Überprüfung und Fortschreibung der Filterregeln für Geotextilien

Jana Liebl M.Sc., Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik Moritz Schleeh M.Sc., Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik

Die langfristige Funktionalität von Geokunststoffen, die für die Filtration verwendet werden, hängt davon ab, ob sie dem umgebenden Boden Filterstabilität verleihen und gleichzeitig ihr Verstopfen durch feine Partikel verhindert wird. In der Literatur finden sich mehrere Filterregeln/Kriterien zur Beurteilung der Filterstabilität, so auch in dem von der FSGV herausgegebenen Merkblatt M GeokE [1]. M Geok E ordnet die Anwendung in drei Sicherheitsfälle ein, die durch die Angabe von Bereichen der zulässigen effektiven Öffnungsweite, genannt "O_{on}", beschrieben werden. Zu der Zeit, als das M Geok E entwickelt wurde, galt die Obergrenze O₉₀ als technisch sinnvoll/ erstrebenswert, während die Untergrenze auch ein Zugeständnis an die verfügbaren Produkte war. Mittlerweile sind fast ausschließlich Produkte mit O₉₀ an der Untergrenze auf dem Markt erhältlich. Beim Einsatz dieser Produkte für geotextile Filter können Probleme infolge verminderter Durchlässigkeit bzw. Verstopfung des Filters auftreten, was zu einem Ausfall der hydraulischen Filterleistung des Systems führen. In der Folge kann es zur Ansammlung von Sicker-/ Schichtwasser z.B. in Entwässerungsgräben kommen. Neben unerwünschter Staunässe kann es aber auch zu einer Beeinträchtigung der Standsicherheit von Strukturen durch erhöhten Wasserdruck kommen. Der Beitrag gibt einen Überblick über die Ergebnisse einer neuen experimentellen Studie zur Untersuchung der Filterkriterien und des Stofftransports für verschiedene Parameter mittels Filtertests am Boden-Geotextil-System. Abschließend werden Empfehlungen für eine Fortschreibung der Filterkriterien für Geokunststoffe vorgestellt.

1 Einleitung

Horizontales oder vertikales Durchströmen von aneinandergrenzenden Bodenschichten unterschiedlicher Korngrößenverteilung kann an den Grenzflächen und innerhalb der Schichtstrukturen als Folge der Übertragung der Strömungskräfte des Wassers auf das Korngerüst des Bodens hydrodynamische Bodendeformationen bzw. Strukturänderungen des Korngerüsts induzieren. Es kann zu Erosions-, Suffusions- sowie Kolmationserscheinungen kommen. Verhindert die Porenstruktur und die Porenengstellenverteilung der durchströmten Erdstoffe Umlagerungen und den Abtransport von Bodenpartikeln (Bodenrückhaltevermögen), wird dies mechanische Filterstabilität genannt. Die aneinandergrenzenden, durchströmten Schichten sind dann in sich filterstabil zusammengesetzt. Ist dagegen eine Kornbewegung geometrisch möglich, bedarf es zusätzlich der Überschreitung einer für die Mobilisierung der Bodenpartikel kritischen hydraulischen Belastung der Grund- oder Sickerwasserströmung. Wird dieser kritische hydraulische Gradient bei der Durchströmung hingegen nicht erreicht, spricht man von hydraulischer Filterstabilität. Ist weder die mechanische, noch die hydraulische Filterstabilität gegeben, muss einer das Korngerüst der durchströmten Schichten schädigenden Wirkung durch die Anordnung eines Filters entgegengewirkt werden. Als Alternative zu klassischen ein- oder mehrstufigen mineralischen Kornfiltern gewinnt seit einigen Jahren der Einsatz von geotextilen Filtern in Form von durchlässigen Flächenstrukturen wie Vliesen, Gewebe und Maschenware zunehmend an Beliebtheit. Zu den Anwendungsgebieten geotextiler Filter gehören der Staudammbau, der Verkehrswegebau, der Küstenschutz sowie auch der Deponiebau und Stra-Benbau. Die grundsätzliche Aufgabe eines Filters besteht also in der Verhinderung des fortschreitenden Materialaustrags aus dem zu entwässernden Bodenkörper - man spricht von mechanischer Filterwirksamkeit. Dieser Forderung entgegenstehend muss ein Filter andererseits dauerhaft ausreichend durchlässig sein, um seine Durchströmung ohne Rückstau, d.h. ohne wesentlichen Potentialabbau innerhalb des Filters zu ermöglichen. Wird diese



Forderung erfüllt spricht man von *hydraulischer Filterwirksamkeit*. Die zentrale Aufgabe jeder Filterbemessung besteht folglich darin, für den konkreten bautechnischen Anwendungsfall vier sich teilweise widersprechende Kriterien einzuhalten [2]:

- Bodenrückhalt/mechanische Filterwirksamkeit: Die Bodenpartikel müssen nahezu vollständig zurückgehalten werden
- 2. Hydraulische Filterwirksamkeit: das zuströmende Wasser muss druckfrei abgeleitet werden
- 3. Kolmation: die Durchlässigkeit des Filters darf nicht durch eingelagerte Bodenteilchen abnehmen
- Robustheit: der Filter darf beim Einbau, Überschütten oder im Betrieb nicht beschädigt werden

Werden die Kriterien nicht eingehalten, kann es bei Verwendung geotextiler Filter zu Problemen wie einer verminderten Durchlässigkeit oder Verstopfen der Filter kommen. Neben unerwünschter Staunässe ist folglich auch eine Beeinträchtigung der Standsicherheit durch erhöhten Wasserdruck zu erwarten.

2 Bemessung von geotextilen Filtern

Die Entwurfskriterien für Geotextilfilter können grundlegend in "geometrische" Ansätze und "hydraulische" Ansätze gegliedert werden. Geometrische Kriterien enthalten Grenzwerte für den Korndurchmesser d, die Kornverteilung, die Ungleichförmigkeitszahl CU, den Krümmungskoeffizienten CC und die Lagerungsdichte I_D. Hydraulische Kriterien für die Filterbemessung basieren hauptsächlich auf hydraulischen Bedingungen, wobei sich die Bestimmung des hydraulischen Gefälles bzw. der Fließgeschwindigkeit an den relevanten Gefahrenstellen (z.B. Kontaktstellen) zwischen Boden und Geotextil äußerst schwierig gestaltet. Aus diesem Grund basiert die Bemessung meist auf geometrischen Ansätzen. Die geometrische Filterstabilität geotextiler Filter wird durch die Begrenzung der charakteristischen Öffnungsweite Ogo nach oben und eine ausreichende Durchlässigkeit (hydraulische Filterwirksamkeit) durch die Begrenzung der charakteristischen Öffnungsweite O₉₀ nach unten erreicht. Für die praktische Arbeit haben sich einige, wenige Ansätze durchgesetzt.

In Nord- und Südamerika sind die Empfehlungen von [3] in Gebrauch, die mit den kanadischen Empfehlungen erweitert wurden [4]. Daneben ist die Vorgehensweise nach Luettich et al. (1992) [5] weit verbreitet. In Europa sind neben dem Ansatz nach DWA-M 511 [6] (ersetzt das DVWK Merkblatt 211/1992 [7]) Bemessungen nach M Geok E [1] geläufig.

Im Merkblatt über die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaus (M Geok E) werden für die Sicherstellung der mechanischen Filterwirksamkeit geotextiler Filter zunächst drei hydraulische Sicherheitsfälle unterschieden, denen jede Bauaufgabe, bei der ein geotextiler Filter zum Einsatz kommen soll, anhand ihrer spezifischen Randbedingungen zuzuordnen ist. Liegen filtertechnisch einfache Bedingungen vor, kann die Filterdimensionierung anhand des hydraulischen Sicherheitsfalls I erfolgen. Hierbei wird von einer einseitigen Anströmung, einer geringen Wassermenge und einem geringen hydraulischen Gefälle ausgegangen. Bei wechselseitigen und mittleren einseitigen Anströmungen wird der

geotextile Filter nach dem Sicherheitsfall II bemessen. Zudem wird der filtertechnisch schwierige Boden im Sicherheitsfall II auf Erosions- und auf Suffusionssicherheit untersucht. Ist diese nicht gegeben, wird der geotextile Filter nach dem hydraulischen Sicherheitsfall III bemessen. Die Filterdimensionierung nach dem hydraulischen Sicherheitsfall III erfolgt im Einzelfall durch einen Sachverständigen auf Grundlage einer Analyse der hydraulischen Bedingungen anhand eines Bemessungsverfahrens bzw. durch anwendungsbezogene Versuche. Um die hydraulische Filterwirksamkeit zu garantieren und um schädlichen Wasserrückstau zu vermeiden, muss die Wasserdurchlässigkeit des Filters nach M Geok E (k_{v. 5%} = Wasserdurchlässigkeitsbeiwert des Geotextils als Neumaterial) langfristig im eingebauten Zustand die Wasserdurchlässigkeit des zu entwässernden Bodens k_f aufweisen. Diese Bedingung ist erfüllt, wenn $k_{v,5\%} \ge k_{f}$ ist und k_{v 5%} mindestens 1 · 10⁻⁴ m/s beträgt. Zudem ist der Nachweis der Sicherheit gegen Kolmation zu

führen. Des weiteren wird empfohlen, die charakteristische Öffnungsweite O_{90} möglichst nahe an der oberen Grenze $O_{90,max}$, aber keinesfalls unter $0,2 \cdot O_{90,max}$ zu wählen.

3 Systemversuche

Bei der Bearbeitung bzw. Entwicklung des Merkblattes über die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaus (M Geok E) wurde die obere Grenze der Öffnungsweite O₉₀ bei den hydraulischen Sicherheitsfällen I und II als technisch sinnvoll und anstrebenswert angesehen. Die untere Grenze wurde anhand der am Markt verfügbaren Produkte festgelegt. Durch eine Marktstudie konnte festgestellt werden, dass zwischenzeitlich fast ausschließlich Produkte mit Öffnungsweiten von 0,06 mm bis 0,08 mm, also an der unteren Grenze verfügbar sind. Durch den Einsatz dieser Produkte als

geotextile Filter können in der Praxis Probleme, wie die zeitvariante Verringerung der Durchlässigkeit und das als Clogging bezeichnete Zusetzen des Filters durch den anstehenden Boden auftreten. Zur Überprüfung und Fortschreibung der Filterregeln wurden verschiedene Filterversuche am System Boden-Geokunststoff durchgeführt, bei denen vier verschiedene Böden, die sowohl als erosions- und suffosionsgefährdet (leicht plastischer Schluff (UL), weitgestufter Sand (SW)) als auch solche Bodenarten, die als wenig erosionsempfindlich gelten (enggestufter Sand (SE), Sand-Ton-Gemisch (ST*)) mit sieben unterschiedlichen Geotextilen eingesetzt wurden [8]. Die Geotextilien wurden jeweils nach der unteren und oberen Grenze der Öffnungsweite gemäß dem Sicherheitsfall II des verwendeten Bodens gewählt. Zur Bestimmung der wirksamen Öffnungsweite wurde das Verfahren nach DIN EN ISO 12956 (2020) [9] verwendet.

Die Systemversuche gliederten sich in Langzeitfilterversuche (LTF), zyklische Filterversuche (ZV) und suspensionsbeaufschlagte Versuche (SV). Tabelle 3-1 zeigt eine Übersicht der durchgeführten Durchströmungsversuche am System Boden/Geokunststoff. Für die Durchführung der Versuche wurde eine Versuchseinrichtung entwickelt, mit der die Wasserdurchflussmenge Q, die Temperatur T, der Bodendurchgang m_{Boden}, die Trockenmassendifferenz des Geotextils vor und nach dem Versuch m_{Diff}. und die Porenwasserdrücke überprüft werden können. Die verwendete Versuchseinrichtung (Abbildung 3-1) besteht dabei aus einer dreiteiligen, zylindrischen Versuchszelle aus Plexiglas mit einem Innendurchmesser von 12 cm, die mit einer Bodenprobe (H/D = 1), einem Geotextil (rot dargestellt), einem Drainagekies sowie einem Lochblech (grau dargestellt)

	Charakteristische Öffnungsweite O ₉₀ des geotextilen Filters						
	Obere Grenze O _{90, max} (M Geok E)			Untere Grenze _{O90, min} (M Geok E)			
Boden	LTF i = konst.	Zyklisch i ≠ konst.	Suspen- sion i = konst.	LTF i = konst. Fd = 1 mm	LTF i = konst. Fd = 3 mm	Zyklisch i ≠ konst.	Suspen- sion i = konst.
SE	O ₉₀ = 0,3 mm (LV1)	ZV1	SV1	O ₉₀ = 0,08 mm (LV2)	O ₉₀ = 0,08mm (LV3/LV4)	ZV2	SV2
SW	O ₉₀ = 0,3 mm (LV5)	ZV3	SV3	O ₉₀ = 0,08 mm (LV6)	O ₉₀ = 0,08 mm (LV7/LV8)	ZV4	SV4
ST*	O ₉₀ = 0,2 mm (LV9)	ZV5	_	O ₉₀ = 0,06 mm (LV10)	O ₉₀ = 0,06 mm (LV11)	ZV6	_
UL	O ₉₀ = 0,2 mm (LV12)	ZV7	_	O ₉₀ = 0,06 mm (LV 1 3)	O ₉₀ = 0,06 mm (LV14)	ZV8	_

Tabelle 3-1: Übersicht Systemversuche Boden/Geotexti



Abbildung 3-1: Versuchsstand zur Durchführung der Filterversuche

unterhalb des Drainagekieses ausgestattet ist. Die drei Plexiglaszylinder sowie der Kopf der Versuchszelle werden durch drei GeWi-Stäbe M16 miteinander verbunden. Durch ein oberes und unteres Druckgefäß mit konstanten Wasserspiegeln wird das System aus Boden/Geotextil in vertikaler Richtung mit einem versuchsabhängigen, hydraulischen Gefälle von i = 0...12 über einen Zeitraum von bis zu 200 Stunden durchströmt. Die Bodenprobe und das Geokunststoff werden über einen Laststempel mit einer konstanten vertikalen Auflast von 20 kN/m² beaufschlagt, um die realen Einbaubedingungen (Spannungszustand, Überdeckung) abzubilden. Die Durchflussmessung erfolgt unterwasserseitig mit einem digitalen Durchflussmesser. Um thermische Einflüsse auf die Viskosität des Wassers zu berücksichtigen, finden die Versuche in einem klimatisierten Raum bei konstanter Temperatur statt. Um einen Einfluss des Sättigungsgrades auf die Messergebnisse durch die Kompression von Lufteinschlüssen auszuschließen, wird zum Befüllen der Versuchszelle entlüftetes Wasser verwendet. Umfangreiche Tests haben gezeigt, dass eine einmalige Entlüftung des Wassers zu Versuchsbeginn ausreichend ist.

3.1 Langzeitfilterversuche

Im Langzeitfiltrationstest (LTF) wird die zeitliche Entwicklung des Durchlässigkeitsbeiwerts k des Boden-Geokunstoff-Systems unter konstanten Randbedingungen gemessen. Dazu wird am Versuchsstand ein hydraulisches Gefälle von i = 12 eingestellt und das Boden-Geokunststoff-System für 200 h vertikal durchströmt. Insgesamt wurden 14 Langzeitfilterversuche durchgeführt mit dem Ziel, den Einfluss der Öffnungsweite O₉₀, der Filterdicke d sowie der Verfestigungsart (mechanisch verfestigt oder mechanisch/thermisch verfestigt) auf die Langzeitdurchlässigkeit k zu ermitteln. Ausschlaggebend für die Bewertung war hierzu der Durchlässigkeitsverlauf (berechnet nach Formel (1)) über die Zeit, die Bodeneinlagerung im Geotextil m_{Diff} sowie der Bodendurchgang durch das Geotextil m_{Baden}.

$$\mathbf{k} = \frac{\mathbf{Q}}{\mathbf{A} \cdot \mathbf{i}} \left[\frac{\mathbf{m}}{\mathbf{s}} \right] \tag{1}$$

Q = Durchfluss [m³/s] A = Querschnittsfläche [m²] i = hydraulisches Gefälle [-]

Abbildung 3-2 zeigt die Durchlässigkeiten k des Boden-Geotextil-Systems, welche sich mit der Formel (1) berechnen, über die gesamte Versuchsdauer von 12.000 Minuten. In Abbildung 3-2a sind die Durchlässigkeiten der Langzeitversuche 1 bis 4 dargestellt, die mit einem enggestuften Sand (gilt als gering suffosionsgefährdet) und 4 verschiedenen Geotextilien durchgeführt wurden. Die Zuordnung der einzelnen Versuche ist Tabelle 3-1 zu entnehmen. Bei der unteren Grenze wurden sowohl Filterdicken von 1 mm als auch Filterdicken von 3 mm untersucht. Für den Langzeitversuch 3 wurde ein mechanisch verfestigtes Geotextil eingesetzt und bei dem Langzeitversuch 4 ein mechanisch/thermisch verfestigtes Geotextil. Bei der Betrachtung von Abbildung 3-2a zeigt LV1 (obere Grenze O_{90.max'} SE) eine starke Abnahme der Durchlässigkeit zu Versuchsbeginn. Nach 1.680 Minuten wird die Abnahme der Durchlässigkeit geringer. Auch der anfängliche zu beobachtende starke Bodendurch-



Abbildung 3-2: Durchlässigkeit k der Langzeitversuche a) SE b) SW c) ST* d) UL [8]

gang ist nach dieser Zeit nicht mehr feststellbar. Die Durchlässigkeit nimmt stetig ab, bis sich eine konstante Durchlässigkeit nach ca. 133 Stunden einstellt. Der zeitliche Zusammenhang zwischen dem Nachlassen des Bodendurchgangs und der immer geringer werdenden Abnahme der Durchlässigkeit weist darauf hin, dass eine Bodenstruktur entstanden ist, die sich filtertechnisch im Gleichgewicht befindet. Die hingegen anfänglich starke Abnahme der Durchlässigkeit kann auf die Feinteileinlagerungen in die Bodenstruktur zurückgeführt werden. Der vom Differenzdrucksensor gemessene Druck in der eingebauten Bodenprobe zeigt auch, dass im Geotextil-System (LV1) keine Kolmationsprozesse stattfinden. Bei der Verwendung von Geotextilien an der oberen Grenze O_{90 max} findet der größte Bodendurchgang (m_{Boden}) statt, jedoch erfährt das Geotextil sehr wenig Bodeneintrag (m_{Diff}).

Im Vergleich dazu nehmen die Durchlässigkeiten der Geotextil/Boden-Systeme aus enggestuftem Sand und Geotextilien an der unteren Grenze deutlich weniger ab, erreichen jedoch auch nach einer Versuchszeit von 12.000 Minuten keine konstante Durchlässigkeit. Somit kann hier davon ausgegangen werden, dass sich noch kein filterstabiles System eingestellt hat und weitere Feinteile in die Geotextilien eingetragen werden können. Der Vergleich der Bodeneinträge und Bodendurchgänge zeigt, dass neben der Öffnungsweitengröße auch die Dicke des Filters eine Rolle spielt, was auf das erhöhte Porenvolumen zurückzuführen ist. Die Bodeneiträge in die Filter mit geringeren Öffnungsweiten im Zusammenspiel mit den Effekten der Filterdicke weisen auf den Beginn vermehrt auftretender Clogging-Prozesse hin. Auch die Reduktion der Durchlässigkeiten zwischen den Filterdicken manifestiert, dass ein früheres Versagen von Filtern mit einer geringeren Dicke zu erwarten ist. Zudem zeigt der Vergleich der Durchlässigkeiten unterschiedlicher Verfestigungsarten, dass bei einer rein mechanischen Verfestigung des Geotextils (LV3/LV7) im Vergleich zu mechanisch-thermisch verfestigten Geotextilien (LV4/LV8) leicht höhere Durchlässigkeitsrückgänge zu erwarten sind.

Abbildung 3-2b zeigt das System aus weitgestuftem Sand (gilt als suffosionsgefährdet/erosionsgefährdet) und Geotextilien sowohl an der oberen (LV5) als auch an der unteren Grenze (LV6/LV7/ LV8). Bei dem Versuch LV5 (O_{90, max}, SVV, Filterdicke 1 mm) ist analog zum Versuch LV1 (O_{90 max'} SE, Filterdicke 1 mm) ein starker Rückgang der Durchlässigkeit feststellbar. Nach ca. 10.200 Minuten wurde auch hier eine konstante Durchlässigkeit k erreicht, die ein filterstabiles System impliziert. Aufgrund von Erosionsneigungen des SW nimmt die Einstellung eines filterstabilen Systems im Vergleich zum SE mehr Zeit in Anspruch. Die Bodendurchgangsmenge und der Bodeneintrag zeigt sich zu LV1 affin und kann über eine längere Versuchsdauer beobachtet werden. Cloggingprozesse konnten auch hier nicht ermittelt werden. Im Vergleich dazu zeigen die Durchlässigkeiten der Versuche LV7 und LV8 (O_{90.min}, SW, Filterdicke 3 mm) einen starken Durchlässigkeitsrückgang zu Beginn und sinken anschließend stetig weiter. Ein stabiles Filtersystem stellt sich auch nach Ende der Versuchszeit nicht ein. Die Gefahr von Clogging und demnach ein folgendes Filterversagen durch eine stärkere Abnahme der Durchlässigkeit ist analog zum SE durch den Einsatz von Geotextilien an der unteren Grenze $\mathrm{O}_{\mathrm{90,\,min}}$ im Vergleich zur oberen Grenze O_{90, max} erhöht. Es werden bedingt durch das größere Porenvolumen der filterdicken Geotextilien mehr Feinanteile in das Geotextil eingelagert. Zusätzlich zu den Effekten aus dem Einsatz von Geotextilien geringerer Öffnungsweiten, wird der Bodendurchgang durch größere Filterdicken minimiert.

Abbildung 3-2c zeigt den Verlauf der Systemdurchlässigkeiten mit einem Sand-Ton-Gemisch ST* (gilt als wenig suffosions-/erosionsgefährdet) und Geotextilien sowohl an der oberen (LV9) als auch an der unteren Grenze (LV10/LV11) O₉₀. Abbildung 3-2c zeigt auch, dass die Durchlässigkeit des Versuchs LV9 (O_{90, max}, ST*) stetig um einen Wert schwankt. Diese Schwankungen sind auf natürliche Durchlässigkeitsschwankungen zurückzuführen. Ein Durchlässigkeitsrückgang ist nicht festzustellen. Auch der

Bodendurchgang sowie der Bodeneintrag in das Geotextil sind minimal. Dieses Verhalten zeigt, dass es sich um ein filterstabiles System handelt und kein Clogging zu erwarten ist. Im Vergleich zu den Versuchen mit dem SE und dem SW ist m_{Diff} jedoch höher. Dies ist auf den deutlich höheren Feinanteil im ST* zurückzuführen. Die Durchlässigkeitsverläufe der Versuche LV10 (O_{90 min}, ST*, Filterdicke 1 mm) und LV11 (O_{90,min}, ST*, Filterdicke 3 mm) weisen auf Pipingprozesse im Sand-Ton-Gemisch hin, wodurch die Durchlässigkeit zu Beginn steigt. Nach Erreichen einer maximalen Durchlässigkeit nehmen die Durchlässigkeiten kontinuierlich ab, erreichen aber keine konstante Durchlässigkeit. Dieses Verhalten zeigt erneut, dass auch hier der Prozess des Bodeneintrags und des Bodendurchgangs noch nicht abgeschlossen ist. Die Bodeneintragsmenge ist im dickeren Filter zwar absolut gesehen größer, prozentual betrachtet allerdings nicht. Die erhöhte Filterdicke in LV11 und das dadurch erhöhte Porenvolumen sorgen auch im ST* für ein langsameres Zusetzen des Geotextilfilters und wirken somit dem Filterversagen entgegen.

Abbildung 3-2d zeigt den Verlauf der Systemdurchlässigkeiten mit einem leicht plastischen Schluff (suffusionsgefährdet) und den gleichen Geotextilien wie beim ST*. Bei zwei Versuchen LV12 (O_{90 max}, UL) und LV14 (Oqu min, UL, Filterdicke 3 mm) konnten starke Pipingprozesse festgestellt werden, die die Bewertungen der Ergebnisse erschweren. Prinzipiell ist jedoch auch hier ersichtlich, dass die Durchlässigkeit bei LV12 nach Erreichen der maximalen Größe der Pipingstelle nur geringfügig sinkt. LV13 (O_{90 min}, UL, Filterdicke 1 mm) beweist jedoch eindrücklich, dass beim Einsatz von Geotextilien mit einer charakteristischen Öffnungsweite O_{90,min} im Zusammenspiel mit einem leicht plastischen Schluff UL kein Durchfluss mehr stattfindet, was demnach zum vollständigen Verlust der hydraulischen Filterwirksamkeit führen kann

3.2 Zyklische Filterversuche

Die zyklischen Durchlässigkeitsversuche hatten zum Ziel, Regenereignisse unterschiedlicher Intensitäten mit Trockenfallen des Systems zu simulieren und dadurch einen erhöhten Materialtransport zu generieren. Dazu wurde das hydraulische Gefälle zwischen i = 0 und i = 12 variiert. Abbildung 3-3 zeigt den Verlauf eines Lastzykluses. Insgesamt gab es 5 Lastzyklen mit jeweils drei Laststufen (i = (0)/3/6/12) von denen jede Laststufe 15 Minuten gehalten wurde. Somit ergab sich eine Gesamtversuchsdauer von 780 Minuten. Die Aufzeichnung der gleichen Parameter wie beim Langzeitversuch lässt ein Vergleich zu.



Abbildung 3-3: Lastzyklus – Hydraulischer Gradient in Abhängigkeit der Zeit

Abbildung 3-4 zeigt die Durchflüsse in Abhängigkeit der eingestellten hydraulischen Gefälle während der zyklisch durchgeführten Versuche. Dabei sind in Abbildung 3-4 die Versuche mit SE in a), die Versuche mit dem SVV in b), die Versuche mit dem ST* in c) und die Versuche mit dem UL in d) dargestellt. Die in schwarz eingefärbten Versuche stellen jeweils die Versuche mit dem Geotextil mit einer Öffnungsweite an der oberen Grenze O_{90 max} und die in grau eingefärbten Versuche die Versuche mit dem Geotextil mit einer Öffnungsweite an der unteren Grenze O_{90.min} dar. Bei dem Versuch ZV1 (O_{90 max}, SE) ist zu erkennen, dass der Durchfluss in Abhängigkeit des hydraulischen Gefällen im Versuchsverlauf leicht abnimmt (ca. 0,5 l/min). Der Versuch ZV2 (O_{90 min}, SE) zeigt einen stärkeren Rückgang im Laufe der Versuchszeit (ca. 0,8 I/min). Auch die Bodeneinlagerung m_{Diff} in das Geotextil mit O_{90 min} ist um einen Faktor 2,5 höher. Der Bodendurchgang ist hingegen um den Faktor 2,5 geringer.



Abbildung 3-4: Durchfluss der zyklischen Versuche a) SE b) SW c) ST* d) UL [8]

Der stärkere Durchflussrückgang und der höhere Bodeneintrag in das Geotextil O_{90 min} zeigen, dass das Clogging-Potenzial höher ist als bei dem Geotextil O_{90.max}. Im Vergleich zum Langzeitdurchlässigkeitsversuch konnte mit Hilfe der Variation des hydraulischen Gefälles ein höherer Feinteileintrag in das Geotextil erreicht werden. Somit wirken sich unterschiedliche hydraulische Gefälle bzw. Regenereignisse unterschiedlicher Intensität auf das Durchlässigkeitsverhalten und das Clogging-Potential aus. Der Versuch ZV3 (O_{90 max}, SVV) zeigt, dass die Durchflüsse in Abhängigkeit des hydraulischen Gefälles leicht schwanken, jedoch tendenziell gleichbleiben. Das Durchlässigkeitsverhalten des ZV4 (O_{90 min}, SVV) weist höhere Schwankungen auf und zeigt eine Abnahme des Durchflusses am Ende des Versuchs. Die Schwankungen sind auf stärkere Umlagerungsprozesse im SW aufgrund seiner Erosionsgefahr zurückzuführen. Dieser Boden zeigt auch einen erhöhten Feinteileintrag in das Geotextil an der unteren Grenze und den verringerten Bodenaustrag. Die Druckgeber innerhalb der Bodenprobe zeigen eine Erhöhung des Porenwasserdrucks oberhalb des Geotextils. Diese beiden Parameter – der erhöhte Bodeneintrag sowie der Druckanstieg oberhalb des Geotextils – geben Hinweise auf Clogging-Prozesse und damit ein Beginn des Verstopfens des Geotextils. Der Versuch ZV5 (O_{90.max'} ST*) zeigt eine minimale Abnahme des Durchflusses im Lauf der Versuchszeit (0,04 1/min) sowie leichte Schwankungen. Auch der Bodendurchgang sowie der Bodeneintrag in das Geotextil sind gering. Der Bodeneintrag ist jedoch höher als bei den Bodenarten SE und SW. Dies liegt vor allem am höheren Feinanteil im ST*. Eine höhere Durchlässigkeitsabnahme während des Versuchs (0,08 l/min) sowie eine höhere Bodeneinlagerung können beim Versuch ZV6 (O_{90 min}, ST*) im Gegensatz zum Versuch ZV5 festgestellt werden. Ein minimaler Wasserdruckanstieg über dem Geotextil war ersichtlich. Beim System aus leicht plastischem Schluff und dem Geotextil an der oberen Grenze O_{90 max} konnten nur Schwankungen der Durchflüsse, jedoch keine Verringerungen festgestellt werden. Trotz des höheren Bodeneintrags in das Geotextil konnte kein Druckanstieg festgestellt werden. Im Gegensatz dazu nimmt die Durchlässigkeit beim ZV8 (O_{90, min}, UL) deutlich ab, der Bodeneintrag ist bei diesem Versuch maximal und es konnte ein deutlicher Druckanstieg oberhalb des Geotextils festgestellt werden (siehe Abbildung 3-5).



Abbildung 3-5: ZV8 – Druck als Wassersäule über die Versuchszeit [8]

Durch den suffosions- und erosionsgefährdeten UL besteht bei dieser Konstellation die größte Gefahr von Clogging-Prozessen bzw. Ein Verstopfen des geotextilen Filters.

3.3 Suspensionsversuche

Mittels der Suspensionsversuche zum Materialtransport in geotextilen Filtern sollen ebenfalls extreme Regenereignisse und die damit einhergehende hohe zusätzliche Belastung des Geotextils durch ein Auswaschen von Feinanteilen aus Böden simuliert werden. Die sehr hohe Anzahl an frei beweglichen Feststoffteilchen im Wasser ist eine extreme Belastung für die hydraulische und mechanische Filterwirksamkeit. Kolmation und Clogging von geotextilen Filtern werden durch die entstehende Feinteilbeaufschlagung stark verstärkt und die auftretenden Problematiken der Geotextilfilter sollen so besser in den Systemversuchen sichtbar gemacht werden.

Insgesamt wurden vier Versuche durchgeführt: zwei Versuche mit dem Material SE $(O_{90, max}/O_{90, min})$ und zwei Versuche mit dem SW $(O_{90, max}/O_{90, min})$. Kaolin wurde bei den Versuchen intervallweise hinzugefügt (alle 30 Min.). Bei den Versuchen mit dem enggestuften Sand wird deutlich, dass sich der Permittivitätsverlauf (berechnet nach

Formel (2) [10]) vom Boden-Geotextil-System mit $O_{90, max}$ zu dem des Boden-Geotextil-Systems mit $O_{90, min}$ nur hinsichtlich der Anfangsdurchlässigkeiten unterscheidet. Dies ist auf die unterschiedlichen, charakteristischen Öffnungsweiten der Geotextilien zurückzuführen. Nach Zugabe der ersten Kaolinbeaufschlagung sinkt die Permittivität rapide. Das Kaolin lagert sich im gesamten Bodenkörper ein und füllt die Porenräume aus. Infolgedessen entsteht durch die Suspensionszugabe im SE ein dichter und somit undurchlässiger Bodenblock. Auch auf dem Bodenkörper konnten starke Kaolinablagerungen beobachtet werden.

$$\Psi = \frac{Q}{A \cdot \Delta h} \cdot \frac{1,359}{1,0+0,0337 \cdot T + 0,00022 \cdot T^2} \quad \left[\frac{1}{s}\right] (2)$$



Abbildung 3-6: SV3 (links) SV4 (rechts) – Ansicht der Versuchszelle nach 270 Minuten.



Abbildung 3-7: SV3/SV4 - Permittivität über die gesamte Versuchszeit [8]

In Abbildung 3-7 hingegen zeigt sich, dass bei dem Versuch SV3 (O_{90, max}, SW), die Permittivität zwar stark zurückgeht, jedoch am Ende des Versuchs immer noch eine Durchlässigkeit des Systems vorhanden ist.

Die Durchlässigkeit beim Versuch SV4 (O_{90, min}, SW) geht nach einer Versuchsdauer von 270 Minuten schon gegen Null (siehe Abbildung 3-6 und 3-7). Die Werte des Bodendurchgangs sowie der Bodeneinlagerung zeigen ebenfalls, dass im System mit dem Geotextil an der unteren Grenze deutlich mehr Feinteile im Geotextil eingelagert werden. Oberhalb des Geotextils konnte ein Filterkuchen beobachtet werden, der auf ein Verstopfen des Geotextils hinweist.

4 Resümee und Empfehlungen

Die durchgeführten Langzeitdurchlässigkeitsversuche, zyklischen Durchlässigkeitsversuche und die Durchlässigkeitsversuche mit Suspensionsbeaufschlagung zeigen, dass das Clogging-Potenzial und damit die Wahrscheinlichkeit einer Verstopfung des Geotextils bei Verwendung von Produkten mit einer Öffnungsweite Ooo an der im M Geok E definierten unteren Grenze deutlich erhöht ist. Deshalb sollte zur Sicherstellung einer dauerhaft ausreichenden hydraulischen Durchlässigkeit angestrebt werden, nur Geotextilien mit an der oberen Grenze O_{90 max} liegenden Öffnungsweiten einzusetzen angestrebt werden. Die zyklischen Versuche zeigen, dass die Gefahr eines Verstopfens des geotextilen Filters durch Regenereignisse variierender Intensität, durch die die Feinteilmobilisierung im Boden unterstützt wird, gesteigert wird. Die Suspensionsversuche verdeutlichen, dass eine Suspensionsbildung im Boden bzw. ein hoher Feinteileintrag zu vermeiden ist, wobei auch diesbezüglich die Gefahr eines Filterversagens bei dem Einsatz von Geotextilien an der unteren Grenze gemäß M Geok E deutlich erhöht ist.

Aus diesem Grund wird auf Grundlage der gewonnenen Versuchsergebnisse eine Fortentwicklung der Filterregeln gemäß M Geok E hinsichtlich folgender Aspekte empfohlen

- Die untere Grenze der Öffnungsweite gemäß M Geok E (hydraulischer Sicherheitsfall II) sollte angehoben und der Einsatz von Geotextilien mit Öffnungsweiten an der oberen Grenze zur Sicherstellung einer dauerhaft ausreichenden Wasserdurchlässigkeit als Standard angestrebt werden.
- Die bestehende obere Grenze der Öffnungsweite sollte überprüft und gegebenenfalls angehoben werden.
- Es wird empfohlen, ein Kriterium zur Berücksichtigung der Filterdicke zur Gewährleistung einer dauerhaft ausreichenden Wasserdurchlässigkeit aufzunehmen. (vergleiche Ansatz nach [11]).
- Das Kriterium zur hydraulischen Filterwirksamkeit sollte überarbeitet und in das Merkblatt integriert werden.
- Kriterien zur Berücksichtigung weiterer Parameter wie beispielsweise der Lagerungsdichte des Bodens und der Ungleichförmigkeitszahl sollten in die Geotextilfilterbemessung mit einbezogen werden. (vergleiche Ansätze nach [5], [6] und [7])

Zur Konkretisierung der genannten Anpassungsvorschläge werden weiterführende Systemversuche erforderlich.

Literaturverzeichnis

[1] FGSV: Merkblatt über die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaus – M Geok E. Köln: FGSV Verlag GmbH 2016

[2] Stoewahse, C.; Heibaum, M.; Werth, K.: Zur Bemessung geotextiler Filter – Das neue Merkblatt DWA M 511. In: Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, 40. Dresdner Wasserbaukolloquium 2017, S. 241-250

[3] Holtz, Robert D.: Geosynthetic engineering. Richmond: BiTech Publishers Ltd. 1997 [4] CFEM: Canadian Foundation Engineering manual. Canadian Geotechnical Society 2006 (4th Ed.)
[5] Luettich, S.M.; Giroud, J.P.; Bachus, R.C.: Geotextile Filter Design Guide. In: Geotextiles and Geomembranes 11.1992

[6] DWA-M 511, Merkblatt - Filtern mit Geokunststoffen (DWA-Regelwerk). DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. 08/2017

[7] DVWK: Anwendung von Geotextilien im Wasserbau. Hamburg/Berlin: Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.

[8] Moormann, C., Liebl, J., Schleeh, M.: Überprüfung der Auswirkungen der Anwendung der Filterregeln für Geokunststoffe des M Geok E. Bergisch Gladbach: Schlussbericht zum Forschungsvorhaben FE 05.0198/2017/AGB der BASt, 2021

[9] DIN EN ISO 12956:2020-05: Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Bestimmung der charakteristischen Öffnungsweite (ISO 12956:2019)

[10] Krug, M.: Filterwirksamkeit von Geotextilien bei geringen hydraulischen Gefällen. Straßenverkehrstechnik, Heft 766, Bundesminister für Verkehr, 1999

[11] BAW: Merkblatt - Anwendung von geotextilen Filtern an Bundeswasserstraßen (MAG). Bundesanstalt für Wasserbau (Hrsg.), Ausgabe 1993, Karlsruhe.