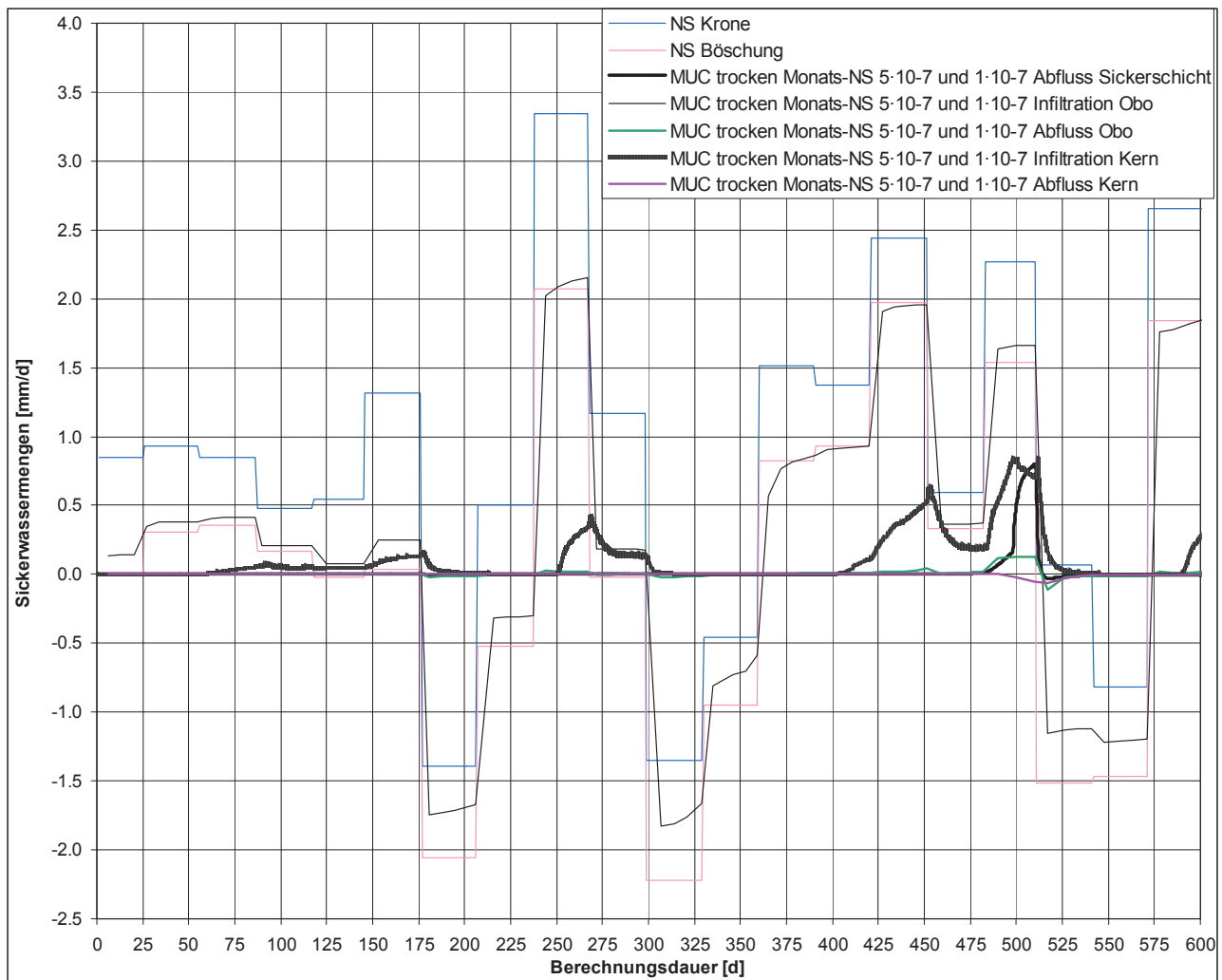


Abbildung 5.25: Sickerwassermengen für die trockene Seite – Monatsniederschlag

Wie der zeitliche Verlauf des Sättigungsgrades an den observation points im Kern 16, 18 und 3 aus der Abbildung 5.26 zeigt, ist der Anfangssättigungsgrad an allen drei Punkten mit 66 % relativ gering. Das heißt, die Saugspannungen im Boden sind im Vergleich zur nassen Seiten höher und damit auch die Infiltration von Sickerwasser in den Kern. Infolge des Niederschlages steigt zunächst der Sättigungsgrad des im Kronenbereich liegenden observation point 18 an. Die Aufsättigung am observation point 16, der in der Böschung liegt, setzt zeitverzögert ein. Ursache hierfür ist die im Böschungsbereich erhöhte Verdunstung und die damit einhergehende geringere Infiltration. Am observation point 3 ist über die gesamte Berechnungsdauer keine Veränderung des Sättigungsgrades zu beobachten. Das in den Kern infiltrierte Sickerwasser ist demnach bis zum Berechnungsende noch nicht bis zur Position des observation points 3 eingedrungen.

Ein Abfluss von Sickerwasser in der Dränschicht ist lediglich nach etwa 500 Berechnungstagen zu verzeichnen. Zu diesem Zeitpunkt sind Oberboden und Kernmaterial wie die Abbildung 5.26 zeigt beinahe vollständig aufgesättigt und können das aus Niederschlägen anfallende Sickerwasser nicht mehr aufnehmen und es kommt zu einem Abfluss in der Dränschicht.

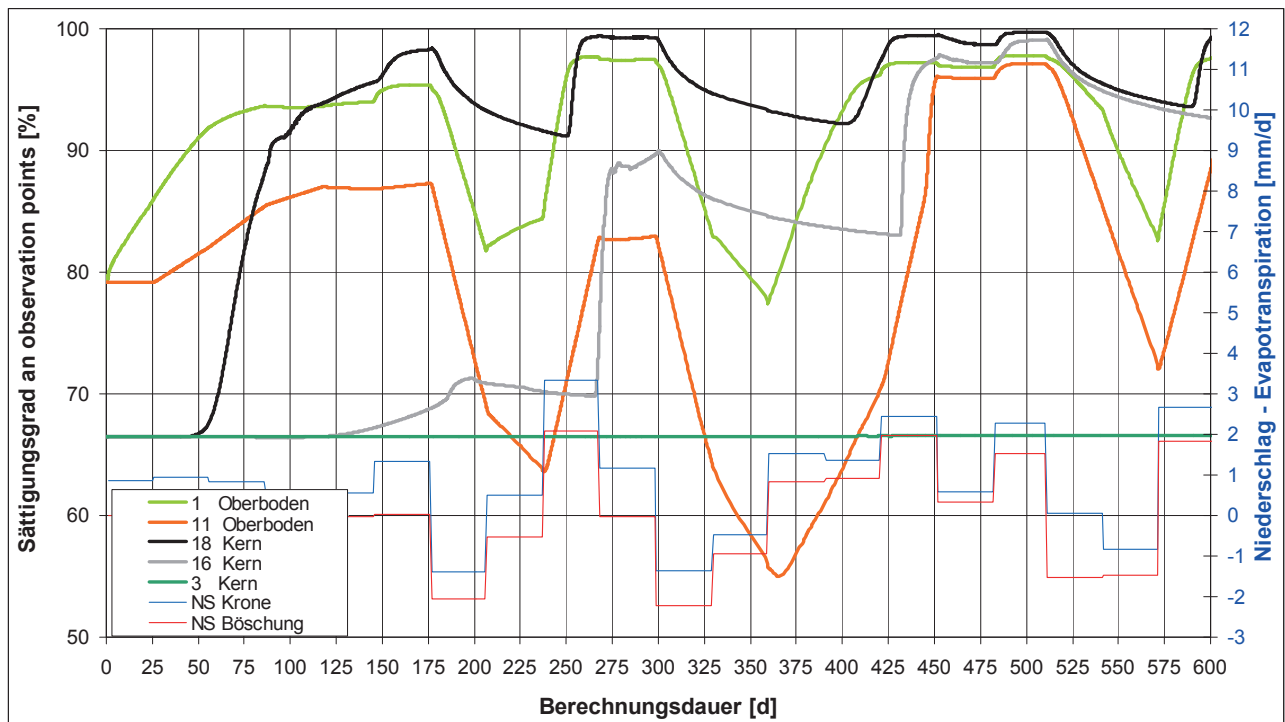


Abbildung 5.26: Sättigungsgrad an den observation points 1, 3, 11, 16 und 18 für die trockene Seite – Monatsniederschlag

### 5.4.2.3 Wochenniederschlag

Für die folgenden Berechnungen wurde als Randbedingung der am Flughafen München gemessene Niederschlag unter Berücksichtigung der Evapotranspiration über die einzelnen Wochen gemittelt. Auffallend ist dabei der sich über eine Woche erstreckende Niederschlag von knapp 13 mm/d nach etwa 260 Berechnungstagen (siehe Abbildung 5.27).

Wie bereits bei den Berechnungen mit Monatsniederschlägen beobachtet lässt sich aus der Abbildung 5.27 für die nasse Seite erkennen, dass sich eine Infiltration in das Kernmaterial und die Abflüsse aus der Dränschicht und dem Oberboden in Abhängigkeit von der Niederschlagsverteilung und –intensität einstellen. Der Sickerwasseraustritt aus dem Kern hingegen nimmt unabhängig vom Niederschlagsereignis über die gesamte Berechnungszeit von 602 Tagen von anfänglich 0,11 mm/d auf 0,05 mm/d ab. Zwischen dem Sickerwasserabfluss in der Dränschicht und dem Sättigungsgrad von Oberboden und Kernmaterial besteht wiederum eine Korrelation. So kommt es nur dann zu einem Abfluss in der Sickerschicht infolge des versickernden Niederschlages, wenn der Oberboden und das oberflächennahe Kernmaterial wassergesättigt sind. Dies ist gut anhand des in der Abbildung 5.28 dargestellten Sättigungsgrades in Abhängigkeit von der Zeit an observation points im Oberboden und im Kern zu erkennen. Aufgrund der Phasen, in denen die Verdunstung überwiegt, sinkt der Sättigungsgrad an den im Oberboden liegenden observation points 11 und 1 auf bis zu 54 % bzw. 74 %. Im Bereich der Böschung ist dabei der Einfluss der Strahlung stärker und damit auch die Evapotranspiration. Daher kommt es am observation point 11 in Verdunstungsphasen zu einer stärkeren Verringerung des Sättigungsgrades als am observation point 1. Auch an den oberflächennah im Kernmaterial gelegenen observation points 16 und 18 ist eine Veränderung

des Sättigungsgrades infolge des Niederschlagsereignisses zu erkennen. Der Sättigungsgrad sinkt beispielsweise in der Verdunstungsphase vom Berechnungstag 293 bis 391 von 100 % auf 97 %.

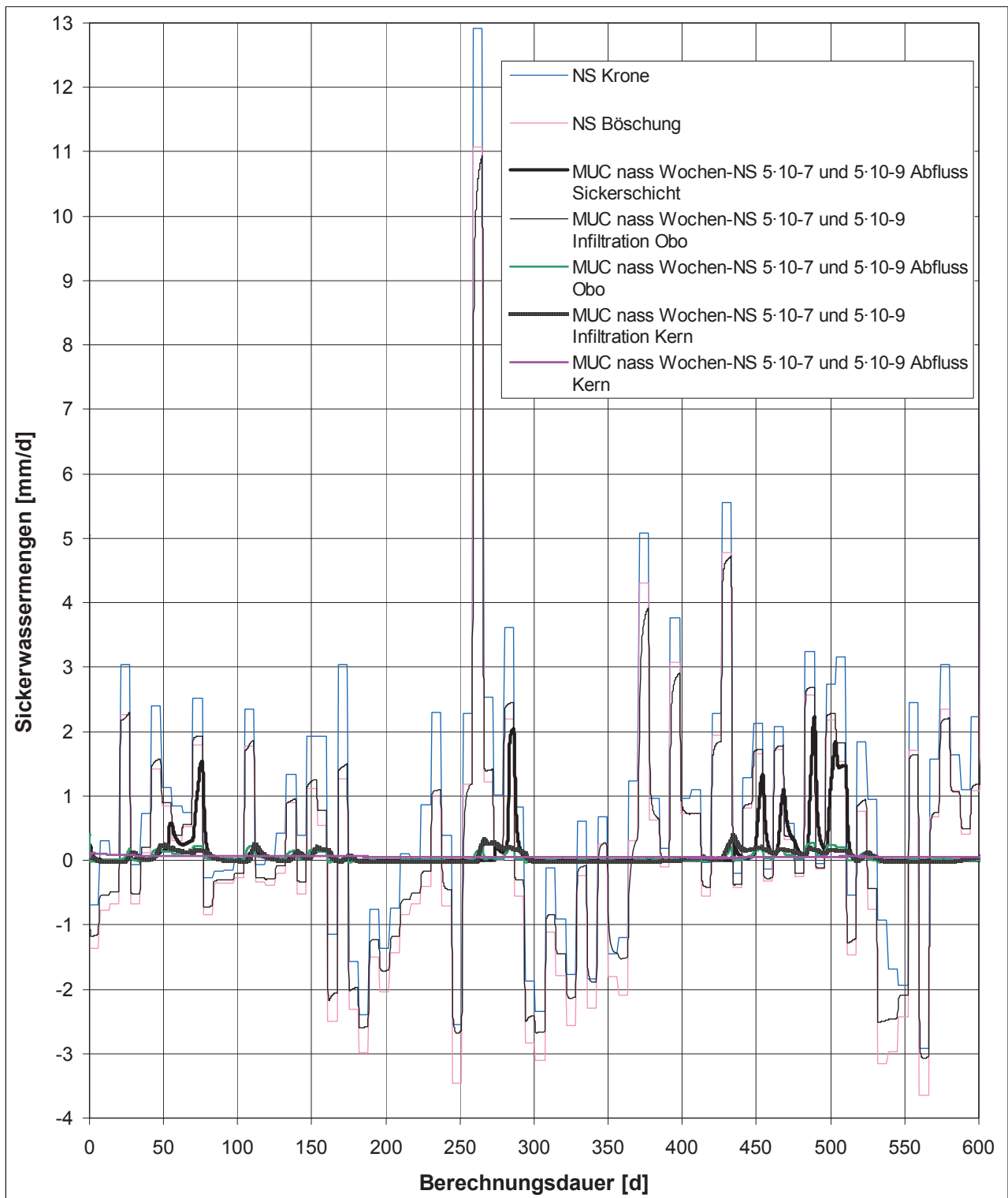


Abbildung 5.27: Sickerwassermengen für die nasse Seite – Wochenniederschlag

Am innerhalb des Kerns liegenden observation point 3 ist zunächst keine Veränderung des Sättigungsgrades auszumachen. Erst nach etwa 480 Tagen nimmt der Sättigungsgrad von den anfänglichen 98 % auf 99 % als Folge von Sickerwasserzutritt zu.

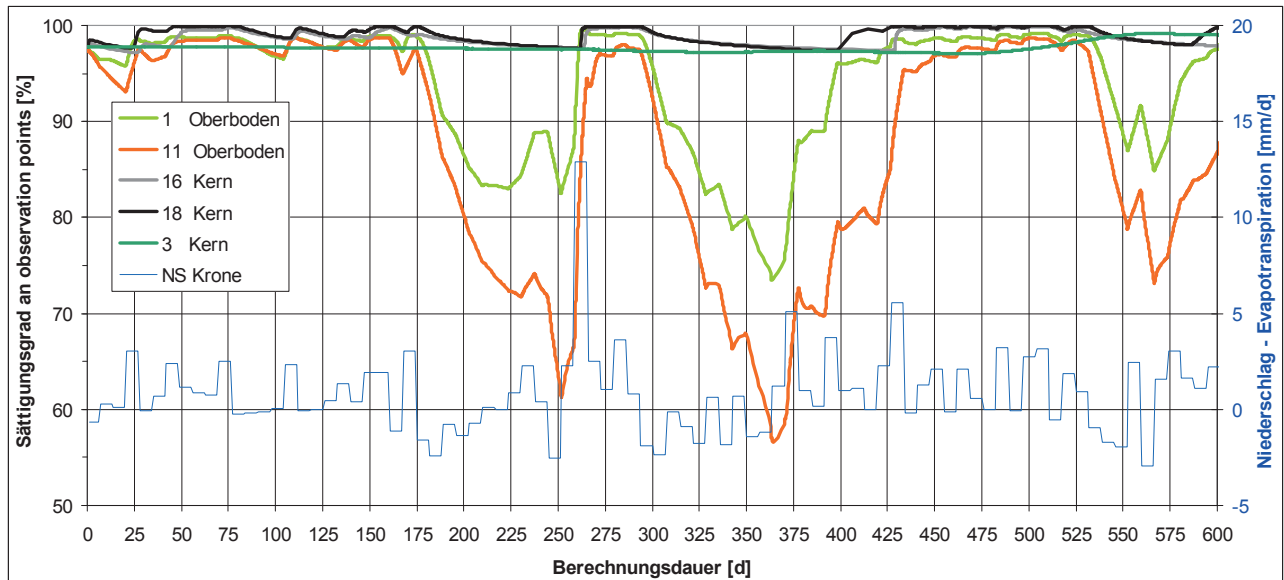


Abbildung 5.28: Sättigungsgrad an den observation points 1, 3, 11, 16 und 18 für die nasse Seite – Wochenniederschlag

In der Abbildung 5.29 sind die Sickerwassermengen in Abhängigkeit von der Zeit aus der Berechnung mit Wochenniederschlägen für die trockene Seite dargestellt. Im Vergleich zur Berechnung für die nasse Seite findet insgesamt eine größere Infiltration in das Kernmaterial statt. Dies liegt am vergleichsweise geringeren Anfangssättigungsgrad des Kernmaterials von 66 % und der damit einhergehenden größeren Saugspannungen. Ein Sickerwasserausfluss aus der Dränschicht findet nur einmalig nach 506 Tagen statt.

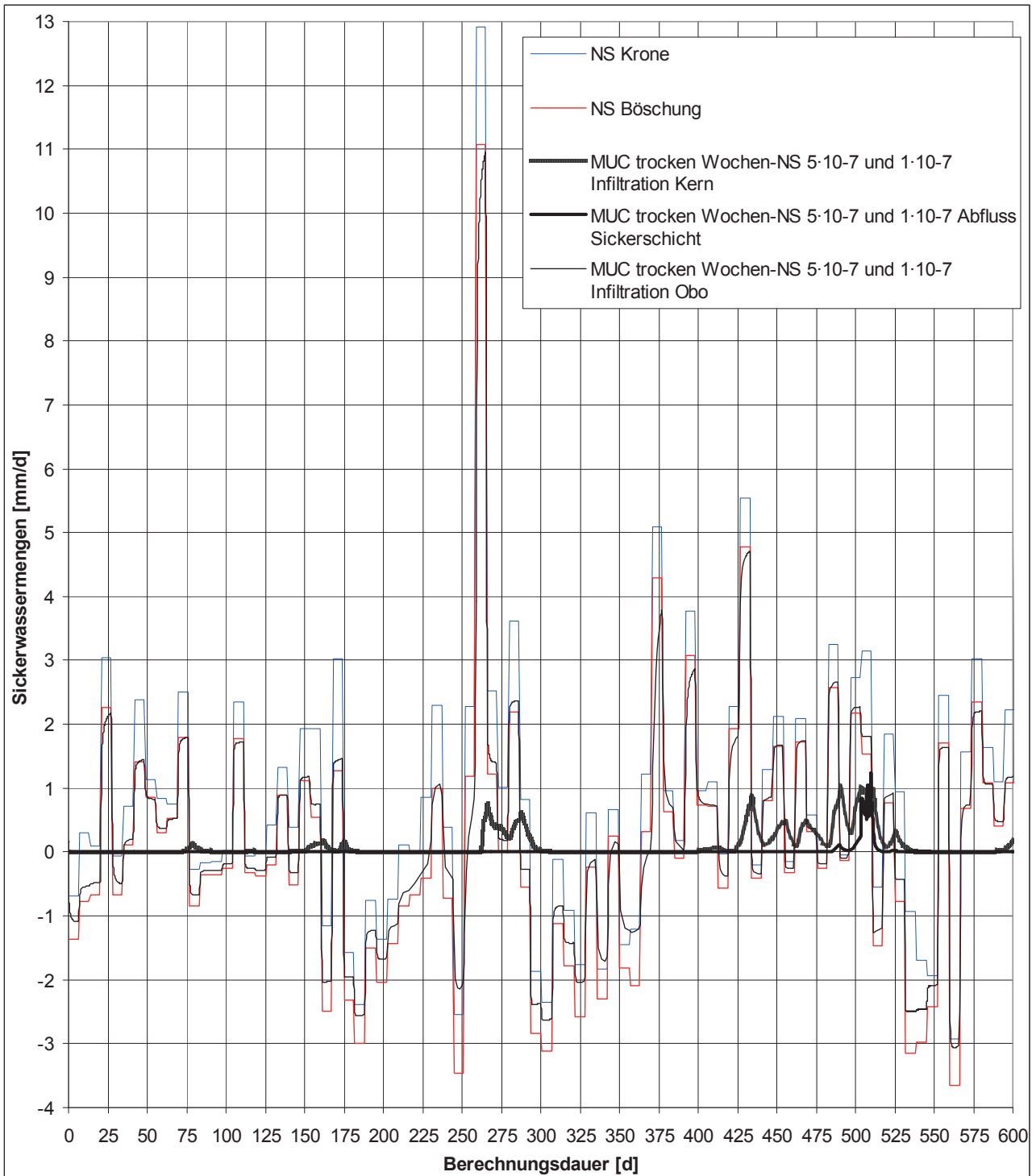


Abbildung 5.29: Sickerwassermengen für die trockene Seite – Wochenniederschlag

#### 5.4.2.4 Tagesniederschlag

Im Zuge der Durchführung von Berechnungen mit unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen wurden auch so genannte Tagesniederschläge angesetzt. Dabei handelt es sich um den über 24 Stunden gemittelten Niederschlag, der an der Klimastation an der Versuchsschüttung halbstündlich



aufgezeichnet wurde, abzüglich der rechnerisch ermittelten Verdunstung. Der maximale Niederschlag tritt am Tag 260 mit 41 mm/d auf.

Die Abbildung 5.30 enthält zum einen den für die Berechnung zugrunde gelegten Niederschlag für den Kern und die Böschung und zum anderen die für eine Berechnungsdauer von 600 erzielten Ergebnisse. Dazu sind der Sickerwasserausfluss aus der Dränmatte sowie die in den Kern infiltrierenden und aus dem Kern austretenden Sickerwassermengen im zeitlichen Verlauf dargestellt. Der zeitliche Verlauf des Sättigungsgrades an den im Kernmaterial gelegenen observation points 16 und 18 geht aus der Abbildung 5.31 hervor.

Wie der Verlauf des Sättigungsgrades an den im Oberboden gelegenen observation points 1 und 11 aus Abbildung 5.31 zeigt, gibt es erwartungsgemäß einen direkten Zusammenhang zwischen der Infiltrations- bzw. Verdunstungsrate und dem Sättigungsgrad des Oberbodens. In Phasen, in denen hauptsächlich Verdunstung vorherrscht, verringert sich der Sättigungsgrad im Oberboden markant. Beispielsweise nimmt der Sättigungsgrad am observation point 11 zwischen den Berechnungstagen 291 und 371 von 99,4 % auf 64,0 % ab. Der während oder nach einer Phase, in der vornehmlich Verdunstung vorherrscht, auftretende Niederschlag wird zunächst vollständig vom Oberboden aufgenommen. Erst wenn dieser weitgehend wassergesättigt ist, wird der Oberboden durchsickert und als Folge daraus kann es je nach Sättigungsgrad des Kernmaterials zu einer Infiltration in den Kern und/oder einem Abfluss in der Sickerschicht kommen (siehe Abbildung 5.30).

Am Berechnungstag 505 wird eine maximale Sickerwassermenge von 14,4 mm/d in der Drän-schicht abgeführt. Die Infiltration in den Kern erreicht nach 285 Tagen einen Maximalwert von 0,48 mm/d. In Phasen, in denen die Evapotranspiration überwiegt, kommt es zu einer leichten Verdunstung aus dem Kernmaterial.

Der in Abbildung 5.30 dargestellte Sickerwasseraustritt aus dem Kern verhält sich weitestgehend unabhängig von der Niederschlagsverteilung und nimmt über die Berechnungszeit von 602 Tagen von 0,11 mm/d auf 0,045 mm/d ab.

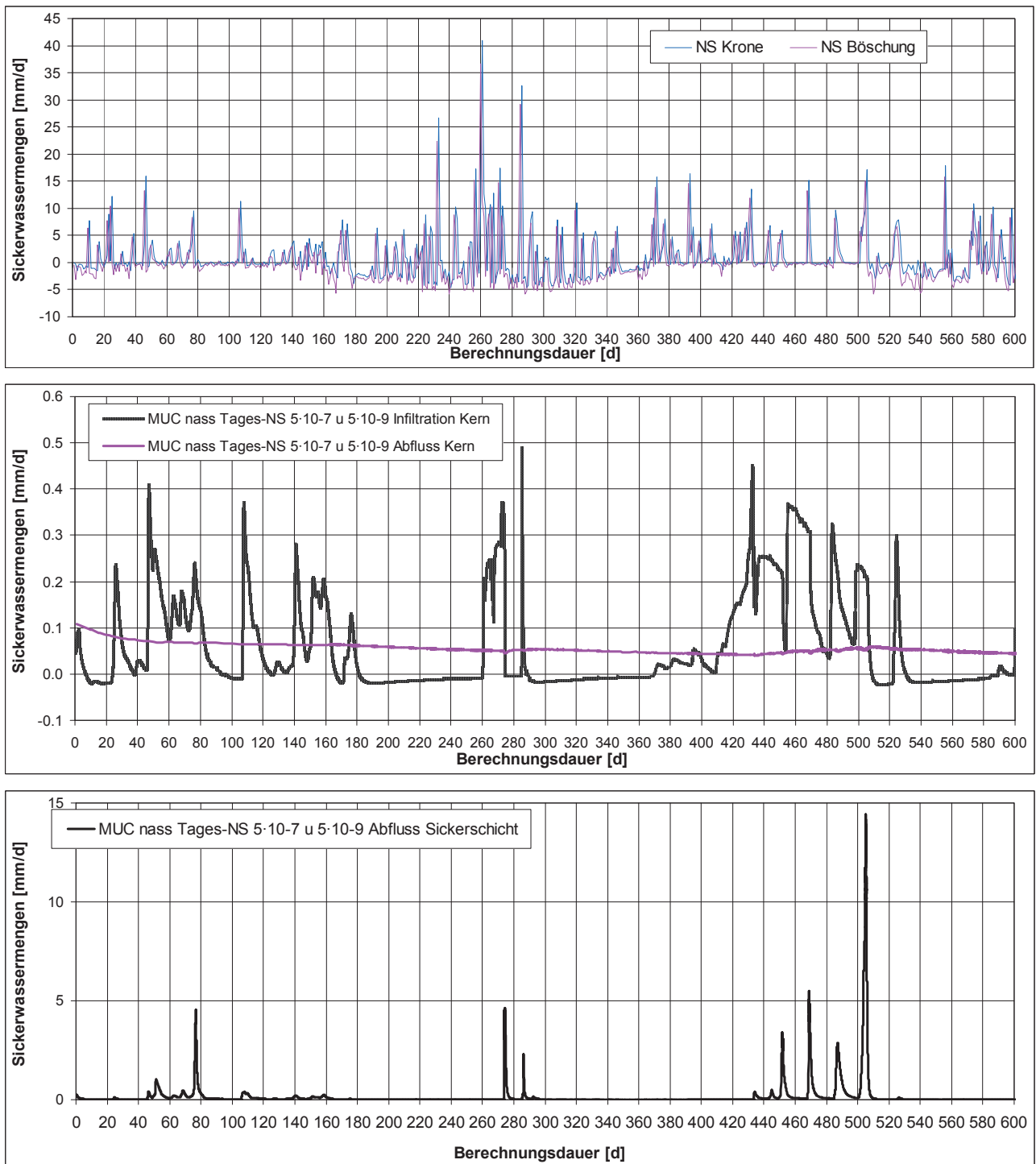


Abbildung 5.30: Berechnungsergebnisse für die nasse Seite – Tagesniederschlag

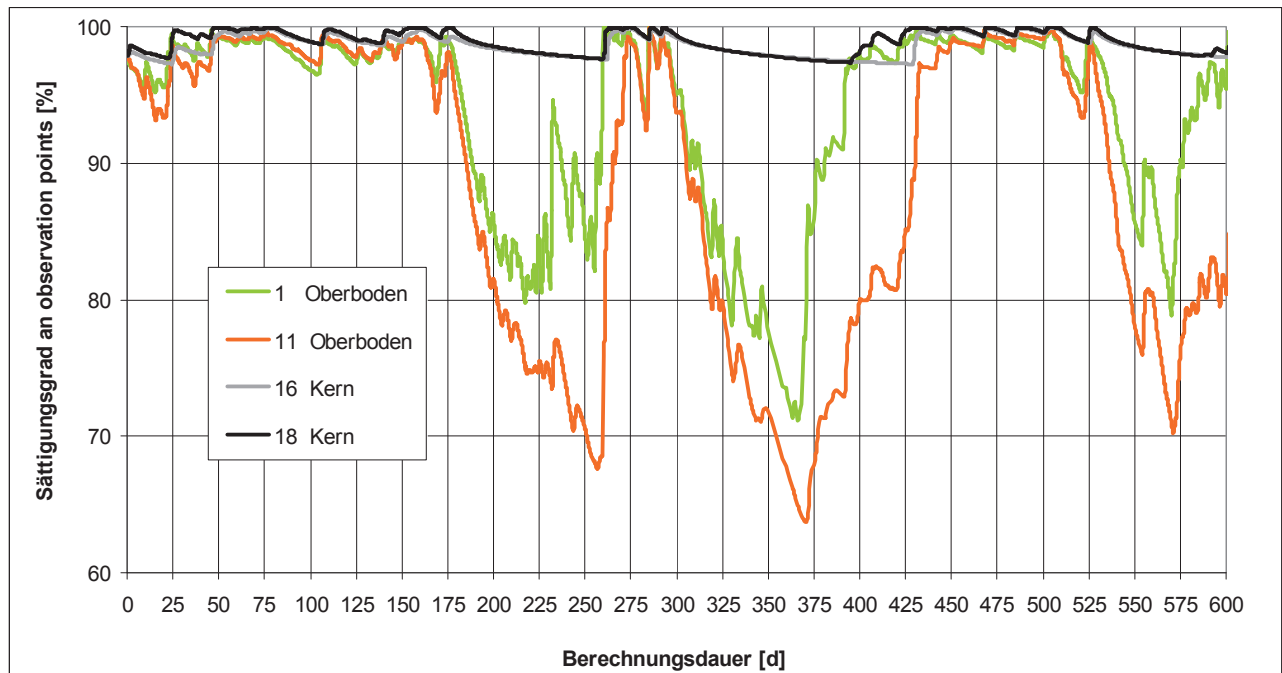


Abbildung 5.31: Sättigungsgrad an den observation points 1, 11, 16 und 18 für die nasse Seite – Tagesniederschlag

Um die Auswirkungen des Durchlässigkeitsbeiwertes des Kernmaterials auf den Wasserhaushalt zu untersuchen, wurde eine Berechnung für die nasse Seite durchgeführt, bei der der  $k$ -Wert des Kernbodens von ursprünglich  $k = 5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$  auf  $k = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$  verringert wurde. Die sich bei dieser Berechnung ergebenden Sickerwassermengen sind in der Abbildung 5.32 dargestellt. Der zeitliche Verlauf der in den Kern einströmenden und aus dem Kern ausfließenden Sickerwassermengen und des aus der Sickerschicht abfließenden Sickerwassers stellt sich sehr ähnlich dar wie bei der Berechnung mit einem  $k$ -Wert von  $5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ . Hinsichtlich der Quantität der ein- und ausströmenden Sickerwassermengen dagegen sind aber deutliche Unterschiede erkennbar. So dringt im Vergleich zur Berechnung mit einem  $k$ -Wert von  $5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$  über die gesamte Berechnungsdauer deutlich weniger Wasser in den Kern ein und fließt deutlich weniger Wasser aus dem Kern aus. Akkumuliert man die aus der Sickerschicht ausfließenden Wassermengen ist zu erkennen, dass infolge des reduzierten Durchlässigkeitsbeiwertes des Kernmaterials aber mehr Sickerwasser in der Sickerschicht abgeführt wird (siehe Abbildung 5.37).

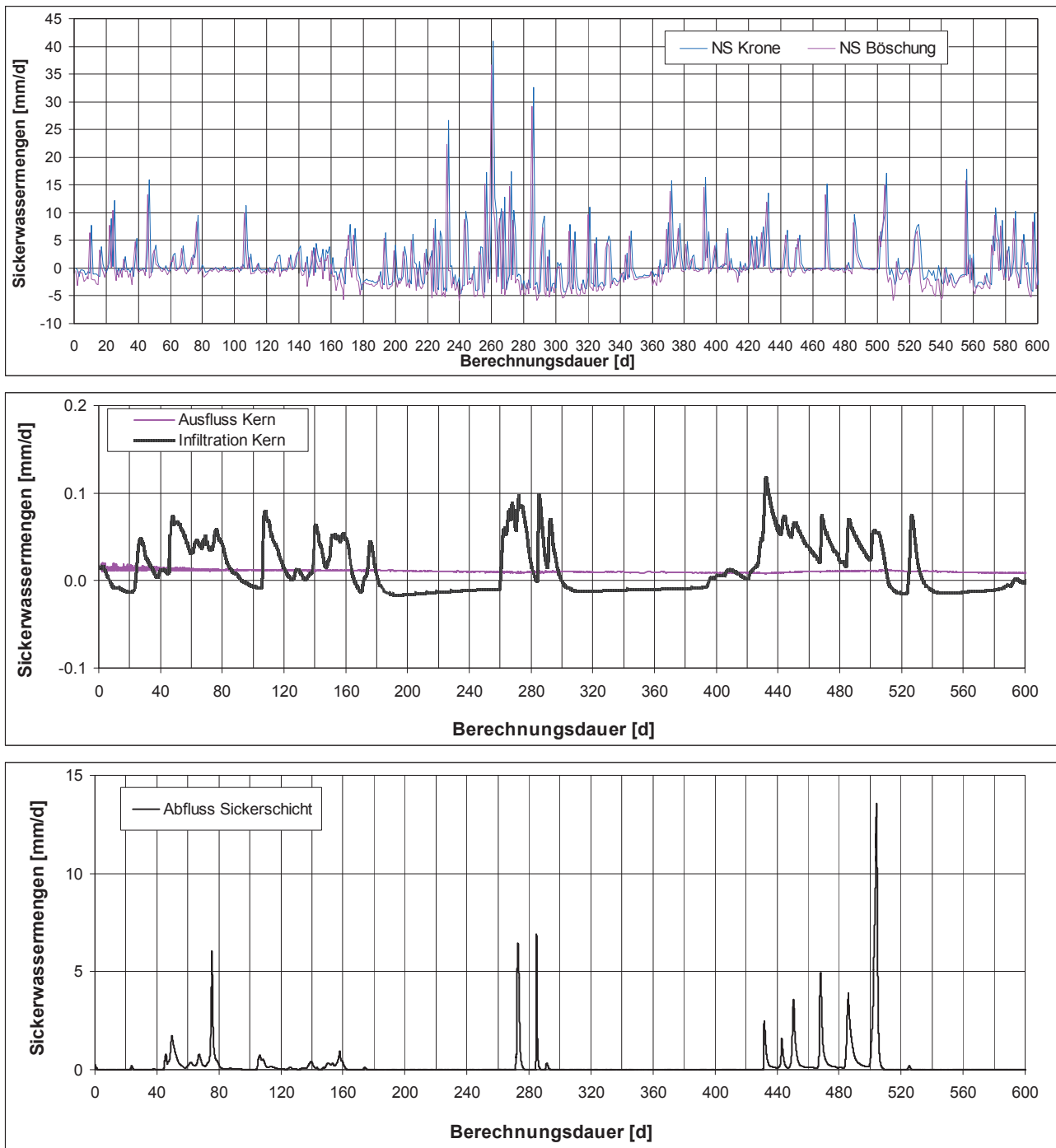


Abbildung 5.32: Berechnungsergebnisse (Tagesniederschlag) für die nasse Seite bei einem k-Wert des Kernmaterials von  $1 \cdot 10^{-9}$  m/s

In der Abbildung 5.33 sind die Sickerwasserverläufe für die trockene Seite in Abhängigkeit vom Tagesniederschlag über eine Berechnungsdauer von 600 Tagen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine Infiltration in den Kernboden in signifikanter Größenordnung erstmalig nach ca. 260 Tagen und ein Sickerwasserabfluss in der Dränmatte einmalig nach 508 Tagen statt findet. Dies beruht auf den Eigenschaften des Oberbodens, der das versickernde Niederschlagswasser zunächst speichert. Erst wenn der Oberboden fast vollständig gesättigt ist, kommt es zu einer Sickerwasser-

abgabe aus dem Oberboden in die Dränschicht. Dieses Sickerwasser wird jedoch fast vollständig vom relativ trockenen Kernmaterial aufgenommen. Einzige Ausnahme ist der Sickerwasserabfluss in der Dränmatte nach 508 Tagen. Zu diesem Zeitpunkt ist das Kernmaterial nahe der Dränschicht fast vollständig wassergesättigt, wie der Sättigungsgrad an den observation points 16 und 18 in Abbildung 5.34 zeigt. Das Kernmaterial kann dadurch das infolge des starken Niederschlagsereignisses infiltrierende Sickerwasser nicht mehr vollständig aufnehmen und es kommt zum Abfluss in der Dränschicht. Bis zu diesem Zeitpunkt sättigt das mit einem Anfangssättigungsgrad von 66 % relativ trockene Kernmaterial infolge des aus der Dränschicht aufgenommenen Sickerwassers nach und nach auf. Unterhalb der Krone ist der Kernboden nahe der Dränschicht bereits nach 269 Tagen fast vollständig wassergesättigt (siehe observation point 18). Damit nimmt die Wasseraufnahme durch den Kernboden ab und zusätzlich anfallender Niederschlag wird im Kronenbereich überwiegend in der Dränschicht abgeführt. Dies wird auch aus dem Strömungsbild in Abbildung 5.35 deutlich. Allerdings fließt das Sickerwasser in der Dränschicht nicht bis zum Böschungsfuß, sondern infiltriert im Bereich der Böschung in das Kernmaterial. Dies beruht auf dem in diesem Bereich geringeren Sättigungsgrad des Kernmaterials und der daraus resultierenden Saugspannungen. Aus der Verteilung des Sättigungsgrades in Abbildung 5.35 ist der im Kronenbereich und im oberen Böschungsbereich nahe der Dränmatte größere Sättigungsgrad des Kernmaterials deutlich zu erkennen. Da sich im Kronenbereich aufgrund der geringeren Neigung eine geringere Evapotranspiration im Vergleich zum Böschungsbereich einstellt, sättigt der Oberboden dort im Zuge von Niederschlagsereignissen schneller auf; dies wird auch aus einem Vergleich der in Abbildung 5.34 dargestellten observation points 1 und 11 deutlich. So zeigt der im Kronenbereich angeordnete observation point 1 insgesamt höhere Sättigungsgrade und längere Phasen mit fast vollständiger Sättigung auf. Entsprechend dem Verhalten des Oberbodens, sättigt auch das Kernmaterial im Böschungsbereich im Vergleich zum Kronenbereich langsamer auf. So zeigt der Verlauf des Sättigungsgrades für den observation point 16 in Abbildung 5.34 erst nach 269 Berechnungstagen eine nennenswerte Veränderung des Sättigungsgrades.

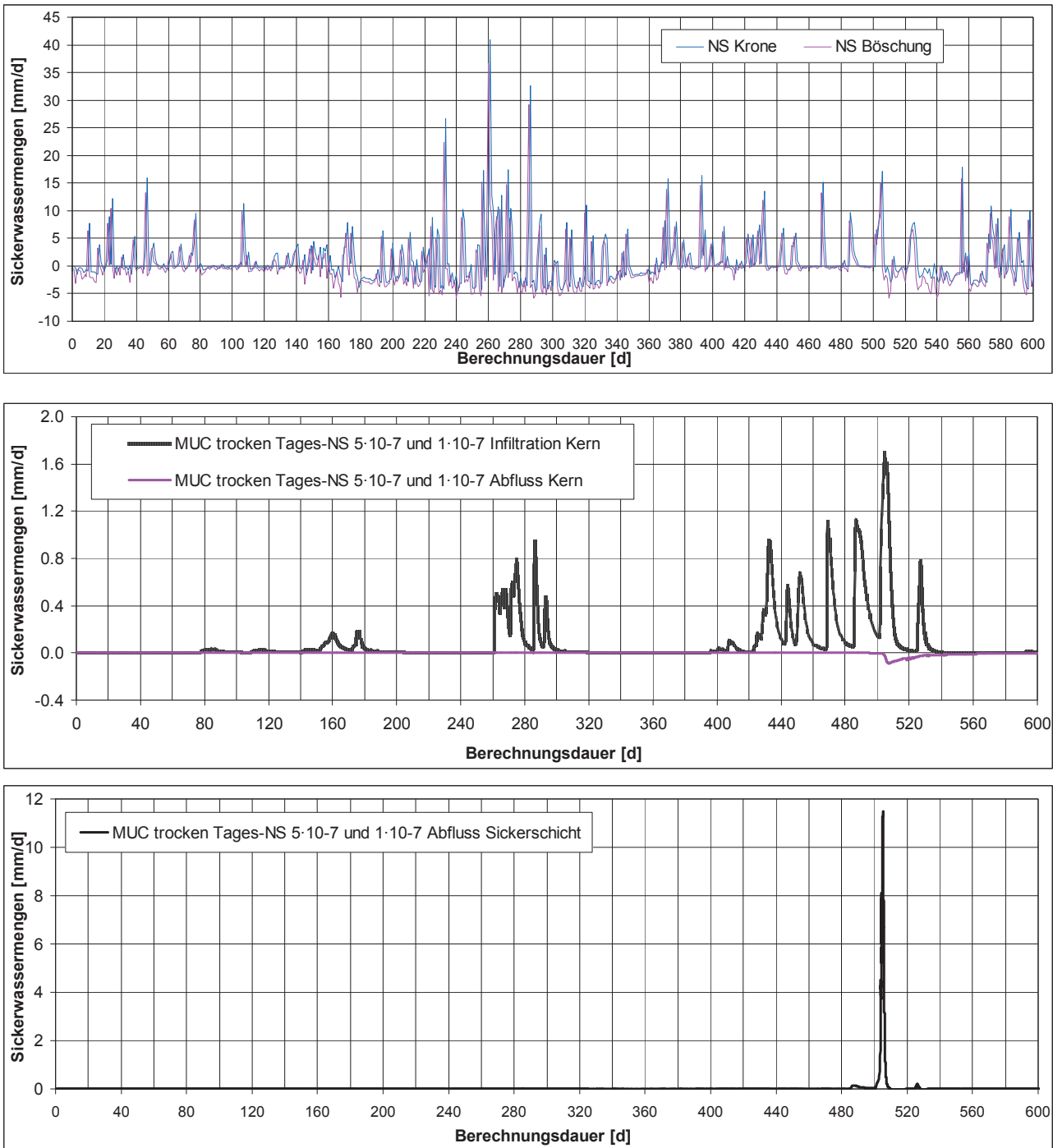


Abbildung 5.33: Berechnungsergebnisse für die trockene Seite – Tagesniederschlag



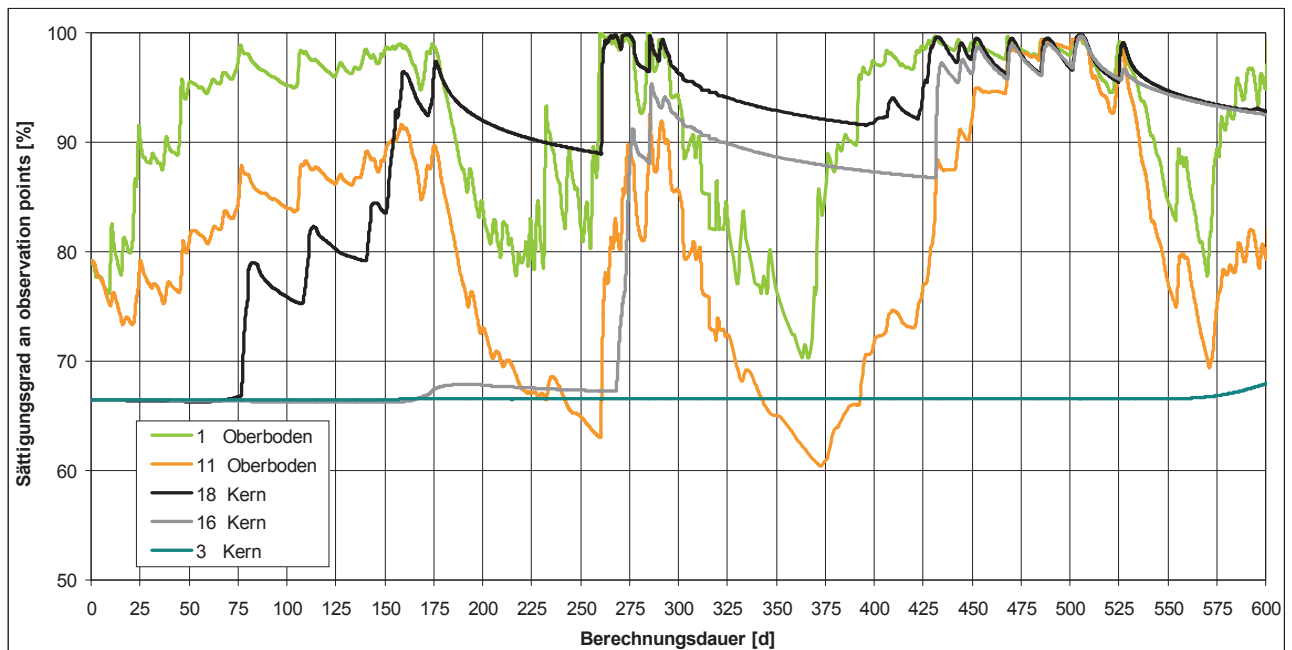


Abbildung 5.34: Sättigungsgrad an den observation points 1, 3, 11, 16 und 18 für die trockene Seite – Tagesniederschlag

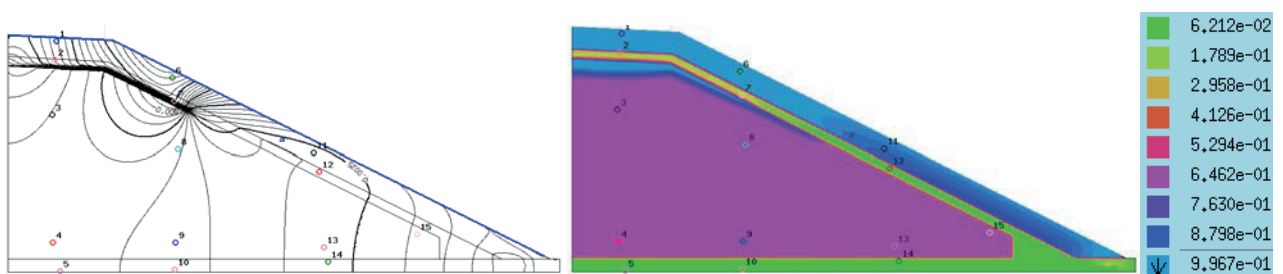


Abbildung 5.35: Strömungslinien mit zugehöriger Verteilung des Sättigungsgrades nach 286 Tagen auf der trockenen Seite – Tagesniederschlag

## 5.5 Vergleich Berechnungsmodell – Versuchsschüttung

In der Abbildung 5.36 werden die volumetrischen Wassergehalte, die im Oberboden des Versuchshügels mittels TDR-Sonden gemessen wurden, und die rechnerisch ermittelten volumetrischen Wassergehalte an im Oberboden liegenden observation points gegenübergestellt. Die Werte für die observation points stammen aus der Berechnung mit Tagesniederschlägen für die trockene Seite. Dabei liegt der observation point 1 in etwa im Bereich der TDR-Sonde MW1E-TDR5 und der observation point 11 im Bereich der Sonde MW4D-TDR17.

Beim Vergleich der gemessenen mit den rechnerisch bestimmten volumetrischen Wassergehalten ist zu beachten, dass der volumetrische Wassergehalt sehr stark von der Dichte des Bodens abhängt und diese lokalen Streuungen unterworfen ist. Die Messungen der TDR-Sonden eignen sich deshalb nicht zur Bestimmung des absoluten Wassergehaltes, sondern dienen vielmehr der Ermitt-

lung von Wassergehaltsänderungen. Dementsprechend sind die Verläufe der gemessenen und rechnerisch ermittelten Kurven im Hinblick auf Wassergehaltsänderungen zu vergleichen. Insgesamt zeigen die Kurven dabei eine gute Korrelation im zeitlichen Verlauf. Es ist allerdings zu erkennen, dass die am observation point 1 rechnerisch ermittelten Wassergehaltsschwankungen etwas geringer ausfallen als die an der zugehörigen TDR-Sonde gemessenen.

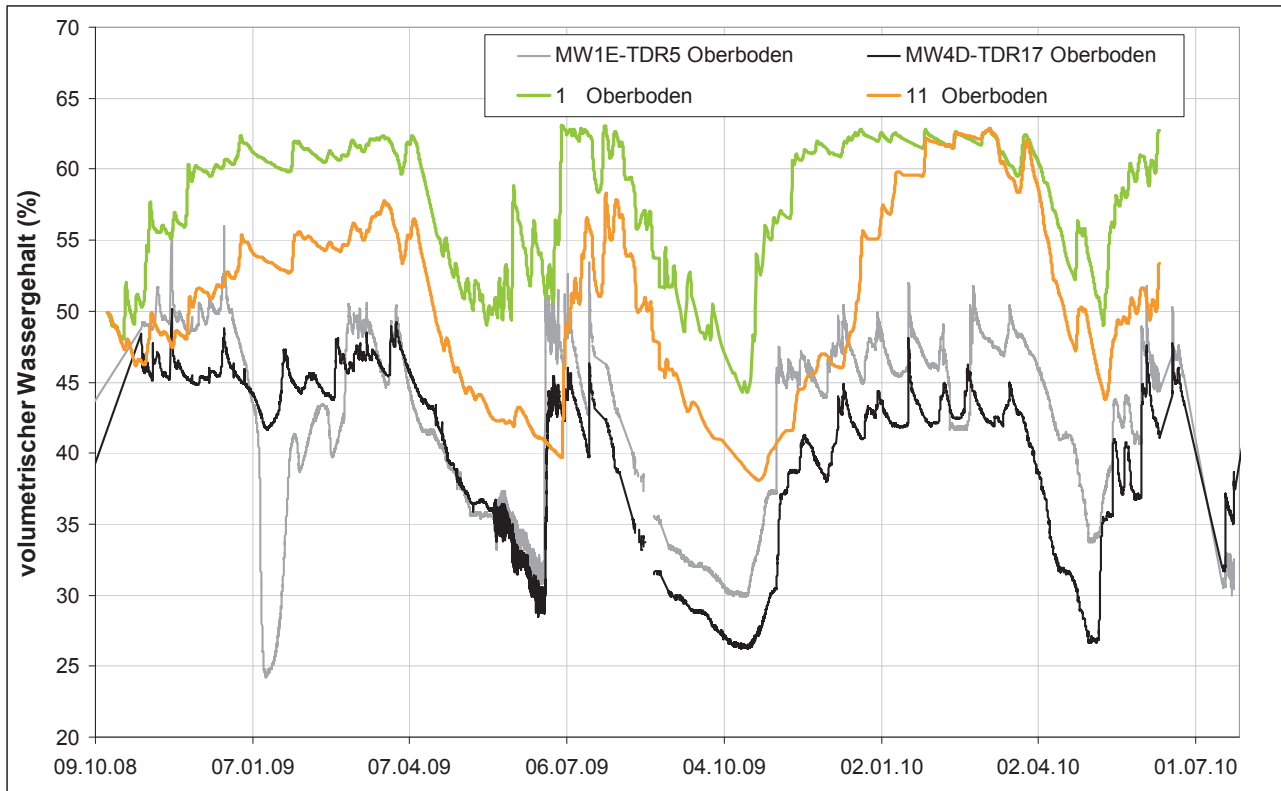


Abbildung 5.36: Volumetrischer Wassergehalt in Abhängigkeit vom Niederschlag an TDR-Sonden im Oberboden und an observation points im Berechnungsmodell für die trockene Seite mit Tagesniederschlag

In der Abbildung 5.37 und Abbildung 5.38 werden die über 602 Tage aufsummierten Sickerwasserabflüsse aus dem Kernmaterial und der Dränschicht sowie die akkumulierten Infiltrationsmengen in den Kern auf der nassen Seite bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen dargestellt und den an der nassen Seite des Versuchshügels gemessenen Sickerwassermengen aus der Basis und aus der Dränmatte gegenübergestellt.

Die Kurven für den Sickerwasserabfluss in der Dränschicht verlaufen für die Berechnungen mit Monats-, Wochen- und Tagesniederschlägen gleichförmig zu der an der Versuchsschüttung gemessenen Kurve. Die Berechnung mit dem Durchschnittsniederschlag zeigt erwartungsgemäß einen linearen Verlauf. Die im Vergleich zu den gemessenen Werten für alle Berechnungen höheren Sickerwassermengen aus der Dränschicht sind auf den für die Berechnungen um eine Zehnerpotenz höher angesetzten  $k$ -Wert des Oberbodens von  $k = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$  zurückzuführen. Dies beruht auf der in Abschnitt 5.2.2 getroffenen Vereinfachung, dass kein Oberflächenabfluss stattfindet. Auf diese Weise dringt der gesamte Niederschlag in den Oberboden ein.

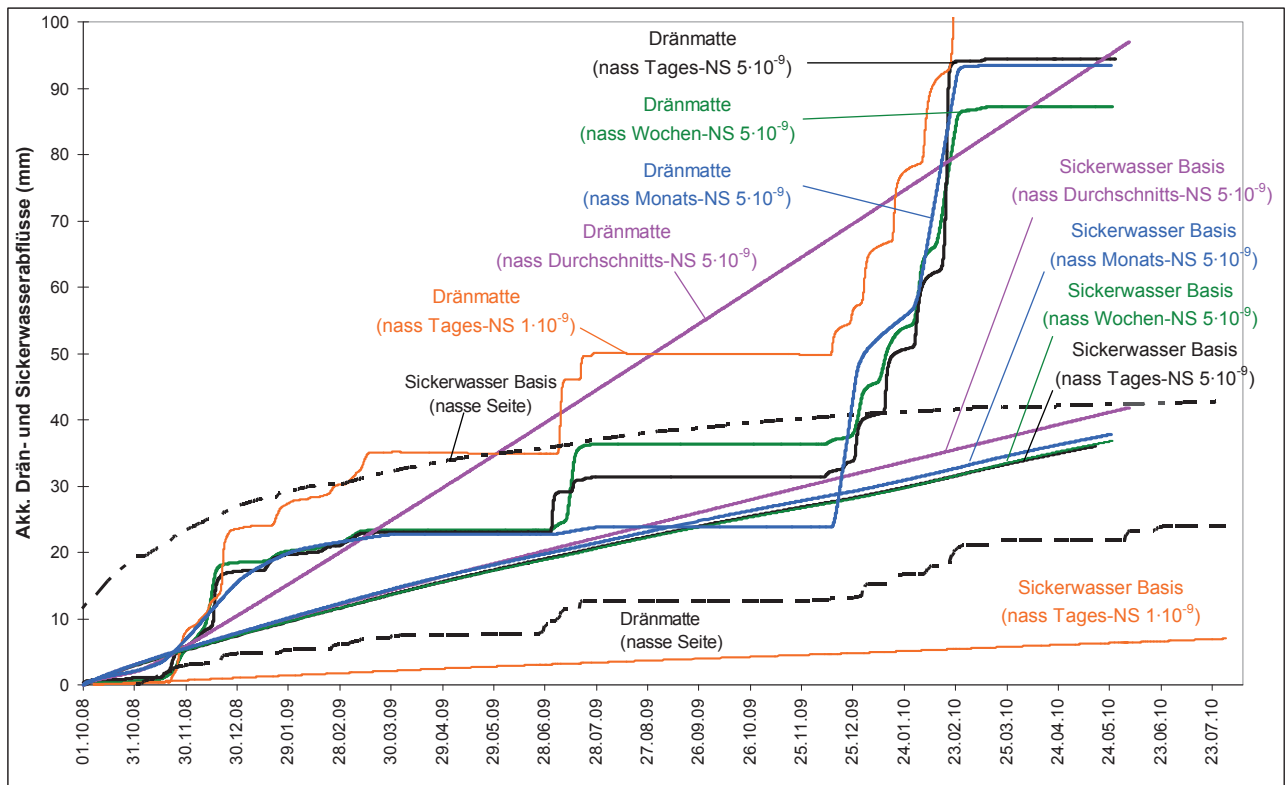


Abbildung 5.37: Akkumulierte Drän- und Sickerwasserabflüsse für die nasse Seite bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen

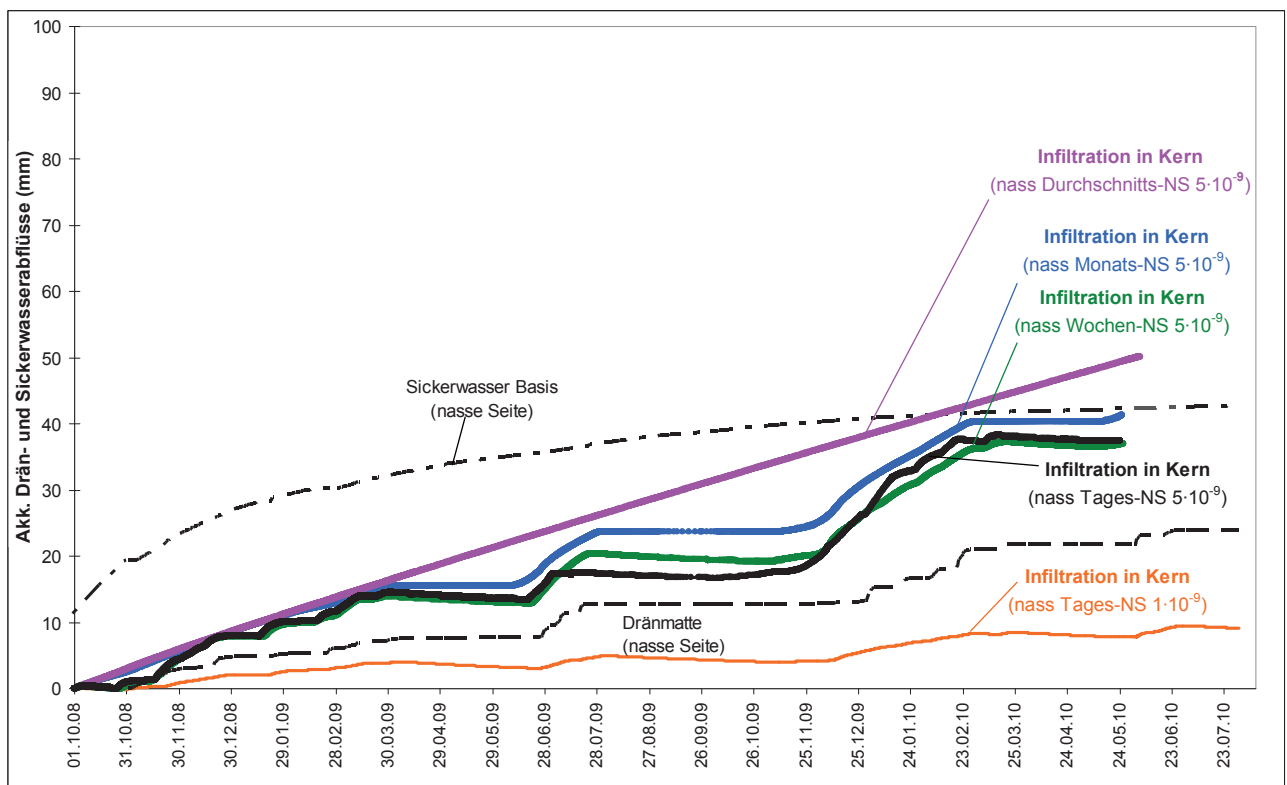


Abbildung 5.38: Akkumulierte Dränabflüsse und Infiltrationsmengen für die nasse Seite bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen

Der Sickerwasserausfluss an der Basis des Kerns verhält sich wie auch in situ bei allen Berechnungen unabhängig von der Niederschlagsverteilung. Allerdings tritt am Versuchshügel zu Beginn der Messungen eine weitaus größere Sickerwassermenge aus als rechnerisch ermittelt. Am Berechnungsende nach 602 Tagen dagegen ergeben sich in den Modellberechnungen bei Ansatz eines  $k$ -Wertes des Kernmaterials von  $5 \cdot 10^{-9}$  m/s deutlich größere Sickerwasserraten als am Versuchshügel gemessen wurden. Setzt man für das Kernmaterial einen  $k$ -Wert von  $1 \cdot 10^{-9}$  m/s an, so ergeben sich im Vergleich zu den Messungen zwar deutlich geringere Gesamtsickerwassermengen, die Sickerwasserraten nach 602 Tagen dagegen liegen in einer ähnlichen Größe wie sie am Versuchshügel gemessen wurden. Wie aus der Abbildung 5.38 zu erkennen ist, stellen sich für die in den Kern infiltrierenden Sickerwassermengen ähnliche Ergebnisse ein. So ergeben sich bei Ansatz eines  $k$ -Wertes von  $5 \cdot 10^{-9}$  m/s für das Kernmaterial für die Berechnungen mit Monats-, Wochen-, und Tageswerten des Niederschlages sehr ähnliche Ergebnisse. Der Ansatz eines Durchschnittswertes führt im Vergleich zu den Berechnungen mit Tageswerten zu einer um etwa 30 % höheren Infiltration. Für den Fall eines  $k$ -Wertes von  $1 \cdot 10^{-9}$  m/s für das Kernmaterial dagegen ergeben sich signifikant geringere Infiltrationsmengen in das Kernmaterial.

Um den Einfluss des Niederschlages auf die Höhe der aus dem Kern ausfließenden Sickerwassermengen zu ermitteln, wurde anhand von Berechnungen ohne Niederschlag und Verdunstung für die nasse Seite untersucht, inwieweit die Anfangsbedingungen die Sickerwassermengen an der Basis beeinflussen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in der Abbildung 5.39 und der Abbildung 5.40 zusammengestellt. Zunächst wurde eine Berechnung mit dem auch für die Berechnungen mit den zeitlich variablen Randbedingungen angesetzten Durchlässigkeitsbeiwert des Kernmaterials von  $k = 5 \cdot 10^{-9}$  m/s durchgeführt. Die Anfangssaugspannung wurde im gesamten Modell dabei zu -3 kPa angesetzt. Die Kurve für den Sickerwasserabfluss aus dem Kern zeigt einen im Vergleich zu dem an der Versuchsschüttung ermittelten Abfluss deutlich unterschiedlichen Verlauf. So ist auch noch nach 602 Tagen Berechnungsdauer ein Sickerwasseraustritt erkennbar. Im Vergleich dazu wurde zum selben Zeitpunkt eine deutlich geringere Sickerwasserrate gemessen.

Um einen stärkeren Abfluss aus dem Kern am Anfang der Berechnungen zu erzielen, wurde der Durchlässigkeitsbeiwert des Kernmaterials auf  $k = 5 \cdot 10^{-8}$  m/s angehoben. Die Auswertung der Berechnungsergebnisse zeigt, dass die Form der Kurve in etwa der tatsächlich gemessenen entspricht. Allerdings fließt über die Berechnungszeit von 602 Tagen beinahe die doppelte Sickerwassermenge aus dem Kern. Dies weist daraufhin, dass der Anfangssättigungsgrad im Modell zu groß angesetzt wurde. Daher wurde der Anfangssättigungsgrad des Kernmaterials in der darauf folgenden Berechnung von 98 % auf 78 % verringert. Dies geschah durch die Veränderung der Anfangssaugspannung von -3 kPa auf -25 kPa. Der Durchlässigkeitsbeiwert wurde wie in der vorangegangenen Berechnung zu  $k = 5 \cdot 10^{-8}$  m/s angesetzt. Jedoch ist das Material in diesem Fall so trocken, dass über die gesamte Berechnungszeit von 1200 Tagen kein Sickerwasserabfluss aus dem Kern stattfindet. Infolgedessen wurde der Anfangssättigungsgrad in einer weiteren Berechnung durch die Vorgabe einer Anfangssaugspannung von -10 kPa auf 92 % eingestellt. Die Auswertung belegt, dass auch damit keine Annäherung an die tatsächlich ermittelte Kurve erzielt werden konnte. Im letzten Schritt wurde der Durchlässigkeitsbeiwert bei einem Anfangssättigungsgrad von 98 % auf  $k = 1 \cdot 10^{-8}$  m/s angehoben. Doch auch damit konnten die rechnerischen Werte nicht

in zufrieden stellender Weise an die gemessenen Werte angeglichen werden. Während am Anfang im Vergleich zu den gemessenen Werten zu wenig Sickerwasser aus dem Kern austritt, fließt darauf folgend zu viel Wasser aus dem Kernmaterial ab.

Diese Diskrepanz zwischen den gemessenen und der berechneten Sickerwassermengen ist vermutlich auf den inhomogenen Einbauwassergehalt des Kernmaterials zurückzuführen. Während die unteren Dammlagen relativ feucht eingebaut wurden und dort nach Verdichtung ein Sättigungsgrad von fast 100 % erreicht wurde, wies das Material in den oberen Lagen einen geringeren Einbauwassergehalt auf. Dadurch wird aufgrund eines zu hohen Anfangswassergehaltes Sickerwasser weitgehend nur aus den unteren Lagen abgegeben, wobei dies infolge des geringeren Fließweges in einer deutlich kürzeren Zeitspanne erfolgt. In den Berechnungen konnte der unterschiedliche Anfangswassergehalt des Kernmaterials jedoch nicht abgebildet werden, da ein im gesamten Modellgebiet konstantes hydraulisches Potential vorgegeben werden musste, um einen Gleichgewichtszustand als Voraussetzung für eine stabile Berechnung zu erzeugen. Der Wassergehalt im Kernmaterial weist im Modell im Anfangszustand dementsprechend über die Höhe denselben Wert auf.

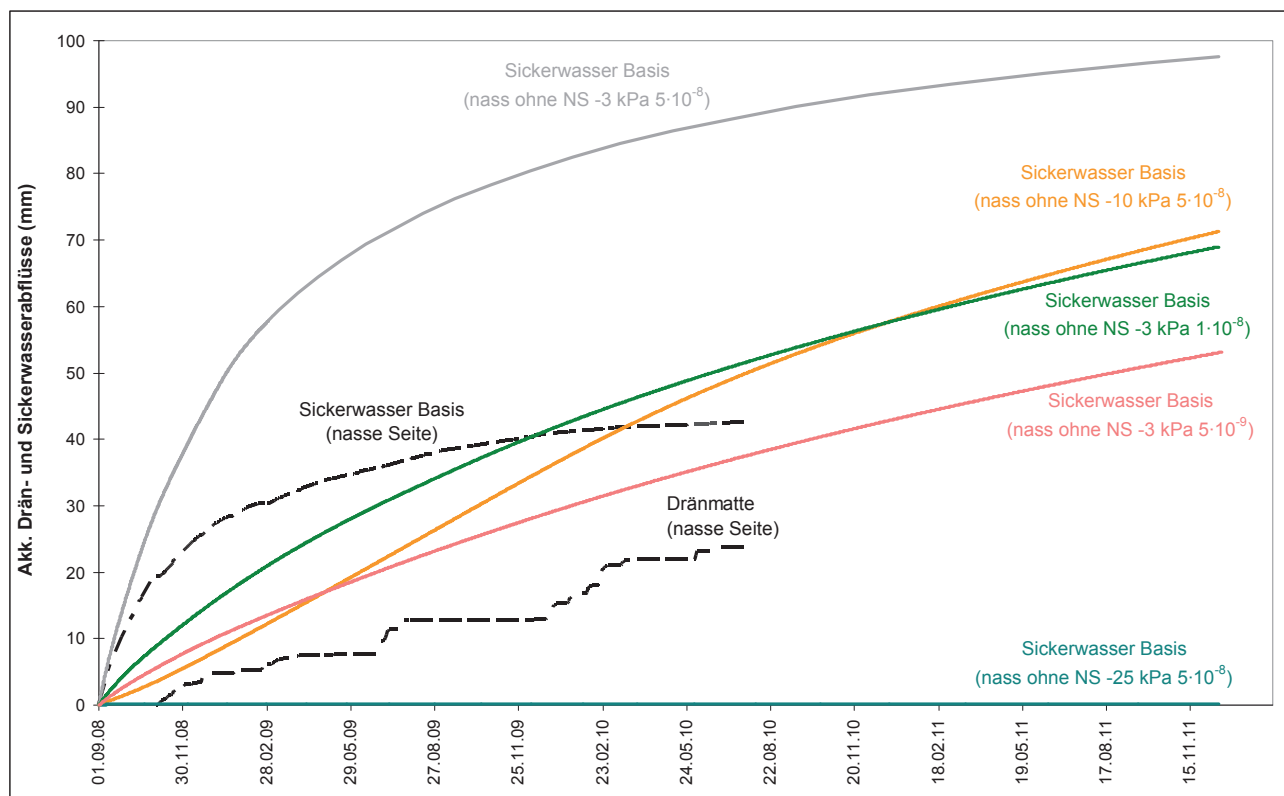


Abbildung 5.39: Akkumulierte Sickerwasserabflüsse aus der Basis für die nasse Seite bei unterschiedlichen Anfangsbedingungen ohne Niederschlag

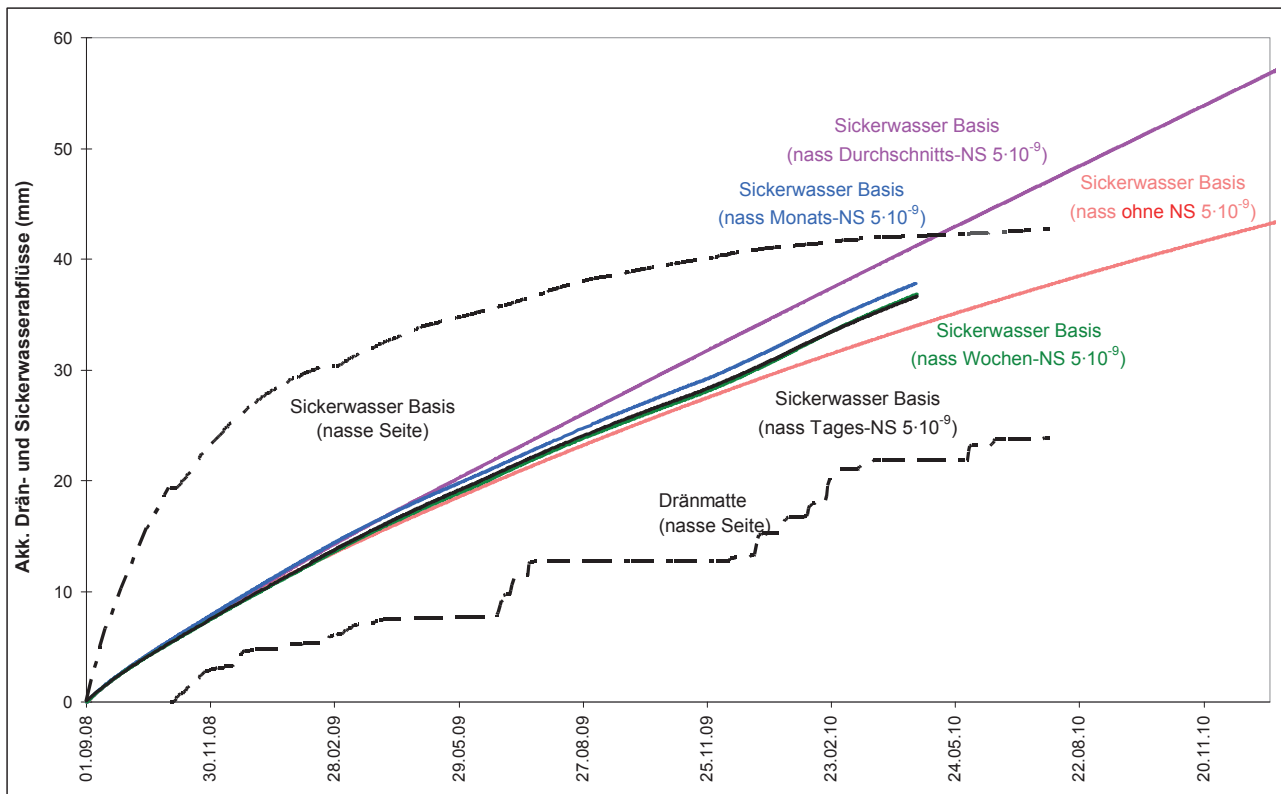


Abbildung 5.40: Vergleich der Berechnungen mit und ohne Niederschlag

In der Abbildung 5.41 werden die über die Berechnungsdauer von 602 Tagen akkumulierten Sickerwasserabflüsse aus dem Kernmaterial und der Dränschicht sowie die aufsummierten Infiltrationsmengen in den Kern für die trockene Seite bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen dargestellt und mit den auf der trockenen Seite des Hügels gemessenen Sickerwassermengen aus der Basis und aus der Dränmatte verglichen.

Während die Messwerte einzelne geringe Abflüsse in der Sickerschicht anzeigen, wird in den Berechnungen ausschließlich am Berechnungstag 505 ein Sickerwasserabfluss in der Dränschicht ermittelt. Dabei ist die Abflussmenge für die Berechnung mit den Tageswerten am größten, gefolgt von den Berechnungen mit den Monats- und Wochenwerten. Am Versuchshügel wurde für die trockene Seite innerhalb von 602 Tagen eine Gesamtabflussmenge aus der Dränmatte von 5,3 mm gemessen. Für die Berechnungen mit Tages-, Wochen- und Monatswerten zeigen sich dagegen deutlich größere Abflussmengen. Dies ist wiederum auf die Vernachlässigung des Oberflächenabflusses bei der Definition der Infiltration in den Oberboden zurück zu führen. Bei den Tageswerten des Niederschlages kommt es deshalb zu zum Teil sehr hohen Infiltrationsmengen, die dann zu einem Großteil in der Dränschicht abgeführt werden. Bei der Berechnung mit dem Durchschnittsniederschlag ergibt sich aufgrund der vergleichmäßig angesetzten Infiltrationsmenge ein deutlich geringerer Sickerwasserabfluss in der Dränschicht. Dieser setzt erstmalig nach etwa 375 Berechnungstagen ein. Vorher wird die vom Oberboden in die Dränschicht abgegebene Sickerwassermenge vollständig vom trocken verdichteten Kern aufgenommen.



Bei keiner der für die trockene Seite durchgeführten Berechnungen wird ein Sickerwasserausfluss an der Basis des Kerns ermittelt. Die über 602 Tage gemessene Gesamtabflussmenge aus dem Kernmaterial des Versuchshügels ist mit 2,7 mm äußerst gering.

Mit bis zu 69 mm infiltriert auf der trockenen Seite eine beinahe doppelt so große Sickerwassermenge in den Kern als auf der nassen Seite. Die größte Infiltrationsmenge wird dabei für die Berechnungen mit den Wochen- und Monatswerten erreicht. Eine mit 60 mm etwas geringere Gesamtinfiltration stellt sich bei der Berechnung mit Tageswerten ein. Dies ist auf den sich bei den Tageswerten einstellenden größeren Abfluss in der Dränschicht infolge von Starkniederschlagsereignissen zurück zu führen. Für den Durchschnittsniederschlag dringen über die gesamte Berechnungsdauer 65 mm in das Kernmaterial ein.

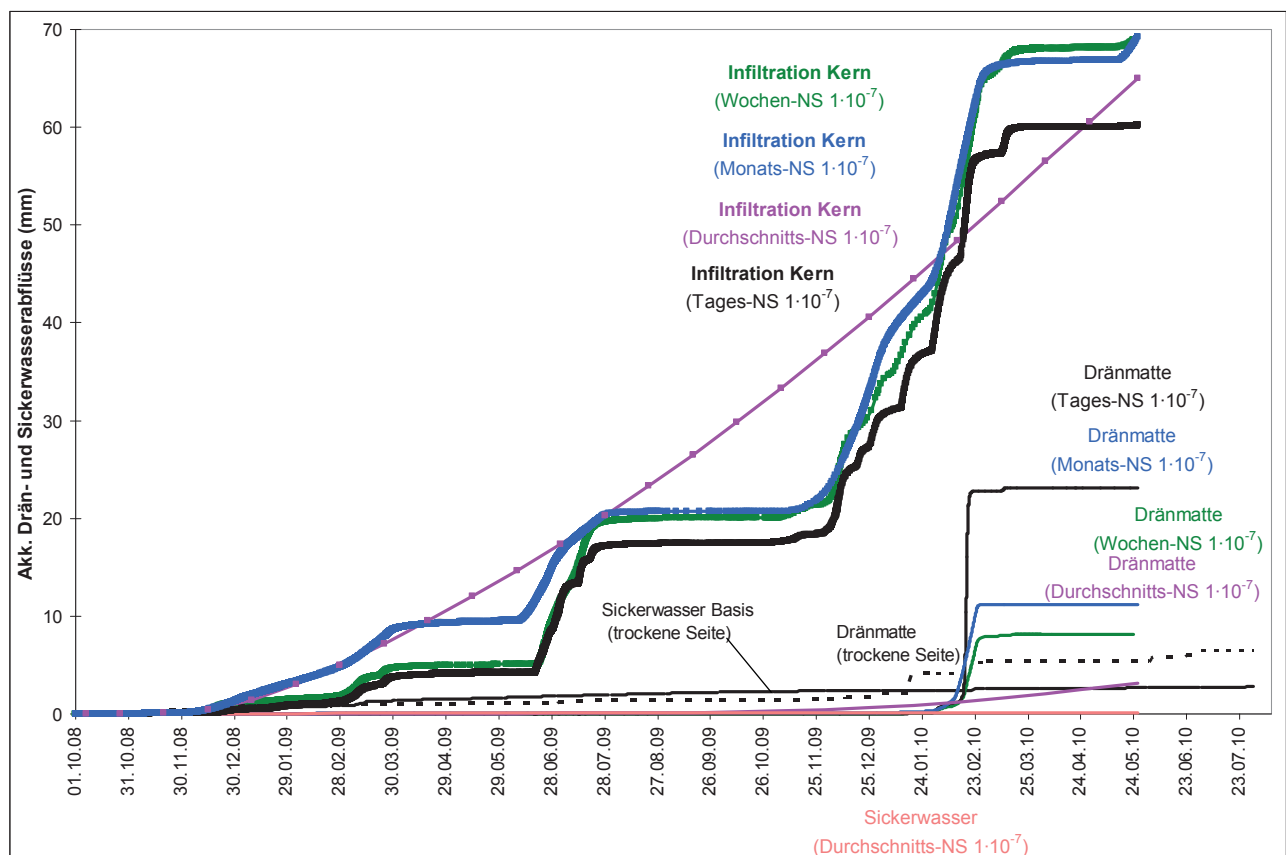


Abbildung 5.41: Akkumulierte Drän- und Sickerwasserabflüsse für die trockene Seite bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen

## 5.6 Bewertung der Berechnungsergebnisse

Die Berechnungen zeigen, dass die gemessenen Sickerwassermengen an der Basis der Versuchsschüttung anhand der durchgeführten Berechnungen nur bedingt wiedergegeben werden können. Dies beruht insbesondere auf dem großen Einfluss des Anfangszustandes auf die Wasserbewegung.

Die gemessenen Sickerwassermengen an der Basis der nassen Seite sind zum Teil auf Konsolidationsvorgänge, die durch die Verdichtung des Bodens initiiert wurden, und zum Teil auf eine Schwerkraft-bedingte Wasserabgabe zurück zu führen. Eine Wasserabgabe infolge von Porenwasserüberdrücken kann mit dem verwendeten Berechnungsprogramm prinzipiell nicht abgebildet werden. Inwieweit der Boden im Modell Wasser abgibt, hängt von seinem Anfangswassergehalt und seiner Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung ab. Stets strebt der Boden einen Gleichgewichtszustand an. Entsprechend der definierten Randbedingungen stellen sich im Boden unterschiedliche Druckverhältnisse ein. Inwieweit es dadurch zu einer Wasserabgabe kommt, hängt von der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung des Bodens ab. Diese beschreibt, wie viel Wasser ein Boden bei bestimmten negativen Porenwasserdrücken zurückhalten kann. Der Zeitraum, über den sich eine Schwerkraft-bedingte Entwässerung erstreckt, hängt von den Durchlässigkeitseigenschaften des Bodens ab. Die Berechnungen ohne Niederschlag haben gezeigt, dass die Wasserabgabe an der Basis der nassen Seite im Vergleich zu den gemessenen Werten im Modell bei Ansatz eines  $k$ -Wertes von  $5 \cdot 10^{-9}$  m/s überschätzt wird. Bei Ansatz eines  $k$ -Wertes von  $1 \cdot 10^{-9}$  m/s dagegen ergibt sich im Modell nach 600 Tagen eine ähnliche Sickerwasserrate wie sie am Versuchshügel gemessen wurde.

Für die trockene Seite der Versuchsschüttung wurde in keiner Berechnung ein Sickerwasserabfluss an der Basis festgestellt. Dies stimmt mit den Messergebnissen überein, wonach nur eine sehr geringe Wassermenge im gesamten Messzeitraum an der Basis der trockenen Seite gefasst wurde.

Die in der Dränmatte gefassten Sickerwassermengen wurden in fast allen Berechnungen überschätzt. Dies ist auf die für die Modellberechnungen getroffene Annahme, dass kein Oberflächenabfluss stattfindet, zurück zu führen. Dadurch kommt es zu einer zu großen Infiltration in den Oberboden, was im Falle einer fast vollständigen Sättigung des Oberbodens zu einer Sickerwasserabgabe an die Dränmatte und damit zu einem im Vergleich zu den gemessenen Werten größeren Dränabfluss führt. Die zeitlichen Verläufe der berechneten Sickerwasserabflüsse zeigen jedoch für die Berechnungen mit Tages-, Wochen- und Monatswerten eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Verläufen. Dies gilt auch für die in den entsprechenden Berechnungen ermittelten Wassergehaltsänderungen im Oberboden. Die Berechnungen mit Durchschnittswerten der Infiltration und damit einer konstanten Randbedingung dagegen können den zeitlichen Verlauf der Dränabflüsse nicht wiedergeben. Stattdessen stellt sich in diesen Berechnungen eine konstante Abflussrate in der Dränschicht ein.

Es wird anhand der durchgeführten Berechnungen deutlich, dass die an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse des Niederschlages, der Verdunstung und des Oberflächenabflusses einen sehr großen Einfluss auf die Sickerwassermengen ausüben. Durch die Vernachlässigung des Oberflächenabflusses wurde die Infiltration in den Boden in den Modellberechnungen deutlich überschätzt und es wurden signifikant größere Abflüsse in der Dränschicht ermittelt.

Zudem haben die Berechnungen gezeigt, dass der Anfangszustand des Bodens einen sehr großen Einfluss auf die Sickerwassermengen an der Basis hat. So wird der Sickerwasserabfluss an der Basis aufgrund der geringen Durchlässigkeit des in den Modellberechnungen betrachteten Bodens noch am Berechnungsende nach ca. 20 Monaten in erheblicher Weise von den Anfangsbedingungen beeinflusst. Die Bewertung der verschiedenen Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen sollten jedoch stets für den sich langfristig einstellenden Zustand vorgenommen werden, wozu deutlich längere Berechnungsdauern erforderlich werden können. Für längere Berechnungsdauern

spricht auch die Erkenntnis, dass der in der Regel tatsächlich vorliegende Anfangszustand der Böden im Modell nicht abgebildet werden kann, da Inhomogenitäten in der Wassergehaltsverteilung zu unterschiedlichen Saugspannungen und damit unterschiedlichen Anfangspotentialen führen, die im Modell nicht stabile Berechnungsläufe nach sich ziehen.

Betrachtet man die sich bei den Berechnungen mit zeitlich konstanten und zeitlich variablen Randbedingungen ergebenden Verläufe für den Abfluss in der Dränmatte und die Infiltration in den Dammkern, sind deutliche Unterschiede zu erkennen, so dass davon ausgegangen werden kann, dass sich für längere Berechnungsdauern ebenfalls erhebliche Unterschiede in der aus dem Dammkern ausfließenden Sickerwassermenge ergeben dürften. Um realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten, sollte die Wirksamkeit der Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen deshalb anhand von Berechnungen mit zeitlich variablen Randbedingungen erfolgen.

## 6 Berechnungen zum Wasserhaushalt der Versuchsschüttung – VADOSE/W

Als Ergänzung und zum Vergleich zu den Berechnungen mit FEFLOW wurden zusätzlich Sickerwasserberechnungen für die Versuchsschüttung mit der Finite-Elemente-Software VADOSE/W – entwickelt von der Firma GEO-SLOPE International Ltd. – durchgeführt. Das Programm ermöglicht es, unter stationären wie auch unter instationären Bedingungen Sickerwasserströmungen im gesättigten wie ungesättigten Medium abzubilden. Ein bedeutender Vorteil der Software im Vergleich zu Grundwassermodellen liegt darin, dass Vadose/W die klimatischen Randbedingungen wie Niederschlag, Temperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Strahlung berücksichtigt und die an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse durch Kopplung der klimatischen Verhältnisse mit den zustandsabhängigen Eigenschaften des Bodens (Wassergehalt, Saugspannung) abbildet. Folglich kann für ein Modell mit definierten klimatischen Randbedingungen im Zuge der Berechnung neben der Wasserbewegung im Boden damit auch die Infiltration, die Evapotranspiration sowie der Oberflächenabfluss ermittelt werden, ohne dass es nötig wäre weitere Annahmen zu treffen. Im Vergleich zu FEFLOW wird außerdem neben der Wasserbewegung in der flüssigen Phase auch der dampfförmige Wassertransport betrachtet. Als Gleichung für den differentiellen Stofftransport verwendet Vadose/W dabei die gegenüber der Richards-Gleichung (3.26) erweiterte Form nach WILSON (1990). 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.

### 6.1 Vorgehensweise

Wie bereits für FEFLOW beschrieben, wurde auch bei der Berechnung mit VADOSE/W zunächst die Geometrie der Versuchsschüttung unter Berücksichtigung der Funktion der einzelnen Schichten entsprechend den Modellanforderungen modifiziert. Danach wurden das FE-Netz generiert und Bodenkennwerte und Randbedingungen zugewiesen. Die Berechnungen wurden unter Berücksichtigung der Klimadaten, die an der am Hügel installierten Klimastation gemessen wurden, durchgeführt.

### 6.2 Modellbildung

#### 6.2.1 Modellgeometrie

Allen Berechnungen liegt die gleiche Modellgeometrie, die auch für die Berechnungen mit dem Programm FEFLOW verwendet wurde, zugrunde (siehe Abbildung 6.1).

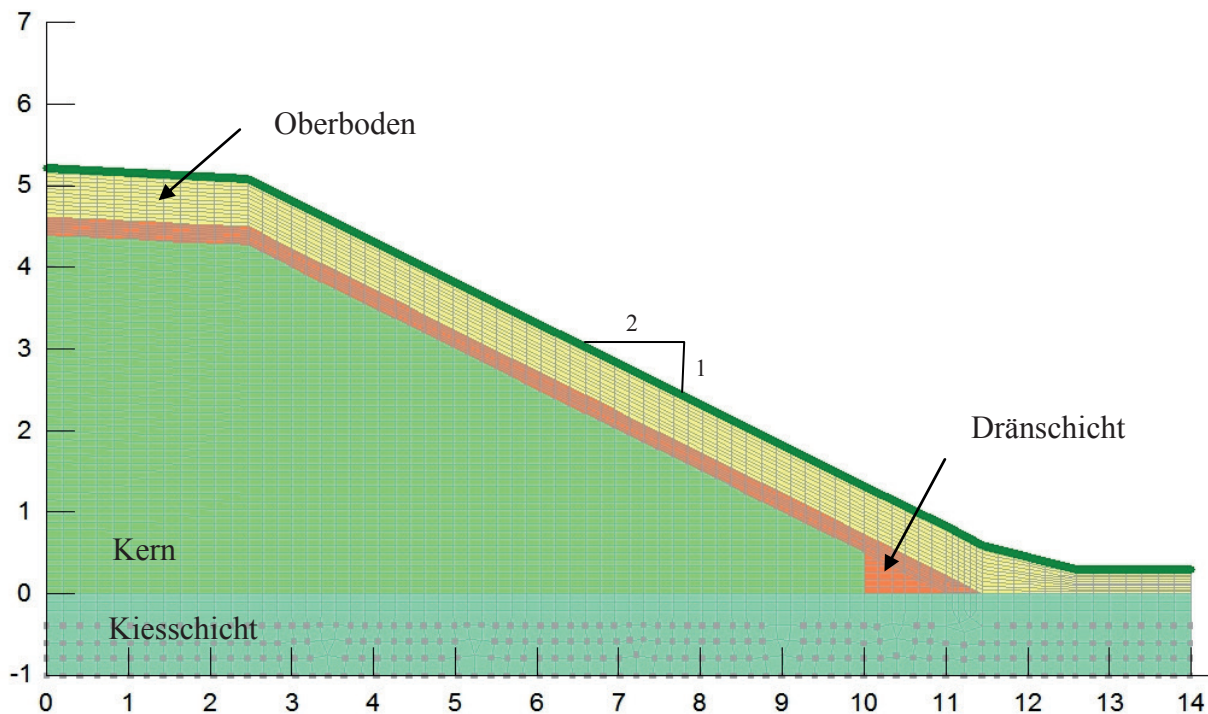


Abbildung 6.1: Modellgeometrie mit Finite-Elemente-Netz

Das FE-Modell besteht aus ca. 3.600 Rechteckelementen, wobei das Netz in der Oberboden- und Dränschicht verfeinert wurde, da hier die größte Wasserbewegung zu erwarten ist.

### 6.2.2 Randbedingungen

An der Unterseite des Modells wurde über die Head-Randbedingung eine konstante Druckhöhe von -1 m definiert. Somit ist die Höhe des Grundwasserspiegels festgelegt; es ist ein freier Ausfluss aus dem Kernmaterial in die darunter liegende grobkörnige Kiesschicht möglich. Der linke und der rechte Rand des Modells werden als undurchlässig angenommen. Hier wurden keinerlei Randbedingungen definiert. Entlang der Oberfläche des Modells wurden die Klimarandbedingungen definiert.

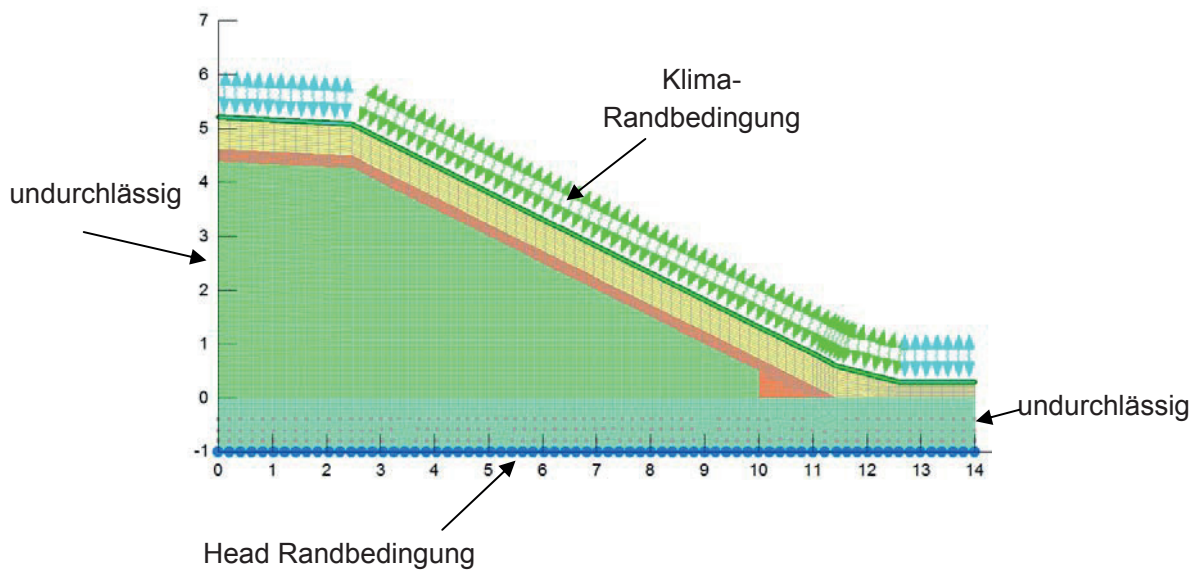


Abbildung 6.2: Modell mit Randbedingungen

Der Randbedingung auf der Oberfläche des Hügels wurden die meteorologischen Daten, die von Oktober 2008 bis Dezember 2010 an der Klimastation neben der Versuchsschüttung gemessen wurden, zugrunde gelegt. Für jeden Tag wurden die tägliche Niederschlagshöhe, die maximale und minimale Temperatur, die größte und kleinste relative Luftfeuchtigkeit, die mittlere Windgeschwindigkeit sowie die durchschnittliche Netto-Strahlung angegeben. Bezüglich der zeitlichen Verteilung im Tagesverlauf wurden alle Klimaparameter als konstant angenommen.

Zur Berechnung der Transpiration müssen weitere Kenngrößen für die Vegetation definiert und über die klimatische Randbedingung in das Modell eingegeben werden. Der Blattflächenindex (BFI) wurde dabei mit 3,6 und die Wurzeltiefe mit 0,4 m über das ganze Jahr als konstant angenommen.

Zur Beschreibung der tatsächlichen Evapotranspiration muss die Abhängigkeit der Wasseraufnahme durch die Vegetation vom Bodenwassergehalt berücksichtigt werden. Dazu wird vom Programm angenommen, dass die tatsächliche Evapotranspiration der potentiellen Evapotranspiration entspricht, solange die Saugspannungen im Oberboden 100 kPa nicht überschreiten, und dass die tatsächliche Evapotranspiration danach linear auf Null bei einer Saugspannung von 1500 kPa abnimmt (siehe Abbildung 6.3). Ähnlich wie bei dem in Abschnitt 3.3.6 beschriebenen Ansatz nach Disse wird damit davon ausgegangen, dass die Pflanzen bei 1500 kPa den permanenten Welkepunkt erreichen und kein Wasser mehr aus dem Oberboden aufnehmen können.

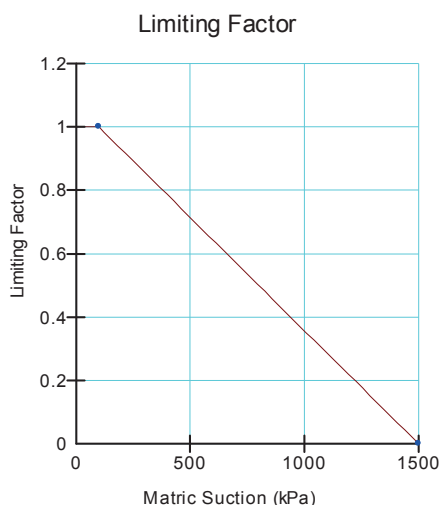


Abbildung 6.3: Verhältnis der tatsächlichen Evapotranspiration zur potentiellen Evapotranspiration („Limiting Factor“) in Abhängigkeit von der Saugspannung („Matric Suction“)

### 6.2.3 Anfangsbedingung

Die Anfangsbedingungen wurden so gewählt, dass die realen Verhältnisse bestmöglich abgebildet werden. Für jedes Material wurde die Anfangsdruckhöhe gleich der Saugspannung gesetzt, die die einzelnen Bodenschichten unmittelbar nach der Verdichtung aufwiesen. Im Zuge der Herstellung der Versuchsschüttung wurde das Kernmaterial in der Osthälfte mit einem durchschnittlichen Wassergehalt von ca. 75 % und in der Westhälfte mit einem durchschnittlichen Wassergehalt von ca. 55 % eingebaut. Dies entspricht Sättigungsgraden von ca. 98 % in der Osthälfte und ca. 66 % in der Westhälfte. Der Wassergehalt des Oberbodens betrug beim Einbau ca. 50 %, der Sättigungsgrad ca. 65 %. Zusammenfassend sind die Anfangsbedingungen in Tabelle 6.1 aufgeführt.

Material	Sättigungsgrad [%]	Saugspannung [kPa]
Oberboden	65	-80
Kern, nass	98	-3
Kern, trocken	66	-35
Dränschicht	-	-3
Kiesschicht	-	-3

Tabelle 6.1: Anfangsbedingungen

### 6.2.4 Bodenkennwerte

Zur Beschreibung des gekoppelten Wärme- und Stofftransportes ist die Definition von hydraulischen und thermischen Bodeneigenschaften erforderlich. Die Bodenkennwerte für das Kernmaterial und den Oberboden wurden entsprechend den Ergebnissen der durchgeführten Laboruntersuchungen angenommen (siehe Abschnitt 4.2.2.3). Für die Drän- und Kiesschicht wurden die von EKBLAD UND ISACSSON (2007) an einem schwach schluffigen Kies (6 % Feinkornanteil, GU nach



DIN 18196) ermittelten Bodenkennwerte angesetzt. Da EKBLAD UND ISACSSON (2007) keine Durchlässigkeitsbeiwerte für die von Ihnen untersuchten Böden angeben, wurde dieser für den betreffenden Boden aufgrund von Erfahrungswerten zu  $k = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  abgeschätzt. Der Parameter A der Beziehung nach van Genuchten wurde für die Dränschicht auf  $100 \text{ m}^{-1}$  erhöht, um die Wasseraufnahme durch den Oberboden zu minimieren. Die Beziehung zwischen der hydraulischen Leitfähigkeit und dem Sättigungsgrad wurde mit dem Modell nach van Genuchten&Mualem beschrieben. Mit VADOSE/W ist es nicht möglich, die Hysterese der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung für die Be- und Entwässerung abzubilden. Das bedeutet, dass die in Tabelle 5.1 angegebenen van Genuchten-Parameter sowohl für Phasen der Bewässerung als auch für Phasen der Entwässerung gelten. Für den Oberboden und das nass verdichtete organische Kernmaterial wurden dabei die Parameter des Hauptentwässerungsastes gewählt. Die Abbildung 6.4 stellt die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen der für die Simulation verwendeten Böden dar.

Die Wärmeleitfähigkeit des Bodenfeststoffes  $\lambda_{\text{solids}}$ , die Wärmeleitfähigkeit des trockenen Bodens  $\lambda_{\text{dry}}$  und die Wärmekapazität des trockenen Bodens  $c_{v,\text{dry}}$  wurden nach VDI 4640 - Teil 1 abgeschätzt. Die Wärmekapazität des Bodenfeststoffes  $c_p$  wurde nach den im Handbuch für VADOSE/W (KRAHN, 2004) aufgeführten Werten für die einzelnen Bodenschichten angenommen.

Die hydraulischen und thermischen Eigenschaften der verschiedenen Böden sind in der Tabelle 6.2 zusammengestellt.

DIN 18196	OT	OT	GW	GW
Schicht	Oberboden	Kernboden – nass	Dränschicht	Kiesschicht
	Entwässerung	Entwässerung		
$k_r$ -Wert [m/s]	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
$\theta_{\text{sat}}$	0.63	0.65	0.23	0.23
$\theta_{\text{res}}$	0	0	0.011	0.011
$\alpha$ [ $\text{m}^{-1}$ ]	0.11	0.14	100	46
n	1.24	1.3	1.79	1.79
$m = 1-(1/n)$	0.19	0.23	0.44	0.44
Thermische Parameter				
$\lambda_{\text{solids}}$ [kJ/(Tag · m · °C)]	146.88 <sup>(1)</sup>	146.88 <sup>(1)</sup>	155.52 <sup>(1)</sup>	155.52 <sup>(1)</sup>
$\lambda_{\text{dry}}$ [kJ/(Tag · m · °C)]	43.20 <sup>(1)</sup>	43.20 <sup>(1)</sup>	34.56 <sup>(1)</sup>	34.56 <sup>(1)</sup>
$c_{p,\text{solids}}$ [kJ/(g · °C)]	$0.71 \cdot 10^{-3}$ <sup>(2)</sup>	$1.674 \cdot 10^{-3}$ <sup>(2)</sup>	$0.71 \cdot 10^{-3}$ <sup>(2)</sup>	$0.71 \cdot 10^{-3}$ <sup>(2)</sup>
$c_{v,\text{dry}}$ [kJ/ (m <sup>3</sup> · °C)]	1550 <sup>(1)</sup>	1550 <sup>(1)</sup>	1500 <sup>(1)</sup>	1500 <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> nach VDI 4640 – Teil 1

<sup>(2)</sup> nach KRAHN (2004)

Tabelle 6.2: Hydraulische und thermische Bodenkennwerte

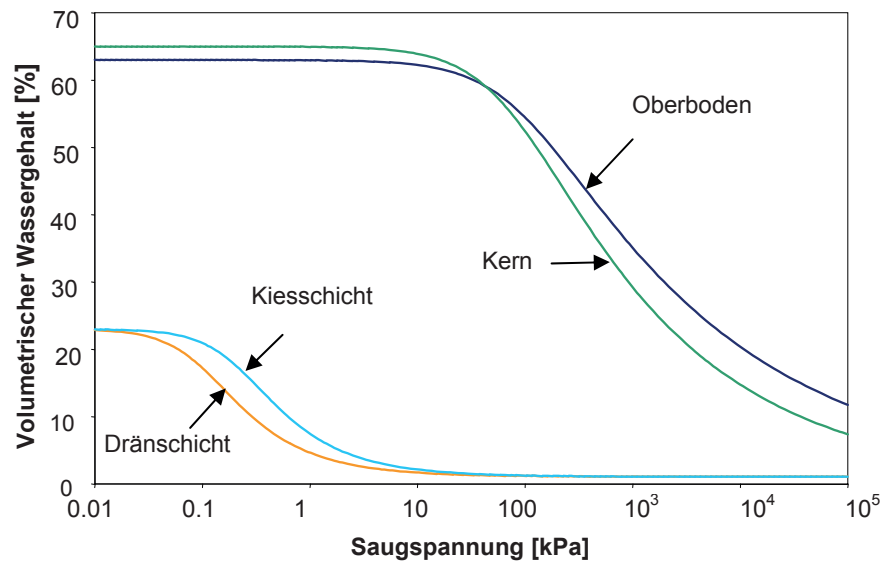


Abbildung 6.4: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen der verschiedenen Böden

In der Abbildung 6.5 ist die hydraulische Leitfähigkeit der unterschiedlichen Materialien in Abhängigkeit von der Saugspannung dargestellt.

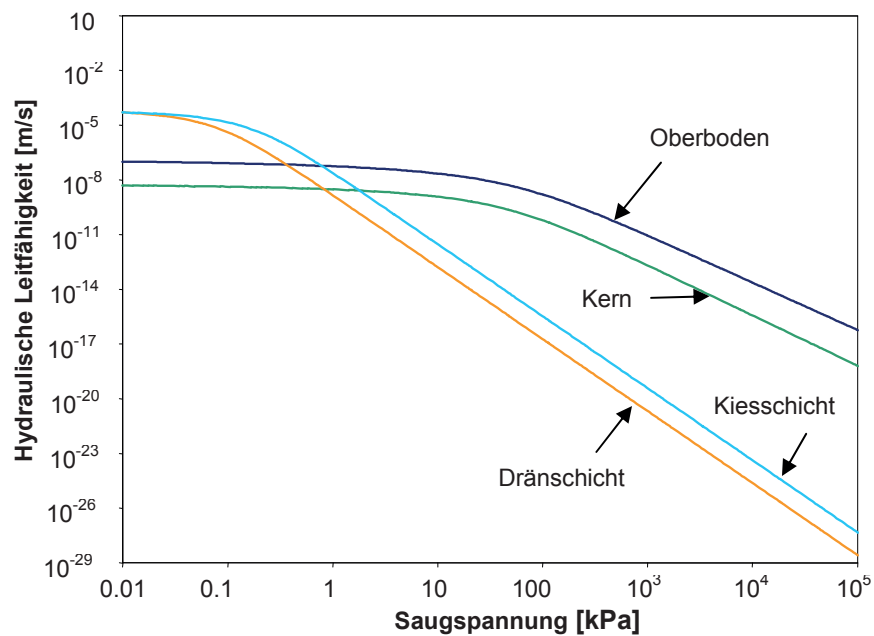


Abbildung 6.5: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Saugspannung

## 6.2.5 Berechnungshilfen in VADOSE/W

### 6.2.5.1 Flux sections

Um Informationen über die Sickerwassermengen in vertikaler Richtung zu erhalten, wurden so genannte „flux sections“ verwendet. „Flux sections“ können vor Beginn der Simulation in jedem beliebigen Bereich des Modells erstellt werden. Das Programm berechnet die Sickerwassermenge, die den definierten Bereich durchfließt, und gibt sowohl die momentanen wie die akkumulierten Durchflussmengen aus. In Abbildung 6.6 sind die an vertikalen Schichttrennflächen zur Überwachung des Durchflusses definierten „flux sections“ dargestellt. Für horizontale Linien können Durchflüsse auch nach Beendigung der Berechnung an beliebigen Stellen ausgegeben werden.

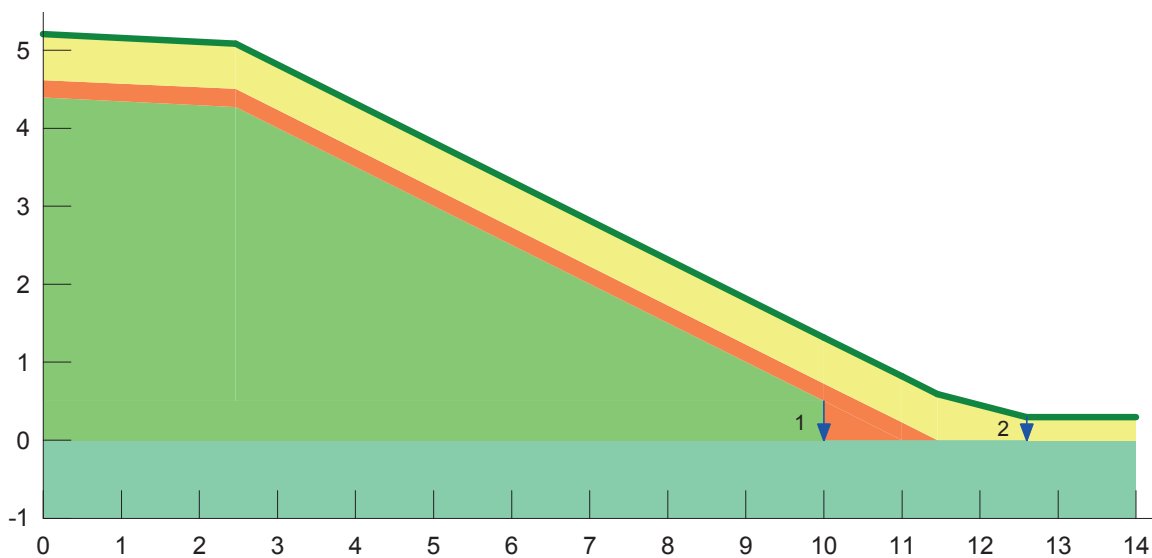


Abbildung 6.6: Flux sections zur Ermittlung der Wasserbewegung im Modell

## 6.3 Berechnungsergebnisse

Vorgestellt werden die Ergebnisse der Berechnung für die nasse Seite. Die Abbildung 6.7 zeigt die akkumulierten Werte der an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse in Abhängigkeit von der Zeit. In der Berechnung fließen von 1800 mm Gesamtniederschlag 160 mm oberflächlich ab. Die Infiltration in den Oberboden beträgt ca. 1600 mm. Etwa 94 % davon werden über die Aufnahme durch die Pflanzen (Transpiration) wieder an die Atmosphäre abgegeben. Die Evaporation ist vernachlässigbar gering und wurde deshalb in der Abbildung 6.7 nicht dargestellt.

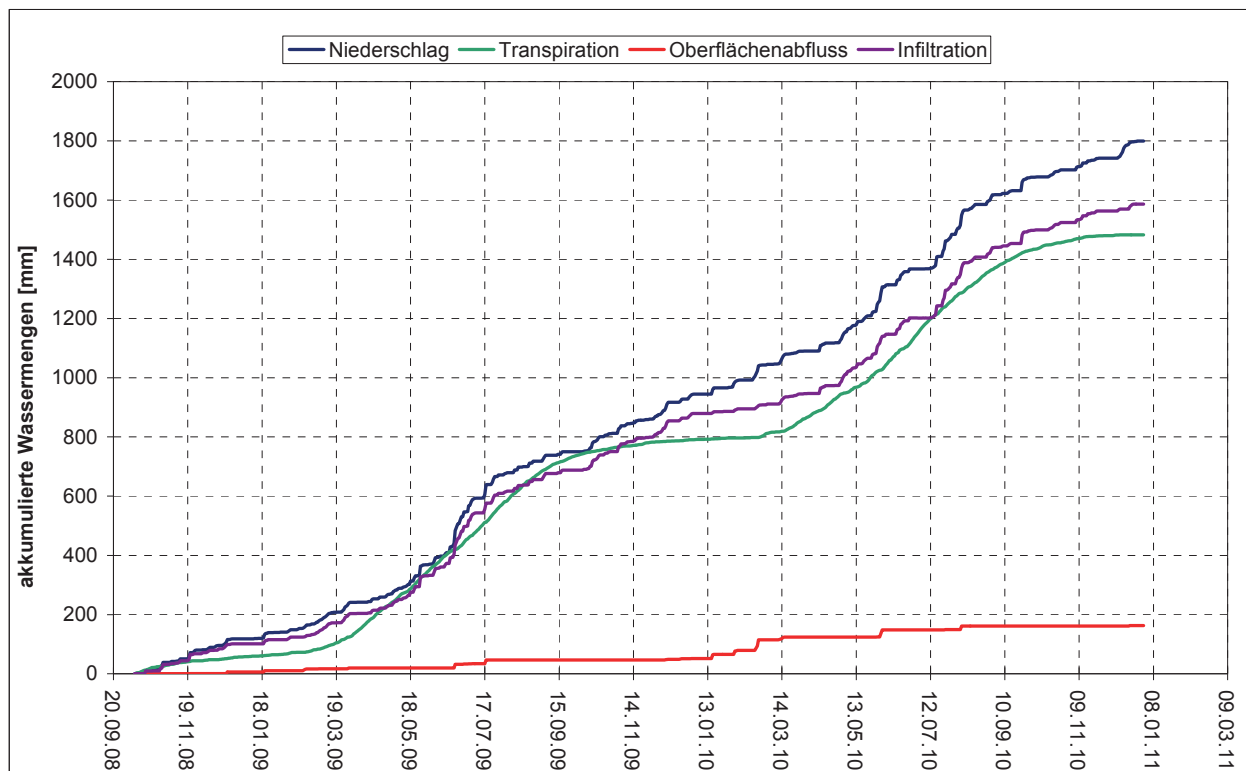


Abbildung 6.7: Prozesse an der Bodenoberfläche, ermittelt mit VADOSE/W

Die Abbildung 6.8 zeigt den volumetrischen Wassergehalt in Abhängigkeit von der Zeit an drei unterschiedlichen Stellen im Oberboden. Die gestrichelten Linien zeigen ergänzend den Verlauf der in der Versuchsschüttung eingebauten TDR-Sonden. Die durchgezogenen Linien bilden die von der Software ermittelten Wassergehalte an den etwa gleichen Punkten im Oberboden ab. Trotz der Tatsache, dass die Werte nicht genau übereinstimmen, verlaufen die Schwankungen, die vom Modell vorhergesagt wurden, parallel zu den am Hügel gemessenen. Die Unterschiede hinsichtlich der Größe der Werte sind vermutlich auf unterschiedlich angesetzte Dichten in den Berechnungen im Vergleich zu den im Feld vorliegenden Dichten zurück zu führen.

Der von VADOSE/W ermittelte Abfluss aus der Dränschicht in Abhängigkeit von der Zeit ist in Abbildung 6.9 zu sehen. Werden diese Ergebnisse mit dem volumetrischen Wassergehalt im Oberboden aus der Abbildung 6.8 verglichen, wird ersichtlich, dass nur Wasser über die Dränschicht abfließt, wenn der Oberboden nahezu gesättigt ist.

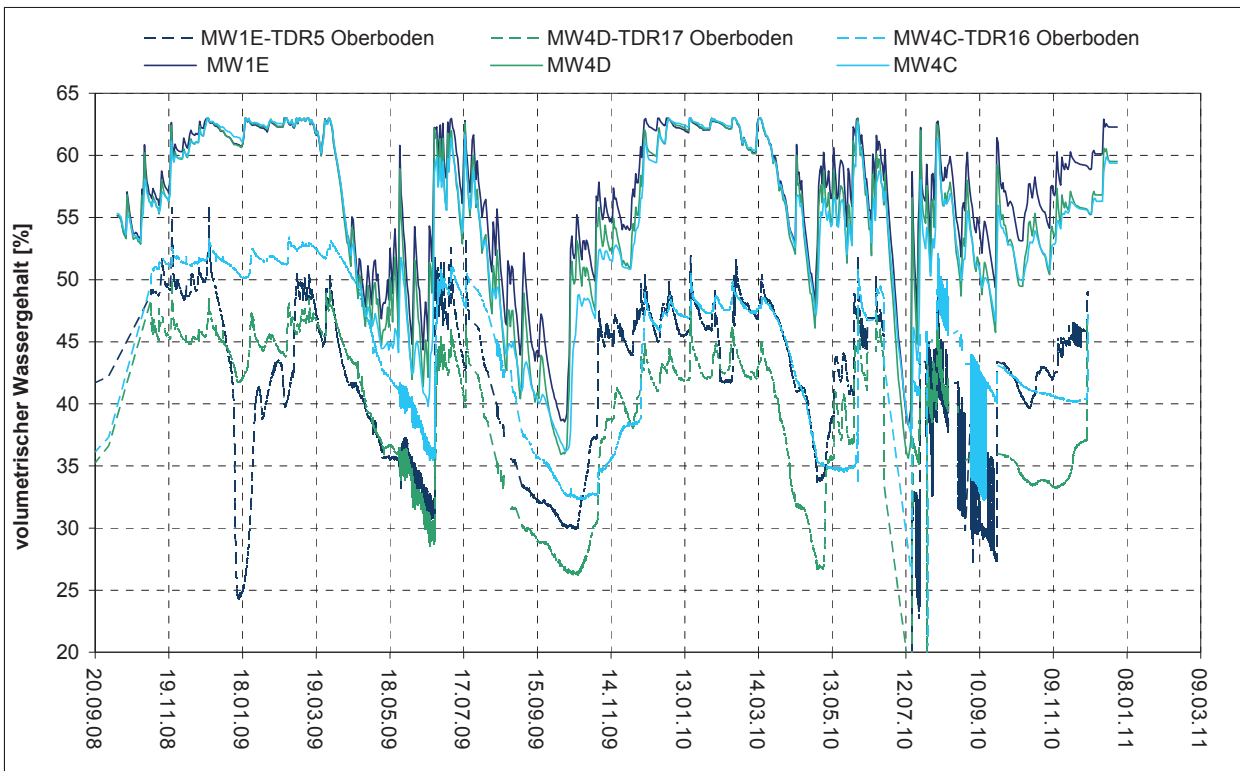


Abbildung 6.8: Volumetrischer Wassergehalt in Abhängigkeit von der Zeit an TDR-Sonden im Oberboden und an Punkten im Berechnungsmodell

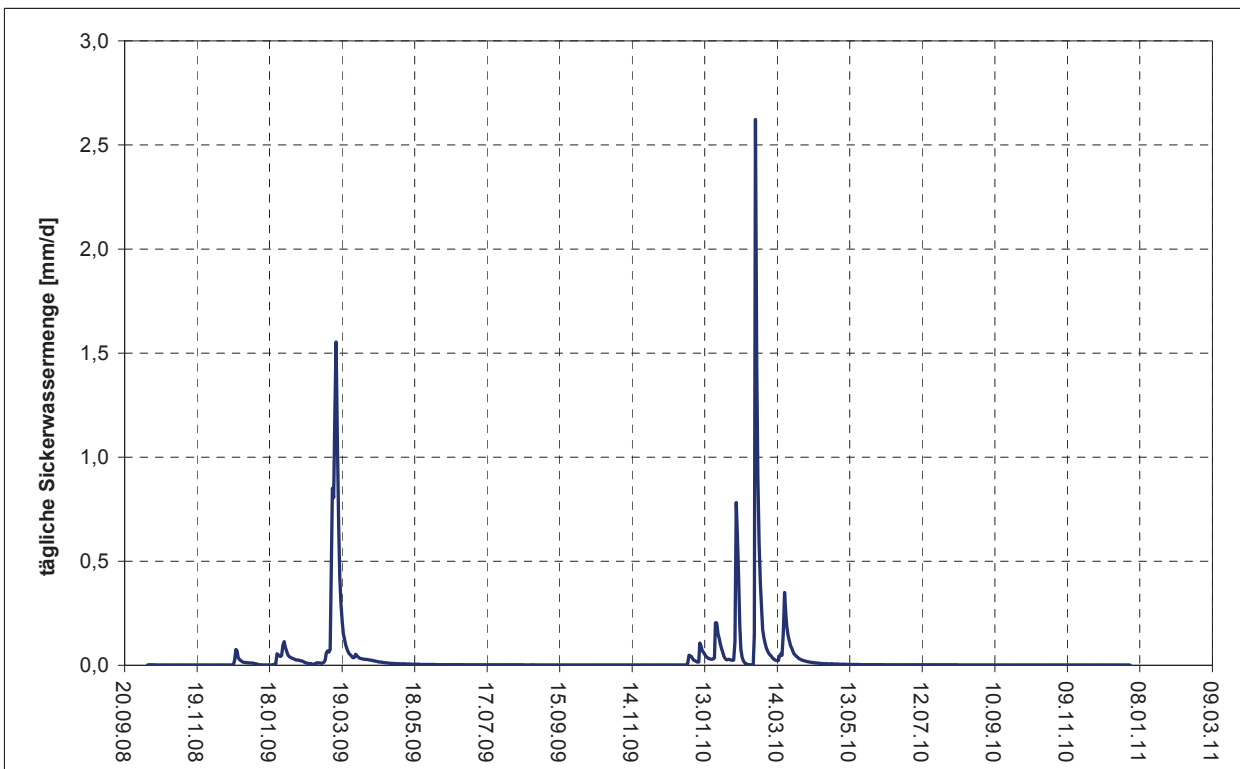


Abbildung 6.9: Sickerwassermenge aus der Dränschicht

In der Abbildung 6.10 ist der über die Zeit akkumulierte Ausfluss aus der Dränschicht dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Verlauf des gemessenen Abflusses aus der Dränschicht vom Programm nicht exakt wiedergegeben wird. Im Hinblick auf die Quantität werden die gemessenen Abflüsse etwas unterschätzt.

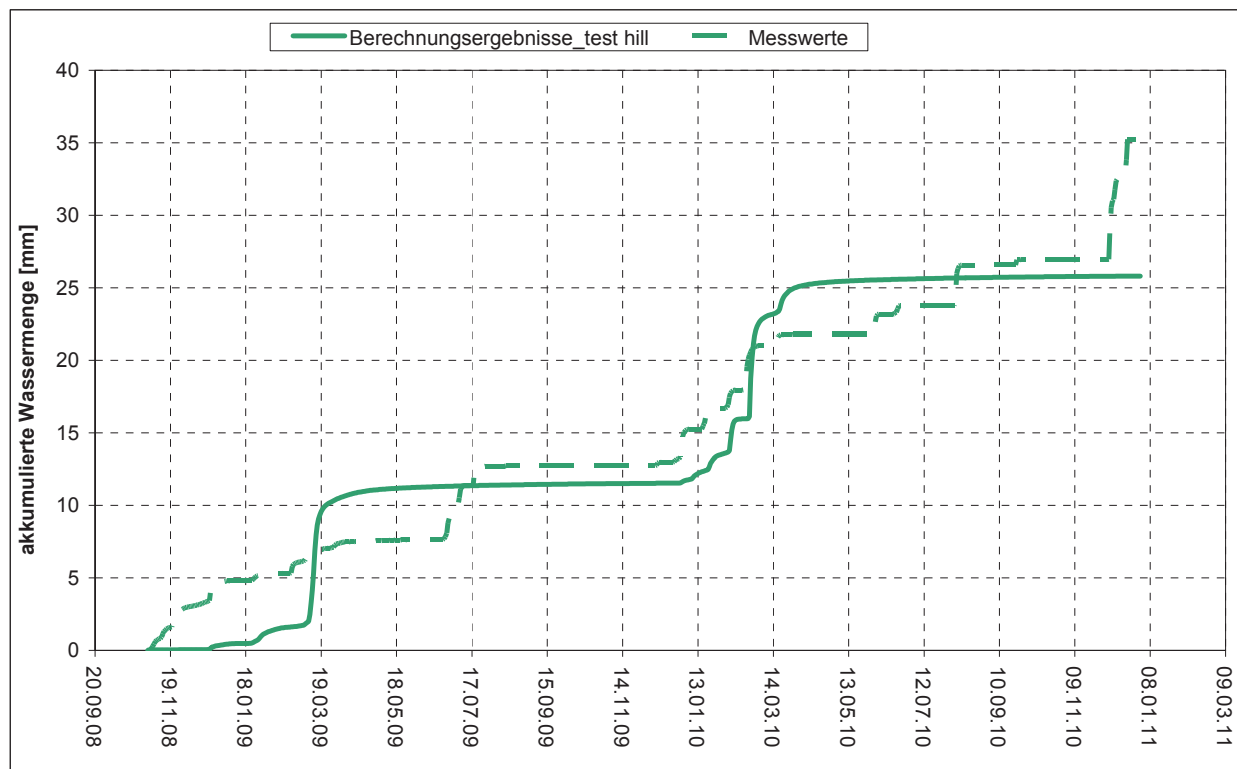


Abbildung 6.10: Akkumulierter Sickerwasseraustritt aus der Dränschicht für Berechnung und Messung

Die zeitliche Verteilung des aus dem Kern an der Basis austretenden Sickerwassers ist in der Abbildung 6.11 dargestellt. Im Vergleich zu den Messungen sind im zeitlichen Verlauf vergleichsweise große Schwankungen zwischen 0,13 mm/d und 0,04 mm/d zu erkennen. Außerdem werden die Wassermengen überschätzt. Dies wird aus der Betrachtung der über die Zeit akkumulierten Sickerwassermengen deutlich. Die Abbildung 6.12 stellt dazu vergleichend die Ergebnisse der Berechnung den Messungen am Hügel gegenüber. Die gestrichelten Linien zeigen die am Hügel gemessenen Werte, die durchgezogenen Linien die Berechnungsergebnisse. Es ist zu erkennen, dass die Berechnung für den gesamten Simulationszeitraum von ca. 2 Jahren einen deutlich größeren Abfluss ergibt als die Messung.

Zu den Unterschieden zwischen den Messungen und den Berechnungsergebnissen können prinzipiell folgende Faktoren beitragen:

- Die Durchlässigkeit im gesättigten Zustand wurde für das nass verdichtete Kernmaterial zu  $5 \cdot 10^{-9}$  m/s angenommen. Die Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche an Proben, die aus der Versuchsschüttung entnommen wurden, deuten auf eine etwas geringere Durchlässigkeit von  $k = 2,5 \cdot 10^{-9}$  m/s hin.
- Die von der Software ermittelten Ergebnisse werden durch die definierte Niederschlagsverteilung beeinflusst. Die Niederschlagsdauer beträgt immer 24 Stunden pro Tag und wird über den

gesamten Tag als konstant angesehen. Dadurch wird die tatsächliche Intensität der Niederschläge reduziert, was zu einem geringeren Oberflächenabfluss und zu einer höheren Infiltration in den Kern und einem damit verbundenen größeren Abfluss aus dem Kern führt.

- Die Hysterese der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung wird mit VADOSE/W nicht abgebildet. Für die Berechnungen wurde die Entwässerungskurve der Beziehung zugrunde gelegt. Dies kann zu einer Überschätzung der Wasseraufnahme und damit zu einer Überschätzung der an der Basis abgegebenen Sickerwassermengen führen.

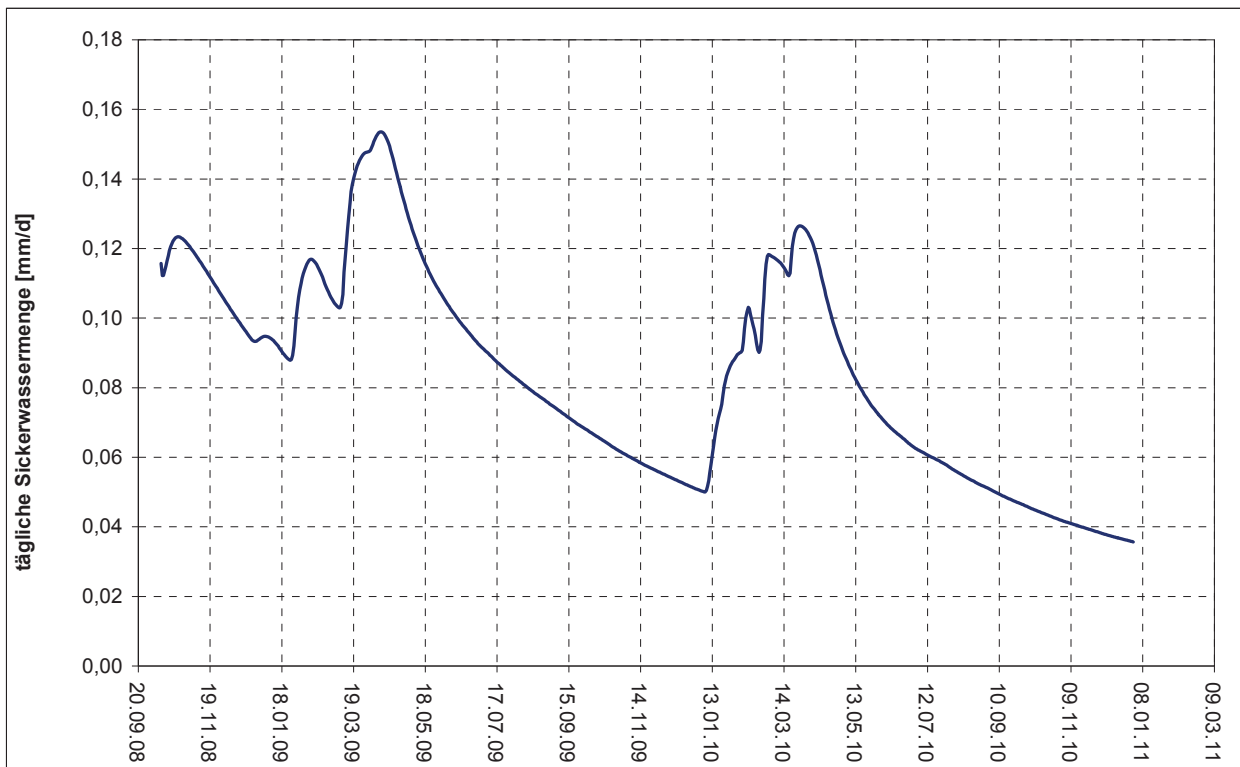


Abbildung 6.11: Sickerwasseraustritt aus dem Kern



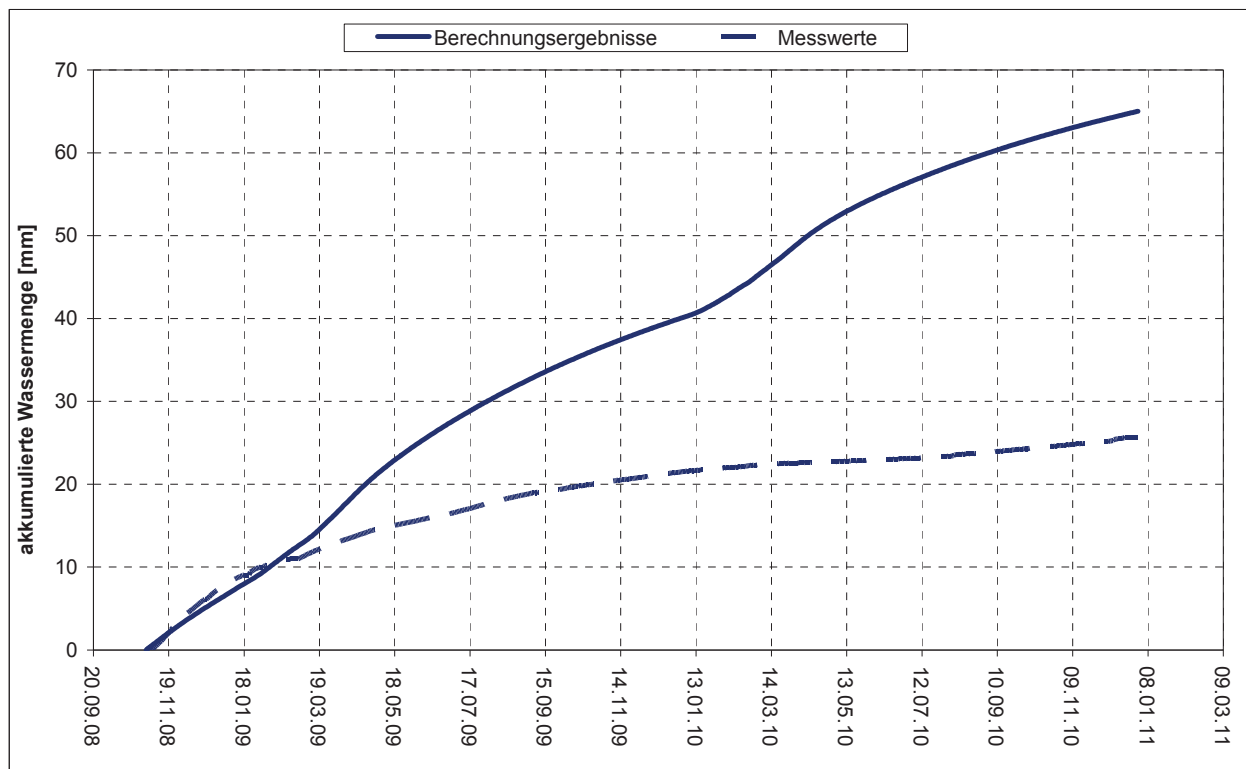


Abbildung 6.12: Akkumulierter Sickerwasseraustritt aus dem Kern für Berechnung und Messung

#### 6.4 Zusammenfassung

Der messtechnisch ermittelte Wasserhaushalt der Versuchsschüttung (nasse Einbaubedingung) wurde mit dem Programm VADOSE/W nachgerechnet. Im Vergleich zu den Messungen werden die Sickerwassermengen an der Basis etwas überschätzt und die Abflüsse in der Dränmatte etwas unterschätzt. Im Vergleich zu den Berechnungen mit FEFLOW können die Abflüsse aus der Dränmatte mit VADOSE/W quantitativ insgesamt jedoch deutlich besser wiedergegeben werden, da bei VADOSE/W auch ein Oberflächenabfluss abgebildet wird und dadurch im Vergleich zu FEFLOW weniger Wasser in den Oberboden infiltriert. Der rechnerisch ermittelte Oberflächenabfluss beträgt ca. 9% des Niederschlages. Da an der Versuchsschüttung keine Messwerte zum Oberflächenabfluss gewonnen werden, kann dieses Ergebnis nicht geprüft werden.

Allerdings zeigen die zeitlichen Verläufe der Sickerwasserabgabe aus der Dränmatte und der Sickerwasserabgabe an der Basis deutliche Unterschiede zu den Messungen. So weist der Verlauf der Sickerwasserspense an der Basis deutlich größere Schwankungen als die Messungen auf. Als Ursache der Differenzen zu den Messwerten werden zum einen Unterschiede in der Durchlässigkeit des nass verdichteten Kernmaterials zwischen den im Modell angesetzten Werten und den in-situ vorliegenden Werten angenommen, zum anderen wird vermutet, dass die Nicht-Berücksichtigung der Hysterese zu einer Überschätzung der Sickerwasserabgabe an der Basis beiträgt.

## 6.5 Vergleich der Ergebnisse für den Abfluss aus dem Kern – FEFLOW / VADOSE

In der Abbildung 6.13 sind die aus dem Kernmaterial austretenden akkumulierten Sickerwassermengen dargestellt, die für die Berechnungen mit FEFLOW und VADOSE/W ermittelt wurden und die am Versuchshügel gemessen wurden. Es wurden die Ergebnisse der Berechnungen für die nasse Seite bei einem über Tage gemittelten Niederschlag gegenübergestellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass dem Oberboden bei der Berechnung mit FEFLOW ein größerer Durchlässigkeitsbeiwert von  $k = 5 \cdot 10^{-7}$  m/s zugewiesen wurde als bei der Berechnung mit VADOSE/W, bei der der Durchlässigkeitsbeiwert des Oberbodens  $k = 5 \cdot 10^{-8}$  m/s beträgt. Das Kernmaterial besitzt bei beiden Berechnungen einen k-Wert von  $k = 5 \cdot 10^{-9}$  m/s. Die in den Berechnungen ermittelten Abflussmengen aus dem Kern übersteigen die am Flughafen gemessene Abflussmenge. Das heißt, in den Simulationen wird der Abfluss aus dem Kernmaterial grundsätzlich überschätzt. Bei VADOSE/W trifft dies in höherem Maße zu als bei FEFLOW. Ursache hierfür ist wie bereits beschrieben unter anderem die Vergleichmäßigung des Niederschlages und bei Berechnungen mit FEFLOW der fehlende Oberflächenabfluss.

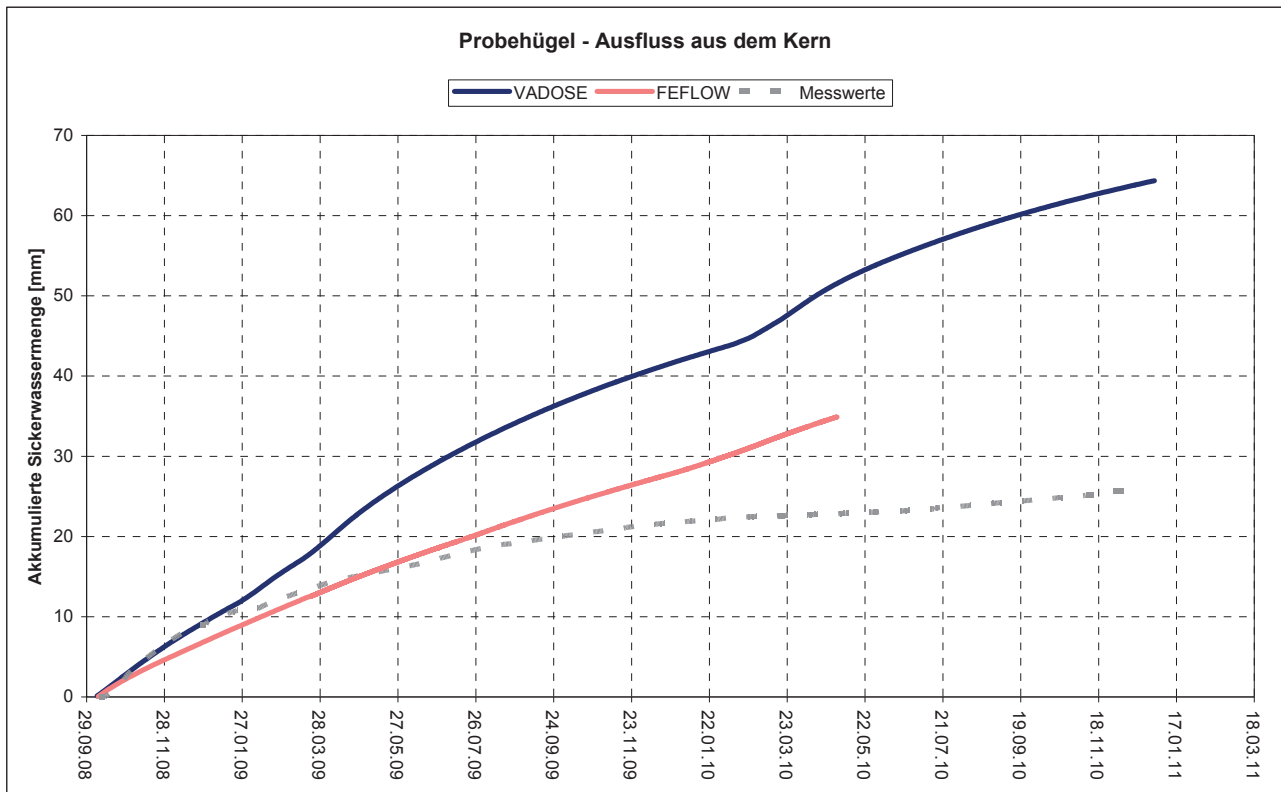


Abbildung 6.13: Akkumulierter Sickerwasseraustritt aus dem Kern für Berechnung mit FEFLOW und VADOSE und Messung

## **7 Berechnungen zum Wasserhaushalt der Bauweise E – FEFLOW**

Des Weiteren wurden für die im Forschungsprojekt FE 05.147/2007/CGB untersuchte Bauweise E Berechnungen mit zeitlich variablen Randbedingungen durchgeführt, um damit die Wirksamkeit der Bauweise besser beurteilen zu können. Zur Vergleichbarkeit mit den bisher durchgeführten Berechnungen wurden die Bodenkennwerte entsprechend den im Rahmen des Forschungsprojektes FE 05.147/2007/CGB angenommenen Werten angesetzt. Die zeitlich variablen Randbedingungen wurden aus Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes für den Flughafen München abgeleitet. Da die instationären Berechnungen für die Versuchsschüttung gezeigt haben, dass die Ergebnisse stark von den Anfangsbedingungen abhängen, wurden die Berechnungen über einen Untersuchungszeitraum von 10 Jahren unter Zugrundelegen der Klimadaten von 01.10.1992 bis 30.09.2002 durchgeführt. Die Verdunstung wurde aus den Klimadaten mit Hilfe der in Abschnitt 3.3.4 beschriebenen FAO-Grasreferenzverdunstung abgeschätzt. Zur Ermittlung des Einflusses einer unterschiedlichen zeitlichen Mittelung des tatsächlich auftretenden Niederschlages bzw. Verdunstung war geplant, Berechnungen unter Ansatz von Tages-, Wochen- und Monatswerten sowie mit einem über die 10 Jahre gemittelten Wert des Niederschlages abzüglich der Verdunstung durchzuführen.

### **7.1 Vorgehensweise**

Zunächst wurde die Geometrie der Bauweise E aus dem Forschungsprojekt FE 05.147/2007/CGB übernommen und entsprechend den Berechnungsanforderungen modifiziert. Danach wurden das FE-Netz generiert und Bodenkennwerte und Randbedingungen zugewiesen. Die Berechnungen mit variablen Randbedingungen wurden für den Niederschlag, der von 1992 bis 2002 am Flughafen München gemessen wurde, unter Berücksichtigung der Evapotranspiration durchgeführt. Im ersten Schritt wurden Simulationen mit einem über die 10 Jahre gemittelten Werten durchlaufen. Darauf aufbauend sollten Berechnungen mit einem über Monate, Wochen und Tage gemittelten Werten des Niederschlages abzüglich der Verdunstung durchgeführt werden.

### **7.2 Modellbildung**

#### **7.2.1 Modellgeometrie**

Den Berechnungen liegt eine im Vergleich zum Forschungsprojekt FE 05.147/2007/CGB leicht modifizierte Modellgeometrie zugrunde (siehe Abbildung 7.1). Die 7,5 m lange Asphaltsschicht wird prinzipiell als wasserundurchlässig angenommen. Da es in der Asphaltsschicht zu keinen Sickerwasserströmungen kommt, wurde die gesamte Schicht für die Simulationen weggelassen.

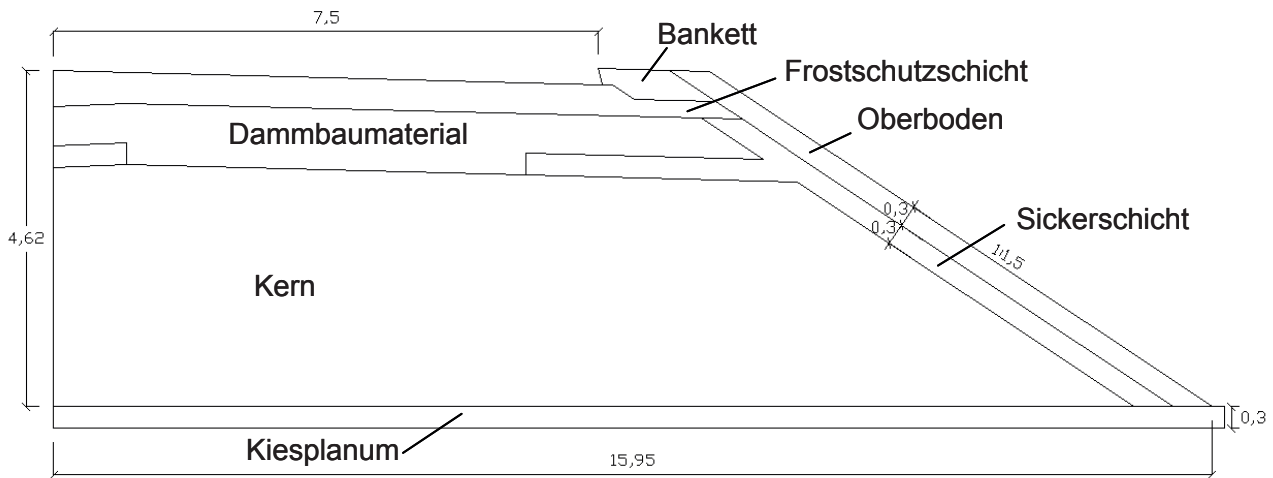


Abbildung 7.1: Modellgeometrie

Der Oberboden des nach der Bauweise E modellierten Straßendamms besitzt eine Dicke von 30 cm. Die zwischen Oberboden und Kernmaterial eingebrachte Dränmatte wurde aus Gründen der Modellierbarkeit als 30 cm dicke Kiesschicht modelliert. Die Böschung ist unter dem Verhältnis von 1:1,5 geneigt und die Aufstandslänge des Damms beträgt 15,95 m.

Die FE-Modelle bestehen aus ca. 48.000 Dreieckselementen. Im Bereich der Oberboden- und der Sickerschicht, in denen die größte Wasserbewegung zu erwarten ist, wurde das Netz jeweils lokal verfeinert.

### 7.2.2 Randbedingungen

Der Niederschlag wurde entsprechend der vom Deutschen Wetterdienst ([www.dwd.de](http://www.dwd.de)) angegebenen Klimadaten für den Flughafen München angesetzt. Zur Vermeidung von numerischen Problemen während der Berechnung musste auf die fiktive Dränschicht verzichtet werden. Da der sich einstellende Oberflächenabfluss wie in Abschnitt 3.2 beschrieben von vielen Faktoren abhängt, konnten diesbezüglich keine gesicherten Annahmen getroffen werden. Auf der sicheren Seite liegend wurde deshalb angenommen, dass sich kein Oberflächenabfluss ausbildet und der Niederschlag abzüglich der abgeschätzten Verdunstung vollständig in den Damm infiltriert. Zur Ermittlung des von der 7,5 m langen Asphaltsschicht abfließenden Niederschlagswassers wurde nach BÜRGER ET AL. (2008) ein Abflussbeiwert von 0,7 angesetzt. Die sich daraus ergebende Wassermenge wurde gleichmäßig unter Beachtung der Böschungsneigung auf Bankett und Böschung verteilt.

Die potentielle Evapotranspiration wurde aus den Klimadaten mit Hilfe der Gras-Referenzverdunstung nach WENDLING (1995) abgeschätzt. Neben den vom DWD angegebenen Klimadaten ist dazu als Eingangsgröße allerdings auch die Nettostrahlung als Differenz der auf die Erdoberfläche einwirkenden und der von Erdoberfläche abgegebenen langwelligen und kurzwelligen Strahlung erforderlich. Diese wurde unter Berücksichtigung der an der Versuchsschüttung am Münchner Flughafen im Zeitraum zwischen Oktober 2008 und Dezember 2010 gemessenen Werten der Nettostrahlung aus den vom DWD für diesen Zeitraum angegebenen Klimadaten folgendermaßen abgeschätzt:

$$R_n = 0,18 \cdot T_{\max} \cdot 1,36^{t_{\text{Sonne}}^{0,494}} \quad [\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}] \quad (7.1)$$

Dabei sind  $T_{\max}$  der Maximalwert der Tageslufttemperatur [°C] und  $t_{\text{Sonne}}$  die tägliche Sonnenscheindauer [h]. Wie die Abbildung 7.2 zeigt, lassen sich die an der Versuchsschüttung gemessenen Werte der Nettostrahlung damit gut wiedergeben.

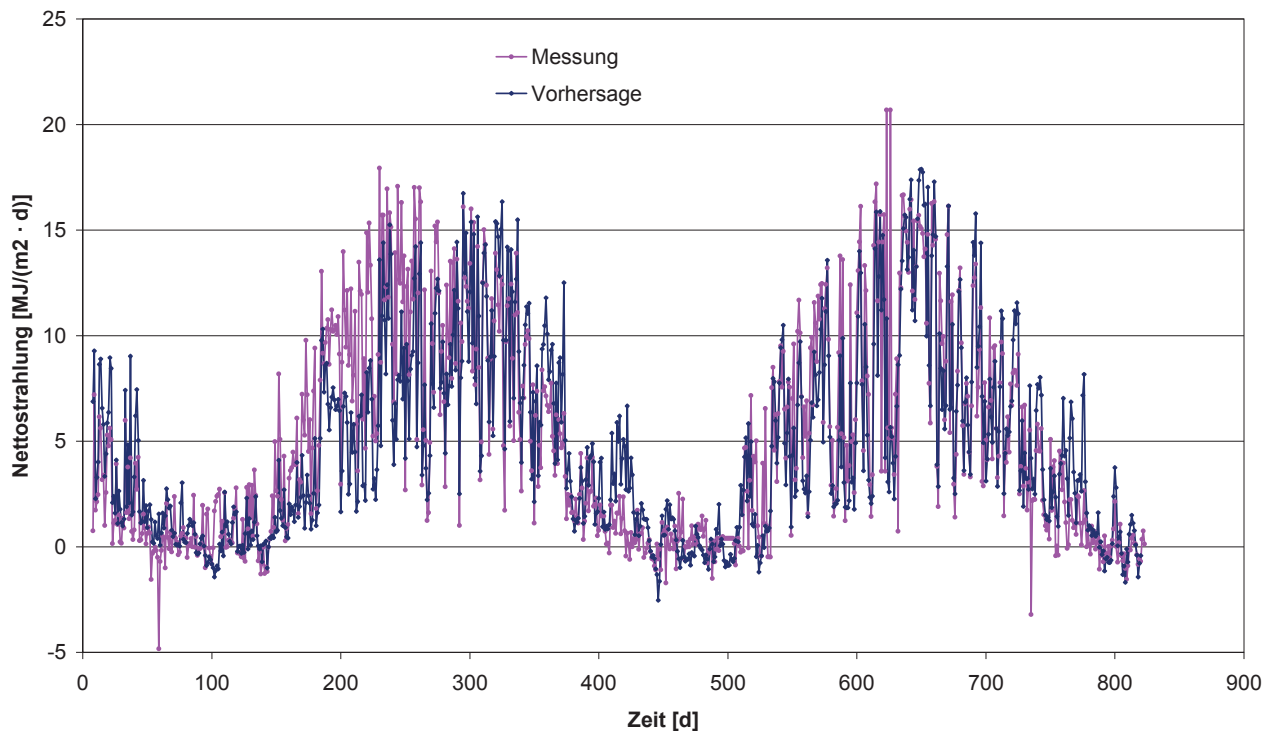


Abbildung 7.2: Vergleich der an der Versuchsschüttung gemessenen Werte der Nettostrahlung mit den nach Gleichung (7.1) abgeschätzten Werten (Zentrum Geotechnik, 2012)

Die tatsächliche Evapotranspiration hängt wie in Abschnitt 3.3.6 beschrieben von den zustandsabhängigen Eigenschaften des Oberbodens ab. Da beim verwendeten Grundwassermodell die an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse vorab ermittelt werden und als Randbedingung vorgegeben sind, kann diese Abhängigkeit während der Berechnung nicht berücksichtigt werden. Vereinfachend wurde deshalb die tatsächliche Verdunstung mit Hilfe dem Bagrov-Verfahren nach dem DVWK Merkblatt 238/1996 ermittelt. Das Bagrov-Verfahren wurde zur Berechnung langjähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung entwickelt. Dazu wurde der Mittelwert des Niederschlages von 859 mm und der Mittelwert der potentiellen Verdunstung von 587 mm aus dem Hydrologischen Atlas von Deutschland (BMU, 2003) herangezogen. Als weitere Eingangsparameter zur Ermittlung des Verhältnisses zwischen der jährlichen potentiellen Verdunstung und der jährlichen tatsächlichen Verdunstung wurden für die Landnutzung eine Grasfläche und für die Bodenart ein Su2 nach der bodenkundlichen Kartieranleitung betrachtet. Damit konnte ein Effektivitätsparameter von 1,8 und daraus letztendlich ein Verhältnis zwischen der tatsächlichen und der potentiellen jährlichen Verdunstung von 0,87 ermittelt werden. Vereinfachend wurden die Tageswerte der mit Hilfe der FAO-Grasreferenzverdunstung ermittelten potentiellen Verdunstung damit reduziert. Dabei

wurde die Böschungsneigung von 1:2 berücksichtigend der Niederschlag im Böschungsbereich entsprechend abgemindert und der Einfluss der Strahlung und damit der Verdunstung berücksichtigt.

Zur Ermittlung der Infiltration wurden anschließend die vom DWD gemessenen Tageswerte des Niederschlages um die tatsächliche Verdunstung reduziert. Für die über 10 Jahre gemittelte durchschnittliche Infiltration ergibt sich damit 0,7 mm/d. Die Abbildung 7.3 stellt neben dem Durchschnittswert die Tages-, Wochen- und Monatswerte für das Bankett dar.

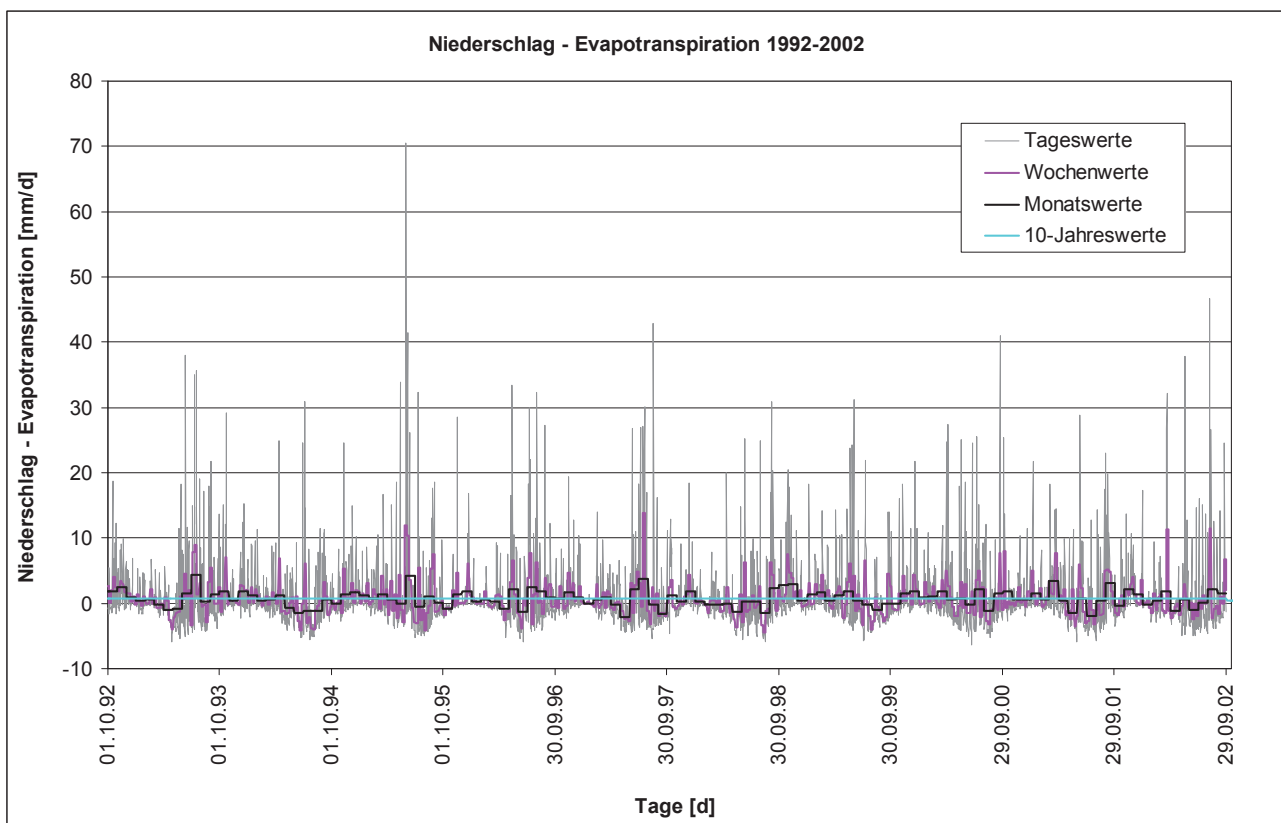


Abbildung 7.3: Tageswerte, Wochenwerte, Monatswerte und Durchschnittswert des Niederschlages abzüglich der Evapotranspiration – Bankett

An der Modellunterseite wurde die Situation eines freien Ausflusses modelliert. Dies geschieht über die Definition eines Potentials entsprechend der geodätischen Höhe. Diese Definition führt dazu, dass Wasser nur im Falle voller Sättigung ausströmen kann, da entsprechend Gleichung (3.23) das Gesamtpotential  $H$  der Summe aus Matrixpotential  $H_m$  und Gravitationspotential  $H_g$  entspricht:

$$H = H_m + H_g$$

und im Falle von  $H = H_g$  das Matrixpotential  $H_m$  gleich Null ist.

Der linke Modellrand ist wie auch bei den zuvor untersuchten Modellen undurchlässig und bildet damit eine feste Berandung. In Abbildung 7.4 ist das Modell mit den festgelegten Randbedingungen dargestellt. Im Bereich der Asphalttschicht an der Dammkrone wurde keine Randbedingung



definiert. Der Asphalt kann als wasserundurchlässig angesehen werden, was in Kombination mit der Straßenneigung von 2,5 % zu einem Abfluss des dort auftreffenden Niederschlags in Richtung Bankett führt. Daher wurde der auf die Asphalterschicht auftreffende Niederschlag nach BÜRGER ET AL. (2008) mit einem Abflussbeiwert von 0,7 abgemindert und gleichmäßig über Bankett und Böschung verteilt. Durch die Modellierung einer Kiesschicht unterhalb des Dammes konnte eine Wasseraufnahme über die Modellunterseite aufgrund der kapillarbrechenden Eigenschaften der Kiesschicht weitgehend minimiert werden.

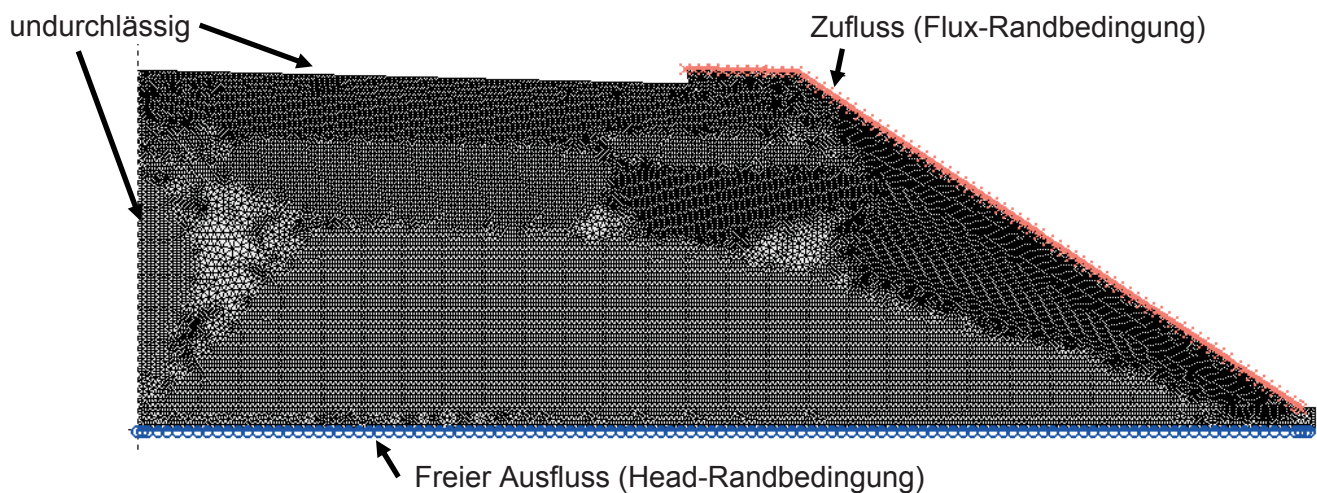


Abbildung 7.4: Modell mit Randbedingungen

### 7.2.3 Anfangsbedingung

Als Anfangsbedingung wurde den Berechnungen im gesamten Modellbereich wie auch im Forschungsprojekt FE 05.147/2007/CGB eine Potentialhöhe  $\psi_h = -1$  m vorgegeben. Dies entspricht der Situation, dass das Grundwasser einen Meter unterhalb des Erdkörpers ansteht. Entsprechend der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung der einzelnen Materialien stellt sich im Anfangszustand die in Abbildung 7.5 dargestellte Verteilung des Sättigungsgrades ein. Im gesamten Modell muss damit gelten, dass das Matrixpotential gleich dem Gravitationspotential ist, also  $\psi_m = -\psi_g = -z$ .

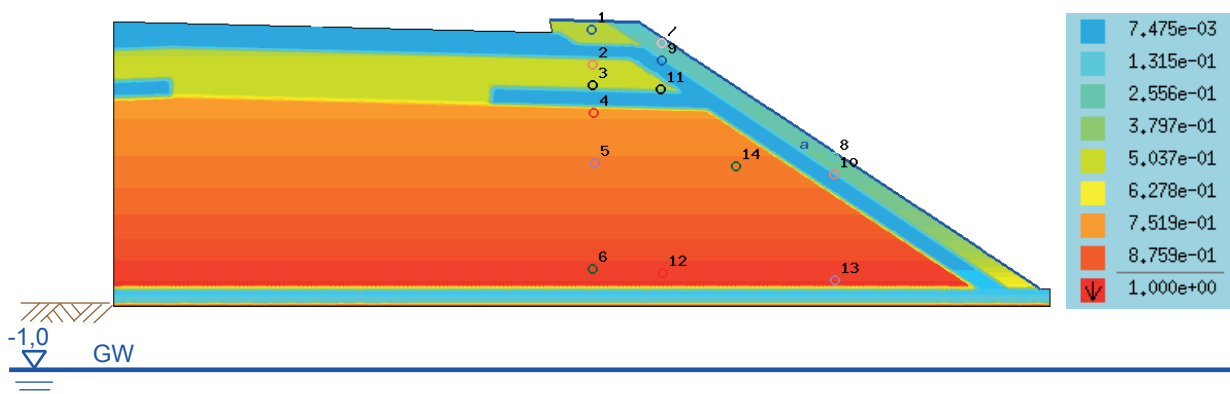


Abbildung 7.5: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand



#### 7.2.4 Bodenkennwerte

Die Bodenkennwerte für Oberboden, Dammbaustoff, Bankett, Sickerschicht und Frostschuttschicht wurden in Anlehnung an das im Forschungsprojekt FE 05.147/2007/CGB beschriebene Modell E2b-1 gewählt. Die van Genuchten-Parameter für das Kernmaterial wurden entsprechend den Ergebnissen der im Zusammenhang mit dem Versuchshügel an einem organogenen Ton durchgeführten Laboruntersuchungen angenommen (siehe Abschnitt 4.2.2.3). Dabei wurden die für den auf der nassen Seite des Proctoroptimums verdichteten Ton ermittelten Kennwerte verwendet. Als Durchlässigkeitsbeiwert im gesättigten Zustand wurde  $k = 1 \cdot 10^{-8}$  m/s angesetzt. Die Hysterese der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung wird in FEFLOW mit einem Ansatz nach SCOTT (1983) beschrieben.

Für die Oberbodenschicht wurden die Bodenkennwerte nach HENNINGS (2000) für den schluffigen bis stark schluffigen Sand (SU / SU\*) übernommen. Diese wurden für unverdichtete natürliche Böden abgeleitet und sind für die in der Regel gering verdichtete Oberbodenschicht als repräsentativ einzustufen. Der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert von  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s wurde mit Hilfe des Ansatzes von BEYER (1964) abgeschätzt.

Zum Schutz des Bodens und Grundwassers sollte das Bankett aus einem schwach durchlässigen Boden ausgebildet werden (RAS-Ew, 2005; BÜRGER ET AL., 2008). Für die Modellberechnungen wurden die Bodenkennwerte eines Sand-Schluff-Gemisches (SU\*) herangezogen. Die van Genuchten-Parameter wurden nach HENNINGS (2000) gewählt. Der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert wurde ebenfalls mit Hilfe des Ansatzes von BEYER (1964) abgeschätzt. Für den Dammbaustoff gelten die gleichen Parameter wie für das Bankett.

Für die Dränschicht, das Frostschutzmaterial und das Kiesplanum wurden die von EKBLAD UND I-SACSSON (2007) an einem schwach schluffigen Kies (6 % Feinkornanteil, GU nach DIN 18196) ermittelten Bodenkennwerte angesetzt. Um eine mögliche Wasseraufnahme im Zuge der Modellberechnungen zu minimieren, wurde der Durchlässigkeitsbeiwert im gesättigten Zustand dabei auf  $k = 5 \cdot 10^{-5}$  m/s verringert.

In nachfolgender Tabelle 7.1 sind die für die Simulationen angesetzten van Genuchten-Parameter sowie die gesättigten Durchlässigkeitsbeiwerte für alle Schichten zusammengestellt.

DIN 18196	SU / SU* <sup>2)</sup>	SU* <sup>2)</sup>	GU <sup>1)</sup>	OT <sup>3)</sup>	
Schicht	Oberboden (Su2)	Dammaustoff / Bankett (Su3)	Drän-/ Kies-schicht/FSS	Kernboden - nass	
				Bewässerung	Entwässerung
$k_f$ -Wert [m/s]	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$
$S_s$	1	1	1	1	1
$S_r$	0.05	0.00	0.048	0.00	0.00
$\alpha$ [m <sup>-1</sup> ]	6.8	2.6	100	1	0.14
n	1.43	1.28	1.79	1.24	1.3
$m = 1-(1/n)$	0.30	0.22	0.44	0.19	0.23
Porenanteil	0.38	0.36	0.23	0.65	0.65

<sup>1)</sup> Ekblad, J.; Isacson, U. (2007): Time domain reflectometry measurements and soil-water characteristic curves of coarse granular materials used in road pavements, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 44, No. 7, pp. 858-872

<sup>2)</sup> 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

<sup>3)</sup> Zentrum Geotechnik der TU München: 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

Tabelle 7.1: Bodenkennwerte

## 7.2.5 Übersicht über die durchgeführten Berechnungen

Zunächst wurden Berechnungen mit einem über die Zeit konstanten Niederschlag durchgeführt. Die vom Deutschen Wetterdienst am Flughafen München gemessenen Klimadaten im Zeitraum von Oktober 1992 bis September 2002 wurden unter Berücksichtigung der Evapotranspiration ausgewertet und über die gesamte Zeit gemittelt. Der auf der Asphalt-schicht anfallende Niederschlag wurde mit dem Abflussbeiwert 0,7 abgemindert und gleichmäßig auf Bankett und Oberboden verteilt.

Zur Ermittlung der Auswirkung unterschiedlicher Niederschlagsverteilungen waren Berechnungen mit veränderlichen Niederschlägen unter Berücksichtigung der Evapotranspiration unter Ansatz von Tageswerten, Wochenwerten und Monatswerten vorgesehen.

## 7.3 Berechnungsergebnisse

### 7.3.1 Sickerwassermengen bei einem Durchschnittswert der Infiltration

Das in der Abbildung 7.6 dargestellte Diagramm zeigt die auf die Länge des Hügels bezogenen Sickerwassermengen im Berechnungsmodell für die über 10 Jahre gemittelte Infiltration. Mit der Zunahme des auf der Asphalt-schicht abfließenden Regenwassers ergibt sich für das Bankett eine konstante Infiltration von 1,8 mm/d und für den Böschungsbereich von 1,5 mm/d. Ausgewertet wurden dabei die Infiltration in den Kern sowie die Abflüsse aus der Dränschicht, aus dem Oberboden und aus dem Kernmaterial. Die Auswertung erfolgte über die in Abschnitt 5.2.5.2 vorgestellten Flu-id-Flux-Linien.

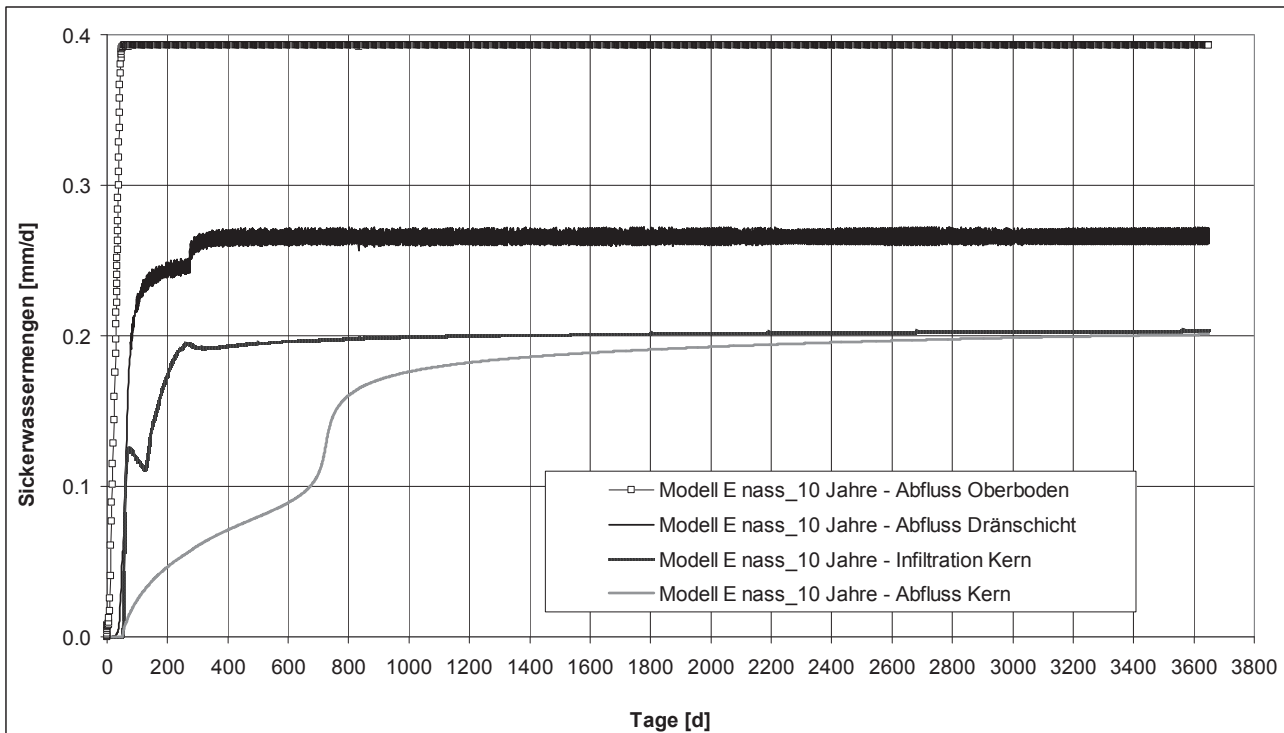


Abbildung 7.6: Sickerwassermengen - 10 Jahres-Werte

Zum Berechnungsende nach 3650 Tagen findet im Oberboden mit 0,39 mm/d der größte Sickerwasserabfluss statt. In der Dränschicht wird mit 0,28 mm/d eine geringere Sickerwassermenge abgeführt. Dies zeigt auch die Verteilung der Strömungslinien aus der Abbildung 7.8. Gegen Ende der 10 Berechnungsjahre erlangen die Infiltration in das Kernmaterial und die Ausflussmenge aus dem Kernmaterial mit jeweils etwa 0,20 mm/d bzw.  $2,3 \cdot 10^{-9}$  m/s den gleichen Wert. Nach 10 Jahren haben sich folglich stationäre Strömungsverhältnisse eingestellt. Dies unterstreicht auch die Verteilung des Sättigungsgrades aus der Abbildung 7.7 – das Kernmaterial im Böschungsbereich ist zu annähernd 100 % wassergesättigt.

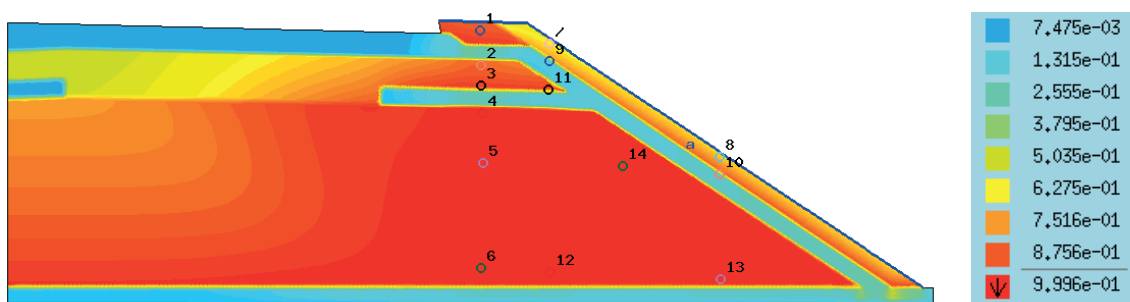


Abbildung 7.7: Verteilung des Sättigungsgrades nach 3650 Tagen

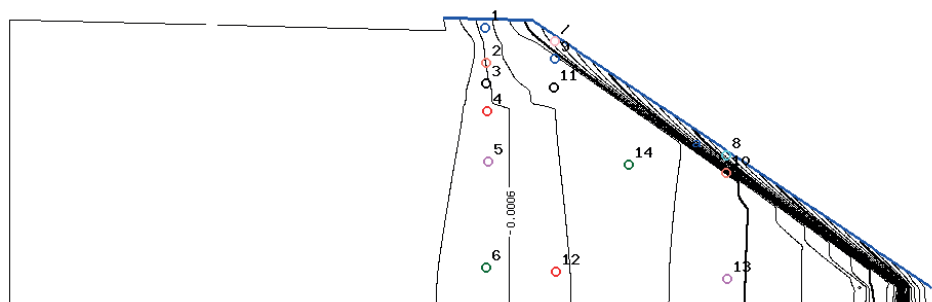


Abbildung 7.8: Strömungslinien nach 3650 Tagen

### 7.3.2 Sickerwassermengen bei zeitlich variablen Niederschlagsverteilungen unter Berücksichtigung der Evapotranspiration

Die Berechnung mit einem über Monate gemittelten Niederschlag konnte nur für 260 Tage durchgeführt werden. Dann stellten sich nicht lösbare numerische Probleme beim Eintreten des auf eine lange Verdunstungsphase folgenden Niederschlags ein (siehe Abbildung 7.9). Es wurden verschiedene Versuche unternommen, ein stabil rechnendes Modell herzustellen, die jedoch keinen Erfolg zeigten.

Aufgrund der nicht vorhandenen Kopplung der Randbedingungen mit den zustandsabhängigen Eigenschaften des Oberbodens kam es bei Ansatz von zeitlich variablen Randbedingungen zu instabilen Berechnungsläufen und Berechnungsabbrüchen. Im Falle von starken Niederschlagsereignissen tritt in der Realität ein Oberflächenabfluss ein. Da die Größe des Oberflächenabflusses aber sowohl vom zustandsabhängigen Sättigungsgrad des Oberbodens als auch von der Größe des Niederschlages abhängt, lässt er sich abgekoppelt von der Wasserbewegung im Boden nicht ausreichend genau ermitteln. Bei Starkniederschlägen gibt die Randbedingung dadurch mehr Wasser vor, welches in den Oberboden eindringen muss, als entsprechend den Saugspannungs- und Durchlässigkeitseigenschaften des Oberbodens aufgenommen werden kann. In umgekehrter Weise wird dem Oberboden im Modell bei lang anhaltenden Trockenphasen mehr Wasser über die Randbedingung entzogen, als vom Oberboden nachgeführt werden kann.

Es ist damit festzuhalten, dass Grundwassermodelle wie FEFLOW, welche die an Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse des Wasserhaushaltes nicht abbilden, nicht geeignet sind, um die sich bei zeitlich variablen Randbedingungen einstellenden Sickerwassermengen abzubilden.

Die weiteren Berechnungen für die Bauweise E wurden deshalb mit dem Programm VADOSE/W durchgeführt.

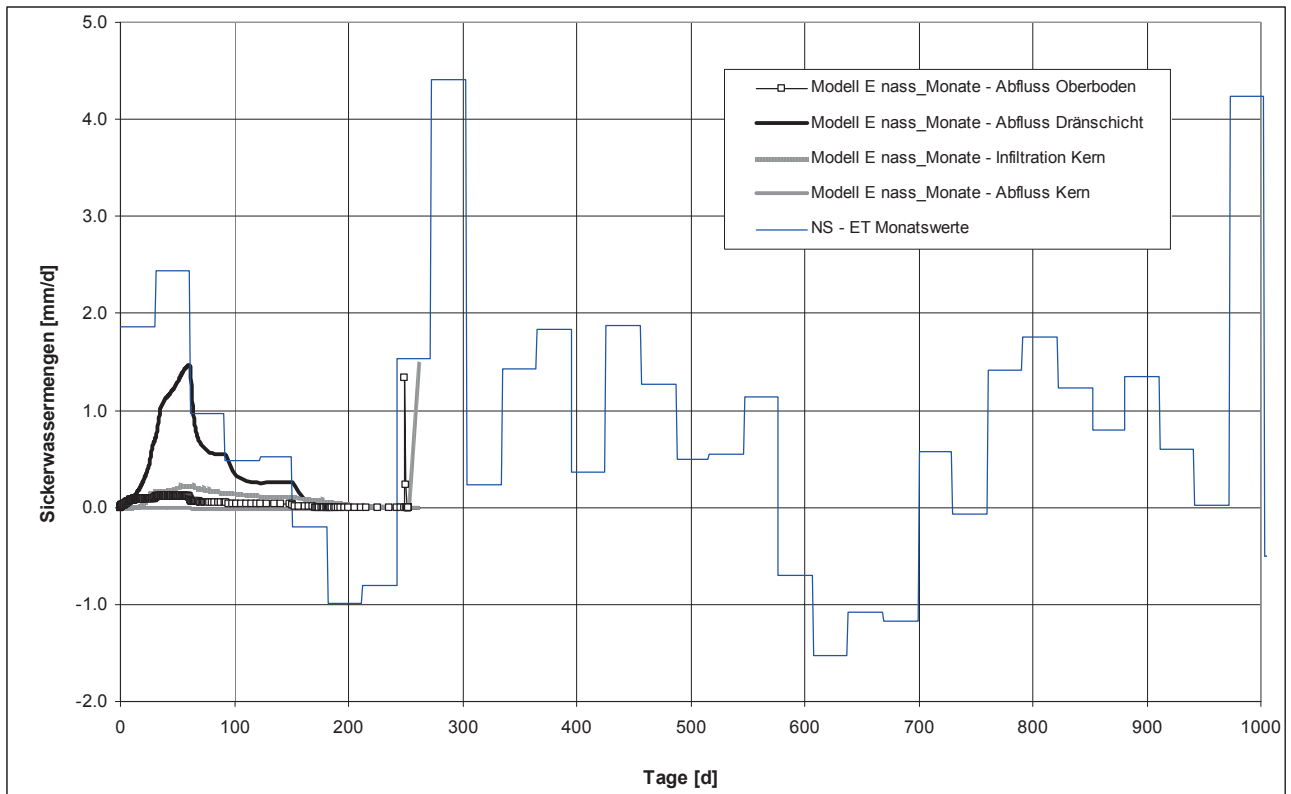


Abbildung 7.9: Sickerwassermengen in Abhängigkeit von Niederschlag bzw. Verdunstung – Berechnungen mit Monatswerten

## **8 Berechnungen zum Wasserhaushalt der Bauweise E – VADOSE/W**

Zur Beurteilung der Wirksamkeit der Bauweise E wurden zusätzlich zu den Berechnungen mit FEFLOW aufgrund der beschriebenen Probleme bei der Simulation mit FEFLOW Berechnungen mit VADOSE/W durchgeführt. Um die Ergebnisse mit den anhand von FEFLOW ermittelten Ergebnissen vergleichen zu können, wurden die gleiche Geometrie, die gleichen Materialeigenschaften, und die gleichen Rand- und Anfangsbedingungen verwendet.

### **8.1 Vorgehensweise**

Als Grundlage für die Berechnungen wurde dieselbe Modellgeometrie wie bei den Berechnungen mit FEFLOW verwendet. Nach Erstellung der Modellgeometrie wurden die Materialeigenschaften der unterschiedlichen Schichten definiert und ein Finite-Elemente-Netz generiert. In einem ersten Schritt wurde eine instationäre Berechnung durchgeführt, wobei als Randbedingung die meteorologischen Daten, die vom 01.10.1992 bis 30.09.2002 vom DWD am Flughafen München aufgezeichnet wurden, angesetzt wurden. In einem zweiten Schritt – aufbauend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Simulation – wurde der Durchschnitt der täglichen absoluten Infiltrationsraten (Infiltration - Verdunstung) gebildet und als konstante Randbedingung angesetzt. Die Berechnung wurde bis zum Erreichen eines stationären Zustandes durchgeführt. Ferner wurden zusätzliche Berechnungen für veränderte Materialeigenschaften und veränderte geometrische Verhältnisse durchgeführt.

### **8.2 Modellbildung**

#### **8.2.1 Modellgeometrie**

Die Geometrie ist ähnlich der, die in FEFLOW verwendet wurde (siehe Abschnitt 7.2.1). Das Modell wurde lediglich etwas verkleinert, um die Berechnungen zu beschleunigen. Dazu wurde gegenüber den Berechnungen mit FEFLOW nur ein Teil des unterhalb der als undurchlässig angenommenen Fahrbahn abgebildet (siehe Abbildung 8.1).

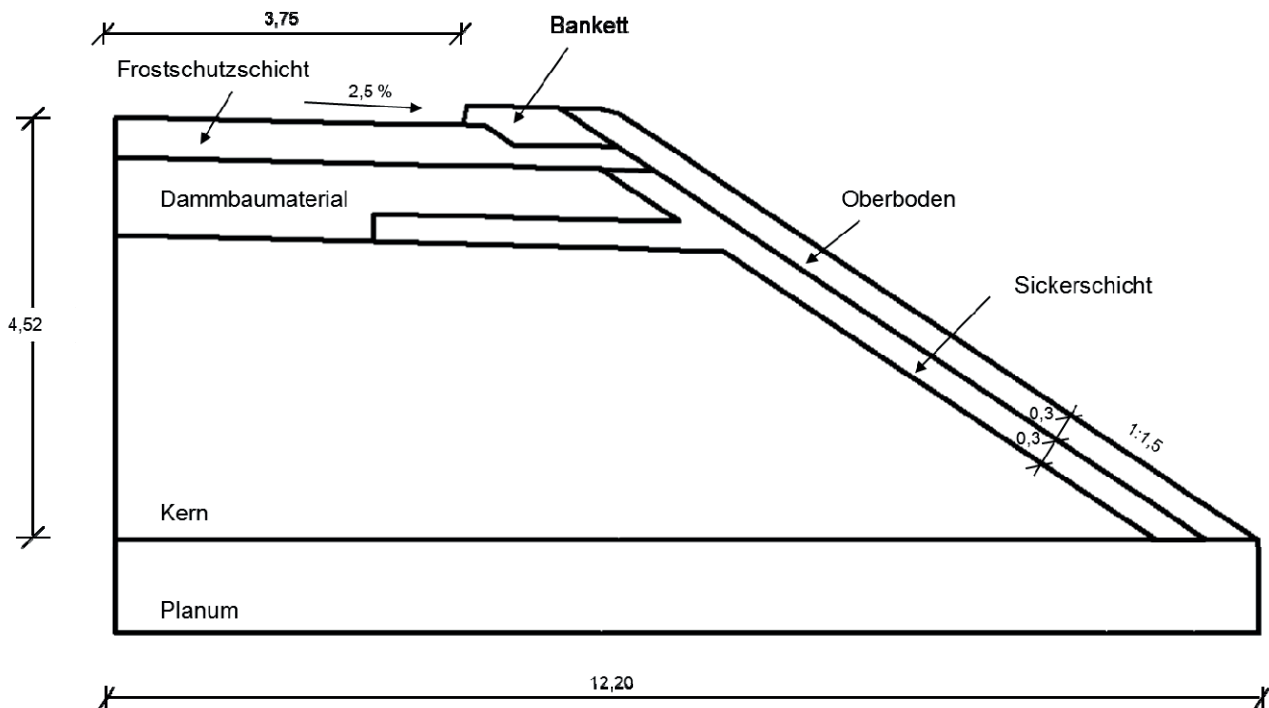


Abbildung 8.1: Modellgeometrie

Da die Asphalttschicht als wasserundurchlässig betrachtet wird, wurde sie zur Vereinfachung nicht im Modell berücksichtigt. Die Dicke des Oberbodens beträgt 30 cm, während an der Basis der Böschung eine 1 m dicke Schicht aus grobkörnigem Boden hinzugefügt wird. Die eigentlich wenige Zentimeter messende Dränmatte wurde als 30 cm mächtige Schicht aus grobkörnigem Boden modelliert. Die Böschungskrone ist insgesamt 5,28 m lang und besitzt eine Neigung von 2,5 %. Die Neigung der anschließenden Böschung beträgt 1:1,5.

Vorberechnungen haben gezeigt, dass die Berechnungsergebnisse eine Abhängigkeit von der Feinheit des generierten Finite-Elemente-Netzes zeigen. Daher wurden unterschiedliche Netze getestet, variierend von 3200 bis 9000 Elementen, wobei die Anzahl der Elemente hauptsächlich im Bereich des Oberbodens, der Dränschicht und in den ersten Zentimetern des Kerns verändert wurde. Die Berechnungen mit einem relativ groben FE-Netz wiesen keine ausreichende Genauigkeit auf, während sich für sehr feine Netze sehr lange Rechenzeiten ergaben. Das für die Durchführung der Simulationen ausgewählte Netz besteht aus 5339 im Wesentlichen viereckigen Elementen (siehe Abbildung 8.2). Das Netz wurde im Bereich des Oberbodens und in den ersten Zentimetern der Dränschicht verfeinert, da dort infolge der Nähe zur Bodenoberfläche maßgebliche Wasserbewegungen stattfinden. Die ersten Zentimeter des Kerns besitzen ebenso ein feineres Netz, um numerische Probleme bei der Abbildung der Infiltration von der Dränschicht in den Kern zu vermeiden.



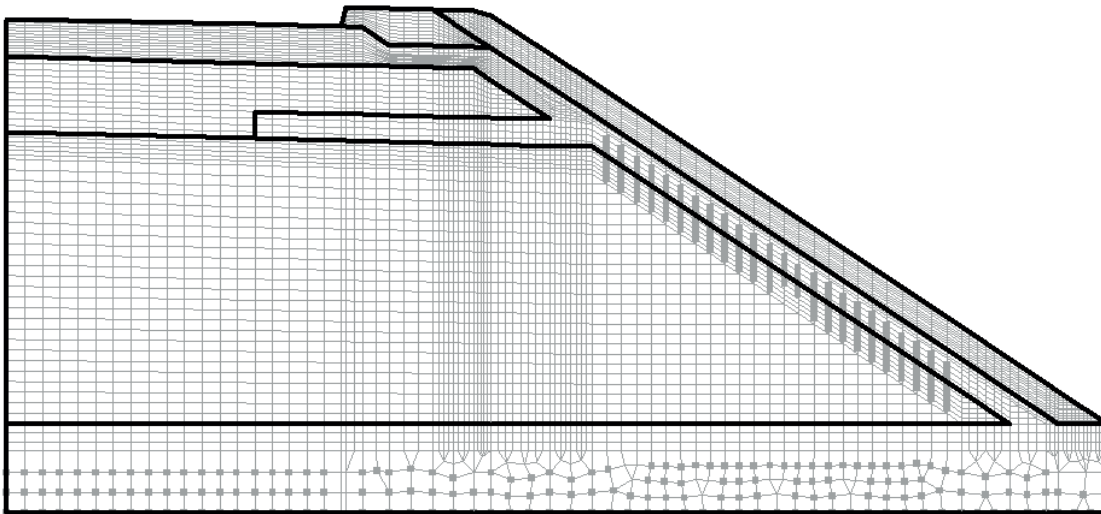


Abbildung 8.2: Finite-Elemente-Netz

### 8.2.2 Randbedingungen

Die Randbedingungen, die für dieses Modell verwendet wurden, sind in der Abbildung 8.3 zu sehen. An der Basis des Planums wurde ein hydraulisches Potential von -1 m angesetzt. Dies beschreibt die Lage des Grundwasserspiegels und ermöglicht die freie Entwässerung des Kerns. Die linken und rechten Seiten des Damms sowie der Teil an der Oberfläche, der tatsächlich mit Asphalt bedeckt ist, wurden als undurchlässig definiert und daher wurden dort keine Randbedingungen angesetzt. Auf der Böschungsschulter im Bereich des Banketts und auf dem die Böschung bedeckenden Oberboden wurde eine Klimarandbedingung definiert.

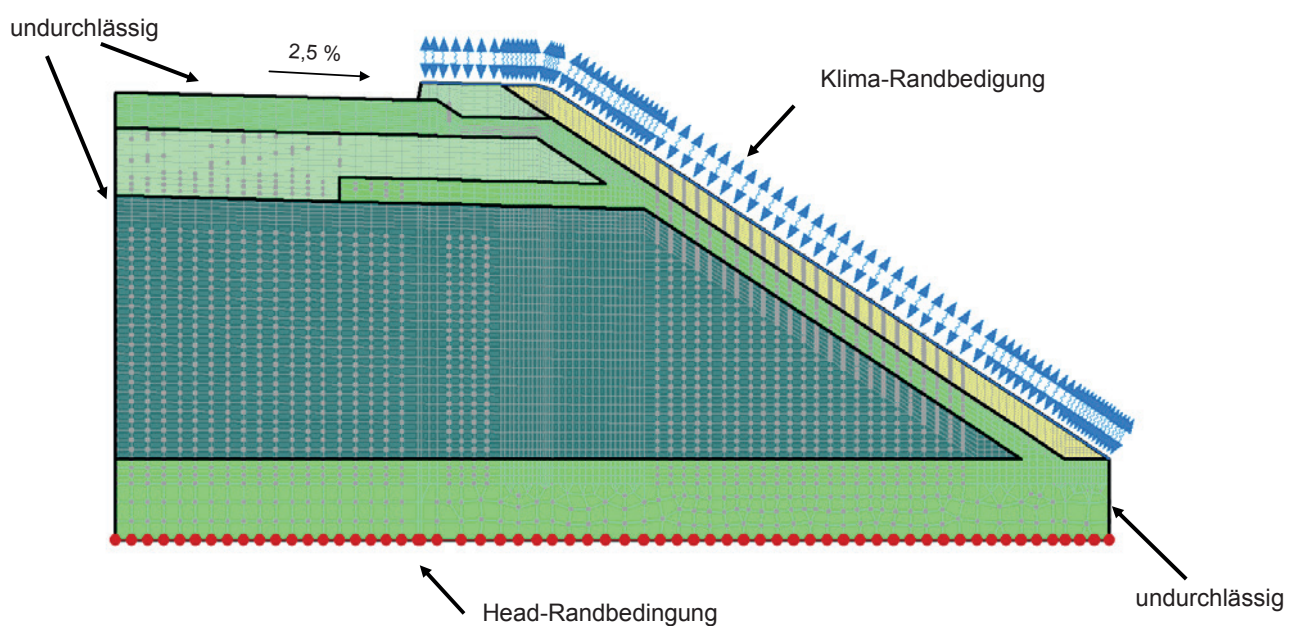


Abbildung 8.3: Modell mit Randbedingungen

Eine Klima-Randbedingung umfasst in VADOSE/W für jeden Zeitschritt die Niederschlagsmenge, die minimale und maximale Temperatur, die minimale und maximale relative Luftfeuchtigkeit, die mittlere Windgeschwindigkeit sowie die durchschnittliche Sonneneinstrahlung. Für die Erstellung einer solchen Datei, wurden die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) für den Zeitraum von Oktober 1992 bis September 2002 zur Verfügung gestellten meteorologischen Daten am Flughafen München berücksichtigt. Diese beinhalten die tägliche Niederschlagsmenge, die Minimal- und Maximaltemperatur, die tägliche durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit, die mittlere Windgeschwindigkeit, die Sonnenscheindauer und die tägliche Bewölkung.

Der Oberflächenabfluss auf der 7,5 m langen Asphaltsschicht wurde unter Berücksichtigung der Niederschlags-Abflusskurve nach BÜRGER ET AL. (2008) ermittelt (siehe Abbildung 8.4). Außerdem wurde angenommen, dass sich der Oberflächenabfluss gleichmäßig über den Böschungsbereich verteilt.

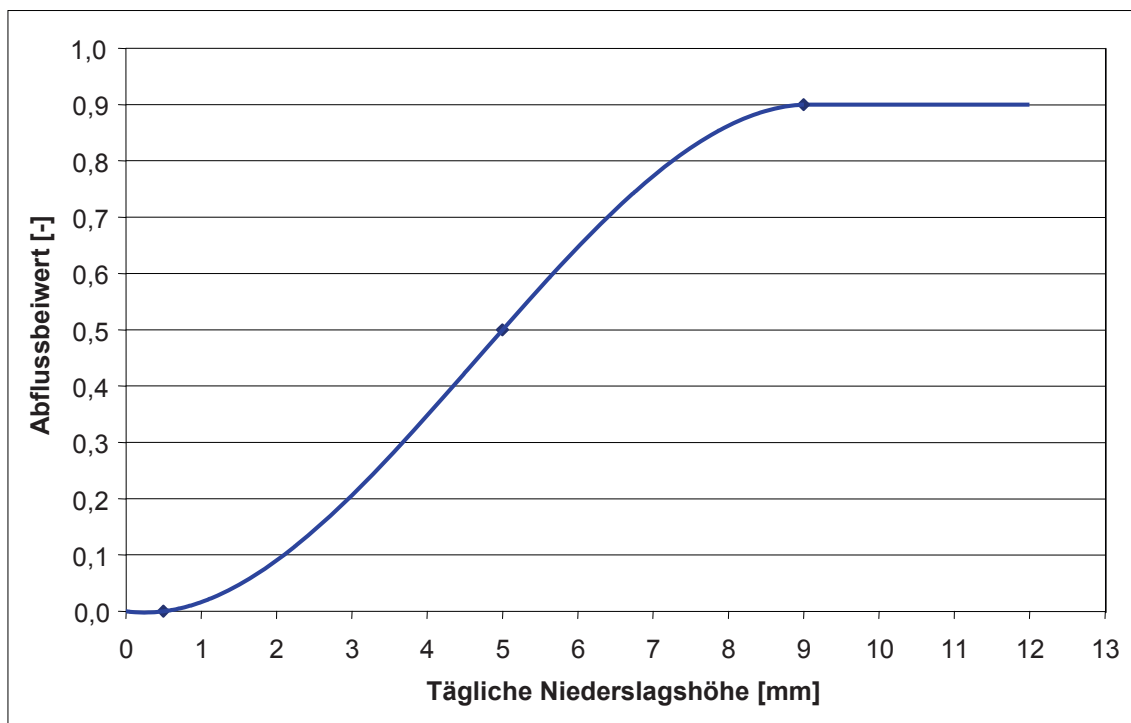


Abbildung 8.4: Niederschlags-Abflusskurve für Tagesniederschläge auf einer versiegelten Fläche nach BÜRGER ET AL. (2008)

Die relative Luftfeuchtigkeit ist anhand von maximalen und minimalen Werten zu definieren. Für die in VADOSE/W einzugebenden Klimadaten werden die Tageswerte der minimalen und maximalen relativen Luftfeuchtigkeit benötigt. Da der Deutsche Wetterdienst nur die tägliche durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit anbietet, wurden die minimalen und maximalen Werte aus den verfügbaren Klimadaten abgeleitet. Dazu wurde folgendermaßen vorgegangen.

Die relative Luftfeuchtigkeit ist definiert als:

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

wobei

RH = relative Feuchtigkeit (%)

$e_a$  = tatsächlicher Dampfdruck (kPa)

$e_0(T)$  = Sättigungsdampfdruck (kPa)

T = Lufttemperatur

Der Sättigungsdampfdruck kann durch folgende Gleichung berechnet werden:

$$e_0(T) = 0.6108 \exp \left[ \frac{17.27 \cdot T}{T + 237.3} \right] \quad (8.2)$$

Die maximale relative Luftfeuchtigkeit tritt bei der minimalen Temperatur auf, während die minimale relative Luftfeuchtigkeit bei der maximalen Temperatur auftritt. Da die erforderlichen Temperatur-Daten vom DWD zur Verfügung gestellt werden, kann der Sättigungsdampfdruck für  $T_{\min}$  und  $T_{\max}$  berechnet werden.

Nach ALLEN ET AL. (1998) kann der tatsächliche Dampfdruck aus folgender Gleichung berechnet werden:

$$e_a = RH_{\text{mittel}} \left[ \frac{e_0(T_{\max}) + e_0(T_{\min})}{2} \right] \quad (8.3)$$

wobei  $RH_{\text{mittel}}$  = durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit, definiert zu

$$RH_{\text{mittel}} = \frac{RH_{\max} + RH_{\min}}{2} \quad (8.4)$$

Diese Definition entspricht formell allerdings nicht der täglichen durchschnittlichen relativen Luftfeuchtigkeit, wie sie vom Deutschen Wetterdienst angegeben wird.

Allerdings haben die Messungen der Maximal- und Minimalwerte für die relative Luftfeuchtigkeit ( $RH_{\max}$  und  $RH_{\min}$ ) an der am Flughafen München platzierten Klimastation gezeigt, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den auf der Basis der maximalen und minimalen Parameter errechneten Mittelwerten und der vom DWD bereitgestellten Tagesmittelwerten für den gleichen Zeitraum gibt. Dafür wurde die tägliche durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit für den Zeitraum zwischen 2008 und 2010 aus den an der Versuchsschüttung gemessenen Werten ermittelt und mit den vom Deutschen Wetterdienst für den betreffenden Zeitraum für den Flughafen München angegebenen Werten verglichen. Es zeigten sich dabei keine signifikanten Unterschiede, weshalb anstelle von  $RH_{\text{mittel}}$  die vom DWD angegebene tägliche mittlere relative Luftfeuchtigkeit für die Berechnung des tatsächlichen Dampfdruckes in die Gleichung (8.4) eingesetzt werden kann. Letztendlich kann die minimale und maximale relative Luftfeuchtigkeit damit durch folgende Gleichungen abgeschätzt werden:

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

und

$$RH_{\max} = \frac{e_a}{e_0(T_{\min})} \quad (8.6)$$

Da der DWD keine Angaben hinsichtlich der Sonnenenergie macht, wird die durchschnittliche Nettostrahlung nach Gleichung (7.1) berechnet.

Für die Berechnung der Transpiration müssen der Blattflächenindex, die Wurzeltiefe und die Funktion für den Limiting Factor (Verhältnis der tatsächlichen Transpiration zur potentiellen Transpiration) definiert werden. Die Wurzeltiefe und die Grashöhe werden über den Berechnungszeitraum mit 30 cm bzw. 12 cm als konstant angenommen. Der Blattflächenindex LAI gibt das Verhältnis zwischen der Blattfläche und der Bodenfläche wieder und wird verwendet, um zu beschreiben, wie sich die aus der Sonneneinstrahlung resultierende Energie zwischen der Bodenoberfläche (direkte Verdunstung) und den Pflanzen (Transpiration) aufteilt. In Abhängigkeit von der Höhe des Bewuchses kann der Blattflächenindex LAI nach Allen et al. (2008) folgendermaßen abgeschätzt werden:

$$LAI = 24 \cdot h \quad (8.7)$$

wobei  $h$  = Höhe des Bewuchses [m]

Unter den genannten Annahmen ergibt sich damit ein Blattflächenindex von 2,88.

Zur Beschreibung der tatsächlichen Evapotranspiration muss die Abhängigkeit der Wasseraufnahme durch die Vegetation vom Bodenwassergehalt berücksichtigt werden. Dazu wird vom Programm angenommen, dass die tatsächliche Evapotranspiration der potentiellen Evapotranspiration entspricht, solange die Saugspannungen im Oberboden 30 kPa nicht überschreiten, und dass die tatsächliche Evapotranspiration danach linear auf Null bei einer Saugspannung von 1500 kPa abnimmt (siehe Abbildung 8.5). Es wird damit davon ausgegangen, dass die Pflanzen bei 1500 kPa den permanenten Welkepunkt erreichen und kein Wasser mehr aus dem Oberboden aufnehmen können.

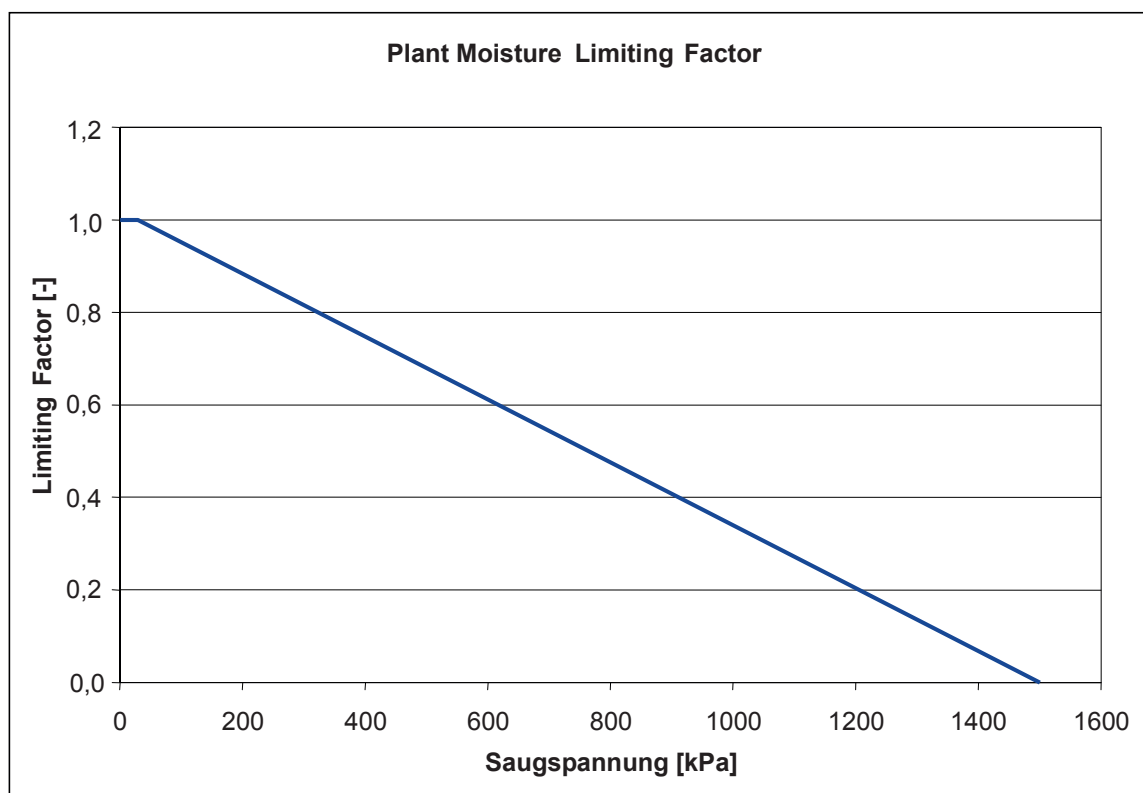


Abbildung 8.5: Verhältnis der tatsächlichen Transpiration zur potentiellen Transpiration („Limiting Factor“) in Abhängigkeit von der Saugspannung

### 8.2.3 Anfangsbedingung

Vergleichbar mit den in FEFLOW durchgeführten Berechnungen wurde als Anfangsbedingung eine Potentialverteilung definiert, die sich bei einem Grundwasserspiegel, der einen Meter unterhalb der Dammschle lies, einstellt.

### 8.2.4 Bodenkennwerte

Die hydraulischen Eigenschaften der Böden werden mit Hilfe des Modells nach van Genuchten & Mualem beschrieben. Die verwendeten Bodenkennwerte entsprechen denen, die für die FEFLOW-Simulationen angesetzt wurden. Da VADOSE/W die Hysterese der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung nicht berücksichtigt, wurden für das Kernmaterial nur die Parameter der Entwässerungskurve verwendet. Die verwendeten Werte sind in der Tabelle 8.1 zusammengefasst. In der Abbildung 8.6 ist die Funktion der hydraulischen Leitfähigkeit (Wasserdurchlässigkeit in Abhängigkeit von der Saugspannung) der verschiedenen Materialien dargestellt.

DIN 18196	SU/SU*	SU*	GU	OT
Schicht	Oberboden	Dammbau- stoff/Bankett (Su3)	Drän-/Planum/FSS	Kernboden-nass Entwässerung
Hydraulische Parameter				
$k_f$ -Wert [m/s]	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-8}$
$\theta_{sat}$	0.38	0.36	0.23	0.65
$\theta_{res}$	0.019	0.000	0.011	0.000
$\alpha$ [ $m^{-1}$ ]	6.80	2.60	100.00	0.14
$n$	1.43	1.28	1.79	1.30
$m = 1-(1/n)$	0.30	0.22	0.44	0.23
Thermische Parameter				
$\lambda_{solids}$ [kJ/(Tag · m · °C)]	382.430 <sup>(1)</sup>	382.430 <sup>(1)</sup>	213.885 <sup>(1)</sup>	1048.032 <sup>(1)</sup>
$\lambda_{dry}$ [kJ/(Tag · m · °C)]	39.0 <sup>(1)</sup>	39.0 <sup>(1)</sup>	36.0 <sup>(1)</sup>	43.2 <sup>(1)</sup>
$c_{p\_solids}$ [kJ/(g · °C)]	$0.71 \cdot 10^{-3}$ <sup>(2)</sup>	$0.71 \cdot 10^{-3}$ <sup>(2)</sup>	$0.71 \cdot 10^{-3}$ <sup>(2)</sup>	$1.674 \cdot 10^{-3}$ <sup>(2)</sup>
$c_{v\_dry}$ [kJ/ (m <sup>3</sup> · °C)]	1500 <sup>(1)</sup>	1500 <sup>(1)</sup>	1500 <sup>(1)</sup>	1500 <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> nach VDI 4640 – Teil 1

<sup>(2)</sup> nach KRAHN (2004)

Tabelle 8.1: Hydraulische und thermische Parameter für die verschiedenen Materialien

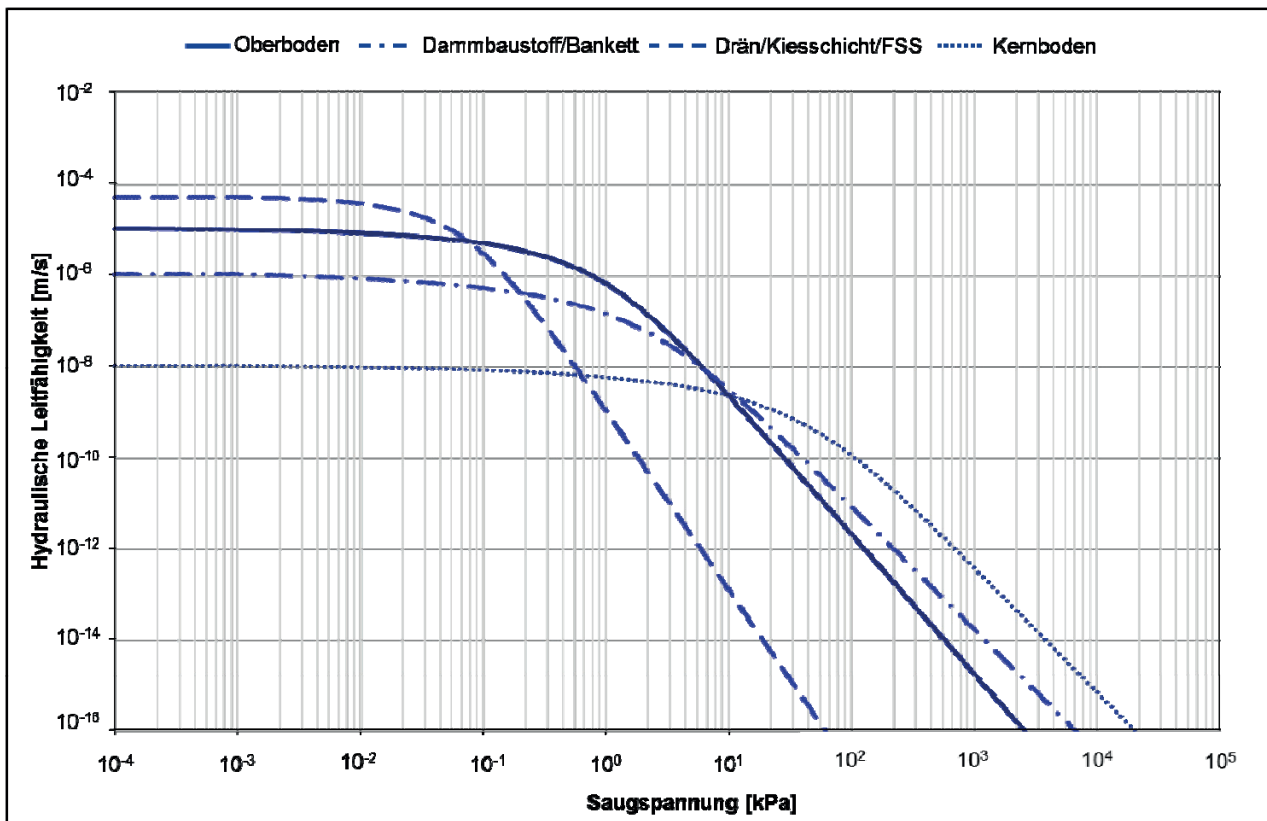


Abbildung 8.6: Hydraulische Leitfähigkeit der verwendeten Baustoffe in Abhängigkeit von der Saugspannung

## 8.3 Berechnungsergebnisse

### 8.3.1 Sickerwassermengen bei Tageswerten der Infiltration/Verdunstung

Die Abbildung 8.7 stellt die akkumulierten Werte der an der Dammoberfläche in Abhängigkeit von der Zeit stattfindenden Prozesse dar. Von 1992 bis 2002 wurden 7000 mm Niederschlag auf die Oberfläche aufgebracht. Ca. 11,3 % (790 mm) laufen als Oberflächenabfluss auf der Böschung ab, während 6236 mm Wasser in den Damm infiltrieren. Davon werden etwa 52 % (3253 mm) über die Transpiration an die Atmosphäre abgegeben. Aufgrund des hohen Wertes für den Blattflächenindex von 2,88 ist die Evaporation so gering, dass sie in der Abbildung 8.7 nicht aufgeführt ist.

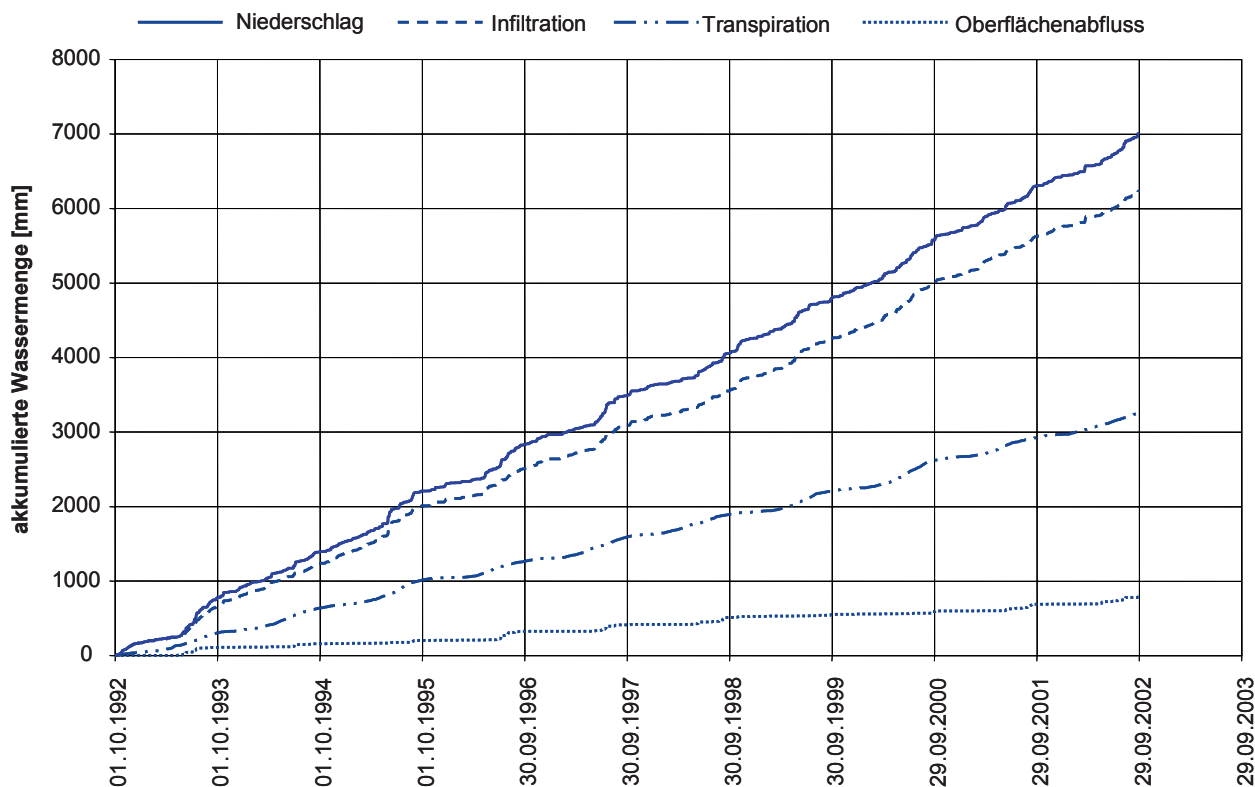


Abbildung 8.7: Prozesse an der Bodenoberfläche, ermittelt mit VADOSE/W

Die akkumulierten Werte für die Infiltration in den Kern und den Abfluss aus dem Kern sind in Abhängigkeit von der Zeit in der Abbildung 8.8 dargestellt. Von den 630 mm, die im Berechnungszeitraum in den Kern eindringen, fließen etwa 593 mm (94 %) über die Basis des Kerns ab. Von Oktober 1992 bis Oktober 1995 nimmt der Wassergehalt im Kern zu und bleibt im Zeitraum von Oktober 1996 bis September 2002 relativ konstant. Für den Zeitraum von Oktober 1996 bis September 2002 beträgt der durchschnittliche Abfluss aus dem Kern 60 mm/a bzw. 0,16 mm/d.

In der Abbildung 8.9 sind die Sickerwassermengen für den Oberboden und die Dränschicht dargestellt. Die absolute Infiltration in den Damm (Niederschlag - Transpiration) beträgt 2983 mm. Davon fließen 872 mm im Oberboden ab, während 2282 mm in die darunterliegende Dränschicht sickern. Der tatsächliche Abfluss in der Dränschicht beläuft sich auf 1675 mm, der Rest infiltriert in das Kernmaterial.



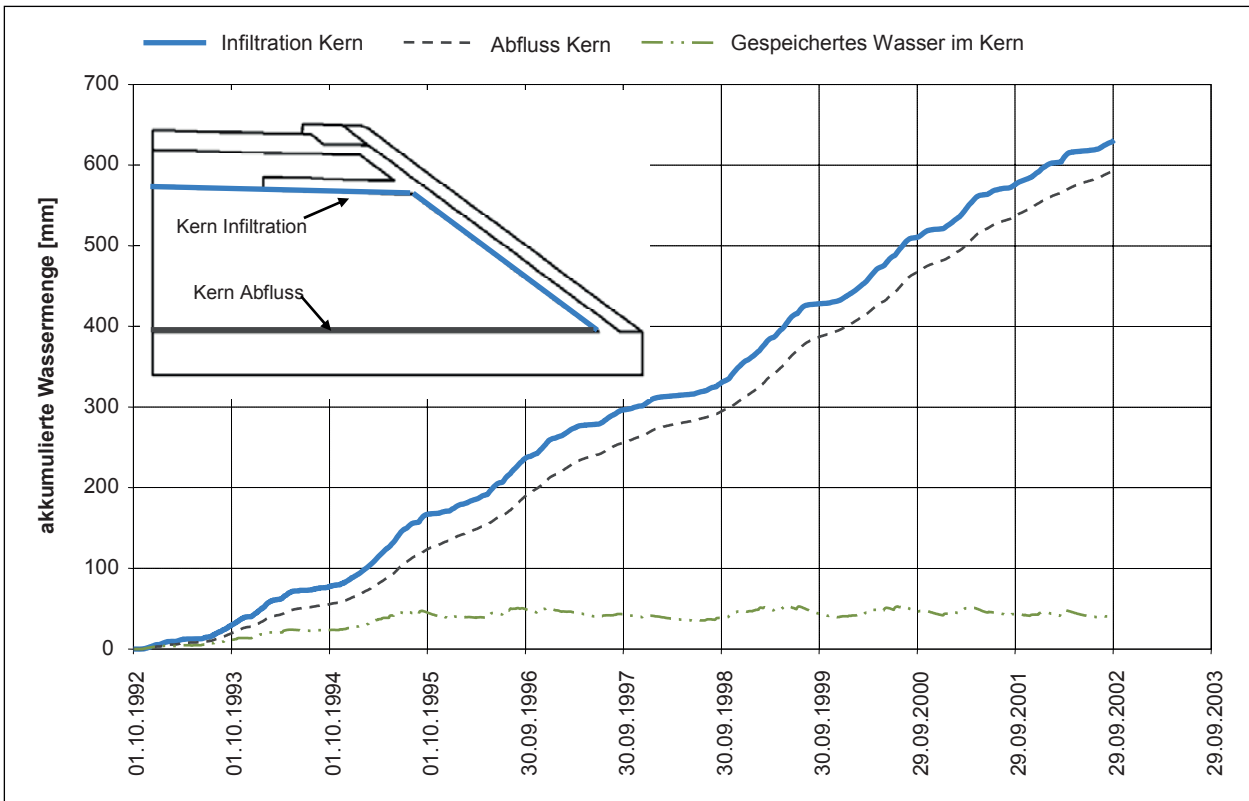


Abbildung 8.8: Akkumulierte Sickerwassermengen für die Infiltration in den Kern und den Abfluss aus dem Kern

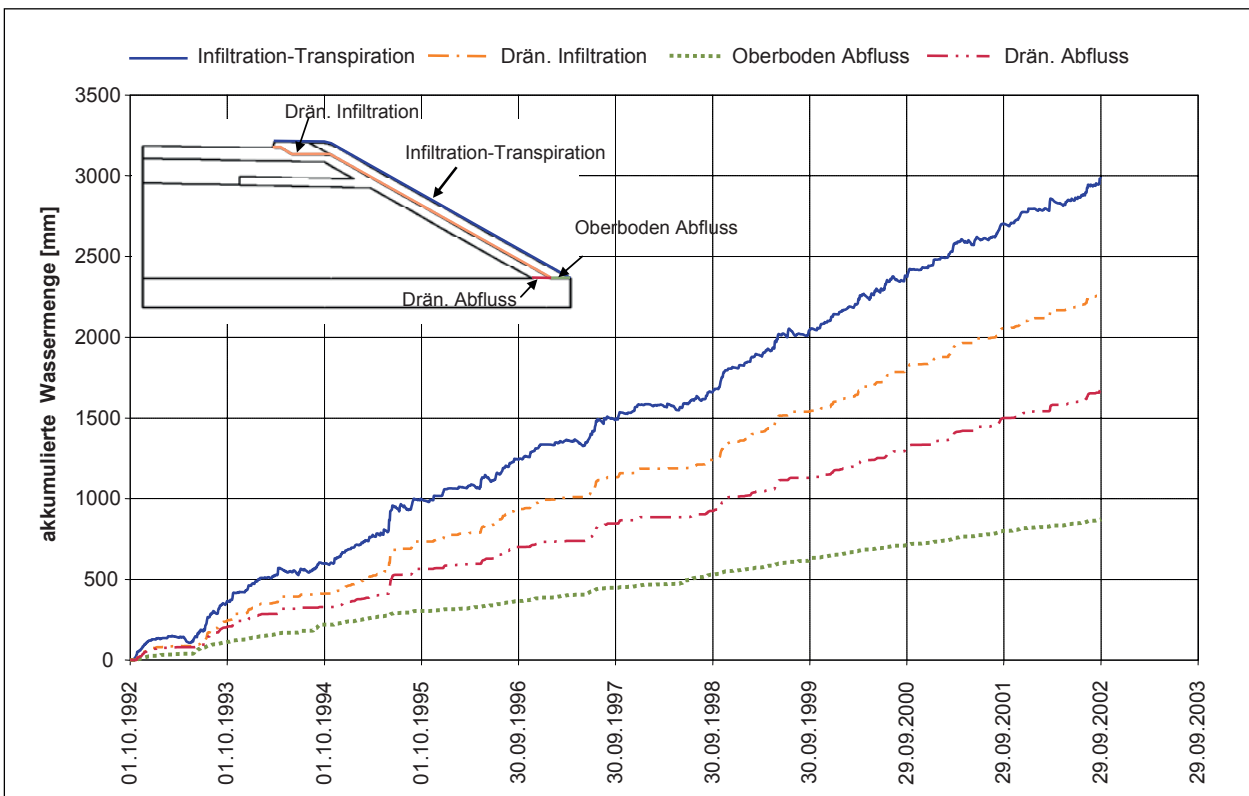


Abbildung 8.9: Akkumulierte Sickerwassermengen für Oberboden und Dränschicht

### 8.3.2 Sickerwassermengen bei einem Durchschnittswert der Infiltration

#### 8.3.2.1 Randbedingungen

In einem nächsten Schritt wurden Berechnungen mit stationären Randbedingungen durchgeführt. Basierend auf den Ergebnissen der instationären Analyse wurde die tägliche Infiltrationsrate für den Zeitraum von 10 Jahren als Randbedingung auf Bankett und Oberboden aufgebracht. Die tägliche durchschnittliche Infiltrationsrate wurde wie folgt berechnet:

$$Q = \frac{\sum \text{Infiltration} - \sum \text{Transpiration}}{3650} \text{ [m}^3\text{/d]}$$

Dadurch ergibt sich eine durchschnittliche Infiltrationsrate von 1,5 mm/d auf der Böschungsschulter und 1,3 mm/d auf der Böschungsoberfläche. Die Berechnung wurde bis zum Erreichen eines stationären Zustandes durchgeführt.

#### 8.3.2.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Berechnung sind in der Abbildung 8.10 dargestellt. Nach ca. 1500 Tagen stellen sich stationäre Verhältnisse ein. Von der aufgegeben Wassermengen fließen 0,37 mm/d im Oberboden ab und infiltrieren 0,44 mm/d in die Dränschicht. Der geringere Teil der in die Dränschicht infiltrierenden Wassermenge wird in der Dränschicht zum Böschungsfuß abgeführt (0,18 mm/d). Der Rest von 0,27 mm/d infiltriert in den Kern. Der Ausfluss aus dem Kern beträgt in diesem Fall 0,27 mm/d. Das ist ein 1,7-fach höherer Wert als der in der instationären Berechnung ermittelte Wert von 0,16 mm/d.

In der Abbildung 8.11 werden die Ergebnisse der Berechnungen mit stationären und instationären Randbedingungen verglichen. Der größte Unterschied zeigt sich hierbei bei der Infiltration in die Dränschicht und dem Abfluss aus der Dränschicht. So fließt bei der Berechnung mit instationären Randbedingungen eine geringere Wassermenge im Oberboden ab und infiltriert eine größere Wassermenge in die Dränschicht als bei der Berechnung mit einer gleichmäßigen Infiltration. Die Infiltration in das Kernmaterial ist bei der Berechnung mit Tageswerten der Infiltration aber dennoch geringer als bei der Berechnung mit einer gleichmäßigen Infiltration.

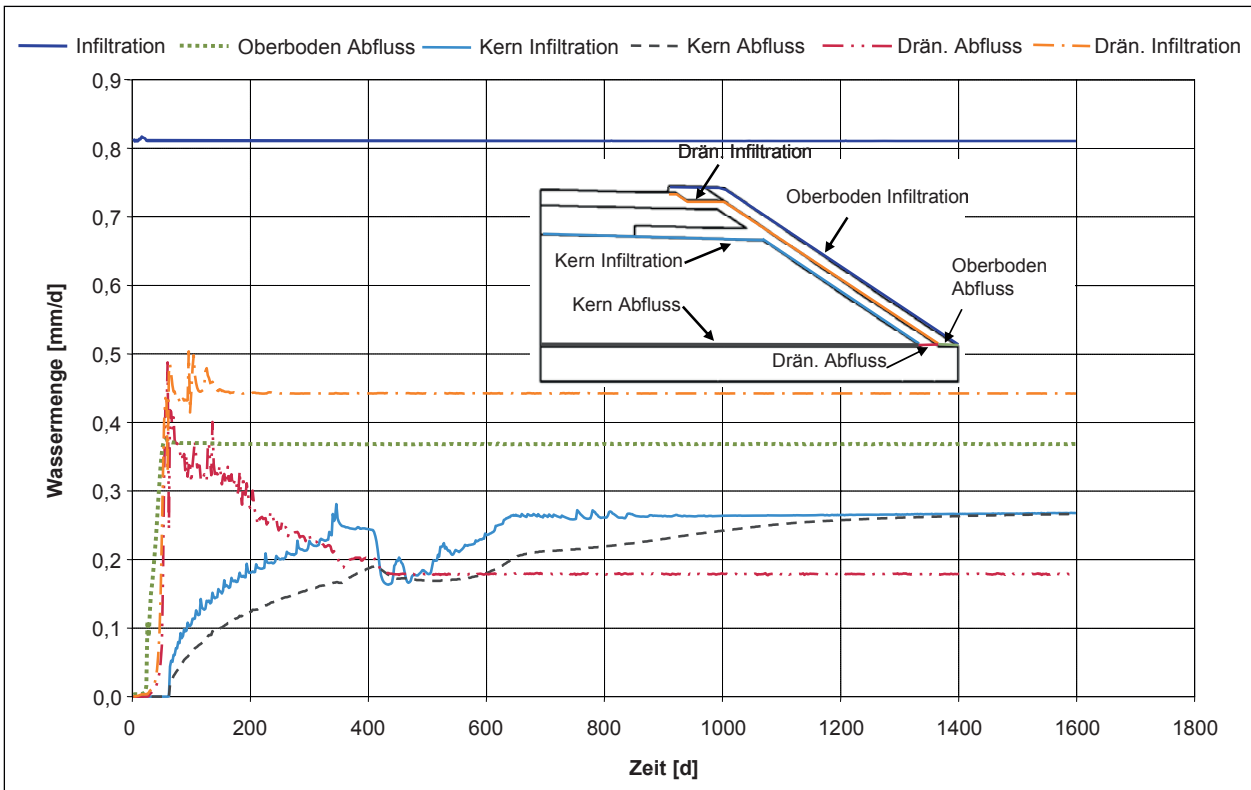


Abbildung 8.10: Ergebnisse der Berechnung mit stationären Randbedingungen

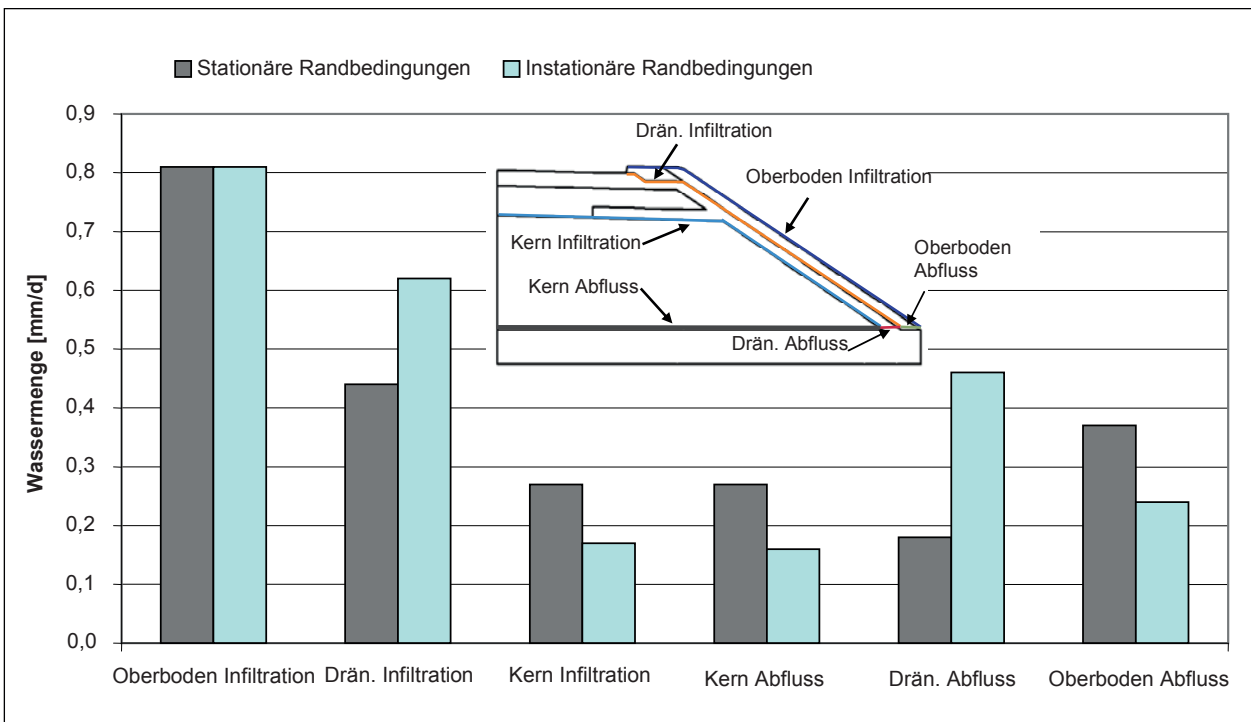


Abbildung 8.11: Vergleich der Sickerwasserraten unter stationären und instationären Randbedingungen

Zur Analyse des auf den ersten Blick auffallend großen Oberbodenabflusses bei der Berechnung mit stationären Randbedingungen wurden die Saugspannungen 3 cm oberhalb und 3 cm unterhalb des Überganges zwischen Oberboden und Dränschicht in einem Abstand von 1 m ausgewertet. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 8.12 dargestellt. Der Porenwasserdruck im Oberboden variiert von 0,55 kPa bis 1,45 kPa und in der Dränschicht von 0,5 kPa bis 0,85 kPa. Entsprechend den definierten Bodeneigenschaften (siehe Abbildung 8.6) ist für diesen Bereich der Saugspannung die hydraulische Leitfähigkeit des Oberbodens größer als die der Dränschicht, obwohl die Durchlässigkeit der Dränschicht im gesättigten Zustand deutlich größer ist. Dadurch ergibt sich ein vergleichsweise großer Oberbodenabfluss und eine verhältnismäßig geringe Infiltration in die Dränschicht.

Bei den instationären Randbedingungen tritt nur an bestimmten Tagen ein Niederschlag auf und daher ist die tatsächliche Infiltrationsrate in der Regel größer als 0,81 mm/d. Dies könnte rechnerisch zu geringeren Saugspannungen in der Dränschicht und dadurch zu einer größeren hydraulischen Leitfähigkeit führen, was eine größere Infiltration in die Dränschicht nach sich zieht.

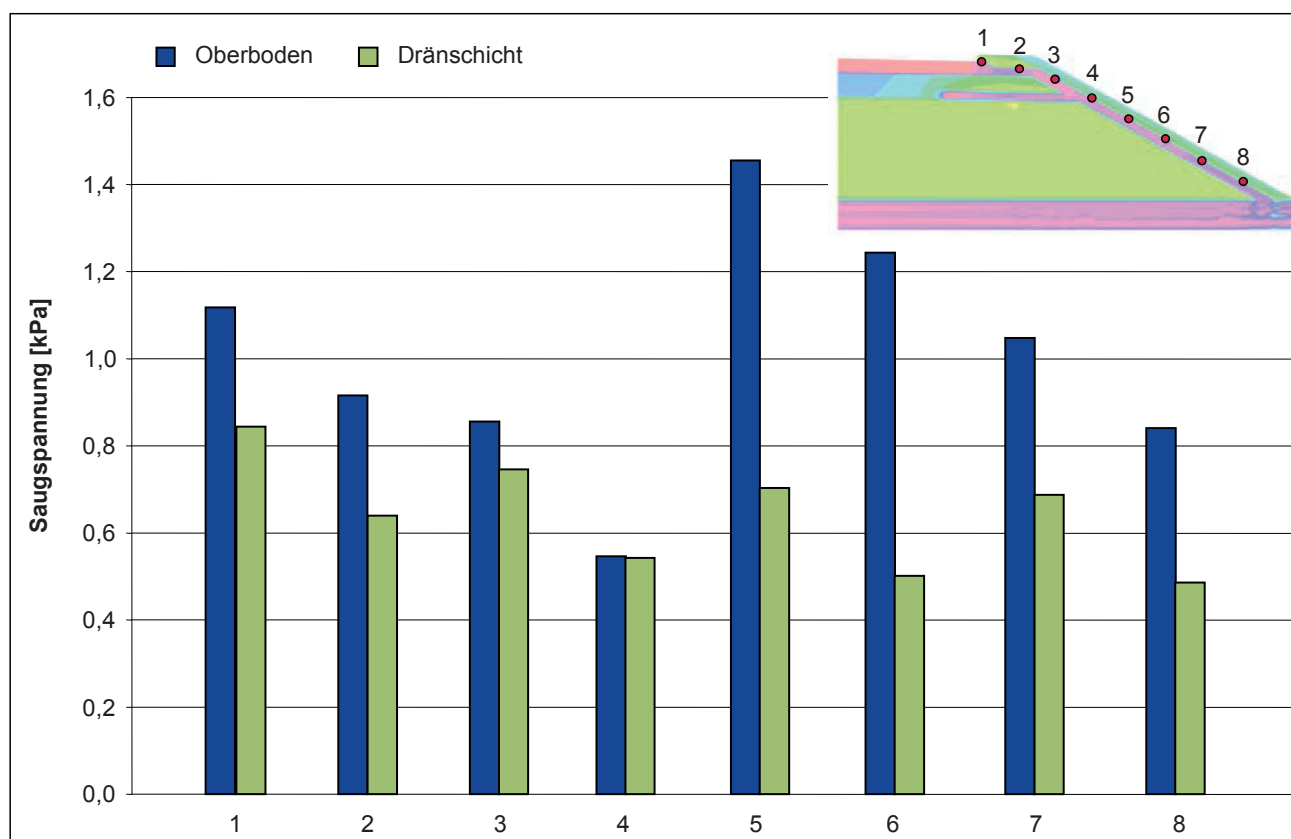


Abbildung 8.12: Saugspannung an der Grenze von Oberboden zu Dränschicht unter stationären Randbedingungen

Eine Teil des in den Kern infiltrierenden Sickerwassers dringt im Bereich des Böschungsfußes in den Damm ein. Um zu prüfen, ob auf diesen Bereich ein besonderes Augenmerk gelegt werden sollte, wurde die in diesem Bereich auftretende Abflussmenge berechnet – gelb markiert in der Abbildung 8.13.

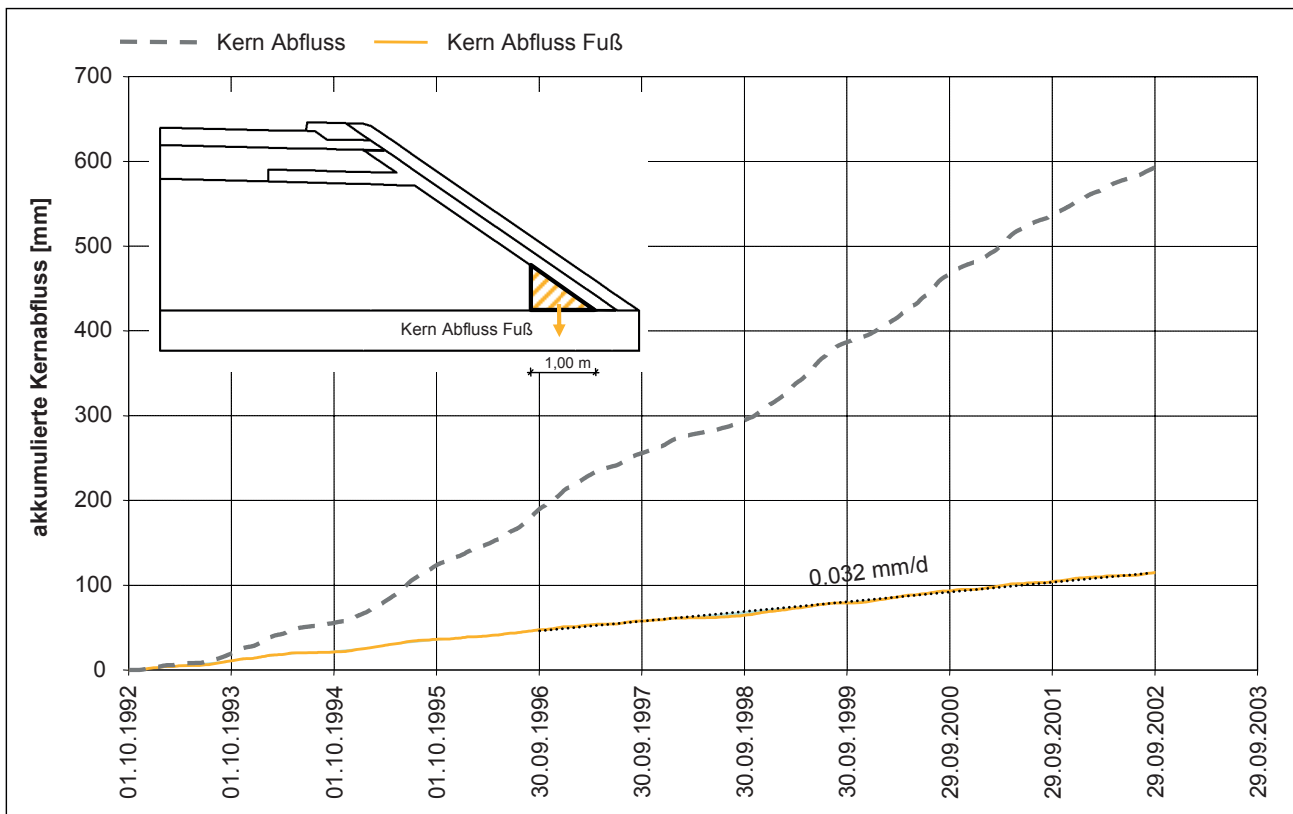


Abbildung 8.13: Ausfluss aus dem gesamten Kern und aus dem angegebenen Teilbereich am Böschungsfuß

Für die stationären Randbedingungen beträgt der Durchfluss im betreffenden Bereich 0,05 mm/d, d.h. 19,6 % von der Ausflussrate aus dem gesamten Kern (0,27 mm/d). Bei instationären Randbedingungen fallen 19,4 % des Sickerwassers aus dem Kern in diesem Bereich an. Für die Jahre 1996 bis 2002 wurde die mittlere Sickerwassermenge aus diesem Bereich damit zu 0,03 mm/d geschätzt. Da dieser Betrag relativ niedrig ist, wurden keine weiteren Simulationen durchgeführt, bei denen für diesen Bereich Böden mit geringeren Durchlässigkeiten zugrunde gelegt worden wären.

### 8.3.3 Berechnungen mit modifizierten Parametern/Abmessungen

#### 8.3.3.1 Modifizierung der Durchlässigkeit der Dränschicht

Eine Berechnung mit stationären Randbedingungen wurde auch für eine Dränschicht, die eine größere gesättigte hydraulische Leitfähigkeit von  $5 \cdot 10^{-3}$  m/s besitzt, durchgeführt. Die Materialeigenschaften sind in der Tabelle 8.2 dargestellt. Als Randbedingungen wurden die in Abschnitt 8.3.2 beschriebenen Infiltrationsraten angesetzt.

DIN 18196	SU/SU*	SU*	GU	OT
Schicht	Oberboden	Dammbau- stoff/Bankett (Su3)	Drän-/Planum/FSS	Kernboden-nass Entwässerung
Hydraulische Parameter				
$k_f$ -Wert [m/s]	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-8}$
$\theta_{\text{sat}}$	0.38	0.36	0.23	0.65
$\theta_{\text{res}}$	0.019	0.000	0.011	0.000
$\alpha$ [ $\text{m}^{-1}$ ]	6.80	2.60	100.00	0.14
$n$	1.43	1.28	1.79	1.30
$m = 1 - (1/n)$	0.30	0.22	0.44	0.23
Thermische Parameter				
$\lambda_{\text{solids}}$ [kJ/(Tag $\cdot$ m $\cdot$ °C)]	382.430 <sup>(1)</sup>	382.430 <sup>(1)</sup>	213.885 <sup>(1)</sup>	1048.032 <sup>(1)</sup>
$\lambda_{\text{dry}}$ [kJ/(Tag $\cdot$ m $\cdot$ °C)]	39.0 <sup>(1)</sup>	39.0 <sup>(1)</sup>	36.0 <sup>(1)</sup>	43.2 <sup>(1)</sup>
$c_{p,\text{solids}}$ [kJ/(g $\cdot$ °C)]	$0.71 \cdot 10^{-3}$ <sup>(2)</sup>	$0.71 \cdot 10^{-3}$ <sup>(2)</sup>	$0.71 \cdot 10^{-3}$ <sup>(2)</sup>	$1.674 \cdot 10^{-3}$ <sup>(2)</sup>
$c_{v,\text{dry}}$ [kJ/ (m <sup>3</sup> $\cdot$ °C)]	1500 <sup>(1)</sup>	1500 <sup>(1)</sup>	1500 <sup>(1)</sup>	1500 <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> nach VDI 4640 – Teil 1

<sup>(2)</sup> nach KRAHN (2004)

Tabelle 8.2: Hydraulische und thermische Kennwerte der Böden

Die Ergebnisse der Berechnung werden in der Abbildung 8.14 dargestellt. Obwohl nach einer Berechnungszeit von 1800 Tagen kein stationärer Zustand für das Gesamtmodell erreicht werden konnte, wurde für den Abfluss aus dem Oberboden und der Dränschicht sowie für die Infiltration in den Kern ein stationärer Zustand erzielt. Unter der Annahme, dass sich die Infiltration in den Kern nicht mehr verändert, kann für den stationären Zustand die Abflussrate aus dem Kern der ermittelten Infiltrationsrate gleich gesetzt werden. Von der Infiltrationsrate von 0,81 mm/d, die auf der Dammoberfläche angesetzt wurde, fließen 0,12 mm/d innerhalb des Oberbodens und 0,37 mm/d in der Dränschicht ab. Der Rest von 0,32 mm/d infiltriert in den Kern und wird im stationären Zustand auch aus dem Kern abfließen.

Aus der größeren Durchlässigkeit der Dränschicht resultiert ein größerer Zufluss vom Oberboden in die Dränschicht, was zu einer Verringerung der im Oberboden abfließenden Sickerwassermenge auf 0,12 mm/d führt. Die Abflussmenge aus der Dränschicht hat sich mit 0,37 mm/d in etwa verdoppelt. Der größere Zufluss in die Dränschicht führt auch zu einer Zunahme der Infiltrationsmenge in den Kern auf 0,32 mm/d im Vergleich zu dem Wert von 0,27 mm/d bei einem Durchlässigkeitsbeiwert der Dränschicht von  $k = 5 \cdot 10^{-5}$  m/s.

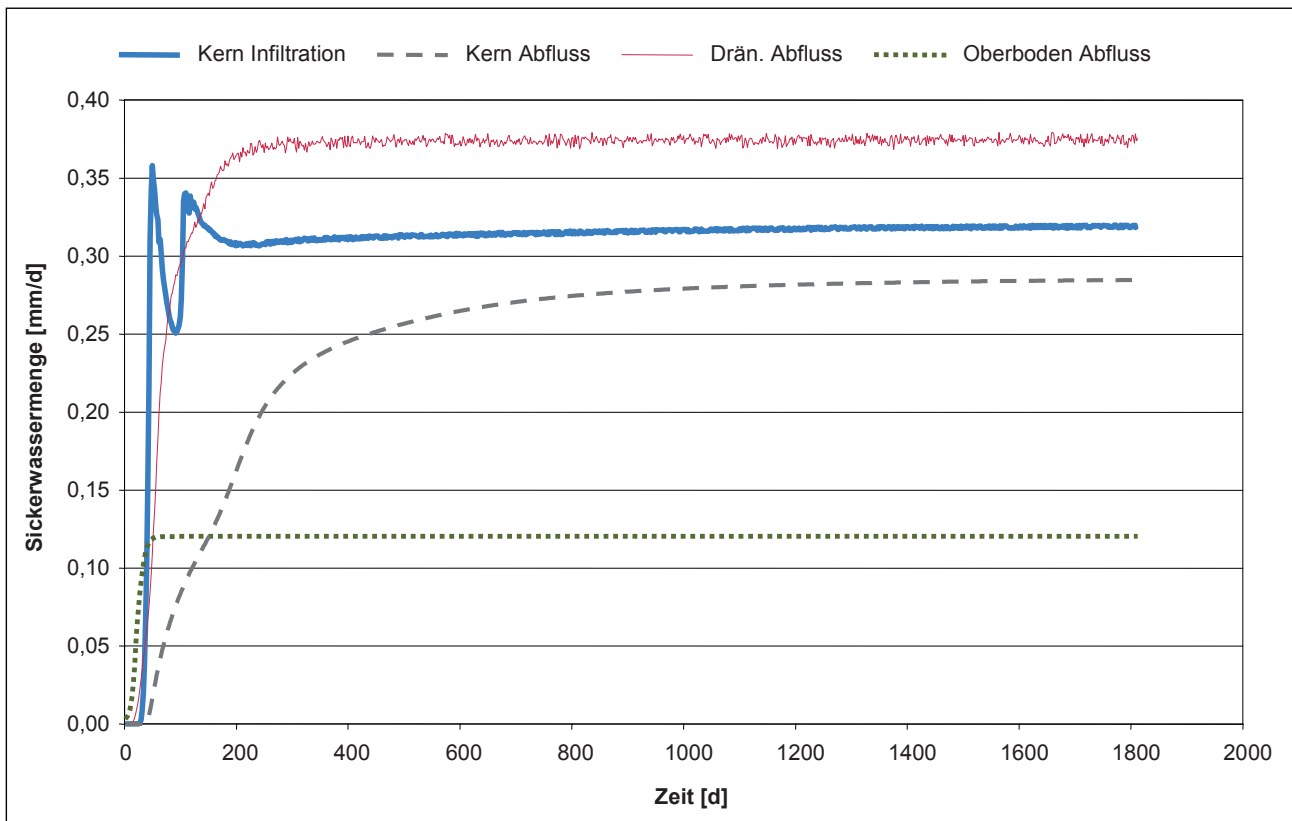


Abbildung 8.14: Ergebnisse für eine stationäre Berechnung mit der durchlässigeren Dränschicht

### 8.3.3.2 Modifizierung der Geometrie

Da zu erwarten ist, dass die größte Infiltration in den Kern direkt unterhalb des Banketts stattfindet, wurde die Bauweise E modifiziert, indem auf der Oberfläche des Kerns eine 50 cm dicke Tonschicht ergänzt wurde (siehe Abbildung 8.15).

Die Tabelle 8.3 zeigt die definierten Kennwerte der einzelnen Böden. Für die Tonschicht wurden die hydraulischen Parameter nach TINJUM ET AL. (1997) für einen leicht plastischen Ton verwendet.

Um den Einfluss der Tonschicht auf den Wasserhaushalt zu beurteilen, wurde eine Simulation mit denselben stationären Randbedingungen, wie sie in den vorherigen Berechnungen angesetzt wurden, durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 8.16 dargestellt.



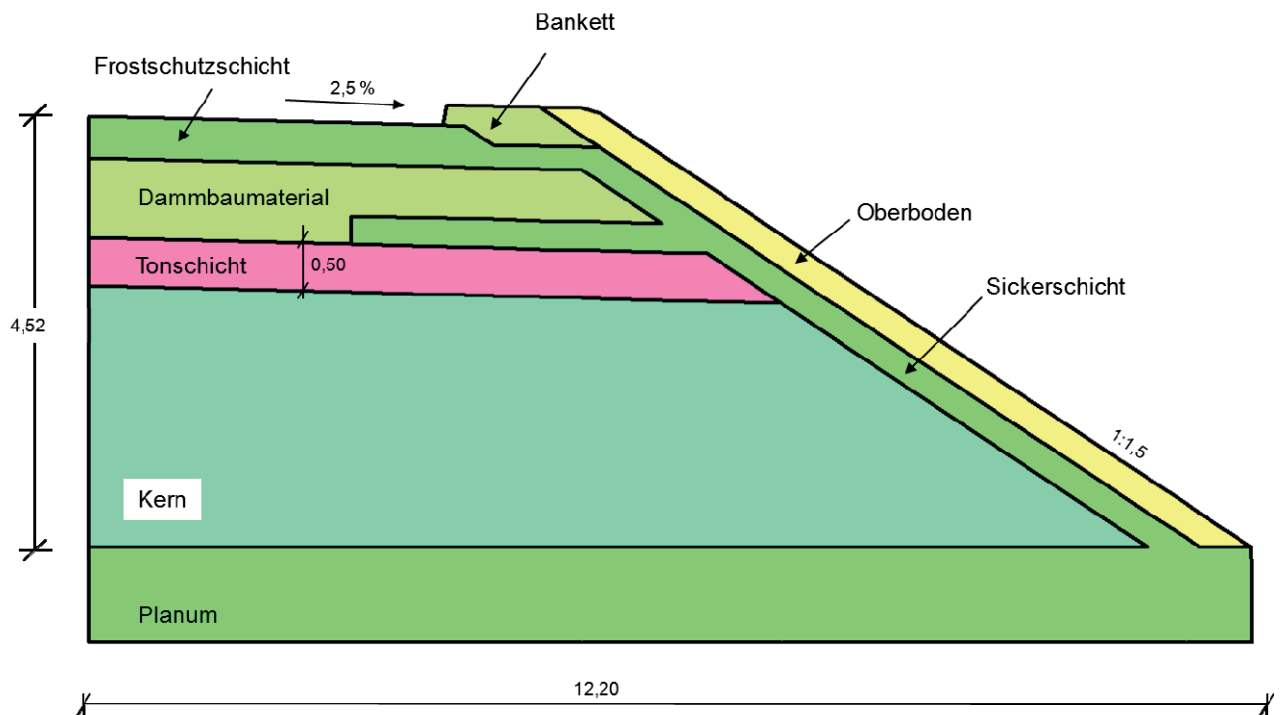


Abbildung 8.15: Modellgeometrie mit einer zusätzlichen Tonschicht oberhalb des Kerns

DIN 18196	SU/SU*	SU*	GU	TL <sup>(3)</sup>	OT
Schicht	Oberboden	Dammbau- stoff/Bankett (Su3)	Drän- /Planum/FSS	Tonschicht	Kernboden-nass Entwässerung
Hydraulische Parameter					
$k_f$ -Wert [m/s]	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$
$\theta_{\text{sat}}$	0.38	0.36	0.23	0.34	0.65
$\theta_{\text{res}}$	0.019	0.000	0.011	0.000	0.000
A [m <sup>-1</sup> ]	6.80	2.60	100.00	1.76	0.14
n	1.43	1.28	1.79	1.089	1.30
$m = 1 - (1/n)$	0.30	0.22	0.44	0.08	0.23
Thermische Parameter					
$\lambda_{\text{solids}}$ [kJ/(Tag · m · °C)]	382.430 <sup>(1)</sup>	382.430 <sup>(1)</sup>	213.885 <sup>(1)</sup>	253.152 <sup>(1)</sup>	1048.032 <sup>(1)</sup>
$\lambda_{\text{dry}}$ [kJ/(Tag · m · °C)]	39.0 <sup>(1)</sup>	39.0 <sup>(1)</sup>	36.0 <sup>(1)</sup>	43.2 <sup>(1)</sup>	43.2 <sup>(1)</sup>
$c_{p\_solids}$ [kJ/(g · °C)]	$0.71 \cdot 10^{-3}$ <sup>(2)</sup>	$0.71 \cdot 10^{-3}$ <sup>(2)</sup>	$0.71 \cdot 10^{-3}$ <sup>(2)</sup>	$0.71 \cdot 10^{-3}$ <sup>(2)</sup>	$1.674 \cdot 10^{-3}$ <sup>(2)</sup>
$c_{v\_dry}$ [kJ/(m <sup>3</sup> · °C)]	1500 <sup>(1)</sup>	1500 <sup>(1)</sup>	1500 <sup>(1)</sup>	1550 <sup>(1)</sup>	1500 <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> nach VDI 4640 – Teil 1<sup>(2)</sup> nach KRAHN (2004)<sup>(3)</sup> nach TINJUM et. al. (1997)

Tabelle 8.3: Hydraulische und thermische Parameter für die verschiedenen Materialien

Die zusätzliche Tonschicht scheint den Wasserhaushalt des Dammbauwerkes nicht wesentlich zu beeinflussen. Trotz der Modifikation ist die Abflussmenge aus dem Kern mit 0,24 mm/d immer noch relativ hoch und verringert sich nur um etwa 11 %. Der Abfluss aus der Dränschicht beträgt 0,19 mm/d, während der Abfluss im Oberboden mit 0,37 mm/d gleich geblieben ist.

In der Abbildung 8.17 ist die Abflussmenge aus dem gesamten Kern zusammen mit dem aus dem Teilbereich am Böschungsfuß abfließenden Sickerwasser dargestellt. Der Abfluss aus dem Teilbereich am Böschungsfuß beträgt mit 0,018 mm/d nur 7,5 % des gesamten Abflusses.

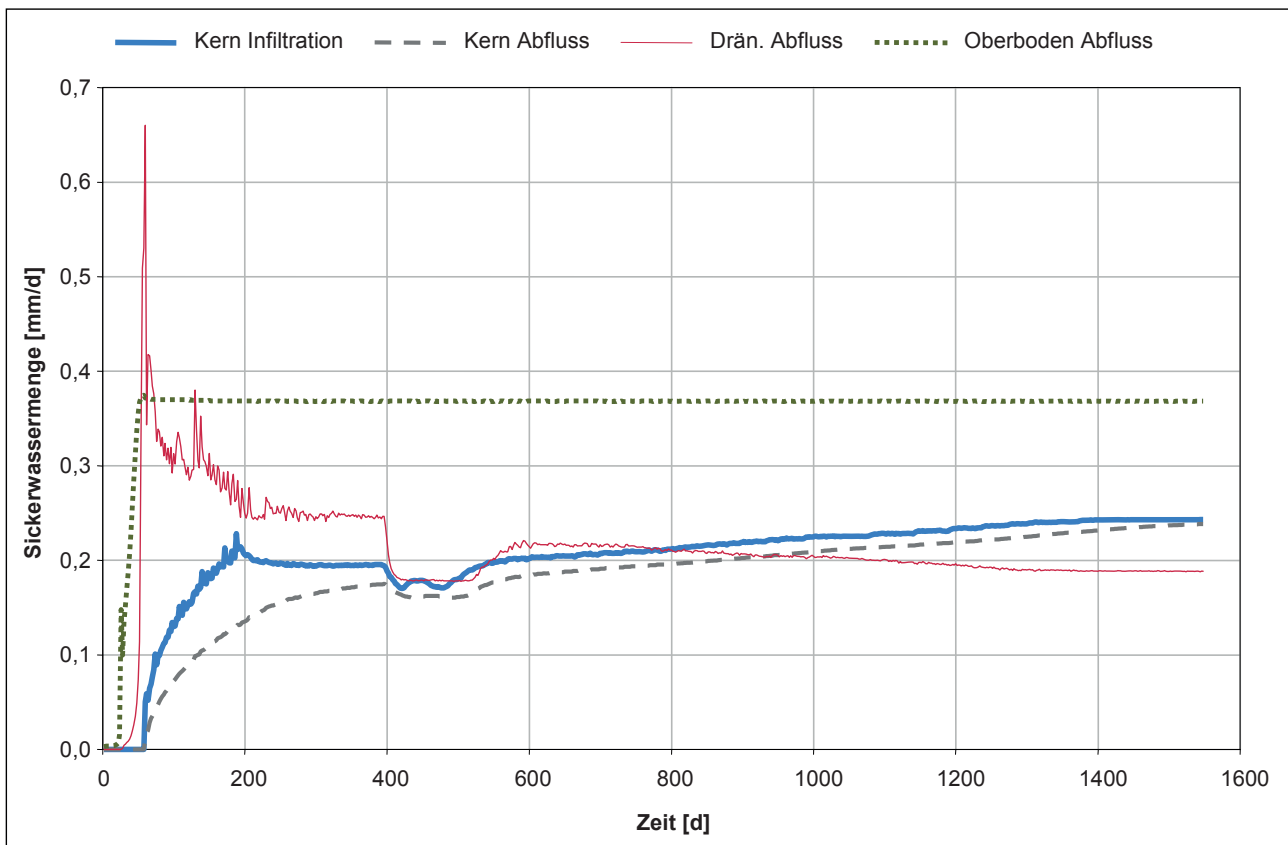


Abbildung 8.16: Sickerwassermengen bei zusätzlicher Tonschicht

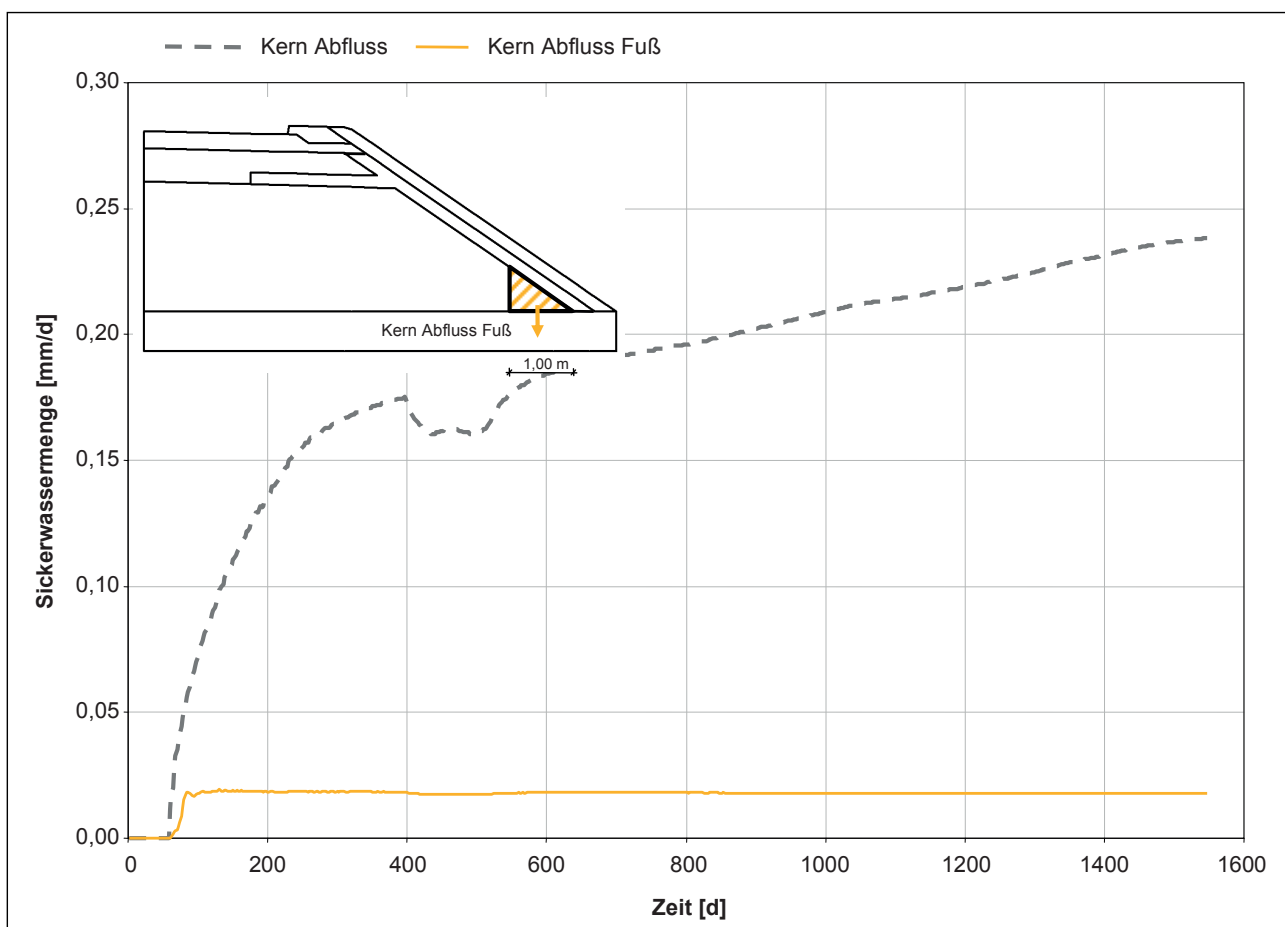


Abbildung 8.17: Abfluss aus dem gesamten Kern und aus dem Teilbereich am Böschungsfuß - modifizierte Geometrie

### 8.3.4 Vergleich der Ergebnisse

## 8.4 Vergleich der Ergebnisse – FEFLOW / VADOSE

In der Abbildung 8.18 sind die Ergebnisse der mit FEFLOW und VADOSE ermittelten Sickerwassermengen unter Ansatz von stationären Randbedingungen dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass bei den Berechnungen mit FEFLOW kein Oberflächenabfluss angesetzt wurde. Im Vergleich zu den Berechnungen mit VADOSE ergibt sich deshalb bei FEFLOW eine größere Infiltrationsmenge in den Oberboden. Im Kronenbereich der Böschung beträgt die sie bei den Berechnungen mit FEFLOW 1,8 mm/d, während sich aus den Berechnungen mit VADOSE eine Infiltration von 1,534 mm/d. Im Böschungsbereich liegen die Infiltrationsraten bei 1,5 mm/d (FEFLOW) bzw. 1,27 mm/d (VADOSE). Außerdem ist beim Vergleich der Berechnungsergebnisse zu beachten, dass in FEFLOW die Hysterese der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung der verwendeten Böden abgebildet wurde, während dies bei VADOSE nicht möglich ist. So wurde den Berechnungen mit VADOSE die Entwässerungskurve der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung zugrunde gelegt.

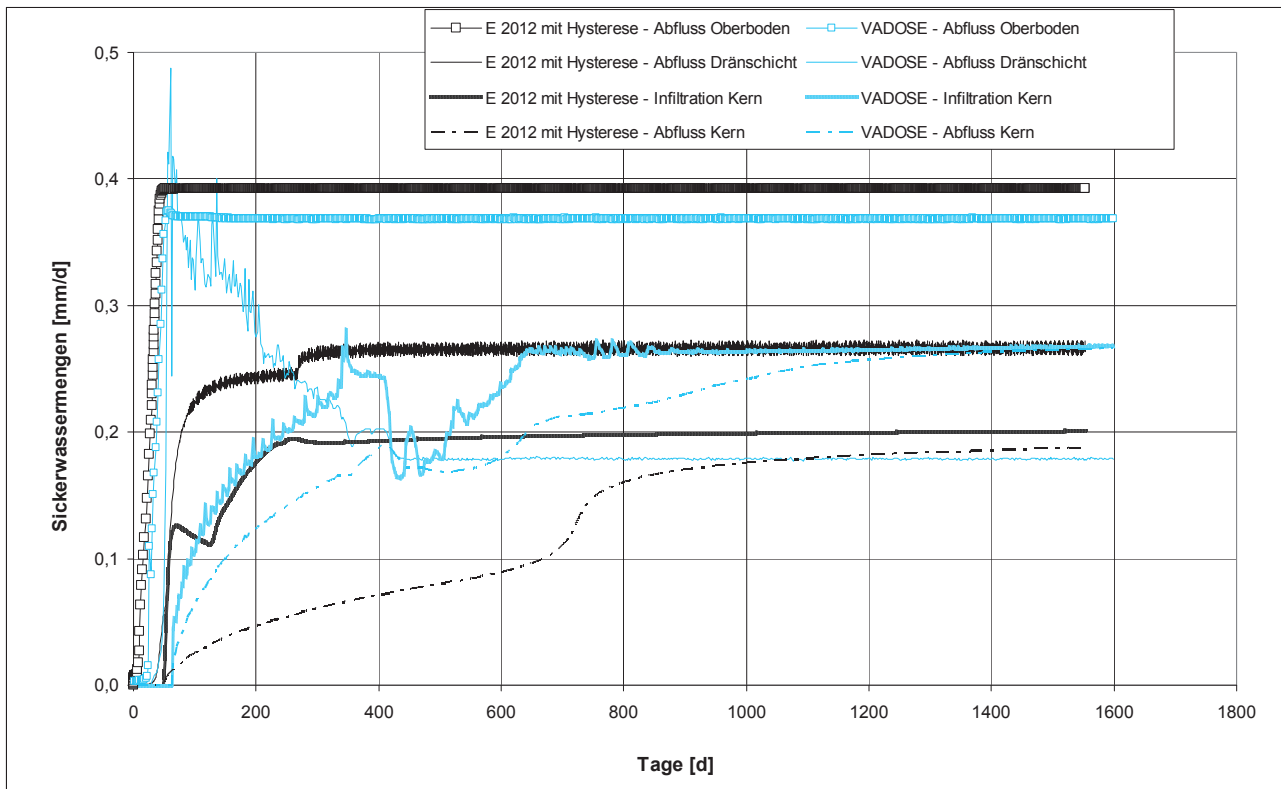


Abbildung 8.18: Vergleich der Sickerwassermengen für das Modell E – FEFLOW / VADOSE

Die Abbildung 8.18 stellt die mit FEFLOW und mit VADOSE ermittelten Sickerwassermengen dar. Da die Berechnungen von unterschiedlichen Anfangsbedingungen ausgehend gestartet wurden, sind insbesondere zu Berechnungsbeginn deutliche Unterschiede erkennbar. Im stationären Zustand stellt sich in beiden Modellen ein ähnlicher Oberbodenabfluss von 0,37 mm/d bzw. 0,39 mm/d ein. Der Abfluss aus der Dränschicht liegt bei der Berechnung mit VADOSE mit 0,18 mm/d deutlich unter dem mit FEFLOW ermittelten Abfluss von 0,27 mm/d. Der Abfluss aus dem Kern ist bei VADOSE mit 0,27 mm/d dagegen deutlich größer als bei FEFLOW (0,20 mm/d).

Vermutlich sind die deutlichen Unterschiede im Sickerwasserabfluss aus der Dränschicht und dem Kern auf die Hysterese der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung des Kernmaterials zurückzuführen, die in VADOSE nicht berücksichtigt werden kann. So stellen sich bei einer Bewässerung im Vergleich zu einer Entwässerung bei gleichem Wassergehalt im Boden geringere Saugspannungen ein. Diese führen dazu, dass eindringendes Sickerwasser vergleichsweise langsamer aufgenommen wird, als wenn für die Bewässerung auch die Entwässerungskurve der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung zugrunde gelegt wird, wie dies bei den Berechnungen mit VADOSE der Fall ist. Bei VADOSE kommt es dadurch vermutlich zu einer Überschätzung der in den Kern infiltrierenden Sickerwassermengen, was gleichzeitig zu einer Reduzierung der Abflüsse in der Dränschicht führt.

## 9 Bewertung der Wirksamkeit der Bauweise E

Die von Schweller et al. durchgeführten Berechnungen haben gezeigt, dass sich bei der Bauweise E bei Vorliegen eines Durchlässigkeitsbeiwertes des Kernmaterials von  $k = 1 \cdot 10^{-7}$  m/s vergleichsweise große Sickerwasserraten an der Basis des Kerns einstellen. Für die im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens durchgeführten Berechnungen wurde der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert des Kernmaterials deshalb auf  $k = 1 \cdot 10^{-8}$  m/s reduziert. Unter Ansatz eines zeitlich konstanten Zuflusses wurden mit VADOSE/W Sickerwasserraten an der Basis des Kernmaterials von 0,28 mm/d ermittelt. Auf das Jahr bezogen ergeben sich damit Sickerwassermengen von 102 mm. Bei Ansatz von Tageswerten des Niederschlages und der Evapotranspiration sind Sickerwassermengen von 0,16 mm/d bzw. 60 mm/a zu erwarten. Beim Ansatz von Durchschnittswerten ergeben sich damit um ca. 1,7-fach größere Sickerwasserraten als beim Ansatz von Tageswerten. Ungeklärt bleibt bei den durchgeführten Untersuchungen, inwiefern bereits die Bildung von Tageswerten des Niederschlages, womit eine Vergleichmäßigung der tatsächlichen, meist deutlich kürzeren und intensiveren Niederschlagsereignisse vorgenommen wird, Einfluss auf die Sickerwassermengen nimmt.

Anhand von weiteren Berechnungen wurde geprüft, ob die Durchsickerung des Kerns durch Aufbringen einer zusätzlichen Dichtungsschicht auf der Oberfläche des Kerns, wobei der Böschungsbereich ausgespart wird, reduziert werden kann. Die durchgeführten Berechnungen mit zeitlich konstanten Infiltrationsraten zeigen allerdings nur eine geringe Reduzierung der Durchsickerung des Kerns von 0,28 mm/d auf etwa 0,24 mm/d.

Desweiteren wurde im Rahmen der Berechnungen geprüft, ob eine verstärkte Infiltration in das Kernmaterial am Böschungsfuß stattfindet. Gemäß den Berechnungsergebnissen ist dies jedoch nicht der Fall.

Eine wesentliche Verbesserung der Wirksamkeit der Bauweise E ist zu erwarten, sofern im Kern geringer durchlässige Materialien im Bereich von gesättigten Durchlässigkeitsbeiwerten von  $k = 5 \cdot 10^{-9}$  m/s verwendet werden. Dies entspricht etwa den Verhältnissen an der Versuchsschüttung am Münchner Flughafen, für die Sickerwassermengen  $< 20$  mm/a anhand von experimentellen Untersuchungen und numerischen Berechnungen bestimmt wurden. Mit einem Durchlässigkeitsbeiwerten von  $k = 5 \cdot 10^{-9}$  m/s für das Kernmaterial liegen aber bereits Verhältnisse wie bei der Bauweise B nach MTSE vor. Dazu wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens FE 05.147 (SCHWELLER ET AL., 2009) Berechnungen durchgeführt, die die Wirksamkeit der Bauweise belegen.

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Forschungsbericht wurden Untersuchungen zum Einfluss der an der Bodenoberfläche stattfindenden Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Boden auf die sich bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen einstellenden Sickerwassermengen dargestellt. Dazu wurde zunächst der Wasserhaushalt von Erddämmen analysiert und wurde auf verschiedene Ansätze zur Beschreibung der Evapotranspiration eingegangen.

Anschließend wurde anhand einer Literaturrecherche gezeigt, dass zum Wasserhaushalt von Straßendämmen, bzw. Schutzwällen, für die die im MTSE beschriebenen Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen in Frage kämen, abgesehen von einem am Münchner Flughafen durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsvorhabens bisher keine Feldstudien bekannt sind. Im Zusammenhang mit der Standsicherheit von Böschungen und dem Wasserhaushalt von Deponieoberflächenabdichtungen und von Flachdächern liegen einige Untersuchungen zu den an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozessen des Oberflächenabflusses, der Infiltration und der Evapotranspiration vor. Jedoch lassen sich die Ergebnisse nur bedingt auf Straßendämme übertragen, da im Vergleich zum Deponiebau bei Straßendämmen deutlich größere Böschungsneigungen und im Vergleich zu natürlich gewachsenen Hängen ein im Allgemeinen vollkommen unterschiedlicher Schichtaufbau vorliegen.

Da im Rahmen des von der TU München am Münchner Flughafen durchgeführten F&E-Vorhabens wertvolle Informationen zum Wasserhaushalt eines Erdbauwerkes mit technischen Sicherungsmaßnahmen gewonnen wurden, wurden die vorliegenden Ergebnisse, die von BIRLE ET AL. (2010), BIRLE (2012) und von BIRLE UND HEYER (2012) veröffentlicht wurden, zusammenfassend dargestellt. Dabei wurde insbesondere der Wasserhaushalt der im Rahmen der Untersuchungen errichteten Versuchsschüttung dargestellt, da diese in Anlehnung an die Bauweise E des Merkblattes MTSE errichtet wurde, und deshalb für die vorliegende Aufgabenstellung von besonderem Interesse war.

Im Weiteren wurde untersucht, inwieweit die Ergebnisse zum Wasserhaushalt dieses Erdbauwerkes mit den Programmen FEFLOW und VADOSE/W abgebildet werden können. Dazu wurden Berechnungen sowohl mit Durchschnittswerten des Niederschlages und der Verdunstung als auch mit Tageswerten des Niederschlages und der Verdunstung durchgeführt.

Die Ergebnisse der Berechnungen zum Wasserhaushalt der Versuchsschüttung zeigen, dass der messtechnisch ermittelte Wasserhaushalt der Versuchsschüttung (nasse Einbaubedingung) sowohl mit dem Programm FEFLOW als auch mit dem Programm VADOSE/W nur eingeschränkt wiedergegeben werden kann. Bei dem verwendeten Grundwassermodell FEFLOW muss die sich in Abhängigkeit vom Niederschlag, von der Evapotranspiration und vom Oberflächenabfluss ergebende Infiltration vorweg ermittelt und als Randbedingung vorgegeben werden. Dies bringt erhebliche Nachteile mit sich, da die Kopplung der an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse (Verdunstung, Infiltration, Oberflächenabfluss) mit den zustandsabhängigen Eigenschaften des Oberbodens nicht abgebildet werden kann. Aufgrund der vorliegenden umfangreichen Messergebnissen zum Wasserhaushalt konnte die Evapotranspiration für den gemessenen Zeitraum abgeschätzt werden.

Zum Oberflächenabfluss lagen keine Messergebnisse vor, weshalb er vereinfachend zu Null angenommen wurde. Die Infiltration in den Boden wurde dementsprechend als Differenz zwischen Niederschlag und Evapotranspiration angesetzt. Aufgrund der Annahme, dass kein Oberflächenabfluss stattfindet, ergaben die Berechnungen mit FEFLOW zu große Infiltrationsmengen und dadurch im Vergleich zu den Messungen zu große Sickerwassermengen aus der Dränmatte und dem Kern.

Beim Programm VADOSE/W werden die an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse unter Berücksichtigung der zustandsabhängigen Eigenschaften des Oberbodens ermittelt. Dadurch sind stabile Berechnungsläufe unter Ansatz von Tageswerten der Klimabedingungen möglich. Die Berechnungen an der Versuchsschüttung mit Ansatz von Tageswerten zeigen aber, dass die Sickerwassermengen an der Basis im Vergleich zu den Messungen überschätzt und die Abflüsse in der Dränmatte unterschätzt werden. Als Ursache der Differenzen zu den Messwerten werden zum einen Unterschiede in der Durchlässigkeit des nass verdichteten Kernmaterials zwischen den im Modell angesetzten Werten und den in-situ vorliegenden Werten angenommen; zum anderen wird vermutet, dass die Nicht-Berücksichtigung der Hysterese bei VADOSE/W zu einer Überschätzung der Sickerwasserabgabe an der Basis beiträgt.

Der Vergleich der anhand der verschiedenen Modellberechnungen ermittelten Sickerwassermengen zeigt, dass die zeitliche und quantitative Abbildung der an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse (Niederschlag, Verdunstung, Oberflächenabfluss) einen erheblichen Einfluss auf die sich einstellenden Sickerwassermengen haben. Zur Untersuchung der Wirksamkeit technischer Sicherungsmaßnahmen sollten deshalb der Niederschlag, die Evapotranspiration und der Oberflächenabfluss sowohl in der zeitlichen Verteilung als auch in der quantitativen Größe realitätsnah wiedergegeben werden.

Zur Ermittlung der Wirksamkeit der Bauweise E wurden Berechnungen sowohl mit FEFLOW als auch mit VADOSE/W durchgeführt. Im Vergleich zu den von Schweller et al. durchgeführten Berechnungen wurde der Wasserhaushalt des Straßendamms sowohl unter Ansatz eines auf 365 Tage gemittelten Durchschnittswertes der Infiltration als auch mit Tageswerten des Niederschlages bzw. der Verdunstung ermittelt. Zur Vergleichbarkeit wurden die Bodenkennwerte entsprechend den von Schweller et al. angenommenen Werten angesetzt. Da sich bei den Berechnungen von Schweller et al. aber bereits gezeigt hatte, dass sich bei der Bauweise E bei Vorliegen eines Durchlässigkeitsbeiwertes des Kernmaterials von  $k = 1 \cdot 10^{-7}$  m/s vergleichsweise große Sickerwasserraten an der Basis des Kerns einstellen, wurde für die im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens durchgeführten Berechnungen der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert des Kernmaterials auf  $k = 1 \cdot 10^{-8}$  m/s reduziert. Die Randbedingungen wurden anhand der Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes für den Flughafen München abgeschätzt, wobei den Berechnungen ein Zeitraum von 10 Jahren (1992 - 2002) zugrunde gelegt wurde.

Aufgrund der fehlenden Kopplung zwischen den an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozessen und den zustandsabhängigen Eigenschaften des Oberbodens kam es in den Berechnungen mit FEFLOW vielfach zu Berechnungsabbrüchen. Mit dem Programm FEFLOW konnten deshalb unter Ansatz von zeitlich variablen Randbedingungen keine aussagekräftigen Ergebnisse erzielt werden.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Anwendung von Berechnungsprogrammen wie FEFLOW, bei denen die Kopplung zwischen den an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozessen und den



zustandsabhängigen Eigenschaften des Oberbodens nicht berücksichtigt wird, beim Ansatz von Tageswerten des Niederschlages, der Evapotranspiration und des Oberflächenabflusses nicht sinnvoll ist. Für Berechnungen unter Ansatz von Durchschnittswerten der Infiltration dagegen sind derartige Programme geeignet.

Die mit VADOSE/W für die Bauweise E durchgeführten Berechnungen zeigen, dass die Vergleichmäßigung der Infiltration bei einer Berechnung mit Durchschnittswerten der Infiltration zu ca. 1,7-fach größeren Sickerwassermengen als beim Ansatz von Tageswerten führt. Die mit Tageswerten der Klimadaten durchgeführten Berechnungen ergaben für die Bauweise E bei einem Durchlässigkeitsbeiwert des Kerns von  $k = 1 \cdot 10^{-8}$  m/s eine mittlere Sickerwasserrate an der Basis des Kerns von ca. 60 mm/a.

Im Rahmen weiterer Berechnungen mit VADOSE/W wurde untersucht, inwieweit durch das Aufbringen einer zusätzlichen Dichtungsschicht auf der Oberfläche des Kerns die Sickerwasserrate reduziert werden kann. Die entsprechenden Berechnungen zeigen allerdings, dass dies nur zu einer geringen Reduzierung führt. Eine wesentliche Verbesserung der Wirksamkeit der Bauweise E ist zu erwarten, sofern der Durchlässigkeitsbeiwert des Kernmaterials auf  $k = 5 \cdot 10^{-9}$  m/s reduziert wird. Dies entspricht etwa den Verhältnissen an der Versuchsschüttung am Münchner Flughafen, für die Sickerwassermengen  $< 20$  mm/a anhand von experimentellen Untersuchungen und numerischen Berechnungen bestimmt wurden. Mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von  $k = 5 \cdot 10^{-9}$  m/s für das Kernmaterial liegen aber bereits Verhältnisse wie bei der Bauweise B nach MTSE vor. Die Wirksamkeit dieser Bauweise wurde bereits im Rahmen des Forschungsvorhabens FE 05.147 (SCHWELLER ET AL., 2009) anhand von Berechnungen belegt.

Bisher ungeklärt ist, inwiefern die Bildung von Tageswerten des Niederschlags, die auch bereits eine Vergleichmäßigung der tatsächlichen, meist deutlich kürzeren und intensiveren Niederschlagsereignisse darstellt, Einfluss auf die Sickerwassermengen nimmt. Auch zeigt der Vergleich der Berechnungsergebnisse mit Messungen, dass die Berechnungen den Wasserhaushalt der Erdbauwerke nur eingeschränkt wiedergeben können. Unklarheiten bestehen insbesondere im Hinblick auf die Größe der Verdunstung und des Oberflächenabflusses an Erdbauwerken und zum Einfluss der Hysterese der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung auf den Wasserhaushalt. Es wird deshalb empfohlen, die Wirksamkeit der Bauweisen, insbesondere der Bauweise E, anhand von Messungen an Erdbauwerken zu überprüfen. Dazu sollten Messfelder errichtet werden, mit denen der Wasserhaushalt von Erdbauwerken mit technischen Sicherungsmaßnahmen erfasst werden kann. Für die zu errichtenden Messfelder sollte der Wasserhaushalt anhand von Berechnungen prognostiziert werden und mit den Messungen verglichen werden.

## Literaturverzeichnis

- Albright, W. H.; Benson, C. H.; Gee, G. W.; Roesler, A. C.; Abichou, T.; Apiwantragoon, P.; Lyles, B. F.; Rock, S. A. (2004): Field Water Balance of Landfill Final Covers, *Journal of Environmental Quality*, Vol. 33 (6), pp. 2317-2332.
- 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/x0490e00.htm>, Zugriff am 22.12.2009.
- Beyer, W. (1964): Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve, *WWT* 14, S. 165-168, Berlin.
- Heyer, D.; Birle, E. (2010): Technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau, *Geotechnik* Ausgabe 2010/3, S. 262-275.
- Birle, E.; Boso, M.; Heyer, D. (2010): Investigation of the water flow in an embankment built of organic soil: Experimental results and large scale field test, *Fifth International Conference on Unsaturated Soils*, Barcelona, 6.-8. September 2010, Tagungsband Volume II, pp. 1299-1304.
- Birle, E. (2012): Geohydraulische Eigenschaften verdichteter Tone unter besonderer Berücksichtigung des ungesättigten Zustandes, *Schriftenreihe - Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der TU München*, Heft 51, 2012.
- Birle, E.; Heyer, D. (2012): Water balance of an earth fill built of slightly contaminated organic clay, *GeoCongress 2012*, Oakland, 25.03.2012 bis 29.03.2012.
- BMU (2003): *Hydrologischer Atlas von Deutschland*, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 3. Lieferung 2003.
- Brooks, R.; Corey, A. (1964): Hydraulic properties of porous media, *Hydrology Papers Colorado State University*.
- Buckingham, E. (1907): *Studies on the movement of soil moisture*, U.S. Dept. Agric. Bur. Soils Bull. 38, U.S. Government Printing Office, Washington DC.
- Bürger, M.; Kocher, B.; Marks, T.; Hillmann, R. (2008): *Arbeitsentwurf der Ersatzbaustoffverordnung: Modellannahmen für Straßenbauwerke - Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen vom Juli 2008*.
- Cardoso, R.; Maranha das Neves, E.; Almeida Santos, P. (2010): Suction changes during the construction of an embankment from A10 Motorway in Portugal, *Proceedings of the Fifth International Conference on Unsaturated Soils*, Barcelona, 2010, Eds. Alonso, E. und Gens, A.; Taylor and Francis Group, Vol. 2, pp. 1305-1311.
- Dalton, J. (1801): On evaporation, In: *Experimental Essays*. 3: 574-594, zitiert in Schöniger und Dietrich (2009).
- Darcy, H. (1856): *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*, Victor Dalmont, Paris.
- Deutscher Wetterdienst: [www.dwd.de](http://www.dwd.de)

- Disse, M. (1999): Validation of a Simple Model to Determine Regional Evapotranspiration and Groundwater Recharge Rates, *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 24, No. 4, pp. 325-330, Elsevier Science Ltd.
- DVWK Merkblatt 238/1996: Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen, Bonn, 1996.
- Dwyer, S. F. (2003): Water Balance Measurements and Computer Simulations of Landfill Covers, Dissertation, The University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico.
- Dyck, S.; Peschke, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie, 3. Auflage, Verlag für Bauwesen Berlin.
- Edlefsen, N. E.; Anderson, A. B. C. (1943): Thermodynamics of Soil Moisture, *Hilgardia*, Vol. 15, pp. 31-298, 1943, 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, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 44, No. 7, pp. 858-872.
- Fredlund, D. G.; Rahardjo, H. (1993): Soil mechanics for unsaturated soils, John Wiley & Sons, Inc.
- Golf, W. (1981): Ermittlung der Wasserressourcen im Mittelgebirge, *Wasserwirtschaft und Wassertechnik* 31, S. 93-95, zitiert in DVWK Merkblatt 238/1996: Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen.
- Grathwohl, P.; Liedl, R.; Beyer, C.; Konrad, W.; Amankwah, E.A. (2006): Übertragung der Ergebnisse des BMBF-Förderschwerpunktes „Sickerwasserpoggnose“ auf repräsentative Fallbeispiele (Teilprojekt 1a) – Abschlussbericht der Universität Tübingen.
- Gröngröft, A.; Tresselt, K.; Berger, K.; Melchior, S.; Türk, M.; Miehlich, G. (2002): Austrocknungsverhalten einer mineralischen Oberflächendichtung aus Hafenschlick (I): Ergebnisse eines fünfjährigen Feldversuches, in „Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen“; Tagungsband Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 03, S. 107-116.
- Haude, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise, *Mitt. Dt. Wetterd.* 2 (11), Bad Kissingen (Dt. Wetterd.), zitiert in Schöniger und Dietrich (2009).
- Henken-Mellies, W. U. (2002): Wirksamkeit und Wasserhaushalt einer mineralischen Deponie-Oberflächenabdeckung: Ergebnisse von Langzeituntersuchungen an einem Großlysimeter, in „Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen“; Tagungsband Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 03, S. 117-126.
- 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.
- Hjelmar, O.; Holm, J.; Crillesen, K. (2007): Utilisation of MSWI bottom ash as sub-base in road construction: First results from a large scale test site, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 139 (3), pp. 471-480.
- Hoffmann, T.; Fabry, W. (1999): Regenwassermanagement – natürlich mit Dachbegrünung, Bundesverband Garten-, Landschafts- und Sportplatzbau e.V. (BGL), 1999.
- Khire, M. V.; Benson, C. H.; Bosscher, P. J. (1997): Water Balance Modeling of Earthen Final Covers, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 123 (8), pp. 744-754.

- Krahn, J. (2004): Vadose Zone Modeling with VADOSE/W, first edition, Mai 2004, GEO-SLOPE International, Canada.
- Leong E. C., Rahardjo, H. (1997): Review of soil-water characteristic curve equations, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, pp. 1106-1117.
- Lim, T. T.; Rahardjo, H.; Chang, M. F.; Fredlund, D. G. (1996): Effect of rainfall on matric suctions in a residual soil slope, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, No. 4, pp. 618-628.
- Melchior, S.; Berger, K.; Vielhaber, B.; Miehlich, G. (2002): Großlysimeter Deponie Hambrug-Georgswerder: Wasserhaushalt und Wirksamkeit von Oberflächenabdichtungssystemen mit bindigen mineralischen Dichtungen, in „Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen“; Tagungsband Hörteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 03, S. 57-74.
- Monteith, J. L. (1965): Evaporation and environment, In: Foggy, G.T. (ed): *Sympos. The state and movement of water in living organism*, pp. 205-234, Cambridge (Univ Press), zitiert in Schöniger und Dietrich (2009).
- Merkblatt über Bauweisen für Technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau (M TS E), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau, Ausgabe 2009.
- Mualem, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 3, pp. 513-522.
- Nelson, E. J.; Overton, D. D. (2010): Water migration in pavement subgrade, *Proceedings of the Fifth International Conference on Unsaturated Soils*, Barcelona, 2010, Eds. Alonso, E. und Gens, A.; Taylor and Francis Group, Vol. 2, pp. 1345-1349.
- Ng, C. W. W.; Zhan, L. T.; Bao, C. G.; Fredlund, D. G.; Gong, B. W. (2003): Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration, *Géotechnique* Vol. 53, No. 2, pp. 143-175.
- Nguyen, Q.; Fredlund, D. G.; Samarasekera, L.; Marjerison, B. L. (2010): Seasonal pattern of matric suctions in highway subgrades, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 47, No. 3, pp. 267-280.
- Nyhan, J., W.; Schofield, T., G.; Starmer, R., H. (1997): A Water Balance Study of Four Landfill Cover Designs Varying in Slope for Semiarid Regions, *Journal of Environmental Quality*, Vol. 26 (5), pp.1385-1392.
- Penman, H. L. (1956): Estimating evaporation, *Trans. Amer. Geophys. Union* 37, pp. 43-46, zitiert in Schöniger und Dietrich (2009).
- Rahardjo, H.; Lee, T. T.; Leong, E. C.; Rezaur, R. B. (2005): Response of a residual soil slope to rainfall, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 42, No. 2, pp. 340-351.
- RAS-Ew (2005): Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Entwässerung, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau.
- Scheffer und Schachtschabel (2002): *Lehrbuch der Bodenkunde*, Spektrum Akademischer Verlag, 15. Auflage, Heidelberg 2.
- Schöniger, M.; Dietrich, J. (2009): *Hydroskript*, <http://www.hydroskript.de>, Uni Braunschweig, Stand 2009, Zugriff 03.12.09.

- Schweller, G.; Birle, E.; Heyer, D. (2009): Geohydraulische Bewertung technischer Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau, Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau, Schlussbericht zum Forschungsvorhaben FE 05.147/2007/CGB vom Oktober 2009.
- Scott, P. S.; Farquhar, G. J.; Kouwen, N. (1983): Hysteretic effects on net infiltration, *Advances in Infiltration*, Publ. 11 - 83, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, S. 163-170.
- Shuttleworth, W. J. (1993): Evaporation, in Maidment, D. R.: *Handbook of Hydrology* (chapter 4), McGraw-Hill Verlag.
- Sverdrup, H. U. (1936): Das maritime Verdunstungsproblem, *Ann. Hydrogr. u. Marit. Meteorol.* 64, H. 2, zitiert in DVWK-Merkblatt 238/1996.
- Thielen, A. (2008): Einfluss der Bodensättigung auf die Stabilität von Hängen, Veröffentlichung der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Band 231.
- Thorntwaite, C. W. (1948): An approach toward a rational classification of climate, *The Geogr. Rev.* 38 (1): 55-94, zitiert in Schöniger und Dietrich (2009).
- van Genuchten, M. Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, pp. 892-898.
- Wagner, J.-F.; Schnatmeyer, C. (2002): Großversuche der Universität Trier mit einer mineralischen Abdichtungsschicht, in „Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen“; Tagungsband Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 03, S. 91-105.
- Warren, R. W.; Hakonson, T. E.; Bostick, K. V. (1996): Choosing the Most Effective Hazardous Waste Landfill Cover, *Remediation Journal*, Vol. 6 (2), pp. 23-41.
- Wendling, U. (1995): Berechnung der Gras-Referenzverdunstung mit der FAO Penman-Monteith-Beziehung, *Wasserwirtschaft*, Nr. 85.
- Wilson, G. W.: *Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems*, Ph.D. thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, zitiert in Krahn (2004).
- Zentrum Geotechnik der TU München (2010): Schlussbericht zum F&E-Vorhaben „Grundbautechnische Untersuchungen und umweltgerechte Verwendung von organischen Böden in Geländeaufschüttungen“, unveröffentlichter Bericht vom 11.08.2010.
- Zentrum Geotechnik der TU München (2011): Bericht zu den Ergebnissen der Messphase 01.07.10 bis 30.06.11, zum F&E-Vorhaben „Grundbautechnische Untersuchungen und umweltgerechte Verwendung von organischen Böden in Geländeaufschüttungen“, unveröffentlichter Bericht vom 16.08.2011
- Zentrum Geotechnik der TU München (2012): Flughafen München, 3. Start- und Landebahn, Ausführungsplanung Erdbau, Geotechnischer Bericht - Teil V – Geohydraulische Berechnungen zur Durchsickerung der Geländeaufschüttungen, unveröffentlichter Bericht vom 10.01.2012.

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Haude-Faktoren (nach DIN 19685)
Tabelle 4.1:	van Genuchten – Parameter
Tabelle 5.1:	Bodenkennwerte
Tabelle 5.2:	Übersicht über die angepassten Durchlässigkeitsbeiwerte
Tabelle 5.3:	Übersicht über die untersuchten Berechnungsdauern in Tagen für die einzelnen Modelle
Tabelle 5.4:	Übersicht über die durchgeführten Berechnungen ohne Niederschlag und deren Berechnungsdauern
Tabelle 6.1:	Anfangsbedingungen
Tabelle 6.2:	Hydraulische und thermische Bodenkennwerte
Tabelle 7.1:	Bodenkennwerte
Tabelle 8.1:	Hydraulische und thermische Parameter für die verschiedenen Materialien
Tabelle 8.2:	Hydraulische und thermische Kennwerte der Böden
Tabelle 8.3:	Hydraulische und thermische Parameter für die verschiedenen Materialien

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1:	Wasserhaushalt eines Erddammes mit technischen Sicherungselementen
Abbildung 3.2:	Volumenelement mit Filtergeschwindigkeiten
Abbildung 3.3:	Typische Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung (entnommen aus BIRLE, 2011)
Abbildung 3.4:	Typische Beziehung zwischen Saugspannung und volumetrischen Wassergehalt für unterschiedliche Böden (entnommen aus BIRLE, 2011)
Abbildung 4.1:	Proctorkurve des organogenen Tones (BIRLE, 2012)
Abbildung 4.2:	Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen
Abbildung 4.3:	Grundriss der Versuchsschüttung (Prinzipdarstellung)
Abbildung 4.4:	Schnitt durch die Versuchsschüttung (Prinzipdarstellung) (Schnitt II – II)
Abbildung 4.5:	Ausbreiten des organischen Kernmaterials zum Trocknen
Abbildung 4.6:	Homogenisieren des organischen Kernmaterials
Abbildung 4.7:	Aufbau der Versuchsfelder in der Aufstandsfläche
Abbildung 4.8:	Anschlüsse in der Aufstandsfläche der Versuchsschüttung
Abbildung 4.9:	Polygonwalze (25t)
Abbildung 4.10:	Glattmantelwalze
Abbildung 4.11:	Einbau und Verdichtung der Dichtwände aus Ton
Abbildung 4.12:	Verlegen der oberen Dränmatte
Abbildung 4.13:	Rinnenkörper und Anschluss an Messschacht



- Abbildung 4.14: Herstellen der Sickerleitung
- Abbildung 4.15: Aufbringen des Oberbodens
- Abbildung 4.16: Kabelanschluss
- Abbildung 4.17: Verlegen der Leerrohre
- Abbildung 4.18: Einbau eines Tensiometers und einer TDR-Sonde
- Abbildung 4.19: Erosionsmatten
- Abbildung 4.20: Anspritzbegrünung
- Abbildung 4.21: Probehügel nach Anspritzbegrünung
- Abbildung 4.22: Klimastation
- Abbildung 4.23: Bodengleich eingebauter Niederschlagsammler (Quantifizierung über Kippwaage)
- Abbildung 4.24: Niederschlagssammler
- Abbildung 4.25: Schematische Darstellung des Wasserhaushaltes des Probehügels
- Abbildung 4.26: Am Probehügel aufgezeichnete Tageswerte des Niederschlags
- Abbildung 4.27: Am Probehügel aufgezeichnete Monatswerte des Niederschlags
- Abbildung 4.28: Tagesmittelwerte des Sickerwassers an der Basis der nassen Seite im Zeitraum zwischen September und November 2008 (Einbau)
- Abbildung 4.29: Tagesmittelwerte des Sickerwassers an der Basis im Zeitraum zwischen November 2008 und Juli 2010
- Abbildung 4.30: Monatsmittelwerte des Sickerwassers an der Basis im Zeitraum zwischen September 2008 und Juli 2010
- Abbildung 4.31: Saugspannungsmessungen für das Tensiometer MO1A (Basis nass) im Zeitraum zwischen August 2008 und August 2009
- Abbildung 4.32: Tagesmittelwerte des Sickerwassers aus der oberen Dränmatte
- Abbildung 4.33: Wassergehalte in den Messpunkten MW1E, MW4C und MW4D im Oberboden
- Abbildung 4.34: Akkumulierte Wassermengen des Niederschlags, des Sickerwassers an der Basis und des Sickerwassers aus der oberen Dränmatte
- Abbildung 4.35: Tageswerte der tatsächlichen Evapotranspiration abgeschätzt nach Penman- Monteith
- Abbildung 4.36: Monatswerte der tatsächlichen Evapotranspiration abgeschätzt nach Penman- Monteith
- Abbildung 5.1: Modellgeometrie
- Abbildung 5.2: Finite-Elemente-Netz
- Abbildung 5.3: Tageswerte, Wochenwerte, Monatswerte und Durchschnittswert des Niederschlags abzüglich der Evapotranspiration für die Dammkrone
- Abbildung 5.4: Modell mit Randbedingungen
- Abbildung 5.5: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für die trockene Seite
- Abbildung 5.6: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für die nasse Seite
- Abbildung 5.7: Saugspannungs-Sättigungsgrad-Beziehung für den Kernboden
- Abbildung 5.8: Saugspannungs-Sättigungsgrad-Beziehung für den Oberboden
- Abbildung 5.9: Saugspannungs-Sättigungsgrad-Beziehung für die Dränschicht



- Abbildung 5.10: ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit für den Kernboden und den Oberboden modelliert mit Ansatz nach van Genuchten und Mualem
- Abbildung 5.11: observation single points
- Abbildung 5.12: hydraulisches Potential an observation single points in Abhängigkeit von der Zeit
- Abbildung 5.13: Fluid-Flux-Linien zur Ermittlung der Wasserbewegung im Modell
- Abbildung 5.14: Sickerwassermengen für die trockene Seite bei einem Niederschlag von 2,0 mm/d
- Abbildung 5.15: Verteilung des Sättigungsgrades nach 510 Tagen für die trockene Seite
- Abbildung 5.16: Strömungslinien nach 510 Tagen für die trockene Seite
- Abbildung 5.17: Sickerwassermengen für die nasse Seite bei einem Niederschlag von 2,0 mm/d
- Abbildung 5.18: Verteilung des Sättigungsgrades nach 935 Tagen für die nasse Seite – zeitlich konstanter Niederschlag
- Abbildung 5.19: Strömungslinien nach 935 Tagen für die nasse Seite – zeitlich konstanter Niederschlag
- Abbildung 5.20: Modellgeometrie ohne fiktive Dränschicht
- Abbildung 5.21: Sickerwassermengen für die nasse Seite – Durchschnittsniederschlag
- Abbildung 5.22: Sickerwassermengen für die trockene Seite – Durchschnittsniederschlag
- Abbildung 5.23: Sickerwassermengen für die nasse Seite – Monatsniederschlag
- Abbildung 5.24: Sättigungsgrad an den observation points 1, 3, 11, 16 und 18 für die nasse Seite – Monatsniederschlag
- Abbildung 5.25: Sickerwassermengen für die trockene Seite – Monatsniederschlag
- Abbildung 5.26: Sättigungsgrad an den observation points 1, 3, 11, 16 und 18 für die trockene Seite – Monatsniederschlag
- Abbildung 5.27: Sickerwassermengen für die nasse Seite – Wochenniederschlag
- Abbildung 5.28: Sättigungsgrad an den observation points 1, 3, 11, 16 und 18 für die nasse Seite – Wochenniederschlag
- Abbildung 5.29: Sickerwassermengen für die trockene Seite – Wochenniederschlag
- Abbildung 5.30: Berechnungsergebnisse für die nasse Seite – Tagesniederschlag
- Abbildung 5.31: Sättigungsgrad an den observation points 1, 11, 16 und 18 für die nasse Seite – Tagesniederschlag
- Abbildung 5.32: Berechnungsergebnisse (Tagesniederschlag) für die nasse Seite bei einem k-Wert des Kernmaterials von  $1 \cdot 10^{-9}$  m/s
- Abbildung 5.33: Berechnungsergebnisse für die trockene Seite – Tagesniederschlag
- Abbildung 5.34: Sättigungsgrad an den observation points 1, 3, 11, 16 und 18 für die trockene Seite – Tagesniederschlag
- Abbildung 5.35: Strömungslinien mit zugehöriger Verteilung des Sättigungsgrades nach 286 Tagen auf der trockenen Seite – Tagesniederschlag.
- Abbildung 5.36: Volumetrischer Wassergehalt in Abhängigkeit vom Niederschlag an TDR-Sonden im Oberboden und an observation points im Berechnungsmodell für die trockene Seite mit Tagesniederschlag
- Abbildung 5.37: Akkumulierte Drän- und Sickerwasserabflüsse für die nasse Seite bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen

- Abbildung 5.38: Akkumulierte Dränabflüsse und Infiltrationsmengen für die nasse Seite bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen
- Abbildung 5.39: Akkumulierte Sickerwasserabflüsse aus der Basis für die nasse Seite bei unterschiedlichen Anfangsbedingungen ohne Niederschlag
- Abbildung 5.40: Vergleich der Berechnungen mit und ohne Niederschlag
- Abbildung 5.41: Akkumulierte Drän- und Sickerwasserabflüsse für die trockene Seite bei unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen
- Abbildung 6.1: Modellgeometrie mit Finite-Elemente-Netz
- Abbildung 6.2: Modell mit Randbedingungen
- Abbildung 6.3: Verhältnis der tatsächlichen Evapotranspiration zur potentiellen Evapotranspiration („Limiting Factor“) in Abhängigkeit von der Saugspannung („Matric Suction“)
- Abbildung 6.4: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen der verschiedenen Böden
- Abbildung 6.5: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Saugspannung
- Abbildung 6.6: Flux sections zur Ermittlung der Wasserbewegung im Modell
- Abbildung 6.7: Prozesse an der Bodenoberfläche, ermittelt mit VADOSE/W
- Abbildung 6.8: Volumetrischer Wassergehalt in Abhängigkeit von der Zeit an TDR-Sonden im Oberboden und an Punkten im Berechnungsmodell
- Abbildung 6.9: Sickerwassermenge aus der Dränschicht
- Abbildung 6.10: Akkumulierter Sickerwasseraustritt aus der Dränschicht für Berechnung und Messung
- Abbildung 6.11: Sickerwasseraustritt aus dem Kern
- Abbildung 6.12: Akkumulierter Sickerwasseraustritt aus dem Kern für Berechnung und Messung
- Abbildung 6.13: Akkumulierter Sickerwasseraustritt aus dem Kern für Berechnung mit FEFLOW und VADOSE und Messung
- Abbildung 7.1: Modellgeometrie
- Abbildung 7.2: Vergleich der an der Versuchsschüttung gemessenen Werte der Nettostrahlung mit den nach Gleichung (7.1) abgeschätzten Werten (Zentrum Geotechnik, 2012)
- Abbildung 7.3: Tageswerte, Wochenwerte, Monatswerte und Durchschnittswert des Niederschlages abzüglich der Evapotranspiration – Bankett
- Abbildung 7.4: Modell mit Randbedingungen
- Abbildung 7.5: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand
- Abbildung 7.6: Sickerwassermengen - 10 Jahres-Werte
- Abbildung 7.7: Verteilung des Sättigungsgrades nach 3650 Tagen
- Abbildung 7.8: Strömungslinien nach 3650 Tagen
- Abbildung 7.9: Sickerwassermengen in Abhängigkeit von Niederschlag bzw. Verdunstung – Berechnungen mit Monatswerten
- Abbildung 8.1: Modellgeometrie
- Abbildung 8.2: Finite-Elemente-Netz
- Abbildung 8.3: Modell mit Randbedingungen

- 
- Abbildung 8.4: Niederschlags-Abflusskurve für Tagesniederschläge auf einer versiegelten Fläche nach BÜRGER ET AL. (2008)
- Abbildung 8.5: Verhältnis der tatsächlichen Transpiration zur potentiellen Transpiration („Limiting Factor“) in Abhängigkeit von der Saugspannung
- Abbildung 8.6: Hydraulische Leitfähigkeit der verwendeten Baustoffe in Abhängigkeit von der Saugspannung
- Abbildung 8.7: Prozesse an der Bodenoberfläche, ermittelt mit VADOSE/W
- Abbildung 8.8: Akkumulierte Sickerwassermengen für die Infiltration in den Kern und den Abfluss aus dem Kern
- Abbildung 8.9: Akkumulierte Sickerwassermengen für Oberboden und Dränschicht
- Abbildung 8.10: Ergebnisse der Berechnung mit stationären Randbedingungen
- Abbildung 8.11: Vergleich der Sickerwasserraten unter stationären und instationären Randbedingungen
- Abbildung 8.12: Saugspannung an der Grenze von Oberboden zu Dränschicht unter stationären Randbedingungen
- Abbildung 8.13: Ausfluss aus dem gesamten Kern und aus dem angegebenen Teilbereich am Böschungsfuß
- Abbildung 8.14: Ergebnisse für eine stationäre Berechnung mit der durchlässigeren Dränschicht
- Abbildung 8.15: Modellgeometrie mit einer zusätzlichen Tonschicht oberhalb des Kerns
- Abbildung 8.16: Sickerwassermengen bei zusätzlicher Tonschicht
- Abbildung 8.17: Abfluss aus dem gesamten Kern und aus dem Teilbereich am Böschungsfuß - modifizierte Geometrie
- Abbildung 8.18: Vergleich der Sickerwassermengen für das Modell E – FEFLOW / VADOSE

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Straßenbau“

## 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 spannenden 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, Pichotka, 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.

#### S 150: Abschätzung des Restwerts im PMS am Ende des Bewertungszeitraums

Stöckner, Sagnol, Brzuska, Wellner, Blasl, Sommer, Krause, Komma € 19,50

#### S 151: Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Waschbetonfahrbahndecken mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze Klein, Gehlen, Kränkel

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

#### S 152: Wiederverwendung von RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken

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

#### S 153: Optimierung von Fugensystemen in Betonfahrbahndecken – Messtechnische Grundlage zur Ermittlung realer Beanspruchungen in situ

Recknagel, Spitzer, Hoppe, Wenzel, Pirsakawetz € 23,00

#### S 154: Prozessoptimierung der Asphaltextraktion mit Oktansäuremethylester (OME)

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

#### S 155: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton – Verteilungsfunktion und Extremwerte

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

**S 156: Asphaltoberbau und extreme Temperaturen**

Beckedahl, Schrödter, Koppers, Mansura, Reutter, Thelen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 157: Erfassung von Bäumen mittels Laserscan-Daten zur Expositionsanalyse entlang des Bundesfernstraßennetzes in NRW**

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

**S 158: Anforderungen an Baustoffe für schwach durchlässige, dauerhaft tragfähige, ungebundene Bankette**

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

**S 159: Dauerhafte Betondecken – Optimierung der Fahrbahnoberfläche durch Texturierung mittels Grinding-Verfahren**

Villaret, Alte-Teigeler, Altreuther, Beckenbauer, Frohböse, Gehlen, Oeser, Skarabis, Tulke, Wang  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 160: Untersuchungen zur Ursache von Treiberscheinungen in Tragschichten ohne Bindemittel unter Verwendung von RC-Baustoffen aus Beton**

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

**S 161: Ermittlung der realistischen Verkehrsverteilung auf mehrstreifigen Bundesfernstraßen als Eingangsgröße für die rechnerische Dimensionierung und Bewertung der strukturellen Substanz**

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

**S 162: Beurteilung von Betonfahrbahndecken hinsichtlich deren in-situ AKR-Potenzial bei Gesteinskörnungen nach dem ARS Nr. 04/2013**

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

**S 163: NANOASPHALT – Optimierung der Gebrauchseigenschaften und der Beständigkeit von Asphaltstraßen unter Nutzung der Nanotechnologie**

Beginn, Belke, Oeser, Meyer, Paffrath, Wellner, Clauß, Beckedahl, Koppers, Schmidt, Erdmann, Schmidt, Hofmann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 164: Untersuchung der Quellempfindlichkeit veränderlich fester Gesteine bei der Verwendung als Erdbaustoff**

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

**S 165: Analyse des gefügeabhängigen Löslichkeitsverhaltens potenziell AKR-empfindlicher Gesteinskörnungen**

Weise, Oesch, Wilsch, Sigmund, Hüniger, Kositz  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 166: Vibrationshammerverfahren zur Bestimmung der Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel**

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

**S 167: Aktualisierung und Anpassung der Straßenbelastungsdaten für die Dimensionierung**

K. Villaret, S. Villaret, Kathmann, Oeser, Ückermann, Schröder, Rive  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 168: Entwicklung einer Prüfsystematik zur Identifizierung der Bitumenart und der verwendeten Modifizierungsmittel in einem Ausbaupasphalt**

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

**S 169: Untersuchung eines praxisbezogenen Instrumentariums zur Bewertung der Rissicherheit von Gussasphalten**

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

**S 170: Kriterien für die Dauerhaftigkeit von Asphaltsschichten - Untersuchungen zur Ansprache des Haftverhaltens**

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

## 2022

**S 171: Informationssystem Straßenzustand Teil 2: Entwicklung von Sensoren zur Erfassung des strukturellen Zustandes von Asphaltstraßen (SENSOR)**

Bald, Böhm, Čičković, Tielmann, Hill, Peitsch, Gablovský, Muschalla, Czaja, Ulrich, Farbischewski, Huczek  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 172: Verbesserung der Erfassung des Verhaltens von Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) zur Berücksichtigung in den RStO, RDO und den RSO**

Wellner, Leischner, Spanier € 16,50

**S 173: Analyse der Auswirkungen von Witterungsextremen an bestehenden Straßenbefestigungen in Betonbauweise**

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

**S 174: Raumdichtebestimmung an hohlraumreichen Asphalten**

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

**S 175: Einfluss der Fugenöffnungsweite auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken aus Beton**

Altreuther, Beckenbauer, Ertsey, Otto, Schubert, Kropp, Hoever  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 176: Strömungsmodelle zur Simulation der Durchsickerung von Straßenbauwerken mit Implementierung hydrologischer Parameter**

Michaelides, Koukoulidou, Birle, Heyer, Vogt  
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.