

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

FA 5.192

Forschungsstelle: Technische Universität München, Zentrum Geotechnik, Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau (Prof. Dr.-Ing. R. Cudmani)
 Bearbeiter: Birle, E. / Koukoulidou, A. / Cudmani, R.
 Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn
 Abschluss: Februar 2019

1 Einleitung

Untersuchungen zur Durchsickerung von Erdbauwerken bei der Verwendung von Böden beziehungsweise Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen wurden bereits in den beiden vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) geförderten Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FE 05.147 (Schweller et al., 2009) und FE 84.105 (Michaelides et al., 2013) durchgeführt. Mit den im Rahmen des Forschungsvorhabens 05.147 durchgeführten Simulationsberechnungen konnte die prinzipielle Wirksamkeit der Bauweisen A, B und D belegt werden. Mit den Untersuchungen von Michaelides et al. (2013) konnte gezeigt werden, dass auch für die Bauweise E sehr geringe Sickerwassermengen zu erwarten sind, wenn die zum Einsatz kommenden Böden beziehungsweise Baustoffe mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen einen Durchlässigkeitsbeiwert im Bereich von $k = 1 \cdot 10^{-8}$ m/s aufweisen.

Bei den im Zusammenhang mit der Bauweise E durchgeführten Berechnungen wurden jedoch keine RC-Baustoffe und industriellen Nebenprodukte betrachtet, da zum Zeitpunkt der Berechnungen keine belastbaren Daten zu deren hydraulischen Eigenschaften vorlagen. Im Vergleich zu mineralischen Böden weisen RC-Baustoffe und industrielle Nebenprodukte aber deutliche Unterschiede im Hinblick auf ihre hydraulischen und erdbautechnischen Eigenschaften auf, die im Vergleich zu mineralischen Böden mit vergleichbaren Korngrößenverteilungen zu einem deutlich unterschiedlichen Verhalten führen können. Nachdem in der Folge von Scharnagl und Durner (2014) experimentelle Untersuchungen zu den hydraulischen Eigenschaften von Ersatzbaustoffen durchgeführt und Kennwerte für die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit und die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung ermittelt worden waren, lagen nunmehr belastbare Kennwerte als Eingangsparameter für Simulationsberechnungen vor.

Da RC-Baustoffe und industrielle Nebenprodukte einen nennenswerten Stoffstrom darstellen und aufgrund ihrer in der Regel sehr guten erdbautechnischen Eigenschaften für einen Einsatz im Erdbau prädestiniert sind, sollten auch für diese Stoffe Untersuchungen zur Durchsickerung beim Einsatz in Straßendämmen durchgeführt werden. Mithilfe der Berechnungen sollte beurteilt werden, unter welchen Randbedingungen technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden beziehungsweise Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen gemäß den Bauweisen des Merkblatts MTSE erforderlich

werden und unter welchen Umständen auf zusätzliche Abdichtungselemente verzichtet werden kann. Außerdem sollte anhand der Untersuchungen herausgearbeitet werden, inwiefern sich RC-Baustoffe und industrielle Nebenprodukte gegenüber natürlichen Böden im Hinblick auf eine Durchsickerung unterscheiden.

2 Zielsetzung und Methodik

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

3 Modellbildung

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

Für die Simulationsberechnungen wurde ein 4 m hoher Straßendamm betrachtet. Die Dammhöhe bis zum Planum beträgt 3,2 m und die Höhe des Oberbaus 80 cm (54 cm Frostschuttschicht und Schottertragschicht sowie 26 cm gebundene Schichten).

Unter Zugrundelegung der oben beschriebenen Geometrie wurden zwei Grundmodelle erstellt. In Grundmodell 1 wurden technische Sicherungsmaßnahmen entsprechend der Bauweise E berücksichtigt. Die oberhalb des Kernmaterials vorgesehene Dränmatte wurde im Modell als 20 cm dicke Dränschicht abgebildet. Die Geometrie des Grundmodells 1 ist in Bild 1 dargestellt. Die Geometrie des Grundmodells 2 unterscheidet sich vom Grundmodell 1 nur darin, dass die Dränschicht zwischen Oberboden und Kern entfällt (siehe Bild 2).

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

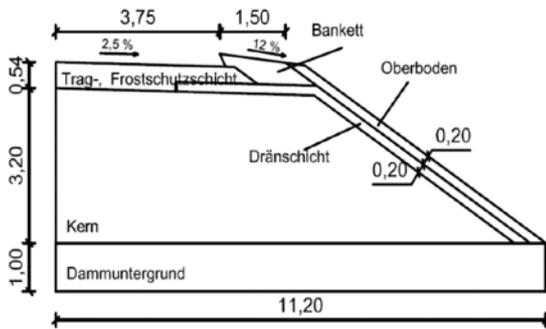


Bild 1: Geometrie von Grundmodell 1

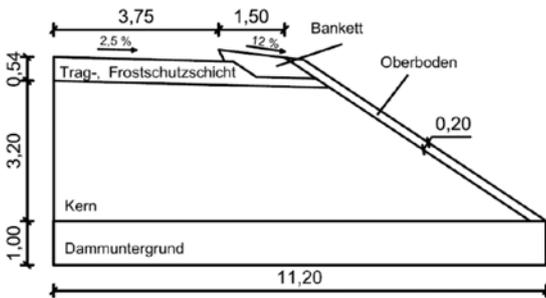


Bild 2: Geometrie von Grundmodell 2

Die für beide Grundmodelle verwendeten Randbedingungen sind in Bild 3 dargestellt. An der Modellunterseite wurde eine Randbedingung der ersten Art (Potentialrandbedingung) von -1 m angesetzt. Sie entspricht der Lage des angenommenen höchsten Grundwasserspiegels und ermöglicht die freie Entwässerung des Kerns. Die rechte und linke Seite des Damms sowie die Fahrbohnoberfläche wurden als undurchlässig betrachtet.

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

Der Fahrbohnabfluss wurde im Modell als zusätzlicher Niederschlag im Bereich des Banketts und des Oberbodens berücksichtigt, wobei eine Verteilung halb auf Bankett und halb auf Oberboden angesetzt wurde.

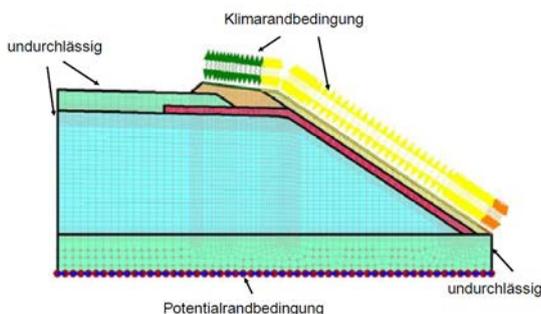


Bild 3: Randbedingungen

Die hydraulischen Kennwerte des Bankettmaterials, des Oberbodens und der Frostschuttschicht wurden in den Reihenuntersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Kernmaterialien gleich angesetzt. Für das Bankettmaterial wurde der von Scharnagl und Durner untersuchte Boden "BM 5" herangezogen. Bei diesem handelt es sich um einen stark schluffigen Kies (GU* nach DIN 18196, Feinkornanteil ca. 20 %) mit einem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert von $7,5 \cdot 10^{-6}$ m/s. Für die Frostschuttschicht wurde der von Scharnagl und Durner untersuchte Boden "BM 1", bei dem es sich um einen stark sandigen Kies (GW nach DIN 18196) handelt, herangezogen. Für den Oberboden wurden die Werte nach Hennings (2000) für einen schluffigen Sand (Su2), die aus der bodenkundlichen Kartieranleitung stammen und für nicht verdichtete Böden in natürlicher Lagerung als repräsentativ angesehen werden können, verwendet. Die gesättigte Durchlässigkeit des Oberbodens wurde mit $1 \cdot 10^{-5}$ m/s abgeschätzt. Die hydraulischen Kennwerte für die Dränschicht wurden entsprechend den Ergebnissen, die im Rahmen des Forschungsvorhabens 05.185 "Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST" (Melsbach et al., 2018) durch Nachrechnung der Ergebnisse der Hallenlysimeter ermittelt wurden, angesetzt. Dabei handelt es sich um eine Modifikation der von Ekblad und Isacsson (2007) an einem schwach schluffigen Kies (GU nach DIN 18196) ermittelten Bodenkennwerte. Der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert beträgt $5 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Für den Kern wurden die folgenden Materialien von Scharnagl und Durner betrachtet:

- Boden "BM 1": stark sandiger Kies (GW nach DIN 18196) mit einem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert k von $1 \cdot 10^{-5}$ m/s
- Boden "BM 2": ein von Scharnagl und Durner als stark sandiger Schluff bezeichneter Boden, bei dem es sich nach DIN 18196 aber um einen stark schluffigen Kies (GU*) handelt. Der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert k beträgt $6,6 \cdot 10^{-8}$ m/s.
- RC-Baustoff "RC 2": ein von Scharnagl und Durner als "Praxisgemisch" bezeichneter Baustoff, bei dem es sich um einen RC-Mix handeln dürfte. Der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert k beträgt $1,8 \cdot 10^{-6}$ m/s.
- RC-Baustoff "RC 5": schluffiger Kies (GU nach DIN 18196) mit einem gesättigten k -Wert von $1,2 \cdot 10^{-6}$ m/s
- Hausmüllverbrennungsasche "HMVA 1": GW nach DIN 18196 mit einem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert k von $6,4 \cdot 10^{-5}$ m/s
- Hausmüllverbrennungsasche "HMVA 3": GU nach DIN 18196 mit einem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert k von $6,3 \cdot 10^{-8}$ m/s
- Stahlwerksschlacke "SWS": GU nach DIN 18196 mit einem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert k von $1,2 \cdot 10^{-6}$ m/s

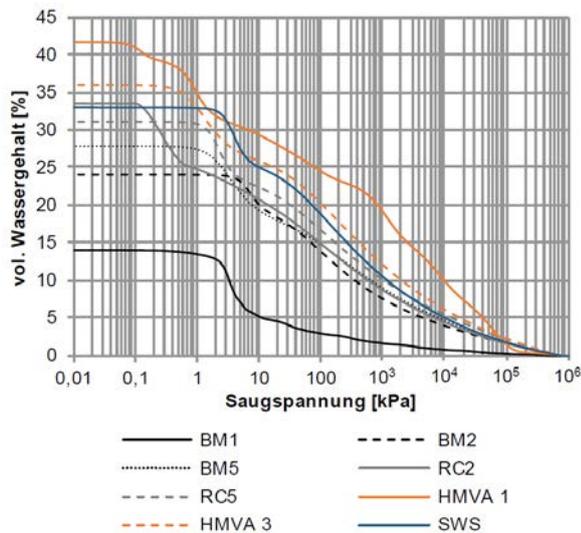


Bild 4: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen der Kernmaterialien

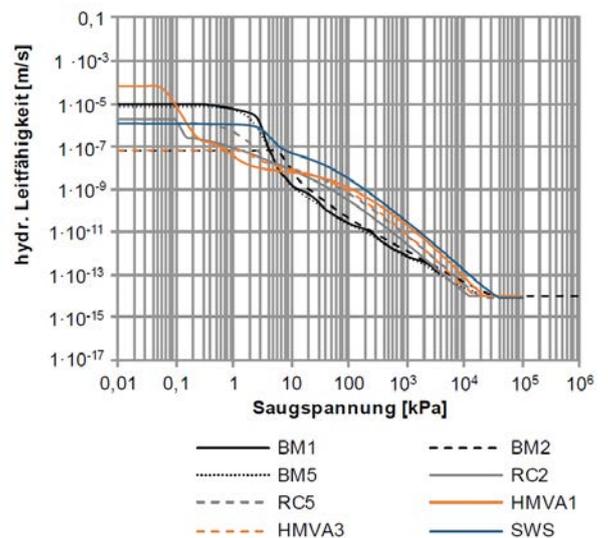


Bild 5: Hydraulische Leitfähigkeitsfunktionen der Kernmaterialien

Zusätzlich wurde eine Berechnung mit dem im Forschungsvorhaben FE 84.105 betrachteten organischen Ton (OT nach DIN 18196) mit einer gesättigten Durchlässigkeit von $1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s durchgeführt. Die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen und die Leitfähigkeitsfunktionen für die Kernmaterialien sind in Bild 4 und 5 dargestellt.

Darüber hinaus wurden sechs Berechnungen zur Ermittlung des Einflusses des Banketts auf den Wasserhaushalt durchgeführt. Dazu wurden für das Bankett Materialien mit unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften ($k_{\text{sat}} = 1,0 \cdot 10^{-5}$ m/s, $k_{\text{sat}} = 7,5 \cdot 10^{-6}$ m/s, $k_{\text{sat}} = 1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s) zum Ansatz gebracht. Außerdem wurden Berechnungen zu einer möglichst realitätsnahen Abbildung des Oberflächenabflusses durchgeführt.

4 Berechnungsergebnisse

In Bild 6 sind die Berechnungsergebnisse der Grundmodelle 1 und 2 dargestellt.

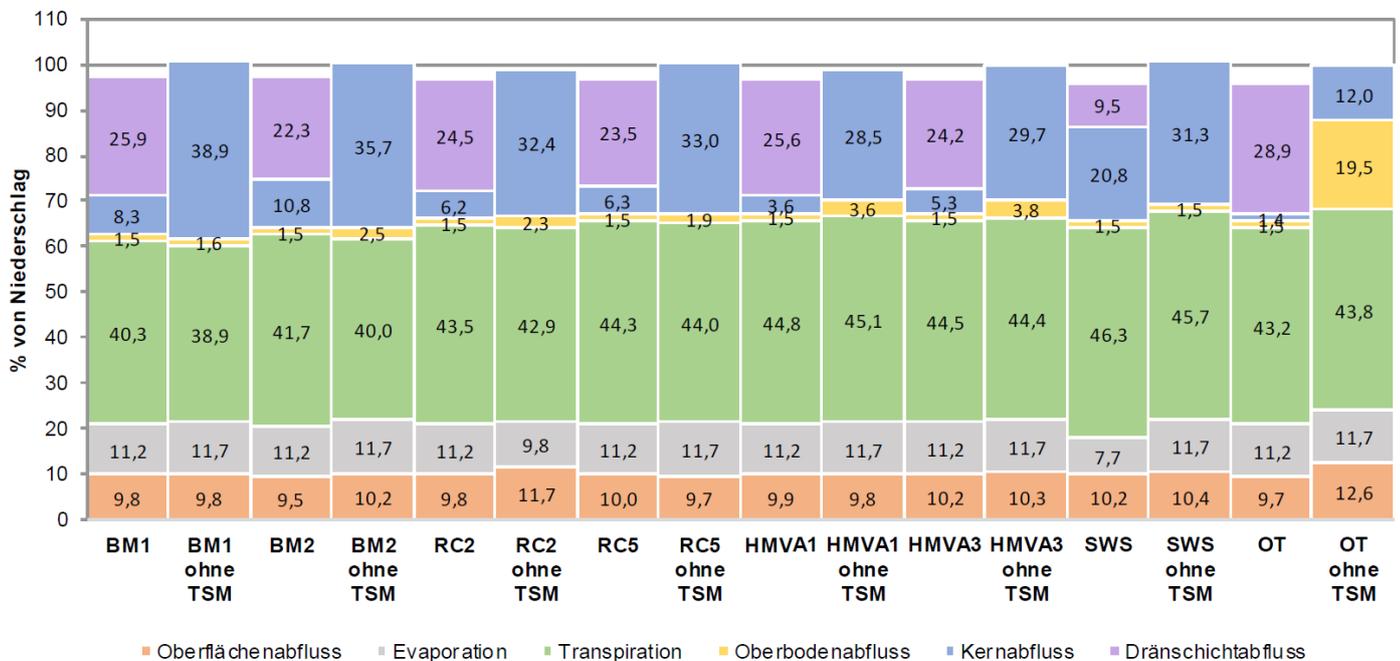


Bild 6: Vergleich der Modelle mit Dränschicht (Grundmodell 1) und ohne Dränschicht (Grundmodell 2)

Aus den Berechnungsergebnissen lässt sich Folgendes ableiten:

- Die Sickerwassermenge aus dem Straßendamm (Kernabfluss) liegt bei den Modellen ohne Dränschicht (Grundmodell 2) im Bereich von ca. 29 bis 39 % (bezogen auf den Niederschlag), solange der Durchlässigkeitsbeiwert des Kernmaterials $k \geq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s ist. Erst bei einem Durchlässigkeitsbeiwert $k \leq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s nimmt die Sickerwassermenge aus dem Kern deutlich ab. Außerdem zeigen die Berechnungen, dass die Sickerwassermenge bei den Materialien mit einem Durchlässigkeitsbeiwert $k \geq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s nicht in eine direkte Abhängigkeit vom gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert des Kernmaterials gebracht werden kann.
- Die Verwendung einer Dränschicht oberhalb des Kernmaterials (Grundmodell 1) führt zu einer signifikanten Reduktion des Sickerwassers aus dem Kern. So beträgt der Kernabfluss abgesehen vom Modell mit Stahlwerksschlacke bei den Materialien mit einem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert $k \geq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s zwischen 3,6 und 10,8 % des Niederschlags. Bei Ansatz der Stahlwerksschlacke (SWS) als Kernmaterial liegt der Kernabfluss bei 20,8 %. Die Berechnung mit dem organischen Ton als Kernmaterial ($k_{\text{sat}} = 1 \cdot 10^{-8}$ m/s) ergab einen Kernabfluss von 1,4 %.
- Die Berechnungsergebnisse am Modell mit Dränschicht belegen, dass der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert des Kernmaterials für die hier betrachteten, überwiegend durchlässigen Materialien kein geeigneter Indikator ist, um die Höhe der Kerndurchsickerung zu prognostizieren. Die Berechnung mit dem Ton mit organischen Beimengungen als Kernmaterial (OT) ergibt aufgrund des sehr geringen gesättigten Durchlässigkeitsbeiwerts des Tons (kleiner als $1 \cdot 10^{-8}$ m/s entsprechend den Anforderungen nach MTSE) erwartungsgemäß eine sehr geringe Durchsickerung des Kerns und bestätigt damit die Eignung der Bauweise E nach MTSE zur Minimierung der Durchsickerung von Böden beziehungsweise Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen. Mit zunehmendem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert des Kernmaterials nimmt die Durchsickerung des Kerns aber nicht in gleicher Weise zu. Dies zeigt sich am deutlichsten an der Berechnung mit der HMVA 1. Obwohl diese mit $k_{\text{sat}} = 6,4 \cdot 10^{-5}$ m/s die höchste gesättigte Durchlässigkeit aller untersuchten Kernmaterialien aufweist, ist der ermittelte Kernabfluss mit 3,6 % des Niederschlags sehr niedrig. Die Wirksamkeit der Dränschicht und der sich ergebende Kernabfluss werden dagegen maßgeblich von der hydraulischen Leitfähigkeit des Kernmaterials im ungesättigten Zustand, und dabei besonders im Bereich der sich einstellenden Saugspannungen an der Grenze zwischen Dränschicht und Kern, beeinflusst.
- Die zusätzlichen Berechnungen zum Einfluss des Bankettmaterials zeigen, dass bei einem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert des Bankettmaterials von $k_{\text{sat}} \geq 1,0 \cdot 10^{-5}$ m/s der Straßenabfluss zu 90 % im Bereich des Banketts versickern kann. Bei dem gemäß den ZTV E-StB 2017 geforderten gering durchlässigen Bankettmaterial ($k_{\text{sat}} = 1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s) kann davon ausgegangen werden, dass ca. 65 % im Bankettbereich versickern und 35 % des Straßenabflusses über das Bankett oberflächlich abfließen.
- Die zusätzlichen Berechnungen zur Verteilung des Straßenabflusses auf Bankett und Oberboden zeigen, dass die Verteilung des Straßenabflusses auf Bankett und Oberboden im Modell insbesondere bei gering durchlässigen Bankettmaterialien einen Einfluss auf die Sickerwassermenge und den Dränschichtabfluss hat. Für Bankettmaterialien mit einem Durchlässigkeitsbeiwert $k_{\text{sat}} \geq 1,0 \cdot 10^{-5}$ m/s kann vereinfachend der Straßenabfluss im Modell zu 100 % auf das Bankett aufgebracht werden, ohne dass dadurch signifikante Ungenauigkeiten hinsichtlich des Wasserhaushalts zu erwarten wären. Bei Bankettmaterialien mit einem Durchlässigkeitsbeiwert im Bereich von $k_{\text{sat}} = 1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s wird für zukünftige Berechnungen empfohlen, ca. 2/3 des Straßenabflusses auf dem Bankettbereich und ca. 1/3 im Bereich des Oberbodens aufzubringen. Für Bankettmaterialien mit einem Durchlässigkeitsbeiwert zwischen $k_{\text{sat}} \geq 1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s und $k_{\text{sat}} \leq 1,0 \cdot 10^{-5}$ m/s wird dementsprechend je nach k-Wert eine Berechnung mit einem Ansatz von 65 bis 100 % des Straßenabflusses im Bereich des Banketts und dem Rest im Bereich des Oberbodens als ausreichend realitätsnah beurteilt. Allerdings ist diesbezüglich zu beachten, dass die Größe des Straßenabflusses direkt von der Niederschlagshöhe und -verteilung abhängt und die genannten Anteile der Versickerung nur für die untersuchten Verhältnisse gelten (durchschnittlicher Jahresniederschlag 828 mm/a).
- Die bei Grundmodell 1 und 2 zugrunde gelegte Verteilung des Straßenabflusses halb auf Bankett und halb auf Oberboden führt tendenziell zu etwas geringeren Sickerwassermengen aus dem Kern, verglichen zum Ansatz von 100 % des Straßenabflusses auf dem Bankett.
- Insbesondere bei gering durchlässigen Bankettmaterialien, auf denen ein Teil des Straßenabflusses oberflächlich abfließt und nicht infiltriert, hat auch der Oberboden einen maßgeblichen Einfluss auf den Wasserhaushalt. Die im Rahmen der Voruntersuchungen durchgeführten Berechnungen zeigen, dass der Oberflächenabfluss sehr stark von der minimalen Leitfähigkeit des Oberbodens bei niedrigen Wassergehalten beziehungsweise hohen Saugspannungen, die beispielsweise nach längeren Trockenperioden vorliegen können, abhängt und zur Vermeidung unrealistisch hoher Oberflächenabflüsse die minimale hydraulische Leitfähigkeit nicht kleiner als ca. $k_{\text{sat}} = 1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s vorgegeben werden sollte.
- Einen wesentlichen Einfluss auf den Wasserhaushalt von Straßendämmen hat die Dränschicht. In den Modellberechnungen wurde diese mit hydraulischen Kennwerten einer Kiesschicht belegt, wobei die Kennwerte dem Forschungsvorhaben 05.185 "Numerische

Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST" (Melsbach et al., 2018) entnommen worden waren. Darin wurden die hydraulischen Kennwerte der verwendeten Dränmatte aus einer Nachrechnung von experimentellen Untersuchungen abgeleitet.

