

**Fachveröffentlichung der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

bast

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung vertreten durch die
Bundesanstalt für Straßenwesen

Schlussbericht

zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FE-Nr. 05.147/2007/CGB

Geohydraulische Bewertung technischer Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau

Sachbearbeiter:

Dipl.-Ing. Gabriele Schweller

Dipl.-Ing. Emanuel Birle

Projektleiter:

Dr.-Ing. Dirk Heyer

Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau

Technische Universität München

Leiter:

Prof. Dr.-Ing. Norbert Vogt, Ordinarius

Oktober 2009

Inhalt	Seite
1 Einleitung	4
2 Forschungskonzept.....	4
2.1 Zielsetzung	4
2.2 Konzeption.....	5
3 Vorstellung der Bauweisen nach M_TS_E.....	6
3.1 Begriffsbestimmungen	6
3.1.1 Technische Sicherungsmaßnahmen	6
3.1.2 Abdichtungssystem	6
3.1.3 Bauweisen mit Abdichtungen	6
3.1.4 Kernbauweisen ohne Abdichtungen	8
3.1.5 Bauweisen mit gering durchlässigem Baukörper aus Buml	9
3.1.6 Bauweise mit wasserabweisender Anspritzung.....	10
4 Grundlagen der Wasserbewegung im ungesättigten Boden.....	10
4.1 Wasserhaushalt von Erdkörpern	10
4.2 Wasserbewegung im Boden in flüssiger Phase	11
5 Modellbildung	18
5.1 Berechnungsprogramm	18
5.2 Vorgehensweise	19
5.3 Modellgeometrie	19
5.4 Randbedingungen	21
5.5 Anfangsbedingung.....	23
5.6 Bodenkennwerte.....	25
5.6.1 Oberboden.....	25
5.6.2 Bankett	25
5.6.3 Dammbaustoff	26
5.6.4 Drän- und Frostschutzschichten	26
5.6.5 Fiktive Dränschicht	26
5.6.6 Dichtung	26
5.6.7 Asphalt.....	26
5.6.8 Buml	27
5.7 Berechnungshilfen in FEFLOW	30
5.7.1 Observation single points	30
5.7.2 Fluid-Flux-Analyzer.....	31
5.7.3 Budget Analyzer	32
5.8 Übersicht über die durchgeführten Berechnungen.....	32
6 Berechnungsergebnisse	35
6.1 Voruntersuchungen zum Straßenaufbau.....	35
6.1.1 Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d.....	37
6.1.2 Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 9,4 mm/d.....	43
6.1.3 Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 23,5 mm/d.....	46
6.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse	48
6.2 Modell A.....	52
6.2.1 Modellbildung – Modell A.....	52

6.2.2	Anfangs- und Randbedingungen – Modell A.....	53
6.2.3	Bodenkennwerte – Modell A.....	55
6.2.4	Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d.....	56
6.2.5	Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 9,4 mm/d.....	59
6.2.6	Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 23,5 mm/d.....	61
6.2.7	Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse – Modell A.....	64
6.3	Modell B.....	66
6.3.1	Modellbildung – Modell B.....	66
6.3.2	Anfangs- und Randbedingungen – Modell B.....	67
6.3.3	Bodenkennwerte – Modell B.....	68
6.3.4	Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d.....	68
6.3.5	Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 9,4 mm/d.....	70
6.3.6	Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse – Modell B.....	71
6.4	Modell D.....	72
6.4.1	Modellbildung – Modell D.....	72
6.4.2	Anfangs- und Randbedingungen – Modell D.....	73
6.4.3	Bodenkennwerte – Modell D.....	75
6.4.4	Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d.....	76
6.4.5	Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 9,4 mm/d.....	81
6.4.6	Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 23,5 mm/d.....	84
6.4.7	Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse – Modell D.....	85
6.5	Modell E.....	88
6.5.1	Modellbildung – Modell E.....	88
6.5.2	Anfangs- und Randbedingungen – Modell E.....	90
6.5.3	Bodenkennwerte – Modell E.....	92
6.5.4	Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d.....	94
6.5.5	Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 9,4 mm/d.....	100
6.5.6	Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 23,5 mm/d.....	103
6.5.7	Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse – Modell E.....	104
6.6	Modellvergleich.....	106
7	Bewertung der einzelnen Bauweisen.....	110
8	Zusammenfassung.....	113
	Literaturverzeichnis.....	114
	Tabellenverzeichnis.....	116
	Abbildungsverzeichnis.....	118

1 Einleitung

Bei Verwendung von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen in Erdbauwerken – in diesem Bericht mit Buml abgekürzt – 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 (M TS E) stellt insgesamt sechs unterschiedliche Bauweisen für Straßendämme, die entsprechend auch auf andere Erdbauwerke übertragbar sind, vor. Diese können prinzipiell in Bauweisen mit Abdichtungen, Bauweisen mit gering durchlässigem Körper aus Buml und Kernbauweisen ohne Abdichtungen unterschieden werden. Im Rahmen des Forschungsauftrages sollen die verschiedenen Bauweisen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit bewertet und gegebenenfalls optimiert werden. Damit stellen die Untersuchungen die Voraussetzung für einen anforderungsgerechten Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen dar.

2 Forschungskonzept

2.1 Zielsetzung

Mit der vorliegenden Forschungsarbeit soll die Wirksamkeit verschiedener technischer Sicherungsmaßnahmen bei der Verwendung von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau bewertet werden. Die Betrachtung soll dabei in umweltspezifischer und wasserwirtschaftlicher Hinsicht erfolgen. Da ein potentieller Schadstoffaustrag aus dem 3-Phasen-System des Bodens in der Regel maßgeblich über die flüssige Phase erfolgt, ist das entscheidende Kriterium aus wasserwirtschaftlicher und umweltspezifischer Sicht die bei den verschiedenen Bauweisen zu erwartende Sickerwassermenge.

Bereits im Zuge des BMBF-Förderschwerpunktes „Sickerwasserprognose“ wurden von Grathwohl et al. (2006) Berechnungen zur Durchsickerung verschiedener Erdbauwerke bei der Verwendung von Ersatzbaustoffen durchgeführt. Neben einem Lärmschutzwall und einer Parkplatzsituation wurde dabei ein Straßendamm untersucht. Technische Sicherungsmaßnahmen wurden in den Berechnungen nicht berücksichtigt.

Im Vergleich zu den Berechnungen von Grathwohl et al. (2006) sollen in dieser Forschungsarbeit verschiedene Bauweisen zur technischen Sicherung von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau untersucht werden. Dabei sollen die in den betrachteten

Straßendamm versickernden Niederschläge nicht vorgegeben werden, sondern sie ergeben sich in Abhängigkeit von den hydraulischen Eigenschaften der Oberbodenschicht. Anhand der Berechnungsmodelle sollen die verschiedenen Bauweisen im Hinblick auf die Sickerwassermengen vergleichend untersucht werden und unter Berücksichtigung der Ergebnisse ggf. modifiziert bzw. optimiert werden.

2.2 Konzeption

Zu Beginn der Forschungsarbeit werden die relevanten Bauweisen zum Einbau von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen in Erdbauwerken charakterisiert. Dabei wird zwischen Bauweisen mit Abdichtungen, Bauweisen mit gering durchlässigem Körper aus Buml und Kernbauweisen ohne Abdichtungen unterschieden. Anschließend werden die im Hinblick auf den Wasserhaushalt von Erdkörpern relevanten Prozesse herausgearbeitet. Zur Verringerung der Komplexität der Modelle und der erforderlichen Eingangsparameter werden von diesen im Zuge der Modellbildung nur die für die Zielsetzung der Forschungsarbeit unbedingt erforderlichen Prozesse betrachtet. Für die Qualität der Berechnungsergebnisse ist die Abbildung der Wasserbewegung im Boden von großer Bedeutung. Aus diesem Grunde werden in Abschnitt 1 die dem gewählten physikalischen Modell zugrunde liegenden theoretischen Grundlagen zur Wasserbewegung im Boden kurz dargestellt.

Unter Berücksichtigung des gewählten physikalischen Modells wird anschließend im Detail auf die Modellgeometrie, die Randbedingungen und die Bodenkennwerte eingegangen. Bei den betrachteten Bauweisen handelt es sich um mehrschichtige Erdkörper, die unter Berücksichtigung der bautechnischen Regelwerke aus sehr unterschiedlichen Materialien aufgebaut sein können. Entsprechend können die für die vorliegende Fragestellung relevanten hydraulischen Eigenschaften einer Schicht in Abhängigkeit vom verwendeten Material sehr unterschiedlich sein. Diesem wird Rechnung getragen, indem den betreffenden Bodenschichten die Kennwerte unterschiedlicher Bodenarten zugrunde gelegt werden. Kombiniert man die verschiedenen Bodenarten mit den gewählten Randbedingungen und Bauweisen, ergibt sich jedoch eine sehr große Anzahl an Berechnungsmodellen. Zur Reduzierung des Rechenaufwandes werden deshalb in Vorstudien die Einflüsse unterschiedlicher Bodeneigenschaften im Bereich des Straßenaufbaus abgeklärt. Dies umfasst beispielsweise den Einfluss der Eigenschaften des Banketts und des Oberbodens auf die in den Erdkörper eindringenden Sickerwassermengen. In Abschnitt 6.1 des vorliegenden Entwurfes des Schlussberichtes werden die Ergebnisse dieser Vorstudien im Detail dargestellt, und es werden darauf aufbauend auf der sicheren Seite liegend die für die weiteren Berechnungen anzusetzenden Bodeneigenschaften definiert.

Mit dem auf Grundlage der Vorstudien definierten Straßenaufbau wurden anschließend weitere Berechnungen zur vergleichenden Untersuchung der verschiedenen Bauweisen durchgeführt. Die Berechnungen wurden mit unterschiedlichen, im zeitlichen Verlauf konstanten Niederschlagsmengen durchgeführt. Nach Erfordernis wurden zum Teil die Bodeneigenschaften der die verschiedenen Bauweisen charakterisierenden Schichten variiert. Anhand der Ergebnisse werden die im Merkblatt M TS E vorgestellten Bauweisen mit den darin definierten Anforderungen an die Eigenschaften maßgebender Bodenschichten überprüft. Abschließend werden die verschiedenen Bauweisen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit beurteilt und werden Empfehlungen zur Optimierung der einzelnen Bauweisen gegeben.

3 Vorstellung der Bauweisen nach M TS E

3.1 Begriffsbestimmungen

Das Merkblatt über Bauweisen für Technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau (M TS E) definiert die Begriffe Technische Sicherungsmaßnahmen und Abdichtungssystem wie folgt:

3.1.1 Technische Sicherungsmaßnahmen

„Technische Sicherungsmaßnahmen im Sinne des Merkblattes M TS E sind bautechnische und/oder konstruktive Maßnahmen, die geeignet sind, den Schutz von Boden, Grundwasser und Oberflächengewässer beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen sicherzustellen.“

3.1.2 Abdichtungssystem

„Das Abdichtungssystem besteht aus dem Dichtungselement (mineralische Abdichtung, geosynthetische Tondichtungsbahn, Kunststoffdichtungsbahn, Wasser abweisende Anspritzung) und den ggf. erforderlichen Sicker-, Schutz-, Stütz-, Trenn- und Filterschichten.“

3.1.3 Bauweisen mit Abdichtungen

Im Merkblatt M TS E für den Einbau von Bodenmaterial mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen in Lärm- und Sichtschutzwälle sowie Straßendämme werden einige zu berücksichtigende Bedingungen gegeben. Eine Durchsickerung von schadstoffbelasteten Böden und Baustoffen durch eindringendes Oberflächen- und Niederschlagwasser muss durch Abdichtungen verhindert werden. Dabei kann die Dichtung aus witterungsempfindlichen Materialien (geosynthetische und mineralische Stoffe) sowie aus witterungsunempfindlichen Baustoffen wie Kunststoffdichtungsbahnen und geeigneten Bentonitmatten bestehen.

Das Merkblatt M TS E führt verschiedene Bauweisen mit Abdichtungen auf. Die im Folgenden dargestellten Abbildungen zeigen Straßendämme, bei denen die als wasserundurchlässig geltenden Fahrbahndecken als Bestandteil der Abdichtung gesehen werden. Um den Schutz des Dammkernes aus Bodenmaterial mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen vor Durchsickerung sicherzustellen, ist eine im Ausbreitungswinkel von 45° unter die Asphaltdecke reichende Kunststoffdichtungsbahn oder wahlweise eine geosynthetischen Tondichtungsbahn anzuordnen. Diese müssen im Straßenseitenbereich mindestens 1,2 m, in Sonderfällen 1,6 m, unter der Oberfläche eingebracht sein, damit eine Durchstoßung durch Pfosten und Schutzplanken verhindert wird. Sinngemäß sind die unterschiedlichen Bauweisen auf andere Erdbauwerke übertragbar; an die Stelle der Asphaltdecke tritt beispielsweise für Wälle eine durchgängige Dichtung.

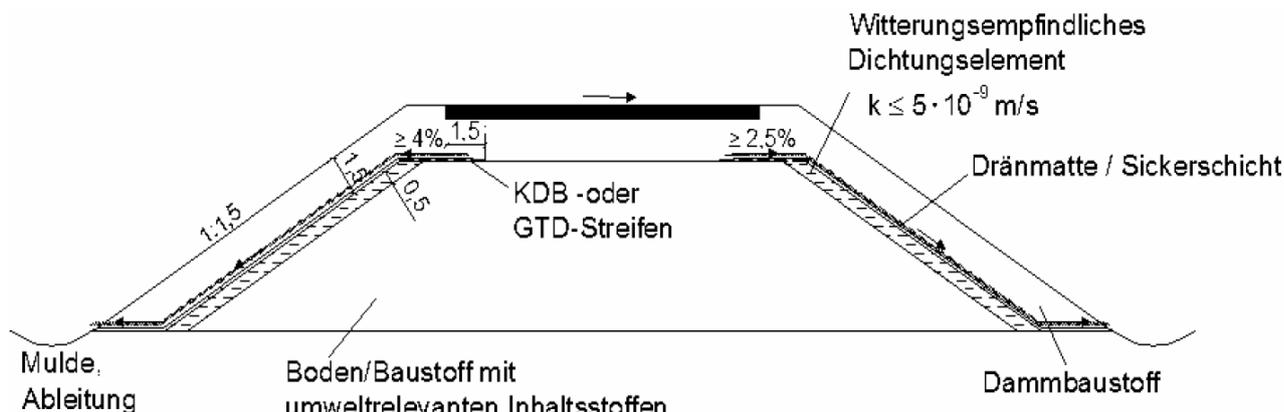


Abbildung 3.2: Bauweise B – Damm mit witrungsempfindlichen Dichtungselementen und Sickerschicht

Die Verwendung einer witrungsunempfindlichen Abdichtung wie Kunststoffdichtungsbahnen oder geosynthetischen Tondichtungsbahnen, bei denen eine Unempfindlichkeit gegenüber Durchwurzelung und Witrungsbeanspruchungen belegt ist, macht eine Überdeckung mit Dammbaustoff in einer Mächtigkeit von 1,5 m unnötig. Je nach Art der geplanten Begrünung ist hierbei die Dicke der Überdeckung zu wählen. Diese Bauweise C, in Abbildung 3.3 dargestellt, erlaubt bei gleich bleibenden Dammabmessungen eine größere Kubatur des Dammkernes aus Buml.

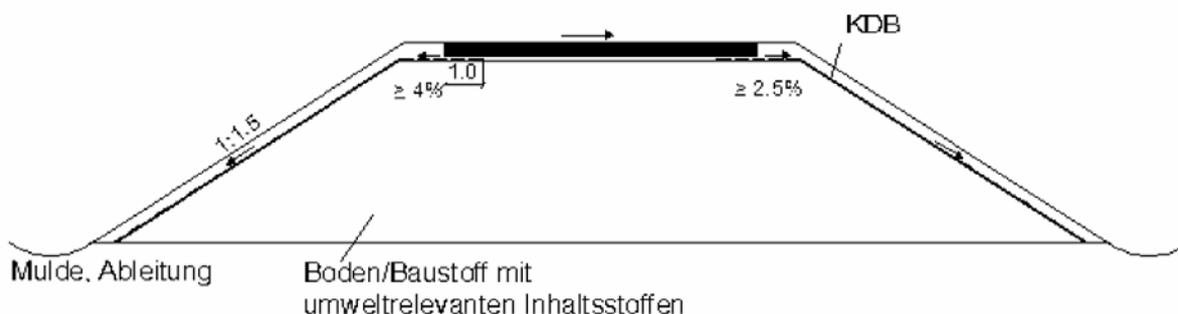


Abbildung 3.3: Bauweise C – Damm mit witrungsunempfindlichen Dichtungselementen

3.1.4 Kernbauweisen ohne Abdichtungen

Eine weitere Form des Dammaufbaus, bei der der Kern aus Buml nur im Bereich unterhalb der Fahrbahn eingebaut wird, ist in Abbildung 3.4 zu sehen. Die Stützkörper an den Seiten werden mit einem Durchlässigkeitsbeiwert, der mindestens um das 50-fache größer als der des Kernmaterials ist, eingebaut ($k_1 \geq 50 \cdot k_2$).

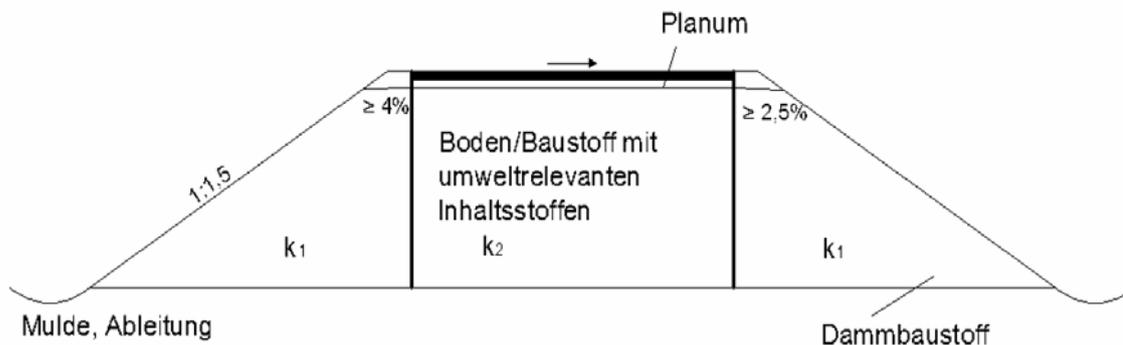


Abbildung 3.4: Bauweise D – Damm mit Kern aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen

3.1.5 Bauweisen mit gering durchlässigem Baukörper aus BumI

Bei der in Abbildung 3.5 dargestellten Bauweise E soll der Dammkern aus BumI nach Einbau einen Durchlässigkeitsbeiwert von $k_f \leq 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ aufweisen. Zusammen mit einer darüber liegenden Dränschicht, die eine rasche Ableitung des infiltrierten Wassers gewährleistet, soll damit eine Durchsickerung minimiert werden. Für diese Dammbauweise sind zwei Varianten vorgesehen. Variante 1 fasst das von der Fahrbahndecke abfließende Oberflächenwasser mittels Hochbord am tiefer gelegenen Straßenrand. Bei Variante 2 fließt das Oberflächenwasser über die Böschung ab und wird am Dammfuß abgeleitet.

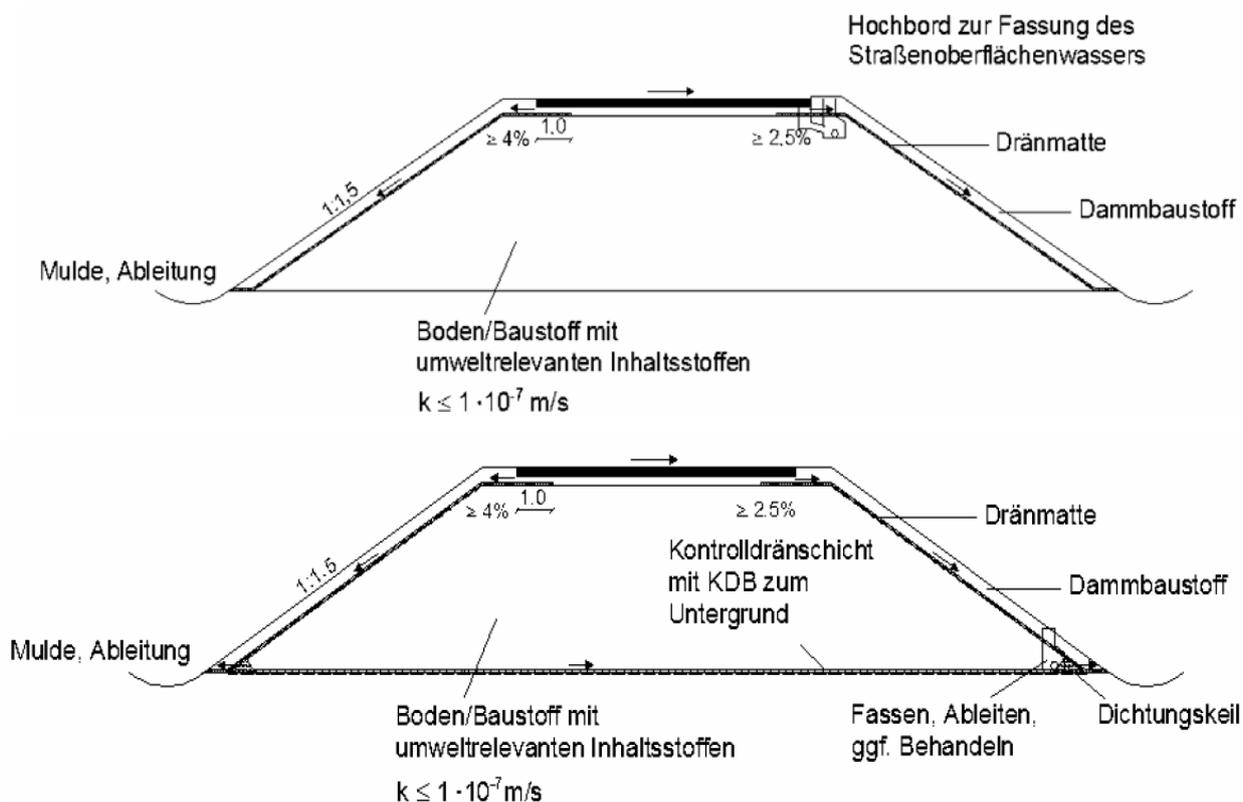


Abbildung 3.5: Bauweise E – Damm mit schwach durchlässigem Baukörper aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen

3.1.6 Bauweise mit wasserabweisender Anspritzung

Eine zusätzliche Variante für den Aufbau eines Erdbauwerkes aus Materialien mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen stellt die Anspritzung mit einer wasserabweisenden Bitumenemulsion von mindestens $0,8 \text{ kg/m}^2$ dar (Abbildung 3.6). Die Anwendung dieser Bauweise F bedingt allerdings hydrogeologisch günstige Untergrundverhältnisse (siehe unter Anderem RuA-StB, 2005). Für die Dicke der Überdeckung der wasserabweisenden Anspritzung gilt die Art der späteren Bepflanzung als Maßgabe.

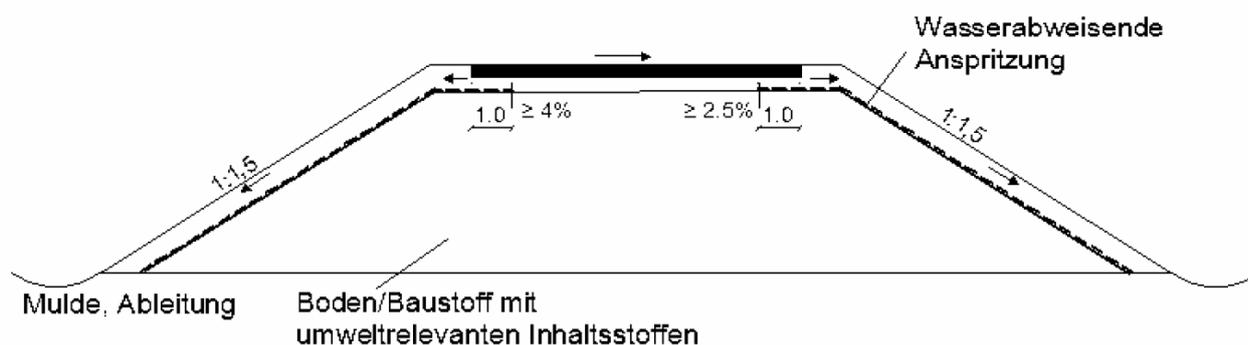


Abbildung 3.6: Bauweise F – Damm mit wasserabweisender Anspritzung

4 Grundlagen der Wasserbewegung im ungesättigten Boden

4.1 Wasserhaushalt von Erdkörpern

Der Wasserhaushalt eines bewachsenen Erdkörpers mit seinen wichtigsten Komponenten ist vereinfacht in Abbildung 4.1 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)

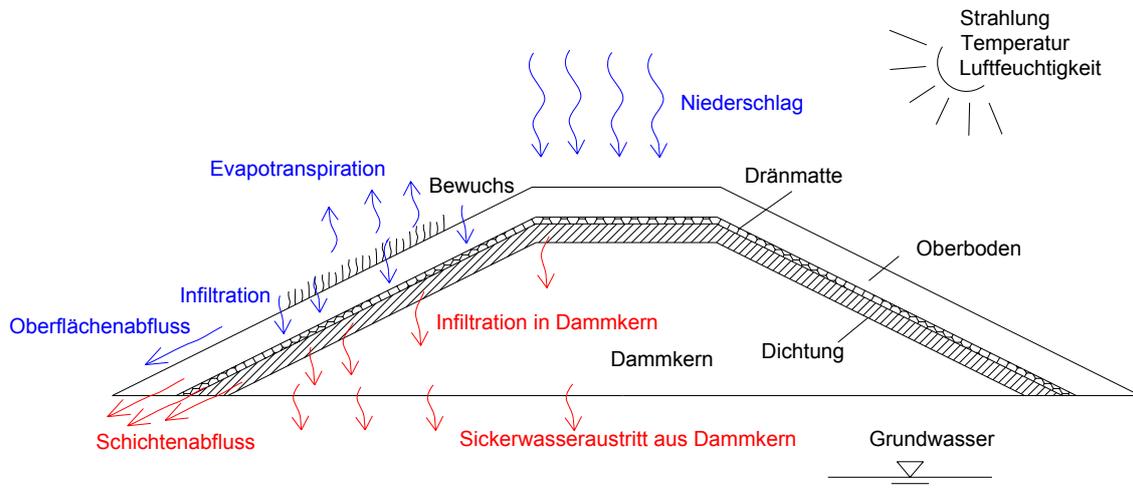


Abbildung 4.1: Wasserhaushalt eines Erddammes mit technischen Sicherungselementen

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.

Die im Oberboden bzw. an der Bodenoberfläche auftretenden Vorgänge der Evaporation, Transpiration der Pflanzen, des Oberflächenabflusses und der Versickerung infolge von Niederschlägen sind hochkomplexe Prozesse, die mit numerischen Methoden bisher nur bedingt simulierbar sind (Benson et al., 2004). Unter Berücksichtigung der Zielsetzung des vorliegenden Forschungsvorhabens wird nur die Wasserbewegung im Boden betrachtet (in Abbildung 4.1 rot dargestellt). Die Wasserbewegung in der gasförmigen Phase bleibt dabei unberücksichtigt. Im Hinblick auf eine vergleichende Untersuchung der Wirksamkeit der einzelnen Bauweisen ist diese Vorgehensweise aber ausreichend.

Im Folgenden werden die Grundlagen der Wasserbewegung in der flüssigen Phase im Boden dargestellt.

4.2 Wasserbewegung im Boden in flüssiger Phase

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 und kann bei der vorliegenden Fragestellung vernachlässigt werden.

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:

$$k = \frac{Q}{A} \cdot \frac{d}{h} \quad (1)$$

Dabei ist d die Dicke des Bodens [L] und 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 [L³] und der durchströmten Fläche A [L²] wird aus Gleichung (1):

$$k = v \cdot \frac{d}{h} \quad (2)$$

Mit Einführung des hydraulischen Gradienten $i = d/h$ ergibt sich:

$$k = \frac{v}{i} \quad (3)$$

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

$$v = k \cdot \text{grad}(h) \quad (4)$$

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 ψ_h berücksichtigt. Nach Buckingham (1907) lässt sich die Filtergeschwindigkeit damit folgendermaßen ausdrücken:

$$v = k(\theta) \cdot \text{grad}(\psi_h) \quad (5)$$

Dabei stellt $k(\theta)$ [L/T] den vom volumetrischen Wassergehalt abhängigen Durchlässigkeitsbeiwert dar; ψ_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** ψ_g berücksichtigt den Einfluss des Schwerfeldes der Erde und erscheint als geodätische Höhe z .
- Das **Matrixpotential** ψ_m umfasst den Einfluss der Bodenmatrix auf das Wasser infolge von Kapillar- und Adsorptionskräften.

- Das **osmotische Potential** ψ_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:

$$\Psi_h = \Psi_m + \Psi_g \quad (6)$$

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 4.2 dargestellten Volumenelementes mit den daran auftretenden Filtergeschwindigkeiten ableiten.

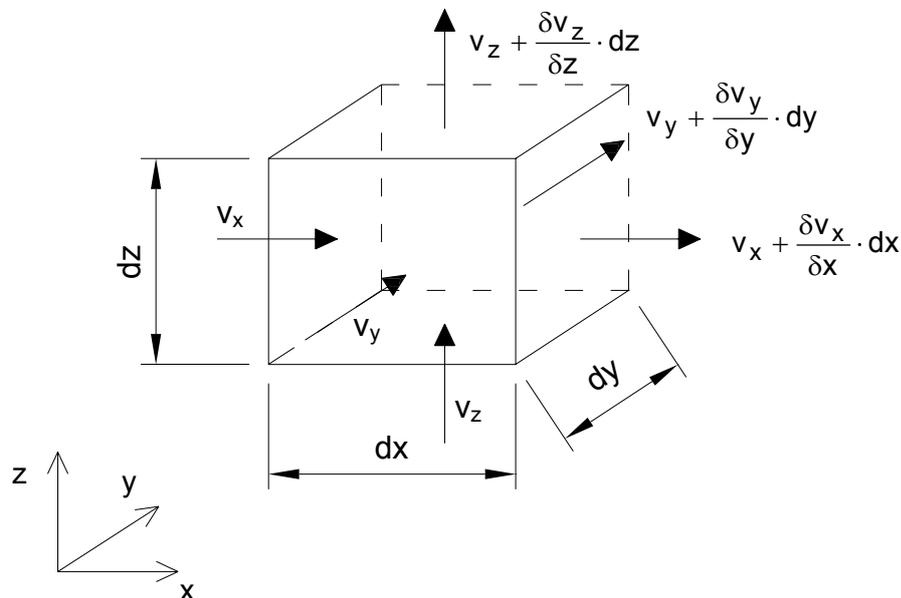


Abbildung 4.2: Volumenelement mit Filtergeschwindigkeiten

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

$$\frac{\delta v_x}{\delta x} + \frac{\delta v_y}{\delta y} + \frac{\delta v_z}{\delta z} = 0 \quad (7)$$

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 θ und Gleichung (7) nimmt folgende Form an:

$$\frac{\delta v_x}{\delta x} + \frac{\delta v_y}{\delta y} + \frac{\delta v_z}{\delta z} = \frac{\delta \theta}{\delta t} \quad (8)$$

Durch Kombination des Fließgesetzes nach Darcy-Buckingham (Gleichung (5)) mit der Kontinuitätsbedingung (Gleichung (8)) erhält man nach einigen Umformungen die sogenannte Richards-Gleichung:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left[k(\theta) \cdot \frac{\delta \psi_m}{\delta x} \right] + \frac{\delta}{\delta y} \left[k(\theta) \cdot \frac{\delta \psi_m}{\delta y} \right] + \frac{\delta}{\delta z} \left[k(\theta) \cdot \frac{\delta \psi_m}{\delta z} + 1 \right] = C(\psi) \frac{\delta \psi}{\delta t} \quad (9)$$

$$\text{mit } C(\psi) = \frac{\delta \theta}{\delta \psi} \quad (10)$$

$C(\psi)$ 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 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 Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung und auf die Durchlässigkeitseigenschaften ausüben.

Die Abbildung 4.3 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.

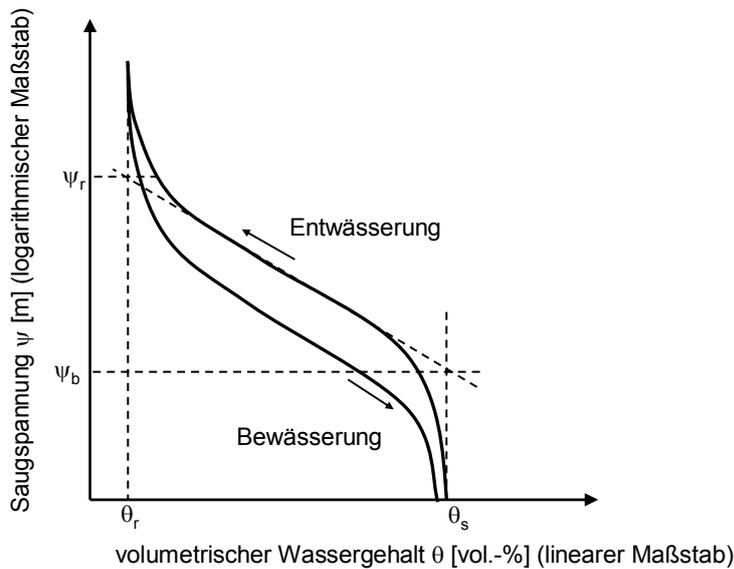


Abbildung 4.3: Typische Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung

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

- Der Sättigungswassergehalt θ_s (siehe Abbildung 4.3) 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 Lufttrittspunkt ψ_b abgeleitet werden (siehe Abbildung 4.3). 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 θ_r bestimmt werden (siehe Abbildung 4.3).

Die Abbildung 4.4 stellt die prinzipielle Form der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung für unterschiedliche Böden als Entwässerungskurve unter Vernachlässigung des hysteretischen Verhaltens dar. Es ist erkennbar, dass der Lufttrittspunkt, welcher der passiven kapillaren Steighöhe entspricht, mit zunehmendem Feinkornanteil zunimmt. Sandige Böden mit geringem Feinkornanteil zeigen außerdem eine starke Entwässerung bei Saugspannungen oberhalb des Lufttrittspunktes, was aus dem sehr flachen Kurvenverlauf in Abbildung 4.4 deutlich wird.

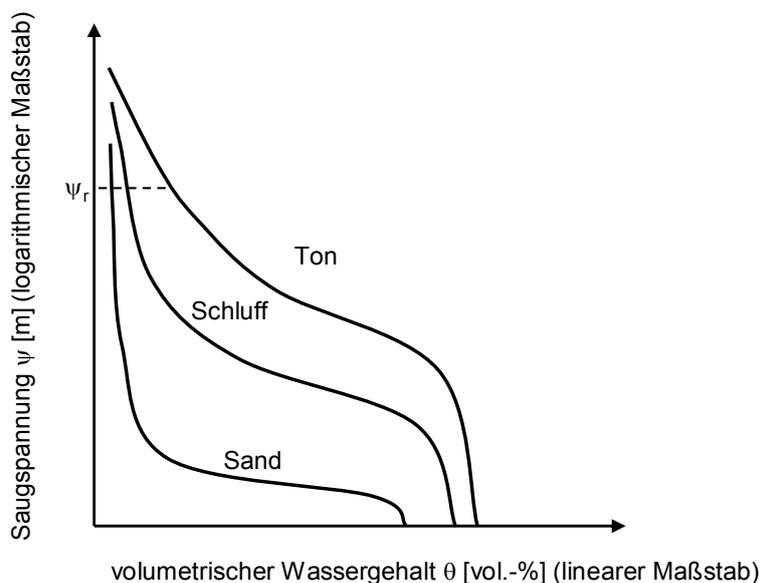


Abbildung 4.4: typische Beziehung zwischen Saugspannung und volumetrischen Wassergehalt für unterschiedliche Böden

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 drei-parametriges Modell vor:

$$S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \cdot \psi)^n} \right]^m \quad (11)$$

Dabei sind n [-], m [-] und α [1/L] die an einen messtechnisch ermittelten Verlauf einer Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung anzupassenden Parameter. Der Parameter α kann dabei in Zusammenhang mit dem Lufteintrittspunkt 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:

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (12)$$

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

$$k_r(\theta) = \frac{k(\theta)}{k_s} = S_e^\tau \left[\frac{\int_0^\theta \frac{d\theta}{\Psi}}{\int_0^{\theta_s} \frac{d\theta}{\Psi}} \right]^2 \quad (13)$$

Dabei sind:

k_r : relativer Durchlässigkeitsbeiwert [-]

k : absoluter Durchlässigkeitsbeiwert [L/T]

k_s : gesättigter Durchlässigkeitsbeiwert [L/T]

τ : Tortuositätsfaktor [-]

$$S_e: \text{ effektiver Sättigungsgrad [-], } S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \text{ bzw. } S_e = \frac{S - S_r}{S_s - S_r} \quad (14)$$

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 $\tau = 0,5$:

$$k_r(\psi) = \frac{k(\psi)}{k_s} \cdot \frac{\left[1 - (\alpha|\psi|)^{n-1} \cdot \left[1 + (\alpha|\psi|)^n \right]^{-m} \right]^2}{\left[1 + (\alpha|\psi|)^n \right]^{\frac{m}{2}}} \quad (15)$$

Unter Verwendung des relativen Sättigungsgrades S_e wird aus Gleichung (15):

$$k(S_e) = k_s \cdot S_e^{0,5} \cdot \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (16)$$

Mit Gleichung (15) lässt sich die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit direkt aus dem Matrixpotential unter Verwendung der Parameter α , n und m entsprechend dem Modell nach van Genuchten (1980) ermitteln.

Der Parameter m ist dabei nicht unabhängig, sondern es gilt:

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (17)$$

Das bedeutet, dass die Beziehungen zwischen Saugspannung und Wassergehalt sowie der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und dem Wassergehalt in geschlossener Form aus den Gleichungen (11) und (16) ermittelt werden können. Die zu bestimmenden Eingangsparameter sind der volumetrische Wassergehalt bei Sättigung θ_s bzw. der Sättigungsgrad bei Vollsättigung S_s , der volumetrische Restwassergehalt θ_r bzw. der Sättigungsgrad beim Restwassergehalt S_r , der ge-

sättigte Durchlässigkeitsbeiwert k_s , sowie die Parameter α und n . Der volumetrische Wassergehalt und der Sättigungsgrad sind über den Porenanteil miteinander verknüpft.

5 Modellbildung

5.1 Berechnungsprogramm

Die Untersuchungen werden 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 4.2 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 4.2 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 lässt sich die durch Evapotranspiration abgegebene Wassermenge aus diesen Modellen nicht ermitteln, sondern muss getrennt davon abgeschätzt werden und ggf. bei der Definition der Randbedingungen berücksichtigt werden. Da die Transpiration und die Evaporation von den klimatischen Verhältnissen (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Strahlung) und von den Eigenschaften des Bewuchses gesteuert werden, ist das Verhalten des Wasserhaushaltes im zeitlichen Verlauf mit den verwendeten Modellen nur vereinfachend abbildbar. Für die Nachrechnung von Feldmessdaten 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 und Strahlung, was die Komplexität der Berechnungen erhöht.

Da es bei dem vorliegenden Forschungsvorhaben um eine vergleichende Untersuchung verschiedener Bauweisen geht, hat man sich zur Reduzierung des Berechnungsaufwandes für ein Sickerwassermodell entschieden.

5.2 Vorgehensweise

Zunächst werden die im Merkblatt M TS E aufgeführten Bauweisen mit technischen Sicherungselementen analysiert. Unter Berücksichtigung der Funktion der verschiedenen Elemente der einzelnen Bauweisen wird anschließend die Geometrie so weit wie möglich vereinfacht und entsprechend den Modellanforderungen modifiziert. Nach der Ermittlung der Modellgeometrie können Bodenkennwerte und Randbedingungen zugewiesen werden. Während des zeitaufwändigen Prozesses der Modellfindung durch eine Vielzahl von Vorberechnungen stellte sich heraus, dass die stark nichtlineare partielle Differenzialgleichung bei dem vorliegenden mehrschichtigen geometrischen Aufbau nur unter Diskretisierung der einzelnen Zeitschritte instationär gelöst werden kann. Die Berechnung wurde deshalb von einem definierten Anfangszustand ausgehend gestartet und bis zum Erreichen eines quasi-stationären Zustandes durchgeführt.

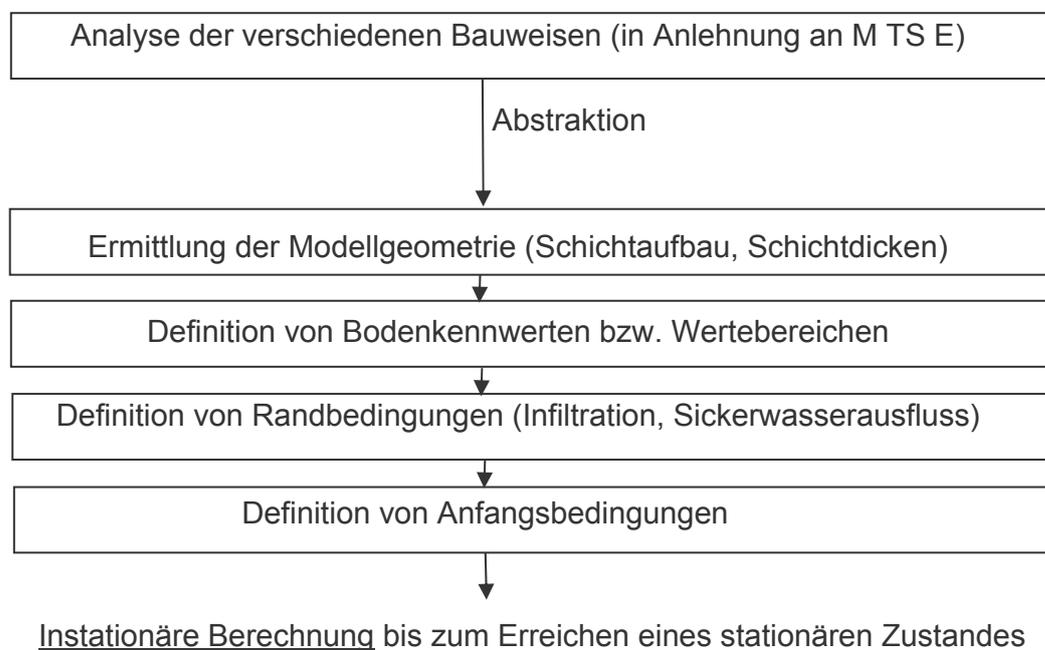


Abbildung 5.1: Modellierungsschritte

5.3 Modellgeometrie

Allen Berechnungen wird ein 5 m hoher Damm mit den Abmessungen des wirtschaftlichen und leistungsfähigen Regelquerschnittes RQ 10,5 nach RAS-Q (1996), der in der Regel für Bundesstraßen verwendet wird, zugrunde gelegt. In Abbildung 5.2 ist der Damm mit dem für alle Bauweisen charakteristischen Straßenaufbau am Beispiel der Bauweise E dargestellt.

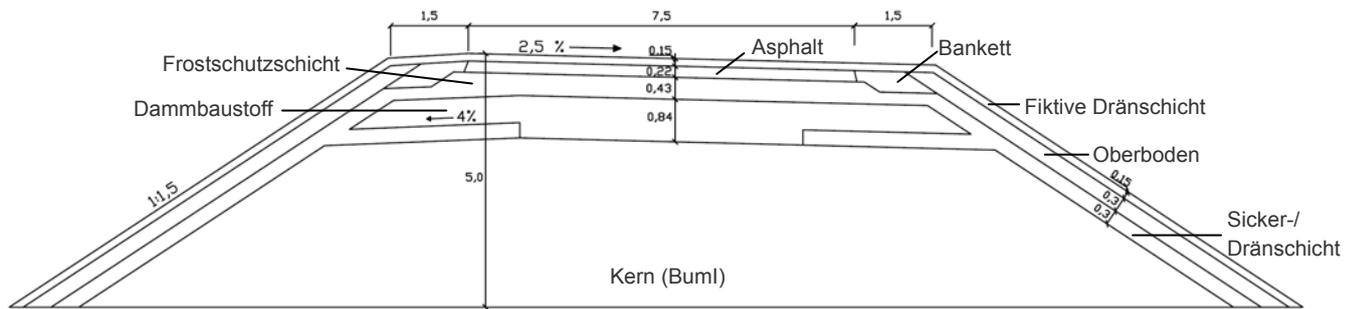


Abbildung 5.2: Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus Buml – Modellierung

Im Zuge der Voruntersuchungen zeigte es sich, dass die Abbildung der Wasserbewegung in den einzelnen Schichten des Straßenaufbaus eine sehr feine räumliche Diskretisierung erfordert. Die zunächst am gesamten Damm durchgeführten Modellberechnungen waren dadurch mit sehr großen Rechenzeiten verbunden. Aus diesem Grund wurde das Berechnungsmodell auf den in Abbildung 5.3 dargestellten eingefärbten Bereich beschränkt. Den eigentlichen Dammquerschnitt umgibt eine fiktive Dränschicht, die einen Wasserabfluss auf dem eigentlichen Straßendamm im Sinne eines Oberflächenabflusses ermöglichen soll. Der auf das Modell aufgebrachte Niederschlag kann so entweder in den Damm infiltrieren oder auf der Straßenoberfläche über die fiktive Dränschicht abfließen. Im Vergleich zu den von Grathwohl et al. (2006) durchgeführten Berechnungen zur Durchsickerung verschiedener Erdbauwerke bei Verwendung von Ersatzbaustoffen soll die Menge und Verteilung des in den Damm infiltrierenden Niederschlagswasser damit realitätsnaher erfasst werden. Grathwohl et al. (2006) gaben in ihren Berechnungen die in den Damm infiltrierenden Wassermengen direkt als Randbedingung vor, was im Falle eines gering durchlässigen Banketts zu einer Überschätzung der Sickerwassermengen führen kann.

Gemäß der RAS-Ew (2005) sollte der Oberboden im Falle einer Böschungsneigung steiler als 1:2 mit einer Mächtigkeit von 10 cm ausgeführt werden. Aus Gründen der Modellierbarkeit wurde der Oberboden mit einer Mächtigkeit von 30 cm abgebildet. Das Gleiche gilt für die als Kiesschicht modellierte Sickerschicht. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit dürfte sie wie im Merkblatt M TS E für die Bauweise E dargestellt in der Regel als wenige Zentimeter dicke Dränmatte ausgeführt werden. Derart dünne Elemente bereiten aber Schwierigkeiten bei der Generierung des Finite-Elemente-Netzes und können zu erheblichen numerischen Problemen führen.

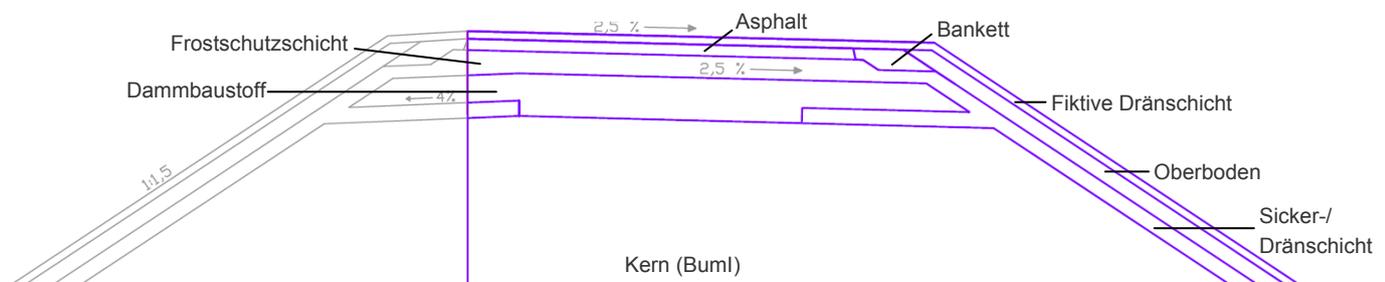


Abbildung 5.3: Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus Buml – Modellgeometrie

Die FE-Modelle bestehen aus ca. 50.000 Dreieckselementen. Im Bereich des Oberbodens, des Banketts und des Bumls, bei dem die größten Sickerwassermengen zu erwarten sind, wurde das Netz jeweils lokal verfeinert (siehe Abbildung 5.4).

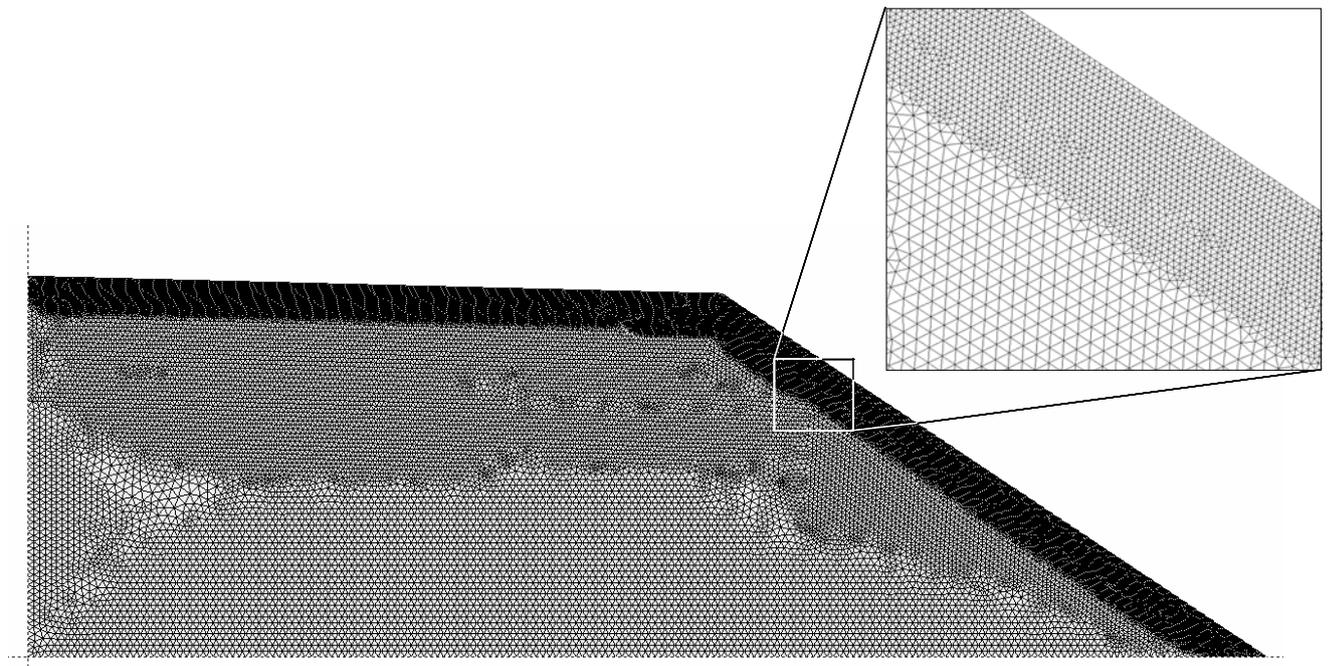


Abbildung 5.4: Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus Buml – Finite-Elemente-Netz

5.4 Randbedingungen

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die Wirksamkeit verschiedener Bauweisen vergleichend zu untersuchen. Eine exakte Abbildung des Wasserhaushaltes im jahreszeitlichen Ablauf ist deshalb nicht erforderlich. Mit dem gewählten Berechnungsmodell kann wie bereits in Abschnitt 1.1 beschrieben prinzipiell nur die Wasserbewegung im Boden abgebildet werden. Die an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse der Evapotranspiration, des Oberflächenabflusses und der Infiltration können nur vereinfachend dargestellt werden. Großen Einfluss auf die Wirksamkeit der Bauweisen hat die Menge und Verteilung des infiltrierenden Niederschlagswassers. Für die Berechnungen wird angenommen, dass die Asphaltfläche praktisch undurchlässig ist und in diesem Bereich keine Infiltration, sondern nur ein Oberflächenabfluss stattfindet. Dementsprechend wird das im Bereich der Fahrbahn auftreffende Niederschlagswasser rechnerisch vollständig über den Fahrbahnrand an das Bankett abgeführt. Dort kommt es in Abhängigkeit von den hydraulischen Eigenschaften des Banketts zu einer Versickerung in den Boden bzw. zu einem weiteren Oberflächenabfluss. Da das Bankett nach RAS-Ew (2005) schwach durchlässig sein sollte, ist davon auszugehen, dass das anfallende Niederschlagswasser nur zum Teil versickern wird. Die Sickerwassermenge ist vor allem von den Durchlässigkeitseigenschaften des entsprechenden Materials abhängig. Zu Beginn eines Niederschlagsereignisses liegt das Material in der Regel im ungesättigten Zustand vor und wird im Laufe des Niederschlagsereignisses aufsättigen. Mit zunehmendem Wassergehalt nehmen die Durchlässigkeit des Materials zu und die Saugspannungen ab. Zur Abbildung der Sickerwassermenge im Modell wird der Zusammenhang zwischen Durch-

lässigkeit und Wassergehalt sowie Saugspannung und Wassergehalt benötigt. Diese werden in der Regel in Laboruntersuchungen ermittelt oder mit Hilfe von Pedotransferfunktionen aus elementaren Bodeneigenschaften abgeschätzt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass zwischen Labor- und Felduntersuchungen u.a. aufgrund des Einflusses von Bewuchs und von Kleintiertätigkeit erhebliche Unterschiede auftreten können. In der vorliegenden Forschungsarbeit wird die über das Bankett und den Oberboden infiltrierende Wassermenge in ihrer Größe und in ihrer Verteilung nicht vorgegeben, sondern sie stellt sich in Abhängigkeit der Bodeneigenschaften ein. Da mit dem verwendeten mathematischen Modell prinzipiell nur die Wasserbewegung im Boden abgebildet werden kann, wird im Modell über dem eigentlichen Straßenkörper eine zusätzliche fiktive Schicht aufgebracht. Diese zeichnet sich durch eine sehr große Durchlässigkeit aus und dient im Modell zur Abführung des in der Realität anfallenden Oberflächenwasser. Im Folgenden wird diese Schicht als fiktive Dränschicht bezeichnet.

Am oberen Modellrand, d.h. auf der Oberseite der fiktiven Dränschicht, wird der Niederschlag in Form eines konstanten Zuflusses („Flux-Randbedingung“) aufgebracht. Die Größe des Niederschlages wurde anhand des mittleren jährlichen Niederschlages für den Flughafen München von 857 mm/a berechnet. Dieser Wert liegt etwas über dem mittleren jährlichen Niederschlag für die Bundesrepublik Deutschland von 797 mm/a (DWD). In den ersten Berechnungen wurde der Gesamtniederschlag auf 365 Tage verteilt, womit man eine konstante Niederschlagsmenge von 2,35 mm/d erhält. Um die Auswirkungen größerer Niederschlagsmengen zu studieren, wurden zusätzlich Berechnungen mit einer 4-fach sowie einer 10-fach größeren Niederschlagsmenge, d.h. 9,4 mm/d und 23,5 mm/d durchgeführt. Diese Wassermengen entsprechen dem mittleren jährlichen Niederschlag für den Flughafen München verteilt auf 3 bzw. 1,2 Monate. Die modellierte Böschungsneigung von 1:1,5 berücksichtigend wird der Niederschlag im Böschungsbereich entsprechend auf 1,955 mm/d, 7,82 mm/d bzw. 19,55 mm/d abgemindert.

An der Modellunterseite wird die Situation eines freien Ausflusses modelliert. Dies geschieht über die Definition eines Potentials entsprechend der geodätischen Höhe und der sogenannten „constraint“-Randbedingung. Das Wasser darf an der Unterseite demzufolge nur aus-, aber nicht einströmen.

Die Definition des Potentials entsprechend der geodätischen Höhe führt dazu, dass Wasser nur im Falle voller Sättigung ausströmen kann, da entsprechend Gleichung (6) gilt:

$$\psi_h = \psi_m + \psi_g$$

und im Falle von $\psi_h = \psi_g$ das Matrixpotential ψ_m gleich Null ist.

Der linke Modellrand ist undurchlässig und bildet damit eine feste Berandung. In Abbildung 5.5 ist das verwendete Modell mit den Randbedingungen für die Bauweise mit gering durchlässigem Körper aus Buml dargestellt.

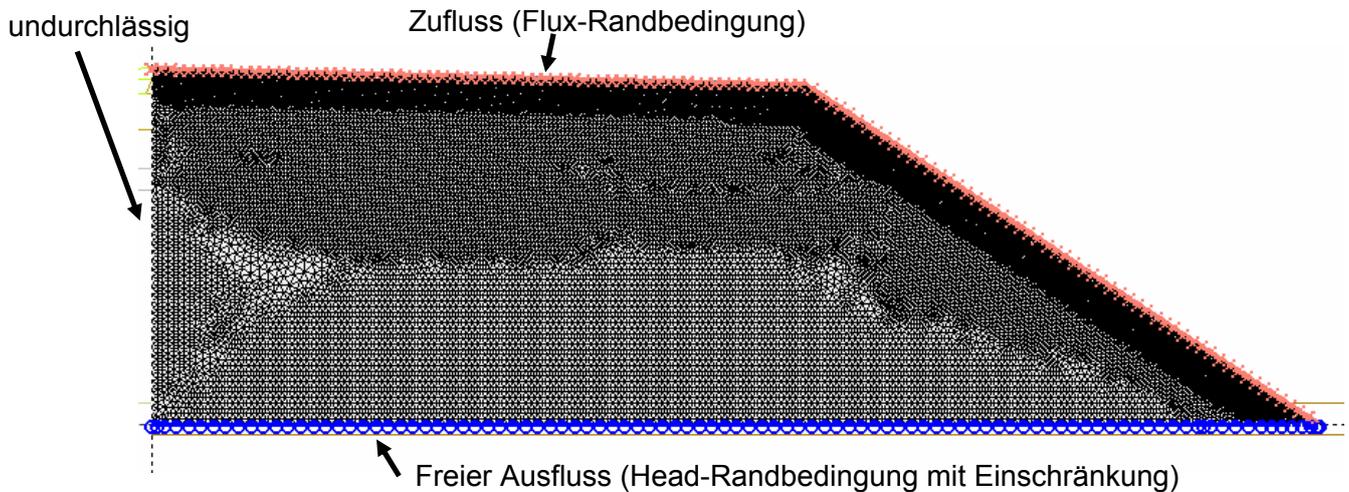


Abbildung 5.5: Modell mit Randbedingungen

5.5 Anfangsbedingung

Als Anfangsbedingung wurde den Berechnungen in der ersten Phase im gesamten Modellbereich eine Potentialhöhe $\psi_h = 0$ vorgegeben. Dies entspricht der Situation, dass der Erdkörper an der Unterseite im Grundwasser steht. Im gesamten Modell muss damit gelten, dass das Matrixpotential gleich dem Gravitationspotential ist, also $\psi_m = -\psi_g$ bzw. $\psi_m = -z$. Entsprechend der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung der einzelnen Materialien ergibt sich damit die in Abbildung 5.6 dargestellte Verteilung des Sättigungsgrades.

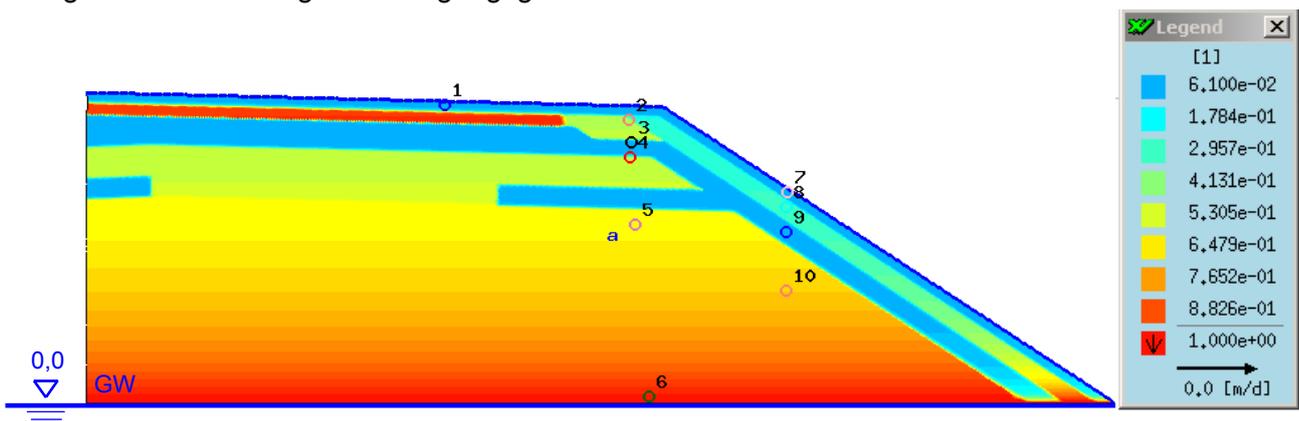


Abbildung 5.6: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand, wenn der Damm in Grundwasser steht

Aus der Überlegung heraus, dass das Grundwasser mindestens einen Meter unterhalb des Dammfußes liegen muss, wurden die weiteren Berechnungen mit einer vorgegebenen Potentialhöhe von $\psi_m = -1\text{m}$ durchgeführt. Daraus ergibt sich eine anfängliche Verteilung des Sättigungsgrades wie in Abbildung 5.7 dargestellt. Das Material im Dammkern weist dadurch am Dammfuß nicht wie bei dem oben aufgeführten Modell, das im Grundwasser steht, einen Sättigungsgrad von 100 %, son-

dem einen entsprechend der Saugspannungs-Wassergehalts-Eigenschaften geringeren Sättigungsgrad auf.

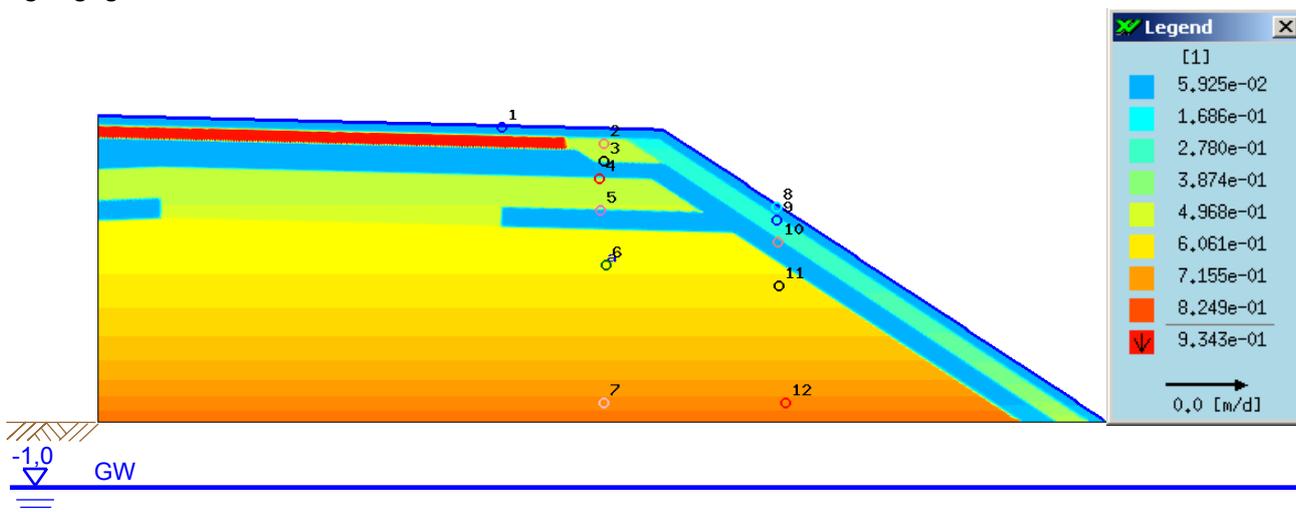


Abbildung 5.7: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand, wenn das Grundwasser 1m unter der Dammunterkante liegt

In der Realität liegt unmittelbar nach Herstellung des Dammes ein anderer Anfangszustand vor. Dieser wird wesentlich durch den beim Einbau vorliegenden Wassergehalt und den nach Verdichtung erzielten Sättigungsgrad bestimmt. Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen der Voruntersuchungen zunächst Berechnungen mit einem für jede Bodenschicht konstanten Sättigungsgrad durchgeführt. Die vorgegebenen Sättigungsgrade entsprechen dabei einem bestimmten Matrixpotential. An den Grenzen zwischen zwei Bodenschichten führt dies zu Unstetigkeiten, indem es zu einem Sprung des Matrixpotentials kommt. Von einem derartigen Anfangszustand ausgehend konnte in den Modellberechnungen kein rechnerisch stabiler Zustand gefunden werden. Vereinfachend wurde daher im nächsten Schritt im gesamten Modell ein konstanter Sättigungsgrad von 95 % angesetzt. Dies entspricht einem im Hinblick auf eine mögliche Durchsickerung ungünstigen, da bereits weitgehend aufgesättigten Zustand. Das Problem der Unstetigkeiten des Matrixpotentials an den Schichtgrenzen tritt damit allerdings in gleicher Weise auf. Dies spiegelte sich auch in den Berechnungen wieder, indem wiederum kein stabiler Zustand erreicht wurde. In einem dritten Schritt wurde als Anfangszustand im gesamten Modell ein konstantes Matrixpotential vorgegeben. Die Höhe des Potentials wurde für die im Hinblick auf die Durchströmung maßgebende Bodenschicht ermittelt. Dabei wurde wiederum eine 95 %-ige Sättigung dieser Schicht angenommen. Dies führt dazu, dass sich für die verschiedenen Bodenschichten zwar unterschiedliche Sättigungsgrade, aber keine Sprünge im Matrixpotential an den Schichtgrenzen einstellen. Damit konnte ein stabiler Anfangszustand erzielt werden. Die Berechnungsergebnisse zeigen jedoch, dass sich dadurch in den grobkörnigen Bodenschichten oberhalb der Dichtungsschicht sehr hohe Sättigungsgrade einstellen, die zu einer Wasserabgabe aus diesen Schichten führen. Insbesondere bei der Bauweise E mit gering durchlässigem BumI ohne Abdichtung führt dies zu einer unrealistischen Wasserströmung aus der Dränschicht in den gering durchlässigen BumI, was auch aus Abbildung 6.110 hervorgeht.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurden die Berechnungen mit dem eingangs beschriebenen Anfangszustand einer konstanten Potentialhöhe durchgeführt. Damit befindet sich das Modell anfangs in einem Gleichgewichtszustand, wodurch die aus dem definierten Niederschlag resultierende Sickerwasserströmung klar erkannt werden kann.

5.6 Bodenkennwerte

Bei den betrachteten Bauweisen handelt es sich um mehrschichtige Erdkörper, die unter Berücksichtigung der bautechnischen Regelwerke aus sehr unterschiedlichen Materialien aufgebaut sein können. Deshalb können die für die vorliegende Fragestellung relevanten hydraulischen Eigenschaften einer Schicht sehr unterschiedlich sein. Dies betrifft beispielsweise die bei Bauweisen mit Abdichtungen einsetzbaren Bumlis. Dort können prinzipiell grob-, gemischt-, aber auch feinkörnige Böden eingebaut werden, sofern die erforderlichen mechanischen Eigenschaften erfüllt werden. In gleicher Weise können die Eigenschaften des Straßenoberbaus in gewissen Bandbreiten variieren. Festzuhalten ist außerdem, dass die vorliegenden Bodenkennwerte für unverdichtete Böden gelten. Im Folgenden werden die den einzelnen Schichten zugeordneten Bodenkennwerte dargestellt und in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

5.6.1 Oberboden

Zur Gewährleistung der Versickerung des Oberflächenwassers sollte der Durchlässigkeitsbeiwert gemäß der RAS-Ew (2005) im Bereich zwischen 10^{-3} m/s und 10^{-5} m/s liegen. Der Einfluss unterschiedlich durchlässiger Oberböden auf die Versickerung im Böschungsbereich wird anhand von Berechnungen mit einem Feinsand, einem schluffigen Sand sowie einem stark schluffigen Sand durchgeführt. Die diesen Böden zugewiesenen hydraulischen Kennwerte sind in Tabelle 5.1 angegeben. Die Bodenkennwerte des Feinsandes basieren auf den von Elzeftawy und Cartwright (1981) am Lakeland Sand durchgeführten Untersuchungen. Von Leong und Rahardjo (1997) wurden für die ermittelten Saugspannungs-Sättigungsgrad-Beziehungen entsprechende van Genuchten-Parameter angegeben. Die Bodenkennwerte für den schluffigen und stark schluffigen Sand wurden Hennings (2000) entnommen. Diese wurden für unverdichtete natürliche Böden abgeleitet und sind für die in der Regel gering verdichtete Oberbodenschicht als repräsentativ einzustufen. Die gesättigten Durchlässigkeitsbeiwerte der bei Hennings (2000) angegebenen Bodenarten wurden mit Hilfe des Ansatzes von Beyer (1964) abgeschätzt.

5.6.2 Bankett

Zum Schutz des Bodens und Grundwassers sollte das Bankett aus einem schwach durchlässigen Boden ausgebildet werden (RAS-Ew, 2005; Bürger et al., 2008). Empfohlen wird deshalb die Verwendung von gemischtkörnigen Böden der Bodengruppen SU, ST, GU und GT. Für die Modellberechnungen wurden die Bodenkennwerte eines Kies-Schluff-Gemisches (GU) und zweier Sand-Schluff-Gemische (SU und SU*) herangezogen. Die van Genuchten-Parameter des Kies-Schluff-Gemisches wurden Ekblad und Isacsson (2007) entnommen. Da Ekblad und Isacsson (2007) keine Durchlässigkeitsbeiwerte für die von Ihnen untersuchten Böden angeben, wurden diese mit dem Ansatz nach Beyer (1964) abgeschätzt. Bei den Sand-Schluff-Gemischen handelt es sich um die auch für den Oberboden verwendeten Bodenarten nach Hennings (2000).

5.6.3 Dammbaustoff

Der Begriff Dammbaustoff bezeichnet bei verschiedenen Bauweisen Böden, an die außer ihrer erdbautechnischen Eignung keine speziellen Anforderungen gestellt sind. Allerdings darf es sich dabei nicht um Bumls handeln. Dementsprechend können als Dammbaustoff prinzipiell sowohl grob- als auch gemischt- und feinkörnige Böden zum Einsatz kommen. Der Einfluss unterschiedlicher Dammbaustoff-Materialien auf die Sickerwassermenge soll anhand von den in Tabelle 5.1 angegebenen gemischtkörnigen Böden untersucht werden. Bei diesen handelt es sich um die zwei bereits beschriebenen Sand-Schluff-Gemische nach Hennings (2000) und ein von Ekblad und Isacsson (2007) untersuchtes Kies-Schluff-Gemisch.

5.6.4 Drän- und Frostschutzschichten

Für Drän- und Frostschutzschichten werden die von Ekblad und Isacsson (2007) an einem schwach schluffigen Kies (6 % Feinkornanteil, GU nach DIN 18196) ermittelten Bodenkenwerte angesetzt. Da Ekblad und Isacsson (2007) keine Durchlässigkeitsbeiwerte für die von Ihnen untersuchten Böden angeben, wurde dieser für den betreffenden Boden mit dem Ansatz nach Beyer (1964) abgeschätzt.

5.6.5 Fiktive Dränschicht

Die über dem eigentlichen Dammkörper modellierte fiktive Dränschicht wird mit denselben Bodenkenwerten belegt, die auch für Drän- und Frostschutzschichten verwendet werden. (s. Abschnitt 5.6.4)

5.6.6 Dichtung

Für die Untersuchung der Bauweisen mit mineralischen Dichtungsschichten wird auf Laboruntersuchungen von Tinjum et al. (1997) und Meerdink et al. (1996) zurückgegriffen. Tinjum et al. (1997) führten Saugspannungs-Untersuchungen an unterschiedlich plastischen Tonen durch und haben aus ihren Untersuchungen van Genuchten-Parameter abgeleitet. Durchlässigkeitsbeiwerte wurden von Tinjum et al. (1997) nicht angegeben. Diese wurden aufgrund von Erfahrung abgeschätzt. Meerdink et al. (1996) führten Laborversuche zur Ermittlung der Durchlässigkeit im gesättigten wie auch ungesättigten Zustand sowie der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung an einem leicht plastischen Ton durch. Die von Tinjum et al. (1997) und Meerdink et al. (1996) ermittelten Bodenkenwerte können Tabelle 5.1 entnommen werden.

5.6.7 Asphalt

Die Asphalttschicht wird als praktisch undurchlässig angenommen. Im Modell wird sie mit den auch für die Dichtungsschicht verwendeten Kennwerten des ausgeprägt plastischen Tons nach Tinjum et al. (1997) mit dem k_f -Wert $5 \cdot 10^{-10}$ m/s abgebildet. Das Programm FEFLOW bietet prinzipiell die Möglichkeit, einzelne Bereiche aus dem FE-Modell auszuspüren und dadurch als undurchlässig zu modellieren. Jedoch kam es bei einer derartigen Modellierung der Asphalttschicht bei einer Reihe von Vorberechnungen zu numerischen Problemen. Aus diesem Grund wurde auf den ausgeprägt plastischen Ton für die Modellierung der Asphalttragschicht zurückgegriffen. Dabei ist zu beachten, dass sehr große Sprünge des Durchlässigkeitsbeiwertes von benachbarten Bodenschichten ebenfalls zu numerischen Berechnungsproblemen führen können. Daher wurde der Durchlässigkeits-

beiwert des für die Modellierung der Asphaltdeckschicht herangezogenen Tons nicht zusätzlich reduziert.

5.6.8 Buml

Böden und Baustoffe mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen sind anhand von Schadstofffrachten im Eluat oder im Feststoff charakterisiert. Bodenmechanisch kann es sich bei diesen Materialien prinzipiell um grob-, gemischt- oder feinkörnige Böden handeln. Die Modellberechnungen wurden in Abhängigkeit von den einzelnen Bauweisen mit den in Tabelle 5.1 dargestellten Böden durchgeführt. Bei diesen handelt es sich um den bereits vorgestellten Boden nach Ekblad und Isacsson (2007) sowie um einen stark sandigen Schluff, dem die Kennwerte des Su4 (siehe Tabelle 5.1) nach Hennings (2000) zugewiesen wurden. Der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert dieses Bodens wurde wiederum nach Beyer (1964) abgeschätzt. Außerdem wurden die im Rahmen eines großmaßstäblichen Feldversuches am Münchner Flughafen – MUC – an einem verdichteten Ton mit organischen Beimengungen bestimmten Werte herangezogen (Prüfbericht des Zentrum Geotechnik der TU München vom 12.12.2008). Aus Laboruntersuchungen ist bekannt, dass der Ton in Abhängigkeit von seinen Einbaubedingungen unterschiedliche Durchlässigkeitsbeiwerte aufweist. Berechnungen wurden mit einem Durchlässigkeitsbeiwert $k_f = 1 \cdot 10^{-8}$ m/s (MUC) und $k_f = 1 \cdot 10^{-9}$ m/s (MUC*) durchgeführt.

Kurzbezeichnung	Elzeftawy ⁵⁾⁶⁾	Su2 ³⁾	Su3 ³⁾	Ekblad 0.4 ¹⁾	Su2 ³⁾	Su3 ³⁾	Ekblad 0.4 ¹⁾	Su2 ³⁾	Su3 ³⁾
DIN 18196	fS	SU / SU*	SU*	GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*
Schicht	Oberboden			Bankett			Dammbaustoff		
k _r -Wert [m/s]	5*10 ⁻⁵	1*10⁻⁵	1*10⁻⁶	5*10⁻³	1*10⁻⁵	1*10⁻⁶	5*10⁻³	1*10⁻⁵	1*10⁻⁶
S _s	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S _r	0,12	0,05	0,00	0,05	0,05	0,000	0,05	0,05	0,000
A [m ⁻¹]	3,45	6,8	2,6	46	6,8	2,6	46	6,8	2,6
n	3,8	1,43	1,28	1,79	1,43	1,28	1,79	1,43	1,28
m = 1-(1/n)	0,74	0,30	0,22	0,44	0,30	0,22	0,44	0,30	0,22
Porenanteil	0,28	0,38	0,36	0,23	0,38	0,36	0,23	0,38	0,36
Kurzbezeichnung	Ekblad 0.4 ¹⁾	Ekblad 0.4 ¹⁾	Tinjum M ²⁾	Tinjum F ²⁾	Meerdink ⁴⁾	Ekblad 0.4 ¹⁾	Su4 ³⁾	MUC ⁷⁾	MUC* ⁷⁾
DIN 18196	GU (5.9% T+U)	GU (5.9% T+U)	TL	TA	TL	GU (5.9% T+U)	UL	OT	OT
Schicht	Drän/FSS	fiktiver Drän	Dichtung			BumI			
k _r -Wert [m/s]	5*10⁻³	5*10⁻³	5*10⁻⁹	5*10⁻¹⁰	5*10 ⁻¹⁰	5*10⁻³	1*10⁻⁷	1*10 ⁻⁸	1*10 ⁻⁹
S _s	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S _r	0,048	0,048	0,00	0,00	0,190	0,05	0,000	0,05	0,05
A [m ⁻¹]	46	46	1,76	0,322	0,85	46	1,67	0,14	0,14
n	1,79	1,79	1,089	1,07	1,35	1,79	1,275	1,4	1,4
m = 1-(1/n)	0,44	0,44	0,08	0,07	0,26	0,44	0,22	0,29	0,29
Porenanteil	0,23	0,23	0,34	0,35	0,36	0,23	0,37	0,65	0,65

fett und kursiv gedruckt: abgeschätzte Werte

¹⁾ 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, p. 858-872

²⁾ Tinjum, J.M.; Benson, C. H.; Blotz, L. R. (1997): Soil-water characteristic curves for compacted clays, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol. 123, No.11, p. 1060-1069

³⁾ 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

⁴⁾ Meerdink, J. S. et al. (1996): Unsaturated hydraulic conductivity of two compacted barrier soils, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122, No. 7, p. 565-576

⁵⁾ Elzeftawy, A.; Cartwright, K. (1981): Evaluating the saturated and unsaturated hydraulic conductivity of soils, Permeability and groundwater contaminant transport, ASTM STP 746, T. F. Zimmie und C. O. Riggs, eds., ASTM, West Conshohocken, p. 168-181

⁶⁾ Leong E.C., Rahardjo, H. (1997): Review of soil-water characteristic curve equations, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, p.1106-1117

⁷⁾ 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 5.1: Bodenkennwerte

Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben spiegeln sich die van Genuchten-Parameter in der Form der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung wieder. In Abbildung 5.8 werden deshalb die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen der einzelnen Böden in der parametrisierten Form nach van Genuchten dargestellt.

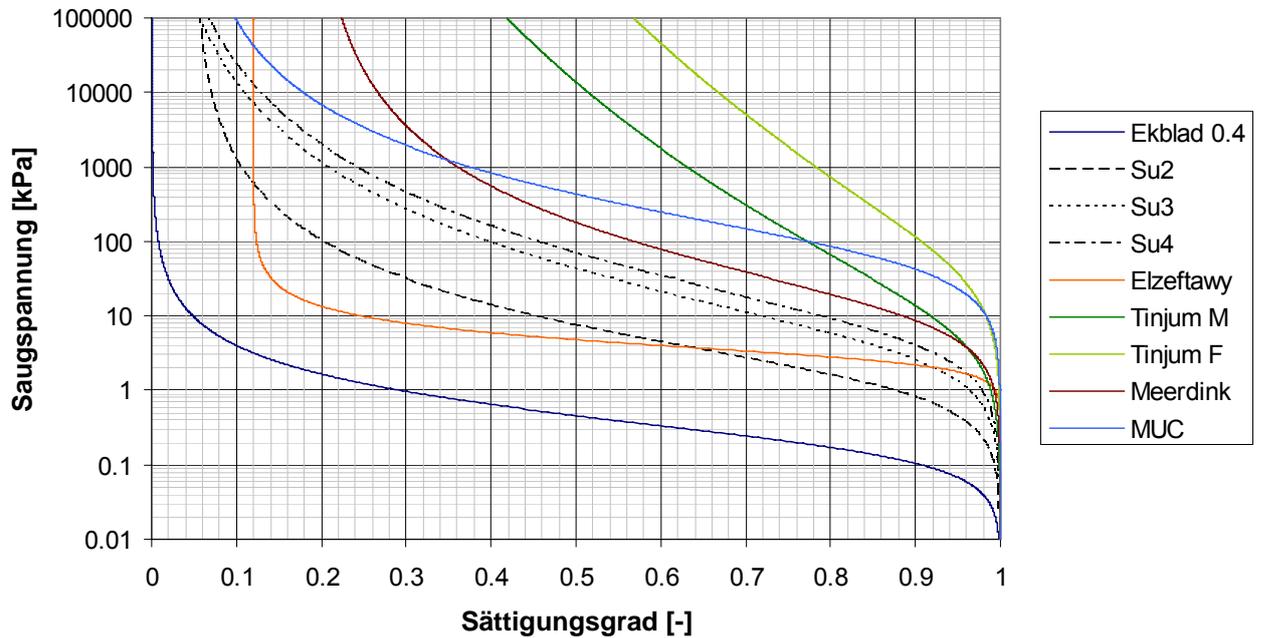


Abbildung 5.8: Saugspannungs-Sättigungsgrad-Beziehung der einzelnen Böden modelliert mit Ansatz nach van Genuchten

Der Zusammenhang zwischen der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und dem Sättigungsgrad entsprechend dem Modell nach van Genuchten-Mualem ist für die grob- und gemischtkörnigen Böden in Abbildung 5.9 und für die feinkörnigen Böden in Abbildung 5.10 dargestellt.

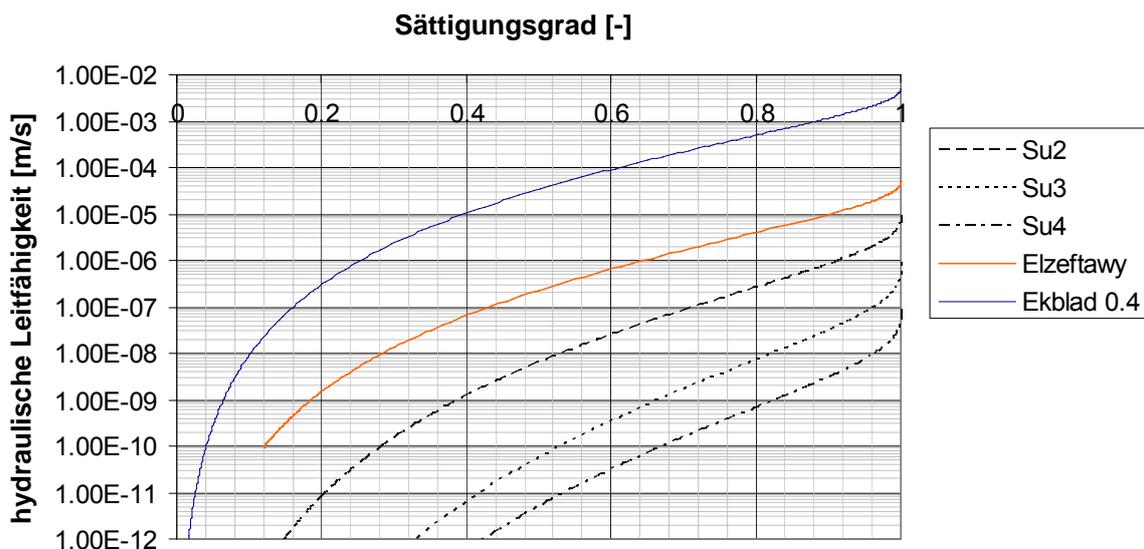


Abbildung 5.9: ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit der grob- und gemischtkörnigen Böden modelliert mit Ansatz nach van Genuchten und Mualem

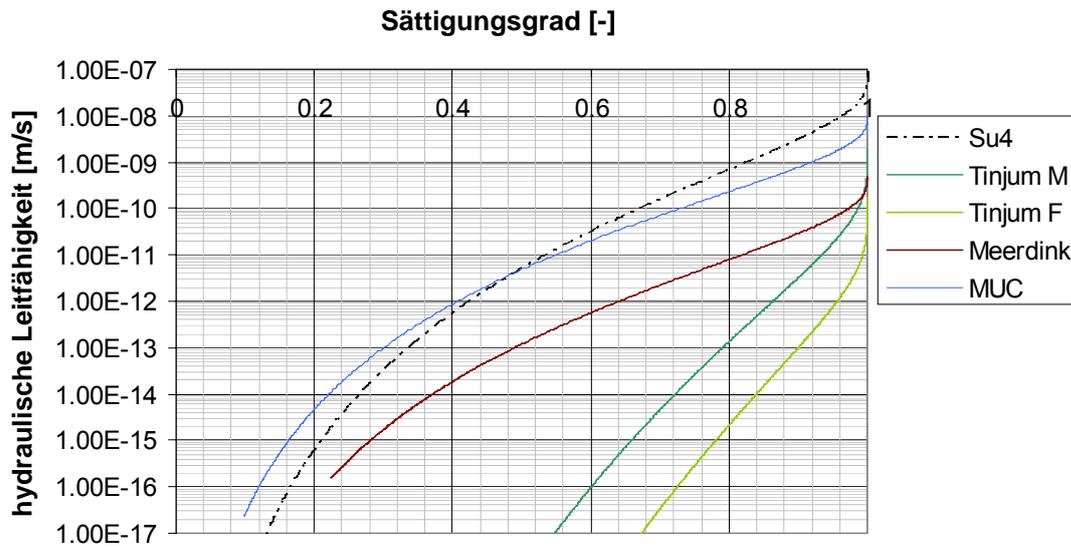


Abbildung 5.10: ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit der feinkörnigen Böden modelliert mit Ansatz nach van Genuchten und Mualem

5.7 Berechnungshilfen in FEFLOW

5.7.1 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 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.

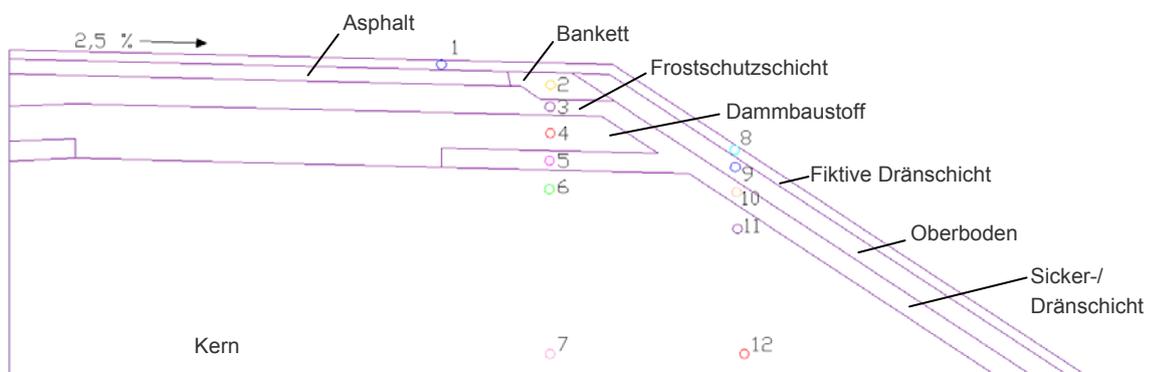


Abbildung 5.11: observation single points

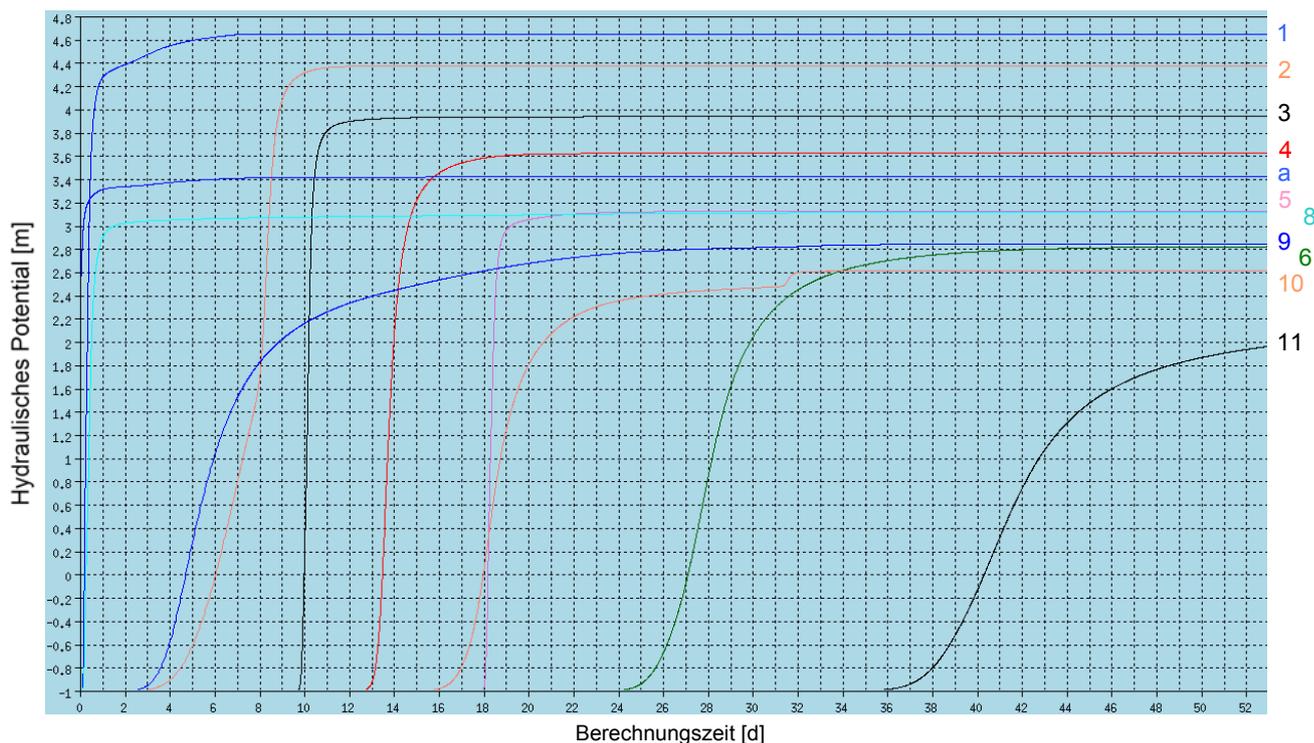


Abbildung 5.12: hydraulisches Potential an observation single points in Abhängigkeit von der Zeit

5.7.2 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. In Abbildung 5.14 ist die Linie dargestellt, anhand der die Infiltration in den Dammkern (flux in) für das Modell E ermittelt wurde.

Allerdings ist dabei zu beachten, dass die mit dem Fluid-Flux-Analyzer ermittelten Werte aus einer Nachlaufrechnung unter Berücksichtigung der an den Knoten ermittelten Potentialhöhen und den für die einzelnen Elemente ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerten resultieren. Die über die Ränder in das Modellgebiet ein- und ausströmenden Wassermengen können mit Hilfe des Budget Analyzer ermittelt werden. Im Vergleich zum Fluid-Flux-Analyzer weisen diese Werte eine größere Genauigkeit dar, da sie ein direktes Ergebnis des Berechnungsvorganges darstellen. Aus diesem Grund kann beispielsweise die mit Hilfe des Fluid-Flux-Analyzers ermittelte Summe aus den Teilbeträgen für die Infiltration in den Damm über Bankett und Oberboden und aus dem Oberflächenabfluss in der fiktiven Dränschicht vom tatsächlichen Gesamtzufluss in das Modell um einige Prozent abweichen. Nichtsdestotrotz stellt der Fluid-Flux-Analyzer ein wertvolles Instrument zur quantitativen Ermittlung der Wasserbewegung innerhalb des Modells dar.

	fiktive Dränschicht	FrostSS	Asphalt
DIN 18196	GU	GU	TA
Kurzbezeichnung	Ekblad 0.4	Ekblad 0.4	Tinjum F
k_r -Wert [m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s	1	1	1
S_r	0,05	0,05	0,00
A [m^{-1}]	46	46	0,322
n	1,79	1,79	1,07
$m = 1-(1/n)$	0,44	0,44	0,07
Porenanteil	0,23	0,23	0,35

Tabelle 5.2: Bodenkennwerte für die fiktive Dränschicht, die Frostschutzschicht und die Asphaltsschicht

Die Tabelle 5.3 gibt eine Übersicht über die durchgeführten Berechnungsmodelle als Kombinationen der verschiedenen Bodenkennwerte für die einzelnen Schichten. Die vollständigen Parametersätze für die Bodenkennwerte der einzelnen Bodenarten können der Tabelle 5.1 entnommen werden.

Die Modellbezeichnung folgt dem Schema aus der Abbildung 5.15. Dabei steht an erster Stelle der Großbuchstabe der untersuchten Bauweise. Diesem folgt eine Ziffer, welche eine Information über die für den Straßenaufbau (Bankett und Oberboden) verwendeten Bodenkennwerte darstellt (siehe auch Abschnitt 6.1). Der danach folgende kleine Buchstabe steht für die untersuchte Kombination der Bodenkennwerte der einzelnen Schichten. Danach ist die der Berechnung zugrunde liegende Potentialhöhe am unteren Rand ($\psi_h = -1$ m oder $\psi_h = 0$ m) angefügt. Steht an dieser Stelle nichts, ist die Potentialhöhe $\psi_h = 0$. Nach dem Unterstrich reiht sich die Niederschlagsintensität ein, die in der Simulation auf der Modelloberfläche aufgebracht wurde.

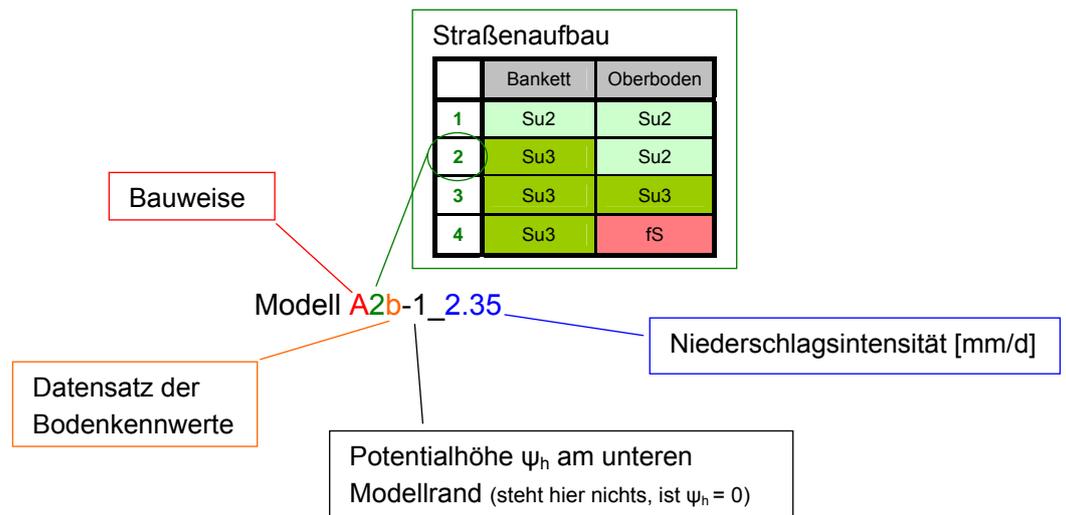


Abbildung 5.15: Schema für die Bezeichnung der einzelnen Berechnungsmodelle

		Bankett	Oberboden	Dammbaustoff	Sickerschicht	Dichtung	Buml	Potentialhöhe ψ_h [m]
Modell A2a	DIN 18196	SU*	SU / SU*	GU		TL	GU	0
	Kurzbezeichnung	Su3	Su2	Ekblad 0.4		Meerdink	Ekblad 0.4	
	k_r -Wert [m/s]	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$		$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-3}$	
Modell A2b / Modell A2b-1	DIN 18196	SU*	SU / SU*	SU*		TL	GU	0 -1
	Kurzbezeichnung	Su3	Su2	Su3		Meerdink	Ekblad 0.4	
	k_r -Wert [m/s]	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$		$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-3}$	
Modell B2-1	DIN 18196	SU*	SU / SU*	SU*	GU	TL	GU	-1
	Kurzbezeichnung	Su3	Su2	Su3	Ekblad 0.4	Tinjum M	Ekblad 0.4	
	k_r -Wert [m/s]	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-3}$	
Modell D2a / Modell D2a-1	DIN 18196	SU*	SU / SU*	SU / SU*			UL	0 -1
	Kurzbezeichnung	Su3	Su2	Su2			Su4	
	k_r -Wert [m/s]	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$			$1 \cdot 10^{-7}$	
Modell D2b-1	DIN 18196	SU*	SU / SU*	SU*			UL	-1
	Kurzbezeichnung	Su3	Su2	Su3 mod			Su4	
	k_r -Wert [m/s]	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$			$1 \cdot 10^{-7}$	
Modell D2c-1	DIN 18196	SU*	SU / SU*	GU mod			SU / SU*	-1
	Kurzbezeichnung	Su3	Su2	Ekblad 0.4			Su2	
	k_r -Wert [m/s]	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$			$1 \cdot 10^{-5}$	
Modell E1a	DIN 18196	SU / SU*	SU / SU*	GU	GU		UL	0
	Kurzbezeichnung	Su2	Su2	Ekblad 0.4	Ekblad 0.4		Su4	
	k_r -Wert [m/s]	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$		$1 \cdot 10^{-7}$	
Modell E2a	DIN 18196	SU*	SU / SU*	GU	GU		UL	0
	Kurzbezeichnung	Su3	Su2	Ekblad 0.4	Ekblad 0.4		Su4	
	k_r -Wert [m/s]	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$		$1 \cdot 10^{-7}$	
Modell E3a	DIN 18196	SU*	SU*	GU	GU		UL	0
	Kurzbezeichnung	Su3	Su3	Ekblad 0.4	Ekblad 0.4		Su4	
	k_r -Wert [m/s]	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$		$1 \cdot 10^{-7}$	
Modell E4a-1	DIN 18196	SU*	fS	GU	GU		UL	-1
	Kurzbezeichnung	Su3	Elzeftawy	Ekblad 0.4	Ekblad 0.4		Su4	
	k_r -Wert [m/s]	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$		$1 \cdot 10^{-7}$	
Modell E2b-1	DIN 18196	SU*	SU / SU*	SU*	GU		UL	-1
	Kurzbezeichnung	Su3	Su2	Su3	Ekblad 0.4		Su4	
	k_r -Wert [m/s]	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$		$1 \cdot 10^{-7}$	
Modell E2c-1	DIN 18196	SU*	SU / SU*	SU*	GU		org. Boden	-1
	Kurzbezeichnung	Su3	Su2	Su3	Ekblad 0.4		MUC	
	k_r -Wert [m/s]	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$		$1 \cdot 10^{-9}$	
Modell E2d-1	DIN 18196	SU*	SU / SU*	SU*	GU		org. Boden	-1
	Kurzbezeichnung	Su3	Su2	Su3	Ekblad 0.4		MUC*	
	k_r -Wert [m/s]	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$		$1 \cdot 10^{-8}$	

Tabelle 5.3: Übersicht über die den einzelnen Berechnungsmodellen zugrunde liegenden Bodenkennwerte

In Tabelle 5.4 sind die simulierten Berechnungsdauern für die jeweiligen Modelle bei den unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten zusammengestellt. In Abhängigkeit von der Modellgeo-

metrie und den simulierten Niederschlagsintensitäten hat sich für einzelne Modelle ein sehr großer Berechnungsaufwand ergeben. Dieser hat dazu geführt, dass einzelne Berechnungen in einem vertretbaren Zeitraum nur bis zu einer simulierten Berechnungsdauer von wenigen Tagen durchgeführt werden konnten, während in anderen Berechnungen ein Zeitraum von bis zu einem Jahr untersucht werden konnte.

Niederschlag Modell	2,35 [mm/d]	9,4 [mm/d]	23,5 [mm/d]
Modell A2a	1782 d	190 d	34 d
Modell A2b	550 d		67 d
Modell A2b-1	350 d	68 d	
Modell B2-1	560 d	104 d	
Modell D2a	410 d		
Modell D2a-1	750 d	85 d	25 d
Modell D2b-1	1540 d	213 d	
Modell D2c-1	540 d	300 d	
Modell E1a	300 d	48,6 d	36,5 d
Modell E2a	300 d		
Modell E3a	300 d	60 d	19 d
Modell E2b-1	480 d	45 d	10 d
Modell E2c-1	380 d		
Modell E2d-1	240 d		
Modell E4a-1	200 d	365 d	

Tabelle 5.4: Übersicht über die untersuchten Berechnungsdauern in Tagen für die einzelnen Modelle

6 Berechnungsergebnisse

6.1 Voruntersuchungen zum Straßenaufbau

Die vorab durchgeführten Modellberechnungen dienen der Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Materialien in Bankett und Oberboden auf die Größe und Verteilung der Sickerwassermengen. Die Berechnungen wurden anhand der Bauweise E mit gering durchlässigem Körper aus BumI ohne Abdichtung durchgeführt. Die Bodenkennwerte für die fiktive Dränschicht, für den Dammbaustoff, für Drän- und Frostschutzschichten, für den Asphalt sowie für den Baustoff mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen wurden in allen Berechnungen gleich angesetzt (siehe Tabelle 6.1). Der Dammbaustoff wurde dabei als stark durchlässiges Material mit den Parametern des schwach schluffigen Kieses nach Ekblad und Isacsson (2007) abgebildet. Das BumI wurde mit den Kennwerten eines Su4 nach Hennings (2000) belegt. Die Bodenkennwerte des Banketts und des Oberbodens wurden in den Berechnungen variiert. Für das Bankett wurden die Bodenkenn-

werte der Sand-Schluff-Gemische Su2 und Su3 nach Hennings (2000) verwendet, für den Oberboden wurde des Weiteren ein Feinsand nach Elzeftawy und Cartwright (1981) angesetzt.

Schicht	fiktive Dränschicht	Dammaustoff	Drän / FrostSS	Asphalt	Buml
DIN 18196	GU (5.9% T+U)	GU (5.9% T+U)	GU (5.9% T+U)	TA	UL
Kurzbezeichnung	Ekblad 0.4	Ekblad 0.4	Ekblad 0.4	Tinjum F	Su4
Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-7}$
S_s	1	1	1	1	1
S_r	0.048	0.048	0.048	0.00	0.00
A [1/m]	46	46	46	0.322	1.67
n	1.79	1.79	1.79	1.07	1.275
$m = 1 - (1/n)$	0.44	0.44	0.44	0.07	0.22
Porenanteil	0,23	0,23	0,23	0,35	0,37

Tabelle 6.1: Bodenkennwerte für fiktive Dränschicht, Dammbaustoff, Drän- und Frostschutzschichten, Asphalt sowie Buml für die Bauweise E

Nachfolgend sind die einzelnen Modelle mit den zugrunde gelegten Bodenkennwerten aufgeführt:

- Modell E1a zeichnet sich durch eine hohe Durchlässigkeit des Oberbodens und des Banketts aus, indem beiden Bodenschichten die Kennwerte des Su2 zugrunde gelegt wurden.

Schicht	Oberboden	Bankett
DIN 18196	SU /SU*	SU / SU*
Kurzbezeichnung	Su2	Su2
Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
S_s	1	1
S_r	0.05	0.05
A [1/m]	6.8	6.8
n	1.43	1.43
$m = 1 - (1/n)$	0.30	0.30
Porenanteil	0,38	0,38

Tabelle 6.2: Bodenkennwerte für Oberboden und Bankett im Modell E1a

- Im Modell E2a wurden dem Bankett die Kennwerte des Su3 zugewiesen. Dem Oberboden dagegen wurden wie im Modell E1a die Kennwerte des Su2 zugrunde gelegt.

Schicht	Oberboden	Bankett
DIN 18196	SU /SU*	SU*
Kurzbezeichnung	Su2	Su3
Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$
S_s	1	1
S_r	0.05	0.000
A [1/m]	6.8	2.6
n	1.43	1.28
$m = 1 - (1/n)$	0.30	0.22
Porenanteil	0,38	0,36

Tabelle 6.3: Bodenkennwerte für Oberboden und Bankett im Modell E2a

- Im Modell E3a wurden sowohl dem Bankett als auch dem Oberboden die Kennwerte des Su3 zugewiesen.

Schicht	Oberboden	Bankett
DIN 18196	SU*	SU*
Kurzbezeichnung	Su3	Su3
Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
S_s	1	1
S_r	0.000	0.000
A [1/m]	2.6	2.6
n	1.28	1.28
$m = 1 - (1/n)$	0.22	0.22
Porenanteil	0,36	0,36

Tabelle 6.4: Bodenkennwerte für Oberboden und Bankett im Modell E3a

- Im Modell E4a-1 wurden dem Bankett die Kennwerte des Su3, dem Oberboden die des Feinsandes zugewiesen.

Schicht	Oberboden	Bankett
DIN 18196	fS	SU*
Kurzbezeichnung	Elzeftawy	Su3
Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$
S_s	1	1
S_r	0,12	0.000
A [1/m]	3,45	2.6
n	0.74	1.28
$m = 1 - (1/n)$	0.41	0.22
Porenanteil	0,28	0,36

Tabelle 6.5: Bodenkennwerte für Oberboden und Bankett im Modell E4a-1

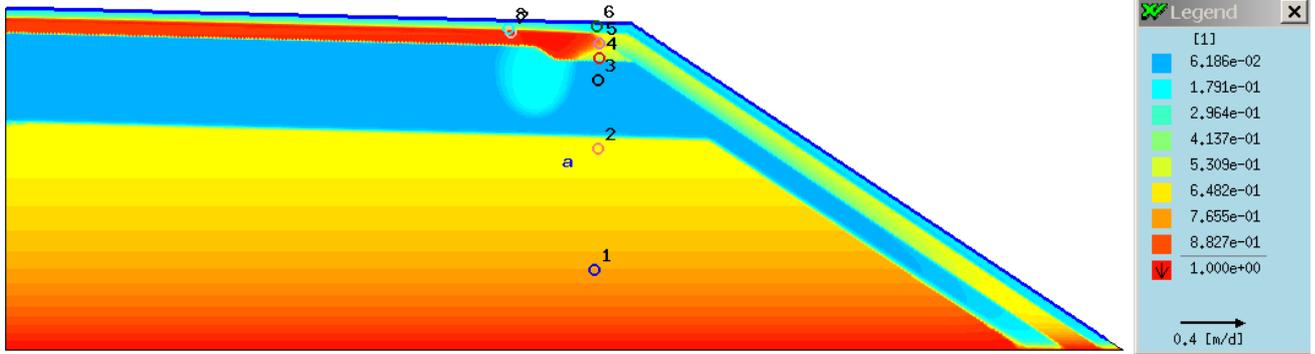
Die Modelle E1a bis E3a wurden jeweils mit den in Abschnitt 1.1 erläuterten Niederschlagsmengen von 2,35 mm/d, 9,4 mm/d und 23,5 mm/d untersucht. Das Modell E4a-1 wurde nur mit Niederschlagsintensitäten von 2,35 mm/d und 9,4 mm/d berechnet. Die Ergebnisse der einzelnen Berechnungsmodelle werden im Folgenden diskutiert. In Anlage 1.4, Blatt 1 bis 7, sind sie zudem tabellarisch zusammengefasst.

6.1.1 Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d

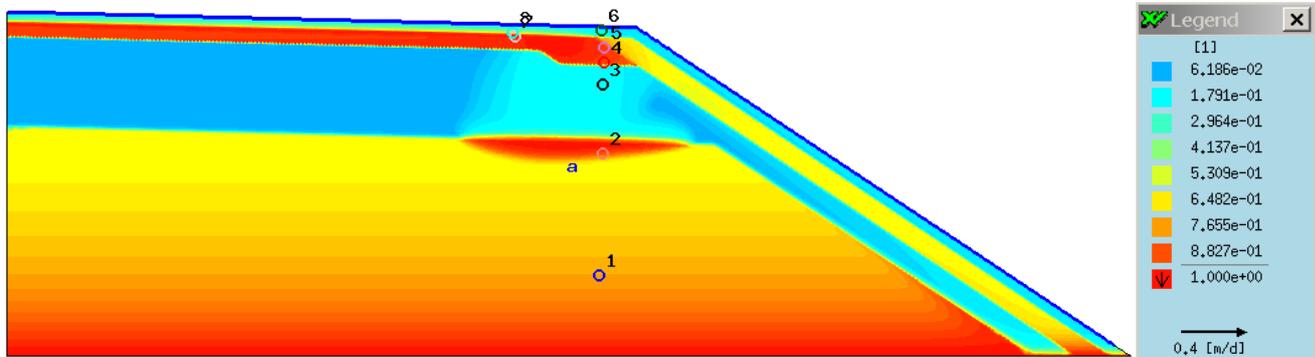
Die Berechnungen mit der geringen Niederschlagsintensität von 2,35 mm/d im Kronenbereich bzw. 1,955 mm/d im Bereich der Böschungen konnten für die Modelle E1a_2.35, E2a_2.35, E3a_2.35 und E4a-1_2.35 bis zum Erreichen einer stationären Infiltrationsmenge in das Kernmaterial durchgeführt werden. Im stationären Zustand ist das BumI im äußeren Bereich unterhalb der Fahrbahnränder vollständig gesättigt. Aufgrund der geringen hydraulischen Leitfähigkeit des BumIs im ungesättigten Zustand wird dieses Stadium allerdings erst nach ca. 250 Tagen erreicht. Die Verteilung des Sättigungsgrades zu verschiedenen Zeitpunkten bei einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d ist für das Modell E2a in Abbildung 6.1 dargestellt. Die Modelle E1a, E3a und E4a-1

unterscheiden sich diesbezüglich vom Modell E2a nicht wesentlich. Das Berechnungsmodell mit den Bezeichnungen der unterschiedlichen Schichten ist in Abbildung 3.5 dargestellt.

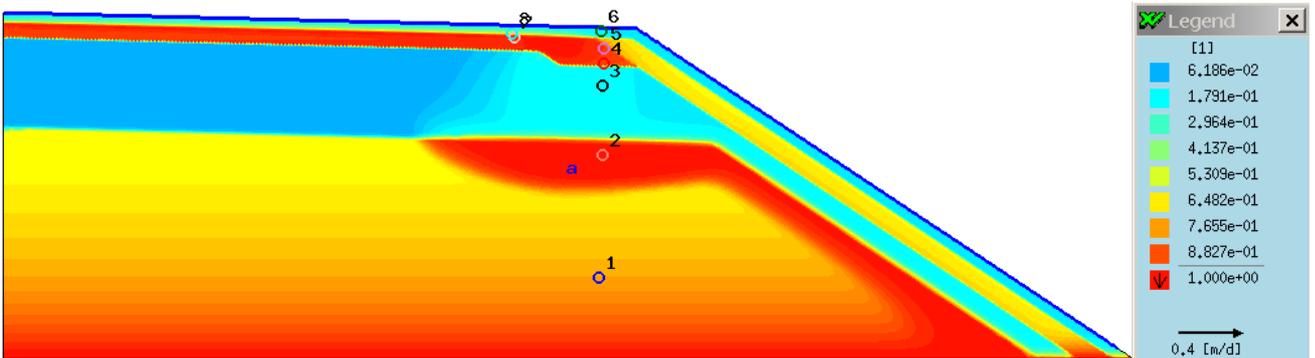
Verteilung des Sättigungsgrades nach 10 d



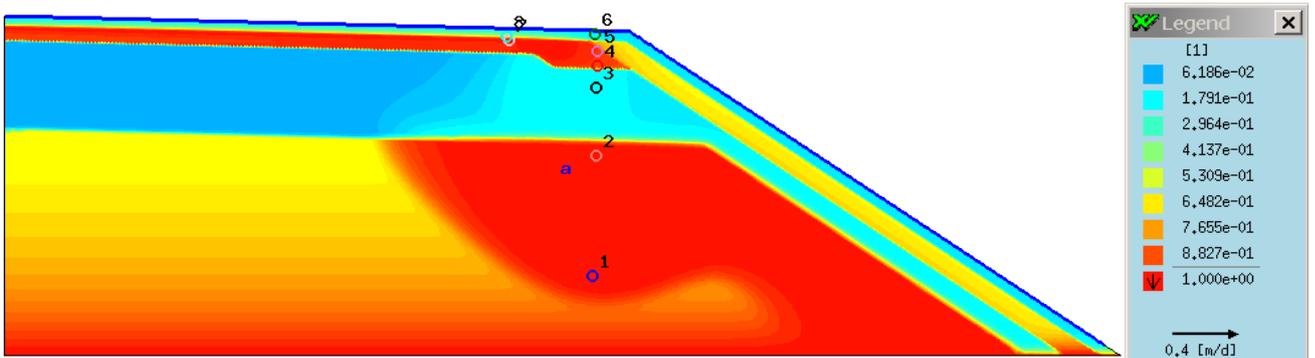
Verteilung des Sättigungsgrades nach 20 d



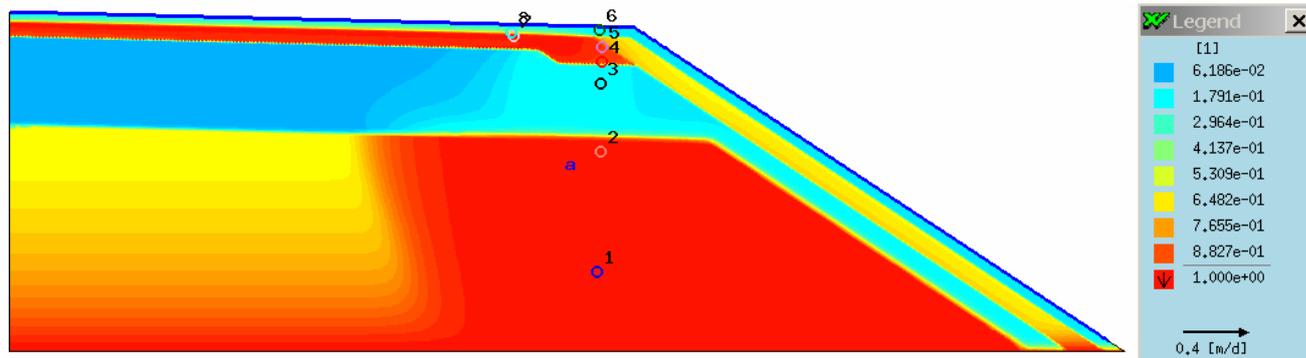
Verteilung des Sättigungsgrades nach 40 d



Verteilung des Sättigungsgrades nach 100 d



Verteilung des Sättigungsgrades nach 200 d



Verteilung des Sättigungsgrades nach 300 d

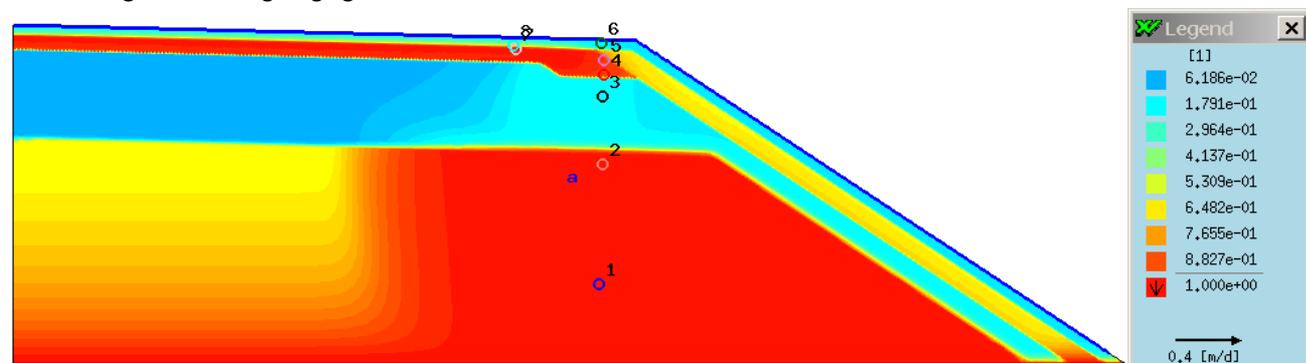


Abbildung 6.1: Verteilung des Sättigungsgrades bei Modell E2a und einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d zu verschiedenen Zeitpunkten

Die auf das gesamte Jahr verteilte Niederschlagsmenge von 2,35 mm/d bzw. 1,955 mm/d wurde bei den Modellen E1a bis E4a-1 vollständig vom Oberboden und vom Bankett aufgenommen. Ein mit einem Oberflächenabfluss gleich zu setzender Abfluss in der fiktiven Dränschicht findet nicht statt. Im Modell E1a_2.35 dringt das von der Asphaltenschicht abfließende Niederschlagswasser unmittelbar im Bereich neben der Fahrbahn in das Bankett aus Su2-Material ein wie die Strömungslinien aus Abbildung 6.2 zeigen. Bei den Modellen, für die der weniger wasserdurchlässige Su3 als Material des Banketts gewählt wurde (E2a_2.35, E3a_2.35 und E4a-1_2.35), wird das von der Fahrbahn anfallende Oberflächenwasser über eine längere Strecke im Bankettbereich versickert (siehe Abbildung 6.3, Abbildung 6.4 und Abbildung 6.5). Dabei ist zu beachten, dass die Strömungslinien keine Aussage über die Quantität der Sickerwassermengen geben; dargestellt sind lediglich die Wege, die das Wasser nimmt.

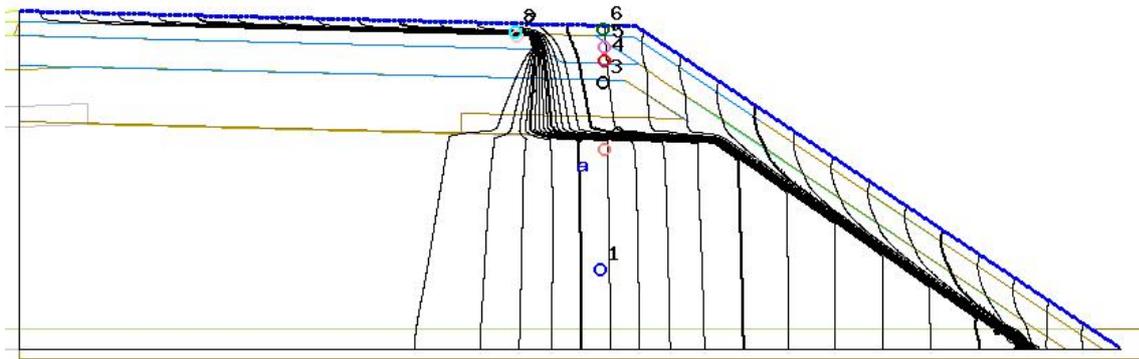


Abbildung 6.2: Strömungslinien in Modell E1a nach 300 d bei einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d

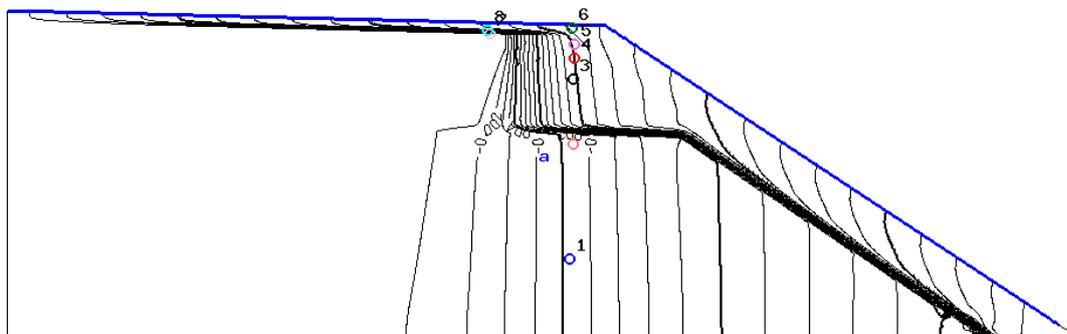


Abbildung 6.3: Strömungslinien in Modell E2a nach 300 d bei einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d

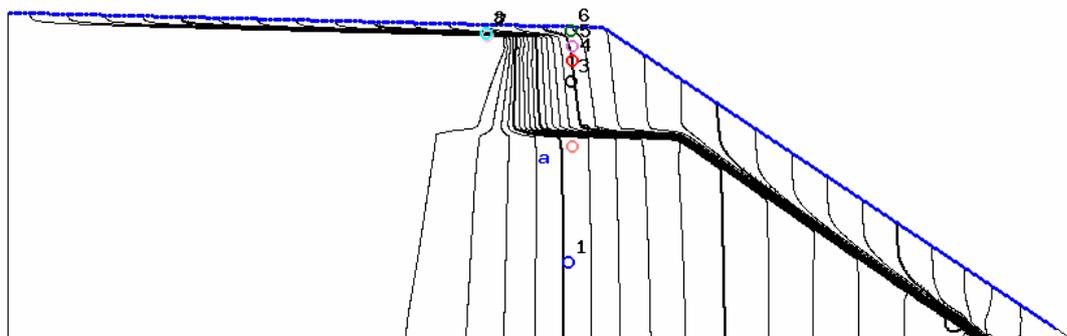


Abbildung 6.4: Strömungslinien in Modell E3a nach 300 d bei einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d

Beim Modell E4a-1 tritt ein so genannter Kapillarsperreneffekt auf. Das Sickerwasser, das in den Oberboden eingedrungen ist, wird nicht an die darunter liegende Dränschicht weitergeleitet, sondern im Oberboden bis zur Dammunterkante abgeführt. Im Strömungsbild in Abbildung 6.5 ist der getrennte Abfluss des Sickerwassers im Oberboden und in der Sickerschicht deutlich zu erkennen.

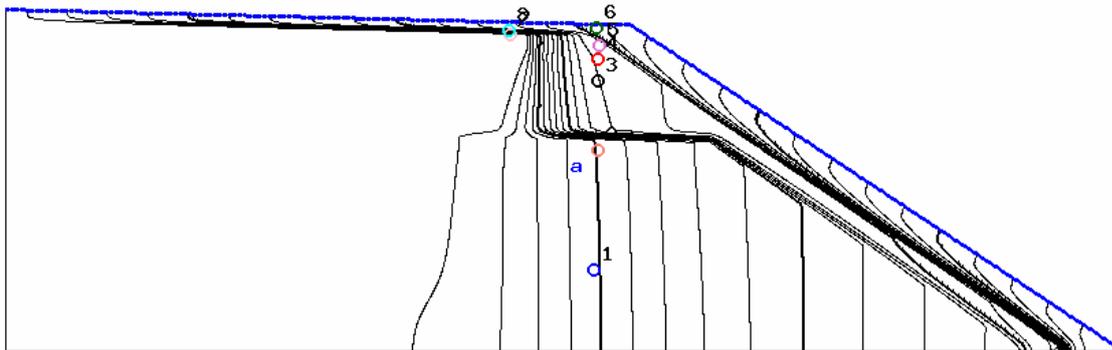


Abbildung 6.5: Strömungslinien in Modell E4a-1 nach 200 d bei einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d

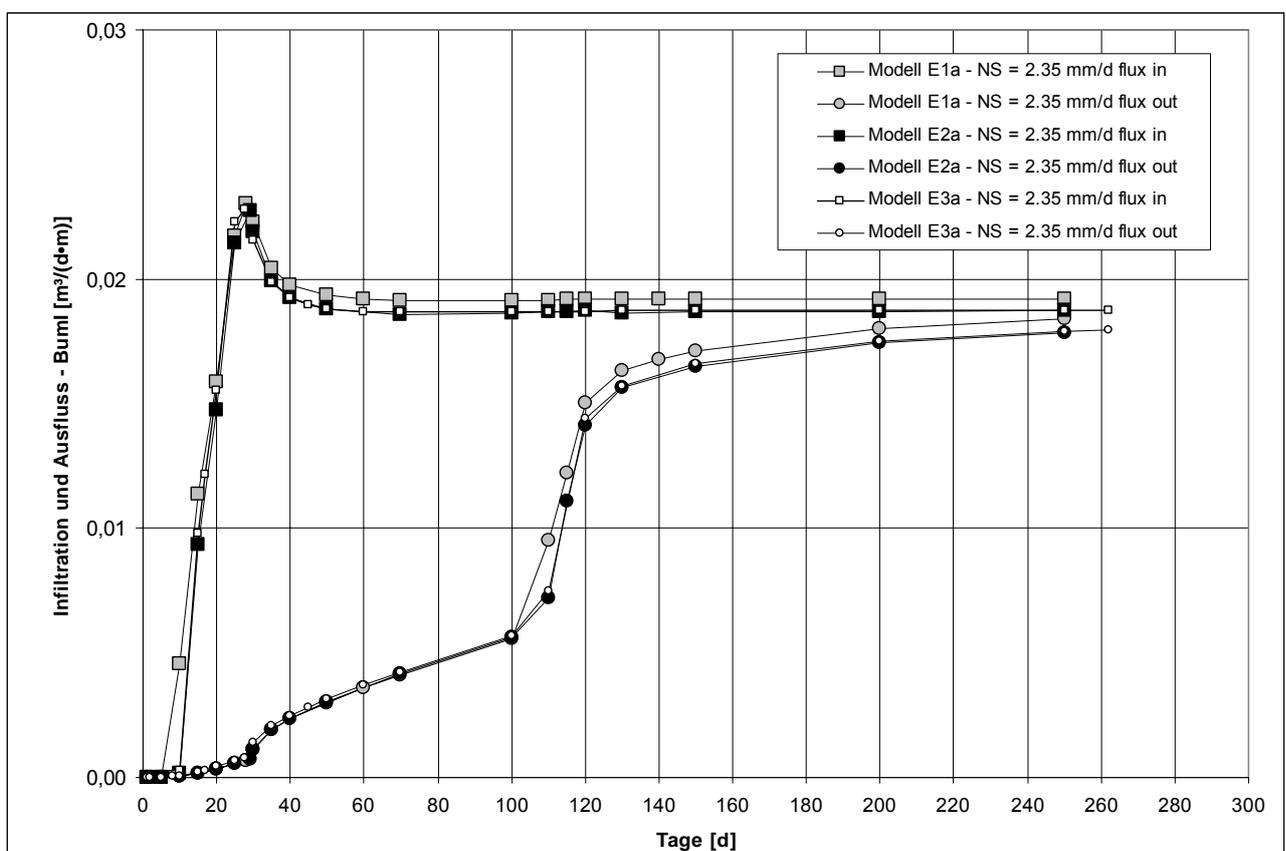


Abbildung 6.6: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für die Modelle E1a, E2a, E3a und E4a-1 bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d

In Abbildung 6.6 sind für den Boden mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im zeitlichen Verlauf ein- und ausströmenden Wassermengen dargestellt. Die Infiltration in den Dammkern steigt zunächst fast linear an und fällt dann nach Erreichen des Maximalwertes auf einen konstanten Wert ab. Dieser maximale Wert ist für alle Modelle etwa nach 25 Tagen erreicht. Der Maximalwert zeigt an, wann das versickernde Niederschlagswasser den BumI erreicht. Aufgrund der im Anfangszustand relativ hohen Saugspannungen wird zunächst eine hohe Infiltrationsrate erreicht. Mit zunehmender Aufsättigung nehmen die Saugspannungen im BumI nahe der Sickerschicht ab, was zu einer Ab-

nahme der Infiltrationsrate führt. Dieses Verhalten entspricht dem aus Durchlässigkeitsversuchen bekannten Infiltrationsverlauf feinkörniger Böden (Heyer, 2001).

Der Ausfluss aus dem Kern steigt bis zum Zeitpunkt von 100 Tagen stetig an. Danach kommt es zu einem sprunghaften Anstieg der Exfiltration bis sich der Wert an den der Infiltration annähert. Nach ca. 300 Tagen liegt ein stationärer Fließzustand vor. Abbildung 6.6 zeigt für alle untersuchten Berechnungen einen ähnlichen Verlauf der Infiltration in bzw. des Ausflusses aus dem Kernmaterial. Beim Modell E1a_2.35 fallen geringfügig höhere Sickerwassermengen als für die übrigen Modelle an. Dies ist auf die Wahl des höher durchlässigen Materials (Su2) für das Bankett zurückzuführen.

Die Infiltrationsmengen in das Bankett in Abhängigkeit vom über der Fahrbahn und dem Bankett anfallenden Niederschlagsmenge dringt bei dem kleinen aufgebrauchten Niederschlag von 2,35 mm/d beinahe vollständig in das Bankett. Wie Tabelle 6.6 zeigt, infiltriert bei Modell E1a_2.35 das über der Fahrbahn und dem Bankett anfallende Niederschlagswasser beinahe vollständig. Auch die Sickerwassermengen in das Bankett für die Modelle E2a_2.35 und E3a_2.35 sind mit 93 % und 95 % vom Niederschlag über Fahrbahn und Bankett sehr hoch. Bei Modell E4a-1_2.35 ist die im Bankett versickernde Sickerwassermenge mit etwa 87 % geringer. Dies ist vermutlich auf die Beschaffenheit des Oberbodens zurückzuführen.

Modell \ Niederschlag	2,35 [mm/d]
Modell E1a	99,6 %
Modell E2a	93,1 %
Modell E3a	95,0 %
Modell E4a-1	86,6 %

Tabelle 6.6: Infiltrationsmenge in Bankett in Prozent vom Niederschlag über Fahrbahn und Bankett bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d

Aus dem Diagramm in Abbildung 6.7 geht hervor, dass etwa die Hälfte des Gesamtniederschlags auf den Damm von $0,03755 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ bei allen aufgeführten Berechnungsmodellen in den Kern aus Buml infiltriert. Ursächlich hierfür ist der sehr geringe Niederschlag von 2,35 mm/d bzw. 1,955 mm/d, der wiederum zu sehr geringen Sickerwassermengen führt. Diese sind so niedrig, dass sie bei gesättigten Verhältnissen zur Hälfte vom Buml aufgenommen und bei den Modellen E1a_2.35, E2a_2.35 und D3a_2.35 zur Hälfte in der oberhalb des Bumls befindlichen Dränschicht abgeführt werden. Der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert der Dränschicht ist zwar deutlich größer als derjenige des Bumls, allerdings beträgt der Gradient für das Wasser in der Dränschicht auf dem Buml in Richtung des Bumls bei gesättigten Verhältnissen ungefähr $i = 1$ und in Abflussrichtung der Dränschicht nur $i = 0,025$ entsprechend dem Gefälle der Dränschicht. Dadurch kommt es im gesättigten Fall zu einer Durchströmung des Bumls mit einer maximalen Abflussleistung, die etwa dem gesättigten k_f -Wert des Bumls bei einem Gradienten $i = 1$ entspricht.

Im Modell E4a-1_2.35 verdeutlicht der große Abfluss im Oberboden den in Abbildung 6.5 sichtbaren Kapillarsperreneffekt.

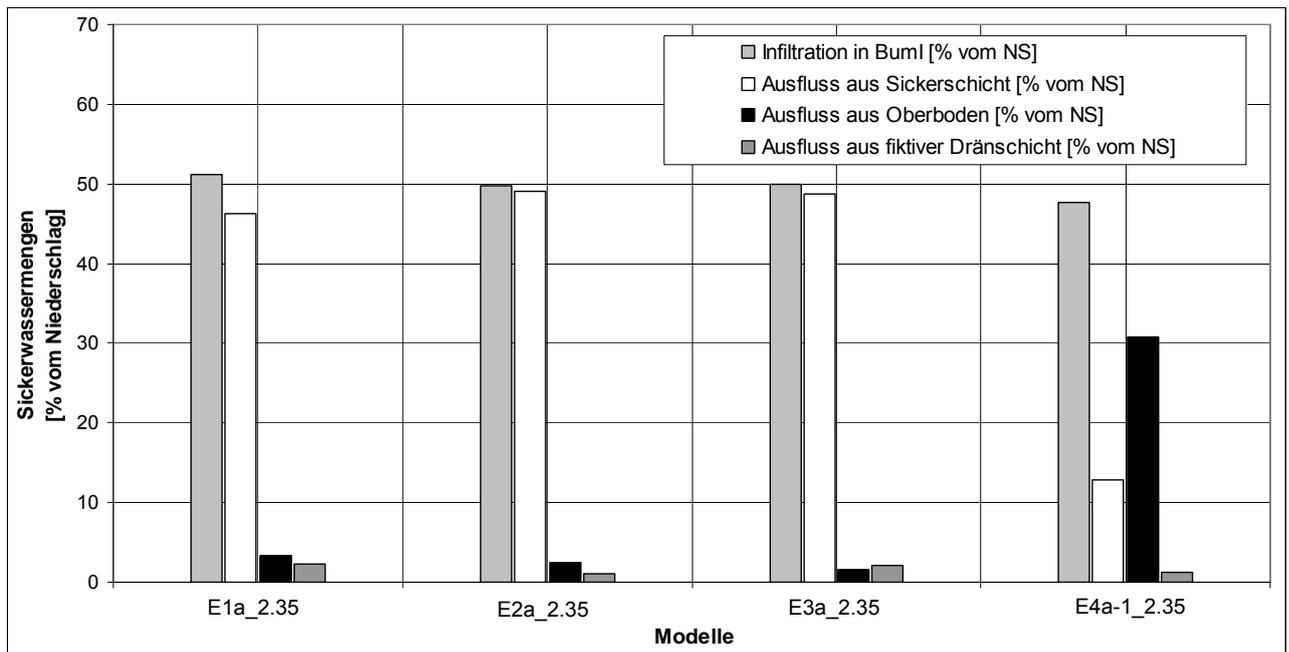


Abbildung 6.7: Diagramm – Sickerwassermengen in Abhängigkeit von den Materialien in Bankett und Oberboden bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d

6.1.2 Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 9,4 mm/d

Bei Ansatz eines Niederschlages von 9,4 mm/d im Kronenbereich bzw. 7,82 mm/d auf die Böschung konnte bei den Modellen E1a und E3a mit einem vertretbaren Rechenaufwand kein stationärer Zustand der Fließvorgänge im gesamten Modell erreicht werden. Für die in den BumI infiltrierende Sickerwassermenge stellt sich allerdings nach jeweils etwa 25 Tagen ein stationärer Wert ein wie Abbildung 6.8 zeigt. Die Berechnungen wurden für Modell E1a_9.4 nach 49 Tagen und für Modell E3a_9.4 nach 60 Tagen abgebrochen. Zu diesen Zeitpunkten war der BumI jeweils noch nicht vollständig aufgesättigt, sondern noch im Sättigungsvorgang begriffen. Dementsprechend sind die aus dem BumI austretenden Sickerwassermengen verhältnismäßig gering.

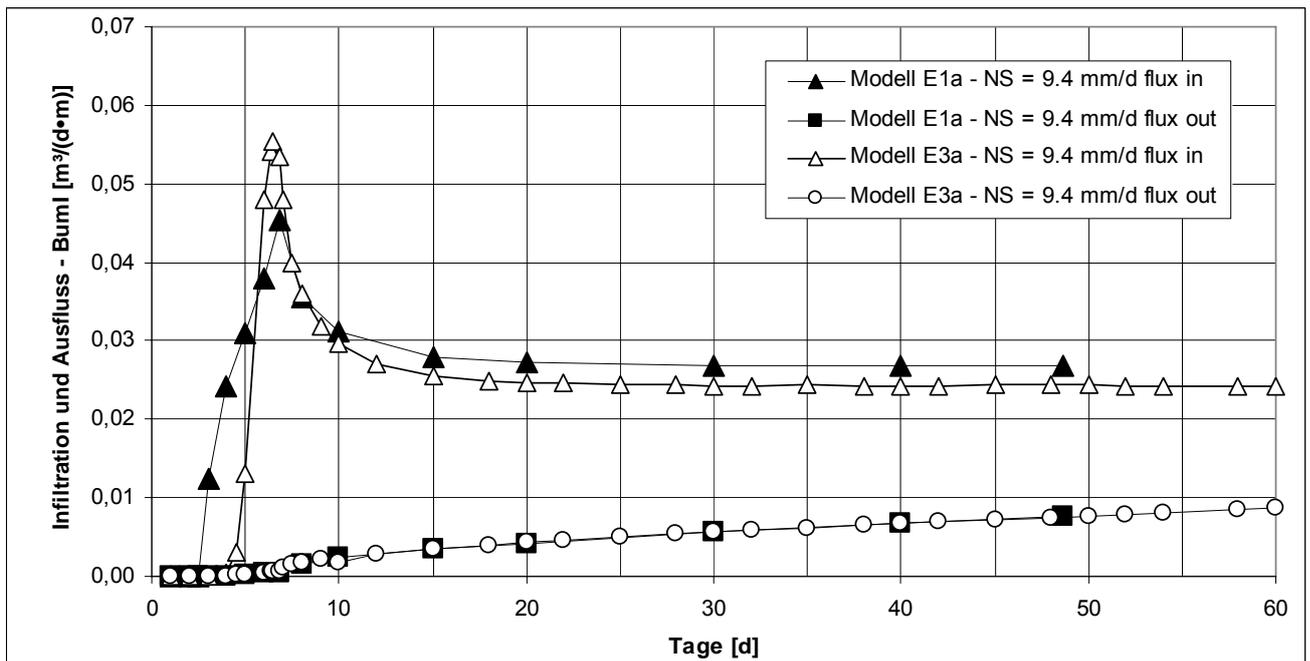


Abbildung 6.8: Infiltration in Buml und Ausfluss aus Buml bei den Modellen E1a_9.4 und E3a_9.4

Es lässt sich feststellen, dass die in den Buml eindringende Wassermenge zunächst stark zunimmt und nach einer anschließenden Abnahme auf einem konstanten Wert stagniert. Aus den Ergebnissen der Modellberechnungen mit dem geringeren Niederschlag von 2,35 mm/d ist bekannt, dass sich die in den Buml infiltrierende Sickerwassermenge im zeitlichen Verlauf danach bis zum Erreichen eines stationären Zustandes nicht mehr verändert (siehe Abbildung 6.6). Die aus dem Buml ausströmende Wassermenge dagegen nimmt im zeitlichen Verlauf weiter zu, bis sie im stationären Fließzustand der in den Buml eindringenden Sickerwassermenge entspricht.

Niederschlag		9,4 [mm/d]
Modell		
Modell E1a		97,5 %
Modell E3a		43,0 %

Tabelle 6.7: Infiltrationsmenge in Bankett in Prozent vom Niederschlag über Fahrbahn und Bankett bei einem Niederschlag von 9,4 mm/d

97,5 % des über der Fahrbahn und dem Bankett anfallenden Niederschlags versickern im Modell E1a_9.4 bereits im Bereich des Banketts (siehe Tabelle 6.7 und Strömungslinien aus Abbildung 6.9). Bei Modell E3a_9.4 versickern im Bankett nur etwa 43 % des über Asphaltdecke und Bankett aufgetragenen Niederschlags. Dies führt zu einem Oberflächenabfluss im kronennahen Bereich der Böschung, was gut anhand der Strömungslinien aus Abbildung 6.10 zu erkennen ist. Dieses Oberflächenwasser versickert dann zusammen mit dem im Böschungsbereich auftretenden Niederschlag im Oberboden. Daher entsteht auch in diesem Fall trotz des weniger durchlässigen Oberbodenmaterials nur ein geringer Oberflächenabfluss in der fiktiven Dränschicht von 4,9 % der Gesamtniederschlagsmenge. Deshalb ist die in den Oberboden infiltrierende Sicker-

wassermenge für Modell E3a_9.4 deutlich höher als bei Modell E1a_9.4 wie Tabelle 6.8 zu entnehmen ist. Für das Modell E1a_9.4 beträgt der Oberflächenabfluss lediglich 2,3 % von der Gesamtniederschlagsmenge. Außerdem kommt es wie Tabelle 6.9 zeigt bei einem Niederschlag von 9,4 mm/d zu einem verhältnismäßig höheren Abfluss in der Sickerschicht als bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d (siehe Abbildung 6.7).

	Infiltration in Bankett [% vom NS]	Infiltration in Oberboden [% vom NS]	Oberflächenabfluss [% vom NS]
Modell E1a	51,1	44,7	2,3
Modell E3a	22,5	69,5	4,9

Tabelle 6.8: Infiltrationsmengen in Abhängigkeit vom Niederschlag für die Modell E1a und E3a bei einem Niederschlag von 9,4

	Ausfluss aus fikt. Dränschicht [% vom NS]	Ausfluss aus Oberboden [% vom NS]	Ausfluss aus Sickerschicht [% vom NS]	Infiltration in BumI [% vom NS]
Modell E1a	2,3	3,6	76,6	17,6
Modell E3a	5	5,7	79,4	15,9

Tabelle 6.9: Sickerwassermengen in Abhängigkeit von den Materialien in Bankett und Oberboden bei einem Niederschlag von 9,4 mm/d

Die nach 49 Tagen in den BumI einströmende Wassermenge beträgt im Modell E1a_9.4 etwa 18 % und im Modell E3a_9.4 etwa 16 % der Gesamtniederschlagsmenge. Die im Modell E1a_9.4 geringfügig höheren Sickerwassermengen resultieren aus dem gegenüber dem Modell E3a_9.4 etwas durchlässigeren Material im Bereich des Banketts (siehe auch Abschnitt 6.1.1).

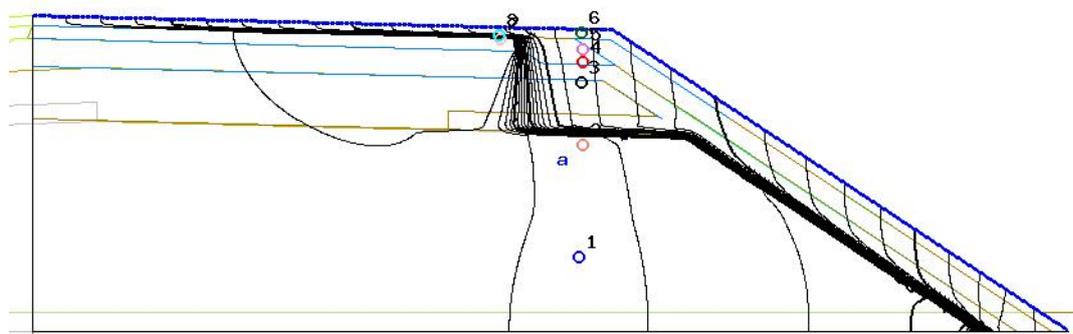


Abbildung 6.9: Strömungslinien im Modell E1a bei einem simulierten Niederschlag von 9,4 mm/d nach 49 d

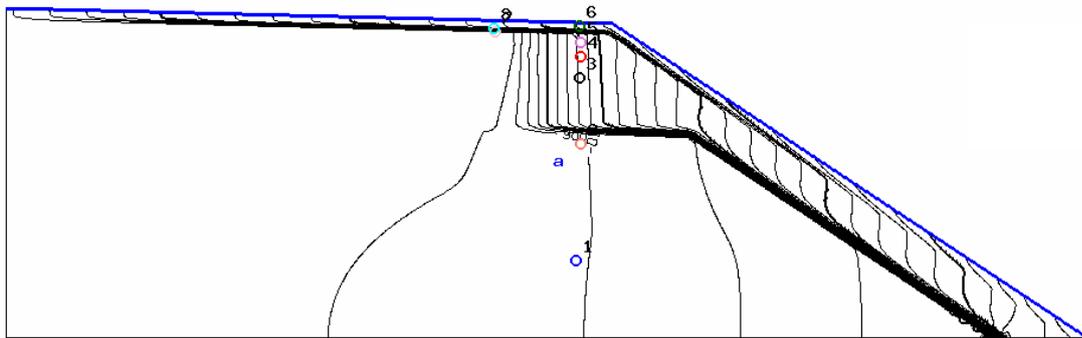


Abbildung 6.10: Strömungslinien im Modell E3a bei einem simulierten Niederschlag von 9,4 mm/d nach 60 d

6.1.3 Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 23,5 mm/d

Für die Strömungssimulation mit einem auf der Dammoberseite aufgetragenen Niederschlag von 23,5 mm/d und auf die Böschung aufgetragenen Niederschlag von 19,55 mm/d konnten die Berechnungen für die Modelle E1a und E3a aufgrund des unverhältnismäßig großen Zeitaufwandes nicht bis zum stationären Zustand durchgeführt werden. Für Modell E1a_23.5 wurde die Simulation nach 36,5 Tagen, für Modell E3a_23.5 nach 19 Tagen abgebrochen. Die Infiltrationsmenge in den Dammkern ist in beiden Modellen nach etwa 15 Tagen konstant.

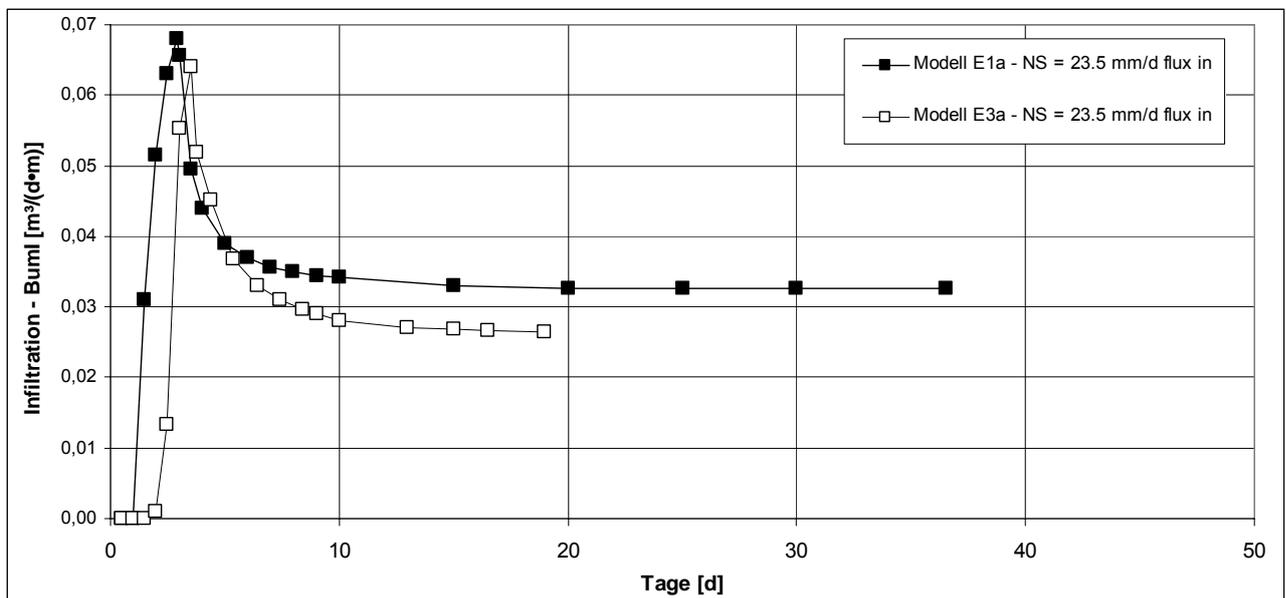


Abbildung 6.11: Infiltration in den Buml bei den Modellen E1a_23.5 und E3a_23.5

Die Infiltration des Sickerwassers in den Dammkern aus Buml zeigt über die Zeit einen ähnlichen Verlauf wie bei den mit geringeren Niederschlägen durchgeführten Berechnungen aus den Abschnitten 6.1.1 und 6.1.2. D. h., die in den Kern infiltrierende Sickerwassermenge nimmt anfänglich stark zu und geht nach Erreichen des kurzzeitigen Maximums auf einen konstanten Wert zurück (siehe Abbildung 6.11).

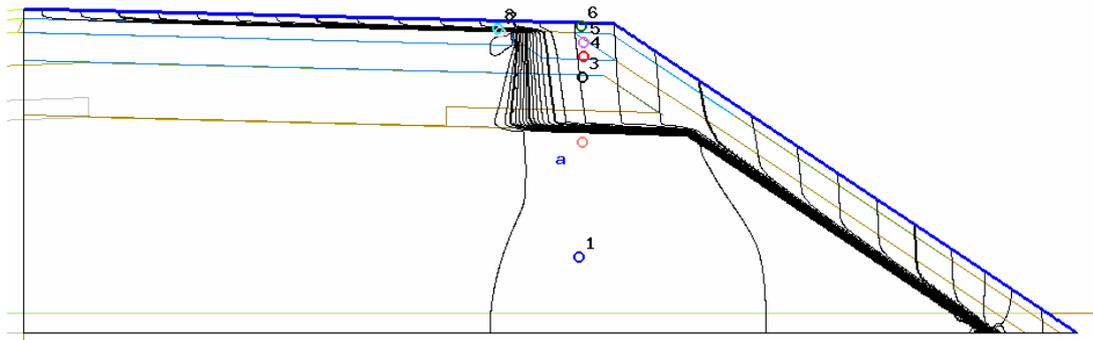


Abbildung 6.12: Strömungslinien im Modell E1a_23.5 nach 36,5 d

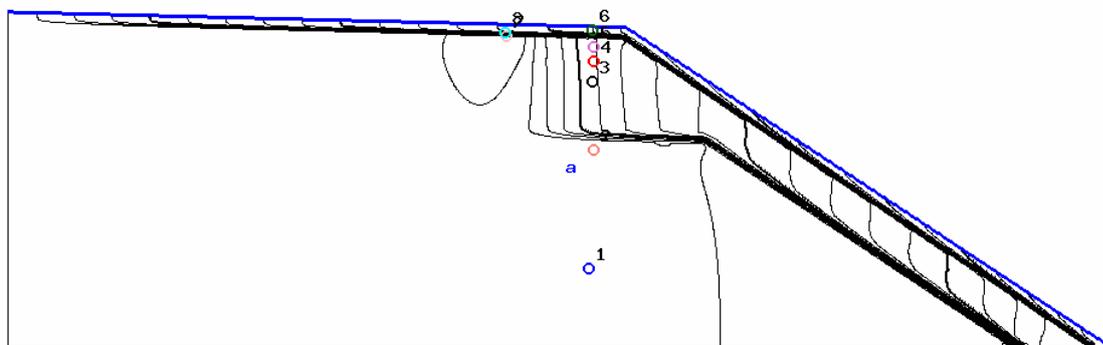


Abbildung 6.13: Strömungslinien im Modell E3a_23.5 nach 16,5 d

Niederschlag	23,5 [mm/d]
Modell E1a	99,5 %
Modell E3a	35,3 %

Tabelle 6.10: Infiltrationsmenge in Bankett in Prozent vom Niederschlag über Fahrbahn und Bankett bei einem Niederschlag von 23,5 mm/d

Aus Tabelle 6.10 geht hervor, dass selbst bei dem verhältnismäßig starken Niederschlag von 23,5 mm/d im Modell E1a_23.5 das über der Fahrbahn und dem Bankett anfallende Niederschlagswasser vollständig im Bankett aus Su2 versickert. Im Modell E3a_23.5 dringen nur 35 % des über Asphaltdecke und Bankett aufgetragenen Niederschlages in das Bankett aus Su3-Material ein. Das restliche Niederschlagswasser wird in der fiktiven Dränschicht auf der Dammoberfläche abgeführt und versickert zum Teil zusammen mit dem über der Böschung aufgetragenen Niederschlag im Oberboden (Su2) oder fließt an der Dammoberfläche ab. Der Oberflächenabfluss beträgt etwa 41,5 % der Gesamtabflussmenge (siehe Tabelle 6.11). Auch die Strömungslinien aus Abbildung 6.13 zeigen einen deutlichen Oberflächenabfluss im Modell E3a_23.5. Tabelle 6.11 zufolge fließen im Modell E1a_23.5 lediglich 6,4 % der Gesamtabflussmenge auf der Dammoberfläche ab, was zu den Strömungslinien aus Abbildung 6.12 passt; es ist

deutlich zu erkennen, dass im Modell E1a_23.5 das gesamte Niederschlagswasser, das über Fahrbahn und Bankett anfällt, im Bankett versickert und sich kein Oberflächenabfluss einstellt.

Da die Berechnungen für die Modell E1a und E3a bei einem vorgegebenen Niederschlag von 23,5 mm/d keinen stationären Zustand erreichen, werden die Sicker Mengen aus der fiktiven Dränschicht, dem Oberboden und der Sickerschicht auf die bis zum Berechnungsende angefallene Ausflussmenge aus dem Damm bezogen.

	Ausfluss aus fikt. Dränschicht [% vom Abfluss]	Ausfluss aus Oberboden [% vom Abfluss]	Ausfluss aus Sickerschicht [% vom Abfluss]	Infiltration in BumI [% vom NS]
Modell E1a	6,4	7,1	80,6	8,5
Modell E3a	41,5	9,6	45,9	6,9

Tabelle 6.11: Sickerwassermengen in Abhängigkeit von den Materialien in Bankett und Oberboden bei einem Niederschlag von 23,5 mm/d

Zum Zeitpunkt des jeweiligen Berechnungsendes infiltrieren im Modell E1a_23.5 etwa 9 % und im Modell E3a_23.5 etwa 7 % der Gesamtsickerwassermenge in den Kern aus Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen. In der Sickerschicht werden bei Modell E1a_23.5 etwa 80 % der gesamten Ausflussmenge abgeführt, in Modell E3a_23.5 nur etwa 46 % (siehe Tabelle 6.11). Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Modell E1a_23.5 eine größere Sickerwassermenge aus dem Bankett auf die Sickerschicht trifft. Im Modell E3a_23.5 fließt wie oben erläutert ein Großteil des Niederschlages bereits an der Dammoberseite ab. Demzufolge ist der Abfluss in der Sickerschicht kleiner.

6.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Ein Vergleich der Infiltrationsverläufe in den BumI in Abbildung 6.14 für die unterschiedlichen Niederschläge von 2,35 mm/d, von 9,4 mm/d und von 23,5 mm/d am Beispiel des Modells E1a zeigt, dass mit zunehmender Niederschlagsintensität der Maximalwert der Infiltration in den Kern zeitlich früher eintritt. Während für einen Niederschlag von 2,35 mm/d die größte Sickerwassermenge erst nach etwa 27,5 Tagen auftritt, dringt bei einem Niederschlag von 9,4 mm/d bereits nach 6,5 Tagen und bei einem Niederschlag von 23,5 mm/d nach 3 Tagen die größte Wassermenge in den BumI ein.

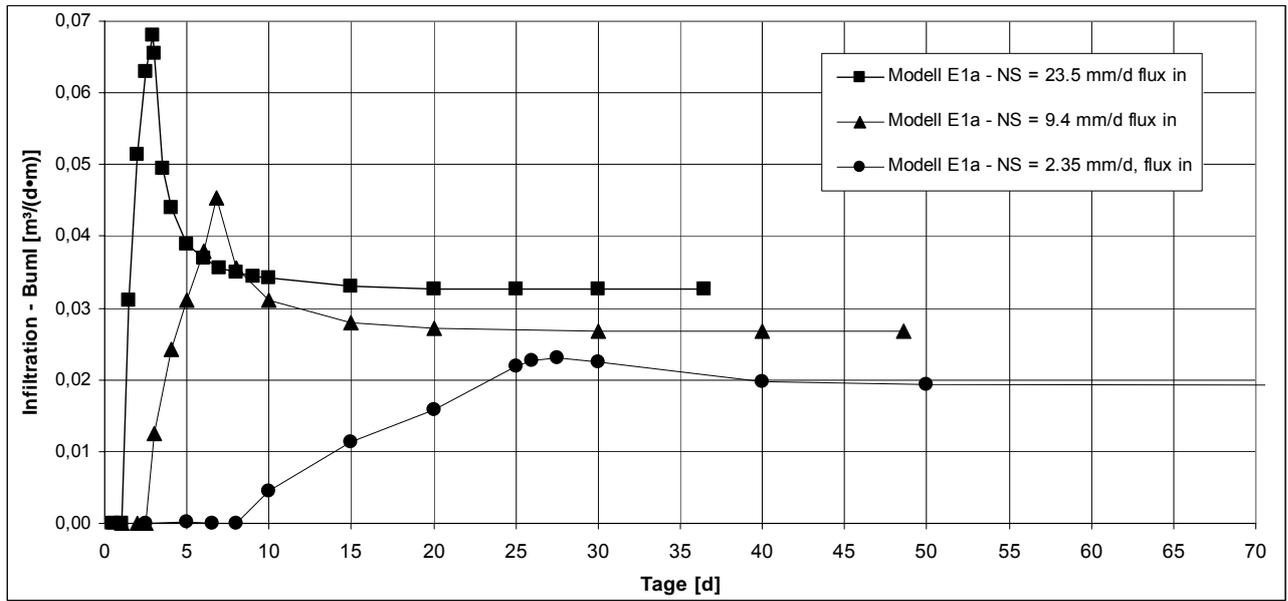


Abbildung 6.14: Infiltration in BumI beim Modell E1a für die Niederschläge 2,35 mm/d, 9,4 mm/d und 23,5 mm/d

Aus Abbildung 6.14 ist weiter zu erkennen, dass sich mit geringer werdendem Niederschlag auch die bei stationären Strömungsverhältnissen in den BumI infiltrierende Wassermenge verringert. Im Verhältnis zur Gesamtniederschlagsmenge betrachtet, verringert sich die Infiltrationsmenge in den BumI jedoch mit zunehmender Niederschlagsintensität, wie die Auswertung aus Abbildung 6.18 zeigt.

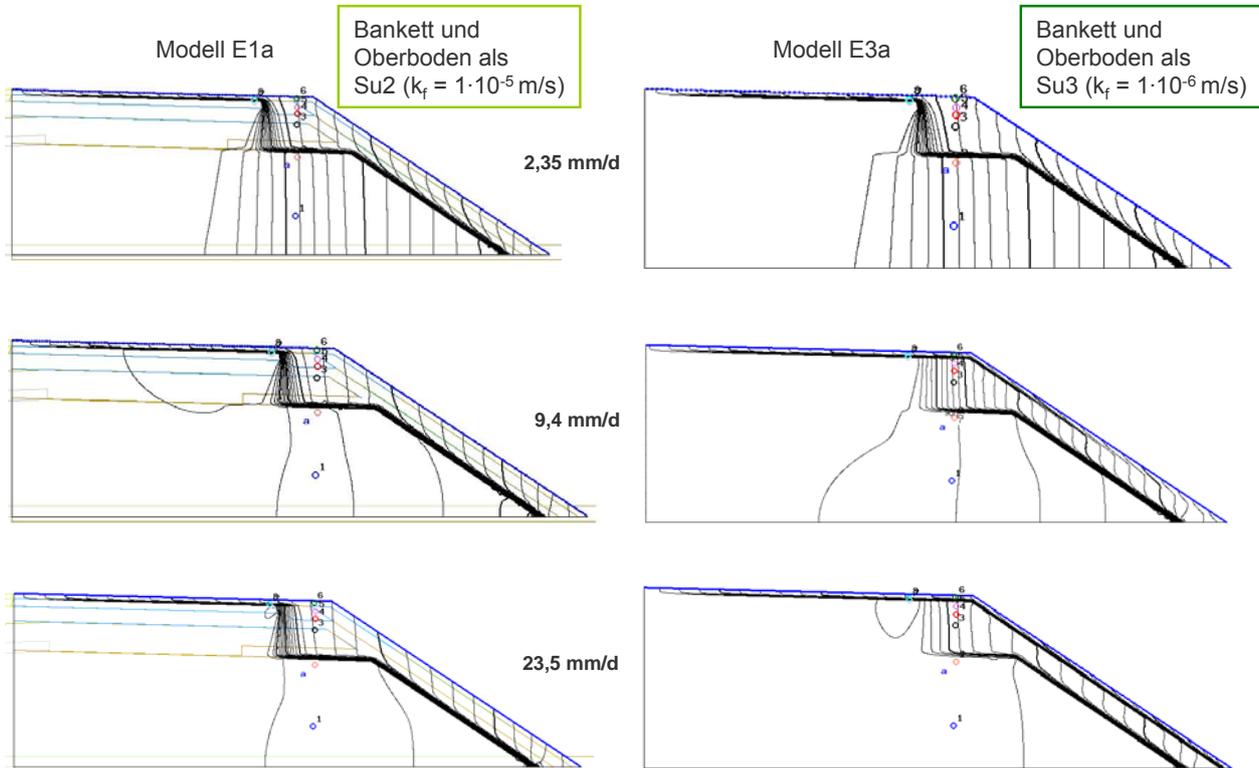


Abbildung 6.15: Strömungslinien für die Modelle E1a und E3a für die Niederschläge 2,35, 9,4 und 23,5 mm/d

Die durchgeführten Berechnungen zeigen, dass die Eigenschaften vor allem des Banketts in Verbindung mit der Niederschlagsmenge und -dauer einen großen Einfluss auf die Sickerwassermengen besitzen. Abbildung 6.15 zeigt die Sickerwassermengen für die Modelle E1a und E3a bei den Niederschlagsintensitäten 2,35 mm/d, 9,4 mm/d und 23,5 mm/d. Sehr geringe Niederschläge werden auch von einem gering durchlässigen Material im Bankett – wie es bei Modell E1a der Fall ist – weitgehend aufgenommen; bei größeren Niederschlagsmengen hingegen kommt es zu einem erhöhten Oberflächenabfluss, was für Modell E3a zu sehen ist. Umgekehrt proportional dazu verhält sich die Kurve für die Infiltration in den Damm. Das heißt, mit zunehmender Niederschlagsintensität infiltriert im Verhältnis zur Gesamtniederschlagsmenge weniger Sickerwasser in den Damm. Für relativ durchlässige Materialien im Bankett und Oberboden wie bei Modell E1a spielt die Größe des Niederschlags eine untergeordnete Rolle für die Sickerwasserinfiltration in den Damm.

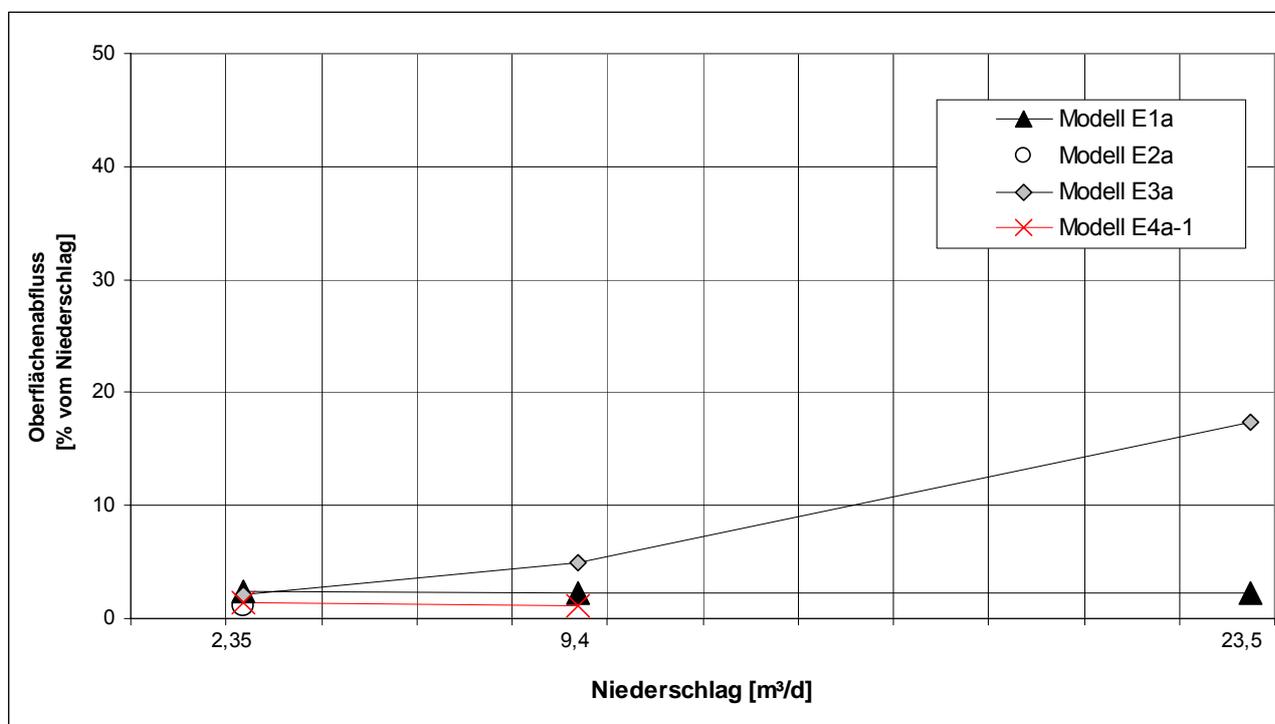


Abbildung 6.16: Oberflächenabfluss in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge

Die Abbildung 6.17 stellt die Infiltration in das Bankett in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge dar. Es zeigt sich, dass auch starke Niederschläge von 23,5 mm/d vollständig im Bereich des Banketts versickern, wenn dieses aus einem Material entsprechend einem Su2 hergestellt wird. Wird das Bankett aus einem geringer durchlässigen Material (Su3) hergestellt, kommt es bei stärkeren Niederschlagsereignissen nur zu einer teilweisen Versickerung des über Fahrbahn und Bankett anfallenden Niederschlages im Bereich des Banketts. In diesem Fall fließt die vom Bankett nicht aufnehmbare Wassermenge in der fiktiven Dränschicht zum Oberboden ab, wo sie zum großen Teil versickert. Wie ein Vergleich der Modelle E1a und E3a in Abbildung 6.17 zeigt, wirkt sich ein gering durchlässiges Material im Bereich des Banketts insbesondere bei starken Niederschlagsereignissen positiv, d.h. reduzierend, auf die im Bereich des Banketts versickernde Wassermenge aus.

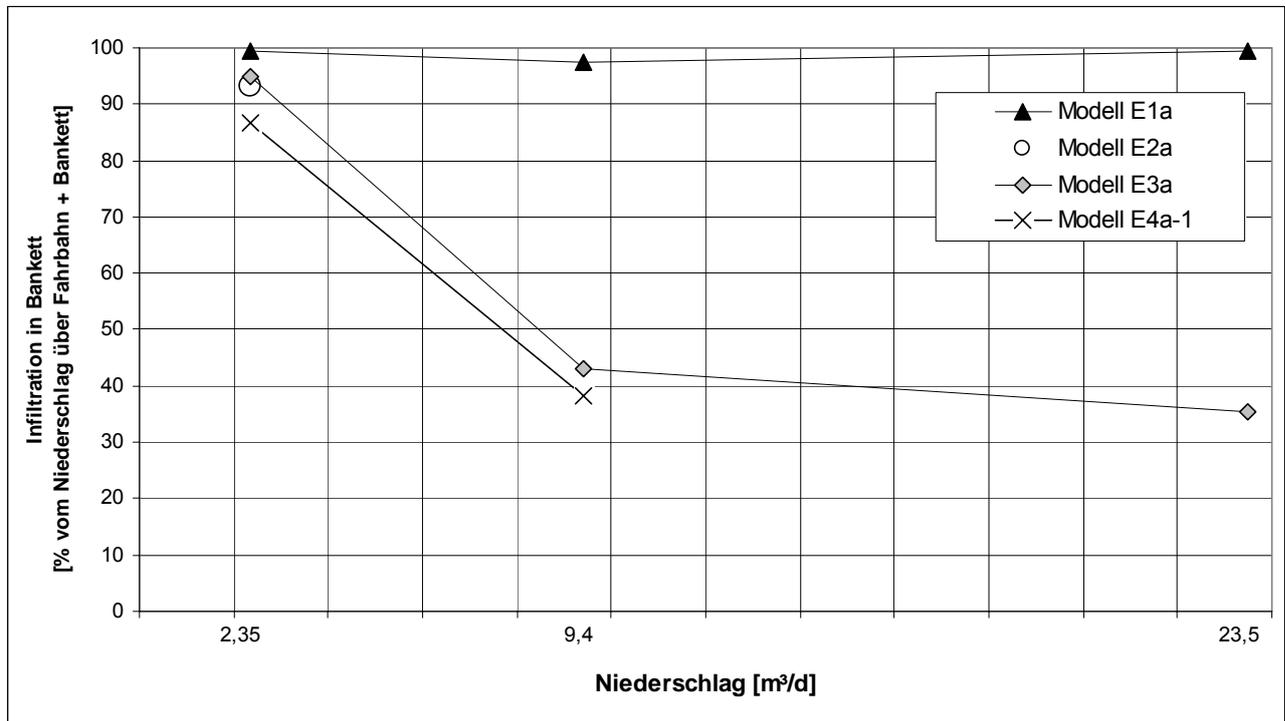


Abbildung 6.17: Infiltration in das Bankett in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge

Langandauernde, geringe Sickerwasserspenden zur oberhalb des Bumls gelegenen Dränschicht werden wie erwartet zu einem großen Anteil vom Kern aufgenommen, auch wenn das Material nur gering wasserdurchlässig ist. Aus diesem Grund werden bei einem ständigen Niederschlag von 2,35 mm/d ca. 50 % des Niederschlages rechnerisch vom Buml aufgenommen (siehe Abbildung 6.18). In Abhängigkeit vom Sättigungsgrad des Bumls kommt es dabei zunächst zu einer Aufsättigung bevor eine Durchsickerung einsetzt. Mit zunehmender Niederschlagsintensität verringert sich die Infiltration in den Buml im Verhältnis zur Niederschlagsmenge gleichermaßen für alle berechneten Modelle unabhängig von den Eigenschaften des Oberbodens und des Banketts (siehe Abbildung 6.18). Darüber hinaus ist zu beobachten, dass im Modell E1a zwar bei allen untersuchten Niederschlagsintensitäten eine größere Wassermenge in den Buml infiltriert als im Modell E3a, jedoch sind die Unterschiede verhältnismäßig gering. Die etwas geringere Infiltration beruht auf dem geringer durchlässigen Bankettmaterial bei Modell E3a. Da das nicht im Bereich des Banketts versickernde Niederschlagswasser aber bei Modell E3a im Oberboden versickert, ist der Gesamtsickerwasseranfall an den Buml aus Bankett und Oberboden nur geringfügig reduziert und es kommt in beiden Modellen zu ähnlichen Infiltrationsraten in den Buml.

Die Auswertungsergebnisse für die im Zuge der Voruntersuchungen für den Straßenaufbau durchgeführten Berechnungen sind in Anlage 1.4, Blatt 1 bis 8 beigefügt. In den weiteren Berechnungen wurden für das Bankett die Bodenkennwerte des Su3 mit $k_f = 1 \cdot 10^{-6}$ m/s und für den Oberboden die des Su2 mit $k_f = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s angesetzt.

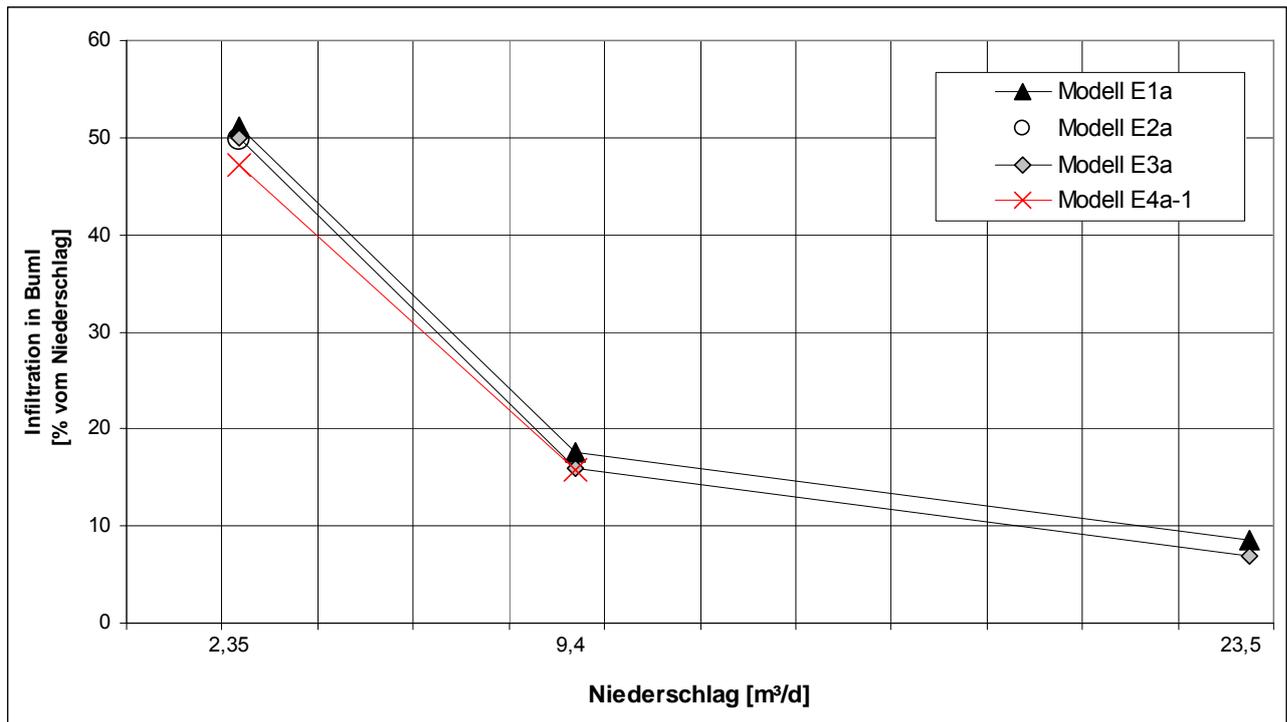


Abbildung 6.18: auf den Niederschlag bezogene Infiltration in BumI in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge

6.2 Modell A

6.2.1 Modellbildung – Modell A

Wie bereits im Abschnitt 3.1.3 beschrieben, werden bei der Bauweise A als technische Sicherungsmaßnahmen witterungsempfindliche Dichtungselemente ohne Sickerschicht eingesetzt. Um Austrocknung und Durchwurzelung zu vermeiden und eine dauerhafte Eignung der Materialien zu gewährleisten, ist eine Mindestüberdeckung der mineralischen und geosynthetischen Dichtungselemente von 1,5 m erforderlich (siehe Abbildung 6.19). Da bei dieser Bauweise keine Sickerschicht vorgesehen ist, wird ein sehr kleiner Durchlässigkeitsbeiwert des Dichtungsmaterials mit $k_f \leq 5 \cdot 10^{-10}$ m/s gefordert. Um den Abfluss des eindringenden Niederschlagswassers im über der Dichtung liegenden Dammbaumaterial sicherstellen zu können, muss dessen Durchlässigkeitsbeiwert mindestens um den Faktor 1000 größer als der der Abdichtung sein. In Abbildung 6.20 ist das Berechnungsmodell für die Bauweise A dargestellt.

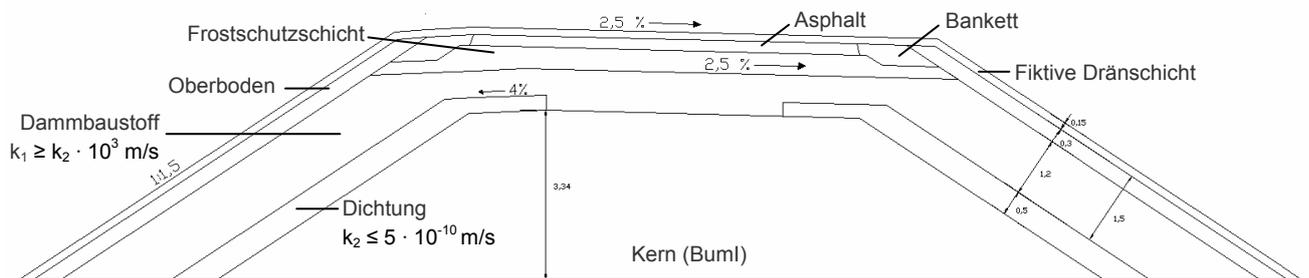


Abbildung 6.19: Bauweise A mit witterungsempfindlichen Dichtungselementen ohne Sickerschicht – Modellierung

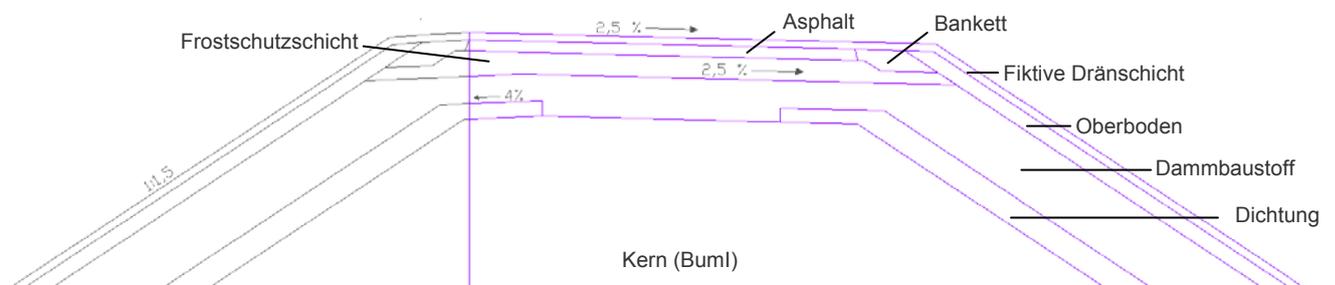


Abbildung 6.20: Bauweise A mit witterungsempfindlichen Dichtungselementen ohne Sickerschicht – Modellgeometrie

6.2.2 Anfangs- und Randbedingungen – Modell A

Die folgenden drei Abbildungen zeigen den Anfangssättigungsgrad für die Modelle A2a, A2b und A2b-1. Für die Modelle A2a und A2b wurde als Anfangsbedingung ein im gesamten Modell konstantes hydraulisches Potential $\psi_h = 0$ vorgegeben. Die daraus resultierende Verteilung des Sättigungsgrades ist in Abbildung 6.21 und Abbildung 6.22 dargestellt. Entsprechend der Anfangsbedingung liegt an der Modellunterseite jeweils ein Sättigungsgrad $S_r = 1,0$ vor. Die beiden Modelle unterscheiden sich lediglich durch das Material des Dammbaustoffes. Im Modell A2a wurden dem Dammbaustoff die Eigenschaften eines weit gestuften Kieses, im Modell A2b die eines stark schluffigen Sandes zugrunde gelegt. Aufgrund der unterschiedlichen Saugspannungs-Sättigungsgrad-Beziehungen der beiden Materialien ergeben sich im Anfangszustand unterschiedliche Verteilungen des Sättigungsgrades im Dammbaustoff.

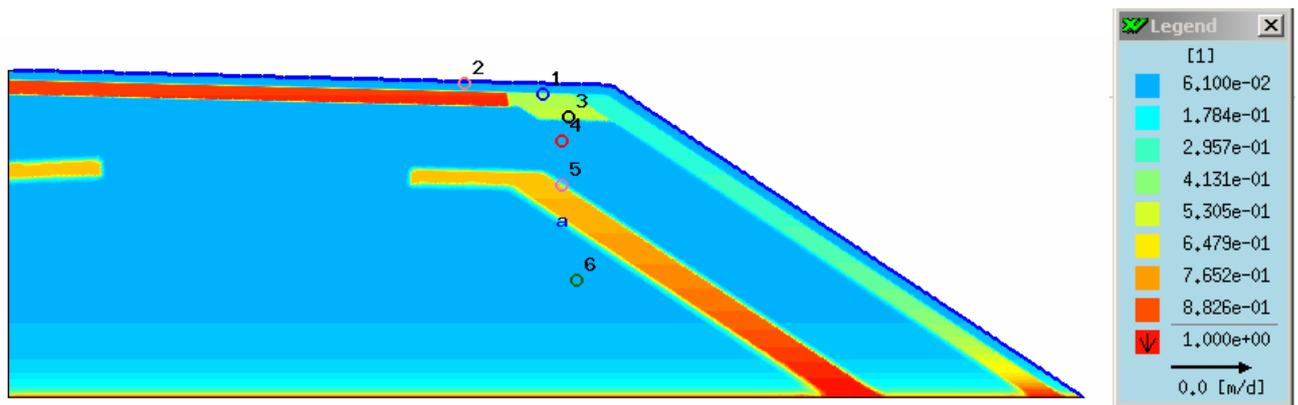


Abbildung 6.21: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell A2a

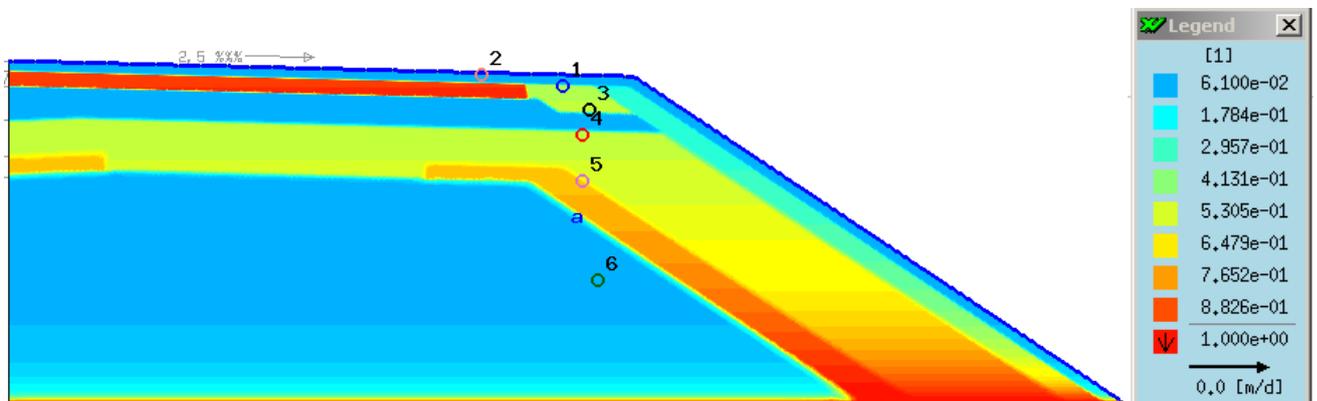


Abbildung 6.22: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell A2b

Beim Modell A2b-1 wurde das Grundwasser einen Meter unterhalb der Dammsohle anstehend simuliert. Die Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustandes bei Modell A2b-1 zeigt demzufolge keine vollständig gesättigte Zone an der Dammsohle (siehe Abbildung 6.23). Auch im übrigen Damm – besonders gut an der Einfärbung im unteren Bereich zu erkennen – ist der Sättigungsgrad im Anfangszustand bei einer vorgegebenen Potentialhöhe von $\psi_h = -1$ m geringer als im Modell A2b.

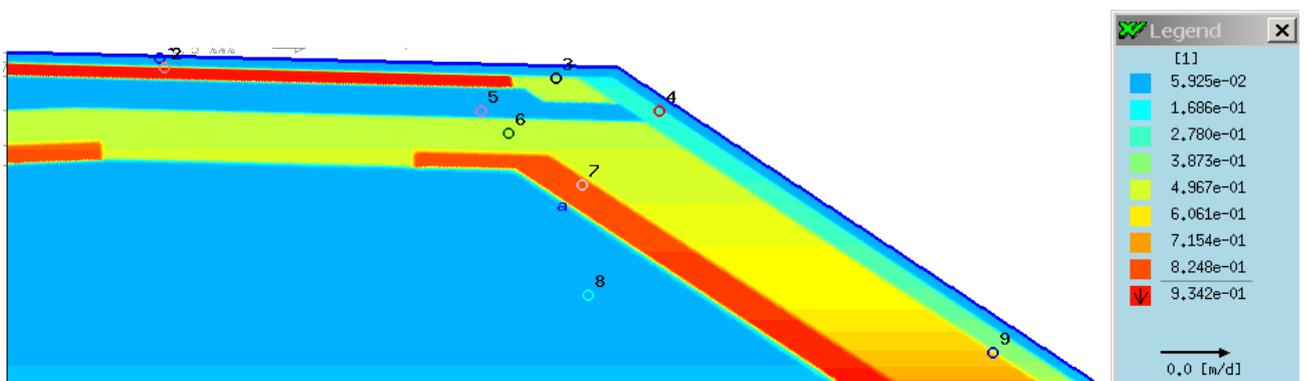


Abbildung 6.23: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell A2b-1

Als Randbedingung wurde bei den Modellen A2a und A2b an der Modellunterseite ein hydraulisches Potential $\psi_h = 0$ definiert. Beim Modell A2b-1 wurde das hydraulische Potential an der Unterseite zu $\psi_h = -1\text{m}$ festgelegt. Durch eine sogenannte „constraint“-Randbedingung wurde in allen Modellen eine Wasseraufnahme über die Modellunterseite unterbunden.

Am oberen Modellrand wurden die Niederschläge 2,35 mm/d, 9,4 mm/d bzw. 23,5 mm/d definiert. Die in den einzelnen Berechnungen simulierten Zeiträume können der nachfolgenden Tabelle 6.12 entnommen werden.

Niederschlag Modell	2,35 [mm/d]	9,4 [mm/d]	23,5 [mm/d]
Modell A2a	1782 d	190 d	34 d
Modell A2b	550 d		67 d
Modell A2b-1	350 d	68 d	

Tabelle 6.12: Übersicht über die untersuchten Berechnungsdauern in Tagen für die einzelnen Modelle der Bauweise A

6.2.3 Bodenkennwerte – Modell A

In Tabelle 6.13 sind für die Modelle A2a, A2b und A2b-1 die den jeweiligen Schichten zugrunde gelegten Eigenschaften zusammengestellt. Die Eigenschaften des Straßenaufbaus (Asphaltschicht, Bankett und Oberboden), der fiktiven Dränschicht, der Frostschutzschicht und auch der Dichtungsschicht bleiben bei allen drei Modellen gleich. Einzig der Dammbaustoff sowie die Potentialhöhe wurden variiert.

		fiktive Dränschicht / FrostSS	Asphalt	Bankett	Oberboden	Damm- baustoff	Dichtung	Buml	Potentialhöhe ψ_n [m]
Modell A2a	DIN 18196	GU	TA	SU*	SU / SU*	GU	TL	GU	0
	Kurzbezeichnung	Ekblad 0.4	Tinjum F	Su3	Su2	Ekblad 0.4	Meerdink	Ekblad 0.4	
	k_f -Wert [m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-3}$	
	S_s	1	1	1	1	1	1	1	
	S_r	0,05	0,00	0,00	0,05	0,05	0,190	0,05	
	A [m^{-1}]	46	0,322	2,6	6,8	46	0,85	46	
	n	1,79	1,07	1,28	1,43	1,79	1,35	1,79	
	$m = 1-(1/n)$	0,44	0,07	0,22	0,30	0,44	0,26	0,44	
	Porenanteil	0,23	0,35	0,36	0,38	0,23	0,36	0,23	
Modell A2b	DIN 18196	GU	TA	SU*	SU / SU*	SU*	TL	GU	0
	Kurzbezeichnung	Ekblad 0.4	Tinjum F	Su3	Su2	Su3	Meerdink	Ekblad 0.4	
	k_f -Wert [m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-3}$	
	S_s	1	1	1	1	1	1	1	
	S_r	0,05	0,00	0,00	0,05	0,00	0,190	0,05	
	A [m^{-1}]	46	0,322	2,6	6,8	2,6	0,85	46	
	n	1,79	1,07	1,28	1,43	1,28	1,35	1,79	
	$m = 1-(1/n)$	0,44	0,07	0,22	0,30	0,22	0,26	0,44	
	Porenanteil	0,23	0,35	0,36	0,38	0,36	0,36	0,23	
Modell A2b-1	DIN 18196	GU	TA	SU*	SU / SU*	SU*	TL	GU	-1
	Kurzbezeichnung	Ekblad 0.4	Tinjum F	Su3	Su2	Su3	Meerdink	Ekblad 0.4	
	k_f -Wert [m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-3}$	
	S_s	1	1	1	1	1	1	1	
	S_r	0,05	0,00	0,00	0,05	0,00	0,190	0,05	
	A [m^{-1}]	46	0,322	2,6	6,8	2,6	0,85	46	
	n	1,79	1,07	1,28	1,43	1,28	1,35	1,79	
	$m = 1-(1/n)$	0,44	0,07	0,22	0,30	0,22	0,26	0,44	
	Porenanteil	0,23	0,35	0,36	0,38	0,36	0,36	0,23	

Tabelle 6.13: Bodenkennwerte der Modelle A2a, A2b und A2b-1

6.2.4 Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d

In Abbildung 6.24 ist die Infiltration des Sickerwassers in den Dammkern aus dem Buml für die Modelle A2a und A2b bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d auf den Kronenbereich bzw. von 1,599 mm/d auf die Böschungsseite dargestellt. Beim Modell A2a_2.35 stellt sich nach ca. 300 Tagen ein stationärer Fließzustand, bei dem die in den Buml infiltrierende Wassermenge der aus dem Buml ausströmenden Wassermenge entspricht, ein. Die Infiltrationsmenge beträgt dabei etwa $0,001 \text{ m}^3/(d \cdot m)$.

Die Berechnungen am Modell A2b_2.35 konnten in einem vertretbaren Rechenzeitraum nicht bis zum Erreichen eines stationären Fließzustandes geführt werden. Es ist aber zu erkennen, dass sich sowohl die Infiltrationskurve als auch die ausströmende Wassermenge einem konstanten Wert annähern. Nach einer simulierten Dauer von ca. 370 Tagen stellt sich beim Modell A2b_2.35 etwa

eine viermal höhere in den Buml infiltrierende Sickerwassermenge als bei Modell A2a_2.35 ein. Verantwortlich hierfür sind die unterschiedlichen Eigenschaften des Dammbaumaterials. In Modell A2a_2.35 wurden dem Dammbaustoff die Eigenschaften eines Kieses zugrunde gelegt; dieser übernimmt aufgrund seiner hohen Durchlässigkeit die Funktion einer Dränschicht und gewährleistet eine Abführung des in den Damm infiltrierenden Sickerwassers. Der geringer durchlässige Su3 aus Modell A2b-1_2.35 hingegen sättigt infolge von Kapillarspannungen mit der Zeit immer weiter auf und führt zu einem Wassertransport in die unterhalb der Fahrbahn gelegenen Bereiche. Da in diesem Bereich konstruktiv keine Dichtungsschicht vorgesehen ist, kann der Dammbaustoff dort das Sickerwasser ungehindert an das Kernmaterial abgeben. Dieser Vorgang ist anhand der Verteilung des Sättigungsgrades in Abbildung 6.27 und der Strömungslinien in Abbildung 6.28 gut zu erkennen.

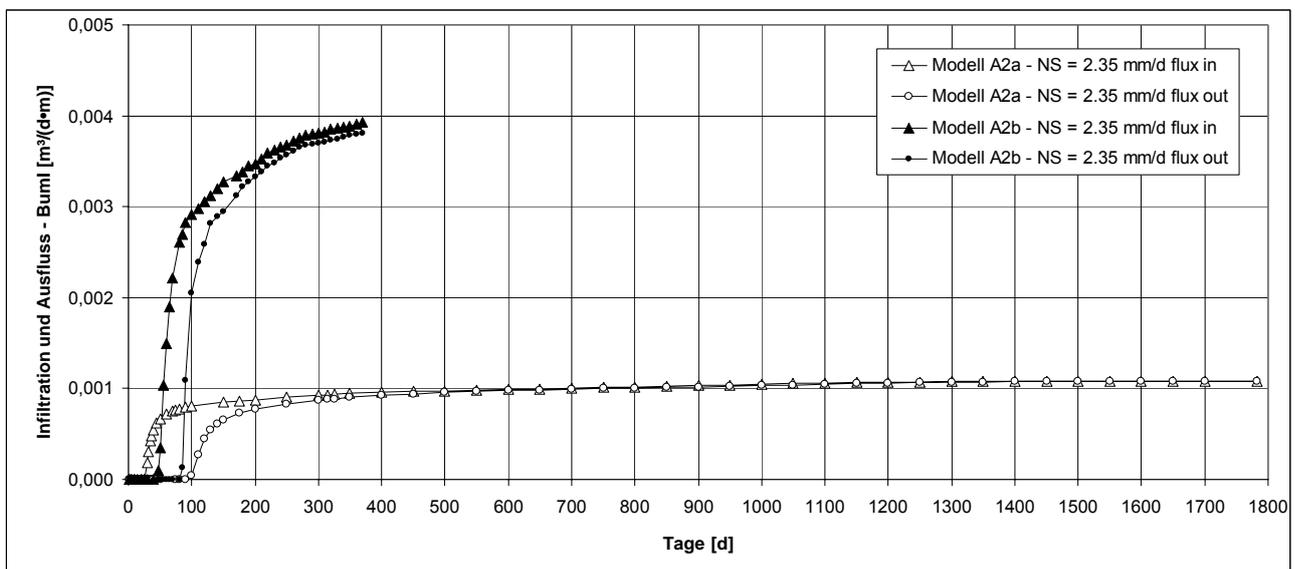


Abbildung 6.24: Infiltration in Buml und Ausfluss aus Buml für die Modelle A2a und A2b bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d

Auch beim Modell A2a_2.35 kommt es zu einer leichten Aufsättigung des Dammbaumaterials unterhalb des Banketts wie Abbildung 6.25 zeigt. Demzufolge infiltriert ebenfalls geringfügig Wasser in den Dammkern, sichtbar an dem etwas helleren und damit mit einem größeren Sättigungsgrad belegten Bereich in Abbildung 6.25. Die Strömungslinien in Abbildung 6.26 zeigen deutlich die Dränwirkung des als schwach schluffiger Kies ausgebildeten Dammbaustoffes beim Modell A2a.

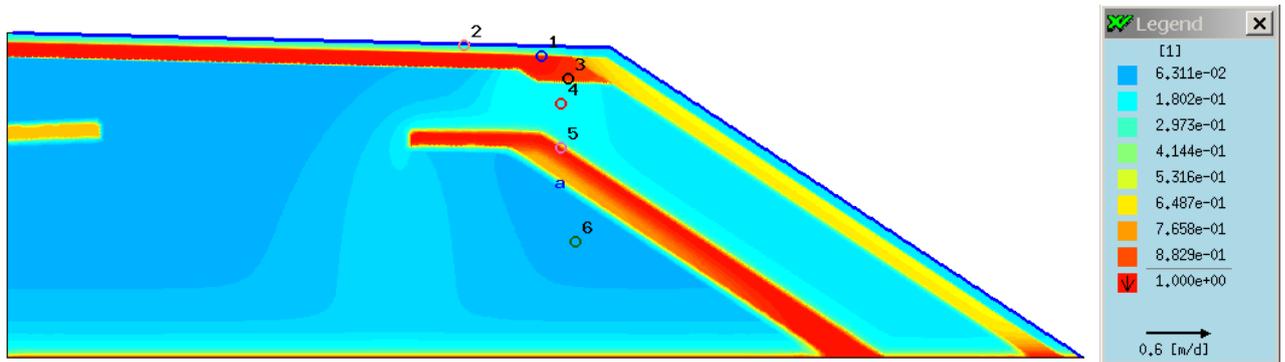


Abbildung 6.25: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell A2a_2.35 nach 350 Tagen

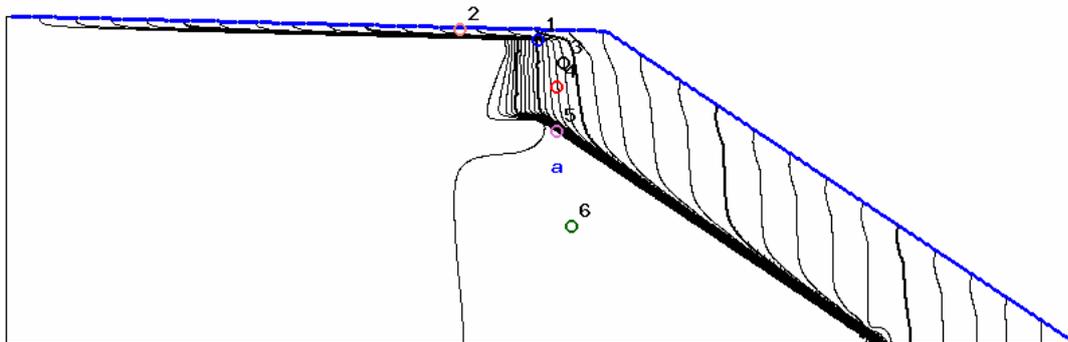


Abbildung 6.26: Strömungslinien im Modell A2a_2.35 nach 350 Tagen

Aufgrund der geringeren Durchlässigkeit des im Modell A2b als stark schluffiger Sand (Su3) modellierten Dammbaustoffes, wird der Großteil des Sickerwassers in einem ca. 50 cm breiten Bereich oberhalb der Dichtung im Dammbauwerk abgeführt. Eine Durchsickerung der Dichtungsschicht findet sowohl im Modell A2a als auch im Modell A2b nur in vernachlässigbarer Größe statt.

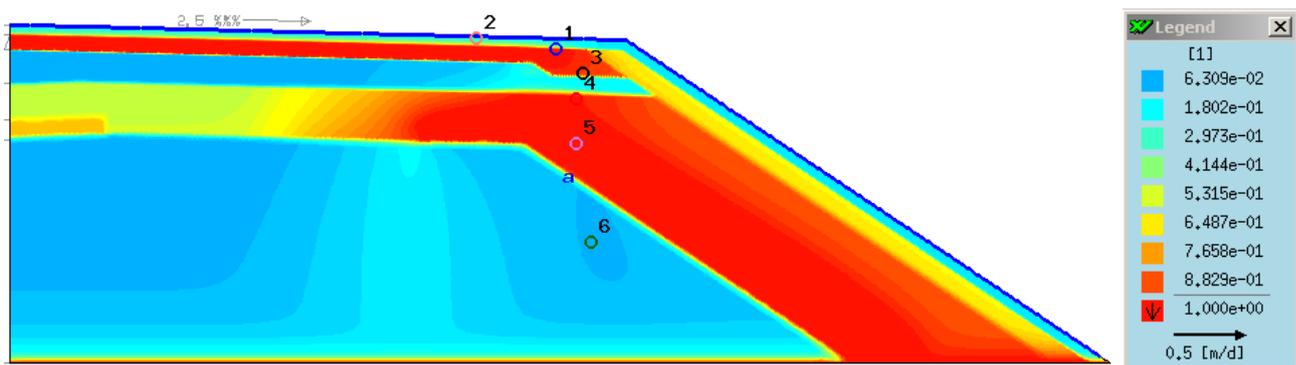


Abbildung 6.27: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell A2b_2.35 nach 350 Tagen

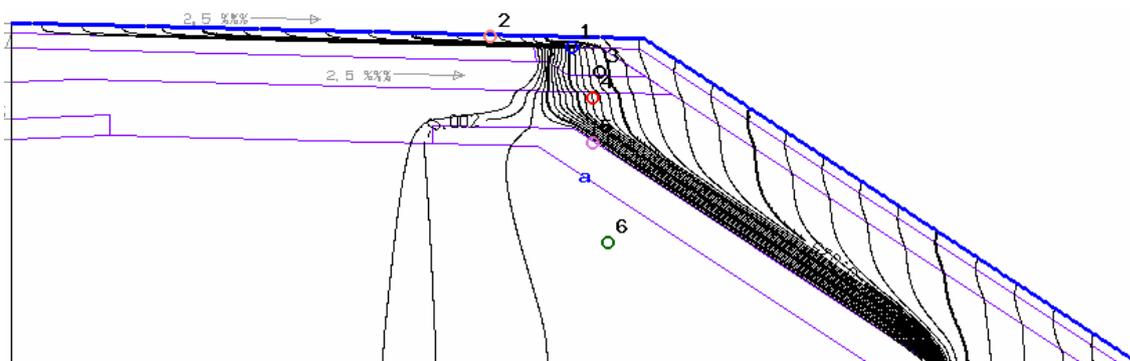


Abbildung 6.28: Strömungslinien im Modell A2b_2.35 nach 350 Tagen

Ein Vergleich der Berechnungsmodelle A2b_2.35 und A2b-1_2.35 zeigt die Auswirkung der unterschiedlichen Randbedingungen am unteren Rand. Beim Modell A2b_2.35 wurde am unteren Rand eine Potentialhöhe $\psi_h = 0$ definiert. Dem Modell A2b-1_2.35 wurde eine Potentialhöhe $\psi_h = -1$ m zugrunde gelegt. Die in den BumI einströmenden bzw. ausströmenden Wassermengen sind in

Abbildung 6.29 dargestellt. Die Berechnung für Modell A2b-1_2.35 wurde aufgrund des großen Rechenaufwandes abgebrochen, bevor sich stationäre Fließzustände im BumI einstellen konnten. Es ist jedoch erkennbar, dass sich die Infiltration in den Kern ähnlich wie bei Modell A2b_2.35 etwa einem Wert von $0,004 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ annähert.

Beim Vergleich der Infiltrationskurven in den Kern von Modell A2b_2.35 und Modell A2b-1_2.35 ist festzustellen, dass bei einer vorgegebenen Potentialhöhe von $\psi_h = -1 \text{ m}$ im zeitlichen Verlauf zunächst etwas weniger Sickerwasser in den BumI eindringt. Auch beginnt der Ausfluss aus dem BumI später. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Damm bei einer Potentialhöhe von $\psi_h = -1 \text{ m}$ im Anfangszustand insgesamt einen geringeren Sättigungsgrad aufweist und damit der Auf-sättigungsprozess des Dammbaustoffes und des BumIs länger andauert. Es ist jedoch zu erwarten, dass sich im stationären Fließzustand sehr ähnliche Sickerwassermengen einstellen werden.

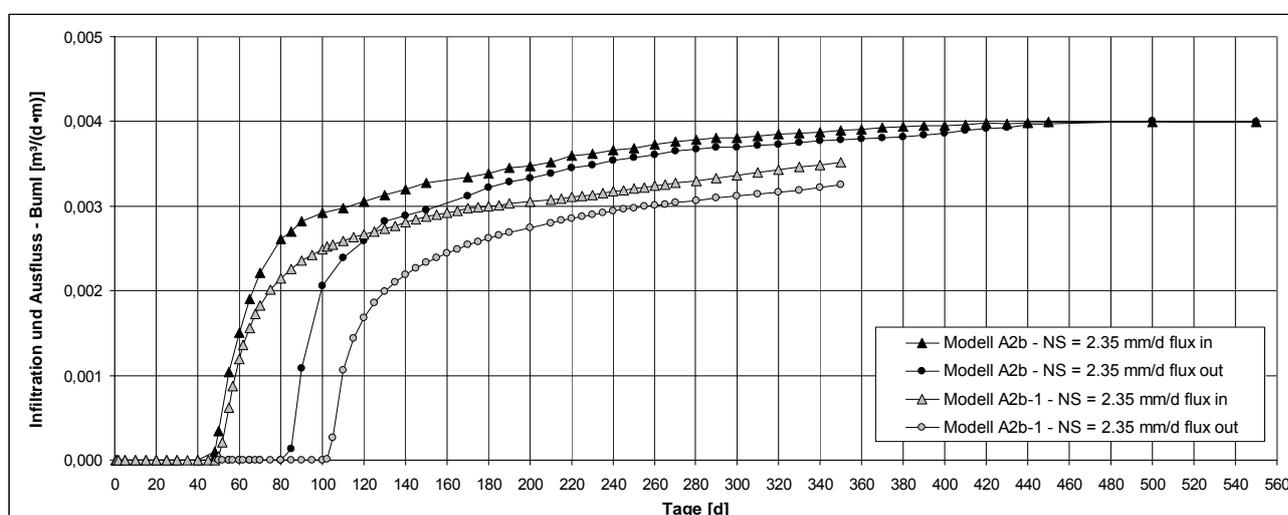


Abbildung 6.29: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für die Modelle A2b und A2b-1 bei einem Niederschlag von $2,35 \text{ mm/d}$

6.2.5 Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von $9,4 \text{ mm/d}$

Die Berechnungsmodelle A2a und A2b-1 zeigen für einen Niederschlag von $9,4 \text{ mm/d}$ im Kronenbereich bzw. $7,82 \text{ mm/d}$ auf der Böschung die in Abbildung 6.30 dargestellten Infiltrationsverläufe in den BumI und jeweils den Sickerwasserausfluss aus dem BumI. Bei Modell A2a_9.4 wurde nach ca. 150 Tagen ein stationärer Fließzustand erreicht. Die in den Kern infiltrierenden Sickerwassermengen im Modell A2b-1_9.4 sind wie auch bei den Berechnungen mit dem geringen Niederschlag von $2,35 \text{ mm/d}$ weitaus höher als im Modell A2a_9.4. Dies ist wiederum auf die Art des Dammbaustoffes zurückzuführen wie bereits in Abschnitt 0 erläutert ist.

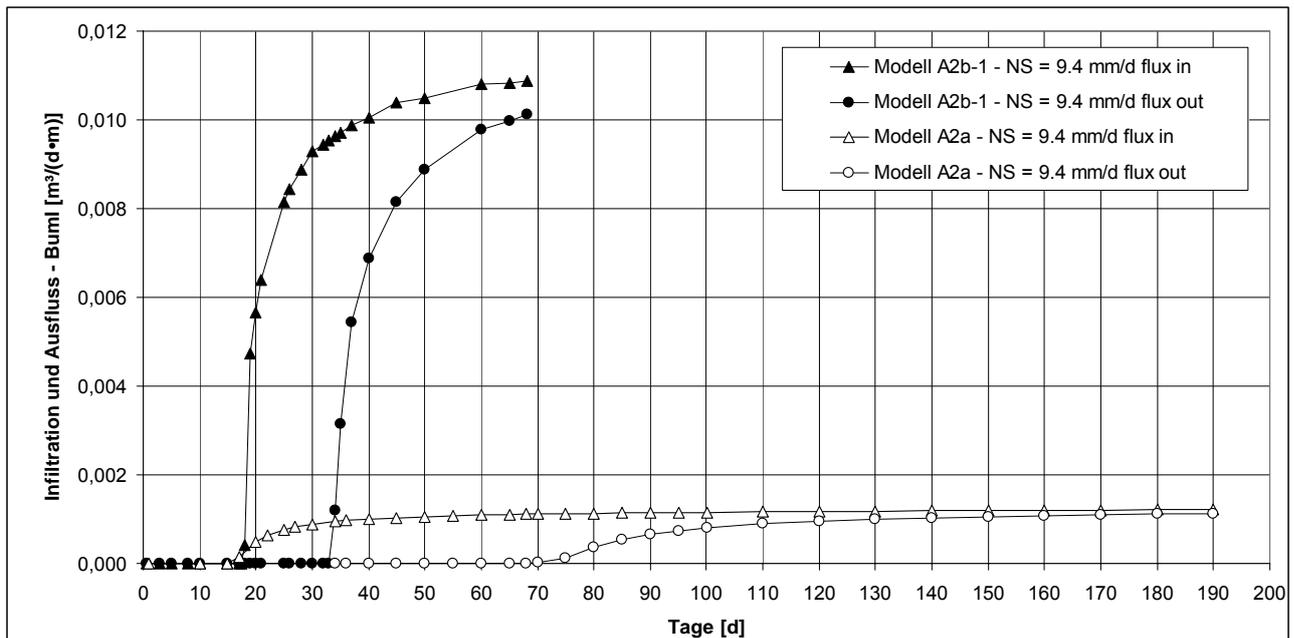


Abbildung 6.30: Infiltration in Buml und Ausfluss aus Buml für die Modelle A2a und A2b-1 bei einem Niederschlag von 9,4 mm/d

In Abbildung 6.31 ist die Verteilung des Sättigungsgrades für das Modell A2a_9.4 nach 190 Tagen dargestellt. Es kommt nur zu einer sehr geringen Infiltration des Sickerwassers in den Buml, wie auch die Strömungslinien in Abbildung 6.32 zeigen. Bei dem Modell A2b-1_9.4 hingegen sättigt der als stark schluffiger Sand (Su3) modellierte Dammbaustoff über die Zeit auf und gibt Sickerwasser an den Buml ab; gut zu erkennen in Abbildung 6.33. Die Strömungslinien in Abbildung 6.34 zeigen, dass das Sickerwasser im Böschungsbereich oberhalb der Dichtungsschicht über die ganze Breite des Dammbaustoffes abgeführt wird. Im Bereich der Frostschuttschicht unterhalb des Banketts kommt es bei dem simulierten Niederschlag von 9,4 mm/d zu einer Sickerströmung in Richtung des Oberbodens. Aufgrund seiner geringen Durchlässigkeit kann der Sand nicht die gesamte aus dem Bankett in die Frostschuttschicht infiltrierende Wassermenge aufnehmen. Dadurch strömt ein Teil des Sickerwassers in der Frostschuttschicht dem Oberboden zu. Allerdings tritt das Sickerwasser vor Erreichen der Dammsohle vom Oberboden in den Dammbaustoff ein.

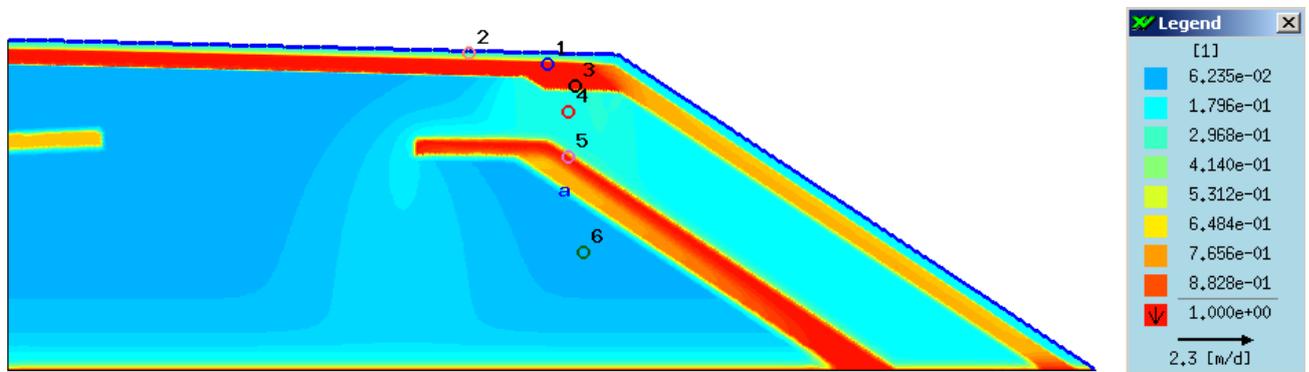


Abbildung 6.31: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell A2a_9.4 nach 190 Tagen

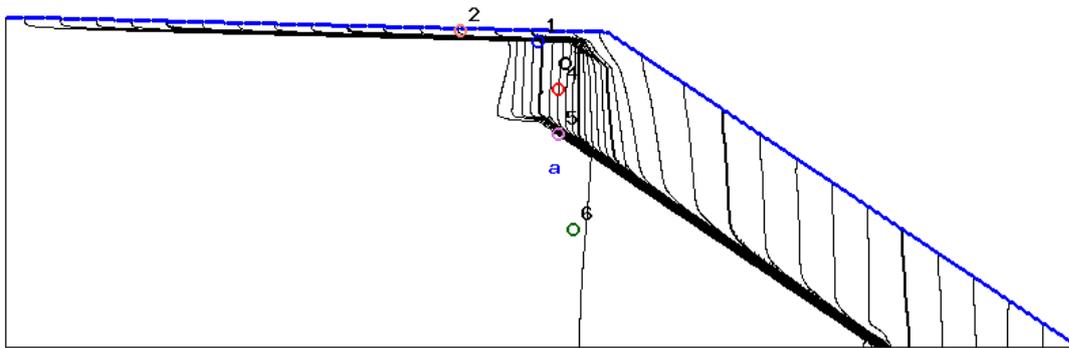


Abbildung 6.32: Strömungslinien im Modell A2a_9.4 nach 190 Tagen

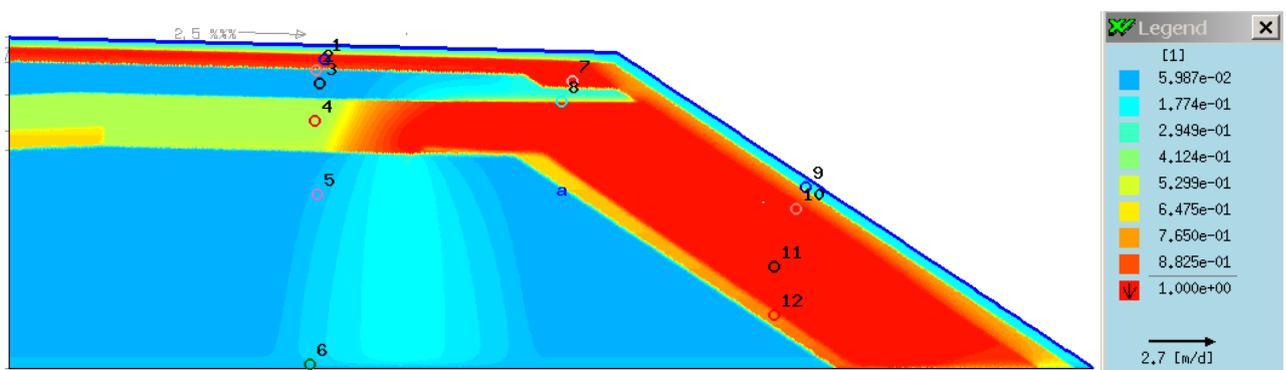


Abbildung 6.33: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell A2b-1_9.4 nach 65 Tagen

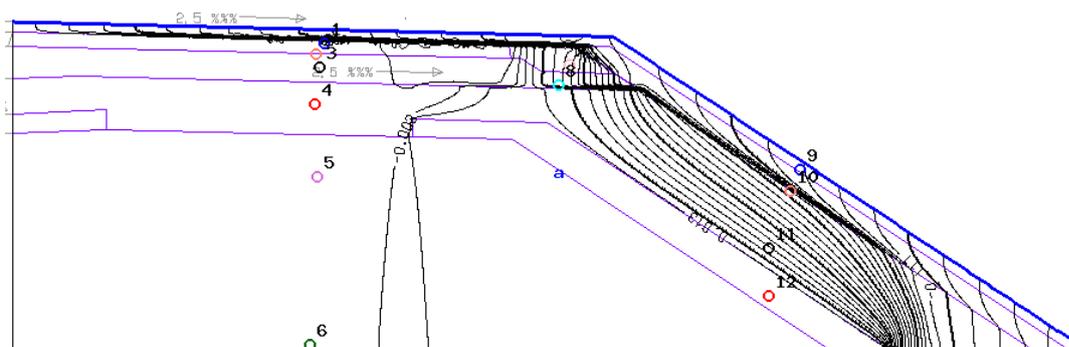


Abbildung 6.34: Strömungslinien im Modell A2b-1_9.4 nach 65 Tagen

6.2.6 Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 23,5 mm/d

Mit einem simulierten Niederschlag von 23,5 mm/d im Kronenbereich bzw. 19,55 mm/d auf der Böschung wurden Berechnungen für die Modelle A2a und A2b durchgeführt. Mit einem zeitlich vertretbaren Rechenaufwand konnte dabei jedoch für Modell A2a_23.5 kein stationärer Fließzustand erreicht werden.

In Abbildung 6.35 sind jeweils der Infiltrationsverlauf in das Kernmaterial und für Modell A2b_23.5 auch die Ausflussmengen aus dem Buml über die Zeit dargestellt. Wie bereits bei den Be-

rechnungen, die mit den geringeren Niederschlägen 2,35 mm/d und 9,4 mm/d durchgeführt wurden, übersteigt die Infiltrationsmenge in den Kern bei Modell A2b_23.5 die bei Modell A2a_23.5 anfallende Menge um ein Vielfaches. Ursächlich hierfür sind wie bereits in Abschnitt 0 beschrieben die Eigenschaften des dem Dammbaustoff zugrunde gelegten Materials. Nach etwa 40 Tagen stellt sich ein stationärer Fließzustand im BumI für das Modell A2b_23.5 ein; das heißt, die Infiltration in den BumI und der Ausfluss aus dem BumI sind gleich groß.

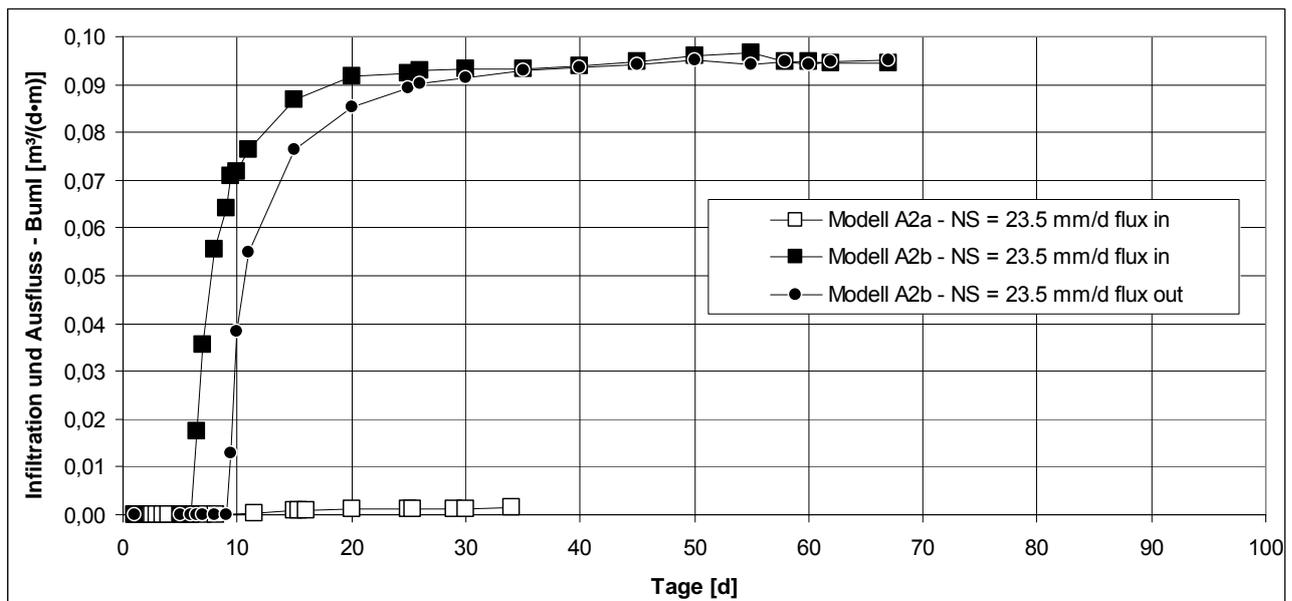


Abbildung 6.35: Infiltration in BumI für die Modelle A2a und A2b bei einem Niederschlag von 23,5 mm/d

In Abbildung 6.36 ist die Verteilung des Sättigungsgrades für das Modell A2a_23.5 nach 34 Tagen dargestellt. Es kommt nur zu einer sehr geringen Infiltration des Sickerwassers in den BumI, erkennbar an dem helleren Bereich, der einen etwas höheren Sättigungsgrad im Dammkern markiert. Ein Sickerwasseraustritt aus dem BumI findet nach 34 Tagen noch nicht statt. Anhand der Strömungslinien aus Abbildung 6.37 ist wiederum deutlich die Drainagewirkung des gut durchlässigen Dammbaustoffes bei Modell A2a erkennbar.

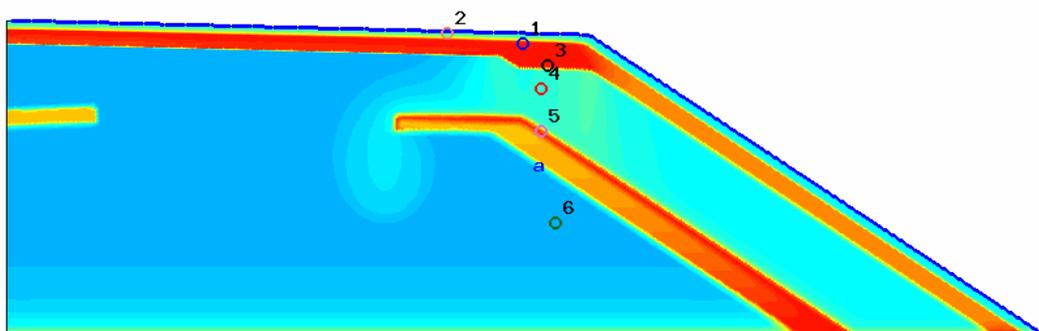


Abbildung 6.36: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell A2a_23.5 nach 34 Tagen

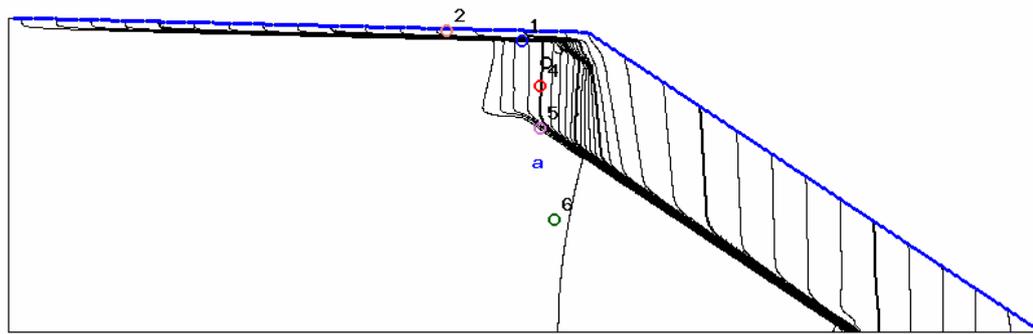


Abbildung 6.37: Strömungslinien im Modell A2a_23.5 nach 34 Tagen

Bei Modell A2b_23.5 hingegen ist – wie bereits bei den Niederschlägen 2,35 mm/d und 9,4 mm/d zu beobachten – eine Wasserabgabe aus dem Dammbaustoff in den BumI im Bereich unterhalb der Fahrbahn deutlich erkennbar (siehe Abbildung 6.38). Das Dammbaumaterial ist zum Berechnungsende nach 67 Tagen in weiten Bereichen bis unter die Asphaltdecke aufgesättigt und gibt Sickerwasser an den BumI ab. Aus dem Strömungsbild in Abbildung 6.39 lässt sich erkennen, dass das aus dem Bankett in der Frostschutzschicht anfallende Sickerwasser zu einem Aufstau in der Frostschutzschicht führt, da der Oberboden und der Dammbaustoff das anfallende Sickerwasser aufgrund ihrer zu geringen Durchlässigkeiten nicht schnell genug abführen können. Unterhalb der Fahrbahn im Bereich hinter der mineralischen Dichtung kommt es dadurch zu einer Durchströmung des Dammbaustoffes und einem anschließenden Wasserzutritt in das Kernmaterial.

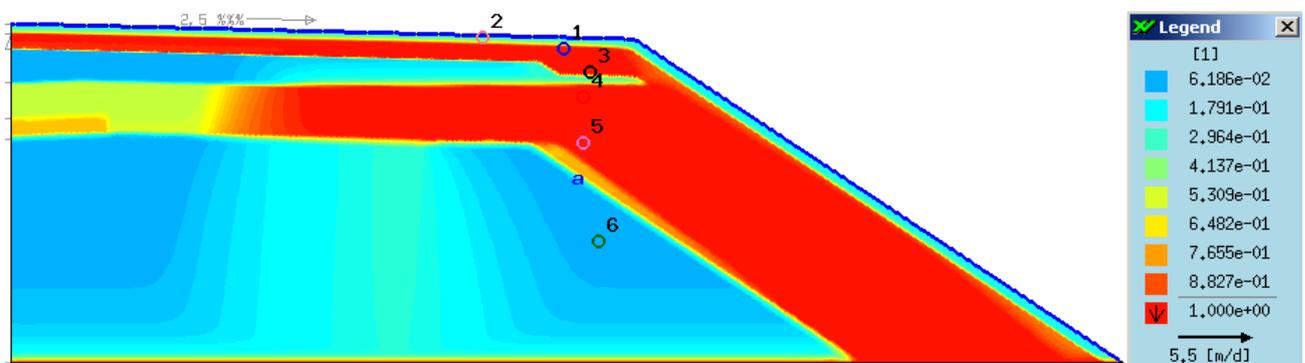


Abbildung 6.38: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell A2b_23.5 nach 67 Tagen

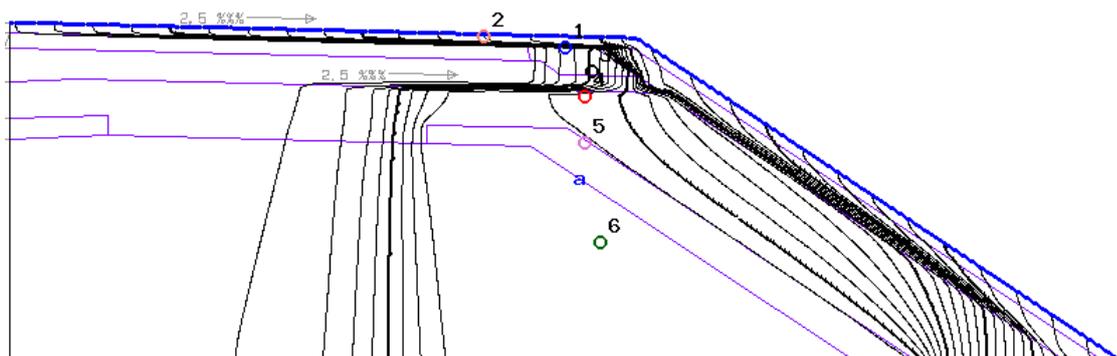


Abbildung 6.39: Strömungslinien im Modell A2b_23.5 nach 67 Tagen

6.2.7 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse – Modell A

In Abbildung 6.40 sind die Infiltrationsverläufe in den BumI für das Modell A2a bei den Niederschlägen 2,35 mm/d, 9,4 mm/d und 23,5 mm/d zusammengestellt. Es zeigt sich zum einen, dass mit zunehmender Niederschlagsintensität die Infiltration in den BumI zeitlich früher einsetzt und zum anderen ist erkennbar, dass die Infiltrationsmengen in den BumI im stationären Fließzustand, auch wenn dieser bei den Niederschlägen von 9,4 mm/d und 23,5 mm/d nicht erreicht wurde, zunehmen. Die Infiltrationsmenge im stationären Fließzustand beträgt bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d etwa $0,001 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ und wird bei einem Niederschlag von 9,4 mm/d etwa bei $0,0013 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ erwartet. Aus einer Extrapolation der Simulationsergebnisse kann die Infiltrationsmenge in den BumI bei einem Niederschlag von 23,5 mm/d etwa zu $0,0018 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ abgeschätzt werden.

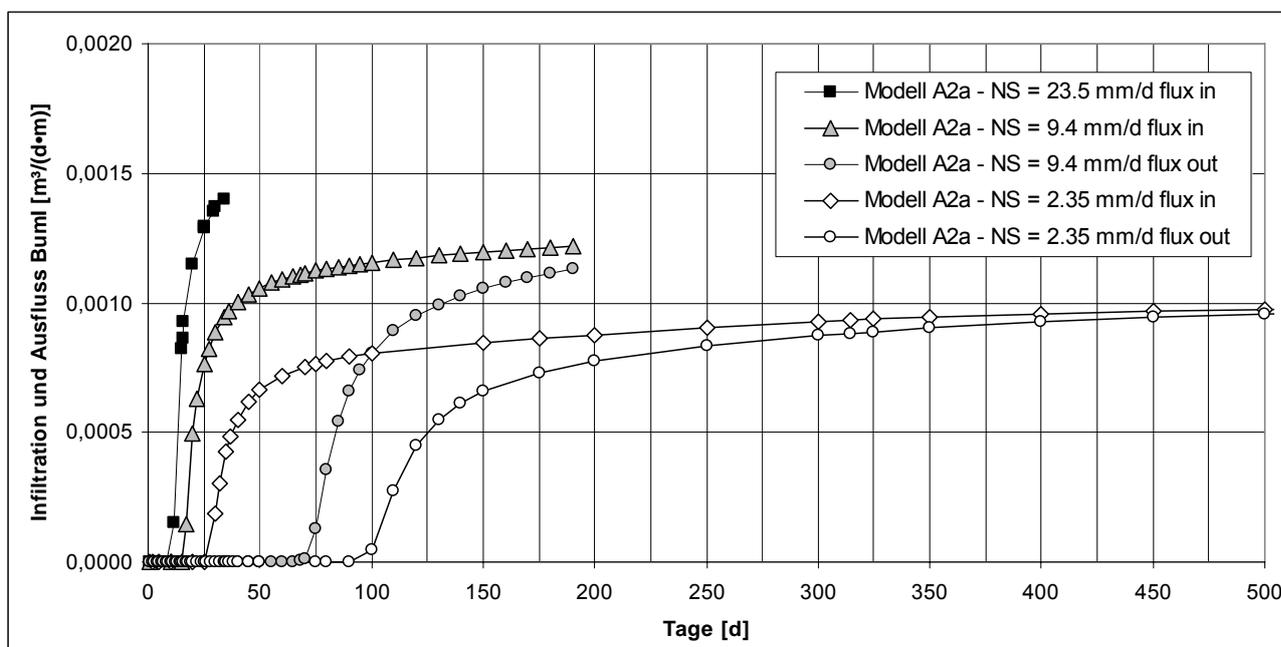


Abbildung 6.40: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für Modell A2a bei den Niederschlägen 2,35 mm/d, 9,4 mm/d und 23,5 mm/d

In Abbildung 6.41 sind die Infiltrationsverläufe in den BumI und die zugehörigen Ausflusskurven aus dem BumI für das Modell A2b bei den Niederschlägen 2,35 mm/d und 23,5 mm/d und für das Modell A2b-1 für den Niederschlag von 9,4 mm/d dargestellt. Wie auch beim Modell A2a setzt die Infiltration in den BumI mit zunehmender Niederschlagsintensität zeitlich früher ein. Im Vergleich zu Modell A2a nehmen die Infiltrationsmengen in den BumI im stationären Zustand mit zunehmendem Niederschlag jedoch überproportional zu. Stationäre Fließzustände wurden für alle drei Niederschlagsintensitäten erreicht. Die Infiltrationsmengen in den BumI betragen dabei etwa $0,004 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ (bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d), etwa $0,01 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ (bei einem Niederschlag von 9,4 mm/d) und bei einem Niederschlag von 23,5 mm/d etwa $0,094 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$. Die vergleichsweise sehr hohen Sickerwassermengen bei Modell A2b_23.5 resultieren aus dem bereits

beschriebenen Aufstau des aus dem Bankett anfallenden Sickerwassers in der Frostschutzschicht. Dadurch kommt es zu einer Durchsickerung des Dammbaustoffes unterhalb der Fahrbahn hinter der mineralischen Dichtungsschicht.

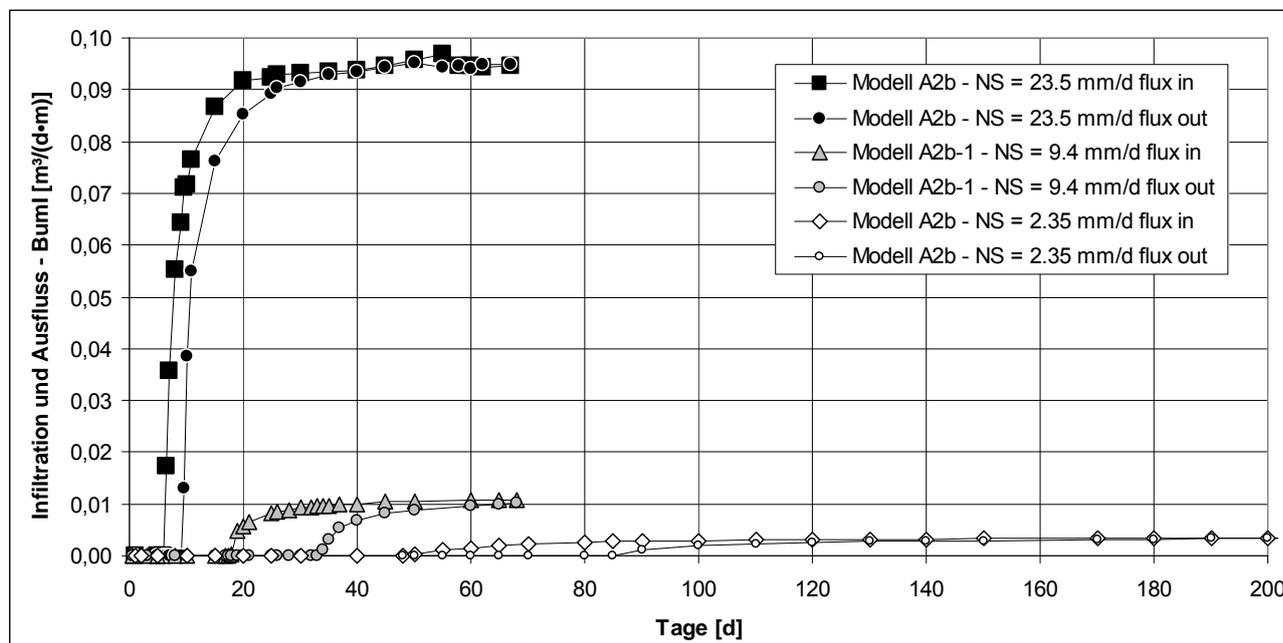


Abbildung 6.41: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für Modell A2b bzw. A2b-1 bei den Niederschlägen 2,35 mm/d, 9,4 mm/d und 23,5 mm/d

Wird die in den BumI einströmenden Sickerwassermengen auf den Gesamtniederschlag bezogen, so ergibt sich die Darstellung in Abbildung 6.42. Es zeigt sich, dass bei Einbau eines grobkörnigen, gut durchlässigen Dammbaustoffes wie im Modell A2a simuliert nur sehr geringe Sickerwassermengen in den BumI infiltrieren. Die in den BumI einströmende Sickerwassermenge beträgt bei einem dauerhaften Niederschlag von 2,35 mm/d dabei etwa 2,5 % des Niederschlages und nimmt mit zunehmender Niederschlagsintensität auf ca. 1 % (bei 9,4 mm/d Niederschlag) bzw. 0,5 % (bei 23,5 mm/d Niederschlag) ab. Anders stellt sich dies für das Modell A2b dar. Infolge von Kapillarspannungen nimmt der in Modell A2b als stark schluffiger Sand simulierte Dammbaustoff Sickerwasser aus der Frostschutzschicht auf und gibt dieses im Bereich unterhalb der Fahrbahn, in dem keine Dichtungsschicht aufgebracht ist, an den BumI ab. Allerdings setzt dieser Prozess einen Aufsättigungsvorgang des Dammbaustoffes voraus. Die Dauer der Aufsättigung und die Größe des aufgesättigten Bereiches hängen dabei von der Niederschlagsintensität ab. Im Falle eines dauerhaften Niederschlages von 2,35 mm/d stellt sich im stationären Fließzustand eine Wasserabgabe in den BumI von etwa 10 % des Niederschlages ein. Bei dem kontinuierlich hohen Niederschlag von 23,5 mm/d kommt es neben der Aufsättigung weiter Bereiche des Dammbaustoffes bis unter die Asphaltsschicht auch zu einem Aufstau des aus dem Bankett einströmenden Sickerwassers in der Frostschutzschicht bis unter die Fahrbahn, was eine relativ große Wasserabgabe an den BumI mit sich bringt. Dadurch steigen die in den BumI infiltrierenden Wassermengen bei einem konstanten Niederschlag von 23,5 mm/d überproportional stark auf etwa 25 % der Gesamtniederschlagsmenge an (siehe Modell A2b in Abbildung 6.42).

Im Hinblick auf die in den BumI infiltrierende Wassermenge ist die Durchströmung der Dichtungsschicht bei beiden Modellen im Vergleich zur Sickerwasserabgabe aus dem Dammbaustoff ver-

nachlässigbar klein. In Anlage 1.1, Blatt 1 bis 7 sind die Berechnungsergebnisse tabellarisch aufgeführt

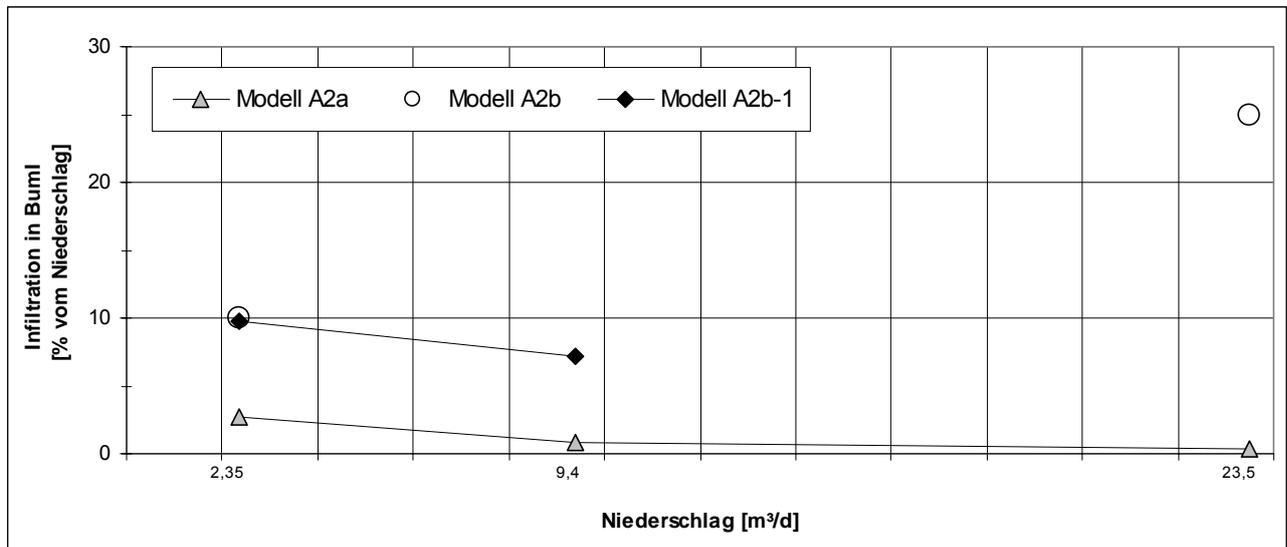


Abbildung 6.42: auf den Niederschlag bezogene Infiltration in BumI in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge bei den Modellen A2a, A2b und A2b-1

6.3 Modell B

6.3.1 Modellbildung – Modell B

Die Bauweise B unterscheidet sich von der Bauweise A im Wesentlichen durch die zusätzlich über den witterungsempfindlichen Dichtungselementen gelegene Sickerschicht. Dies erlaubt gemäß M TS E einen im Vergleich zur Bauweise A etwas höheren Durchlässigkeitsbeiwert der witterungsempfindlichen Abdichtung von $k_f \leq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s. Außerdem ist an das Dammbaumaterial bei Bauweise B keine ausdrückliche Anforderung mehr gestellt.

Abbildung 6.43 zeigt die für die Berechnungen angepassten Abmessungen des Modells. Der eingefärbte Bereich aus Abbildung 6.44 stellt wie bereits in Abschnitt 5.3 erläutert den in den Berechnungen modellierten Bereich dar.

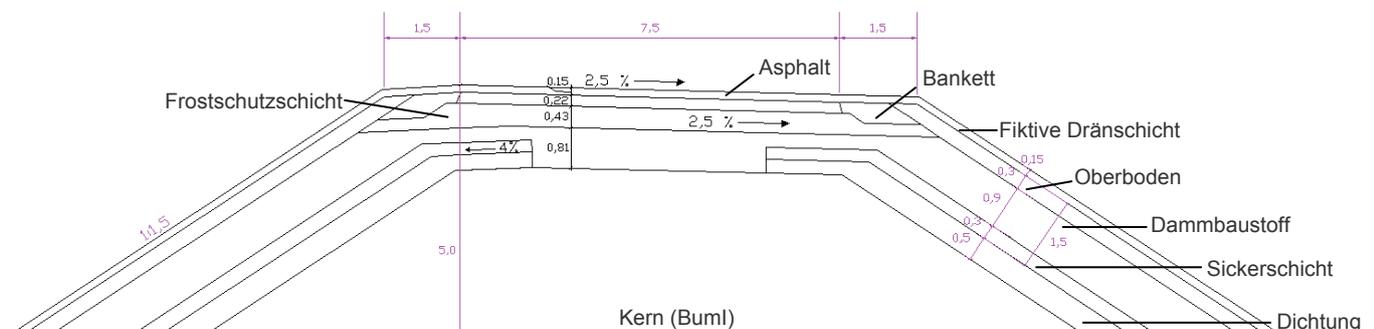


Abbildung 6.43: Bauweise B mit witterungsempfindlichen Dichtungselementen und Sickerschicht - Modellierung

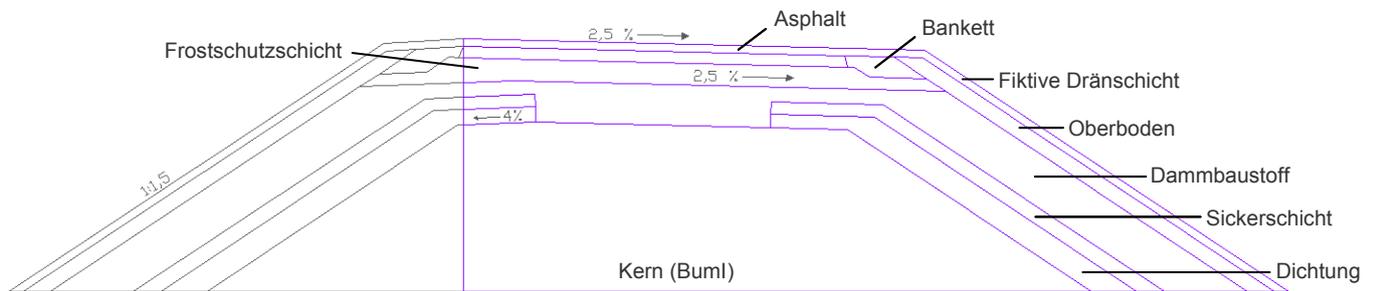


Abbildung 6.44: Bauweise B mit witterungsempfindlichen Dichtungselementen und Sickerschicht - Modellgeometrie

6.3.2 Anfangs- und Randbedingungen – Modell B

Als Anfangsbedingung wurde beim Modell B2-1 eine im gesamten Modellbereich konstante Potentialhöhe $\psi_h = -1\text{m}$ definiert. Die daraus resultierende Verteilung des Sättigungsgrades ist in Abbildung 6.45 dargestellt. Als Unterschied zu Bauweise A lässt sich darin deutlich die blau eingefärbte, und damit einen geringen Sättigungsgrad aufweisende Sickerschicht oberhalb der Abdichtung erkennen.

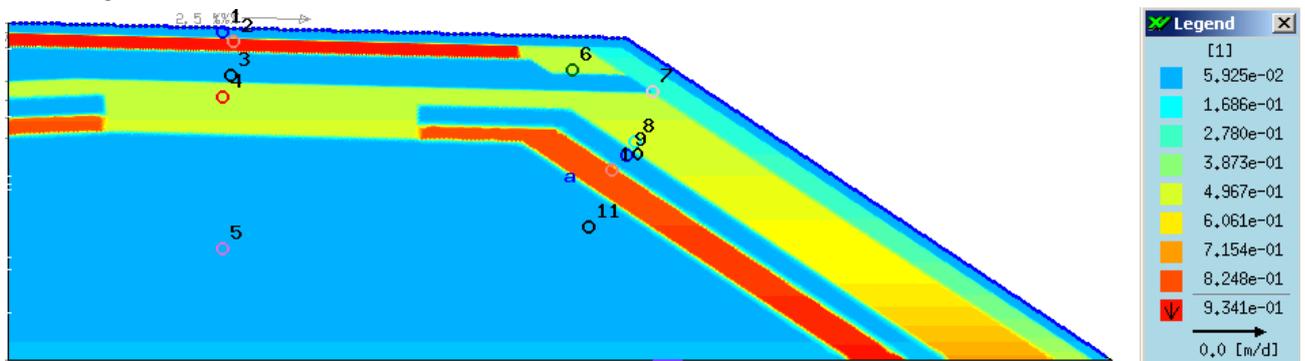


Abbildung 6.45: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell B2-1

Als Randbedingung wurde beim Modell B2-1 an der Modellunterseite das hydraulische Potential $\psi_h = -1\text{ m}$ definiert.

Am oberen Modellrand wurden die Niederschläge 2,35 mm/d und 9,4 mm/d definiert. Die Berechnungsdauern für beide Simulationen können der nachfolgenden Tabelle 6.14 entnommen werden. Die Berechnung mit einem Niederschlag von 2,35 mm/d wurde bis zu einer Dauer von 560 Tagen durchgeführt. Dabei wurden näherungsweise stationäre Fließzustände erreicht. Dagegen musste die Berechnung mit einem Niederschlag von 9,4 mm/d aufgrund des enormen Rechenaufwandes bei einer simulierten Dauer von 104 Tagen nach einer Rechenzeit von ca. 4 Wochen abgebrochen werden, obwohl bis dahin keine stationären Fließzustände erreicht worden sind. Der extrem hohe Rechenaufwand resultiert aus dem mehrschichtigen Aufbau des Modells, bei dem sich gering durchlässige (Dichtungsschicht / Dammbaustoff) mit vergleichsweise stark durchlässigen Schichten (Frostschuttschicht / Sickerschicht) abwechseln. Da die Rechenzeit mit zu-

nehmendem Niederschlag stark zunimmt, musste auf eine Berechnung mit einem simulierten Niederschlag von 23,5 mm/d verzichtet werden.

Modell \ Niederschlag	2,35	9,4	23,5
	[mm/d]	[mm/d]	[mm/d]
Modell B2-1	560 d	104 d	-

Tabelle 6.14: Übersicht über die untersuchten Berechnungsdauern in Tagen für die einzelnen Modelle der Bauweise A

6.3.3 Bodenkennwerte – Modell B

Für die Bauweise B wurde nur das Modell B2-1 mit den in Tabelle 6.15 angegebenen Bodenkennwerten der unterschiedlichen Schichten untersucht.

Modell B2-1	fiktive Dränschicht / FrostSS	Asphalt	Bankett	Oberboden	Dammbaustoff	Sickerschicht	Dichtung	Buml	Potentialhöhe ψ_h [m]
DIN 18196	GU	TA	SU*	SU / SU*	SU*	GU	TL	GU	-1
Kurzbezeichnung	Ekblad 0.4	Tinjum F	Su3	Su2	Su3	Ekblad 0.4	Tinjum M	Ekblad 0.4	
k_r -Wert [m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-3}$	
S_s	1	1	1	1	1	1	1	1	
S_r	0,05	0,00	0,00	0,05	0,00	0,05	0,00	0,05	
A [m ⁻¹]	46	0,322	2,6	6,8	2,6	46	1,76	46	
n	1,79	1,07	1,28	1,43	1,28	1,79	1,089	1,79	
$m = 1 - (1/n)$	0,44	0,07	0,22	0,30	0,22	0,44	0,08	0,44	
Porenanteil	0,23	0,35	0,36	0,38	0,36	0,23	0,34	0,23	

Tabelle 6.15: Bodenkennwerte des Modells B2-1

6.3.4 Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d

Die Berechnung für das Modell B2-1 mit dem im Kronenbereich angesetzten Niederschlag von 2,35 mm/d bzw. dem auf die Böschung aufgebrauchten Niederschlag von 1,955 mm/d wurde nach 560 Tagen abgebrochen. Aus Abbildung 6.46 geht hervor, dass die Infiltration des Sickerwassers in den Buml nach etwa 58 Tagen einsetzt. Die Infiltrationsmenge nimmt im zeitlichen Verlauf ab, hat aber bis zum Berechnungsende bei 560 Tagen noch keinen konstanten Wert angenommen. Sickerwasser tritt erstmals nach ca. 200 Tagen an der Unterseite des Dammes aus. Die Kurve für den Sickerwasserausfluss zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die infiltrierende Wassermenge. Sie nimmt im zeitlichen Verlauf ab und nähert sich dabei der Infiltrationskurve an. Zum Ende der Berechnung nach 560 Tagen liegt sie zwar noch etwas unterhalb der Infiltrationskurve, jedoch haben sich die Kurven schon so weit angenähert, dass näherungsweise von stationären Fließzuständen ausgegangen werden kann.

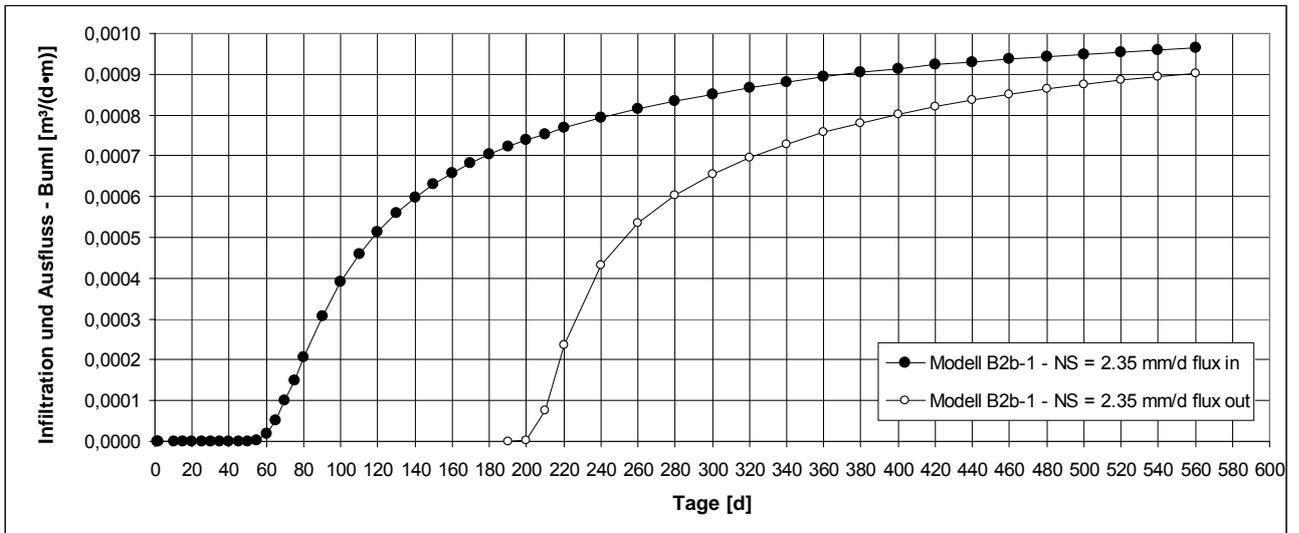


Abbildung 6.46: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für Modell B2-1 bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d

Abbildung 6.47 zeigt die Verteilung des Sättigungsgrades im Modell B2-1 bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d nach 560 Tagen. Das als stark schluffiger Sand (Su3) modellierte Dammbaumaterial nimmt aufgrund von Kapillarspannungen Wasser auch im Bereich unterhalb der Fahrbahn auf und gibt dort Sickerwasser an den als Kies modellierten BumI ab. Im BumI bildet sich entsprechend vom Eintrittspunkt des Sickerwassers bis zum Austrittsbereich an der Unterseite eine Zone mit erhöhtem Sättigungsgrad aus – zu erkennen an der hellblauen Einfärbung.

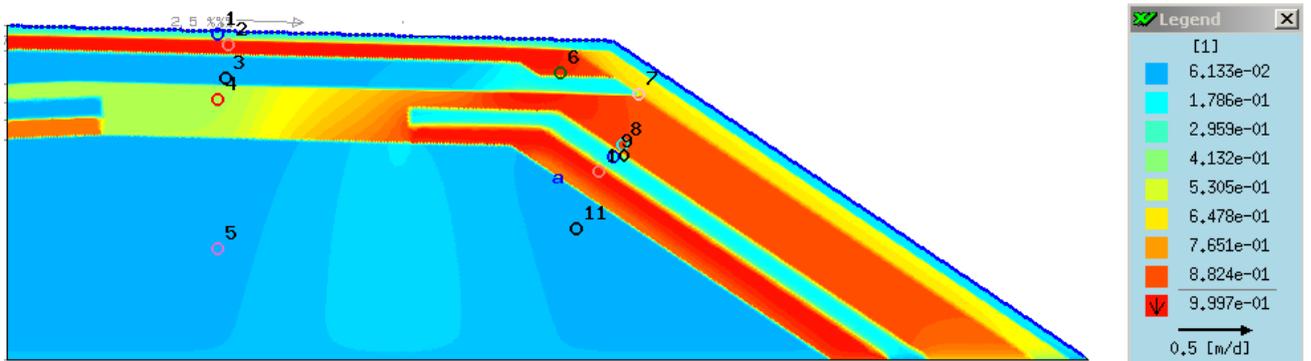


Abbildung 6.47: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell B2-1_2.35 nach 560 Tagen

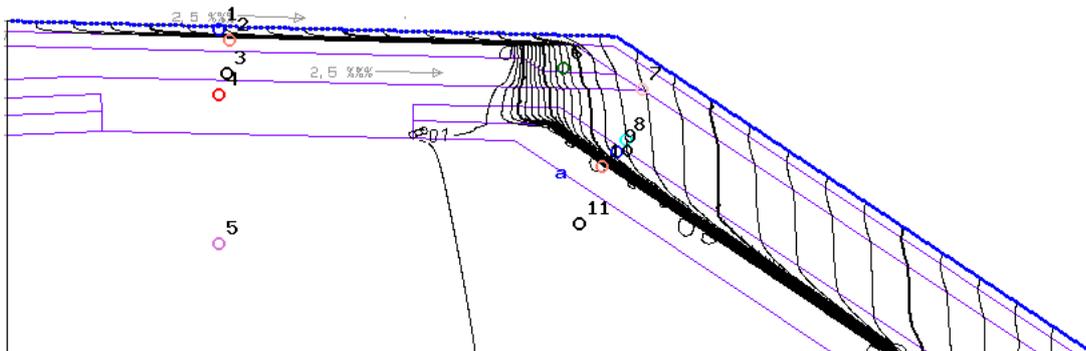


Abbildung 6.48: Strömungslinien im Modell B2-1_2.35 nach 560 Tagen

Anhand der Strömungslinien in Abbildung 6.48 ist der Abfluss des Sickerwassers in der über der Dichtung liegenden Dränschicht deutlich zu erkennen. Der aufgebrauchte Niederschlag durchsickert das Bankett, den Oberboden und das Dammbaumaterial und wird dann in der Sickerschicht abgeführt.

6.3.5 Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 9,4 mm/d

Die Berechnung für das Modell B2-1 bei einem Niederschlag von 9,4 mm/d im Kronenbereich bzw. von 7,82 mm/d auf der Böschung wurde wegen sehr hoher Rechenzeiten nach 104 Tagen abgebrochen. Zu diesem Zeitpunkt haben sich im Modell noch keine stationären Verhältnisse eingestellt. Die Infiltrationskurve in Abbildung 6.49 zeigt einen im zeitlichen Verlauf abnehmenden Anstieg der in den Kern infiltrierenden Wassermenge. Innerhalb der berechneten Zeitspanne von 104 Tagen kommt es nicht zu einem Ausfluss von Sickerwasser aus dem Dammkern. Wie die Verteilung des Sättigungsgrades aus Abbildung 6.50 zeigt, hat die Zone mit erhöhtem Sättigungsgrad im Bum1 – zu erkennen an der hellblauen Einfärbung – die Dammschle nach 104 Tagen noch nicht erreicht.

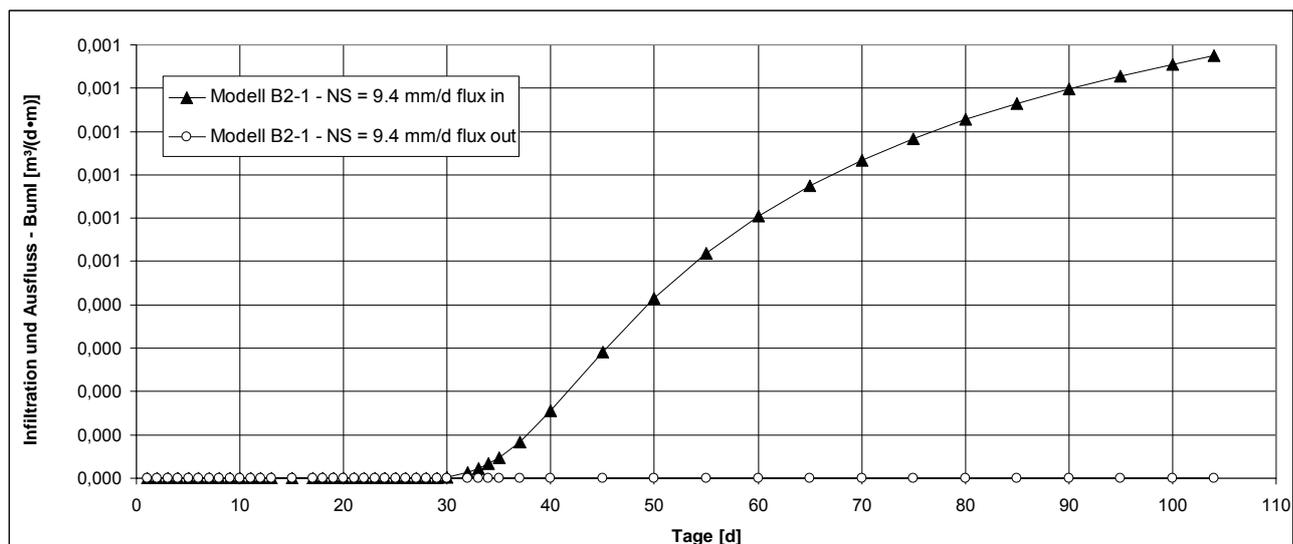


Abbildung 6.49 Infiltration in Bum1 und Ausfluss aus Bum1 für Modell B2-1 bei einem Niederschlag von 9,4 mm/d

In Abbildung 6.51 sind für das Modell B2-1_9.4 die Strömungslinien nach 100 Tagen dargestellt. Deutlich ist der Abfluss des Sickerwassers in der über der Dichtung liegenden Sickerschicht zu erkennen. Im Bereich der Frostschuttschicht unterhalb des Banketts kommt es ähnlich wie bei der Bauweise A bei dem simulierten Niederschlag von 9,4 mm/d zu einer Sickerströmung in Richtung des Oberbodens. Aufgrund seiner geringen Durchlässigkeit kann der Sand im Dammbaumaterial nicht die gesamte aus dem Bankett in die Frostschuttschicht infiltrierende Wassermenge aufnehmen. Dadurch strömt ein Teil des Sickerwassers in der Frostschuttschicht dem Oberboden zu. Allerdings fließt das Sickerwasser nur kurz unterhalb der Frostschuttschicht aus dem Oberboden in den Dammbaumaterial.

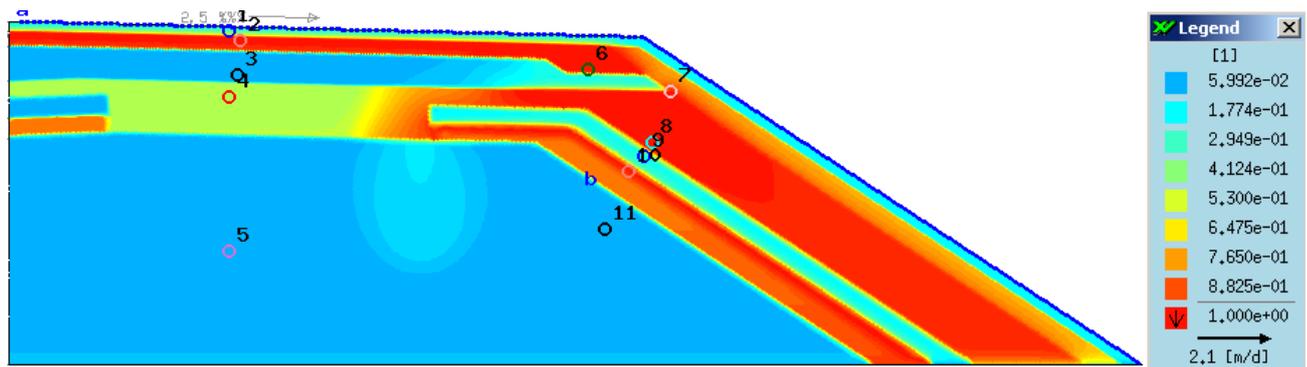


Abbildung 6.50: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell B2-1_9.4 nach 100 Tagen

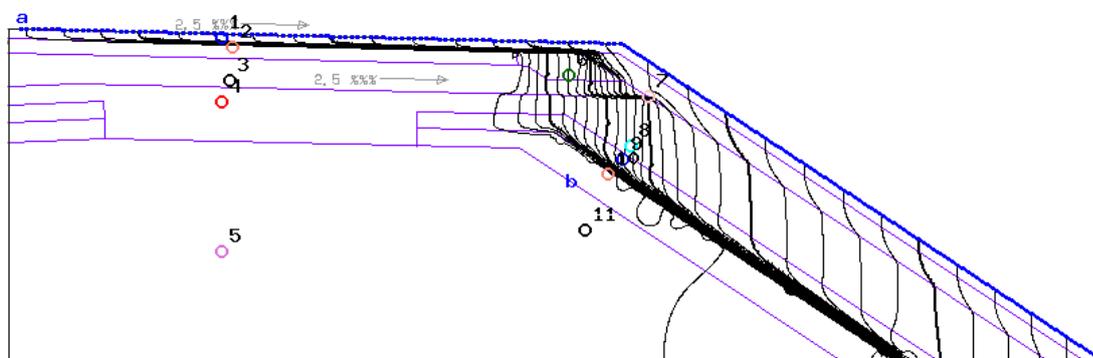


Abbildung 6.51: Strömungslinien im Modell B2-1_9.4 nach 100 Tagen

6.3.6 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse – Modell B

In Abbildung 6.52 sind die Infiltrationsverläufe in den BumI für das Modell B2-1 bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d und 9,4 mm/d dargestellt. Es zeigt sich zum einen, dass mit zunehmender Niederschlagsintensität die Infiltration in den BumI zeitlich früher einsetzt. Zum anderen ist erkennbar, dass die im stationären Fließzustand erwarteten Infiltrationsmengen in den BumI bei steigender Niederschlagsintensität zunehmen. Ein stationärer Fließzustand wurde näherungsweise nur bei einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d erreicht. Die sich dabei einstellende Infiltrationsmenge in den BumI beträgt etwa 0,001 m³/(d•m). Bei einem Niederschlag von 9,4 mm/d kann unter der Annahme, dass sich der zeitliche Verlauf der Infiltrationskurve ähnlich wie der im Modell B2-1_2.35 einstellen wird, eine Infiltrationsmenge in den BumI von etwa 0,0018 m³/(d•m) abgeschätzt werden.

Werden die in den BumI einströmenden Sickerwassermengen auf den Niederschlag bezogen, so ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle 6.16 aufgeführten Werte.

	Infiltration in BumI [% vom Niederschlag]
Modell B2-1_2.35	2,6
Modell B2-1_9.4	1,1

Tabelle 6.16: Infiltration in BumI in Abhängigkeit vom Niederschlag für die Modelle B2-1_2.35 und B2-1_9.4

Es zeigt sich, dass beim Modell B2-1 nur sehr geringe Wassermengen in den BumI infiltrieren. Für einen aufgebrauchten Niederschlag von 2,35 mm/d beträgt die in den BumI eindringende Sickerwassermenge etwa 2,6 %. Bei einer Niederschlagsmenge von 9,4 mm/d verringert sich die in den BumI infiltrierende Sickerwassermenge auf 1,1 %. In Anlage 1.2, Blatt 1 und 2 sind die Sickerwassermengen bei Berechnungsende aufgeführt.

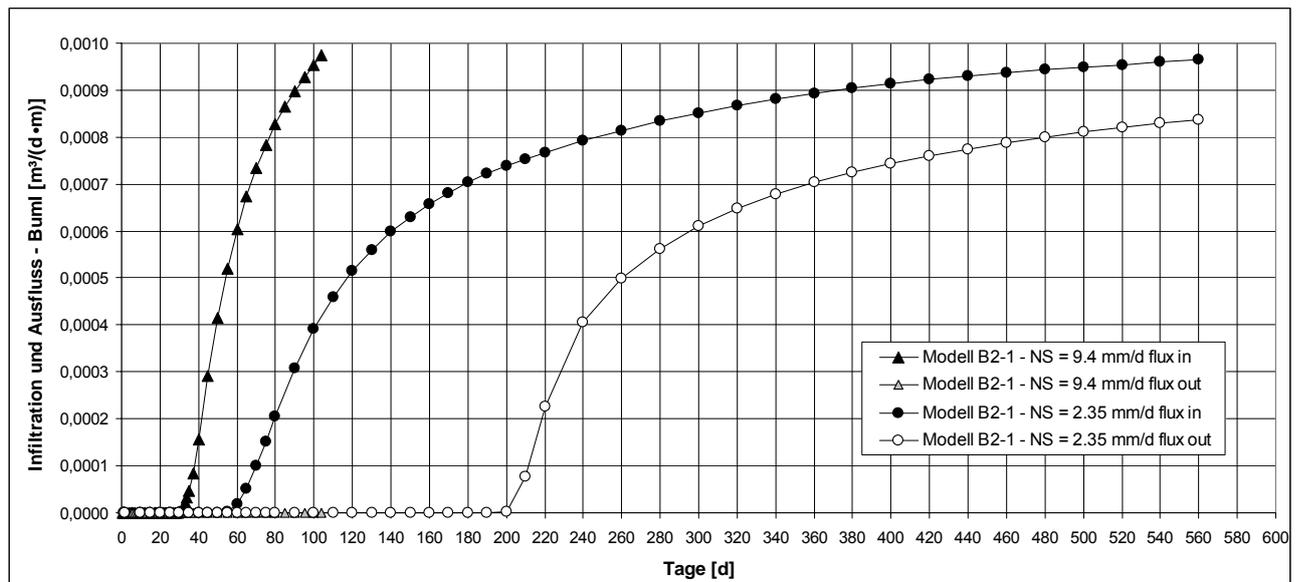


Abbildung 6.52: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für die Modelle B2-1_2.35 und B2-1_9.4

6.4 Modell D

6.4.1 Modellbildung – Modell D

Bei der Bauweise D wird wie bereits in Abschnitt 3.1.4 beschrieben der Boden oder Baustoff mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen nur im Dammkern im Bereich unterhalb der Asphaltsschicht eingebaut. Dabei ist darauf zu achten, dass der seitlich anschließende Dammbaustoff einen mindestens um den Faktor 50 durchlässigeren k_f -Wert besitzt als das Kernmaterial. Das den Berechnungen zugrunde gelegte Modell ist der Abbildung 6.53 zu entnehmen. In Abbildung 6.54 ist violett eingefärbt die Modellgeometrie für die Bauweise D dargestellt.

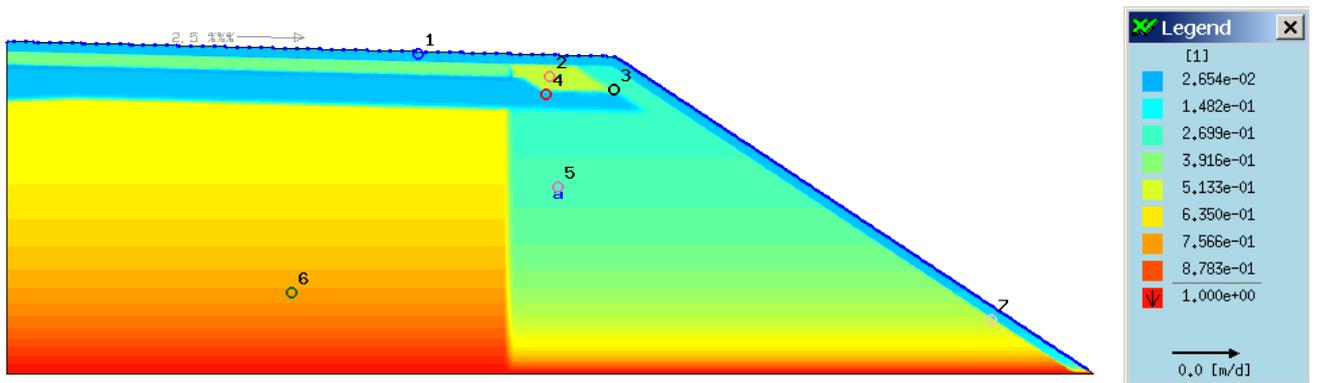


Abbildung 6.55: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell D2a

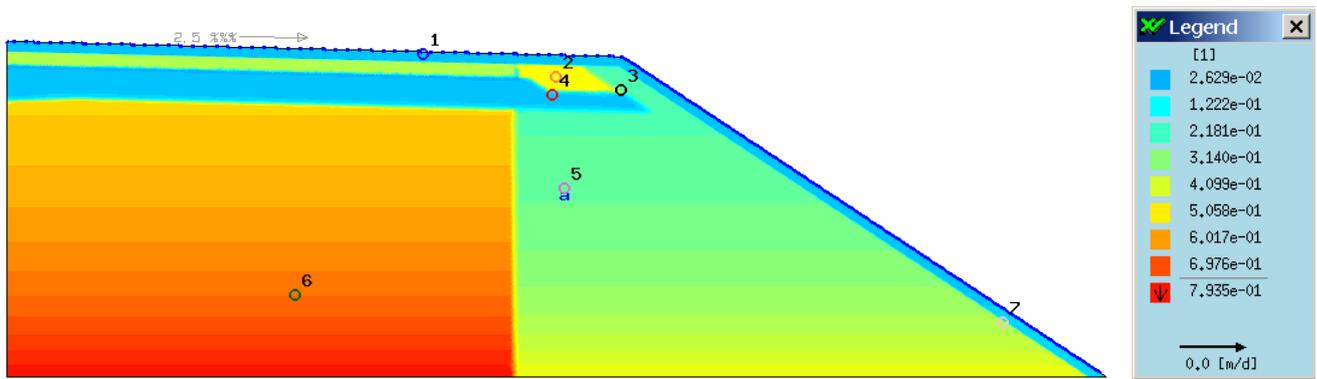


Abbildung 6.56: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell D2a-1

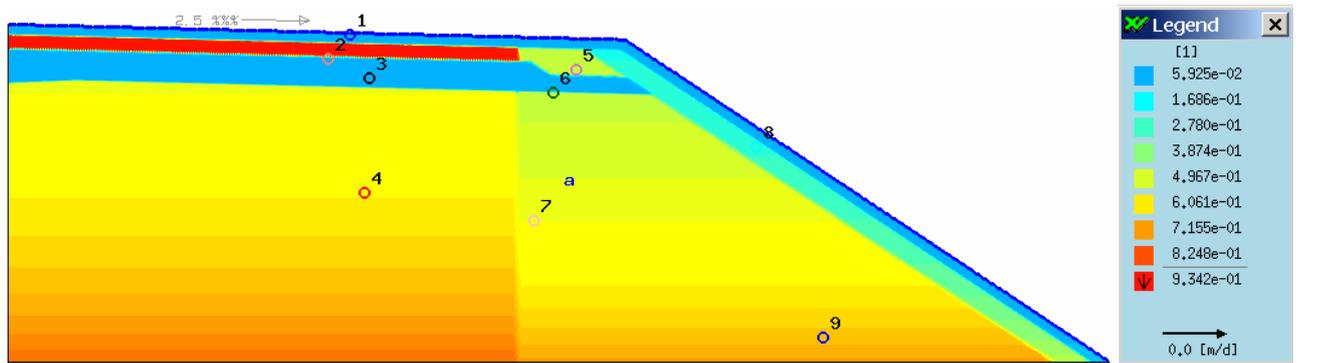


Abbildung 6.57: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell D2b-1

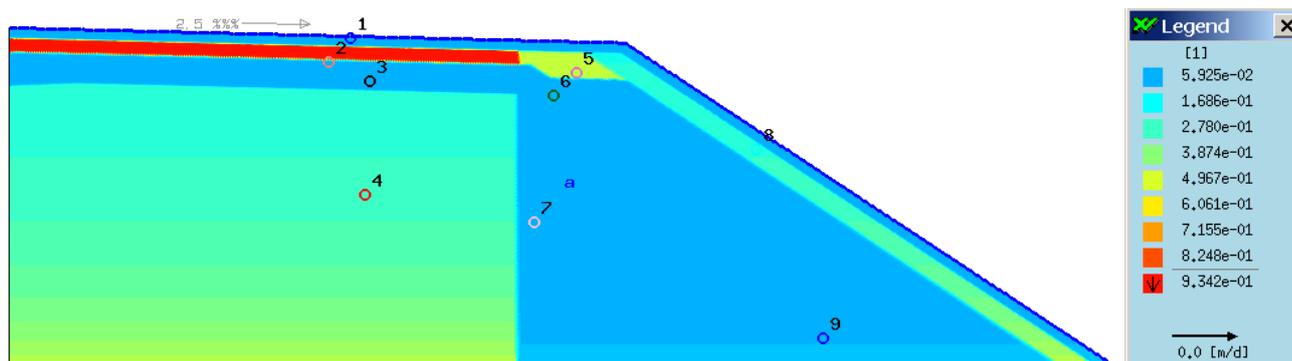


Abbildung 6.58: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell D2c-1

Am oberen Modellrand wurde ein Niederschlag von 2,35 mm/d, 9,4 mm/d bzw. 23,5 mm/d definiert. Die Berechnungen mit einem Niederschlag von 2,35 mm/d konnten bis zum Erreichen des stationären Zustandes durchgeführt werden. Berechnungen mit den Niederschlägen von 9,4 mm/d und 23,5 mm/d wurden aufgrund des großen Rechenaufwandes nur für das Modell D2a-1 durchgeführt. Diese mussten aufgrund der großen Rechenzeiten jedoch vor Erreichen eines stationären Zustandes nach einer simulierten Dauer von 85 bzw. 25 Tagen abgebrochen werden. Die Berechnungszeiträume für die einzelnen Simulationen können der nachfolgenden Tabelle 6.17 entnommen werden.

Niederschlag	2,35 [mm/d]	9,4 [mm/d]	23,5 [mm/d]
Modell D2a	410 d		
Modell D2a-1	750 d	85 d	25 d
Modell D2b-1	1540 d	213 d	
Modell D2c-1	540 d	300 d	

Tabelle 6.17: Übersicht über die untersuchten Berechnungsdauern in Tagen für die einzelnen Modelle der Bauweise D

6.4.3 Bodenkennwerte – Modell D

In Tabelle 6.18 sind die Bodenkennwerte für die Modelle D2a, D2a-1, D2b-1 und D2c-1 zusammengestellt. Die Modelle D2a und D2a-1 wurden mit gleichen Bodeneigenschaften aber mit unterschiedlichen Randbedingungen an der Modellunterseite berechnet (siehe Abschnitt 6.4.2). Dem Stützkörper wurden dabei die Eigenschaften eines schluffigen Sandes (Su2) mit dem Durchlässigkeitsbeiwert $k_f = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s und dem Kernmaterial die eines Su4 mit dem Durchlässigkeitsbeiwert $k_f = 1 \cdot 10^{-7}$ m/s zugrunde gelegt. Die Durchlässigkeit des Dammbaustoffes ist demnach 100-fach größer als die des Bumls.

Die Modelle D2b-1 und D2c-1 weisen das nach M TS E geforderte Mindestverhältnis der Durchlässigkeiten zwischen dem Buml und dem Dammbaustoff von 1 : 50 auf. Im Modell D2b-1 wird das Kernmaterial wie auch im Modell D2a-1 als Su4 modelliert; der Dammbaustoff wurde dabei allerdings als ein Su3 mit einem auf $k_f = 5 \cdot 10^{-6}$ m/s erhöhten Durchlässigkeitsbeiwert angesetzt. Das

Modell D2c-1 wurde mit einem Su2 ($k_f = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s) als Dammbaustoff und einem schwach schluffigen Kies (GU) für den Buml berechnet. Dabei wurde der Durchlässigkeitsbeiwert des Kieses auf $k_f = 5 \cdot 10^{-4}$ m/s herabgesetzt.

		fiktive Drän- schicht / FrostSS	Asphalt	Bankett	Oberboden	Damm- baustoff	Buml	Potentialhöhe ψ_h [m]
Modell D2a / Modell D2a-1	DIN 18196	GU	TA	SU*	SU / SU*	SU / SU*	UL	0 -1
	Kurzbezeichnung	Ekblad 0.4	Tinjum F	Su3	Su2	Su2	Su4	
	k_f -Wert [m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$	
	S_s	1	1	1	1	1	1	
	S_r	0,05	0,00	0,00	0,05	0,05	0,000	
	A [m ⁻¹]	46	0,322	2,6	6,8	6,8	1,67	
	n	1,79	1,07	1,28	1,43	1,43	1,275	
	$m = 1-(1/n)$	0,44	0,07	0,22	0,30	0,30	0,22	
Porenanteil	0,23	0,35	0,36	0,38	0,38	0,37		
Modell D2b-1	DIN 18196	GU	TA	SU*	SU / SU*	SU*	UL	-1
	Kurzbezeichnung	Ekblad 0.4	Tinjum F	Su3	Su2	Su3 mod	Su4	
	k_f -Wert [m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$	
	S_s	1	1	1	1	1	1	
	S_r	0,05	0,00	0,00	0,05	0,00	0,000	
	A [m ⁻¹]	46	0,322	2,6	6,8	2,6	1,67	
	n	1,79	1,07	1,28	1,43	1,28	1,275	
	$m = 1-(1/n)$	0,44	0,07	0,22	0,30	0,22	0,22	
Porenanteil	0,23	0,35	0,36	0,38	0,36	0,37		
Modell D2c-1	DIN 18196	GU	TA	SU*	SU / SU*	GU mod	SU / SU*	-1
	Kurzbezeichnung	Ekblad 0.4	Tinjum F	Su3	Su2	Ekblad 0.4	Su2	
	k_f -Wert [m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	
	S_s	1	1	1	1	1	1	
	S_r	0,05	0,00	0,00	0,05	0,05	0,05	
	A [m ⁻¹]	46	0,322	2,6	6,8	46	6,8	
	n	1,79	1,07	1,28	1,43	1,79	1,43	
	$m = 1-(1/n)$	0,44	0,07	0,22	0,30	0,44	0,30	
Porenanteil	0,23	0,35	0,36	0,38	0,23	0,38		

Tabelle 6.18: Bodenkennwerte der für die Modelle D2a, D2a-1, D2b-1 und D2c-1 verwendeten Materialien

6.4.4 Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d

In der Abbildung 6.59 ist die Infiltration des Sickerwassers in den Dammkern und der zugehörige Ausfluss aus dem Dammkern für die Modelle D2a_2.35 und D2a-1_2.35, die sich nur anhand der Randbedingung an der Modellunterseite unterscheiden, dargestellt. Die Infiltrationskurven zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf. Wenige Tage nach Berechnungsbeginn steigen die Kurven zunächst kontinuierlich auf einen Maximalwert für die in den Kern infiltrierende Sickerwassermenge an. Nach Erreichen dieses Maximums fallen die Infiltrationskurven ab und nähern sich über einen Zeitraum von mehreren Jahren einem konstanten Wert an.

Der Berechnungslauf für Modell D2a-1_2.35 wurde nach 750 Tagen und der für Modell D2a_2.35 nach 410 Tagen beendet. In keinem der beiden Modelle stellt sich ein stationärer Zustand von Zufluss in und Ausfluss aus dem Dammkern ein. Es ist zu erkennen, dass die Infiltrationskurven der beiden Modelle gegeneinander verschoben sind. Infolge der unterschiedlichen Randbedingungen ist das Modell D2a_2.35 mit der Randbedingung $\psi_h = 0$ zum Berechnungsende nach 410 Tagen bereits etwas weiter aufgesättigt als das Modell D2a-1_2.35 zum selben Zeitpunkt.

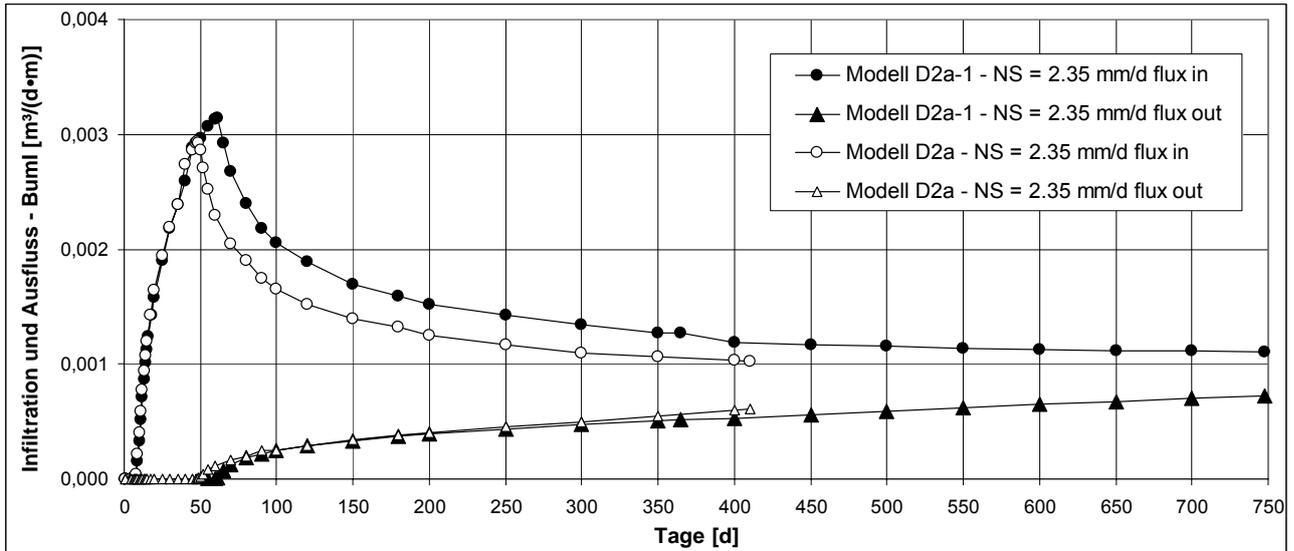


Abbildung 6.59: Infiltration in Buml und Ausfluss aus Buml für die Modelle D2a und D2a-1 bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d

In der Verteilung des Sättigungsgrades für das Modell D2a-1_2.35 nach 750 Tagen in Abbildung 6.62 ist deutlich der aufgesättigte Bereich im Dammkern zu erkennen – rot dargestellt. Dort findet jedoch im Verhältnis zum Dammbaustoff eine nur geringe Durchströmung statt, was aus den Strömungslinien in Abbildung 6.63 hervorgeht. Der größte Anteil des aufgebrachten Niederschlages von 2,35 mm/d versickert im Dammbaustoff. Auch bei Modell D2a_2.35 ist der Bereich des Kerns, der an das Stützmaterial grenzt, wassergesättigt (dargestellt in der Verteilung des Sättigungsgrades nach 410 Tagen in Abbildung 6.60). Es kommt ebenfalls zu einer nur sehr geringen Durchströmung dieser Zone, wie Abbildung 6.61 zeigt.

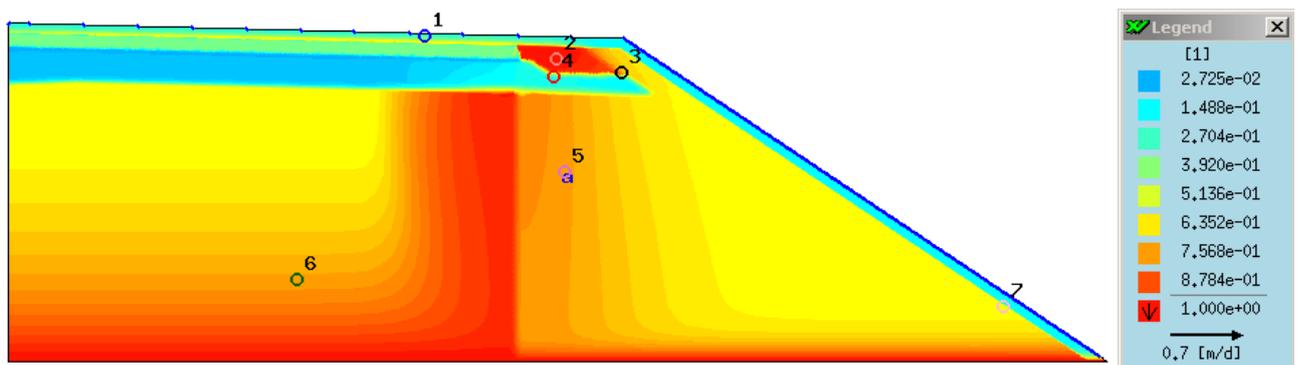


Abbildung 6.60: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell D2a_2.35 nach 410 Tagen

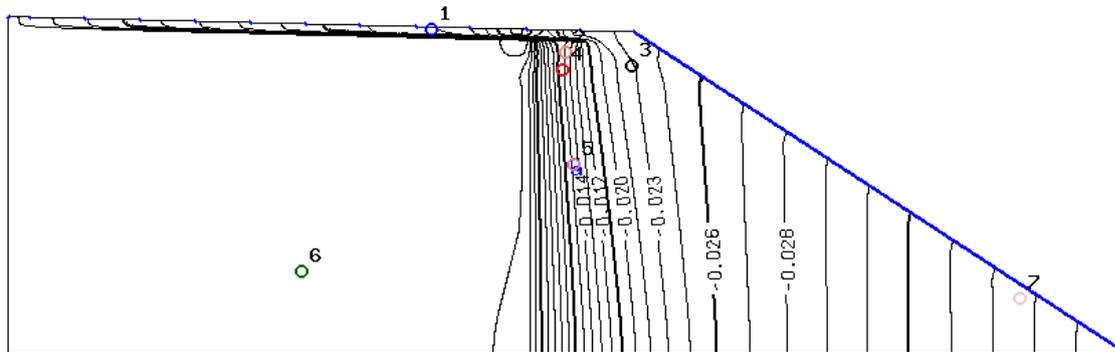


Abbildung 6.61: Strömungslinien im Modell D2a_2.35 nach 410 Tagen

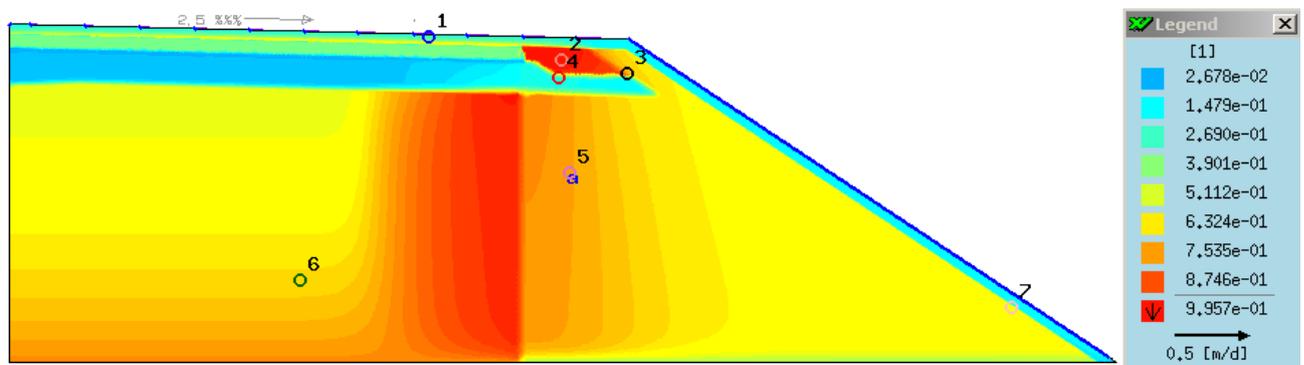


Abbildung 6.62: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell D2a-1_2.35 nach 750 Tagen

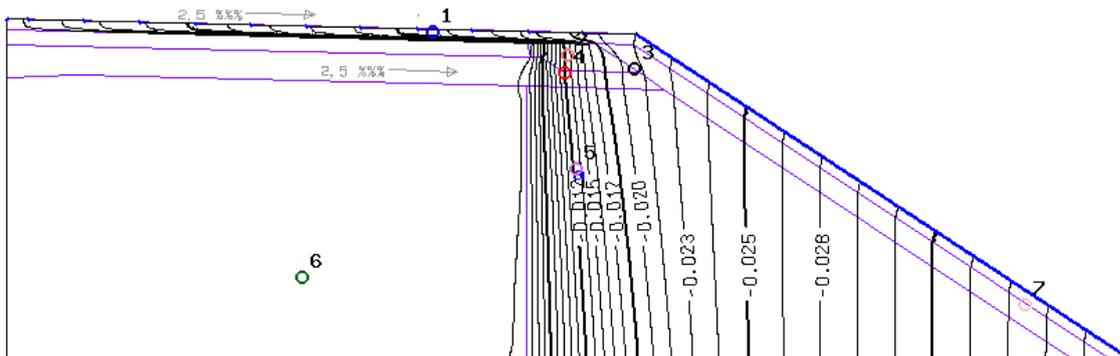


Abbildung 6.63: Strömungslinien im Modell D2a-1_2.35 nach 750 Tagen

In Abbildung 6.64 ist die Infiltration des Sickerwassers in den Dammkern und der zugehörige Ausfluss aus dem Dammkern für die Modelle D2a-1, D2b-1 und D2c-1 für einen Niederschlag von 2,35 mm/d auf den Kronenbereich und einem Niederschlag von 1,955 mm/d auf die Böschung dargestellt. Beim Modell D2c-1 stellt sich nach ca. 500 Tagen ein stationärer Fließzustand, bei dem die in den BumI infiltrierende Wassermenge der aus dem BumI ausströmenden Wassermenge entspricht, ein. Die Infiltrationsmenge beträgt dabei etwa $0,0085 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$.

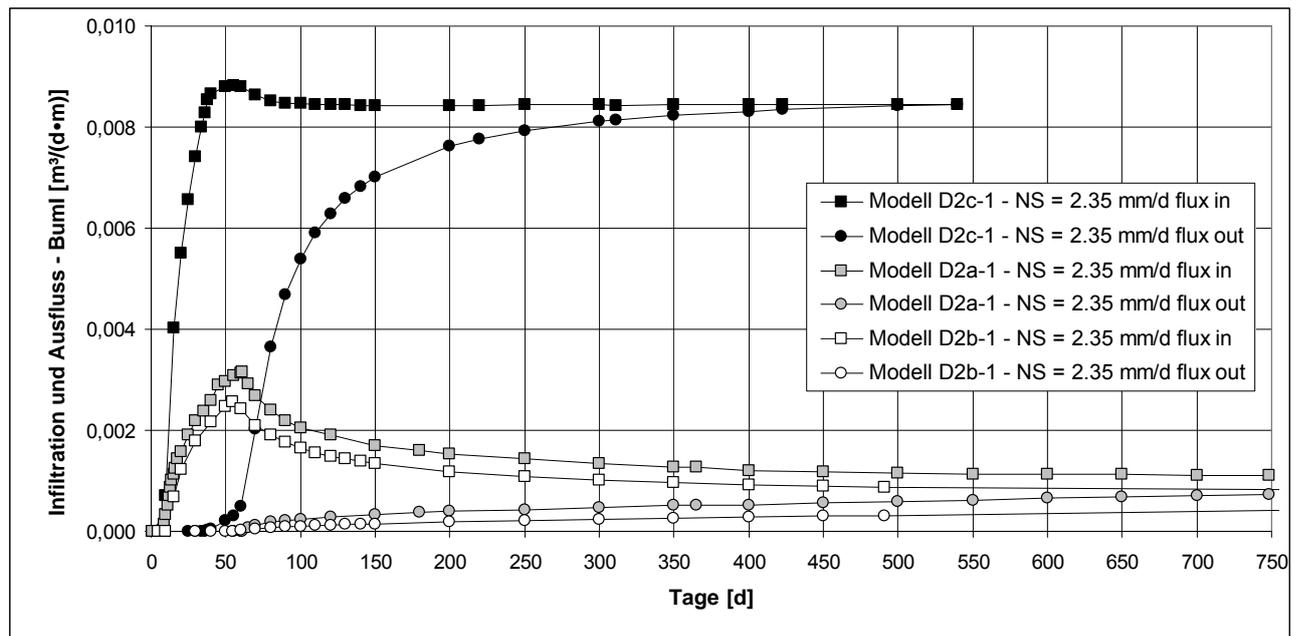


Abbildung 6.64: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für die Modelle D2a-1, D2b-1 und D2c-1 bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d

Die Berechnungen an den Modellen D2a-1_2.35 und D2b-1_2.35 erreichen nach einer simulierten Dauer von 750 bzw. 1540 Tagen immer noch keinen stationären Fließzustand. Es ist aber zu erkennen, dass sich sowohl die Infiltrationskurve als auch die ausströmende Wassermenge einem konstanten Wert annähern. Dieser beträgt für das Modell D2a-1_2.35 etwa $0,0014 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ und für das Modell D2b-1_2.35. etwa $0,0008 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$. Auf den ersten Blick erstaunlich erscheinen die für das Modell D2a-1_2.35 etwas höheren Sickerwassermengen in den BumI als für das Modell D2b-1_2.35. Trotz der geringeren Durchlässigkeit des Dammbaustoffes im Modell D2b-1_2.35 infiltriert weniger Wasser in den Dammkern. Vermutlich ist dies auf die Eigenschaften des im Modell D2b-1_2.35 als Su3 modellierten Dammbaustoffes zurückzuführen, welche einen kapillaren Wassertransport begünstigen.

Die im Vergleich zu den Modellen D2a-1_2.35 und D2b-1_2.35 deutlich größeren Infiltrationsmengen beim Modell D2c-1_2.35 resultieren ebenfalls aus Kapillarspannungseffekten. Der als ein schluffiger Sand modellierte Dammkern nimmt aufgrund von Kapillarspannungen Wasser aus dem gut durchlässigen grobkörnigen Dammbaustoff auf. Begünstigt wird diese Wasseraufnahme durch die aus einem Niederschlag von 2,35 mm/d resultierenden geringen Sickerwassermengen.

In Abbildung 6.65 ist die Verteilung des Sättigungsgrades für das Modell D2b-1_2.35 nach 490 Tagen dargestellt. Es ist ein deutlich erhöhter Sättigungsgrad im Bereich des Dammkerns, der an das Stützmaterial angrenzt, erkennbar. Beim Vergleich von Abbildung 6.65 mit Abbildung 6.60 zeigt sich, dass das im Modell D2b-1_2.35 als Su3 modellierte Stützmaterial zum Berechnungsende einen höheren Sättigungsgrad als der Su2 im Modell D2a-1_2.35 aufweist. Dies beruht ebenfalls im Wesentlichen auf den unterschiedlichen Saugspannungseigenschaften der beiden Materialien.

In Abbildung 6.66 sind die sich zum Berechnungsende beim Modell D2b-1_2.35 einstellenden Strömungslinien dargestellt. Demnach findet nur eine sehr geringe Durchströmung des Dammkerns statt.

Nicht so beim Modell D2c-1_2.35. Hier zeigen die Strömungslinien nach 540 Tagen eine nennenswerte Wasserströmung im Bereich des an den Stützkörper angrenzenden Buml (siehe Abbildung 6.68). Die Verteilung des Sättigungsgrades nach 540 Tagen ist für das Modell D2c-1_2.35 in Abbildung 6.67 dargestellt.

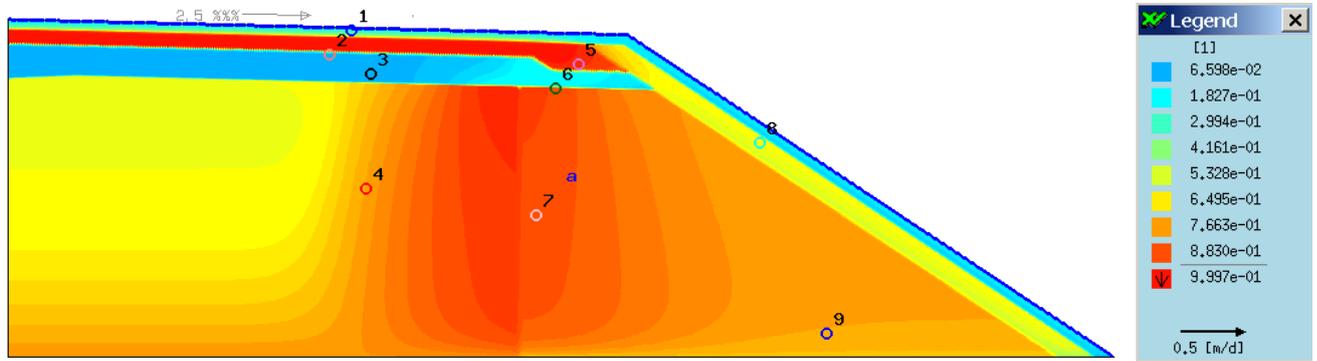


Abbildung 6.65: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell D2b-1_2.35 nach 1540 Tagen

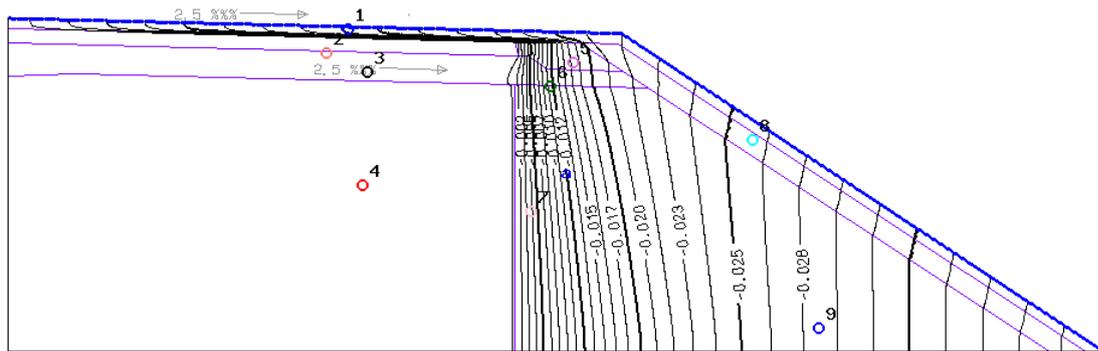


Abbildung 6.66: Strömungslinien im Modell D2b-1_2.35 nach 1540 Tagen

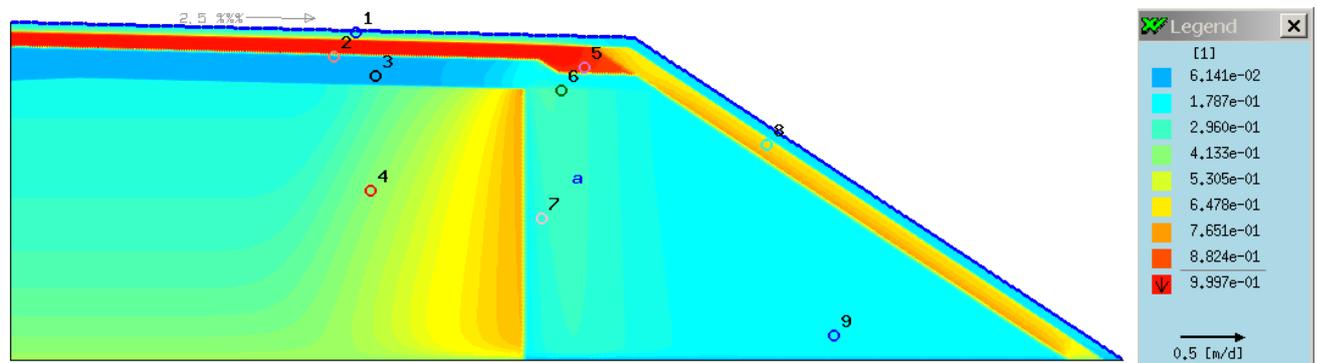


Abbildung 6.67: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell D2c-1_2.35 nach 540 Tagen

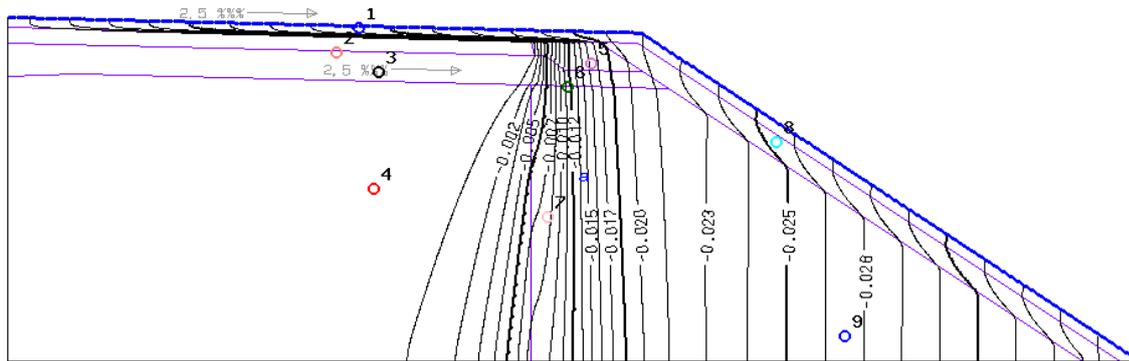


Abbildung 6.68: Strömungslinien im Modell D2c-1_2.35 nach 540 Tagen

6.4.5 Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 9,4 mm/d

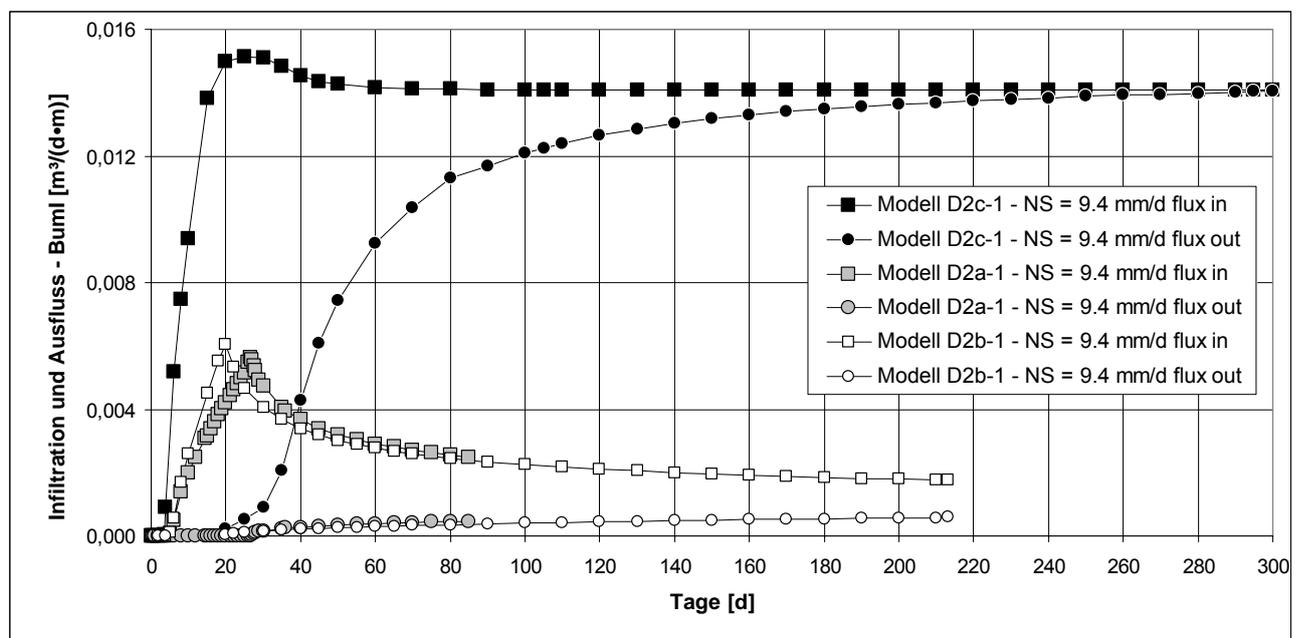


Abbildung 6.69: Infiltration in Buml und Ausfluss aus Buml für die Modelle D2a-1, D2b-1 und D2c-1 bei einem Niederschlag von 9,4 mm/d

Die Abbildung 6.69 zeigt die über die Zeit in den Kern infiltrierende Sickerwassermenge sowie die aus dem Kern ausfließende Sickerwassermenge für die Modelle D2a-1, D2b-1 und D2c-1 bei einem Niederschlag von 9,4 mm/d. Die Berechnungen für die Modelle D2a-1 und D2b-1 konnten in einem vertretbaren Rechenzeitraum nicht bis zum Erreichen eines stationären Fließzustandes geführt werden. Die stationären Infiltrationsmengen werden für die Modelle D2a-1_9.4 und D2b-1_9.4 jeweils bei etwa $0,0015 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ erwartet. Die Berechnungen für Modell D2c-1_9.4 konnten bis zum stationären Fließzustand von den in den Buml einfließenden und ausfließenden Sickerwassermengen durchgeführt werden. Die Sickerwassermenge liegt mit $0,014 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ für Modell D2c-1_9.4 beinahe um das 10-fache höher als für die Modelle D2a-1_9.4 und D2b-1_9.4.

In der in Abbildung 6.70 dargestellten Verteilung des Sättigungsgrades für Modell D2a-1_9.4 ist zu erkennen, dass der als Su4 modellierte Dammkern an der Grenze zum Dammbaustoff nach 85 Tagen vollständig gesättigt ist. Aus den in Abbildung 6.71 dargestellten zugehörigen Strömungslinien ist eine deutliche Wasserbewegung im Bereich des Dammbaustoffes erkennbar. Im Kernmaterial hingegen findet eine Wasserströmung demnach nur in untergeordneter Größe statt.

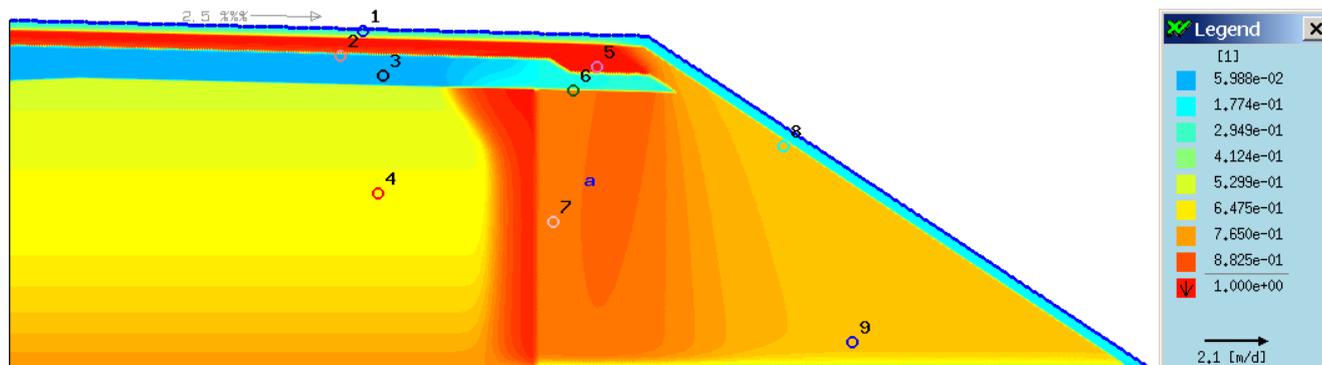


Abbildung 6.70: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell D2a-1_9.4 nach 85 Tagen

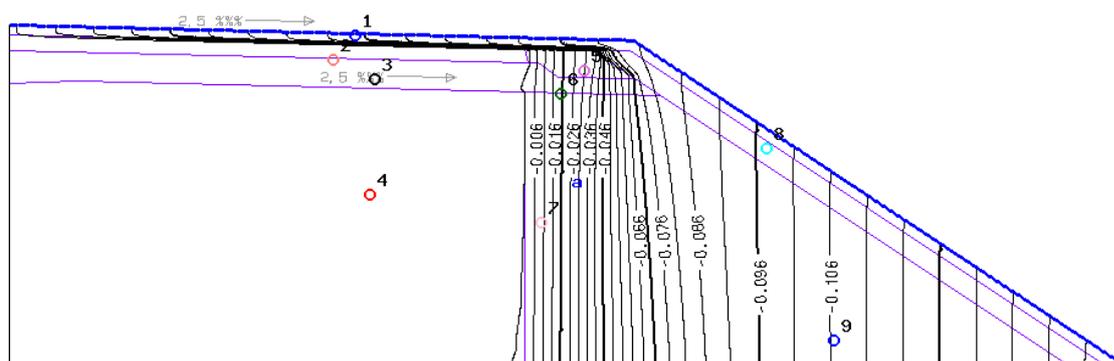


Abbildung 6.71: Strömungslinien im Modell D2a-1_9.4 nach 85 Tagen

Für Modell D2b-1, das sich von Modell D2a-1 nur hinsichtlich der Eigenschaften des Dammbaustoffes unterscheidet, ist die Verteilung des Sättigungsgrades nach 213 Tagen bei einem Niederschlag von 9,4 mm/d in Abbildung 6.72 dargestellt. Die gesättigte Zone im BumI entlang des Dammbaustoffes ist aufgrund der längeren Berechnungszeit weiter ins Kerninnere fortgeschritten als bei Modell D2a-1_9.4. Außerdem ist ein höherer Sättigungsgrad des mit $k_f = 5 \cdot 10^{-6}$ m/s weniger durchlässigen Dammbaustoffes als in Modell D2a-1 ($k_f = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s) zu erkennen. Das Strömungsbild für Modell D2b-1_9.4 in Abbildung 6.73 unterscheidet sich nicht wesentlich vom dem für Modell D2a-1_9.4. In beiden Simulationen ist eine starke Durchströmung des Dammbaustoffes im Bereich unterhalb des Bankettes zu beobachten. Die Wasserbewegung im BumI ist von nachgeordnetem Ausmaß.

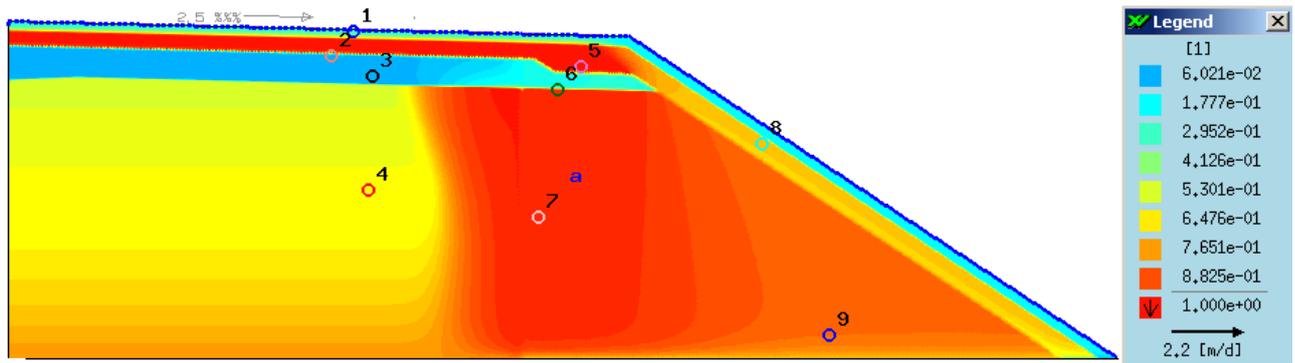


Abbildung 6.72: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell D2b-1_9.4 nach 213 Tagen

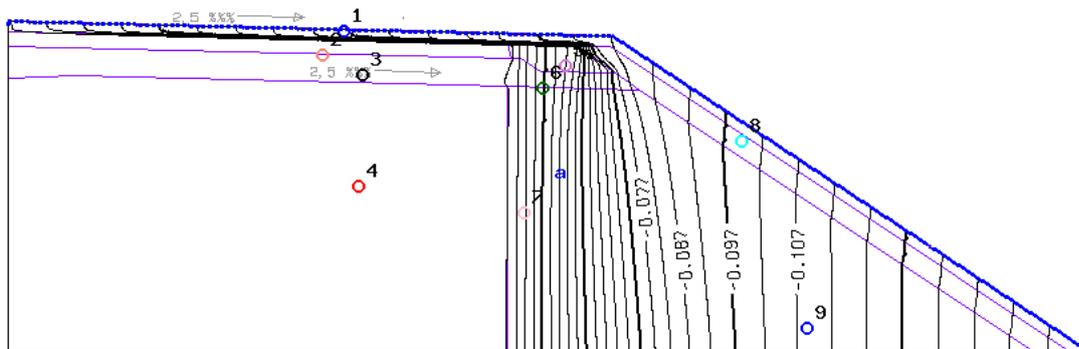


Abbildung 6.73: Strömungslinien im Modell D2b-1_9.4 nach 213 Tagen

Die Verteilung des Sättigungsgrades für das Modell D2c-1_9.4 nach 300 Tagen ist in Abbildung 6.74 dargestellt. Dem Dammbaustoff (Su2) und dem Bum1 (GU mod) wurden in dieser Simulation vergleichsweise hohe Durchlässigkeiten zugeordnet. Die im Vergleich zu den Modellen D2a-1_9.4 und D2b-1_9.4 deutlich größeren Infiltrationsmengen in den Bum1 bei Modell D2c-1_9.4 resultieren aus den bereits in Abschnitt 6.4.4 beschriebenen Kapillarspannungseffekten. Die Strömungslinien in Abbildung 6.75 machen die Durchsickerung des an den Dammbaustoff angrenzenden Bereiches im Bum1 deutlich.

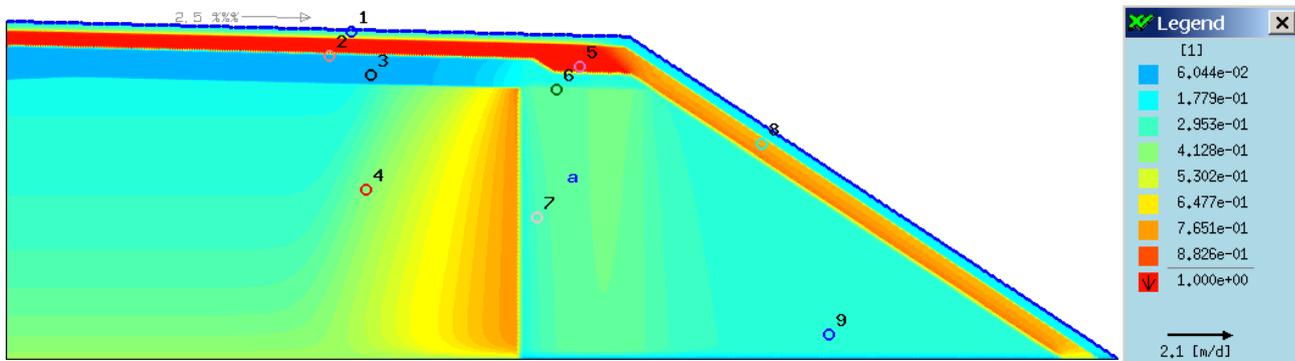


Abbildung 6.74: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell D2c-1_9.4 nach 300 Tagen

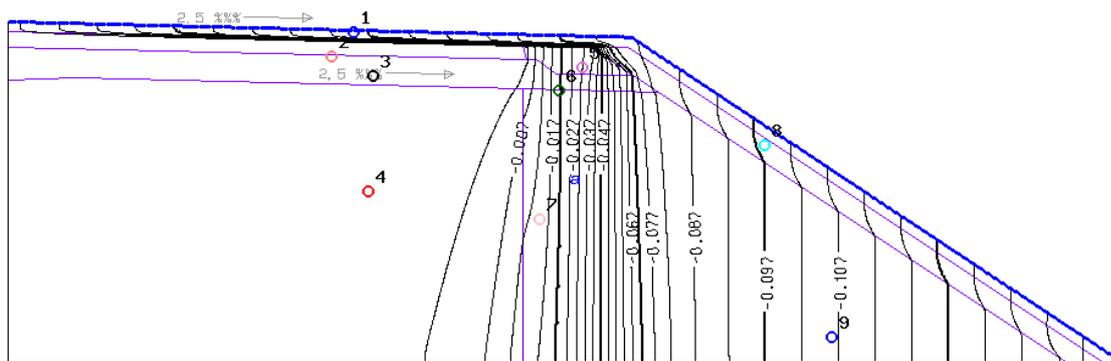


Abbildung 6.75: Strömungslinien im Modell D2c-1_9.4 nach 300 Tagen

6.4.6 Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 23,5 mm/d

Das Modell D2a-1_23.5 wurde mit einem simulierten Niederschlag von 23,5 mm/d im Kronenbereich bzw. 19,55 mm/d auf der Böschung berechnet. Mit einem zeitlich vertretbaren Rechenaufwand konnte dabei jedoch kein stationärer Fließzustand erreicht werden.

In Abbildung 6.76 ist der Infiltrationsverlauf in das Kernmaterial mit zugehörigem Verlauf des Ausflusses aus dem Kernmaterial dargestellt. Unter der Annahme, dass sich die Infiltrationsrate ähnlich wie im Modell D2a-1_9.4 entwickelt, kann die Infiltrationsmenge in den BumI für einen stationären Fließzustand etwa zu $0,0035 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ abgeschätzt werden.

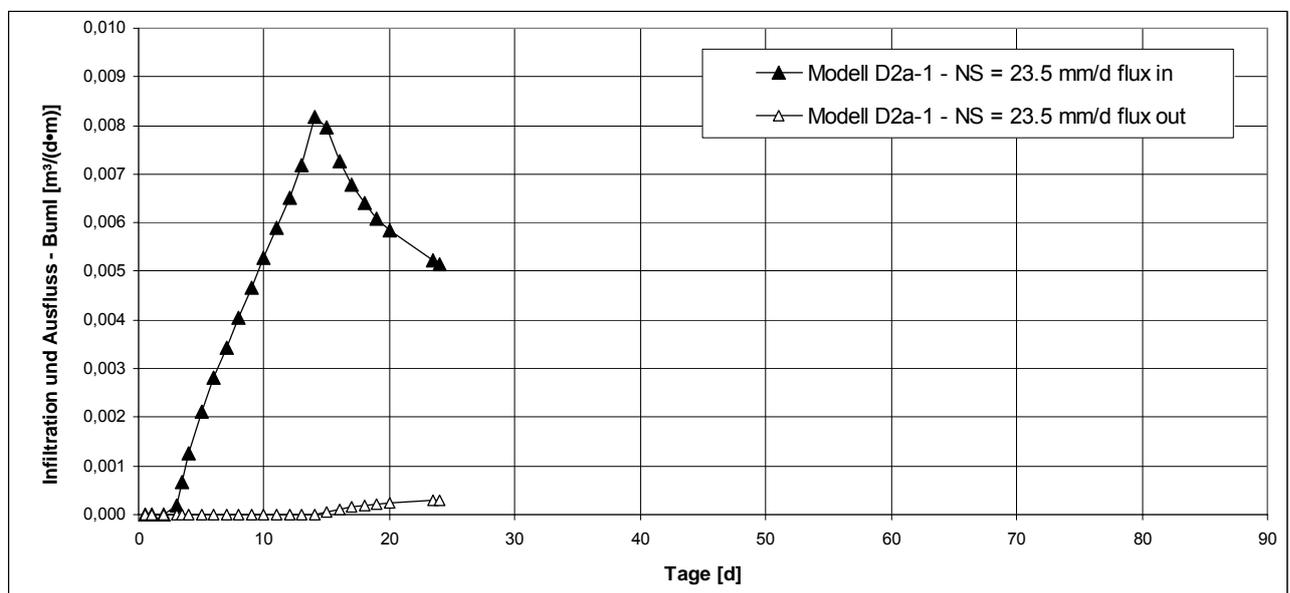


Abbildung 6.76: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für Modell D2a-1, bei einem Niederschlag von 23,5 mm/d

In Abbildung 6.77 ist die Verteilung des Sättigungsgrades für das Modell D2a-1_23.5 nach 25 Tagen dargestellt. Deutlich ist anhand der roten Einfärbung die wassergesättigte Zone des Dammkerns im Grenzbereich zum Stützmaterial zu erkennen. Die in Abbildung 6.78 dargestellten Strömungslinien für das Modell D2a-1_23.5 verdeutlichen die Durchsickerung des Stützmaterials. Im BumI ist demnach nur eine sehr geringe Durchströmung auszumachen.

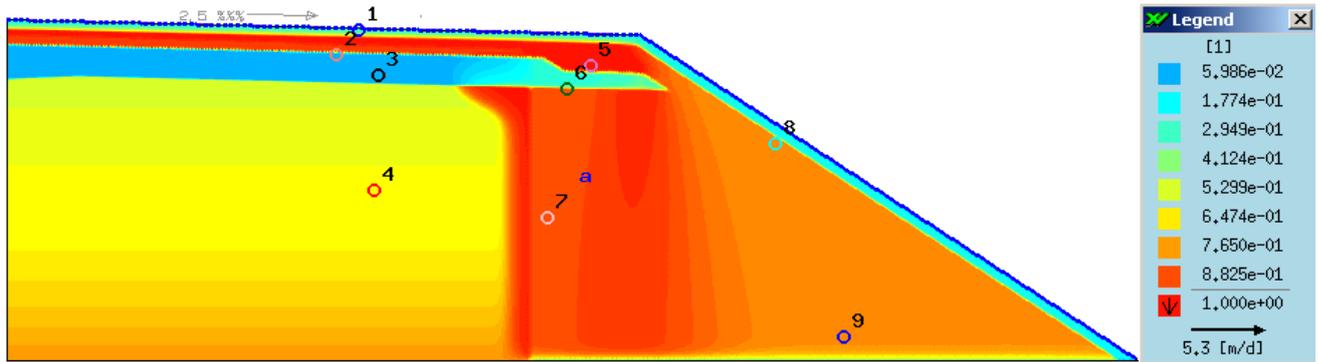


Abbildung 6.77: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell D2a-1_23.5 nach 25 Tagen

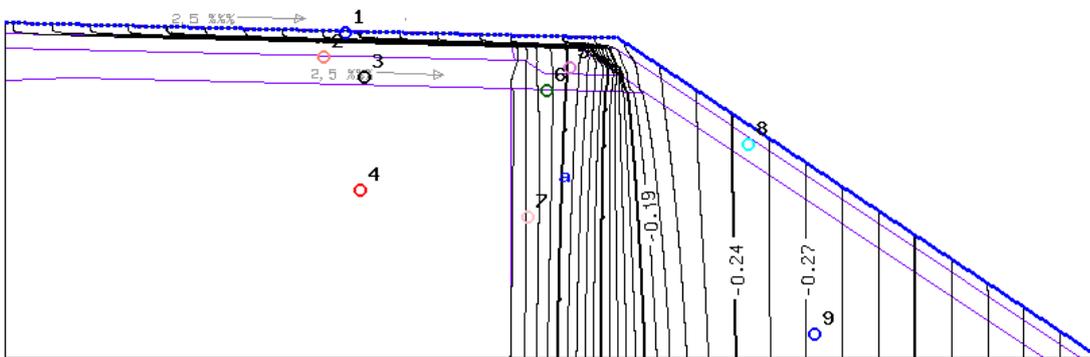


Abbildung 6.78: Strömungslinien im Modell D2a-1_23.5 nach 25 Tagen

6.4.7 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse – Modell D

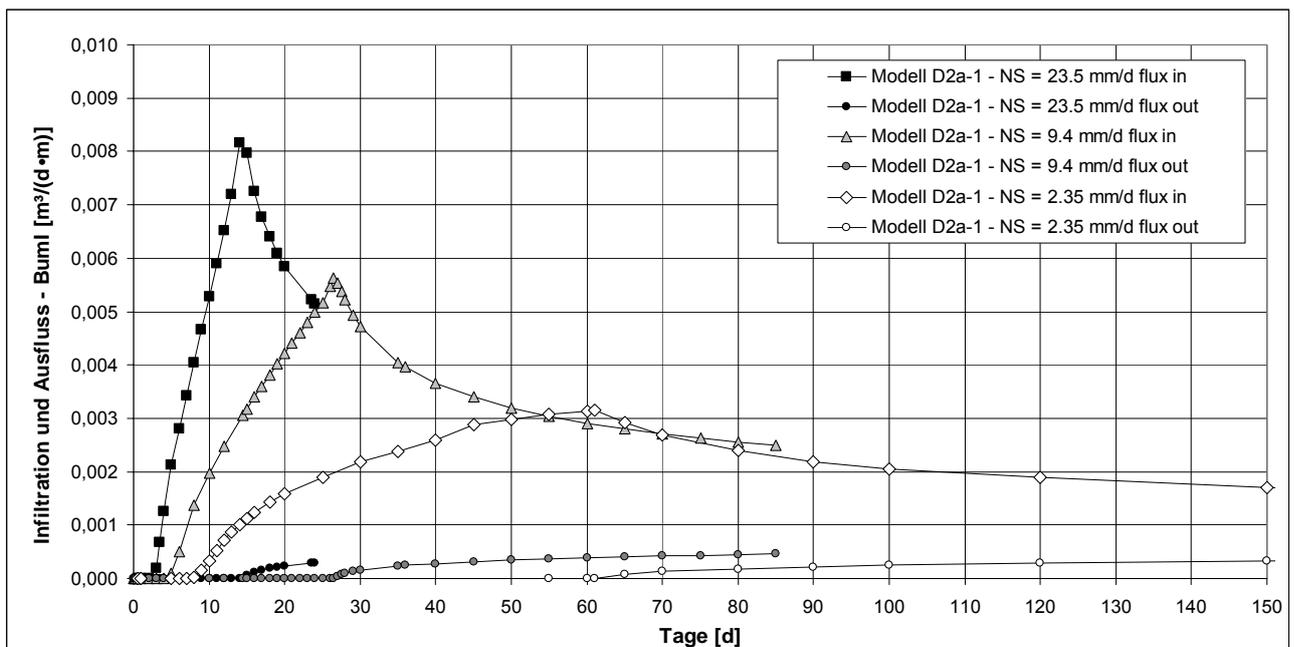


Abbildung 6.79: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für das Modell D2a-1 bei den Niederschlägen 2,35 mm/d, 9,4 mm/d und 23,5 mm/d

In Abbildung 6.79 sind die Infiltrationsverläufe in den BumI für das Modell D2a-1 bei den Niederschlägen 2,35 mm/d, 9,4 mm/d und 23,5 mm/d dargestellt. Es zeigt sich zum einen, dass mit zunehmender Niederschlagsintensität die Infiltration in den BumI zeitlich früher einsetzt, zum anderen ist erkennbar, dass die Infiltrationsmengen in den BumI im stationären Fließzustand, auch wenn dieser nicht erreicht wurde, zunehmen. Die Infiltrationsmengen für Modell D2a-1 im stationären Fließzustand betragen bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d etwa $0,001 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ und werden bei einem Niederschlag von 9,4 mm/d etwa bei $0,002 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ erwartet. Aus einer Extrapolation der Simulationsergebnisse kann die Infiltrationsmenge in den BumI bei einem Niederschlag von 23,5 mm/d etwa zu $0,0035 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ abgeschätzt werden.

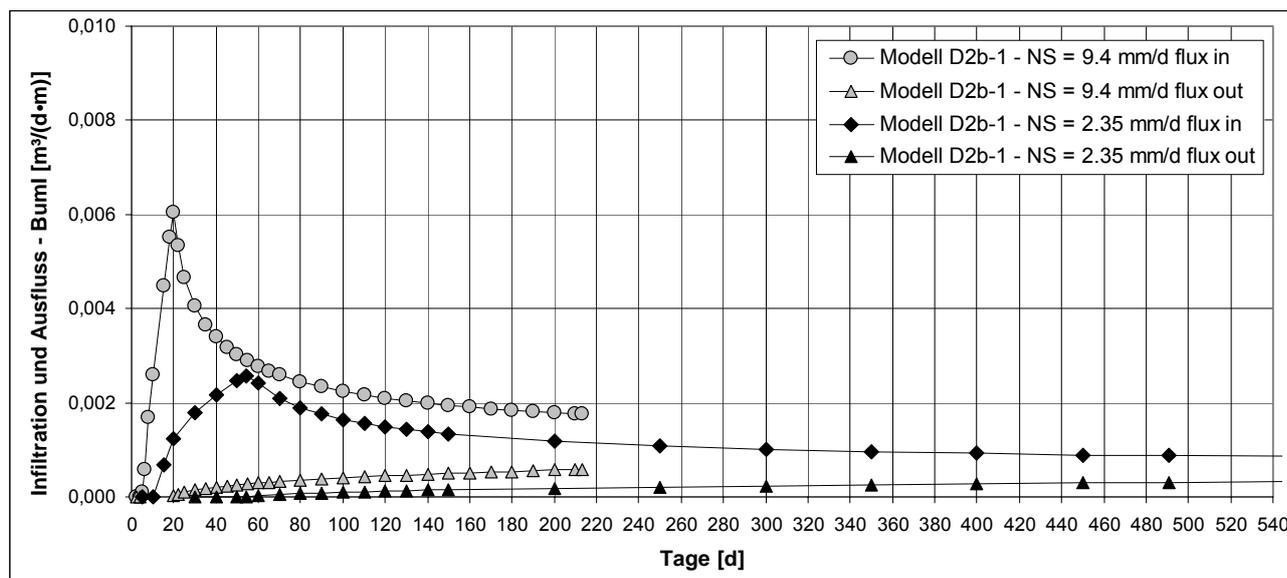


Abbildung 6.80: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für das Modell D2b-1 bei den Niederschlägen 2,35 mm/d und 9,4 mm/d

Abbildung 6.80 zeigt die über die Zeit in den Kern infiltrierenden Sickerwassermengen sowie die aus dem Kern ausfließenden Sickerwassermengen für das Modell D2b-1 bei den Niederschlägen 2,35 mm/d und 9,4 mm/d. Wiederum ist deutlich zu sehen, dass mit zunehmender Niederschlagsintensität die Infiltration in den BumI zeitlich früher einsetzt und dass die im stationären Fließzustand erwarteten Infiltrationsmengen mit steigendem Niederschlag zunehmen. Für das Modell D2b-1_2.35 werden im stationären Zustand etwa $0,0008 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ erwartet. Die Infiltrationsmenge in den BumI bei einem Niederschlag von 9,4 mm/d liegt für das Modell D2b-1 etwa bei $0,0017 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$.

Die Abbildung 6.81 zeigt die in den BumI einströmenden und die aus dem BumI ausströmenden Sickerwassermengen für das Modell D2c-1 bei den Niederschlägen 2,35 mm/d und 9,4 mm/d. Nach dem schwach ausgeprägten Maximum in der Infiltrationskurve geht die Sickerwassermenge auf einen etwas geringeren, konstanten Wert zurück. Die Ausflusskurve nähert sich zeitlich verzögert stetig an die Infiltrationskurve an. Bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d tritt der stationäre Fließzustand im BumI nach etwa 500 Tagen, bei einem Niederschlag von 9,4 mm/d nach etwa 295 Tagen ein. Die Infiltrationsmenge in den BumI beträgt bei stationären Verhältnissen für das Modell D2c-1_2.35 etwa $0,0085 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ und für das Modell D2c-1_9.4 etwa $0,014 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$. Damit liegen die Sickerwassermengen für das Modell D2c-1 weitaus höher als bei den oben betrachteten Modellen mit weniger durchlässigen Materialien in BumI und Dammbaustoff.

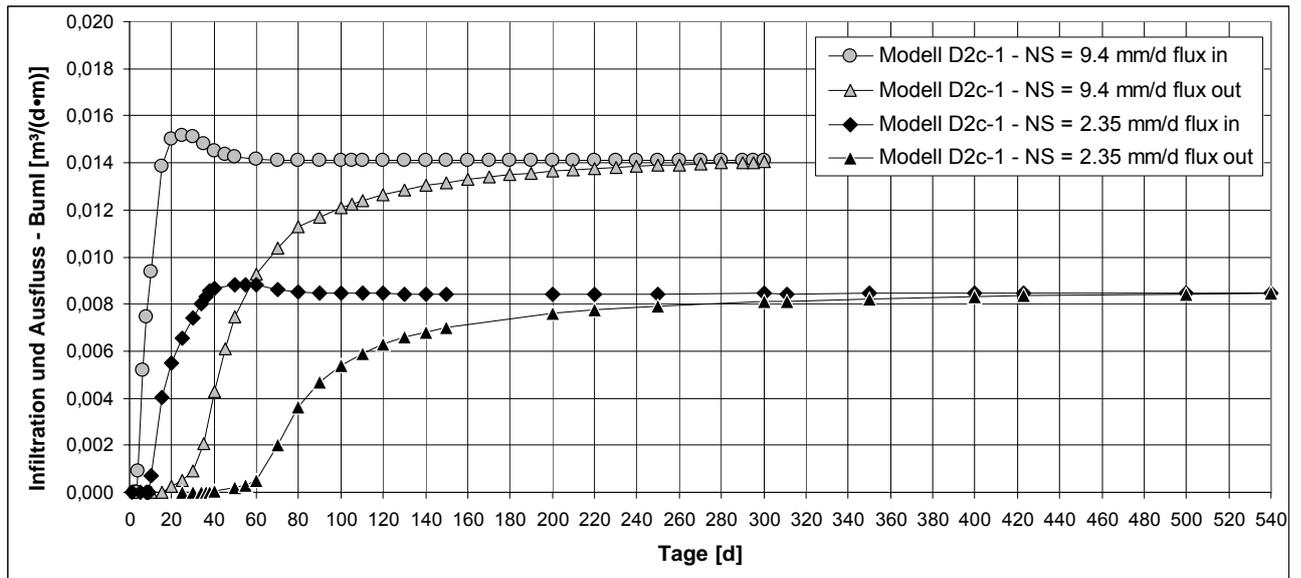


Abbildung 6.81: Infiltration in Bum1 und Ausfluss aus Bum1 für das Modell D2c-1 bei den Niederschlägen 2,35 mm/d und 9,4 mm/d

Werden die in den Bum1 einströmenden Sickerwassermengen auf die jeweilige Gesamtniederschlagsmenge bezogen, so ergibt sich die Darstellung in Abbildung 6.82. Es zeigt sich, dass bei den Modellen D2a, D2a-1 und D2b-1, bei denen als Bum1 der verhältnismäßig gering durchlässige Su4 verwendet wurde, eine nur sehr kleine Infiltration in den Bum1 stattfindet. Die in den Kern einströmenden Sickerwassermengen bewegen sich bei einem dauerhaften Niederschlag von 2,35 mm/d etwa bei 2 bis 3 % des Niederschlages und verringern sich für einen Niederschlag von 9,4 mm/d auf etwa 1 %. Für Modell D2a-1 nimmt die in den Bum1 infiltrierende Sickerwassermenge bei 23,5 mm/d Niederschlag auf 0,9 % von der Gesamtniederschlagsmenge ab.

Beim Modell D2c-1 dagegen versickern bei einer Niederschlagsintensität von 2,35 mm/d etwa 22 % des Gesamtniederschlages im Bum1. Für den höheren Niederschlag von 9,4 mm/d infiltrieren immerhin noch 9,3 % des Gesamtniederschlages in den Dammkern.

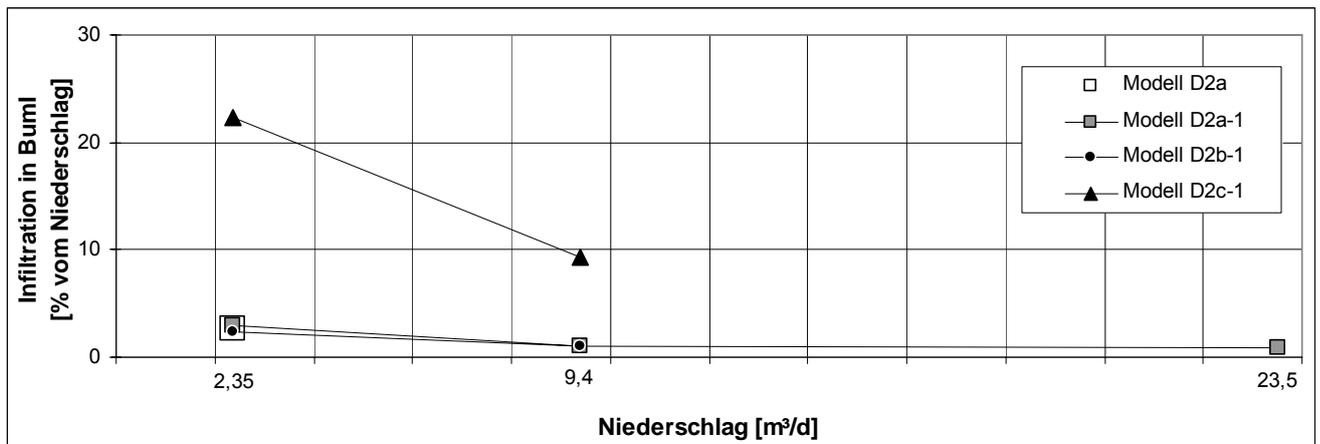


Abbildung 6.82: auf den Niederschlag bezogene Infiltration in Bum1 in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge bei den Modellen D2a, D2a-1, D2b-1 und D2c-1

In Anlage 1.3, Blatt 1 bis Blatt 8 sind die Sickerwassermengen zum jeweiligen Berechnungsende der Modelle für die Bauweise D angegeben.

6.5 Modell E

6.5.1 Modellbildung – Modell E

Bei der Bauweise E wird auf eine Dichtungsschicht verzichtet. Wie bereits unter Abschnitt 3.1.5 beschrieben soll der schwach durchlässige Baukörper mit darüber liegender Sickerschicht an sich nur eine möglichst geringe Durchsickerung zulassen. Daher wird nach M TS E im Hinblick auf die hydraulischen Eigenschaften des Dammkerns ein Durchlässigkeitsbeiwert $k_f \leq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s gefordert.

In Abbildung 6.83 ist violett eingefärbt die den Berechnungen für die Bauweise E zugrunde liegende Modellgeometrie dargestellt. Abbildung 6.84 zeigt die Lage der für die Auswertung der Modelle verwendeten Fluid-Flux-Linien.

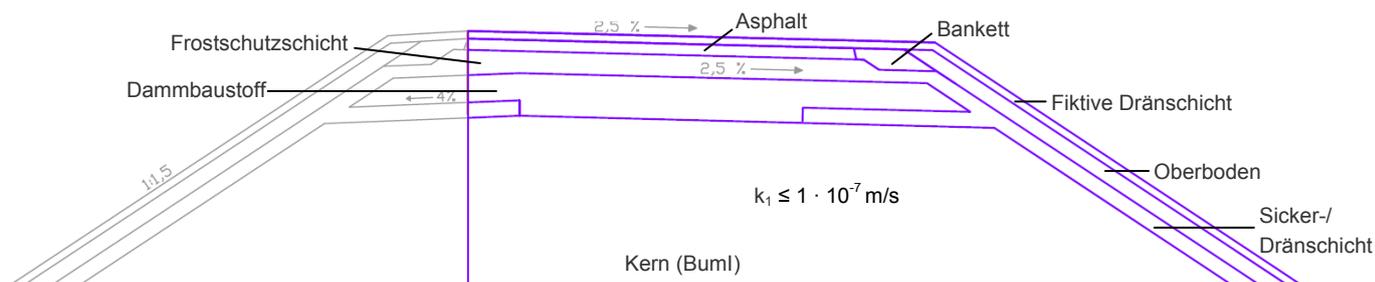


Abbildung 6.83: Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus BumI – Modellgeometrie

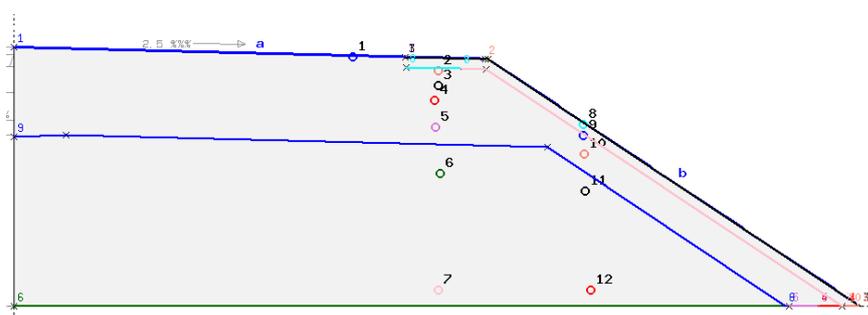


Abbildung 6.84: Lage der Fluid-Flux-Linien zur Auswertung der Berechnungsmodelle an Bauweise E

Die Ergebnisse der Voruntersuchungen haben gezeigt, dass ein Großteil des in den BumI infiltrierenden Sickerwassers im Bereich des Dammfußes in den BumI infiltriert. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, am Dammfuß anstelle des BumIs einen Keil aus gut durchlässigem, unbelastetem Bodenmaterial einzubringen. In den Untersuchungen wurden zwei unterschiedlich große Keile dargestellt in Abbildung 6.85 und Abbildung 6.87 angenommen. Im Modell unterscheiden sich die Berechnungen mit und ohne Keil nicht, da in beiden Fällen auch dem Keil die Eigenschaften des Bu-

mls zugrunde gelegt wurden. Bei der Auswertung der in den BumI einströmenden Sickerwassermenge wurde jedoch zwischen den im Bereich des Keils und den im übrigen Bereich in den BumI infiltrierenden Wassermengen unterschieden. Die im Bereich des Keils infiltrierende Sickerwassermenge wurde anhand der in Abbildung 6.86 (Keil 1) und in Abbildung 6.88 (Keil 2) dargestellten schwarzen Fluid-Flux-Linie 11 ermittelt. Anhand der in Abbildung 6.84 blau dargestellten Fluid-Flux-Linie 9 wurde die bei Fehlen des Keils in den BumI infiltrierende Sickerwassermenge bestimmt. Die in den BumI infiltrierende Sickerwassermenge bei Einbringen eines Keils wurde anschließend als Differenz der über die Linien 9 und 11 einströmenden Wassermengen ermittelt.



Abbildung 6.85: Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus BumI – Keil 1

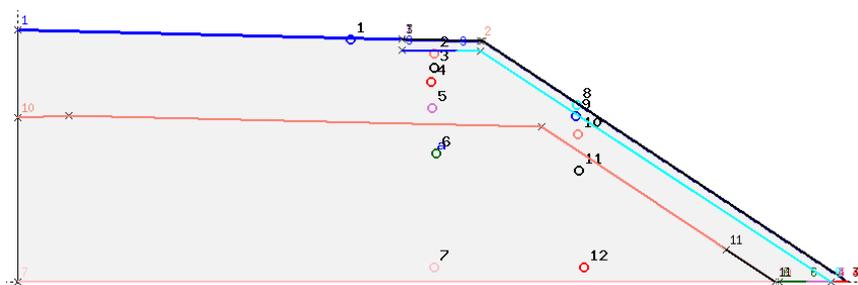


Abbildung 6.86: Lage der Fluid-Flux-Linien – Keil 1 – in den Modellen E2b-1, E2c-1 und E2d-1

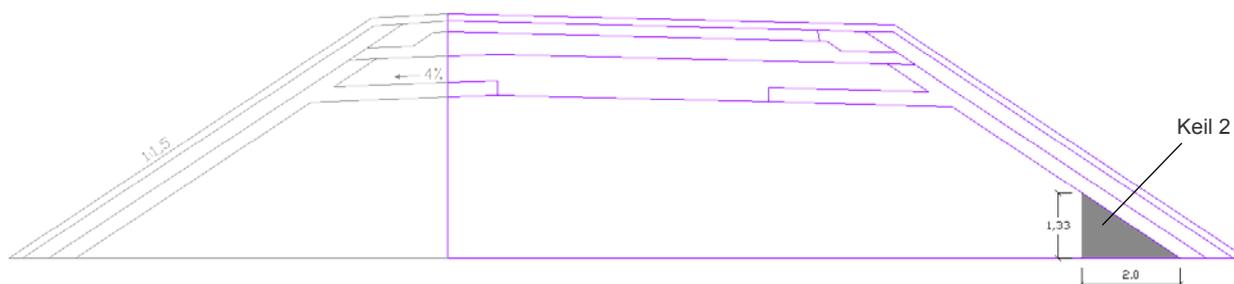


Abbildung 6.87: Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus BumI – Keil 2

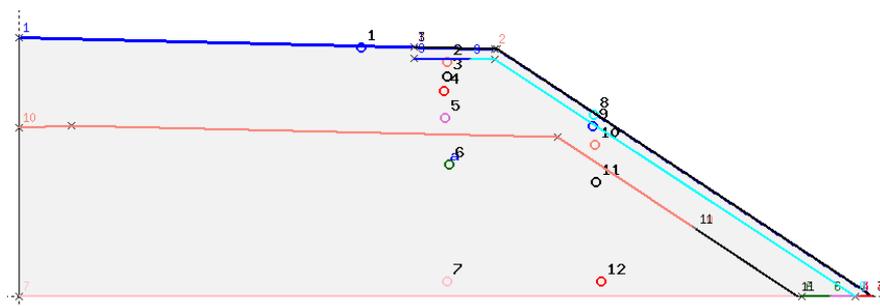


Abbildung 6.88: Lage der Fluid-Flux-Linien – Keil 2 – in den Modellen E2b-1, E2c-1 und E2d-1

6.5.2 Anfangs- und Randbedingungen – Modell E

Die Berechnungen am Modell E2a wurden mit einem konstanten hydraulischen Potential $\psi_h = 0$ als Anfangsbedingung durchgeführt. Die daraus resultierende Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand ist in Abbildung 6.89 dargestellt. Der im Modell E2a als schwach schluffiger Kies modellierte Dammbaustoff unterhalb der Frostschutzschicht ist an seinem geringen Sättigungsgrad, sichtbar an der blauen Einfärbung, gut zu erkennen.

Allen anderen Modellen der Bauweise E wurde als Anfangsbedingung im gesamten Modellbereich die Potentialhöhe $\psi_h = -1$ m zugrunde gelegt. Die daraus resultierende Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand ist für die Modelle E2b-1 in Abbildung 6.90, E2c-1 in Abbildung 6.91 und E2d-1 in Abbildung 6.92 dargestellt. Die Modelle unterscheiden sich voneinander in der Wahl des Kernmaterials, wie die unterschiedlichen Anfangssättigungsgrade belegen. Im Vergleich zum Modell E2a wurde in den Modellen E2b-1, E2c-1 und E2d-1 das Dammbaumaterial als stark schluffiger Sand (Su3) modelliert. Die Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand ist für die Modelle E2c-1 und E2d-1 identisch. Dies liegt daran, dass für beide Modelle die gleichen Böden verwendet wurden. Die Modelle unterscheiden sich lediglich im Durchlässigkeitsbeiwert des für den Kern verwendeten organischen Bodens. Beim Modell E2d-1 wurden dem Bum1 die Eigenschaften des organischen Tons MUC 2 mit einem k_f -Wert von $1 \cdot 10^{-9}$ m/s, und beim Modell Ec2-1 die des organischen Tons MUC 1 mit $k_f = 1 \cdot 10^{-8}$ m/s zugrunde gelegt.

Mit dem Ziel, den tatsächlichen Anfangszustand der Böden nach Herstellung des Dammes realitätsnaher abzubilden, wurden für das Modell E2b-1 außerdem Berechnungen mit einer im gesamten Modellbereich im Anfangszustand vorliegenden Saugspannung von 2,2 kPa durchgeführt. Dieser Wert entspricht etwa der Saugspannung des für den Bum1 verwendeten Su4 bei einem Sättigungsgrad von 95 % (siehe auch Abschnitt 5.5). In Abbildung 6.93 ist die Verteilung des Sättigungsgrades für das Modell E2b-1 mit einer vorgegebenen Saugspannung von 2,2 kPa dargestellt. Aus einem Vergleich mit der in Abbildung 6.90 dargestellten Verteilung des Sättigungsgrades ist deutlich zu erkennen, dass aus dieser Definition der Anfangsbedingung deutlich höhere Sättigungsgrade resultieren, als bei der Definition eines im gesamten Modellbereich konstanten hydraulischen Potentials $\psi_h = -1$ m.

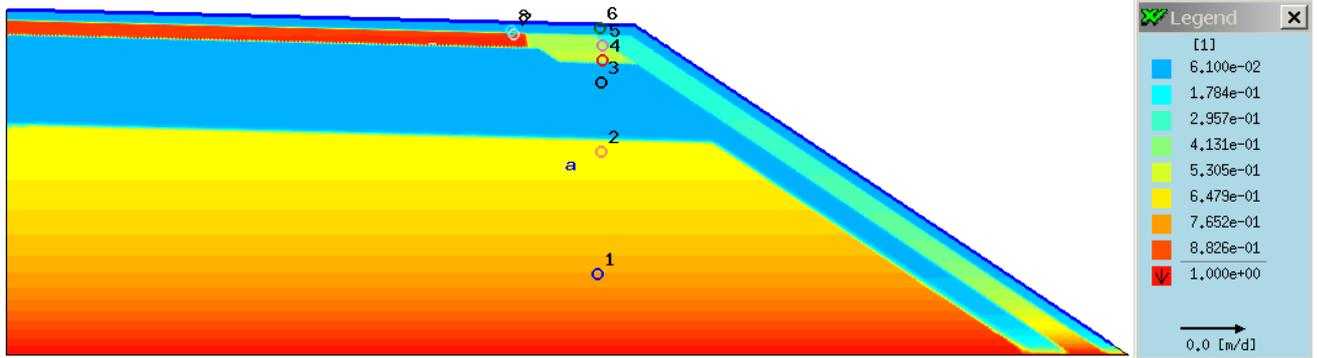


Abbildung 6.89: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell E2a

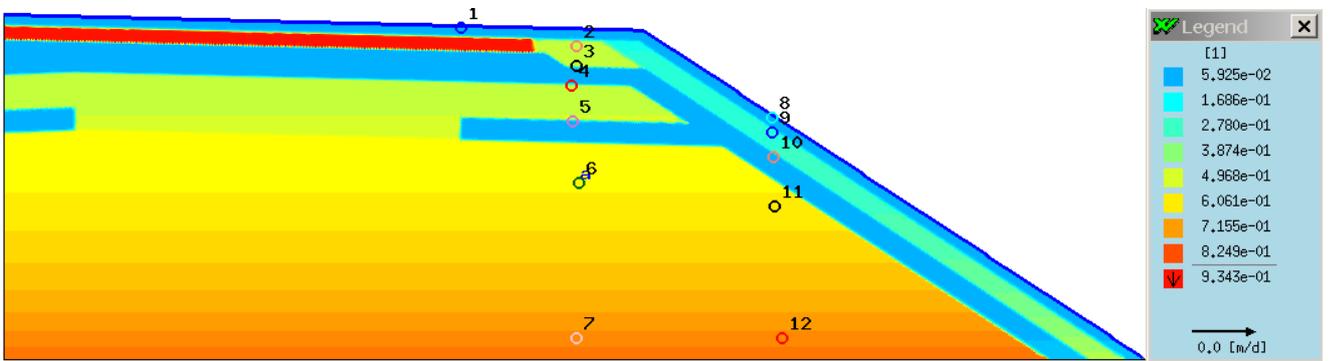


Abbildung 6.90: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell E2b-1

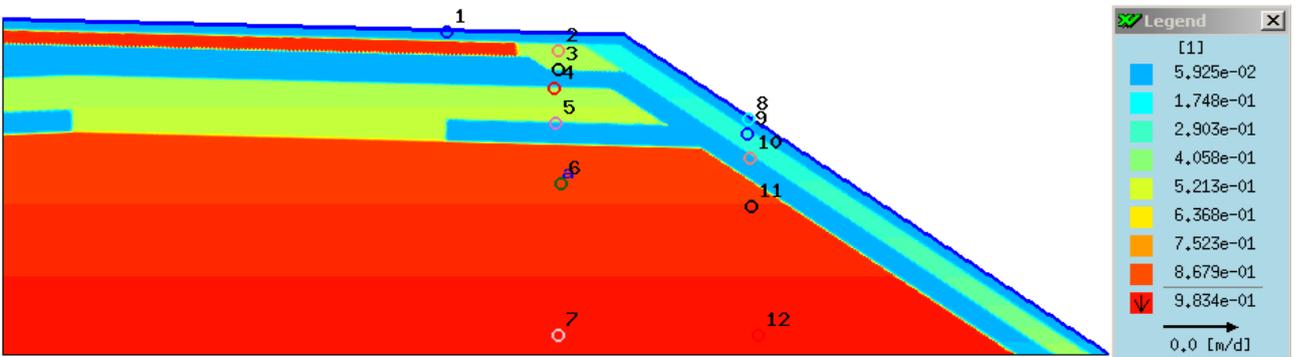


Abbildung 6.91: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell E2c-1

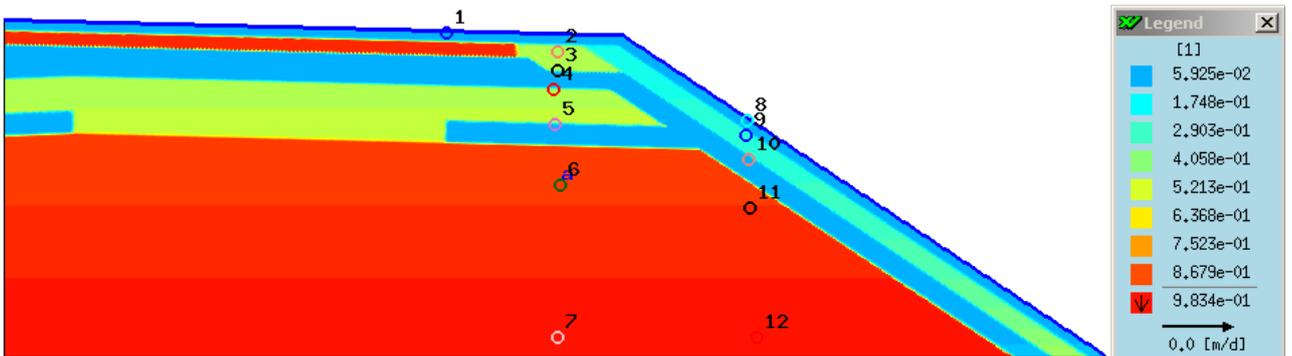


Abbildung 6.92: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell E2d-1

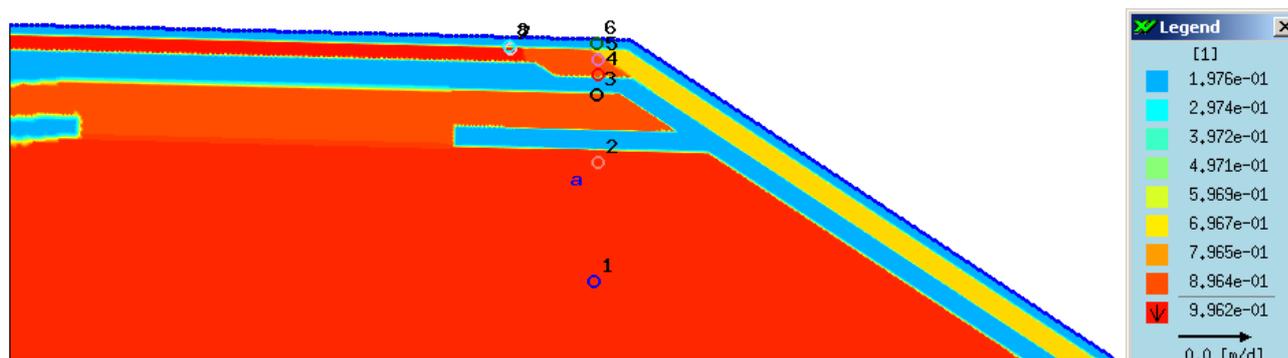


Abbildung 6.93: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell E2b-1 bei einer vorgegebenen Saugspannung von 2,2 kPa

Als Randbedingung wurde beim Modell E2a an der Modellunterseite ein hydraulisches Potential $\psi_h = 0$ definiert. Bei den Modellen E2b-1, E2c-1 und E2d-1 wurde das hydraulische Potential an der Unterseite zu $\psi_h = -1\text{m}$ festgelegt. Durch eine sogenannte „constraint“-Randbedingung wurde in allen Modellen eine Wasseraufnahme über die Modellunterseite unterbunden.

Am oberen Modellrand wurde ein Niederschlag von 2,35 mm/d, 9,4 mm/d bzw. 23,5 mm/d definiert. Die in den einzelnen Berechnungen simulierten Zeiträume können der nachfolgenden Tabelle 6.20 entnommen werden. Die Berechnungen mit einem Niederschlag von 2,35 mm/d konnten bis zum Erreichen eines stationären Zustandes durchgeführt werden. Berechnungen mit den Niederschlägen von 9,4 mm/d und 23,5 mm/d wurden aufgrund des enormen Rechenaufwandes nur für das Modell E2b-1 durchgeführt. Diese mussten aufgrund der großen Rechenzeiten jedoch vor Erreichen eines stationären Zustandes nach einer simulierten Dauer von 45 bzw. 10 Tagen abgebrochen werden.

Niederschlag	2,35 [mm/d]	9,4 [mm/d]	23,5 [mm/d]
Modell E2a	300 d	-	-
Modell E2b-1	480 d	45 d	10 d
Modell E2c-1	380 d	-	-
Modell E2d-1	240 d	-	-

Tabelle 6.19: Übersicht über die untersuchten Berechnungsdauern in Tagen für die einzelnen Modelle der Bauweise E

6.5.3 Bodenkennwerte – Modell E

Die Bodenkennwerte des Straßenaufbaus (Asphaltschicht, Bankett und Oberboden), der fiktiven Dränschicht, der Frostschutzschicht und der Sickerschicht bleiben für alle Berechnungsmodelle der Bauweise E gleich. Lediglich der Dammbaustoff sowie das Kernmaterial wurden variiert. Die Modelle E2a und E2b-1 unterscheiden sich hinsichtlich der Eigenschaften des Dammbaustoffes. Für Modell E2a wurde hierfür der schwach schluffige Kies, für Modell E2b-1 der stark schluffige Sand (Su3) verwendet. Für den Bum1 wurde in beiden Modellen ein Su4 angesetzt.

Die Modelle E2b-1, E2c-1 und E2d-1 wurden mit unterschiedlichen Böden für den Bum1 berechnet. Im Hinblick auf die übrigen Bodenschichten unterscheiden sich die Modelle nicht. Beim Modell E2b-

1 wurden dem Kernmaterial die Eigenschaften des Su4 mit $k_f = 1 \cdot 10^{-7}$ m/s und beim Modell E2c-1 die des organischen Tons mit $k_f = 1 \cdot 10^{-9}$ m/s zugrunde gelegt. Beim Modell E2d-1 wurde für den BumI der organische Ton mit einem Durchlässigkeitsbeiwert $k_f = 1 \cdot 10^{-8}$ m/s angesetzt. Die verschiedenen Bodenkennwerte der einzelnen Modelle sind in der nachfolgenden Tabelle 6.20 angegeben.

		fiktive Dränschicht / FrostSS	Asphalt	Bankett	Oberboden	Damm- baustoff	Sicker- schicht	BumI	Potentia- höhe ψ_b [m]
Modell E2a	DIN 18196	GU	TA	SU*	SU / SU*	GU	GU	UL	0
	Kurzbezeichng.	Ekblad 0.4	Tinjum F	Su3	Su2	Ekblad 0.4	Ekblad 0.4	Su4	
	k_f -Wert [m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-7}$	
	S_s	1	1	1	1	1	1	1	
	S_r	0,05	0,00	0,00	0,05	0,05	0,05	0,000	
	A [m ⁻¹]	46	0,322	2,6	6,8	46	46	1,67	
	n	1,79	1,07	1,28	1,43	1,79	1,79	1,275	
	m = 1-(1/n)	0,44	0,07	0,22	0,30	0,44	0,44	0,22	
	Porenanteil	0,23	0,35	0,36	0,38	0,23	0,23	0,37	
Modell E2b-1	DIN 18196	GU	TA	SU*	SU / SU*	SU*	GU	UL	-1
	Kurzbezeichng.	Ekblad 0.4	Tinjum F	Su3	Su2	Su3	Ekblad 0.4	Su4	
	k_f -Wert [m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-7}$	
	S_s	1	1	1	1	1	1	1	
	S_r	0,05	0,00	0,00	0,05	0,00	0,05	0,000	
	A [m ⁻¹]	46	0,322	2,6	6,8	2,6	46	1,67	
	n	1,79	1,07	1,28	1,43	1,28	1,79	1,275	
	m = 1-(1/n)	0,44	0,07	0,22	0,30	0,22	0,44	0,22	
	Porenanteil	0,23	0,35	0,36	0,38	0,36	0,23	0,37	
Modell E2c-1	DIN 18196	GU	TA	SU*	SU / SU*	SU*	GU	OT	-1
	Kurzbezeichng.	Ekblad 0.4	Tinjum F	Su3	Su2	Su3	Ekblad 0.4	MUC	
	k_f -Wert [m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-9}$	
	S_s	1	1	1	1	1	1	1	
	S_r	0,05	0,00	0,00	0,05	0,00	0,05	0,05	
	A [m ⁻¹]	46	0,322	2,6	6,8	2,6	46	0,14	
	n	1,79	1,07	1,28	1,43	1,28	1,79	1,4	
	m = 1-(1/n)	0,44	0,07	0,22	0,30	0,22	0,44	0,29	
	Porenanteil	0,23	0,35	0,36	0,38	0,36	0,23	0,65	
Modell E2d-1	DIN 18196	GU	TA	SU*	SU / SU*	SU*	GU	OT	-1
	Kurzbezeichng.	Ekblad 0.4	Tinjum F	Su3	Su2	Su3	Ekblad 0.4	MUC*	
	k_f -Wert [m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-8}$	
	S_s	1	1	1	1	1	1	1	
	S_r	0,05	0,00	0,00	0,05	0,00	0,05	0,05	
	A [m ⁻¹]	46	0,322	2,6	6,8	2,6	46	0,14	
	n	1,79	1,07	1,28	1,43	1,28	1,79	1,4	
	m = 1-(1/n)	0,44	0,07	0,22	0,30	0,22	0,44	0,29	
	Porenanteil	0,23	0,35	0,36	0,38	0,36	0,23	0,65	

Tabelle 6.20: Bodenkennwerte der für die Modelle der Bauweise E verwendeten Materialien

6.5.4 Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d

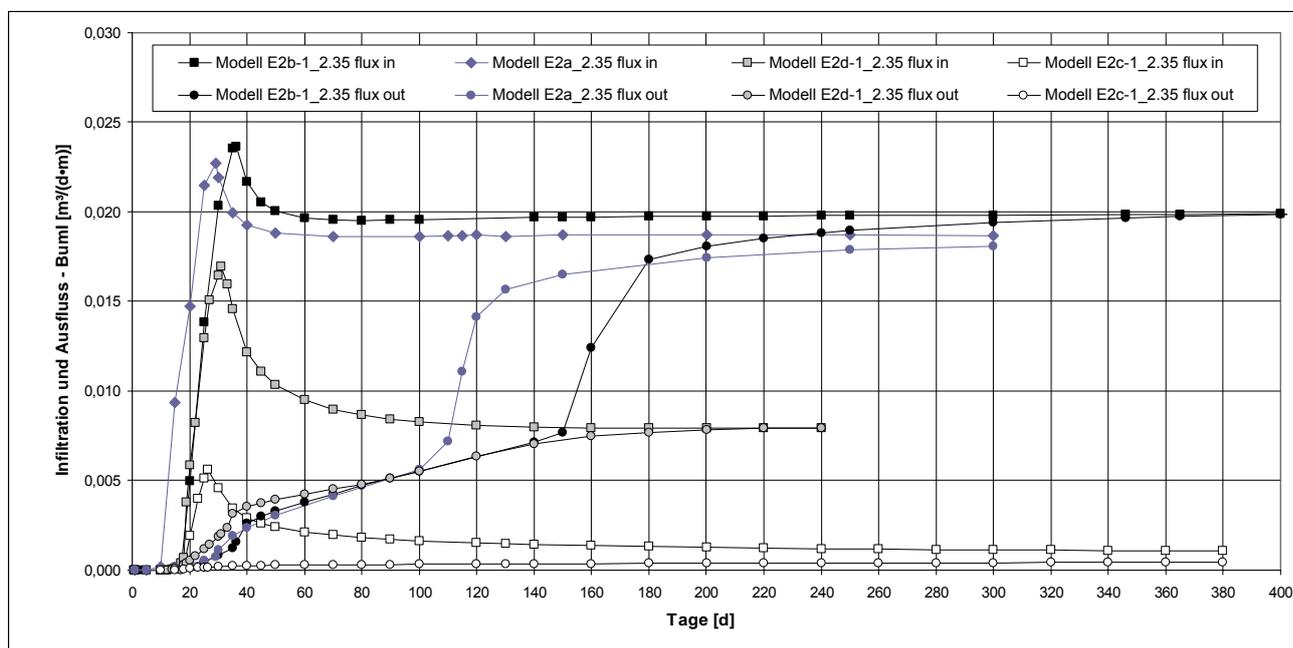


Abbildung 6.94: Infiltration in Buml und Ausfluss aus Buml für die Modelle E2a, E2b-1, E2c-1 und E2d-1 bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d

Das in Abbildung 6.94 dargestellte Diagramm zeigt die in den Dammkern infiltrierenden Sickerwassermengen sowie die zugehörigen aus dem Buml ausfließenden Wassermengen für die Modellberechnungen E2a, E2b-1, E2c-1 und E2d-1 bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d im Kronenbereich und 1,955 mm/d auf der Böschung. Dabei ist zu beobachten, dass die Infiltrationskurven für alle Modelle zunächst auf einen Maximalwert ansteigen, um dann auf einen konstant bleibenden Wert abzufallen. Außerdem ist zu erkennen, dass mit abnehmendem Durchlässigkeitsbeiwert des Bumls auch die Infiltrationsmengen in den Buml kleiner werden. Im stationären Zustand dringen bei Modell E2c-1_2.35 in das Buml aus organischem Ton mit dem k_f -Wert von $1 \cdot 10^{-9}$ m/s nur $0,001 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ ein. Im Modell E2d-1_2.35, bei dem der Durchlässigkeitsbeiwert des organischen Tons zu $k_f = 1 \cdot 10^{-8}$ m/s bei ansonsten gleichen Parametern angenommen wurde, infiltrieren bereits $0,008 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ in den Kern. Beim mit $k_f = 1 \cdot 10^{-7}$ m/s relativ durchlässigen Su4, der als Buml bei den Modellen E2a_2.35 und E2b-1_2.35 modelliert wurde, fallen die größten Sickerwassermengen im stationären Zustand an. Bei Modell E2b-1_2.35 werden $0,02 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ erreicht, bei Modell E2a_2.35 $0,019 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$. Der geringe Unterschied resultiert auf den unterschiedlichen Eigenschaften des Dammbaumaterials. Während bei Modell E2a ein stark durchlässiger Kies als Dammbaustoff angesetzt wurde, der einen raschen Abfluss des Sickerwassers aus dem Bankett ermöglicht, nimmt der im Modell E2b-1 als stark schluffiger Sand (Su3) modellierte Dammbaustoff Sickerwasser infolge von Kapillarspannungen auch im Bereich unterhalb der Fahrbahn auf. Der zeitlich etwas verzögerten Beginn der Infiltration in den Buml beim Modell E2b-1_2.35 im Vergleich zum Modell E2a_2.35 resultiert zum einen aus dem etwas geringeren Sättigungsgrad im Anfangszustand infolge der unterschiedlichen Anfangsbedingungen (siehe Abschnitt 6.5.2). Zum anderen trifft das Sickerwasser im Modell E2b-1_2.35 aufgrund der lang-

sameren Versickerung im Dammbaumaterial verzögert auf die über dem Buml gelegene Sickerschicht, von der aus es zu einer Infiltration in den Buml kommen kann.

Beim Modell E2c-1_2.35 nähert sich der Wert für die Ausflussmenge stetig an den Wert für die in den Buml einsickernde Wassermenge an. Bei den Modellen E2a_2.35, E2b-1_2.35 und E2d-1_2.35 ist ein deutlicher Anstieg der Ausflusskurve zu erkennen, bevor sie sich ebenfalls an die Infiltrationskurve angleicht. Dieser Anstieg resultiert daraus, dass sich im Zuge der Wasseraufnahme im Buml eine Sättigungsfront ausbildet, die beispielsweise für Modell E2b-1_2.35 nach etwa 150 Tagen in einem großen Bereich die Unterkante des Modells erreicht (siehe Abbildung 6.95). Damit nimmt der Bereich an der Dammunterseite, innerhalb dessen es zum Ausfluss des Sickerwassers kommt, stark zu und somit steigt die Ausflussmenge des Sickerwassers binnen kurzer Zeit an.

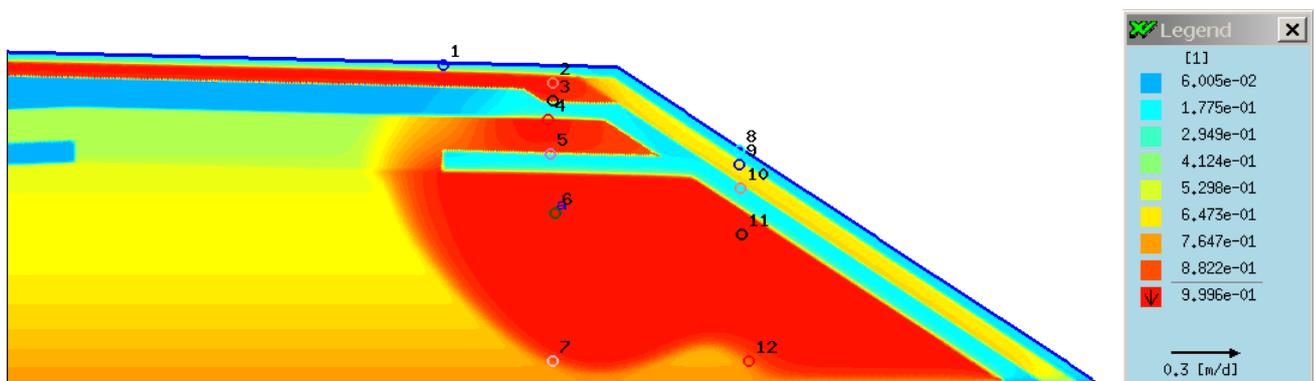


Abbildung 6.95: Verteilung des Sättigungsgrades nach 150 Tagen für Modell E2b-1_2.35

Alle Modelle wurden für den Niederschlag von 2,35 mm/d bis zum stationären Zustand der Infiltration in den Buml berechnet. In Abbildung 6.96 ist die Verteilung des Sättigungsgrades für Modell E2a_2.35 nach 300 Tagen dargestellt. An der roten Färbung ist zu erkennen, dass der Bereich des Bumls unterhalb des Banketts und in der Böschung vollständig wassergesättigt ist. Das Gleiche ist bei der Verteilung des Sättigungsgrades für das Modell E2b-1_2.35 nach 480 Tagen in Abbildung 6.98 zu sehen. Die zugehörigen Strömungslinien für das Modell E2a_2.35 in Abbildung 6.97 und für das Modell E2b-1_2.35 in Abbildung 6.99 zeigen eine Durchsickerung dieser gesättigten Zone. Dabei kommt es gleichzeitig aber auch zu einem Abfluss des Sickerwassers in der über dem Kern liegenden Sickerschicht.

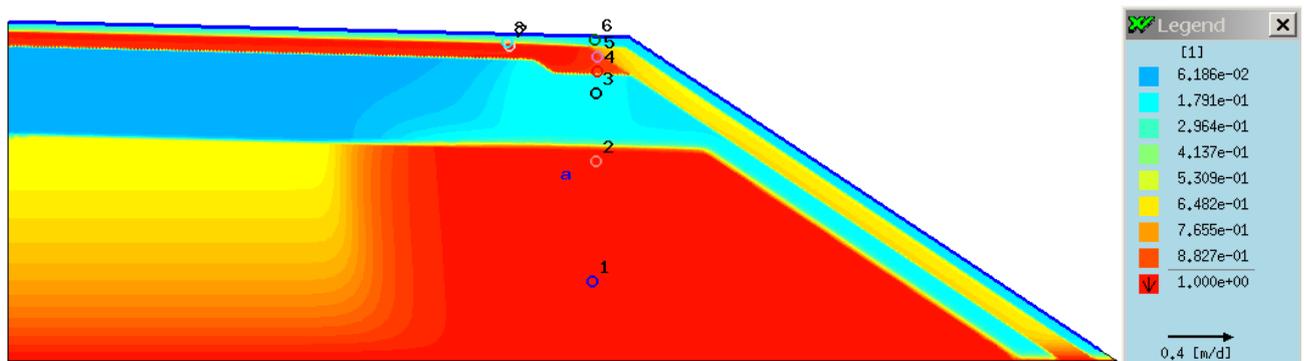


Abbildung 6.96: Verteilung des Sättigungsgrades nach 300 Tagen für Modell E2a_2.35

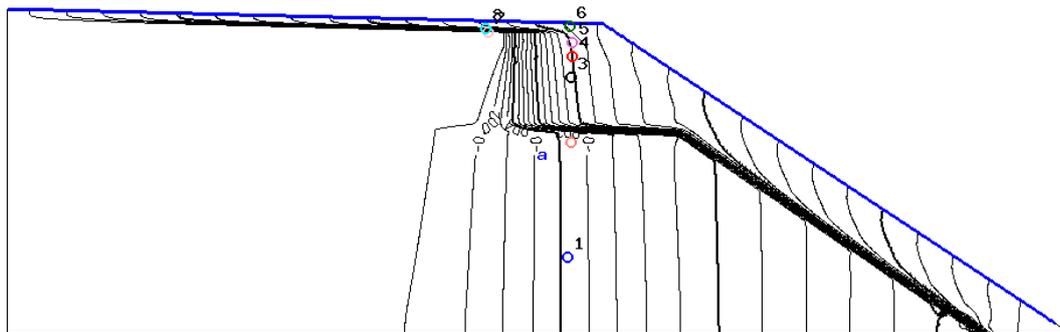


Abbildung 6.97: Strömungslinien im Modell E2a_2.35 nach 300 Tagen

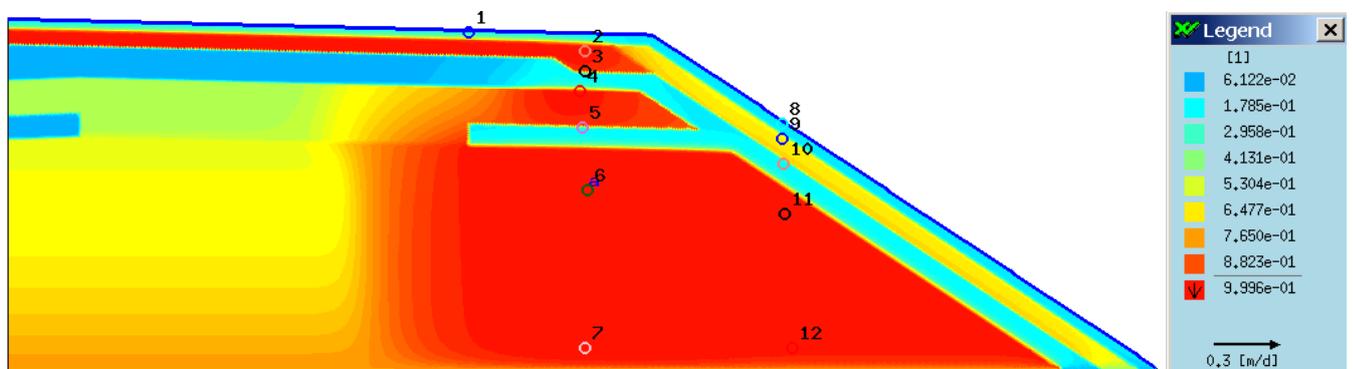


Abbildung 6.98: Verteilung des Sättigungsgrades nach 480 Tagen für Modell E2b-1_2.35

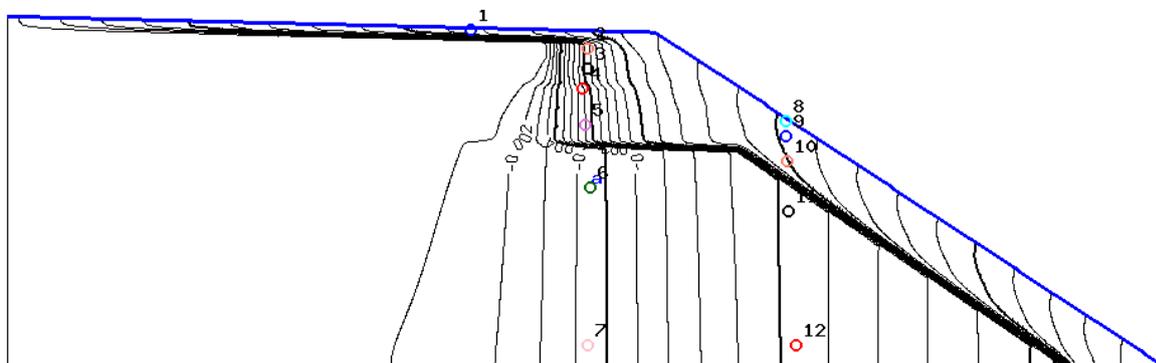


Abbildung 6.99: Strömungslinien im Modell E2b-1_2.35 nach 480 Tagen

Wie bereits beschrieben, ist die Durchsickerung des Bumlis beim Modell E2d-1_2.35 im Vergleich zu den Modellen E2a_2.35 und E2b-1_2.35 deutlich geringer. Gut zu erkennen ist dies an den in Abbildung 6.101 dargestellten Strömungslinien nach einer simulierten Dauer von 240 Tagen. Es treten nur noch wenige Strömungslinien innerhalb des Bumlis auf; der größte Anteil des Sickerwassers wird über die Sickerschicht abgeführt. In Abbildung 6.100 ist die Verteilung des Sättigungsgrades für das Modell E2d-1_2.35 nach 240 Tagen dargestellt. Bei genauem Hinsehen ist auch bei Modell E2d-1_2.35 im Bereich des Bumlis unter dem Bankett und in der Böschung ein Sättigungsgrad von $S_r = 1$ zu erkennen. Im links unterhalb der Fahrbahn gelegenen Bereich ist der Sättigungsgrad etwas niedriger.

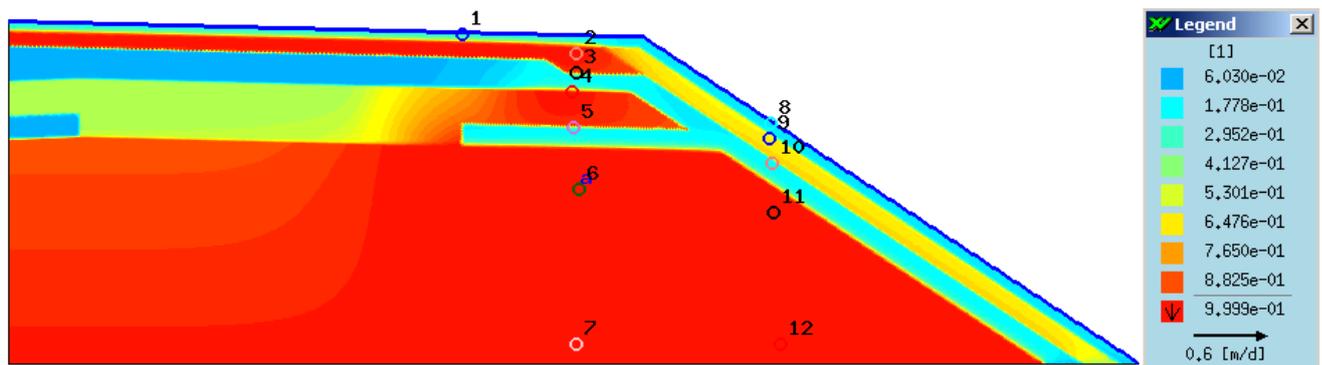


Abbildung 6.100: Verteilung des Sättigungsgrades nach 240 Tagen für Modell E2d-1_2.35

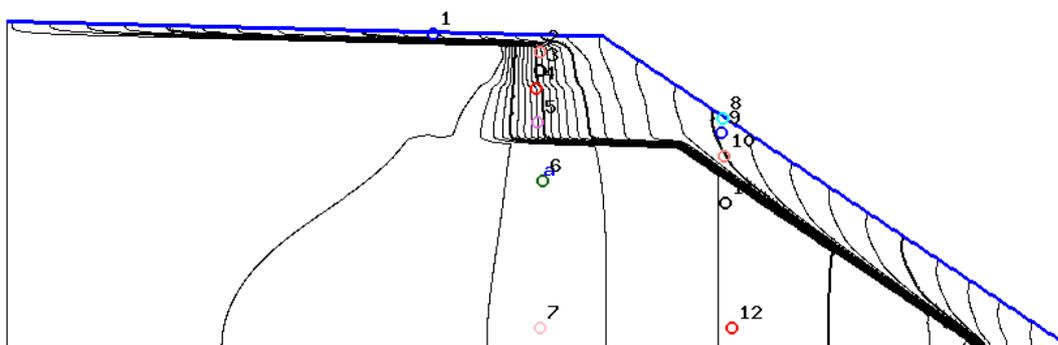


Abbildung 6.101: Strömungslinien im Modell E2d-1_2.35 nach 240 Tagen

Anhand der in Abbildung 6.103 dargestellten Strömungslinien für das Modell E2c-1_2.35 nach 380 Tagen ist keine nennenswerte Durchsickerung des Bumls erkennbar. Das Sickerwasser wird beinahe vollständig in der oberhalb des Bumls gelegenen Sickerschicht bis zur Dammunterkante abgeführt. Die Verteilung des Sättigungsgrades zeigt nach 380 Tagen wie auch bei Modell E2d-1_2.35 eine wassergesättigte Zone im Buml unterhalb des Banketts und in der Böschung. Der nicht vollständig aufgesättigte Bereich im Buml unterhalb der Fahrbahn ist jedoch bei Modell E2c-1_2.35 etwas größer als bei Modell E2d-1_2.35. Dies ist auf den kleineren k_f -Wert für das Kernmaterial und den damit verbundenen langsameren Aufsättigungsprozess im Buml bei Modell E2c-1_2.35 zurückzuführen. Daran ist zu erkennen, dass nach 380 Tagen noch kein vollständig stationärer Fließzustand erreicht worden ist.

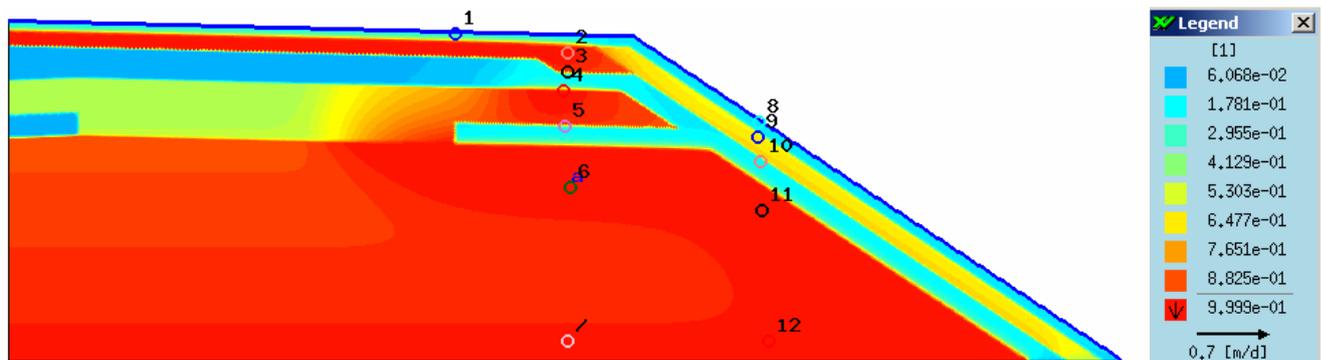


Abbildung 6.102: Verteilung des Sättigungsgrades nach 380 Tagen für Modell E2c-1_2.35

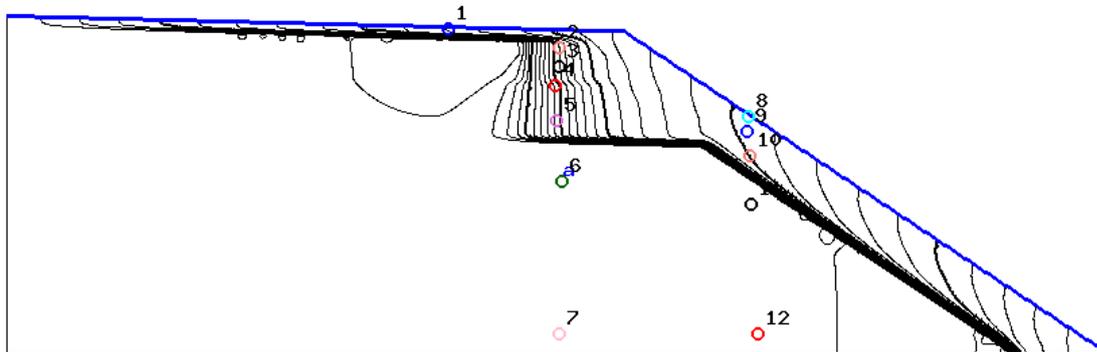


Abbildung 6.103: Strömungslinien im Modell E2c-1_2.35 nach 380 Tagen

In Abbildung 6.104, Abbildung 6.105 und Abbildung 6.106 sind die die in den Dammkern infiltrierenden Sickerwassermengen sowie die zugehörigen aus dem Buml ausfließenden Wassermengen für die Modelle E2b-1, E2c-1 und E2d-1 unter Berücksichtigung der in Abschnitt 6.5.1 beschriebenen Keile am Dammfuß dargestellt. Aus den Diagrammen geht hervor, dass durch den Einbau eines Keils im Fußbereich des Dammkerns die Sickerwassermengen im Buml verringert werden. Die Abbildung 6.104 zeigt den Infiltrationsverlauf in den Buml und die zugehörigen Ausflusskurven für das Modell E2b-1_2.35 ohne eingefügten Keil und für die Keilformen 1 und 2. Die entsprechenden Diagramme für die Modelle E2c-1_2.35 und E2d-1_2.35 sind in Abbildung 6.105 und in Abbildung 6.106 dargestellt.

In der Tabelle 6.21 sind die in das Buml infiltrierenden Sickerwassermengen im stationären Zustand bei Einbau der Keile 1 und 2 im Verhältnis zur Infiltrationsmenge für den Fall, dass kein Keil im Buml vorgesehen ist, aufgeführt. Es stellt sich heraus, dass bei Einbau eines Keils die Infiltrationsmenge in den Buml mit abnehmender Durchlässigkeit des Kernmaterials im Verhältnis zur Sickerwassermenge ohne Keil ebenfalls abnimmt. Auch gibt es einen Unterschied der Infiltration zwischen den Keilformen 1 und 2. Erwartungsgemäß infiltriert bei der größeren Keilform 2 weniger Sickerwasser in den Buml als bei der kleineren Keilform 1.

	ohne Keil	Keil 1	Keil 2
Modell E2b-1_2.35	100 %	86,2 %	77,4 %
Modell E2d-1_2.35	100 %	72,5 %	62,7 %
Modell E2c-1_2.35	100 %	49,9 %	45,2 %

Tabelle 6.21: Infiltrationsmengen in den Buml bei Einbau von Keil 1 und 2 im Verhältnis zur ohne Keil anfallenden Infiltrationsmenge

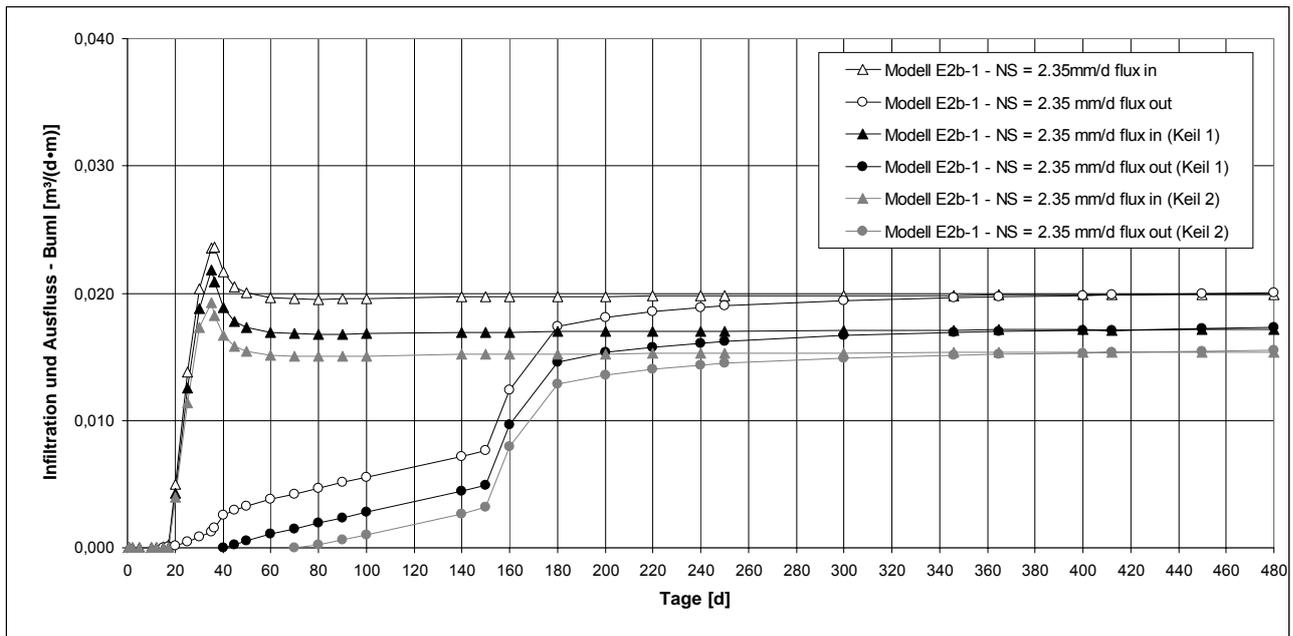


Abbildung 6.104: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für Keil 1 und Keil 2 bei Modell E2b-1_2.35

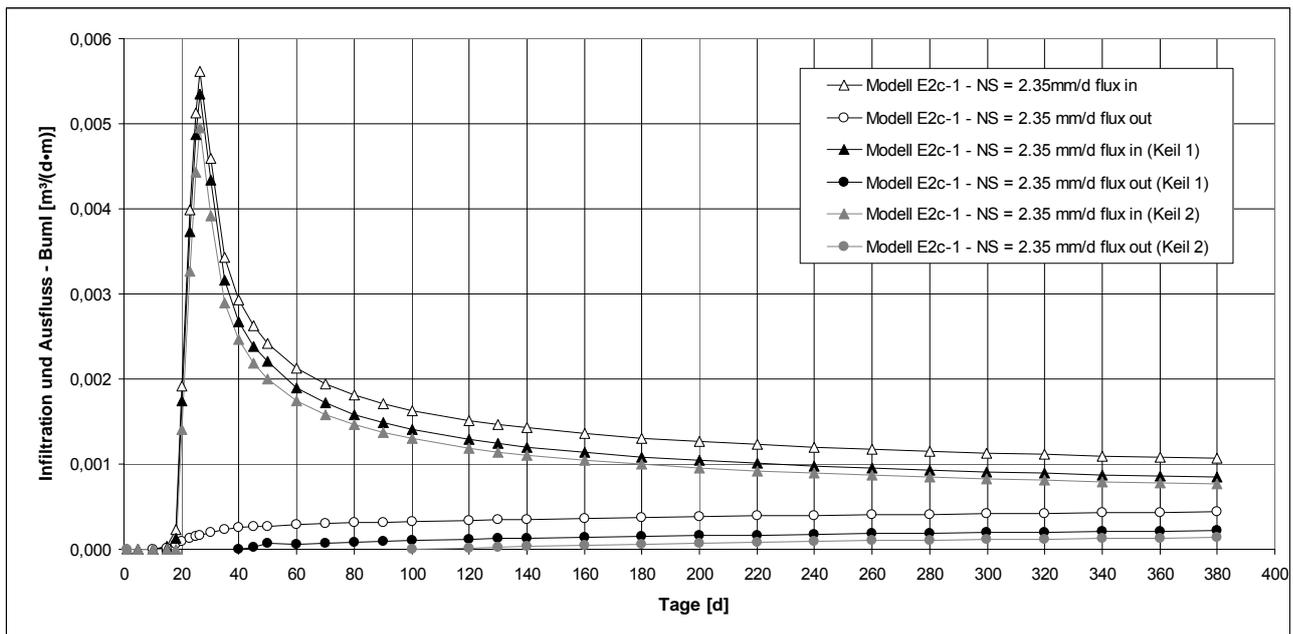


Abbildung 6.105: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für Keil 1 und Keil 2 bei Modell E2c-1_2.35

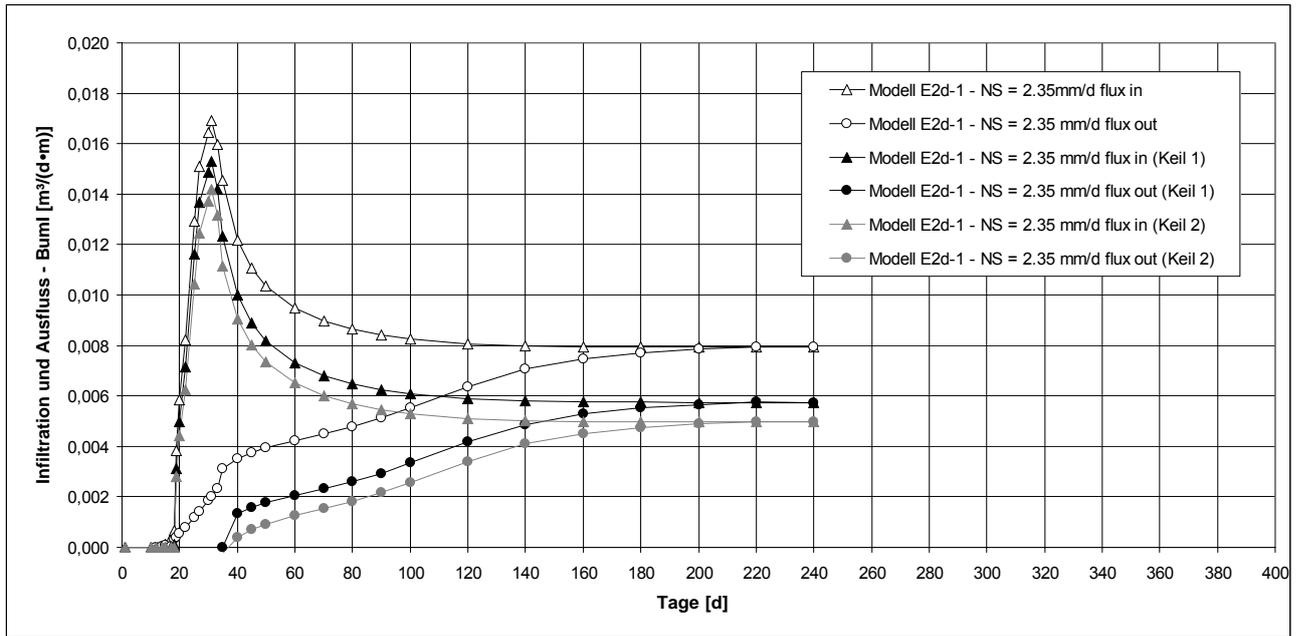


Abbildung 6.106: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für Keil 1 und Keil 2 bei Modell E2d-1_2.35

6.5.5 Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 9,4 mm/d

Das Berechnungsmodell E2b-1 zeigt für einen Niederschlag von 9,4 mm/d im Kronenbereich bzw. 7,82 mm/d auf der Böschung die in Abbildung 6.107 dargestellte Infiltration in den BumI mit zugehörigem Sickerwasserausfluss aus dem BumI. Zum Berechnungsende nach 45 Tagen hat sich noch kein stationärer Zustand eingestellt. Die Infiltrationsmenge in den BumI bleibt für Modell E2b-1_9.4 ab einem Zeitpunkt von etwa 30 Tagen jedoch konstant bei 0,025 m³/(d·m).

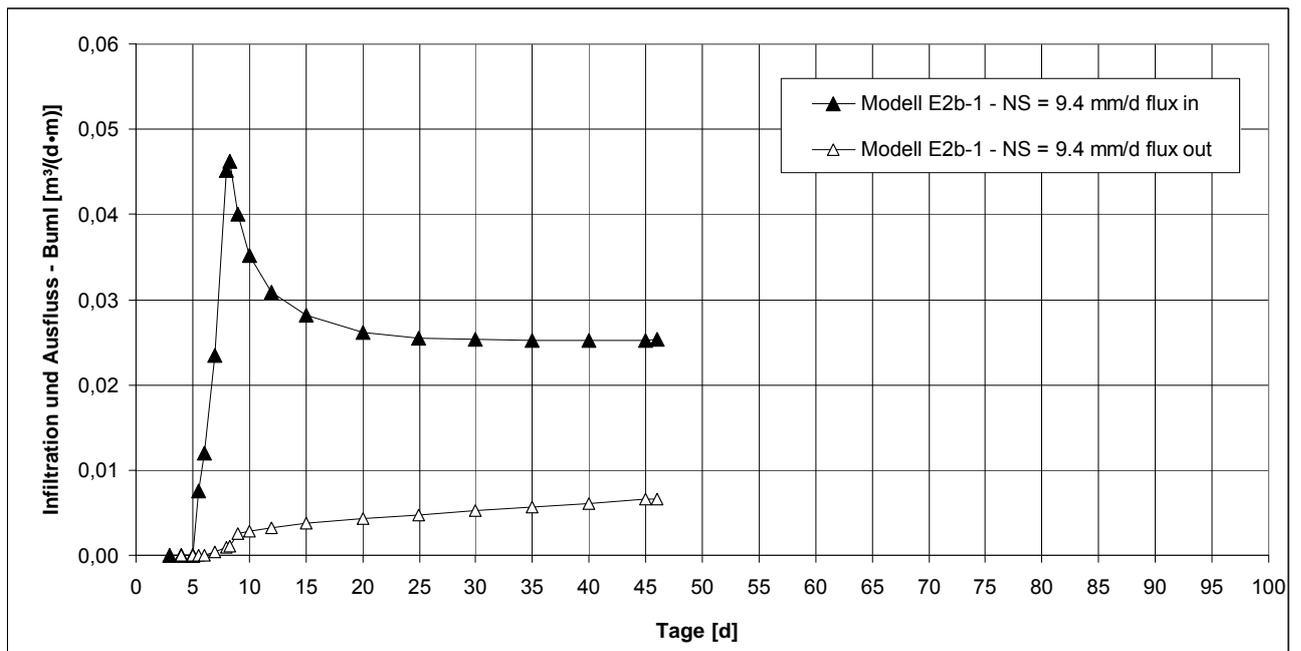


Abbildung 6.107: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für Modell E2b-1_9.4

In Abbildung 6.108 ist die Verteilung des Sättigungsgrades für das Modell E2b-1_9.4 nach 45 Tagen dargestellt. Anhand der Form des rot dargestellten, gesättigten Bereiches ist zu erkennen, dass der Buml noch im Aufsättigungsprozess begriffen ist. Die aus dem Buml ausströmenden Wassermengen sind deshalb noch deutlich geringer als die in den Buml einströmenden. An den in Abbildung 6.109 dargestellten Strömungslinien ist zu erkennen, dass ein Großteil des aus dem Bankett anfallenden Sickerwassers in der Sickerschicht weiter fließt und anschließend größtenteils in der über dem Buml liegenden Sickerschicht abgeführt wird.

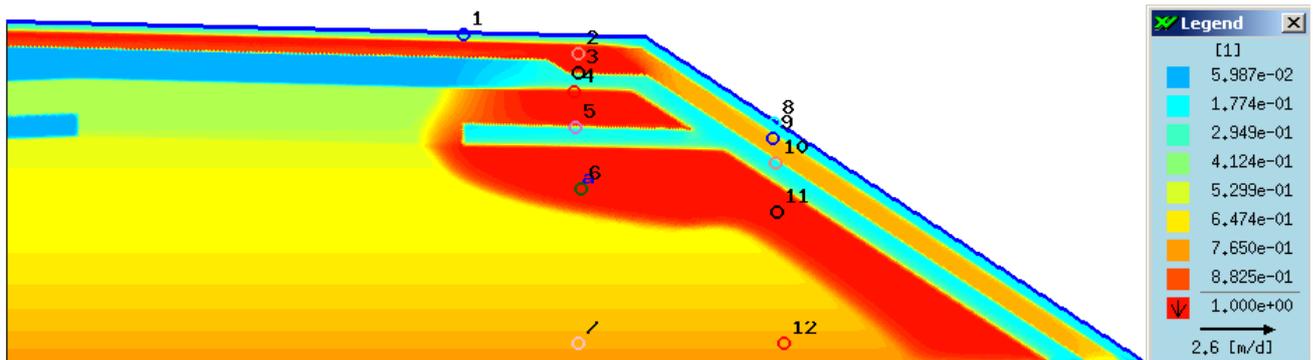


Abbildung 6.108: Verteilung des Sättigungsgrades nach 45 Tagen für Modell E2b-1_9.4

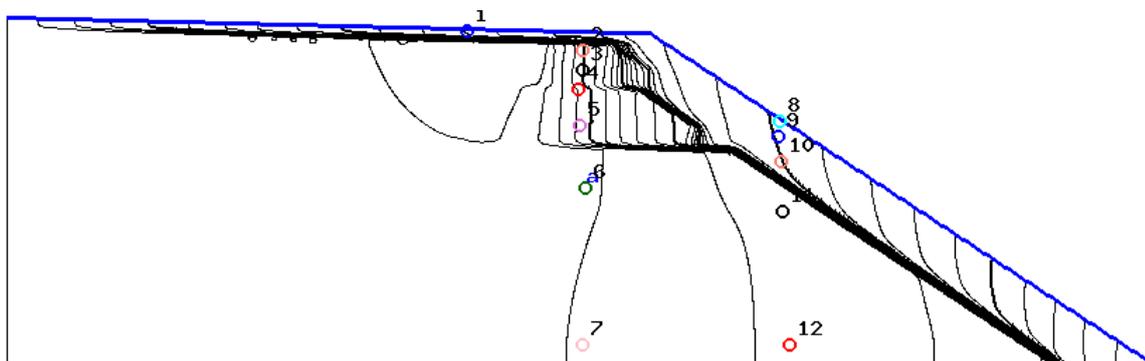


Abbildung 6.109: Strömungslinien im Modell E2b-1_9.4 nach 45 Tagen

Mit einem simulierten Niederschlag von 9,4 mm/d wurde für das Modell E2b-1 außerdem eine Berechnung mit einer Saugspannung von 2,2 kPa als Anfangsbedingung durchgeführt. Die Abbildung 6.110 zeigt die Verläufe der in den Buml einströmenden Sickerwassermenge und der aus dem Buml ausströmenden Sickerwassermenge. Zusätzlich sind auch die entsprechenden Kurven für den Fall, dass kein Niederschlag auftritt, dargestellt. Es ist zu erkennen, dass auch für den Umstand, dass kein Niederschlag auftritt, Sickerwasser in den Buml ein- und aus dem Buml ausströmt. Dies bedeutet, dass sich das Modell bei dieser Definition der Anfangsbedingung wie bereits in Abschnitt 5.5 beschrieben zu Beginn der Berechnung nicht im Gleichgewicht befindet. Die zu Beginn im gesamten Modell vorherrschende Saugspannung von 2,2 kPa liegt in weiten Bereichen unterhalb der aufgrund der geodätischen Höhe sich im Gleichgewichtszustand ohne Niederschlag einstellenden Saugspannungen. Im Fall, dass kein Niederschlag auftritt, kommt es deshalb in großen Bereichen des Modells zu einer Wasserabgabe. Falls wie simuliert ein Niederschlag von 9,4 mm/d angesetzt wird, wird aufgrund des zu Beginn höheren Sättigungsgrades der einzelnen Schichten dem Buml schneller Wasser zugeführt als dies bei einer Anfangsbedingung $\psi_h = -1\text{m}$ der

Fall ist (siehe Abbildung 6.107). Dementsprechend wird der Maximalwert der Infiltrationsrate bereits nach ca. 3 Tagen erreicht. Entsprechend den in Abbildung 6.110 dargestellten Infiltrations- und Ausflussraten scheint sich nach bereits 50 Tagen ein stationärer Zustand einzustellen. Betrachtet man allerdings die Verteilung des Sättigungsgrades in Abbildung 6.111 ist zu erkennen, dass der Sättigungsgrad im Dammbaumaterial und im BumI unterhalb der Fahrbahn noch oberhalb des im stationären Zustand zu erwartenden Wertes liegt. Ein stationärer Zustand liegt deshalb noch nicht vor; bei einer Fortführung der Berechnung könnte der Sickerwasserausfluss deshalb die Infiltrationsrate sogar übersteigen.

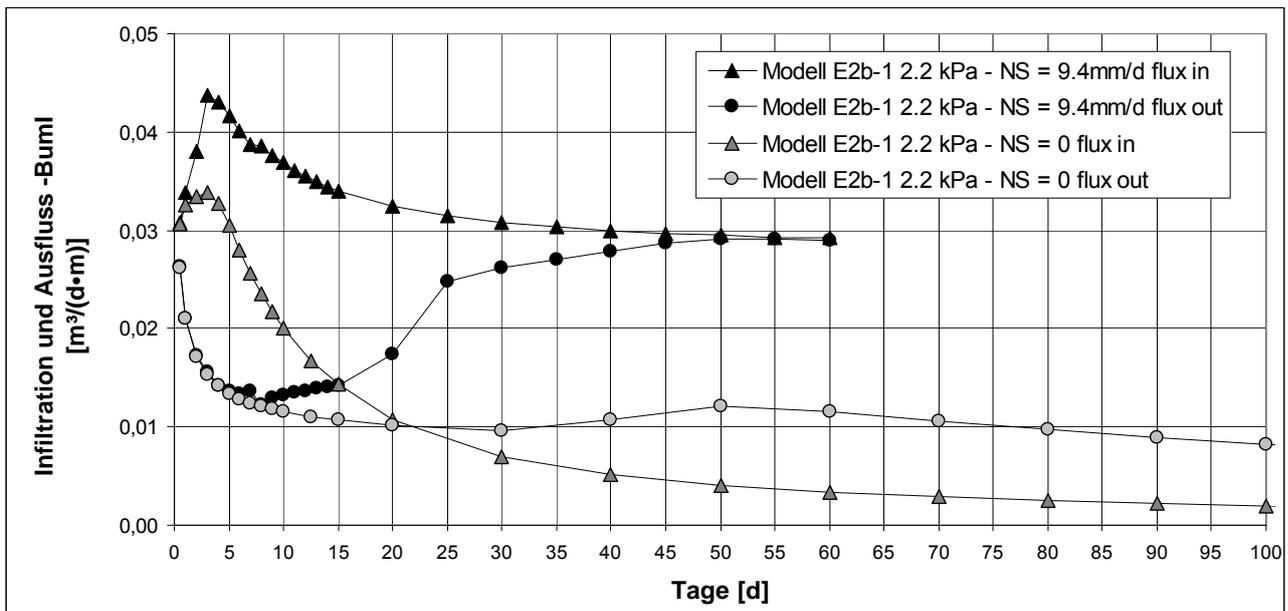


Abbildung 6.110: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für Modell E2b-1 bei der einer Saugspannung von 2,2 kPa als Anfangsbedingung und bei den Niederschlägen 9,4 mm/d und 0 mm/d

In Abbildung 6.112 sind die Strömungslinien nach 60 Tagen für das Modell E2b-1_9.4 bei der vorgegebenen Saugspannung von 2,2 kPa als Anfangsbedingung dargestellt. Das Strömungsbild unterscheidet sich nicht wesentlich von dem für das Modell E2b-1_9.4 mit der Anfangsbedingung $\psi_h = -1m$ (siehe Abbildung 6.109).

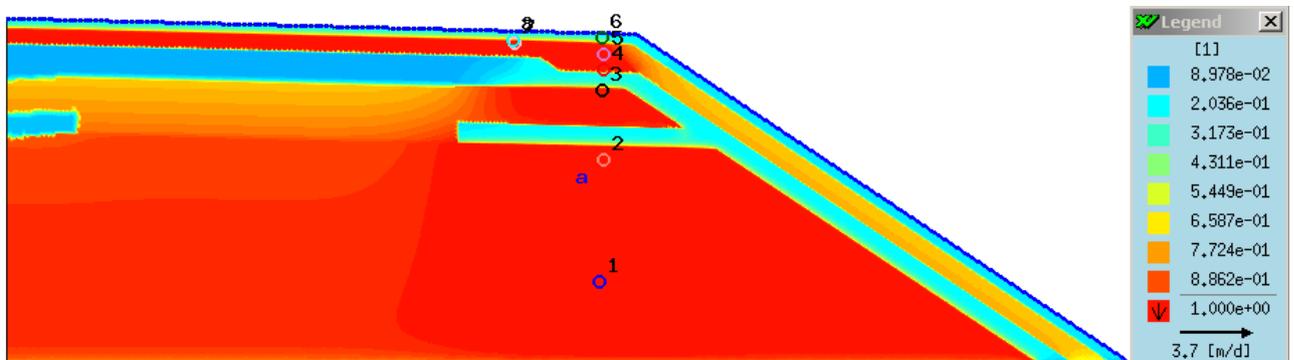


Abbildung 6.111: Verteilung des Sättigungsgrades nach 60 Tagen für Modell E2b-1_9.4 bei der vorgegebenen Saugspannung von 2,2 kPa

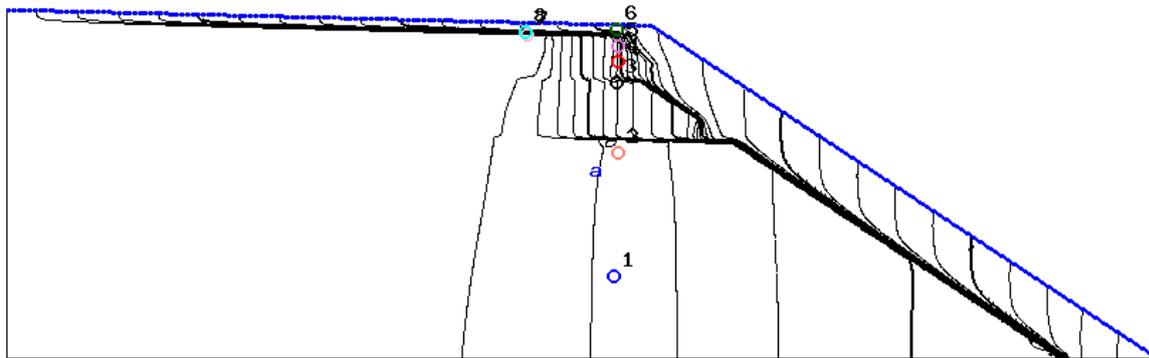


Abbildung 6.112: Strömungslinien im Modell Eb2-1_9.4 nach 60 Tagen bei der vorgegebenen Saugspannung von 2,2 kPa als Anfangsbedingung

6.5.6 Sickerwassermengen bei einem simulierten Niederschlag von 23,5 mm/d

Für das Modell E2b-1 wurde eine Berechnung mit einem simulierten Niederschlag von 23,5 mm/d im Kronenbereich bzw. 19,55 mm/d auf der Böschung durchgeführt. Mit einem zeitlich vertretbaren Rechenaufwand konnte dabei jedoch kein stationärer Fließzustand erreicht werden. In Abbildung 6.113 ist der Infiltrationsverlauf in den BumI und der dazugehörige Verlauf der aus dem BumI ausfließenden Sickerwassermenge dargestellt. Die Infiltrationskurve steigt wie bereits in Abschnitt 6.5.4 beschrieben nach wenigen Tagen auf einen Maximalwert an und fällt anschließend auf einen im stationären Zustand konstanten Wert ab. Für den stationären Zustand kann eine Infiltrationsmenge von etwa $0,03 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ abgeschätzt werden.

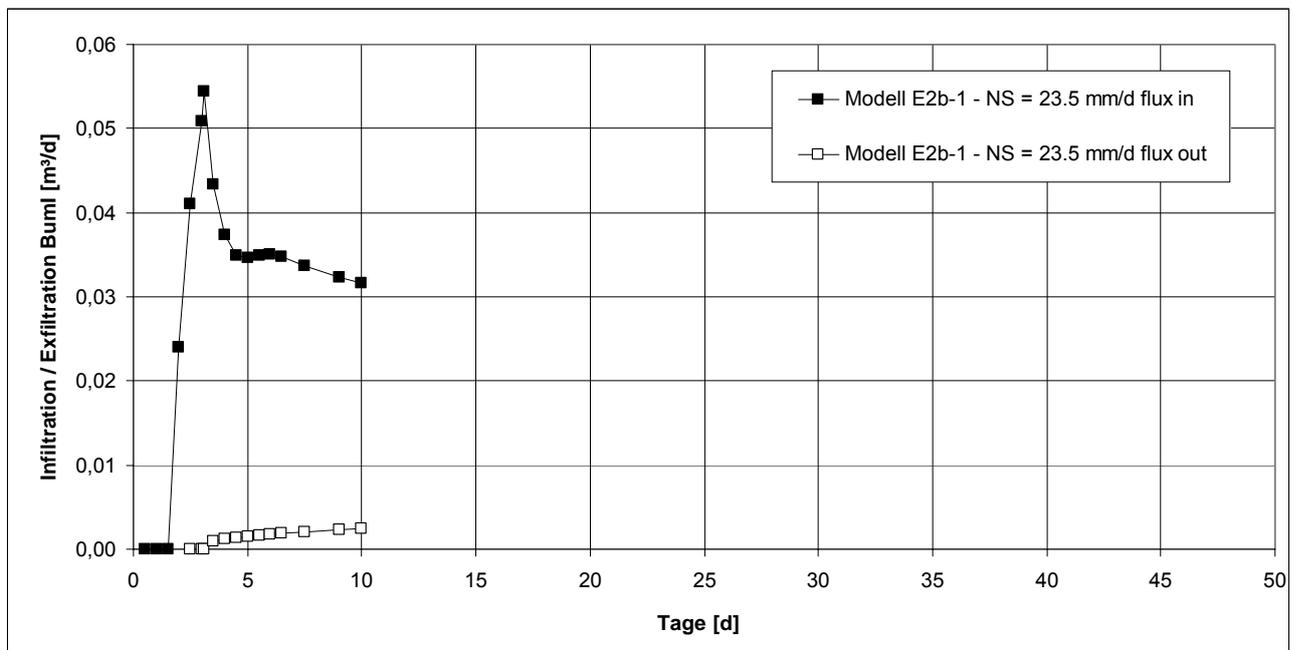


Abbildung 6.113: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für Modell E2b-1_23.5

In Abbildung 6.114 ist die Verteilung des Sättigungsgrades für das Modell E2b-1_9.4 nach 10 Tagen dargestellt. Der Bereich unterhalb der Sickerschicht ist bereits deutlich sichtbar wasser-

gesättigt. Wie die Strömungslinien in Abbildung 6.115 zeigen, wird bei einem Niederschlag von 23,5 mm/d ein Großteil des in den Damm infiltrierenden Sickerwassers in der auf dem BumI gelegenen Sickerschicht abgeführt.

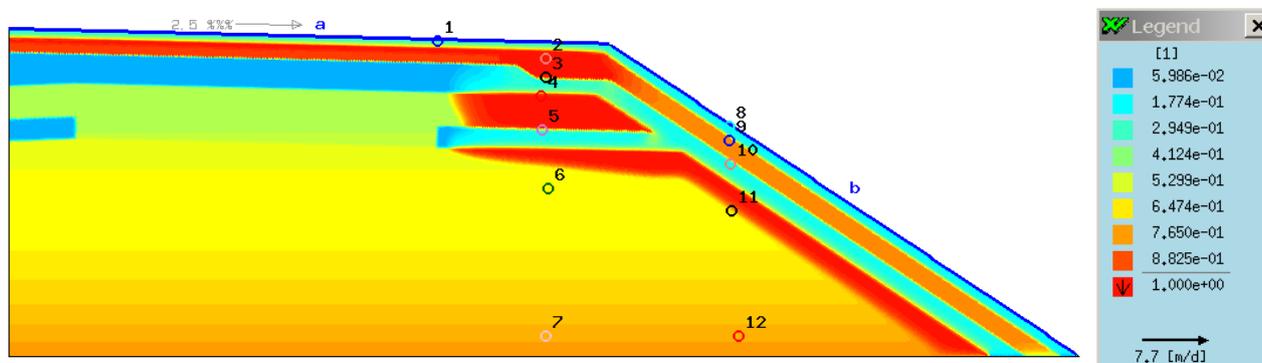


Abbildung 6.114: Verteilung des Sättigungsgrades nach 10 Tagen für Modell E2b-1_23.5

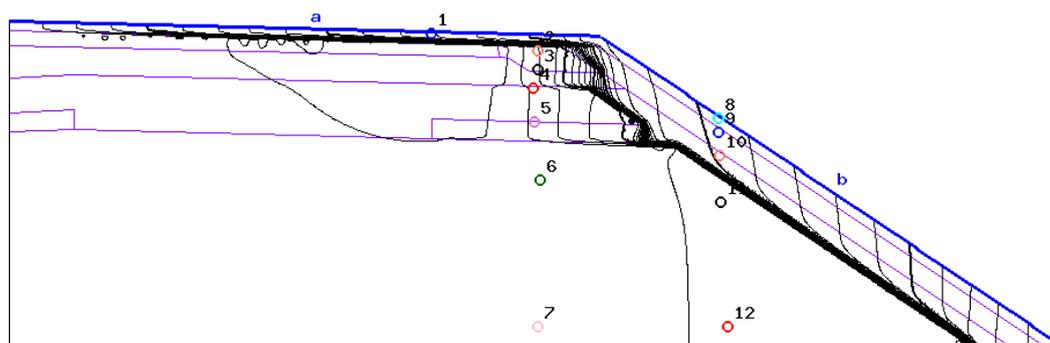


Abbildung 6.115: Strömungslinien im Modell E2b-1_23.5 nach 10 Tagen

6.5.7 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse – Modell E

In Abbildung 6.116 sind die Infiltrationsverläufe in den BumI für das Modell E2b-1 bei den Niederschlägen 2,35 mm/d, 9,4 mm/d und 23,5 mm/d dargestellt. Es zeigt sich zum einen, dass mit zunehmender Niederschlagsintensität die Infiltration in den BumI zeitlich früher einsetzt und zum anderen ist erkennbar, dass die Infiltrationsmengen in den BumI im stationären Fließzustand, auch wenn dieser beim Niederschlag von 23,5 mm/d nicht erreicht wurde, zunehmen. Die Infiltrationsmengen in den BumI im stationären Fließzustand betragen bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d etwa $0,02 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ und bei einem Niederschlag von 9,4 mm/d etwa $0,025 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$. Aus einer Extrapolation der Simulationsergebnisse kann die Infiltrationsmenge in den BumI bei einem Niederschlag von 23,5 mm/d etwa zu $0,03 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ abgeschätzt werden.

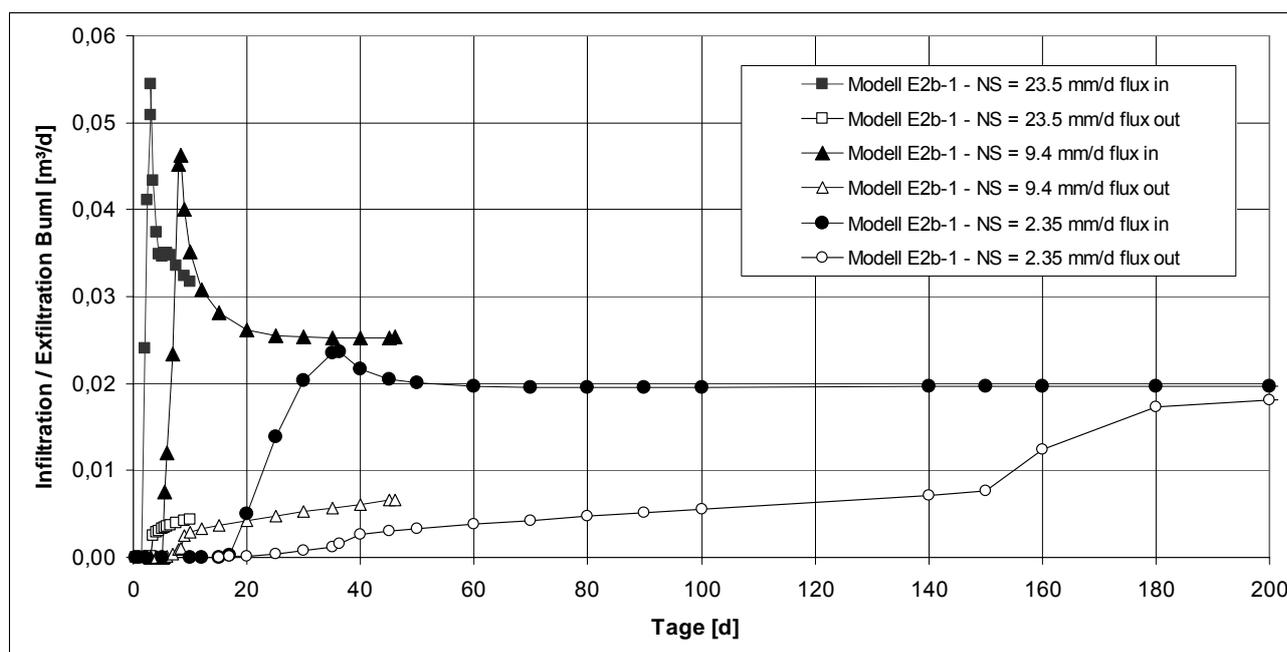


Abbildung 6.116: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für Modell E2b-1 bei den Niederschlägen 2,35 mm/d, 9,4 mm/d und 23,5 mm/d

Werden die in den BumI einströmenden Sickerwassermengen auf den Niederschlag bezogen, so ergibt sich die Darstellung in Abbildung 6.117. Es zeigt sich, dass die Infiltrationsmengen in den BumI mit kleiner werdendem Durchlässigkeitsbeiwert des BumI abnehmen. Für das Modell E2c-1_2.35, bei dem der BumI als organischer Ton mit einem sehr kleinen Durchlässigkeitsbeiwert von $k_f = 1 \cdot 10^{-9}$ m/s modelliert wurde, wird die geringste Infiltration mit 2,8 % des Niederschlages ermittelt. Im Modell E2d-1 weist der dem BumI zugrunde gelegte Ton einen k_f -Wert von $1 \cdot 10^{-8}$ m/s auf. Dabei erhöhen sich im Vergleich zum Modell E2c-1_2.35 die Sickerwassermengen bei einem dauerhaften Niederschlag von 2,35 mm/d auf 20,9 % des Niederschlages. In den Modellen E2a und E2b-1 wurde der BumI jeweils als Su4 mit einem Durchlässigkeitsbeiwert $k_f = 1 \cdot 10^{-7}$ m/s simuliert. Dabei ergeben sich für die Infiltrationsmengen in den BumI die höchsten Werte. In Modell E2a_2.35 infiltriert mit 49,8 % vom Niederschlag etwas weniger Sickerwasser als bei Modell E2b-1_2.35, bei dem die Sickerwassermenge 52,4 % des Niederschlages beträgt. Der Unterschied in der Infiltrationsmenge basiert wie in Abschnitt 6.5.4 beschrieben auf den unterschiedlichen Materialien im Dammbaustoff.

Anhand der Berechnungen für das Modell E2b-1 ist zu sehen, dass die Infiltrationsmengen in den Kern im Verhältnis zum aufgebrachtten Niederschlag mit steigender Niederschlagsintensität kleiner werden. Während beim Niederschlag von 2,35 mm/d mehr als 50 % des Niederschlages in den BumI einströmen, dringen bei einem Niederschlag von 9,4 mm/d nur noch 16,7 % und bei einem Niederschlag von 23,5 mm/d nur noch 8,4 % des Niederschlages ein.

Außerdem ist aus dem Diagramm zu erkennen, dass sich der Einbau eines Keils im Dammfuß des Kerns wie in Abbildung 6.85 und Abbildung 6.87 dargestellt positiv auf die das BumI durchströmenden Sickerwassermengen auswirkt. Das heißt, die Infiltrationsmengen in den BumI und damit auch die Ausflussmengen im stationären Zustand werden durch den Einbau eines Keils bei

allen Modellen reduziert. Anhand des Modells E2b-1 ist allerdings zu erkennen, dass die positive Wirkung des Keils mit zunehmender Niederschlagsintensität abnimmt.

Die Berechnungsergebnisse zum jeweiligen Berechnungsende sind in für die Modelle der Bauweise E in Anlage 1.4, Blatt 1 bis 13, zusammengefasst.

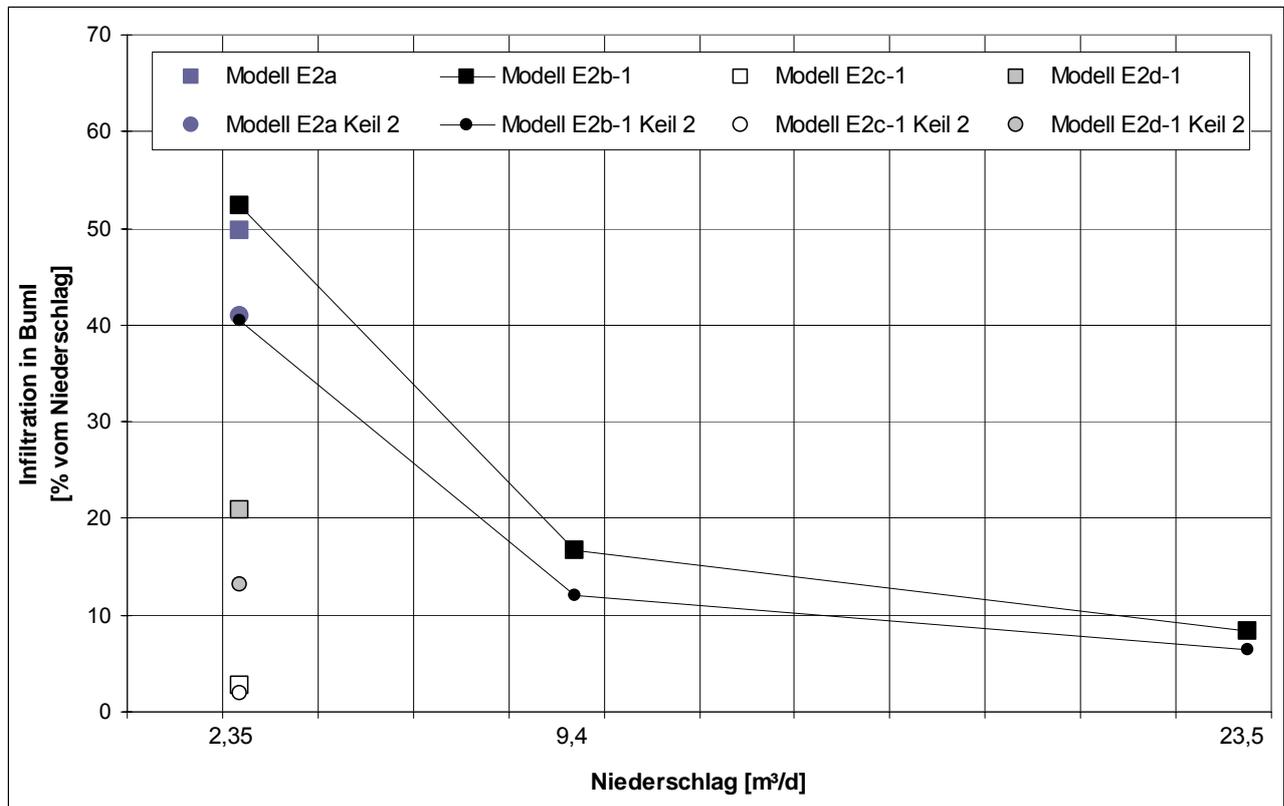


Abbildung 6.117: auf den Niederschlag bezogene Infiltration in BumI in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge bei den Modellen E2a, E2b-1, E2c-1 und E2d-1 mit Keil 2 und ohne Keil

6.6 Modellvergleich

In Abbildung 6.118 sind für die Modelle A, B, D und E die in den BumI im stationären Fließzustand einströmenden Wassermengen in Bezug auf den simulierten Niederschlag dargestellt. Es zeigt sich, dass die bezogenen Infiltrationsmengen mit zunehmendem Niederschlag abnehmen. Eine Ausnahme stellt das Modell A2b_23.5 dar wie aus Abbildung 6.118 hervorgeht. Da nicht für alle Modelle Berechnungen mit den Niederschlägen 9,4 mm/d und 23,5 mm/d durchgeführt wurden, werden zur besseren Übersichtlichkeit in Abbildung 6.119 die sich bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d im stationären Fließzustand einstellenden Sickerwassermengen in den BumI für alle Modelle dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass für fünf Modelle eine sehr geringe bezogene Infiltration kleiner als 3 % ermittelt wurde. Bei diesen handelt es sich um die Modelle A2a, B2-1, D2a-1, D2b-1 und E2c-1. Die Modelle A2a, B2-1 und E2c-1 weisen sehr starke Ähnlichkeiten auf. Dadurch dass der Dammbaustoff im Modell A2a als schwach schluffiger Kies modelliert wurde, übernimmt er eine dränierende

Funktion ähnlich der Sickerschicht im Modell B. Damit entspricht das Modell A2a formell der Bauweise B, wobei der Durchlässigkeitsbeiwert der Dichtungsschicht im Vergleich zur Bauweise B mit $k_f = 5 \cdot 10^{-10}$ m/s um den Faktor 10 reduziert ist. Dieser Unterschied im Durchlässigkeitsbeiwert wirkt sich jedoch nicht nennenswert auf die sich einstellenden Infiltrationsmengen aus. Die rechnerisch ermittelten geringen Sickerwassermengen in den Buml resultieren im Wesentlichen aus einem kapillaren Wassertransport in der Kiesschicht und einer Wasserabgabe an den Buml im Bereich unterhalb der Fahrbahn, in dem keine Dichtungsschicht über dem Buml angeordnet ist. Ein ähnliches Verhalten ist in deutlich stärkerer Ausprägung auch beim Modell A2b-1 zu erkennen. Trotz einer sehr gering durchlässigen Dichtungsschicht mit einem k_f -Wert von $k_f = 5 \cdot 10^{-10}$ m/s stellt sich im Vergleich zu den Modellen A2a und B2-1 eine auffallend hohe bezogene Infiltrationsmenge von ca. 10 % ein. Diese resultiert aus den Eigenschaften des Dammbaumaterials, die in den Rechenmodellen zu einem kapillaren Wassertransport in die unterhalb der Fahrbahn gelegenen Bereiche führen. Da dort keine Dichtungsschicht vorliegt, kommt es zu einer Wasserabgabe vom Dammbaumaterial an den Buml. Bei einem Niederschlag von 23,5 mm/d erhöht sich die auf die Gesamtniederschlagsmenge bezogene Infiltrationsmenge in den Buml für das Modell A2b auf etwa 25 %. Dies resultiert aus einem Aufstau des aus dem Bankett anfallenden Sickerwassers in der Frostschuttschicht, wodurch es zu einer Durchsickerung des Dammbaustoffes unterhalb der Fahrbahn hinter der mineralischen Dichtungsschicht kommt.

Das Modell E2c-1 entspricht formell ebenfalls der Bauweise B, da dem gering durchlässigen Buml ein gesättigter Durchlässigkeitsbeiwert $k_f = 1 \cdot 10^{-9}$ m/s zugrunde gelegt wurde. Dieser Wert ist sogar noch etwas geringer als der bei Bauweise B für die Dichtungsschicht geforderte Wert von $k_f = 5 \cdot 10^{-9}$ m/s. Dementsprechend stellen sich bei diesem Modell ähnlich geringe Sickerwassermengen wie beim Modell B2-1 ein.

Für die Modelle D2a-1 und D2b-1 wurden ebenfalls sehr geringe Sickerwassermengen in den Buml ermittelt. Diese beruhen im Wesentlichen auf der geringen Durchlässigkeit des als Su4 simulierten Dammkerns. Auch wenn das benachbarte Stützmaterial nur einen um den Faktor 50 höheren Durchlässigkeitsbeiwert aufweist, kommt es rechnerisch zu einer sehr geringen Infiltration in den Dammkern.

Für das Modell D2c-1 wurde bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d eine bezogene Infiltrationsmenge von etwa 22 % ermittelt. Im Vergleich zu den Modellen D2a-1 und D2b-1 wurde der Dammkern beim Modell D2c-1 als schluffiger Sand (Su2) modelliert. Der benachbarte Stützkörper wurde im Modell als schwach schluffiger Kies mit einem k_f -Wert von $5 \cdot 10^{-4}$ m/s definiert und weist damit gemäß den Anforderungen nach M TS E eine um den Faktor 50 höhere Durchlässigkeit als das Kernmaterial auf. Die sich dennoch einstellenden hohen Infiltrationsmengen beruhen auf den Saugspannungs-Eigenschaften des Sandes, die ähnlich einer Kapillarsperre bei dauerhaften, geringen Niederschlagsmengen zu einem kapillaren Wassertransport im Sand führen. Für einen Niederschlag von 9,4 mm/d ergibt sich bei dem Modell D2c-1 dadurch immer noch eine Infiltrationsmenge von 9,3 % bezogen auf den Gesamtniederschlag.

Eine ebenfalls große bezogene Infiltrationsmenge von ca. 21 % wurde für das Modell E2d-1 ermittelt. Bei dieser Bauweise ohne Dichtungsschicht wurde dem Buml ein gesättigter Durchlässigkeitsbeiwert $k_f = 1 \cdot 10^{-8}$ m/s zugrunde gelegt. Aufgrund des Fehlens einer Dichtungsschicht stellt sich bei einem dauerhaften geringen Niederschlag von 2,35 mm/d eine im Vergleich zur Bauweise B hohe Sickerwassermenge in den Buml ein. In entsprechender Weise sind für die

Modelle E2a und E2b-1, bei denen dem BumI ein k_f -Wert von $k_f = 1 \cdot 10^{-7}$ m/s zugewiesen wurde, nochmals deutlich höhere Infiltrationsmengen von ca. 50 % feststellbar. Diese extrem hohen Infiltrationsmengen werden jedoch wesentlich durch die Art der den Berechnungen zugrunde gelegten Randbedingung eines konstanten Niederschlages von 2,35 mm/d verursacht. Infolge dieser Randbedingung werden dem BumI über die Sickerschicht kontinuierlich sehr geringe Sickerwassermengen zugeführt. Diese sind so gering, dass sie vom BumI bei Vorliegen eines gesättigten k_f -Wertes von $k_f = 1 \cdot 10^{-7}$ m/s fast vollständig aufgenommen werden. Im Falle von dauerhaft höheren Niederschlägen dagegen wird ein Großteil des Sickerwassers in der auf dem BumI gelegenen Sickerschicht abgeführt (siehe Abbildung 6.118). Die Ausbildung eines Keiles am Dammfuß aus nicht belastetem Material führt zu einer deutlichen Reduzierung der Sickerwassermengen in den BumI wie aus Abbildung 6.119 zu erkennen ist.

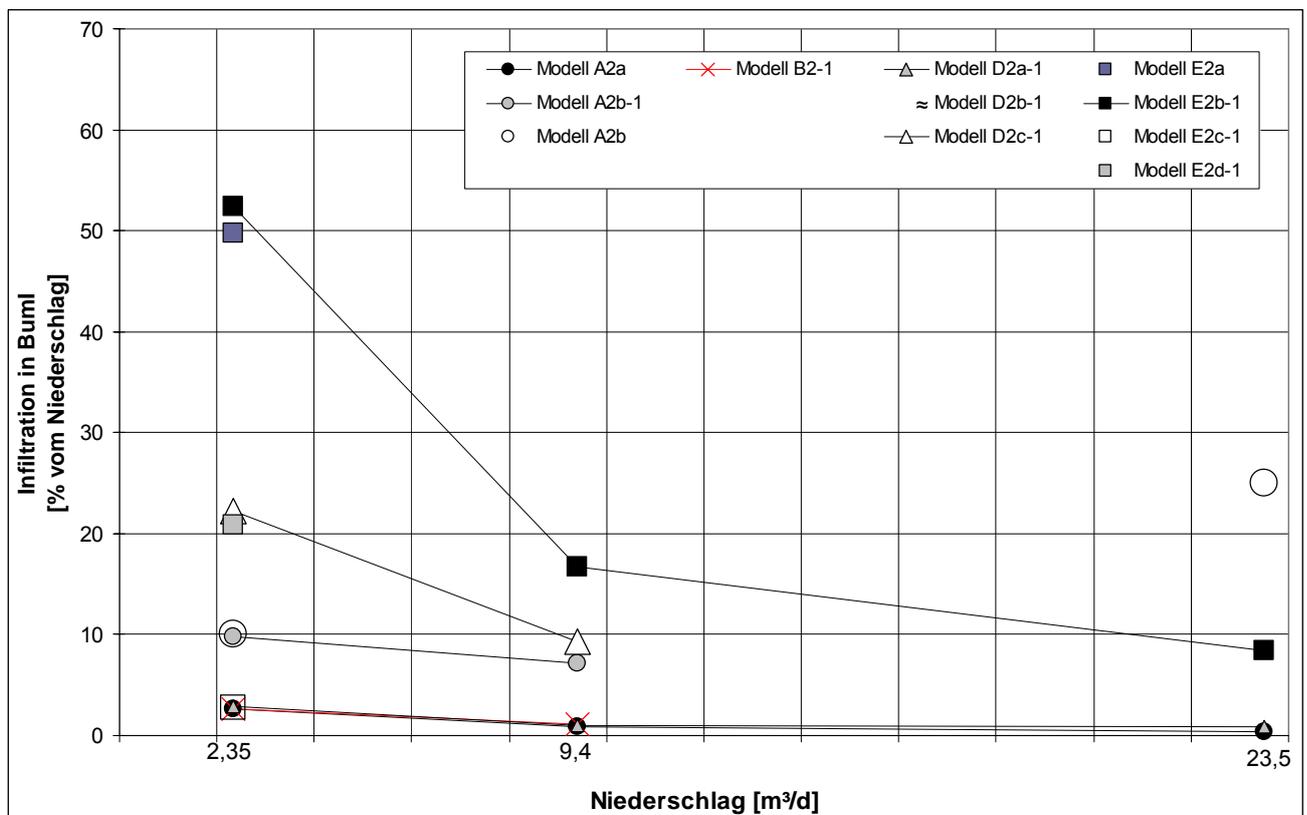


Abbildung 6.118: auf den Niederschlag bezogene Infiltration in BumI im stationären Fließzustand für die Modelle A, B, D und E

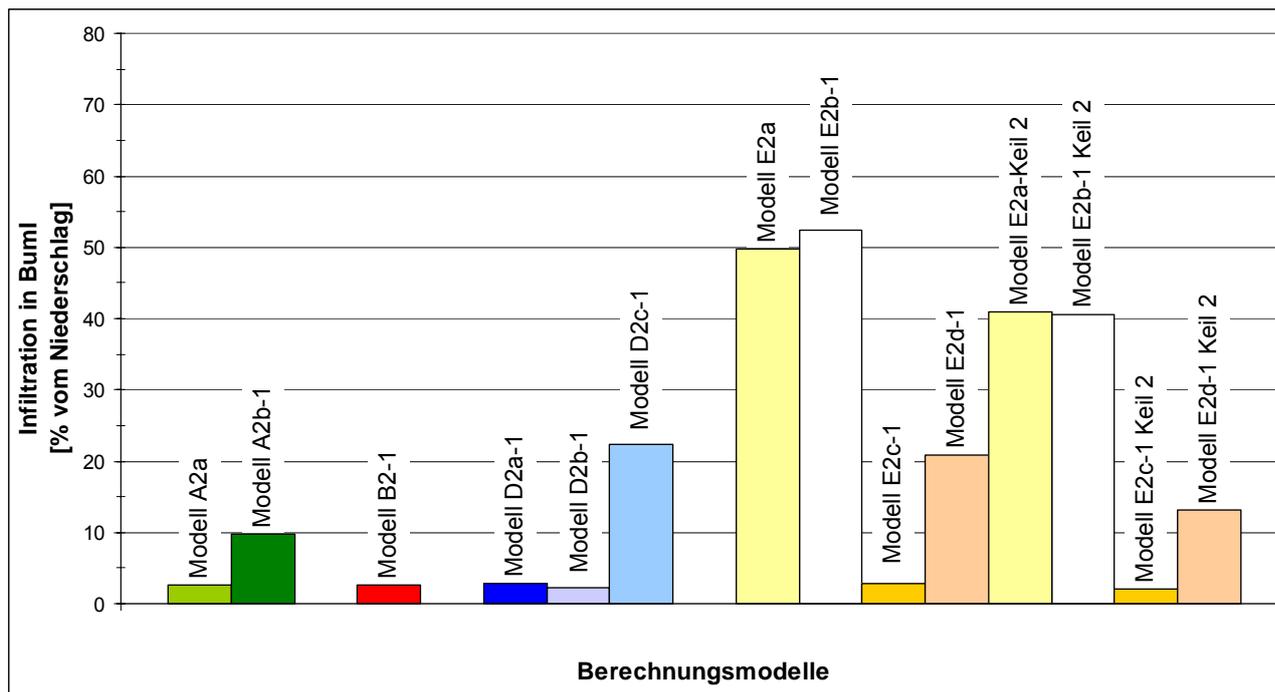


Abbildung 6.119: auf den Niederschlag bezogene Infiltration in Buml im stationären Fließzustand für die Modelle A, B, D und E bei einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d

Sickerwasseraustritte aus dem BumI in den Untergrund verbunden sind. Diese Fragestellung könnte anhand von Berechnungen mit zeitlich variablen Randbedingungen (Wechsel von trockenen und nassen Phasen) unter Berücksichtigung der Evapotranspiration näher untersucht werden.

Bauweise E

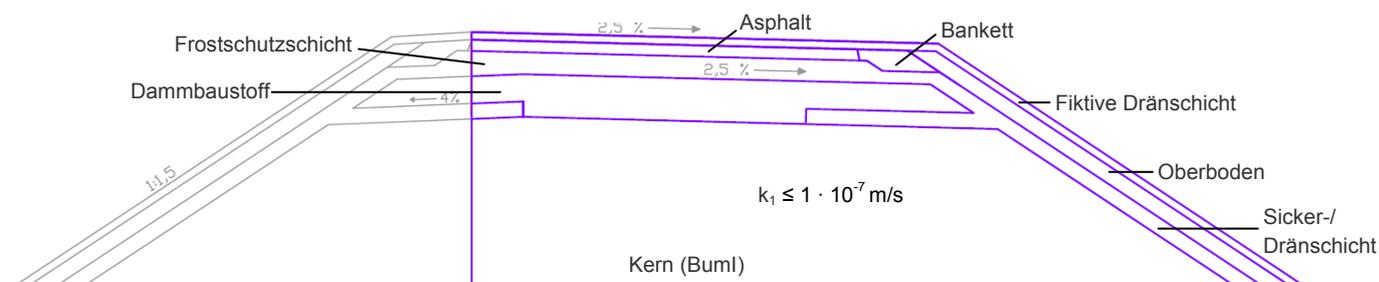


Abbildung 7.4: Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus BumI

Bei der Bauweise E wird der Damm als gering durchlässiger Baukörper unter Verzicht einer Dichtungsschicht erstellt (siehe Abbildung 7.4). Der gering durchlässige Boden mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen soll nach M TS E einen Durchlässigkeitsbeiwert $k_f \leq 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ aufweisen. Die an der Bauweise E durchgeführten Berechnungen ergeben für den Fall, dass der BumI einen Durchlässigkeitsbeiwert $k_f = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ besitzt, sehr große Sickerwassermengen. Bei einer Durchlässigkeit des BumIs von $k_f = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ nehmen die Sickerwassermengen bereits stark ab, liegen aber noch deutlich über den bei der Bauweise B zu erwartenden Werten.

Die bisher ermittelten Sickerwassermengen werden jedoch wesentlich durch die Art der den Berechnungen zugrunde gelegten Randbedingungen beeinflusst. Durch die Definition eines konstanten Niederschlages von 2,35 mm/d kommt es zu einem kontinuierlichen, sehr geringen Sickerwasserzufluss in die oberhalb des BumIs gelegene Sickerschicht. Bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d ist diese Sickerwassermenge so gering, dass sie vom BumI bei Vorliegen eines gesättigten k_f -Wertes von $k_f = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ fast vollständig aufgenommen wird. Außerdem wurde in den bisherigen Berechnungen nicht berücksichtigt, dass der Damm in trockenen Phasen Wasser infolge von Evapotranspiration wieder abgeben kann. Es ist deshalb zweifelhaft, ob es in der Realität wie in den Berechnungsmodellen geschehen zu einer Aufsättigung großer Bereiche des Dammes und einem anschließenden Sickerwasseraustritt an der Dammunterseite kommt. Eine abschließende Bewertung dieser Bauweise ist auf Grundlage der durchgeführten Berechnungen deshalb nicht möglich. Dazu sollten Berechnungen mit zeitlich variablen Randbedingungen (Wechsel von trockenen und nassen Phasen) unter Berücksichtigung der Evapotranspiration durchgeführt werden.

8 Zusammenfassung

Im vorliegenden Forschungsbericht wurden Berechnungen zur Untersuchung der Wirksamkeit verschiedener Bauweisen zur technischen Sicherung von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau vorgestellt. Dabei wurden zunächst die im Merkblatt über Bauweisen für Technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau (M TS E) dargestellten Bauweisen vorgestellt.

Zur Untersuchung der Wirksamkeit wurden numerische Berechnungen mit dem Strömungssimulator FEFLOW durchgeführt. Zur Erstellung der FE-Modelle mussten die in M TS E dargestellten Bauweisen unter Berücksichtigung des Straßenaufbaus zunächst mit Daten unterlegt werden. Anschließend konnten die FE-Modelle erstellt und Rand- und Anfangsbedingungen definiert werden. Anhand von Voruntersuchungen wurde zunächst der Einfluss unterschiedlicher Materialien im Bereich des Straßenaufbaus (Bankett und Oberboden) analysiert.

Auf Grundlage der Voruntersuchungen wurde eine Situation des Straßenaufbaus definiert, mit der anschließend die weiteren Berechnungen zur Ermittlung der bei den verschiedenen Bauweisen zu erwartenden Sickerwassermengen durchgeführt wurden. Anhand einer Vielzahl von Berechnungen wurden dabei verschiedene Szenarien im Hinblick auf die auftretenden Niederschläge und die den verschiedenen Schichten zugrunde liegenden Bodenkennwerte untersucht. Zur Ermittlung der Wirksamkeit der verschiedenen Bauweisen wurden die in die Böden und Baustoffe mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen ein- und ausströmenden Wassermengen für die einzelnen Modelle analysiert. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten wurde dabei jeweils der stationäre Fließzustand betrachtet. Aufgrund des teilweise sehr hohen Berechnungsaufwandes konnte dieser nicht in allen Modellberechnungen erreicht werden. In diesem Fall wurden die im stationären Zustand zu erwartenden Sickerwassermengen aus den vorhandenen Daten extrapoliert.

Durch einen Vergleich der bei den verschiedenen Bauweisen zu erwartenden Sickerwassermengen konnten die im Merkblatt über Technische Sicherungsmaßnahmen (M TS E) dargestellten Bauweisen bewertet werden. Die Ursachen für die bei einzelnen Bauweisen ermittelten vergleichsweise hohen Wassermengen wurden dabei diskutiert und mögliche konstruktive Maßnahmen dargestellt. Es konnten dabei jedoch nicht alle Bauweisen abschließend bewertet werden.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die tatsächlichen Verhältnisse mit den in den Berechnungen definierten zeitlich konstanten Niederschlägen nur eingeschränkt wiedergegeben werden. Es wird vermutet, dass die in die Böden und Baustoffe mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen infiltrierenden Sickerwassermengen damit zum Teil erheblich überschätzt werden.

Aus diesem Grund wurde die Durchführung zusätzlicher Berechnungen mit zeitlich variablen Randbedingungen unter Berücksichtigung der Evapotranspiration empfohlen.

Literaturverzeichnis

- Benson, C.H., Bohnhoff, G.L.; Apinwantragoon, P.; Ogorzalek, A. S.; Shackelford, C. D.; Albright, W. H. (2004): Comparison of model predictions and field data for an ET cover, Tailings and Mine Waste '04, Taylor & Francis Group, London
- Beyer, W. (1964): Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve. WWT 14: 165-168, Berlin
- Brooks, R. und 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.: Ersatzbaustoffverordnung: Modellannahmen für Straßenbauwerke, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2008
- Darcy, H. (1856): Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Victor Dalmont, Paris
- Ekblad, J. und 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, p. 858-872
- Elzeftawy, A. und Cartwright, K. (1981): Evaluating the saturated and unsaturated hydraulic conductivity of soils, Permeability and groundwater contaminant transport, ASTM STP 746, T. F. Zimmie und C. O. Riggs, eds., ASTM, West Conshohocken, p. 168-181
- FGSV (2008): Merkblatt über Bauweisen für Technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau, FGSV Verlag Köln, Ausgabe 2008
- FGSV (2005): RAS-Ew, Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Entwässerung, FGSV Verlag Köln, 2005
- Grathwohl, P., Liedl, R., Beyer, C., Konrad, W., Amankwah, E.A. (2006): Übertragung der Ergebnisse des BMBF-Förderschwerpunktes „Sickerwasserpognose“ auf repräsentative Fallbeispiele (Teilprojekt 1a) – Abschlussbericht der Universität Tübingen
- Hennings, V. (2000): Methodendokumentation Bodenkunde, Auswertungsmethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden, in Geologisches Jahrbuch, Sonderheft, Reihe G, Heft 1, 2. Auflage, mit Ergänzungsseite der Verknüpfungsregel 1.18
- Heyer, D. (2001): Die Durchlässigkeit mineralischer Dichtungsstoffe unter besonderer Berücksichtigung des Sättigungsvorganges, Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der TU München, Heft 30
- LAGA, Länderarbeitsgemeinschaft Abfall, Technische Regeln für die Verwertung (2004)
- Leong E.C. und Rahardjo, H. (1997): Review of soil-water characteristic curve equations, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering , p.1106-1117
- Meerdink, J. S. et al. (1996): Unsaturated hydraulic conductivity of two compacted barrier soils, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122, No. 7, p. 565-576
- Mualem, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resources Research, Vol. 12, No. 3, p. 513-522
- RAS-Q (1996): Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Querschnitt

- RuA-StB (2005): Richtlinien für die umweltverträgliche Anwendung von industriellen Nebenprodukten und RC-Baustoffen im Straßenbau
- Scheffer und Schachtschabel (2002): Lehrbuch der Bodenkunde, Spektrum Akademischer Verlag, 15. Auflage, Heidelberg 2
- Tinjum, J.M.; Benson, C. H.; Blotz, L. R. (1997): Soil-water characteristic curves for compacted clays, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol. 123, No.11, p. 1060-1069
- 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, p. 892-898
- www.dwd.de: webside Deutscher Wetterdienst
- 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

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.1: Bodenkennwerte.....	28
Tabelle 5.2: Bodenkennwerte für die fiktive Dränschicht, die Frostschuttschicht und die Asphalttschicht.....	33
Tabelle 5.3: Übersicht über die den einzelnen Berechnungsmodellen zugrunde liegenden Bodenkennwerte	34
Tabelle 5.4: Übersicht über die untersuchten Berechnungsdauern in Tagen für die einzelnen Modelle	35
Tabelle 6.1: Bodenkennwerte für fiktive Dränschicht, Dammbaustoff, Drän- und Frostschuttschichten, Asphalt sowie BumI für die Bauweise E.....	36
Tabelle 6.2: Bodenkennwerte für Oberboden und Bankett im Modell E1a	36
Tabelle 6.3: Bodenkennwerte für Oberboden und Bankett im Modell E2a	36
Tabelle 6.4: Bodenkennwerte für Oberboden und Bankett im Modell E3a	37
Tabelle 6.5: Bodenkennwerte für Oberboden und Bankett im Modell E4a-1	37
Tabelle 6.6: Infiltrationsmenge in Bankett in Prozent vom Niederschlag über Fahrbahn und Bankett bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d.....	42
Tabelle 6.7: Infiltrationsmenge in Bankett in Prozent vom Niederschlag über Fahrbahn und Bankett bei einem Niederschlag von 9,4 mm/d.....	44
Tabelle 6.8: Infiltrationsmengen in Abhängigkeit vom Niederschlag für die Modell E1a und E3a bei einem Niederschlag von 9,4.....	45
Tabelle 6.9: Sickerwassermengen in Abhängigkeit von den Materialien in Bankett und Oberboden bei einem Niederschlag von 9,4 mm/d.....	45
Tabelle 6.10: Infiltrationsmenge in Bankett in Prozent vom Niederschlag über Fahrbahn und Bankett bei einem Niederschlag von 23,5 mm/d.....	47
Tabelle 6.11: Sickerwassermengen in Abhängigkeit von den Materialien in Bankett und Oberboden bei einem Niederschlag von 23,5 mm/d.....	48
Tabelle 6.12: Übersicht über die untersuchten Berechnungsdauern in Tagen für die einzelnen Modelle der Bauweise A	55
Tabelle 6.13: Bodenkennwerte der Modelle A2a, A2b und A2b-1	56
Tabelle 6.14: Übersicht über die untersuchten Berechnungsdauern in Tagen für die einzelnen Modelle der Bauweise A	68
Tabelle 6.15: Bodenkennwerte des Modells B2-1.....	68
Tabelle 6.16: Infiltration in BumI in Abhängigkeit vom Niederschlag für die Modelle B2-1_2.35 und B2-1_9.4	71
Tabelle 6.17: Übersicht über die untersuchten Berechnungsdauern in Tagen für die einzelnen Modelle der Bauweise D	75
Tabelle 6.18: Bodenkennwerte der für die Modelle D2a, D2a-1, D2b-1 und D2c-1 verwendeten Materialien	76
Tabelle 6.19: Übersicht über die untersuchten Berechnungsdauern in Tagen für die einzelnen Modelle der Bauweise E	92
Tabelle 6.20: Bodenkennwerte der für die Modelle der Bauweise E verwendeten Materialien	93

Tabelle 6.21: Infiltrationsmengen in den BumI bei Einbau von Keil 1 und 2 im Verhältnis zur ohne Keil anfallenden Infiltrationsmenge 98

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1: Bauweise A – Damm mit witterungsempfindlichen Dichtungselementen ohne Sickerschicht.....	7
Abbildung 3.2: Bauweise B – Damm mit witterungsempfindlichen Dichtungselementen und Sickerschicht.....	8
Abbildung 3.3: Bauweise C – Damm mit witterungsunempfindlichen Dichtungselementen	8
Abbildung 3.4: Bauweise D – Damm mit Kern aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen.....	9
Abbildung 3.5: Bauweise E – Damm mit schwach durchlässigem Baukörper aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen.....	9
Abbildung 3.6: Bauweise F – Damm mit wasserabweisender Anspritzung	10
Abbildung 4.1: Wasserhaushalt eines Erddammes mit technischen Sicherungselementen.....	11
Abbildung 4.2: Volumenelement mit Filtergeschwindigkeiten	13
Abbildung 4.3: Typische Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung.....	15
Abbildung 4.4: typische Beziehung zwischen Saugspannung und volumetrischen Wassergehalt für unterschiedliche Böden.....	16
Abbildung 5.1: Modellierungsschritte	19
Abbildung 5.2: Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus BumI – Modellierung	20
Abbildung 5.3: Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus BumI – Modellgeometrie	20
Abbildung 5.4: Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus BumI – Finite-Elemente-Netz.....	21
Abbildung 5.5: Modell mit Randbedingungen.....	23
Abbildung 5.6: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand, wenn der Damm in Grundwasser steht.....	23
Abbildung 5.7: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand, wenn das Grundwasser 1m unter der Dammunterkante liegt.....	24
Abbildung 5.8: Saugspannungs-Sättigungsgrad-Beziehung der einzelnen Böden modelliert mit Ansatz nach van Genuchten.....	29
Abbildung 5.9: ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit der grob- und gemischtkörnigen Böden modelliert mit Ansatz nach van Genuchten und Mualem.....	29
Abbildung 5.10: ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit der feinkörnigen Böden modelliert mit Ansatz nach van Genuchten und Mualem	30
Abbildung 5.11: observation single points.....	30
Abbildung 5.12: hydraulisches Potential an observation single points in Abhängigkeit von der Zeit.....	31
Abbildung 5.13: Fluid-Flux-Linien zur Ermittlung der Wasserbewegung im Modell	32
Abbildung 5.14: Fluid-Flux-Linie zur Ermittlung der Infiltrationsmenge in den Dammkern (BumI) ...	32
Abbildung 5.15: Schema für die Bezeichnung der einzelnen Berechnungsmodelle	33
Abbildung 6.1: Verteilung des Sättigungsgrades bei Modell E2a und einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d zu verschiedenen Zeitpunkten	39
Abbildung 6.2: Strömungslinien in Modell E1a nach 300 d bei einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d	40

Abbildung 6.3: Strömungslinien in Modell E2a nach 300 d bei einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d	40
Abbildung 6.4: Strömungslinien in Modell E3a nach 300 d bei einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d	40
Abbildung 6.5: Strömungslinien in Modell E4a-1 nach 200 d bei einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d	41
Abbildung 6.6: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für die Modelle E1a, E2a, E3a und E4a-1 bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d	41
Abbildung 6.7: Diagramm – Sickerwassermengen in Abhängigkeit von den Materialien in Bankett und Oberboden bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d	43
Abbildung 6.8: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI bei den Modellen E1a_9.4 und E3a_9.4	44
Abbildung 6.9: Strömungslinien im Modell E1a bei einem simulierten Niederschlag von 9,4 mm/d nach 49 d	45
Abbildung 6.10: Strömungslinien im Modell E3a bei einem simulierten Niederschlag von 9,4 mm/d nach 60 d	46
Abbildung 6.11: Infiltration in den BumI bei den Modellen E1a_23.5 und E3a_23.5	46
Abbildung 6.12: Strömungslinien im Modell E1a_23.5 nach 36,5 d	47
Abbildung 6.13: Strömungslinien im Modell E3a_23.5 nach 16,5 d	47
Abbildung 6.14: Infiltration in BumI beim Modell E1a für die Niederschläge 2,35 mm/d, 9,4 mm/d und 23,5 mm/d	49
Abbildung 6.15: Strömungslinien für die Modelle E1a und E3a für die Niederschläge 2,35, 9,4 und 23,5 mm/d	49
Abbildung 6.16: Oberflächenabfluss in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge	50
Abbildung 6.17: Infiltration in das Bankett in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge	51
Abbildung 6.18: auf den Niederschlag bezogene Infiltration in BumI in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge	52
Abbildung 6.19: Bauweise A mit witterungsempfindlichen Dichtungselementen ohne Sickerschicht – Modellierung	53
Abbildung 6.20: Bauweise A mit witterungsempfindlichen Dichtungselementen ohne Sickerschicht – Modellgeometrie	53
Abbildung 6.21: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell A2a	54
Abbildung 6.22: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell A2b	54
Abbildung 6.23: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell A2b-1	54
Abbildung 6.24: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für die Modelle A2a und A2b bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d	57
Abbildung 6.25: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell A2a_2.35 nach 350 Tagen	57
Abbildung 6.26: Strömungslinien im Modell A2a_2.35 nach 350 Tagen	58
Abbildung 6.27: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell A2b_2.35 nach 350 Tagen	58
Abbildung 6.28: Strömungslinien im Modell A2b_2.35 nach 350 Tagen	58
Abbildung 6.29: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für die Modelle A2b und A2b-1 bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d	59
Abbildung 6.30: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für die Modelle A2a und A2b-1 bei einem Niederschlag von 9,4 mm/d	60
Abbildung 6.31: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell A2a_9.4 nach 190 Tagen	60

Abbildung 6.32: Strömungslinien im Modell A2a_9.4 nach 190 Tagen.....	61
Abbildung 6.33: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell A2b-1_9.4 nach 65 Tagen	61
Abbildung 6.34: Strömungslinien im Modell A2b-1_9.4 nach 65 Tagen.....	61
Abbildung 6.35: Infiltration in BumI für die Modelle A2a und A2b bei einem Niederschlag von 23,5 mm/d	62
Abbildung 6.36: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell A2a_23.5 nach 34 Tagen	62
Abbildung 6.37: Strömungslinien im Modell A2a_23.5 nach 34 Tagen.....	63
Abbildung 6.38: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell A2b_23.5 nach 67 Tagen	63
Abbildung 6.39: Strömungslinien im Modell A2b_23.5 nach 67 Tagen.....	64
Abbildung 6.40: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für Modell A2a bei den Niederschlägen 2,35 mm/d, 9,4 mm/d und 23,5 mm/d	64
Abbildung 6.41: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für Modell A2b bzw. A2b-1 bei den Niederschlägen 2,35 mm/d, 9,4 mm/d und 23,5 mm/d	65
Abbildung 6.42: auf den Niederschlag bezogene Infiltration in BumI in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge bei den Modellen A2a, A2b und A2b-1.....	66
Abbildung 6.43: Bauweise B mit witterungsempfindlichen Dichtungselementen und Sickerschicht - Modellierung	66
Abbildung 6.44: Bauweise B mit witterungsempfindlichen Dichtungselementen und Sickerschicht - Modellgeometrie	67
Abbildung 6.45: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell B2-1	67
Abbildung 6.46: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für Modell B2-1 bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d	69
Abbildung 6.47: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell B2-1_2.35 nach 560 Tagen	69
Abbildung 6.48: Strömungslinien im Modell B2-1_2.35 nach 560 Tagen.....	69
Abbildung 6.49 Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für Modell B2-1 bei einem Niederschlag von 9,4 mm/d	70
Abbildung 6.50: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell B2-1_9.4 nach 100 Tagen	71
Abbildung 6.51: Strömungslinien im Modell B2-1_9.4 nach 100 Tagen.....	71
Abbildung 6.52: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für die Modelle B2-1_2.35 und B2-1_9.4	72
Abbildung 6.53: Bauweise D mit Kern aus BumI - Modellierung.....	73
Abbildung 6.54: Bauweise D mit Kern aus BumI - Modellgeometrie.....	73
Abbildung 6.55: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell D2a	74
Abbildung 6.56: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell D2a-1	74
Abbildung 6.57: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell D2b-1	74
Abbildung 6.58: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell D2c-1	75
Abbildung 6.59: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für die Modelle D2a und D2a-1 bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d.....	77
Abbildung 6.60: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell D2a_2.35 nach 410 Tagen	77
Abbildung 6.61: Strömungslinien im Modell D2a_2.35 nach 410 Tagen.....	78
Abbildung 6.62: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell D2a-1_2.35 nach 750 Tagen	78
Abbildung 6.63: Strömungslinien im Modell D2a-1_2.35 nach 750 Tagen	78
Abbildung 6.64: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für die Modelle D2a-1, D2b-1 und D2c-1 bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d.....	79
Abbildung 6.65: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell D2b-1_2.35 nach 1540 Tagen.....	80

Abbildung 6.66: Strömungslinien im Modell D2b-1_2.35 nach 1540 Tagen	80
Abbildung 6.67: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell D2c-1_2.35 nach 540 Tagen	80
Abbildung 6.68: Strömungslinien im Modell D2c-1_2.35 nach 540 Tagen.....	81
Abbildung 6.69: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für die Modelle D2a-1, D2b-1 und D2c-1 bei einem Niederschlag von 9,4 mm/d.....	81
Abbildung 6.70: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell D2a-1_9.4 nach 85 Tagen.....	82
Abbildung 6.71: Strömungslinien im Modell D2a-1_9.4 nach 85 Tagen	82
Abbildung 6.72: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell D2b-1_9.4 nach 213 Tagen.....	83
Abbildung 6.73: Strömungslinien im Modell D2b-1_9.4 nach 213 Tagen	83
Abbildung 6.74: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell D2c-1_9.4 nach 300 Tagen	83
Abbildung 6.75: Strömungslinien im Modell D2c-1_9.4 nach 300 Tagen.....	84
Abbildung 6.76: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für Modell D2a-1, bei einem Niederschlag von 23,5 mm/d	84
Abbildung 6.77: Verteilung des Sättigungsgrades für Modell D2a-1_23.5 nach 25 Tagen.....	85
Abbildung 6.78: Strömungslinien im Modell D2a-1_23.5 nach 25 Tagen	85
Abbildung 6.79: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für das Modell D2a-1 bei den Niederschlägen 2,35 mm/d, 9,4 mm/d und 23,5 mm/d	85
Abbildung 6.80: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für das Modell D2b-1 bei den Niederschlägen 2,35 mm/d und 9,4 mm/d	86
Abbildung 6.81: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für das Modell D2c-1 bei den Niederschlägen 2,35 mm/d und 9,4 mm/d	87
Abbildung 6.82: auf den Niederschlag bezogene Infiltration in BumI in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge bei den Modellen D2a, D2a-1, D2b-1 und D2c-1	87
Abbildung 6.83: Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus BumI – Modellgeometrie	88
Abbildung 6.84: Lage der Fluid-Flux-Linien zur Auswertung der Berechnungsmodelle an Bauweise E.....	88
Abbildung 6.85: Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus BumI – Keil 1.....	89
Abbildung 6.86: Lage der Fluid-Flux-Linien – Keil 1 – in den Modellen E2b-1, E2c-1 und E2d-1....	89
Abbildung 6.87: Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus BumI – Keil 2.....	89
Abbildung 6.88: Lage der Fluid-Flux-Linien – Keil 2 – in den Modellen E2b-1, E2c-1 und E2d-1....	90
Abbildung 6.89: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell E2a.....	91
Abbildung 6.90: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell E2b-1	91
Abbildung 6.91: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell E2c-1.....	91
Abbildung 6.92: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell E2d-1	91
Abbildung 6.93: Verteilung des Sättigungsgrades im Anfangszustand für Modell E2b-1 bei einer vorgegebenen Saugspannung von 2,2 kPa.....	92
Abbildung 6.94: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für die Modelle E2a, E2b-1, E2c-1 und E2d-1 bei einem Niederschlag von 2,35 mm/d	94
Abbildung 6.95: Verteilung des Sättigungsgrades nach 150 Tagen für Modell E2b-1_2.35	95
Abbildung 6.96: Verteilung des Sättigungsgrades nach 300 Tagen für Modell E2a_2.35	95
Abbildung 6.97: Strömungslinien im Modell E2a_2.35 nach 300 Tagen.....	96
Abbildung 6.98: Verteilung des Sättigungsgrades nach 480 Tagen für Modell E2b-1_2.35	96
Abbildung 6.99: Strömungslinien im Modell E2b-1_2.35 nach 480 Tagen.....	96
Abbildung 6.100: Verteilung des Sättigungsgrades nach 240 Tagen für Modell E2d-1_2.35	97
Abbildung 6.101: Strömungslinien im Modell E2d-1_2.35 nach 240 Tagen.....	97

Abbildung 6.102: Verteilung des Sättigungsgrades nach 380 Tagen für Modell E2c-1_2.35	97
Abbildung 6.103: Strömungslinien im Modell E2c-1_2.35 nach 380 Tagen.....	98
Abbildung 6.104: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für Keil 1 und Keil 2 bei Modell E2b-1_2.35	99
Abbildung 6.105: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für Keil 1 und Keil 2 bei Modell E2c-1_2.35	99
Abbildung 6.106: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für Keil 1 und Keil 2 bei Modell E2d-1_2.35	100
Abbildung 6.107: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für Modell E2b-1_9.4	100
Abbildung 6.108: Verteilung des Sättigungsgrades nach 45 Tagen für Modell E2b-1_9.4	101
Abbildung 6.109: Strömungslinien im Modell E2b-1_9.4 nach 45 Tagen.....	101
Abbildung 6.110: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für Modell E2b-1 bei der einer Saugspannung von 2,2 kPa als Anfangsbedingung und bei den Niederschlägen 9,4 mm/d und 0 mm/d	102
Abbildung 6.111: Verteilung des Sättigungsgrades nach 60 Tagen für Modell E2b-1_9.4 bei der vorgegebenen Saugspannung von 2,2 kPa	102
Abbildung 6.112: Strömungslinien im Modell Eb2-1_9.4 nach 60 Tagen bei der vorgegebenen Saugspannung von 2,2 kPa als Anfangsbedingung	103
Abbildung 6.113: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für Modell E2b-1_23.5	103
Abbildung 6.114: Verteilung des Sättigungsgrades nach 10 Tagen für Modell E2b-1_23.5	104
Abbildung 6.115: Strömungslinien im Modell E2b-1_23.5 nach 10 Tagen.....	104
Abbildung 6.116: Infiltration in BumI und Ausfluss aus BumI für Modell E2b-1 bei den Niederschlägen 2,35 mm/d, 9,4 mm/d und 23,5 mm/d	105
Abbildung 6.117: auf den Niederschlag bezogene Infiltration in BumI in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge bei den Modellen E2a, E2b-1, E2c-1 und E2d-1 mit Keil 2 und ohne Keil	106
Abbildung 6.118: auf den Niederschlag bezogene Infiltration in BumI im stationären Fließzustand für die Modelle A, B, D und E.....	108
Abbildung 6.119: auf den Niederschlag bezogene Infiltration in BumI im stationären Fließzustand für die Modelle A, B, D und E bei einem simulierten Niederschlag von 2,35 mm/d	109
Abbildung 7.1: Bauweise A mit witterungsempfindlichen Dichtungselementen ohne Sickerschicht	110
Abbildung 7.2: Bauweise B mit witterungsempfindlichen Dichtungselementen und Sickerschicht	111
Abbildung 7.3: Bauweise D mit Kern aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen.....	111
Abbildung 7.4: Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus BumI.....	112

Bauweise A mit witterungsempfindlichen Dichtungselementen ohne Sickerschicht

superelement	A halb.smh							
Eingabedatei	A2a_2.35.fem							
Ausgabedatei	A2a_2.35.dac							
Anfangsbedingung								
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = 0$ im gesamten Modellbereich						
stationärer Zustand im BumI erreicht nach Tagen	[d]	500						
Randbedingungen								
Niederschlag	[mm/d]	2,35 (auf Oberfläche) und 1,955 (im Bereich der Böschung)						
Bodenkennwerte								
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	Dichtung	BumI	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	GU (5.9% T+U)	TL	GU (5.9% T+U)	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su3	Ekblad 0.4	Meerdink	Ekblad 0.4	Tinjum F
Durchlässigkeitbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,000	0,048	0,190	0,048	0,00
A	[1/m]	46	6,8	2,6	46	0,85	46	0,322
n		1,79	1,43	1,28	1,79	1,35	1,79	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,22	0,44	0,26	0,44	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,36	0,23	0,36	0,23	0,35
Berechnungsergebnisse								
ausgewertet nach 1782 Tagen								
Niederschlag über Modelloberseite	[m ³ /(d•m)]	0,03785						
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,01755						
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,02050						
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,01999						
Abflüsse an Modellunterseite	[m ³ /(d•m)]	0,000943	0,0008749		0,03233	0,0000128	0,001086	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,03525						
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,03524						
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,03430						
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	97,3						
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	2,68	2,48		91,73	0,04	3,08	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		2,55		94,25	0,04	3,17	
Anteil am Niederschlag	[%]	2,49	2,31		85,41	0,03	2,87	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,00261						
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	93,1						
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m ³ /(d•m)]		0,01787	0,01886				
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,0367						
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		52,09	54,98				
Anteil am Niederschlag	[%]		47,21	49,82				
Infiltration in BumI	[m ³ /(d•m)]						0,001085	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]						3,08	
Anteil am Niederschlag	[%]						2,87	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Dichtung + Dammbaustoff + Oberboden + fiktiver Dränschicht
Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Dichtung + Dammbaustoff + Oberboden

Bauweise A mit witterungsempfindlichen Dichtungselementen ohne Sickerschicht

superelement	A halb.smh							
Eingabedatei	A2a_9.4.fem							
Ausgabedatei	A2a_9.4.dac							
Anfangsbedingung								
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = 0$ im gesamten Modellbereich						
stationärer Zustand im Buml erreicht nach Tagen	[d]	stationärer Zustand wurde beim Berechnungsende nach 190 Tagen nicht erreicht						
Randbedingungen								
Niederschlag	[mm/d]	9,4 (auf Oberfläche) und 7,82 (im Bereich der Böschung)						
Bodenkennwerte								
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	Dichtung	Buml	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	GU (5.9% T+U)	TL	GU (5.9% T+U)	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su3	Ekblad 0.4	Meerdink	Ekblad 0.4	Tinjum F
Durchlässigkeitbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,000	0,048	0,190	0,048	0,00
A	[1/m]	46	6,8	2,6	46	0,85	46	0,322
n		1,79	1,43	1,28	1,79	1,35	1,79	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,22	0,44	0,26	0,44	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,36	0,23	0,36	0,23	0,35
Berechnungsergebnisse								
ausgewertet nach 190 Tagen (stationärer Zustand nicht erreicht)								
Niederschlag über Modelloberseite	[m³/(d•m)]	0,1521						
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,071						
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,0819						
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,07897						
Abflüsse an Modellunterseite	[m³/(d•m)]	0,003576	0,003528		0,1385	0,0000153	0,001129 ¹⁾	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,1467						
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,1478						
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,1432						
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	97,6						
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	2,42	2,39		93,71	0,010	0,76 ¹⁾	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		2,46		96,74	0,011	0,79 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]	2,35	2,32		91,06	0,010	0,74 ¹⁾	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m³/(d•m)]	0,0043						
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	97,2						
Infiltration in Oberboden und Bankett								
[m³/(d•m)]			0,10100	0,04732				
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,1483						
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		70,54 ¹⁾	33,05 ¹⁾				
Anteil am Niederschlag	[%]		66,40	31,11				
Infiltration in Buml								
[m³/(d•m)]							0,001219	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]						0,82	
Anteil am Niederschlag	[%]						0,80	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Dichtung + Dammbaustoff + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwassermenge = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Dichtung + Dammbaustoff + Oberboden

¹⁾ stationärer Zustand wurde nicht erreicht

Bauweise A mit witterungsempfindlichen Dichtungselementen ohne Sickerschicht

superelement	A halb.smh							
Eingabedatei	A2a_23.5.fem							
Ausgabedatei	A2a_23.5.dac							
Anfangsbedingung								
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = 0$ im gesamten Modellbereich						
stationärer Zustand im Buml erreicht nach Tagen	[d]	stationärer Zustand wurde beim Berechnungsende nach 34 Tagen nicht erreicht						
Randbedingungen								
Niederschlag	[mm/d]	23,5 (auf Oberfläche) und 19,55 (im Bereich der Böschung)						
Bodenkennwerte								
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	Dichtung	Buml	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	GU (5.9% T+U)	TL	GU (5.9% T+U)	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su3	Ekblad 0.4	Meerdink	Ekblad 0.4	Tinjum F
Durchlässigkeitbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,000	0,048	0,190	0,048	0,00
A	[1/m]	46	6,8	2,6	46	0,85	46	0,322
n		1,79	1,43	1,28	1,79	1,35	1,79	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,22	0,44	0,26	0,44	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,36	0,23	0,36	0,23	0,35
Berechnungsergebnisse								
ausgewertet nach 30 Tagen (stationärer Zustand nicht erreicht)								
Niederschlag über Modelloberseite	[m³/(d•m)]	0,3799						
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,167						
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,202						
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,200						
Abflüsse an Modellunterseite	[m³/(d•m)]	0,009485	0,009562		0,188	0,00001013	7,309E-09 ¹⁾	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,2071						
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,2171						
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,1976						
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	95,4						
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	4,37	4,41		86,61	0,005	0,00 ¹⁾	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		4,84		95,16	0,005	0,00 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]	2,50	2,52		49,49	0,003	0,00 ¹⁾	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m³/(d•m)]	0,1628						
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	57,1						
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m³/(d•m)]		0,28900	0,08257				
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,3716						
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		146,28 ¹⁾	41,79 ¹⁾				
Anteil am Niederschlag	[%]		76,07	21,73				
Infiltration in Buml	[m³/(d•m)]						0,00137	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]						0,63 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]						0,36 ¹⁾	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Dichtung + Dammbaustoff + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwassermenge = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Dichtung + Dammbaustoff + Oberboden

¹⁾ stationärer Zustand wurde nicht erreicht

Bauweise A mit witterungsempfindlichen Dichtungselementen ohne Sickerschicht

superelement	A halb.smh							
Eingabedatei	A2b_2.35.fem							
Ausgabedatei	A2b_2.35.dac							
Anfangsbedingung								
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = 0$ im gesamten Modellbereich						
stationärer Zustand im Buml erreicht nach Tagen	[d]	stationärer Zustand wurde beim Berechnungsende nach 550 Tagen nicht erreicht						
Randbedingungen								
Niederschlag	[mm/d]	2,35 (auf Oberfläche) und 1,955 (im Bereich der Böschung)						
Bodenkennwerte								
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	Dichtung	Buml	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	SU*	TL	GU (5.9% T+U)	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su3	Su3	Meerdink	Ekblad 0.4	Tinjum F
Durchlässigkeitbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,000	0,000	0,190	0,048	0,00
A	[1/m]	46	6,8	2,6	2,6	0,85	46	0,322
n		1,79	1,43	1,28	1,28	1,35	1,79	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,22	0,22	0,26	0,44	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,36	0,36	0,36	0,23	0,35
Berechnungsergebnisse								
ausgewertet nach 550 Tagen (stationärer Zustand noch nicht erreicht)								
Niederschlag über Modelloberseite	[m ³ /(d•m)]	0,0381						
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,0177						
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,0206						
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,0202						
Abflüsse an Modellunterseite	[m ³ /(d•m)]	0,000669	0,001067		0,03409	0,0000769	0,003798 ¹⁾	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,0397						
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,0403						
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,0390						
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	98,3						
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	1,66	2,65		84,59	0,191	9,42 ¹⁾	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		2,73		87,34	0,197	9,73 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]	1,76	2,80		89,48	0,202	9,97 ¹⁾	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	-0,00220						
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	105,8						
Infiltration in Oberboden und Bankett								
Infiltration	[m ³ /(d•m)]		0,01822	0,02105				
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,0393						
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		46,68 ¹⁾	53,93 ¹⁾				
Anteil am Niederschlag	[%]		47,82	55,25				
Infiltration in Buml								
Infiltration	[m ³ /(d•m)]						0,003991	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]						9,90 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]						10,48 ¹⁾	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Dichtung + Dammbaustoff + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Dichtung + Dammbaustoff + Oberboden

¹⁾ stationärer Zustand wurde nicht erreicht

Bauweise A mit witterungsempfindlichen Dichtungselementen ohne Sickerschicht

superelement	A halb.smh							
Eingabedatei	A2b_23.5.fem							
Ausgabedatei	A2b_23.5.dac							
Anfangsbedingung								
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = 0$ im gesamten Modellbereich						
stationärer Zustand im Buml erreicht nach Tagen	[d]	40						
Randbedingungen								
Niederschlag	[mm/d]	23,5 (auf Oberfläche) und 19,55 (im Bereich der Böschung)						
Bodenkennwerte								
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	Dichtung	Buml	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	SU*	TL	GU (5.9% T+U)	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su3	Su3	Meerdink	Ekblad 0.4	Tinjum F
Durchlässigkeitbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,000	0,000	0,190	0,048	0,00
A	[1/m]	46	6,8	2,6	2,6	0,85	46	0,322
n		1,79	1,43	1,28	1,28	1,35	1,79	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,22	0,22	0,26	0,44	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,36	0,36	0,36	0,23	0,35
Berechnungsergebnisse								
ausgewertet nach 67 Tagen								
Niederschlag über Modelloberseite	[m³/(d•m)]	0,3832						
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,1776						
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,2077						
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,2020						
Abflüsse an Modellunterseite	[m³/(d•m)]	0,00882	0,0142		0,2316	0,000133	0,095	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,3498						
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,3570						
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,3409						
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	97,5						
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	2,47	3,98		64,87	0,037	26,61	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		4,17		67,93	0,039	27,86	
Anteil am Niederschlag	[%]	2,30	3,71		60,44	0,035	24,79	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m³/(d•m)]	0,02620						
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	93,2						
Infiltration in Oberboden und Bankett								
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m³/(d•m)]		0,293	0,07242				
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,3654						
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		85,94	21,24				
Anteil am Niederschlag	[%]		76,46	18,90				
Infiltration in Buml								
Infiltration in Buml	[m³/(d•m)]						0,09455	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]						26,48	
Anteil am Niederschlag	[%]						24,67	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Dichtung + Dammbaustoff + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Dichtung + Dammbaustoff + Oberboden

Bauweise A mit witterungsempfindlichen Dichtungselementen ohne Sickerschicht

superelement	A halb.smh							
Eingabedatei	A2b-1_2.35.fem							
Ausgabedatei	A2b-1_2.35.dac							
Anfangsbedingung								
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = -1$ im gesamten Modellbereich						
stationärer Zustand im BumI erreicht nach Tagen	[d]	stationärer Zustand wurde beim Berechnungsende nach 350 Tagen nicht erreicht						
Randbedingungen								
Niederschlag	[mm/d]	2,35 (auf Oberfläche) und 1,955 (im Bereich der Böschung)						
Bodenkennwerte								
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	Dichtung	BumI	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	SU*	TL	GU (5.9% T+U)	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su3	Su3	Meerdink	Ekblad 0.4	Tinjum F
Durchlässigkeitbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,000	0,000	0,190	0,048	0,00
A	[1/m]	46	6,8	2,6	2,6	0,85	46	0,322
n		1,79	1,43	1,28	1,28	1,35	1,79	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,22	0,22	0,26	0,44	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,36	0,36	0,36	0,23	0,35
Berechnungsergebnisse								
ausgewertet nach 163 Tagen (stationärer Zustand noch nicht erreicht)								
Niederschlag über Modelloberseite	[m³/(d•m)]	0,03804						
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,0177						
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,0205						
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,0201						
Abflüsse an Modellunterseite	[m³/(d•m)]	0,000533	0,001158		0,0309	0,0000696	0,003019 ¹⁾	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,0357						
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,03590						
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,0351						
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	98,5						
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	1,48	3,23		86,07	0,194	8,41 ¹⁾	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		3,29		87,92	0,198	8,59 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]	1,40	3,04		81,23	0,183	7,94 ¹⁾	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m³/(d•m)]	0,00214						
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	94,4						
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m³/(d•m)]		0,01818	0,01878				
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,0370						
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		51,73 ¹⁾	53,43 ¹⁾				
Anteil am Niederschlag	[%]		47,79	49,37				
Infiltration in BumI	[m³/(d•m)]						0,002445	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]						6,81 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]						6,43 ¹⁾	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Dichtung + Dammbaustoff + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Dichtung + Dammbaustoff + Oberboden

¹⁾ stationärer Zustand wurde nicht erreicht

Bauweise A mit witterungsempfindlichen Dichtungselementen ohne Sickerschicht

superelement	A halb.smh							
Eingabedatei	A2b-1_9.4.fem							
Ausgabedatei	A2b-1_9.4.dac							
Anfangsbedingung								
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = -1$ im gesamten Modellbereich						
stationärer Zustand im Buml erreicht nach Tagen	[d]	stationärer Zustand wurde beim Berechnungsende nach 68 Tagen nicht erreicht						
Randbedingungen								
Niederschlag	[mm/d]	9,4 (auf Oberfläche) und 7,82 (im Bereich der Böschung)						
Bodenkennwerte								
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	Dichtung	Buml	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	SU*	TL	GU (5.9% T+U)	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su3	Su3	Meerdink	Ekblad 0.4	Tinjum F
Durchlässigkeitbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,000	0,000	0,190	0,048	0,00
A	[1/m]	46	6,8	2,6	2,6	0,85	46	0,322
n		1,79	1,43	1,28	1,28	1,35	1,79	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,22	0,22	0,26	0,44	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,36	0,36	0,36	0,23	0,35
Berechnungsergebnisse								
ausgewertet nach 68,1 Tagen (stationärer Zustand noch nicht erreicht)								
Niederschlag über Modelloberseite	[m ³ /(d•m)]	0,1523						
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,0709						
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,0814						
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,0789						
Abflüsse an Modellunterseite	[m ³ /(d•m)]	0,002523	0,00683		0,113	0,000148	0,0103 ¹⁾	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,1328						
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,1320						
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,1303						
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	98,1						
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	1,91	5,17		85,61	0,112	7,80 ¹⁾	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		5,24		86,74	0,114	7,91 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]	1,66	4,48		74,20	0,097	6,76 ¹⁾	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,02030						
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	86,7						
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m ³ /(d•m)]		0,106	0,04828				
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,1543						
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		81,36 ¹⁾	37,06 ¹⁾				
Anteil am Niederschlag	[%]		69,60	31,70				
Infiltration in Buml	[m ³ /(d•m)]						0,01089	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]						8,25 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]						7,15 ¹⁾	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Dichtung + Dammbaustoff + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Dichtung + Dammbaustoff + Oberboden

¹⁾ stationärer Zustand wurde nicht erreicht

Bauweise B mit witterungsempfindlichen Dichtungselementen mit Sickerschicht

superelement	B halb.smh								
Eingabedatei	B2-1_2.35.fem								
Ausgabedatei	B2-1_2.35.dac								
Anfangsbedingung									
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = -1$ im gesamten Modellbereich							
stationärer Zustand im BumI erreicht nach Tagen	[d]	stationärer Zustand wurde beim Berechnungsende nach 560 Tagen nicht erreicht							
Randbedingungen									
Niederschlag	[mm/d]	2,35 (auf Oberfläche) und 1,955 (im Bereich der Böschung)							
Bodenkennwerte									
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	Sickerschicht	Dichtung	BumI	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	SU*	GU (5.9% T+U)	TL	GU (5.9% T+U)	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su3	Su3	Ekblad 0.4	Meerdink	Ekblad 0.4	Tinjum F
Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,000	0,000	0,048	0,190	0,048	0,00
A	[1/m]	46	6,8	2,6	2,6	46	0,85	46	0,322
n		1,79	1,43	1,28	1,28	1,79	1,35	1,79	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,22	0,22	0,44	0,26	0,44	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,36	0,36	0,23	0,36	0,23	0,35
Berechnungsergebnisse									
ausgewertet nach 560 Tagen (stationärer Zustand noch nicht erreicht)									
Niederschlag über Modelloberseite	[m ³ /(d•m)]	0,0379							
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,0177							
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,0102							
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,0204							
Abflüsse an Modellunterseite	[m ³ /(d•m)]	0,0004054	0,001365		0,004425	0,03125	0,0000226	0,000905 ¹⁾	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,0384							
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,03790							
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,0380							
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	98,9							
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	1,07	3,60		11,68	82,45	0,060	2,39 ¹⁾	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		3,60		11,65	82,31	0,060	2,38 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]	1,07	3,60		11,68	82,45	0,060	2,39 ¹⁾	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,00000							
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	100,0							
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m ³ /(d•m)]		0,01858	0,01899					
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,0376							
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		48,94 ¹⁾	50,02 ¹⁾					
Anteil am Niederschlag	[%]		49,02	50,11					
Infiltration in BumI	[m ³ /(d•m)]							9,64E-04	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]							2,54 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]							2,54 ¹⁾	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Dichtung + Dammbaustoff + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Dichtung + Sickerschicht + Dammbaustoff + Oberboden

¹⁾ stationärer Zustand wurde nicht erreicht

Bauweise B mit witterungsempfindlichen Dichtungselementen mit Sickerschicht

superelement	B halb.smh								
Eingabedatei	B2-1_9.4.fem								
Ausgabedatei	B2-1_9.4.dac								
Anfangsbedingung									
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = -1$ im gesamten Modellbereich							
stationärer Zustand im Buml erreicht nach Tagen	[d]	stationärer Zustand wurde beim Berechnungsende nach 100 Tagen nicht erreicht							
Randbedingungen									
Niederschlag	[mm/d]	9,4 (auf Oberfläche) und 7,82 (im Bereich der Böschung)							
Bodenkennwerte									
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	Sickerschicht	Dichtung	Buml	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	SU*	GU (5.9% T+U)	TL	GU (5.9% T+U)	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su3	Su3	Ekblad 0.4	Meerdink	Ekblad 0.4	Tinjum F
Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,000	0,000	0,048	0,190	0,048	0,00
A	[1/m]	46	6,8	2,6	2,6	46	0,85	46	0,322
n		1,79	1,43	1,28	1,28	1,79	1,35	1,79	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,22	0,22	0,44	0,26	0,44	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,36	0,36	0,23	0,36	0,23	0,35
Berechnungsergebnisse									
ausgewertet nach 100 Tagen (stationärer Zustand noch nicht erreicht)									
Niederschlag über Modelloberseite	[m ³ /(d•m)]	0,1520							
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,0703							
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,0082							
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,0180							
Abflüsse an Modellunterseite	[m ³ /(d•m)]	0,00231	0,00613		0,0175	0,1216	0,0000207	2,74E-11 ¹⁾	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,1476							
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,1460							
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,1453							
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	98,4							
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	1,58	4,20		11,99	83,29	0,014	1,87E-08 ¹⁾	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		4,22		12,05	83,72	0,014	1,88E-08 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]	1,52	4,03		11,51	80,00	0,014	1,80E-08 ¹⁾	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,00600							
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	96,1							
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m ³ /(d•m)]		0,108	0,0462					
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,1542							
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		74,35 ¹⁾	31,81 ¹⁾					
Anteil am Niederschlag	[%]		71,05	30,39					
Infiltration in Buml	[m ³ /(d•m)]							0,000975	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]							0,67 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]							0,64 ¹⁾	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Dichtung + Dammbaustoff + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Dichtung + Sickerschicht + Dammbaustoff + Oberboden

¹⁾ stationärer Zustand wurde nicht erreicht

Bauweise D mit Kern aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen

superelement	D halb.smh						
Eingabedatei	D2a_2.35.fem						
Ausgabedatei	D2a_2.35.dac						
Anfangsbedingung							
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = 0$ im gesamten Modellbereich					
stationärer Zustand im BumI erreicht nach Tagen	[d]	stationärer Zustand wurde beim Berechnungsende nach 413 Tagen nicht erreicht					
Randbedingungen							
Niederschlag	[mm/d]	2,35 (auf Oberfläche) und 1,955 (im Bereich der Böschung)					
Bodenkennwerte							
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	BumI	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	SU / SU*	UL	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su3	Su2	Su4	Tinjum F
Durchlässigkeitbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,000	0,05	0,000	0,00
A	[1/m]	46	6,8	2,6	6,8	1,67	0,322
n		1,79	1,43	1,28	1,43	1,275	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,22	0,30	0,22	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,36	0,38	0,37	0,35
Berechnungsergebnisse							
ausgewertet nach 163 Tagen (stationärer Zustand noch nicht erreicht)							
Niederschlag über Modelloberseite	[m ³ /(d•m)]	0,038078					
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,01797					
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,02031					
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,02041					
Abflüsse an Modellunterseite	[m ³ /(d•m)]	0,000746	0,000986		0,0376	0,001176 ¹⁾	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,0405					
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,0397					
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,0398					
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	98,2					
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	1,88	2,48		94,76	2,96 ¹⁾	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		2,48		94,56	2,96 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]	1,96	2,59		98,74	3,09 ¹⁾	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	-0,00160					
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	104,2					
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m ³ /(d•m)]		0,0197	0,01997			
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,0397					
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		49,54 ¹⁾	50,22 ¹⁾			
Anteil am Niederschlag	[%]		51,74	52,44			
Infiltration in BumI	[m ³ /(d•m)]					0,001021	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]					2,57 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]					2,68 ¹⁾	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Dammbaustoff + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Dammbaustoff + Oberboden

¹⁾ stationärer Zustand wurde nicht erreicht

Bauweise D mit Kern aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen

superelement	D halb.smh						
Eingabedatei	D2a-1_2.35.fem						
Ausgabedatei	D2a-1_2.35.dac						
Anfangsbedingung							
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = -1$ im gesamten Modellbereich					
stationärer Zustand im BumI erreicht nach Tagen	[d]	stationärer Zustand wurde beim Berechnungsende nach 748 Tagen nicht erreicht					
Randbedingungen							
Niederschlag	[mm/d]	2,35 (auf Oberfläche) und 1,955 (im Bereich der Böschung)					
Bodenkennwerte							
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	BumI	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	SU / SU*	UL	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su3	Su2	Su4	Tinjum F
Durchlässigkeitbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,000	0,05	0,000	0,00
A	[1/m]	46	6,8	2,6	6,8	1,67	0,322
n		1,79	1,43	1,28	1,43	1,275	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,22	0,30	0,22	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,36	0,38	0,37	0,35
Berechnungsergebnisse							
ausgewertet nach 748 Tagen (stationärer Zustand noch nicht erreicht)							
Niederschlag über Modelloberseite	$[m^3/(d \cdot m)]$	0,03807					
über Fahrbahn	$[m^3/(d \cdot m)]$	0,0179					
über Bankett und Böschung	$[m^3/(d \cdot m)]$	0,02034					
über Fahrbahn und Bankett	$[m^3/(d \cdot m)]$	0,02017					
Abflüsse an Modellunterseite	$[m^3/(d \cdot m)]$	0,000422	0,001096		0,03545	0,001395 ¹⁾	
Summe Teilabflüsse	$[m^3/(d \cdot m)]$	0,0384					
Gesamtabfluss	$[m^3/(d \cdot m)]$	0,0377					
Gesamt-Sickerwassermenge	$[m^3/(d \cdot m)]$	0,0379					
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	98,9					
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	1,12	2,91		94,06	3,70 ¹⁾	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		2,89		93,43	3,68 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]	1,11	2,88		93,12	3,66 ¹⁾	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	$[m^3/(d \cdot m)]$	0,00038					
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	99,0					
Infiltration in Oberboden und Bankett	$[m^3/(d \cdot m)]$		0,0189	0,01879			
Gesamtinfiltration	$[m^3/(d \cdot m)]$	0,0377					
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		49,81 ¹⁾	49,52 ¹⁾			
Anteil am Niederschlag	[%]		49,65	49,36			
Infiltration in BumI	$[m^3/(d \cdot m)]$					0,001106	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]					2,93 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]					2,91 ¹⁾	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Dammbaustoff + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Dammbaustoff + Oberboden

¹⁾ stationärer Zustand wurde nicht erreicht

Bauweise D mit Kern aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen

superelement	D halb.smh						
Eingabedatei	D2a-1_9.4.fem						
Ausgabedatei	D2a-1_9.4.dac						
Anfangsbedingung							
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = -1$ im gesamten Modellbereich					
stationärer Zustand im BumI erreicht nach Tagen	[d]	stationärer Zustand wurde beim Berechnungsende nach 86 Tagen nicht erreicht					
Randbedingungen							
Niederschlag	[mm/d]	9,4 (auf Oberfläche) und 7,82 (im Bereich der Böschung)					
Bodenkennwerte							
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	BumI	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	SU / SU*	UL	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su3	Su2	Su4	Tinjum F
Durchlässigkeitbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,000	0,05	0,000	0,00
A	[1/m]	46	6,8	2,6	6,8	1,67	0,322
n		1,79	1,43	1,28	1,43	1,275	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,22	0,30	0,22	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,36	0,38	0,37	0,35
Berechnungsergebnisse							
ausgewertet nach 86 Tagen (stationärer Zustand noch nicht erreicht)							
Niederschlag über Modelloberseite	[m ³ /(d•m)]	0,1522					
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,0709					
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,0817					
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,08074					
Abflüsse an Modellunterseite	[m ³ /(d•m)]	0,00231	0,0052		0,137	0,00163 ¹⁾	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,1461					
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,1444					
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,1438					
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	98,4					
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	1,60	3,60		94,88	1,13 ¹⁾	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		3,62		95,25	1,13 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]	1,52	3,42		90,01	1,07 ¹⁾	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,00780					
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	94,9					
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m ³ /(d•m)]		0,113	0,03727			
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,1503					
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		78,56 ¹⁾	25,91 ¹⁾			
Anteil am Niederschlag	[%]		74,24	24,49			
Infiltration in BumI	[m ³ /(d•m)]					0,00248	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]					1,72 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]					1,63 ¹⁾	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Dammbaustoff + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Dammbaustoff + Oberboden

¹⁾ stationärer Zustand wurde nicht erreicht

Bauweise D mit Kern aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen

superelement	D halb.smh						
Eingabedatei	D2a-1_23.5.fem						
Ausgabedatei	D2a-1_23.5.dac						
Anfangsbedingung							
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = -1$ im gesamten Modellbereich					
stationärer Zustand im BumI erreicht nach Tagen	[d]	stationärer Zustand wurde beim Berechnungsende nach 24 Tagen nicht erreicht					
Randbedingungen							
Niederschlag	[mm/d]	23,5 (auf Oberfläche) und 19,55 (im Bereich der Böschung)					
Bodenkennwerte							
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	BumI	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	SU / SU*	UL	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su3	Su2	Su4	Tinjum F
Durchlässigkeitbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,000	0,05	0,000	0,00
A	[1/m]	46	6,8	2,6	6,8	1,67	0,322
n		1,79	1,43	1,28	1,43	1,275	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,22	0,30	0,22	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,36	0,38	0,37	0,35
Berechnungsergebnisse							
ausgewertet nach 24 Tagen (stationärer Zustand noch nicht erreicht)							
Niederschlag über Modelloberseite	[m ³ /(d•m)]	0,38					
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,1773					
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,205					
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,2019					
Abflüsse an Modellunterseite	[m ³ /(d•m)]	0,00544	0,0133		0,35	0,000298 1)	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,3690					
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,3680					
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,3636					
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	98,5					
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	1,48	3,61		95,11	0,08 1)	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		3,66		96,26	0,08 1)	
Anteil am Niederschlag	[%]	1,43	3,50		92,11	0,08 1)	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,01200					
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	96,8					
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m ³ /(d•m)]		0,305	0,0706			
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,3756					
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		83,88 1)	19,42 1)			
Anteil am Niederschlag	[%]		80,26	18,58			
Infiltration in BumI	[m ³ /(d•m)]					0,005149	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]					1,40 1)	
Anteil am Niederschlag	[%]					1,36 1)	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Dammbaustoff + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Dammbaustoff + Oberboden

¹⁾ stationärer Zustand wurde nicht erreicht

Bauweise D mit Kern aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen

superelement	D halb.smh						
Eingabedatei	D2b-1_2.35.fem						
Ausgabedatei	D2b-1_2.35.dac						
Anfangsbedingung							
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = -1$ im gesamten Modellbereich					
stationärer Zustand im BumI erreicht nach Tagen	[d]	stationärer Zustand wurde beim Berechnungsende nach 1544 Tagen nicht erreicht					
Randbedingungen							
Niederschlag	[mm/d]	2,35 (auf Oberfläche) und 1,955 (im Bereich der Böschung)					
Bodenkennwerte							
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	BumI	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	SU*	UL	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su3	Su3	Su4	Tinjum F
Durchlässigkeitbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,000	0,000	0,000	0,00
A	[1/m]	46	6,8	2,6	2,6	1,67	0,322
n		1,79	1,43	1,28	1,28	1,275	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,22	0,22	0,22	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,36	0,36	0,37	0,35
Berechnungsergebnisse							
ausgewertet nach 1544 Tagen (stationärer Zustand noch nicht erreicht)							
Niederschlag über Modelloberseite	[m ³ /(d•m)]	0,038					
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,01773					
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,02044					
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,02019					
Abflüsse an Modellunterseite	[m ³ /(d•m)]	0,000504	0,001125		0,03564	0,00061 ¹⁾	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,0379					
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,0378					
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,0374					
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	98,7					
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	1,33	2,97		94,24	1,61 ¹⁾	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		3,01		95,36	1,63 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]	1,33	2,96		93,79	1,61 ¹⁾	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,00018					
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	99,5					
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m ³ /(d•m)]		0,01889	0,0185			
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,0374					
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		50,54 ¹⁾	49,50 ¹⁾			
Anteil am Niederschlag	[%]		49,71	48,68			
Infiltration in BumI	[m ³ /(d•m)]					0,0007877	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]					2,08 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]					2,07 ¹⁾	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Dammbaustoff + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Dammbaustoff + Oberboden

¹⁾ stationärer Zustand wurde nicht erreicht

Bauweise D mit Kern aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen

superelement	D halb.smh						
Eingabedatei	D2b-1_9.4.fem						
Ausgabedatei	D2b-1_9.4.dac						
Anfangsbedingung							
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = -1$ im gesamten Modellbereich					
stationärer Zustand im BumI erreicht nach Tagen	[d]	stationärer Zustand wurde beim Berechnungsende nach 213 Tagen nicht erreicht					
Randbedingungen							
Niederschlag	[mm/d]	9,4 (auf Oberfläche) und 7,82 (im Bereich der Böschung)					
Bodenkennwerte							
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	BumI	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	SU*	UL	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su3	Su3	Su4	Tinjum F
Durchlässigkeitbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,000	0,000	0,000	0,00
A	[1/m]	46	6,8	2,6	2,6	1,67	0,322
n		1,79	1,43	1,28	1,28	1,275	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,22	0,22	0,22	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,36	0,36	0,37	0,35
Berechnungsergebnisse							
ausgewertet nach 213 Tagen (stationärer Zustand noch nicht erreicht)							
Niederschlag über Modelloberseite	[m³/(d•m)]	0,153					
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,0719					
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,0817					
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,08174					
Abflüsse an Modellunterseite	[m³/(d•m)]	0,0021	0,00475		0,14	0,0005481	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,1474					
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,1472					
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,1453					
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	98,6					
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	1,43	3,23		95,11	0,37 1)	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		3,27		96,35	0,38 1)	
Anteil am Niederschlag	[%]	1,37	3,10		91,50	0,36 1)	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m³/(d•m)]	0,00580					
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	96,2					
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m³/(d•m)]		0,114	0,0376			
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,1516					
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		78,46 1)	25,88 1)			
Anteil am Niederschlag	[%]		74,51	24,58			
Infiltration in BumI	[m³/(d•m)]					0,001765	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]					1,20 1)	
Anteil am Niederschlag	[%]					1,15 1)	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Dammbaustoff + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Dammbaustoff + Oberboden

¹⁾ stationärer Zustand wurde nicht erreicht

Bauweise D mit Kern aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen

superelement	D halb.smh						
Eingabedatei	D2c-1_2.35.fem						
Ausgabedatei	D2c-1_2.35.dac						
Anfangsbedingung							
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = -1$ im gesamten Modellbereich					
stationärer Zustand im Buml erreicht nach Tagen	[d]	500					
Randbedingungen							
Niederschlag	[mm/d]	2,35 (auf Oberfläche) und 1,955 (im Bereich der Böschung)					
Bodenkennwerte							
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	Buml	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	GU mod	SU / SU*	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su3	Ekblad 0.4	Su2	Tinjum F
Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,000	0,048	0,05	0,00
A	[1/m]	46	6,8	2,6	46	6,8	0,322
n		1,79	1,43	1,28	1,79	1,43	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,22	0,44	0,30	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,36	0,23	0,38	0,35
Berechnungsergebnisse							
ausgewertet nach 540 Tagen							
Niederschlag über Modelloberseite	[m ³ /(d•m)]	0,038					
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,0177					
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,02044					
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,02016					
Abflüsse an Modellunterseite	[m ³ /(d•m)]	0,000507	0,00261		0,0268	0,008454	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,0384					
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,0377					
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,0379					
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	98,7					
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	1,34	6,92		71,09	22,42	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		6,89		70,78	22,33	
Anteil am Niederschlag	[%]	1,33	6,87		70,53	22,25	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,00030					
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	99,2					
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m ³ /(d•m)]		0,01891	0,0185			
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,0374					
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		49,94 1)	48,86 1)			
Anteil am Niederschlag	[%]		49,76	48,68			
Infiltration in Buml	[m ³ /(d•m)]					0,008458	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]					22,44	
Anteil am Niederschlag	[%]					22,26	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Dammbaustoff + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Dammbaustoff + Oberboden

Bauweise D mit Kern aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen

superelement	D halb.smh						
Eingabedatei	D2c-1_9.4.fem						
Ausgabedatei	D2c-1_9.4.dac						
Anfangsbedingung							
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = -1$ im gesamten Modellbereich					
stationärer Zustand im BumI erreicht nach Tagen	[d]	295					
Randbedingungen							
Niederschlag	[mm/d]	9,4 (auf Oberfläche) und 7,82 (im Bereich der Böschung)					
Bodenkennwerte							
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	BumI	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	GU mod	SU / SU*	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su3	Ekblad 0.4	Su2	Tinjum F
Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,000	0,048	0,05	0,00
A	[1/m]	46	6,8	2,6	46	6,8	0,322
n		1,79	1,43	1,28	1,79	1,43	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,22	0,44	0,30	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,36	0,23	0,38	0,35
Berechnungsergebnisse							
ausgewertet nach 300 Tagen							
Niederschlag über Modelloberseite	[m ³ /(d•m)]	0,1522					
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,0709					
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,0817					
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,0807					
Abflüsse an Modellunterseite	[m ³ /(d•m)]	0,00231	0,00733		0,124	0,01404	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,1477					
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,14640					
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,1454					
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	98,4					
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	1,58	5,01		84,70	9,59	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		5,04		85,30	9,66	
Anteil am Niederschlag	[%]	1,52	4,82		81,47	9,22	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,00580					
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	96,2					
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m ³ /(d•m)]		0,113	0,03735			
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,1504					
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		77,73 1)	25,69 1)			
Anteil am Niederschlag	[%]		74,24	24,54			
Infiltration in BumI	[m ³ /(d•m)]					0,0141	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]					9,63	
Anteil am Niederschlag	[%]					9,26	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Dammbaustoff + Oberboden + fiktiver Dränschicht
Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Dammbaustoff + Oberboden

Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen

superelement	E halb.smh							
Eingabedatei	E1a_2.35.fem							
Ausgabedatei	E1a_2.35.dac							
Anfangsbedingung								
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = 0$ im gesamten Modellbereich						
stationärer Zustand im Buml erreicht nach Tagen	[d]	300						
Randbedingungen								
Niederschlag	[mm/d]	2,35 (auf Oberfläche) und 1,955 (im Bereich der Böschung)						
Bodenkennwerte								
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	Sickerschicht	Buml	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU / SU*	GU (5.9% T+U)	GU (5.9% T+U)	UL	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su2	Ekblad 0.4	Ekblad 0.4	Su4	Tinjum F
Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,05	0,048	0,048	0,000	0,00
A	[1/m]	46	6,8	6,8	46	46	1,67	0,322
n		1,79	1,43	1,43	1,79	1,79	1,275	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,30	0,44	0,44	0,22	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,38	0,23	0,23	0,37	0,35
Berechnungsergebnisse								
ausgewertet nach 300 Tagen								
Niederschlag über Modelloberseite	[m ³ /(d•m)]	0,03755						
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,01777						
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,01979						
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,01991						
Abflüsse an Modellunterseite	[m ³ /(d•m)]	0,000886	0,001253			0,01752	0,01863	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,0383						
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,0379						
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,0374						
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	97,7						
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	2,34	3,31			46,23	49,16	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		3,35			46,84	49,81	
Anteil am Niederschlag	[%]	2,36	3,34			46,66	49,61	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	-0,00035						
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	100,9						
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m ³ /(d•m)]		0,01707	0,01982				
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,0369						
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		45,64	52,99				
Anteil am Niederschlag	[%]		45,46	52,78				
Infiltration in Buml	[m ³ /(d•m)]						1,92E-02	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]						50,69	
Anteil am Niederschlag	[%]						51,16	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Sickerschicht + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Sickerschicht + Oberboden

Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen

superelement	E halb.smh							
Eingabedatei	E1a_9.4.fem							
Ausgabedatei	E1a_9.4.dac							
Anfangsbedingung								
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = 0$ im gesamten Modellbereich						
stationärer Zustand im BumI erreicht nach Tagen	[d]	stationärer Zustand wurde beim Berechnungsende nach 48 Tagen nicht erreicht						
Randbedingungen								
Niederschlag	[mm/d]	9,4 (auf Oberfläche) und 7,82 (im Bereich der Böschung)						
Bodenkennwerte								
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	Sickerschicht	BumI	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU / SU*	GU (5.9% T+U)	GU (5.9% T+U)	UL	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su2	Ekblad 0.4	Ekblad 0.4	Su4	Tinjum F
Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,05	0,048	0,048	0,000	0,00
A	[1/m]	46	6,8	6,8	46	46	1,67	0,322
n		1,79	1,43	1,43	1,79	1,79	1,275	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,30	0,44	0,44	0,22	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,38	0,23	0,23	0,37	0,35
Berechnungsergebnisse								
ausgewertet nach 48 Tagen (stationärer Zustand noch nicht erreicht)								
Niederschlag über Modelloberseite	[m ³ /(d•m)]	0,152						
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,07105						
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]							
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,08095						
Abflüsse an Modellunterseite	[m ³ /(d•m)]	0,00348	0,00551			0,1165	0,00686 1)	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,1324						
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,1300						
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,1289						
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	97,4						
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	2,68	4,24			89,62	5,28 1)	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		4,28			90,40	5,32 1)	
Anteil am Niederschlag	[%]	2,29	3,63			76,64	4,51 1)	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,02200						
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	85,5						
Infiltration in Oberboden und Bankett								
Infiltration	[m ³ /(d•m)]		0,06798	0,0777				
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,1457						
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		52,75 1)	60,29 1)				
Anteil am Niederschlag	[%]		44,72	51,12				
Infiltration in BumI								
Infiltration	[m ³ /(d•m)]						2,68E-02	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]						20,63 1)	
Anteil am Niederschlag	[%]						17,64	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Sickerschicht + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Sickerschicht + Oberboden

¹⁾ stationärer Zustand wurde nicht erreicht

Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen

superelement	E halb.smh							
Eingabedatei	E1a_23.5.fem							
Ausgabedatei	E1a_23.5.dac							
Anfangsbedingung								
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = 0$ im gesamten Modellbereich						
stationärer Zustand im BumI erreicht nach Tagen	[d]	stationärer Zustand wurde beim Berechnungsende nach 36,5 Tagen nicht erreicht						
Randbedingungen								
Niederschlag	[mm/d]	23,5 (auf Oberfläche) und 19,55 (im Bereich der Böschung)						
Bodenkennwerte								
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	Sickerschicht	BumI	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU / SU*	GU (5.9% T+U)	GU (5.9% T+U)	UL	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su2	Ekblad 0.4	Ekblad 0.4	Su4	Tinjum F
Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,05	0,048	0,048	0,000	0,00
A	[1/m]	46	6,8	6,8	46	46	1,67	0,322
n		1,79	1,43	1,43	1,79	1,79	1,275	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,30	0,44	0,44	0,22	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,38	0,23	0,23	0,37	0,35
Berechnungsergebnisse								
ausgewertet nach 36,5 Tagen (stationärer Zustand noch nicht erreicht)								
Niederschlag über Modelloberseite	[m ³ /(d•m)]	0,384						
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,1776						
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,2064						
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,1991						
Abflüsse an Modellunterseite	[m ³ /(d•m)]	0,008925	0,009906			0,113	0,008424 ¹⁾	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,1403						
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,3604						
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,1313						
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	93,6						
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	2,48	2,75			31,35	2,34 ¹⁾	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		7,54			86,04	6,41 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]	2,32	2,58			29,43	2,19 ¹⁾	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,02360						
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	93,9						
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m ³ /(d•m)]		0,173	0,198				
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,3710						
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		131,73 ¹⁾	150,77 ¹⁾				
Anteil am Niederschlag	[%]		45,05	51,56				
Infiltration in BumI	[m ³ /(d•m)]						0,03264	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]						9,06 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]						8,50	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Sickerschicht + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Sickerschicht + Oberboden

¹⁾ stationärer Zustand wurde nicht erreicht

Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen

superelement	E halb.smh							
Eingabedatei	E2a_2.35.fem							
Ausgabedatei	E2a_2.35.dac							
Anfangsbedingung								
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = 0$ im gesamten Modellbereich						
stationärer Zustand im Buml erreicht nach Tagen	[d]	stationärer Zustand wurde beim Berechnungsende nach 300 Tagen noch nicht erreicht						
Randbedingungen								
Niederschlag	[mm/d]	2,35 (auf Oberfläche) und 1,955 (im Bereich der Böschung)						
Bodenkennwerte								
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	Sickerschicht	Buml	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	GU (5.9% T+U)	GU (5.9% T+U)	UL	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su3	Ekblad 0.4	Ekblad 0.4	Su4	Tinjum F
Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,000	0,048	0,048	0,000	0,00
A	[1/m]	46	6,8	2,6	46	46	1,67	0,322
n		1,79	1,43	1,28	1,79	1,79	1,275	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,22	0,44	0,44	0,22	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,36	0,23	0,23	0,37	0,35
Berechnungsergebnisse								
ausgewertet nach 300 Tagen (stationärer Zustand noch nicht erreicht)								
Niederschlag über Modelloberseite	[m³/(d•m)]	0,03755						
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,01776						
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,01979						
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,01991						
Abflüsse an Modellunterseite	[m³/(d•m)]	0,000417	0,00128			0,01858	0,01809 ¹⁾	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,0384						
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,0379						
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,0380						
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	98,9						
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	1,10	3,38			49,09	47,79 ¹⁾	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		3,37			48,96	47,67 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]	1,11	3,41			49,48	48,18 ¹⁾	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m³/(d•m)]	-0,00030						
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	100,8						
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m³/(d•m)]		0,01853	0,01854				
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,0371						
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		48,83 ¹⁾	48,85 ¹⁾				
Anteil am Niederschlag	[%]		49,35	49,37				
Infiltration in Buml	[m³/(d•m)]						0,01869	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]						49,38 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]						49,77	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Sickerschicht + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Sickerschicht + Oberboden

¹⁾ stationärer Zustand wurde nicht erreicht

Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen

superelement	E halb.smh							
Eingabedatei	E3a_2.35.fem							
Ausgabedatei	E3a_2.35.dac							
Anfangsbedingung								
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = 0$ im gesamten Modellbereich						
stationärer Zustand im Buml erreicht nach Tagen	[d]	stationärer Zustand wurde beim Berechnungsende nach 300 Tagen noch nicht erreicht						
Randbedingungen								
Niederschlag	[mm/d]	2,35 (auf Oberfläche) und 1,955 (im Bereich der Böschung)						
Bodenkennwerte								
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	Sickerschicht	Buml	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU*	SU*	GU (5.9% T+U)	GU (5.9% T+U)	UL	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su3	Su3	Ekblad 0.4	Ekblad 0.4	Su4	Tinjum F
Durchlässigkeitbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,000	0,000	0,048	0,048	0,000	0,00
A	[1/m]	46	2,6	2,6	46	46	1,67	0,322
n		1,79	1,28	1,28	1,79	1,79	1,275	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,22	0,22	0,44	0,44	0,22	0,07
Porenanteil		0,23	0,36	0,36	0,23	0,23	0,37	0,35
Berechnungsergebnisse								
ausgewertet nach 300 Tagen (stationärer Zustand noch nicht erreicht)								
Niederschlag über Modelloberseite	[m³/(d•m)]	0,03755						
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,01776						
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,01979						
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,01991						
Abflüsse an Modellunterseite	[m³/(d•m)]	0,0007927	0,000607			0,01852	0,018149 ¹⁾	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,0381						
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,0379						
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,0373						
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	97,9						
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	2,09	1,60			48,87	47,89 ¹⁾	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		1,63			49,68	48,69 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]	2,11	1,62			49,32	48,33 ¹⁾	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m³/(d•m)]	-0,00035						
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	100,9						
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m³/(d•m)]		0,01805	0,01892				
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,0370						
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		48,42 ¹⁾	50,76 ¹⁾				
Anteil am Niederschlag	[%]		48,07	50,39				
Infiltration in Buml	[m³/(d•m)]						0,01877	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]						49,53 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]						49,99	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Sickerschicht + Oberboden + fiktiver Dränschicht
Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Sickerschicht + Oberboden

¹⁾ stationärer Zustand wurde nicht erreicht

Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen

superelement	E halb.smh							
Eingabedatei	E3a_9.4.fem							
Ausgabedatei	E3a_9.4.dac							
Anfangsbedingung								
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = 0$ im gesamten Modellbereich						
stationärer Zustand im Buml erreicht nach Tagen	[d]	stationärer Zustand wurde beim Berechnungsende nach 60 Tagen nicht erreicht						
Randbedingungen								
Niederschlag	[mm/d]	9,4 (auf Oberfläche) und 7,82 (im Bereich der Böschung)						
Bodenkennwerte								
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	Sickerschicht	BumI	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU*	SU*	GU (5.9% T+U)	GU (5.9% T+U)	UL	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su3	Su3	Ekblad 0.4	Ekblad 0.4	Su4	Tinjum F
Durchlässigkeitbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,000	0,000	0,048	0,048	0,000	0,00
A	[1/m]	46	2,6	2,6	46	46	1,67	0,322
n		1,79	1,28	1,28	1,79	1,79	1,275	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,22	0,22	0,44	0,44	0,22	0,07
Porenanteil		0,23	0,36	0,36	0,23	0,23	0,37	0,35
Berechnungsergebnisse								
ausgewertet nach 60 Tagen (stationärer Zustand noch nicht erreicht)								
Niederschlag über Modelloberseite	[m ³ /(d•m)]	0,1525						
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,07105						
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]							
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,08145						
Abflüsse an Modellunterseite	[m ³ /(d•m)]	0,007522	0,008703			0,11951	0,0077311	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,1435						
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,1379						
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,1359						
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	94,8						
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	5,45	6,31			86,66	5,61 ¹⁾	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		6,40			87,91	5,69 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]	4,93	5,71			78,37	5,07 ¹⁾	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,01460						
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	90,4						
Infiltration in Oberboden und Bankett								
Infiltration	[m ³ /(d•m)]		0,106	0,03429				
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,1403						
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		77,97 ¹⁾	25,22 ¹⁾				
Anteil am Niederschlag	[%]		69,51	22,49				
Infiltration in BumI								
Infiltration	[m ³ /(d•m)]						0,02423	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]						17,57 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]						15,89	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Sickerschicht + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Sickerschicht + Oberboden

¹⁾ stationärer Zustand wurde nicht erreicht

Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen

superelement	E halb.smh							
Eingabedatei	E3a_23.5.fem							
Ausgabedatei	E3a_23.5.dac							
Anfangsbedingung								
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = 0$ im gesamten Modellbereich						
stationärer Zustand im BumI erreicht nach Tagen	[d]	stationärer Zustand wurde beim Berechnungsende nach 16,5 Tagen nicht erreicht						
Randbedingungen								
Niederschlag	[mm/d]	23,5 (auf Oberfläche) und 19,55 (im Bereich der Böschung)						
Bodenkennwerte								
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	Sickerschicht	BumI	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU*	SU*	GU (5.9% T+U)	GU (5.9% T+U)	UL	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su3	Su3	Ekblad 0.4	Ekblad 0.4	Su4	Tinjum F
Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,000	0,000	0,048	0,048	0,000	0,00
A	[1/m]	46	2,6	2,6	46	46	1,67	0,322
n		1,79	1,28	1,28	1,79	1,79	1,275	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,22	0,22	0,44	0,44	0,22	0,07
Porenanteil		0,23	0,36	0,36	0,23	0,23	0,37	0,35
Berechnungsergebnisse								
ausgewertet nach 16,5 Tagen (stationärer Zustand noch nicht erreicht)								
Niederschlag über Modelloberseite	[m³/(d•m)]	0,3848						
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,1770						
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,2078						
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,1991						
Abflüsse an Modellunterseite	[m³/(d•m)]	0,06673	0,01553			0,07402	0,004676 1)	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,1610						
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,1610						
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,0942						
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	58,5						
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	41,45	9,65			45,98	2,90 1)	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		16,48			78,56	4,96 1)	
Anteil am Niederschlag	[%]	17,34	4,04			19,24	1,22 1)	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m³/(d•m)]	0,22380						
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	41,8						
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m³/(d•m)]		0,18	0,07027				
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,2503						
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		191,03 1)	74,58 1)				
Anteil am Niederschlag	[%]		46,78	18,26				
Infiltration in BumI	[m³/(d•m)]						0,02667	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]						16,57 1)	
Anteil am Niederschlag	[%]						6,93	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Sickerschicht + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Sickerschicht + Oberboden

¹⁾ stationärer Zustand wurde nicht erreicht

Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen

superelement	E halb.smh							
Eingabedatei	E4a-1_2.35.fem							
Ausgabedatei	E4a-1_2.35.dac							
Anfangsbedingung								
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = -1$ im gesamten Modellbereich						
stationärer Zustand im BumI erreicht nach Tagen	[d]	stationärer Zustand wurde beim Berechnungsende nach 150 Tagen noch nicht erreicht						
Randbedingungen								
Niederschlag	[mm/d]	2,35 (auf Oberfläche) und 1,955 (im Bereich der Böschung)						
Bodenkennwerte								
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	Sickerschicht	BumI	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	fS	SU*	GU (5.9% T+U)	GU (5.9% T+U)	UL	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Elzeftawy	Su3	Ekblad 0.4	Ekblad 0.4	Su4	Tinjum F
Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,120	0,000	0,048	0,048	0,000	0,00
A	[1/m]	46	3,45	2,6	46	46	1,67	0,322
n		1,79	3,8	1,28	1,79	1,79	1,275	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,74	0,22	0,44	0,44	0,22	0,07
Porenanteil		0,23	0,28	0,36	0,23	0,23	0,37	0,35
Berechnungsergebnisse								
ausgewertet nach 150 Tagen (stationärer Zustand noch nicht erreicht)								
Niederschlag über Modelloberseite	[m ³ /(d•m)]	0,038						
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,01776						
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,02024						
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,01991						
Abflüsse an Modellunterseite	[m ³ /(d•m)]	0,000541	0,01376			0,0135	0,01681 ¹⁾	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,0446						
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,0353						
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,0441						
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	98,8						
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	1,53	38,98			38,24	47,62 ¹⁾	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		31,22			30,63	38,14 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]	1,42	36,21			35,53	44,24 ¹⁾	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,00270						
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	92,9						
Infiltration in Oberboden und Bankett								
Infiltration	[m ³ /(d•m)]		0,02018	0,01725				
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,0374						
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		45,79 ¹⁾	39,14 ¹⁾				
Anteil am Niederschlag	[%]		53,11	45,39				
Infiltration in BumI								
Infiltration	[m ³ /(d•m)]						0,01792	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]						50,76 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]						47,16	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Sickerschicht + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Sickerschicht + Oberboden

¹⁾ stationärer Zustand wurde nicht erreicht

Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen

superelement	E halb.smh							
Eingabedatei	E2b-1_2.35.fem							
Ausgabedatei	E2b-1_2.35.dac							
Anfangsbedingung								
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = -1$ im gesamten Modellbereich						
stationärer Zustand im Buml erreicht nach Tagen	[d]	400						
Randbedingungen								
Niederschlag	[mm/d]	2,35 (auf Oberfläche) und 1,955 (im Bereich der Böschung)						
Bodenkennwerte								
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	Sickerschicht	Buml	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	SU*	GU (5.9% T+U)	UL	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su3	Su3	Ekblad 0.4	Su4	Tinjum F
Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,000	0,000	0,048	0,000	0,00
A	[1/m]	46	6,8	2,6	2,6	46	1,67	0,322
n		1,79	1,43	1,28	1,28	1,79	1,275	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,22	0,22	0,44	0,22	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,36	0,36	0,23	0,37	0,35
Berechnungsergebnisse								
ausgewertet nach 480 Tagen								
Niederschlag über Modelloberseite	[m ³ /(d•m)]	0,03802						
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,01772						
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,02030						
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]							
Abflüsse an Modellunterseite	[m ³ /(d•m)]	0,0005568	0,001867			0,0142	0,02	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,0366						
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,0360						
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,0361						
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	98,5						
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	1,55	5,19			39,47	55,59	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		5,18			39,37	55,45	
Anteil am Niederschlag	[%]	1,46	4,91			37,35	52,60	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,00204						
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	94,6						
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m ³ /(d•m)]		0,01903	0,01830				
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,0373						
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		52,76	50,74				
Anteil am Niederschlag	[%]		50,05	48,13				
Infiltration in Buml	[m ³ /(d•m)]						0,01991	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]						55,34	
Anteil am Niederschlag	[%]						52,37	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Sickerschicht + Oberboden + fiktiver Dränschicht
Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Sickerschicht + Oberboden

Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen

superelement	E halb.smh							
Eingabedatei	E2b-1_9.4.fem							
Ausgabedatei	E2b-1_9.4.dac							
Anfangsbedingung								
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = -1$ im gesamten Modellbereich						
stationärer Zustand im Buml erreicht nach Tagen	[d]	stationärer Zustand wurde beim Berechnungsende nach 46 Tagen nicht erreicht						
Randbedingungen								
Niederschlag	[mm/d]	2,35 (auf Oberfläche) und 1,955 (im Bereich der Böschung)						
Bodenkennwerte								
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	Sickerschicht	Buml	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	SU*	GU (5.9% T+U)	UL	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su3	Su3	Ekblad 0.4	Su4	Tinjum F
Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,000	0,000	0,048	0,000	0,00
A	[1/m]	46	6,8	2,6	2,6	46	1,67	0,322
n		1,79	1,43	1,28	1,28	1,79	1,275	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,22	0,22	0,44	0,22	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,36	0,36	0,23	0,37	0,35
Berechnungsergebnisse								
ausgewertet nach 46 Tagen (stationärer Zustand noch nicht erreicht)								
Niederschlag über Modelloberseite	[m³/(d•m)]	0,1519						
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,0709						
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,0817						
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,0859						
Abflüsse an Modellunterseite	[m³/(d•m)]	0,00234	0,00642			0,11395	0,00665 ¹⁾	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,1294						
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,1262						
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,1270						
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	98,2						
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	1,85	5,09			90,29	5,27 ¹⁾	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		5,05			89,71	5,24 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]	1,54	4,23			75,02	4,38 ¹⁾	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m³/(d•m)]	0,02570						
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	83,1						
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m³/(d•m)]		0,11300	0,03573				
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,1487						
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		88,96 ¹⁾	28,13 ¹⁾				
Anteil am Niederschlag	[%]		74,39	23,52				
Infiltration in Buml	[m³/(d•m)]						0,02531	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]						20,06 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]						16,66	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Sickerschicht + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Sickerschicht + Oberboden

¹⁾ stationärer Zustand wurde nicht erreicht

Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen

superelement	E halb.smh							
Eingabedatei	E2b-1_23.5.fem							
Ausgabedatei	E2b-1_23.5.dac							
Anfangsbedingung								
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = -1$ im gesamten Modellbereich						
stationärer Zustand im Buml erreicht nach Tagen	[d]	stationärer Zustand wurde beim Berechnungsende nach 10 Tagen nicht erreicht						
Randbedingungen								
Niederschlag	[mm/d]	23,5 (auf Oberfläche) und 19,55 (im Bereich der Böschung)						
Bodenkennwerte								
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	Sickerschicht	Buml	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	SU*	GU (5.9% T+U)	UL	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su3	Su3	Ekblad 0.4	Su4	Tinjum F
Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,000	0,000	0,048	0,000	0,00
A	[1/m]	46	6,8	2,6	2,6	46	1,67	0,322
n		1,79	1,43	1,28	1,28	1,79	1,275	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,22	0,22	0,44	0,22	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,36	0,36	0,23	0,37	0,35
Berechnungsergebnisse								
ausgewertet nach 10 Tagen (stationärer Zustand noch nicht erreicht)								
Niederschlag über Modelloberseite	[m³/(d•m)]	0,3787						
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,1772						
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,2030						
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]	0,2147						
Abflüsse an Modellunterseite	[m³/(d•m)]	0,00521	0,01554			0,3198	0,004345 1)	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,3449						
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,3420						
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,3397						
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	98,5						
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	1,52	4,54			93,51	1,27 1)	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		4,57			94,15	1,28 1)	
Anteil am Niederschlag	[%]	1,38	4,10			84,45	1,15 1)	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m³/(d•m)]	0,03670						
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	90,3						
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m³/(d•m)]		0,319	0,054				
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,3730						
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		93,91 1)	15,90 1)				
Anteil am Niederschlag	[%]		84,24	14,26				
Infiltration in Buml	[m³/(d•m)]						0,03169	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]						9,27 1)	
Anteil am Niederschlag	[%]						8,37	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Sickerschicht + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Sickerschicht + Oberboden

¹⁾ stationärer Zustand wurde nicht erreicht

Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen

superelement	E halb.smh							
Eingabedatei	E2c-1_2.35.fem							
Ausgabedatei	E2c-1_2.35.dac							
Anfangsbedingung								
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = -1$ im gesamten Modellbereich						
stationärer Zustand im Buml erreicht nach Tagen	[d]	stationärer Zustand wurde beim Berechnungsende nach 380 Tagen nicht erreicht						
Randbedingungen								
Niederschlag	[mm/d]	2,35 (auf Oberfläche) und 1,955 (im Bereich der Böschung)						
Bodenkennwerte								
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	Sickerschicht	Buml	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	SU*	GU (5.9% T+U)	org. Boden	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su3	Su3	Ekblad 0.4	MUC	Tinjum F
Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,000	0,000	0,048	0,05	0,00
A	[1/m]	46	6,8	2,6	2,6	46	0,14	0,322
n		1,79	1,43	1,28	1,28	1,79	1,4	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,22	0,22	0,44	0,29	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,36	0,36	0,23	0,65	0,35
Berechnungsergebnisse								
ausgewertet nach 380 Tagen (stationärer Zustand noch nicht erreicht)								
Niederschlag über Modelloberseite	[m³/(d*m)]	0,03802						
über Fahrbahn	[m ³ /(d*m)]	0,01772						
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d*m)]	0,02030						
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d*m)]							
Abflüsse an Modellunterseite	[m³/(d*m)]	0,000557	0,00188			0,03525	0,000439 ¹⁾	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d*m)]	0,0381						
Gesamtabfluss	[m ³ /(d*m)]	0,0375						
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d*m)]	0,0376						
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	98,5						
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	1,49	5,01			94,00	1,17 ¹⁾	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		5,00			93,83	1,17 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]	1,47	4,94			92,71	1,15 ¹⁾	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m³/(d*m)]	0,00052						
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	98,6						
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m³/(d*m)]		0,01903	0,01830				
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d*m)]	0,0373						
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		50,65 ¹⁾	48,71 ¹⁾				
Anteil am Niederschlag	[%]		50,05	48,13				
Infiltration in Buml	[m³/(d*m)]						0,00107	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]						2,85 ¹⁾	
Anteil am Niederschlag	[%]						2,81	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Sickerschicht + Oberboden + fiktiver Dränschicht
 Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
 Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus Buml + Sickerschicht + Oberboden

¹⁾ stationärer Zustand wurde nicht erreicht

Bauweise E mit schwach durchlässigem Baukörper aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen

superelement	E halb.smh							
Eingabedatei	E2d-1_2.35.fem							
Ausgabedatei	E2d-1_2.35.dac							
Anfangsbedingung								
Potentialhöhe	[m]	$\psi_h = -1$ im gesamten Modellbereich						
stationärer Zustand im BumI erreicht nach Tagen	[d]	200						
Randbedingungen								
Niederschlag	[mm/d]	2,35 (auf Oberfläche) und 1,955 (im Bereich der Böschung)						
Bodenkennwerte								
Schicht		Fiktive Dränschicht	Oberboden	Bankett	Dammbaustoff	Sickerschicht	BumI	Asphalt
DIN 18196		GU (5.9% T+U)	SU / SU*	SU*	SU*	GU (5.9% T+U)	org. Boden	TA
Kurzbezeichnung		Ekblad 0.4	Su2	Su3	Su3	Ekblad 0.4	MUC*	Tinjum F
Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-10}$
S_s		1	1	1	1	1	1	1
S_r		0,048	0,05	0,000	0,000	0,048	0,05	0,00
A	[1/m]	46	6,8	2,6	2,6	46	0,14	0,322
n		1,79	1,43	1,28	1,28	1,79	1,4	1,07
$m = 1/(1-n)$		0,44	0,30	0,22	0,22	0,44	0,29	0,07
Porenanteil		0,23	0,38	0,36	0,36	0,23	0,65	0,35
Berechnungsergebnisse								
ausgewertet nach 240 Tagen								
Niederschlag über Modelloberseite	[m ³ /(d•m)]	0,03802						
über Fahrbahn	[m ³ /(d•m)]	0,01772						
über Bankett und Böschung	[m ³ /(d•m)]	0,02030						
über Fahrbahn und Bankett	[m ³ /(d•m)]							
Abflüsse an Modellunterseite	[m ³ /(d•m)]	0,000557	0,00188			0,0271	0,00803	
Summe Teilabflüsse	[m ³ /(d•m)]	0,0376						
Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,0369						
Gesamt-Sickerwassermenge	[m ³ /(d•m)]	0,0370						
Gesamt-Sickerwasser/Gesamtabfluss	[%]	98,5						
Anteil am Gesamtabfluss	[%]	1,51	5,09			73,44	21,76	
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		5,08			73,22	21,70	
Anteil am Niederschlag	[%]	1,47	4,94			71,28	21,12	
Differenz Gesamtzufluss-Gesamtabfluss	[m ³ /(d•m)]	0,00112						
Gesamtabfluss/Niederschlag	[%]	97,1						
Infiltration in Oberboden und Bankett	[m ³ /(d•m)]		0,01903	0,01830				
Gesamtinfiltration	[m ³ /(d•m)]	0,0373						
Anteil an Gesamt-Sickerwassermenge	[%]		51,42	49,45				
Anteil am Niederschlag	[%]		50,05	48,13				
Infiltration in BumI	[m ³ /(d•m)]						0,007933	
Anteil an Gesamtabfluss	[%]						21,50	
Anteil am Niederschlag	[%]						20,87	

Summe Teilabflüsse = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Sickerschicht + Oberboden + fiktiver Dränschicht
Gesamtabfluss = Gesamtabfluss über Head-Randbedingungen
Gesamt-Sickerwasser = Summe der Teilabflüsse aus BumI + Sickerschicht + Oberboden