

Überprüfung der Auswirkungen der Anwendung der Filterregeln für Geokunststoffe des M Geok E

FA 5.198

Forschungsstelle: Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik (Prof. Dr.-Ing. habil. C. Moormann)

Bearbeiter: Moormann, C. / Liebl, J. / Schlee, M.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: März 2021

1 Einführung

Die Filterregeln für Geokunststoffe werden im Merkblatt über die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaus – M Geok E (2016) durch Einstufung der Anwendung in drei Sicherheitsfälle unterschieden. Sie werden durch Angabe von Bereichen der zulässigen charakteristischen Öffnungsweite O_{90} beschrieben. Bei der ursprünglichen Bearbeitung des M Geok E wurde die obere Grenze als technisch sinnvoll und anstrebenwert angesehen, während die untere Grenze auch ein Zugeständnis an die verfügbaren Produkte war. Zwischenzeitlich sind am Markt fast ausschließlich Produkte mit Öffnungsweiten von 0,06 bis 0,08 mm, also an der unteren Grenze, verfügbar. Beim Einsatz dieser Produkte als geotextile Filter treten in der Praxis zunehmend Probleme, wie die zeitvariante Verringerung der Durchlässigkeit und das als Clogging bezeichnete Zusetzen des Filters durch den anstehenden Boden auf. Neben unerwünschten Vernässungen ist auch eine Beeinträchtigung der Standsicherheit infolge erhöhten Wasserdrucks möglich, womit ein Versagen der hydraulischen Filterwirksamkeit des Systems gegeben ist.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollen mit Filterversuchen am System Boden/Geokunststoff die Filterkriterien und der Materialtransport für unterschiedliche Parameter im Bereich der unteren Grenze der Öffnungsweite experimentell untersucht und die bestehenden Filterkriterien überprüft werden. Damit soll ein wichtiger Beitrag zur Optimierung der Bemessung geotextiler Filter und der Vermeidung zukünftiger Schadensfälle und daraus resultierender Folgekosten geleistet werden.

Zusammenfassend sollen als Gesamtziel des Vorhabens praxistaugliche Antworten auf folgende Fragestellungen erörtert werden:

- Inwieweit entsprechen die derzeit verwendeten Filterregeln zur Bemessung von geotextilen Filtern in den gängigen Anwendungsfällen des Straßenbaus noch dem Stand der Technik?
- Muss gegebenenfalls die untere Grenze der sich aus der Bemessung nach der mechanischen und nach der hydraulischen Filterwirksamkeit ergebenden charakteristischen Öffnungsweite geotextiler Filter aus Gründen der Kolmationsgefahr angehoben werden?

- Können Geokunststoffe für den erforderlichen Bereich für den breiten Markt verfügbar gemacht werden?
- In welchen Fällen sollte auf den Einsatz von geotextilen Filtern aus Gründen der Kolmationsgefahr eher verzichtet werden?

2 Marktstudie und Anwendererfahrungen

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde eine Marktstudie durchgeführt und ein Fragebogen zur Erörterung von Anwendererfahrungen mit geotextilen Filtern erarbeitet. In der Marktstudie wurden von insgesamt 387 Geokunststoffprodukten die klassischen mechanischen sowie hydraulischen Kennwerte erfasst. Die erfassten Werte zeigen, dass Geovliese nur bis zu einer Öffnungsweite von $O_{90} = 0,18$ mm am Markt verfügbar sind. Größere Öffnungsweiten weisen nur die Geogewebe auf. Zudem konnte festgestellt werden, dass am Markt hauptsächlich mechanisch-thermisch verfestigte Geokunststoffprodukte (63 %) und rein mechanisch verfestigte Geokunststoffprodukte (37 %) vorliegen. Rein thermisch verfestigte Produkte konnten nicht ermittelt werden. Die deutliche Dominanz der mechanisch-thermischen Verfestigung resultiert vor allem aus den besseren mechanischen Eigenschaften, wie einer größeren Zugfestigkeit und Robustheit bei dem Einbau sowie aus transporttechnisch günstigen Gründen. Durch eine bundesweite Erhebung zum Einsatz von Trenn- und Filterkunststoffen im Erdbau des Straßenbaus bei den zuständigen Fachbehörden sollte eruiert werden, in welchen Fällen in der Praxis aus der Anwendung der gängigen Filterkriterien bei der Bemessung geotextiler Filter derzeit tatsächlich systematische Probleme im Hinblick auf die Filterfunktion (Kolmationsgefahr), entstanden sind. Dazu wurde ein Erhebungsbogen erarbeitet, der unter anderem den konkreten Anwendungsfall und den eingesetzten geotextilen Filtern mit den verwendeten Öffnungsweiten erfasst, sowie Probleme (unter anderem Filterversagen) aufzeigen sollte. Insgesamt wurde der Erhebungsbogen an 250 deutsche Behörden verschickt, von denen 36 Rückmeldungen bis zum Stichtag eintrafen. Die Ergebnisse der Erhebungsbögen geben nur einen kleinen Einblick in Projekte, bei denen geotextile Filter zum Einsatz kamen. Jedoch ist eine klare Tendenz – eine zunehmende Verwendung von geotextilen Filtern mit einer Öffnungsweite an der unteren Grenze gemäß den Filterregeln – erkennbar.

3 Durchlässigkeitsversuche

Im Rahmen dieser Forschung wurden verschiedene Filterversuche am System Boden/Geokunststoff durchgeführt. Dabei wurden 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 Mittelsand (SE), Sand-Ton-Gemisch (ST*)) und sieben Geotextilien mit unterschiedlichen

Eigenschaften (Öffnungsweite O_{90} , Filterdicke d , Verfestigungsverfahren) eingesetzt und untersucht. Die Geotextilien wurden jeweils nach der unteren und oberen Grenze der Öffnungsweite gemäß dem hydraulischen Sicherheitsfall II des verwendeten Bodens gewählt. Zur Bestimmung der charakteristischen Öffnungsweite wurde das Verfahren nach DIN EN ISO 12956 (2020)

verwendet. Die Systemversuche gliedern sich in Langzeitfilterversuche (LV), zyklische Filterversuche (ZV) und suspensionsbeaufschlagte Filterversuche (SV). Bei den Langzeitfilterversuchen soll die zeitliche Entwicklung des Durchlässigkeitsbeiwerts des Systems Boden/Geokunststoff unter konstanten Randbedingungen gemessen werden.

Tabelle 1: Versuchsmatrix

| | Charakteristische Öffnungsweite O_{90} des geotextilen Filters | | | | | | |
|-------------------------|--|-----------------------|------------------------------|-------------------------------------|--|-----------------------|------------------------------|
| | Obere Grenze gemäß M Geok E | | | Untere Grenze gemäß M Geok E | | | |
| Boden | i = konst (Monofilament) (Filterdicke 1 mm) | zyklisch (Fd 1 mm) | Suspensionstest (Fd 1 mm) | i = konst. (Fd 1 mm) | i = konst. (Fd 3 mm) | zyklisch (Fd 1 mm) | Suspensionstest (Fd 1 mm) |
| Boden 1: SE | $O_{90} = 0.3$ mm; (LV1/mech.) | (ZV1) (mech.) | (SV1) (mech.) | $O_{90} = 0.08$ mm; (LV2/mech.) | $O_{90} = 0.08$ mm; (LV3/4) (mech./mech.+therm.) | (ZV2) (mech.) | (SV2/ mech.) |
| Boden 2: SW | $O_{90} = 0.3$ mm; (LV5/mech.) | (ZV3) (mech.) | (SV3) (mech.) | $O_{90} = 0.08$ mm; (LV6/mech.) | $O_{90} = 0.08$ mm; (LV7/8) (mech./mech.+therm.) | (ZV4) (mech.) | (SV4) (mech.) |
| Boden 3: UL | $O_{90} = 0.2$ mm; (LV9/mech.) | (ZV5) (mech.) | - | $O_{90} = 0.06$ mm; (LV10/mech.) | $O_{90} = 0.08$ mm; (LV11/mech.) | (ZV6) (mech.) | - |
| Boden 4: ST* | $O_{90} = 0.2$ mm; (LV12/mech.) | (ZV7) (mech.) | - | $O_{90} = 0.06$ mm; (LV13/mech.) | $O_{90} = 0.08$ mm; (LV14/mech.) | (ZV8) (mech.) | - |

Die verwendete Versuchseinrichtung besteht dabei aus einer dreiteiligen, zylindrischen Versuchszelle aus Plexiglas mit einem Innendurchmesser von 12 cm, die mit einer Bodenprobe ($H/D = 1$), einem Geotextil, einem Drainagekies sowie einem Lochblech unterhalb des Drainagekieses ausgestattet ist. Durch ein oberes und unteres Druckgefäß mit konstanten Wasserspiegeln wird das System aus Boden/Geotextil in vertikaler Richtung mit einem hydraulischen Gefälle von $i = 12$ über einen Zeitraum von 200 Stunden durchströmt. Die Bodenprobe und das Geokunststoff werden über einen Laststempel mit einer konstanten vertikalen Auflast von 20 kN/m^2 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 Sättigungsgrads auf die Messergebnisse durch die Kompression von Luftporen auszuschließen, wird zum Befüllen der Versuchszelle entlüftetes Wasser verwendet. Umfangreiche Tests zeigten, dass eine einmalige Entlüftung des Wassers zu Versuchsbeginn ausreichend ist. Der Boden wurde jeweils in die Versuchszelle eingerieselt.

Bei den Langzeitversuchen wurde neben der Wasserdurchflussmenge Q , der Temperatur T auch der Bodendurchgang m_{Boden} , die Masse des Geokunststoffs vor Versuchsbeginn $m_{\text{GK},1,d}$ und nach Versuchsende $m_{\text{GK},2,d}$ im trockenen Zustand gemessen.

Tabelle 1 zeigt die Versuchsmatrix für die Langzeitfilterversuche. Zur Untersuchung des Materialtransports in geotextilen Filtern wurden zusätzlich zu den Langzeitdurchlässigkeitsversuchen zyklische Durchlässigkeitsversuche und Versuche mit Suspensionsbeaufschlagung durchgeführt. Hierbei werden für die jeweiligen Versuchsböden die gleichen Geotextilien wie bei den Langzeitversuchen verwendet (siehe Tabelle 1). Bei den zyklischen Versuchen wird der hydraulische Gradient i während der Versuchszeit von ca. 13 Stunden alle 15 Minuten durch Höhenveränderung des oberen Druckbehälters verändert ($i = 3$ bis 12). Insgesamt werden 5 Zyklen durchgeführt. Diese Variation der hydraulischen Gefälle entspricht dem Lastfall von aufeinanderfolgenden Regenereignissen mit Trockenperioden. Durch wechselnde hydraulische Belastungen können Feinteile in der Bodenprobe stärker mobilisiert werden. Gemessen werden die gleichen Parameter wie bei den Langzeitversuchen. Bei den Versuchen mit Feinteilbeaufschlagung wird das Wasser zusätzlich mit Kaolin versetzt, sodass der geotextile Filter von einer Feinteilsuspension durchströmt wird. Eine konstante Qualität der Suspension wird dabei durch die Anordnung eines mechanischen Rührgeräts erreicht. Während der Versuchszeit von ca. 300 Minuten wird ein hydraulisches Gefälle von $i = 12$ aufgebracht und Kaolin (jeweils 100 g Trockenmasse) in 30-minütigen Abständen dem System zugeführt. Zusätzlich zu den Parametern, die auch bei den Langzeitversuchen und den zyklischen Versuchen erfasst werden, wird hier noch die Veränderung der Korngrößenverteilung nach Versuchsende untersucht.

3.1 Langzeitdurchlässigkeitsversuche

Bild 1 zeigt die Durchlässigkeiten k der Systeme Boden/Geotextil über die gesamte Versuchsdauer von 12 000 Minuten (200 Stunden). In Bild 1a sind die Durchlässigkeiten der Langzeitversuche (LV) 1 bis 4 gezeigt, die mit einem enggestuften Mittelsand SE (gilt als gering suffusionsgefährdet) und vier verschiedenen Geotextilien durchgeführt wurden. Die Zuordnung der einzelnen Versuche ist der Tabelle 1 zu entnehmen. Bei der unteren Grenze wurden sowohl Filterdicken von 1 mm als auch Filterdicken von 3 mm untersucht. Für den LV3 wurde ein mechanisch verfestigtes Geotextil eingesetzt und bei dem LV4 ein mechanisch/thermisch verfestigtes Geotextil. Ziel war es, den Einfluss der Öffnungsweite, der Filterdicke sowie der Verfestigungsart des Geotextils auf die Langzeitdurchlässigkeit zu ermitteln. Ausschlaggebend für die Bewertung war hierzu der Durchlässigkeitsverlauf über die Zeit, die Bodeneinlagerung im Geotextil sowie der Bodendurchgang durch das Geotextil. Bild 1a zeigt, dass die Durchlässigkeit des Systems aus Geotextil mit einer Öffnungsweite an der oberen Grenze und SE (LV1) zu Beginn stark abnimmt. Nach 1 680 Minuten (28 Stunden) wird die Abnahme der Durchlässigkeit geringer. Auch der anfängliche, stark zu beobachtende Bodendurchgang ist nach 28 Stunden nicht mehr feststellbar. Die Durchlässigkeit nimmt stetig ab, bis sich eine Enddurchlässigkeit nach ca. 7 980 Minuten (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 starke anfängliche Durchlässigkeitsverringering

ist auf den Eintrag von Bodenpartikeln zurückzuführen, der sich im Laufe der Versuchszeit jedoch nicht stark verändert. Insgesamt zeigt sich ein Bodendurchgang von 2,7 g und ein Bodeneintrag in das Geotextil von 0,96 g (vergleiche Schlussbericht des FE 05.0198/2017/AGB). Auch die Drücke innerhalb der eingebauten Bodenprobe, die durch Differenzdrucksensoren gemessen wurden, zeigen, dass bei dem System aus Geotextil an der oberen Grenze und dem SE keine Kolmationsprozesse zu erwarten sind. Im Vergleich dazu nehmen die Durchlässigkeiten der Boden/Geotextil-Systeme aus SE und Geotextilien an der unteren Grenze (LV2 – LV4) deutlich weniger ab, erreichen jedoch auch nach einer Versuchszeit von 12 000 Minuten (200 Stunden) keine konstante Enddurchlässigkeit. Somit kann hier davon ausgegangen werden, dass sich noch kein filterstabiles System eingestellt hat und weitere Feinteile in die Geotextilien eingetragen werden können. Eine weitere zeitvariante Abnahme der Durchlässigkeit ist anzunehmen. Der Bodeneintrag in die Geotextilien an der unteren Grenze ist deutlich höher als der Bodeneintrag in das Geotextil an der oberen Grenze (vergleiche Schlussbericht des FE 05.0198/2017/AGB). Besonders die Geotextilien mit einer Filterdicke von 3 mm weisen einen hohen Bodeneintrag auf, wohingegen der Bodendurchgang minimal ist. Der höhere Bodeneintrag in die Geotextilien mit einer Filterdicke von 3 mm ist auf das höhere Porenvolumen des Filters zurückzuführen. Der Bodeneintrag bei den Geotextilien an der unteren Grenze weist auf den Beginn von Cloggingprozessen im System Boden/Geotextil hin. Der Durchlässigkeitsrückgang des Geotextils an der unteren Grenze mit einer Filterdicke von 1 mm ist ca. doppelt so hoch wie bei den Geotextilien an der unteren Grenze und einer Filterdicke von 3 mm.

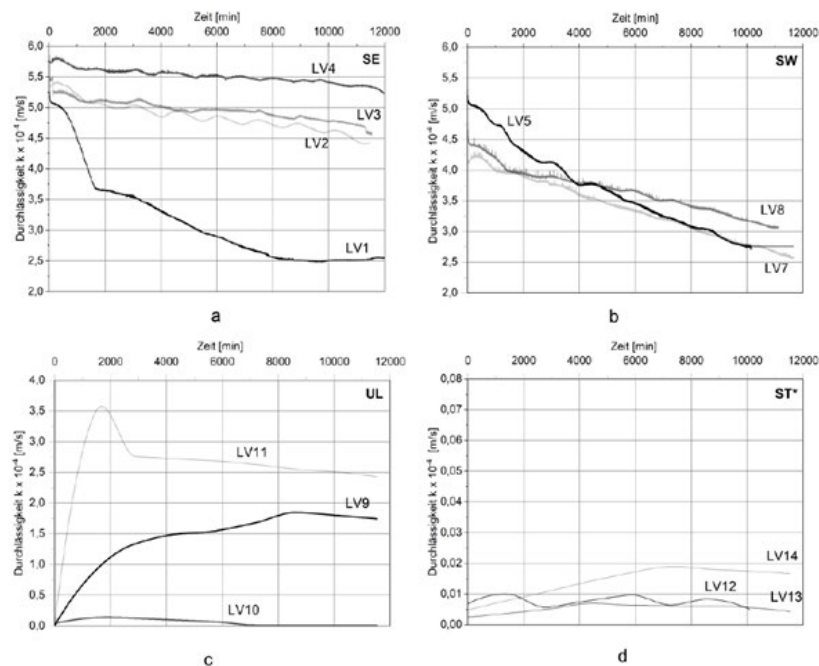


Bild 1: Ergebnisse der zeitlichen Veränderung der Durchlässigkeiten bei den Langzeitversuchen a) SE b) SW c) UL d) ST*

Aus diesem Grund ist ein früheres Versagen des Geotextils mit einer Filterdicke von 1 mm zu erwarten. Der Vergleich der Durchlässigkeiten unterschiedlicher Verfestigungsarten zeigt, dass bei einer rein mechanischen Verfestigung des Geotextils (LV3) leicht höhere Durchlässigkeitsrückgänge zu erwarten sind. Bild 1b zeigt das System aus weitgestuftem Sand SW (gilt als suffosionsgefährdet/erosionsgefährdet) und Geotextilien sowohl an der oberen als auch an der unteren Grenze. Bei dem System aus SW und Geotextil an der oberen Grenze (LV5) ist, wie bei dem System mit dem SE (LV1) ein starker Rückgang der Durchlässigkeit feststellbar. Nach ca. 10 200 Minuten (170 Stunden) ist eine konstante Enddurchlässigkeit ersichtlich. Diese weist auf ein filterstabiles System hin. Die deutlich längere Zeit zur Einstellung eines filterstabilen Systems ist auf die Erosionsneigung des SW zurückzuführen. Auch der Bodendurchgang konnte länger beobachtet werden. Insgesamt zeigte sich ein ähnlicher Bodendurchgang zum Bodendurchgang bei dem System mit dem SE (LV1). Auch der Bodeneintrag stimmt mit dem Ergebnis aus LV1 überein. Cloggingprozesse konnten auch hier nicht ermittelt werden. Der Durchfluss in LV6 (Geotextil an der unteren Grenze und Filterdicke von 1 mm) wurde während des Versuchs zwar erfasst, dieser weist jedoch auf einen Fehler des Durchflussmessers hin (negative Werte). Aus diesem Grund wird der Durchfluss nicht mit in die Auswertung einbezogen. Im Vergleich zu LV5 zeigen die Versuche LV7 und LV8 (Geotextil an der unteren Grenze und Filterdicke von 3 mm) einen starken Durchlässigkeitsrückgang zu Beginn und sinken anschließend stetig weiter. Ein stabiles Filtersystem stellt sich auch nach Ende der Versuchszeit nicht ein, da die Durchlässigkeit weiter sinkt. Auch die Ergebnisse des Bodeneintrags und des Bodendurchgangs zeigen, dass sich in den Geotextilien an der unteren Grenze im Vergleich zum Geotextil an der oberen Grenze deutlich mehr Feinteile im Geotextil einlagern und der Bodendurchgang minimal ist. Der Vergleich der Geotextilien mit unterschiedlichen Filterdicken und Verfestigungsverfahren zeigt die gleiche Tendenz wie beim Versuch mit dem SE. Eine höhere Gefahr von Cloggingprozessen beziehungsweise ein Filterverstopfen ist auch hier bei den Geotextilien an der unteren Grenze zu erwarten. Bild 1c zeigt den Verlauf der Systemdurchlässigkeiten mit einem leicht plastischen Schluff UL (suffosionsgefährdet) und Geotextilien sowohl an der oberen (LV9) als auch an der unteren Grenze mit der Filterdicke von 1 mm (LV10) und 3 mm (LV11). Bei zwei Versuchen (mit Geotextil an der oberen Grenze (LV9) und mit dem Geotextil an der unteren Grenze (LV11) und einer Filterdicke von 3,3 mm) konnten starke Pipingprozesse festgestellt werden, die die Bewertungen der Ergebnisse erschwert. Prinzipiell ist jedoch auch hier ersichtlich, dass die Durchlässigkeit des Systems aus UL und dem Geotextil an der oberen Grenze (LV9) nach Erreichen der maximalen Größe der Pipingstelle nur geringfügig sinkt. Das Durchlässigkeitsverhalten des Systems aus UL und dem Geotextil an der unteren Grenze und einer Filterdicke von 1 mm (LV10) zeigt hingegen, dass eine Durchlässigkeit zum Ende des Versuchs nahezu nicht mehr vorhanden ist. Bild 1d zeigt den Verlauf der Systemdurchlässigkeiten mit einem Sand-Ton-Gemisch ST*

(gilt als wenig suffosions-/erosionsgefährdet) und Geotextilien sowohl an der oberen (LV12) als auch an der unteren Grenze mit der Filterdicke von 1 mm (LV13) und 3 mm (LV14). Das Diagramm zeigt, dass die Durchlässigkeit des Systems aus ST* und Geotextil mit einer Öffnungsweite an der oberen Grenze 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. Der Bodeneintrag ist jedoch höher als bei dem SE und bei dem SW. Dies ist auf den deutlich höheren Feinanteil im ST* zurückzuführen. Die Durchlässigkeitsverläufe der Versuche LV13 (Filterdicke 1 mm) und LV14 (Filterdicke 3,3 mm) weisen auf Pipingprozesse im ST* hin, wodurch die Durchlässigkeit zu Beginn steigt. Nach Erreichen einer maximalen Durchlässigkeit nehmen die Durchlässigkeiten kontinuierlich ab, erreichen aber keine konstante Enddurchlässigkeit. Dieses Verhalten zeigt erneut, dass auch hier der Prozess des Bodeneintrags und des Bodendurchgangs noch nicht abgeschlossen ist. Der Vergleich des Bodeneintrags in das Geotextil und des Bodendurchgangs bei den Geotextilien mit einer Filterdicke von 1 und 3,3 mm zeigt, dass in das Geotextil mit einer Filterdicke von 3,3 mm zwar mehr Feinteile eingeschwemmt werden, die Feinteilmenge bei dem Geotextil mit einer Filterdicke von 1 mm prozentual (bezogen auf die Filterdicke) jedoch höher ist. Dadurch kann ein langsames Zusetzen des Geotextils mit einer Filterdicke von 3,3 mm erwartet werden. Die Versuche mit dem ST* zeigen, dass eine höhere Gefahr des Filterverstopfens bei den Geotextilien an der unteren Grenze vorliegt.

3.2 Zyklische Durchlässigkeitsversuche

Bild 2 zeigt die Durchflüsse in Abhängigkeit der eingestellten hydraulischen Gefälle während der zyklisch durchgeführten Versuche. Die in schwarz eingefärbten Versuche stellen jeweils die Versuche mit dem Geotextil mit einer Öffnungsweite an der oberen Grenze und die in grau eingefärbten Versuche die Versuche mit dem Geotextil mit einer Öffnungsweite an der unteren Grenze dar. Bei dem System ZV1 aus SE und Geotextil an der oberen Grenze ist zu erkennen, dass der Durchfluss in Abhängigkeit des hydraulischen Gefälles im Versuchsverlauf leicht abnimmt (ca. 0,5 l/min). Das System ZV2 aus SE und Geotextil an der unteren Grenze zeigt einen stärkeren Rückgang im Laufe der Versuchszeit (ca. 0,8 l/min). Auch die Bodeneinlagerung in das Geotextil mit einer Öffnungsweite an der unteren Grenze (ZV2) ist um einen Faktor von 2,5 höher. Der Bodendurchgang reduziert sich hingegen um den Faktor 2,5. Der stärkere Durchflussrückgang und der höhere Bodeneintrag in das Geotextil an der unteren Grenze (ZV2) zeigen, dass das Clogging-Potenzial höher ist als bei dem Geotextil an der oberen Grenze (ZV1). Im Vergleich zum Langzeitdurchlässigkeitsversuch konnte mithilfe der Variation des hydraulischen Gefälles ein höherer Feinteileintrag in das Geotextil erreicht werden. Somit wirken sich

unterschiedliche hydraulische Gefälle beziehungsweise Regenereignisse unterschiedlicher Intensität auf das Durchlässigkeitsverhalten und das Clogging-Potenzial aus. Bei dem System ZV3 aus SW und Geotextil an der oberen Grenze ist ersichtlich, dass die Durchflüsse in Abhängigkeit des hydraulischen Gefälles leicht schwanken, jedoch tendenziell gleichbleiben. Das System ZV4 aus SW und Geotextil an der unteren Grenze weist höhere Schwankungen der Durchflüsse auf und zeigt eine Abnahme des

Durchflusses zum Ende des Versuchs. Die Schwankungen sind auf stärkere Umlagerungsprozesse im SW aufgrund der Erosionsneigung zurückzuführen. Es zeigt sich auch bei diesem Boden ein erhöhter Feinteileintrag in das Geotextil und ein verringerter Bodenaustrag. Auch die Druckgeber innerhalb der Bodenprobe zeigen eine Erhöhung des Porenwasserdrucks oberhalb des Geotextils.

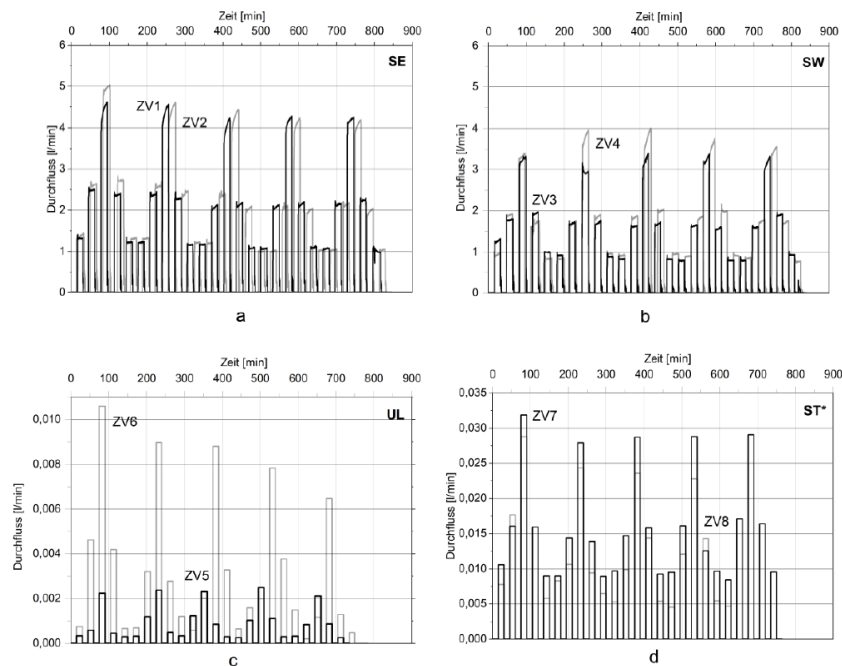


Bild 2: Ergebnisse der zeitlichen Veränderung der Durchlässigkeiten bei den zyklischen Versuchen a) SE b) SW c) UL d) ST*

Diese beiden Parameter – der erhöhte Bodeneintrag sowie der Druckanstieg oberhalb des Geotextils – geben Hinweise auf Clogging-Prozesse und damit auf einen Beginn des Verstopfens des Geotextils. Beim System ZV5 aus UL und Geotextil an der oberen Grenze 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 System ZV6 aus UL und dem Geotextil an der unteren Grenze im Versuchsverlauf deutlich ab. Der Bodeneintrag ist bei diesem Versuch maximal und ein deutlicher Druckanstieg oberhalb des Geotextils konnte festgestellt werden. Durch den suffozi- und erosionsgefährdeten UL besteht bei dieser Konstellation die größte Gefahr von Clogging-Prozessen beziehungsweise eines Verstopfens des geotextilen Filters. Das System ZV7 aus dem ST* und dem Geotextil an der oberen Grenze zeigt eine minimale Abnahme des Durchflusses im Lauf der Versuchszeit (0,04 l/min) sowie leichte Schwankungen. Auch der Bodendurchgang sowie der Bodeneintrag in das Geotextil sind gering. Der Bodeneintrag ist jedoch höher als bei den Bodengruppen SE und SW. Dies liegt vor allem an dem höheren Feinanteil im ST*. Bei dem System

ZV8 aus ST* und Geotextil an der unteren Grenze tritt eine höhere Durchlässigkeitsabnahme während des Versuchs (0,08 l/min) sowie eine höhere Bodeneinlagerung im Gegensatz zum Geotextil an der oberen Grenze auf (vergleiche Schlussbericht des FE 05.0198/2017/AGB). Ein minimaler Wasserdruckanstieg über dem Geotextil konnte festgestellt werden.

3.3 Durchlässigkeitsversuche mit Suspensionsbeaufschlagung

In Bild 3 sind die Permittivitäten über die Versuchsdauer von 300 Minuten (5 Stunden) dargestellt. Dabei sind in Bild 3a die Permittivitätsverläufe der Systeme aus SE und Geotextil an der oberen Grenze der Öffnungsweite O_{90} SV1 (schwarz) und Geotextil an der unteren Grenze der Öffnungsweite SV2 (grau) gezeigt. Bild 3b enthält die Permittivitätsverläufe der Systeme aus SW und Geotextil an der oberen Grenze SV3 (schwarz) sowie mit einem Geotextil an der unteren Grenze SV4 (grau).

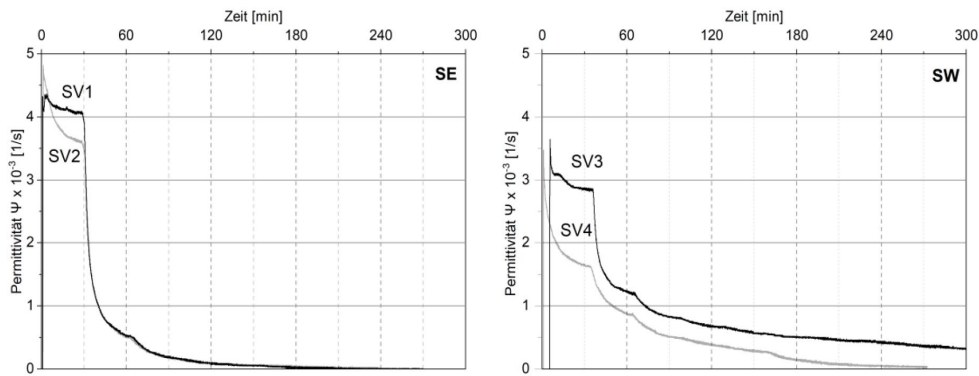


Bild 3: Ergebnisse der zeitlichen Veränderung der Durchlässigkeiten bei den Versuchen mit Suspensionsbeaufschlagung a) SE b) SW

Die vertikalen, gestrichelten Linien in den Diagrammen stellen jeweils die Kaolinzugaben (Intervall = 30 min) dar. Die erste Kaolinzugabe erfolgt nach 30 Minuten. Zu erkennen ist in Bild 3a, dass der Verlauf des Systems SV1 aus SE und Geotextil an der oberen Grenze der Öffnungsweite sowie der Verlauf des Systems SV2 aus SE und Geotextil an der unteren Grenze nahezu identisch sind. Nur der Anfangszustand (ohne Kaolinzugabe) unterscheidet sich. Insgesamt zeigt sich, dass die erste Zugabe von Kaolin die größten Auswirkungen auf die Permittivität hat. Jede weitere Zugabe verringert die Permittivität zwar, aber nicht in dem Maße wie die erste Zugabe. Bei dem SE lagert sich sowohl beim Geotextil an der oberen Grenze (SV1) als auch beim Geotextil an der unteren Grenze (SV2) Kaolin an der Oberfläche der Bodenprobe ab. Dies weist auf ein schnelles Verstopfen der Poren im Boden hin, wodurch keine weiteren Feinteile der Suspension mehr eingeschwemmt werden können. Aufgrund des gleichen Permittivitätsverlaufs der Systeme mit Geotextil an der oberen und an der unteren Grenze sind die Versuche zur Auswertung des Einflusses der Öffnungsweite O_{90} mit dem SE nicht aussagekräftig. In Bild 3b hingegen zeigt sich, dass bei dem System SV3 aus SW und Geotextil an der oberen Grenze, die Permittivität zwar stark zurückgeht, jedoch am Ende des Versuchs immer noch eine Durchlässigkeit des Systems vorhanden ist. Beim System SV4 aus SW und Geotextil an der unteren Grenze geht die Durchlässigkeit nach einer Versuchsdauer von 270 Minuten (4,5 Stunden) gegen Null. Die Werte des Bodendurchgangs sowie der Bodeneinlagerung zeigen ebenfalls, dass im System mit dem Geotextil an der unteren Grenze (SV4) deutlich mehr Feinteile im Geotextil eingelagert werden (vergleiche Schlussbericht des FE 05.0198/2017/AGB). Oberhalb des Geotextils konnte ein Filterkuchen beobachtet werden, der auf ein Verstopfen des Geotextils hinweist.

4 Fazit

Die im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführte Marktstudie zeigt, dass am Markt hauptsächlich mechanisch-thermisch verfestigte Geokunststoffprodukte (63 %) und rein mechanisch verfestigte Geokunststoffprodukte (37 %) vorliegen.

Geovliese sind bis zu einer Öffnungsweite von $O_{90} = 0,18$ mm verfügbar. Größere Öffnungsweiten weisen nur die Geogewebe auf. Die Ergebnisse der Zusammenstellung der Anwendererfahrungen weisen zudem auf eine zunehmende Verwendung von geotextilen Filtern mit einer Öffnungsweite an der unteren Grenze gemäß den Filterregeln hin. Jedoch sind wenige Schadensfälle derzeit von tatsächlich entstehenden systematischen Problemen bei der Verwendung von geotextilen Filtern im Hinblick auf die Filterfunktion (Kolmationsgefahr) bekannt. Die durchgeführten Langzeitdurchlässigkeitsversuche, zyklischen Durchlässigkeitsversuche und die Durchlässigkeitsversuche mit Suspensionsbeaufschlagung haben gezeigt, dass das Clogging-Potenzial und damit die Wahrscheinlichkeit einer Verstopfung des Geotextils bei Verwendung der Geotextilien mit einer Öffnungsweite O_{90} an der unteren Grenze gemäß M Geok E höher ist. Besonders die zyklischen Versuche haben gezeigt, dass die Gefahr eines Verstopfens des geotextilen Filters durch Regenereignisse unterschiedlicher Intensität, welche die Feinteilmobilisierung im Boden unterstützen, hoch ist. Die Suspensionsversuche zeigen, dass eine Suspensionsbildung im Boden beziehungsweise ein hoher Feinteileintrag in den Boden und den Filter unbedingt zu vermeiden ist. Auch hier ist die Gefahr eines Filterversagens bei den Systemen mit dem Geotextil an der unteren Grenze gemäß M Geok E deutlich höher. Durch den Einsatz von Geotextilien mit einer größeren Filterdicke kann ein langsames Zusetzen des Filters durch Feinteileintrag erreicht werden.

Dass es in der Praxis trotz der großen Abweichungen der Öffnungsweiten von der maximalen Öffnungsweite zu relativ wenigen Schadensfällen kommt, liegt an der in situ gegebenen charakteristischen hydraulischen Belastung/Randbedingung, die häufig nicht zu kritischen Bodentransportvorgängen im System Boden/Filter führt. Es ist trotzdem davon auszugehen, dass – und das haben auch die Systemversuche gezeigt – ein Filterversagen umso wahrscheinlicher wird, je weiter die Öffnungsweite von der maximalen Öffnungsweite entfernt ist, zumindest wenn die entsprechenden hydraulischen Randbedingungen vorliegen. Da oftmals die tatsächlich vorhandenen hydraulischen Randbedingungen im Feld nicht sicher eingeschätzt werden können oder auch gar nicht überprüft werden, bietet der Ansatz "so grob

wie möglich“, also die Wahl von Geotextilien so nah wie möglich an der oberen Grenze der Öffnungsweite O_{90} , die erforderliche Sicherheit, um ein Filterversagen zu vermeiden. Darüber hinaus führt eine hohe Anzahl an frei beweglichen Feststoffteilchen im Wasser zu einer möglichen Grenzbelastung des geotextilen Filters und es ist folglich bei starken Feinteilbelastungen mit einer stark erhöhten Kolmationsgefahr zu rechnen. Deshalb ist der Einsatz von geotextilen Filtern unter extremen Randbedingungen immer in situ individuell zu bewerten und in diesem Fall sollte insbesondere auch die Option eines alternativen Einsatzes von mineralischen Filtern geprüft beziehungsweise berücksichtigt werden.

Auf Grundlage der gewonnenen Versuchsergebnisse ist zusammenfassend eine Anpassung des M Geok E hinsichtlich der folgenden Aspekte empfehlenswert:

- Die untere Grenze der Öffnungsweite O_{90} gemäß M Geok E (hydraulischer Sicherheitsfall) sollte angehoben und der Einsatz eines Geotextils an der oberen Grenze zur Sicherstellung einer dauerhaft ausreichenden Wasserdurchlässigkeit 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 BAW MAG 1993).
- Das Kriterium der hydraulischen Filterwirksamkeit, dass die Durchlässigkeit des Filters langfristig die Durchlässigkeit des anstehenden Bodens nicht unterschreitet, sollte überarbeitet und nicht vorwiegend über den Nachweis der Sicherheit gegen Kolmation gesichert werden.
- Kriterien zur Berücksichtigung weiterer Parameter wie beispielsweise die Lagerungsdichte des Bodens und die Ungleichförmigkeitszahl sollten in die Geotextilfilterbemessung mit einbezogen werden (vergleiche Ansätze nach DWA-M 511, DVWK Merkblatt 221/1992, Giroud & Luetlich).

Auf Grundlage der genannten Anpassungsvorschläge sind weiterführende Systemversuche sinnvoll. Zum einen sollten Versuche mit Vliesen an der oberen Grenze der Öffnungsweite gemäß M Geok E durchgeführt werden, da im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ausschließlich Gewebe für die obere Grenze der Öffnungsweite verwendet wurden. Für diese Versuche werden extra dafür hergestellte Vliese (Modellvliese) benötigt, da gemäß der Marktstudie keine Vliese mit einer Öffnungsweite an der oberen Grenze verfügbar sind. Des Weiteren sollten Versuche mit größeren Öffnungsweiten (wie im M Geok E angegeben) durchgeführt werden, um zu ermitteln, inwieweit die obere Grenze (beispielsweise um welchen Faktor) angehoben werden kann unter der Vorgabe, dass die mechanische Filterwirksamkeit noch gegeben ist. Zur Entwicklung eines Kriteriums zur Sicherstellung der hydraulischen Filterwirksamkeit sind Versuche

mit Geovliesen, die unterschiedliche Durchlässigkeiten aufweisen, sinnvoll, um den Einfluss von $k_{\text{Geotextil}}$ zu ermitteln. Des Weiteren sind Untersuchungen zum Einfluss der Lagerungsdichte und der Ungleichförmigkeitszahl des Bodens essenziell. Auch ein Vergleich zwischen einem Kornfilter und einem geotextilen Filter kann anhand von Filterversuchen vorgenommen werden.

