

WEWERKA, M., Chemie Linz AG, Österreich

FILTERWIRKSAMKEIT VON GEOTEXILIEN — PRÜFUNG UND PRAXIS
FILTRATION CAPABILITY OF GEOTEXTILES—TESTING AND PRACTICAL EXPERIENCE
CAPACITE FILTRANTE DES GEOTEXTILES — ESSAIS ET EXPERIENCES PRATIQUES

Aufbauend auf vorhandene Untersuchungen über die Filterwirkung von Geotextilien wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, die das Verhalten des Systems Boden/Geotextil genauer erfassbar machen soll um Dimensionierungsgrundlagen zu schaffen. Dafür wurden spezielle Mischungen aus Glaskugeln, aber auch natürliche Böden verwendet.

Zwei verschiedene Prüfsysteme wurden verwendet:

1. Durchlässigkeitszelle für Durchströmung in einer Richtung. Es wurde der Bodendurchgang und die Veränderung des hydraulischen Druckes in Abhängigkeit von der Zeit festgehalten.
2. Turbulenzprüftopf zur Simulation einer von Wellen angegriffenen Böschung. Es wurde die Erosion des eingebauten Bodens in Abhängigkeit von der Böschungsneigung und der Zeit untersucht.

Parallel zu diesen Untersuchungen wurden bestehende Projekte, bei denen Geotextilien als Filter eingesetzt wurden, überprüft.

1. Allgemeines

Über die Prüfung der Filterwirksamkeit von Geotextilien liegen bereits eine ganze Reihe von Ausarbeitungen vor. Die Interpretation der Ergebnisse, d. h. die daraus abgeleiteten Anwendungskriterien schwanken jedoch teilweise sehr stark. Die Ursache dafür liegt meist im unterschiedlichen Verhalten von Prüfböden und Prüfungsvorrichtungen. Bekanntgewordene Schadensfälle durch die falsche Dimensionierung beziehen sich meistens auf das Verstopfen oder auf mechanische Beschädigungen, weniger auf ein nicht ausreichendes Rückhaltevermögen. Daraus läßt sich bereits erkennen, daß die angewandten Filterkriterien im Bezug auf den Erosionsschutz auf der sehr sicheren Seite liegen.

1.1. Öffnungsweite von Geotextilien

Zur Bestimmung der Öffnungsweite von Geotextilien gibt es eine ganze Reihe von Prüfmethode die von Siebung über Tauchung zur optischen Messung reichen. Welche dieser Methoden den Vorzug erhalten soll, ist dahingestellt, solange bei der Anwendung von Filterregeln jene verwendet wird, die auch zur Festlegung dieser Regeln benützt wurde. Es ist auch zu beachten, daß die Filterregeln nur für jene Produkte gelten, die denen bei der Regel-Bestimmung verwendeten, ähnlich sind.

2. Untersuchungen für mondirektionelle Strömung

Liegt das Geotextil am zu filternden Boden fest an, unterstützt es das Korngerüst gegen dimensionelle Veränderungen, solange dieses an sich stabil ist. Die einseitig gerichtete Belastung durch das Wasser gestattet eine Verspannung der Bodenpartikel auf und zwischen den Fasern (Gewölbewirkung). Dadurch wird verhindert, daß auch Bodenpartikel die kleiner sind als die Öffnungsweite, durchgespült werden. Welches Verhältnis zwischen Korngröße des Bodens und Öffnungsweite des Geotextils eingehalten werden muß, ist von mehreren Faktoren abhängig:

Based on existing investigations on the filter effect of geotextiles test series have been carried out to get more knowledge on the systeme soil-geotextile for creating design rules. Special mixtures of glas balls but also natural soils have been used. Tests have been carried out on two different systems:

1. Permeability cell with water flow in one direction. The amount of passing soil and change of hydraulic pressure versus time has been measured.
2. Test equipment for turbulent water flow to simulate slopes which are attacked by waves. The erosion of soil, also depending on the inclination of the slope, versus time has been investigated.

Additionally existing projects where geotextiles have been used, were examined to proof assumptions which hardly can be simulated by laboratory testing.

- Bodenart (Korngröße, Korngrößenverteilung, Kohäsion)
- Hydraulischer Gradient
- Geotextil
- Äußere Einflüsse (mechan. Belastung)

Einige der derzeit vorhandenen Filterkriterien zeigen eine gewisse Tendenz des Verhältnisanstiegs mit der Ungleichförmigkeit U des Bodens. Nach dem Bereich zwischen $U = 3 - 5$ wird bei einigen Kriterien das Verhältnis weiter angehoben, während es bei anderen wieder abfällt. (Bild 1)

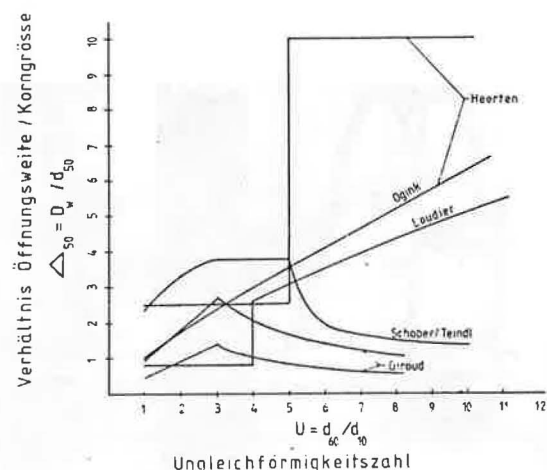


Abb. 1: Vergleich vorhandener Filterkriterien (1,2,3,4)

Die Umrechnung der verschiedenen Kriterien auf das Verhältnis $\Delta_{50} = D_W/d_{50}$ erfolgte unter Berücksichtigung der verschiedenen Prüfmetho- den der Öffnungsweite, wobei die Werte eines mechanisch verfestigten Endlosfaservlieses eingesetzt wurden, unter der Annahme von geradlinigen Kornverteilungen auf einem halb- logarithmischen Diagramm.

2.1. Filterversuche bei laminarer monodirektioneller Strö- mung

Zur Vervollständigung der bisherigen Ergebnisse wurden zusätz- liche Filterversuche durchgeführt.

2.1.1. Verwendete Geotextilien

Die Versuche konzentrieren sich auf eine Geotextilart, jedoch mit verschiedenen Öffnungsweiten und Dicken (Tabelle 1): Diese Geotextilien bestehen aus endlosen Polypropylenfasern mit einem Durchmesser von 0,03 - 0,04 mm. Diese in Wirrlage befindlichen Fasern sind durch Verschlingung miteinander verbunden (mechanisch verfestigt):

Geotextil	A	B	C
Gewicht (g/m ²)	90	200	400
Dicke (mm)	1,1	2,0	3,1
Öffnungsweite D _W (mm) (entspr.Franzius Inst.)	0,12	0,11	0,08
Öffnungsweite 0 ₉₅ (mm) (entspr.CEMAGREF)	0,201	-	0,095
E.O.S. (Siebnummer)	40	70	120
Durchlässigkeits- koeffizient k (cm/sec) (entspr.Franzius-Inst.)	5.10	5.10	4.10

Tabelle 1

2.1.2. Versuchsgerä^t

Zur Überprüfung des Rückhaltevermögens wurden Durchlässig- keitszellen konstruiert, bei denen der Anschluß von Piezo- metern möglich war. Die hydraulische Druckhöhe ist mit 100, 200 oder 300 mm fixiert. Die Geotextilien wurden auf den am unteren Ende der Zelle nach innen ragenden Vorsprung aufge- legt. Das Durchhängen wurde durch ein Drahtgitter mit einer Maschenweite von 10 mm unterbunden. Seitliches Vorbeisickern wurde durch eine Dichtung verhindert. Die Piezometer sind in einer Höhe von 10, 30, 50 und 75 mm über dem Geotextil angebracht. Die offene Fläche der Zelle beträgt 63,6 cm² (Bild 2)

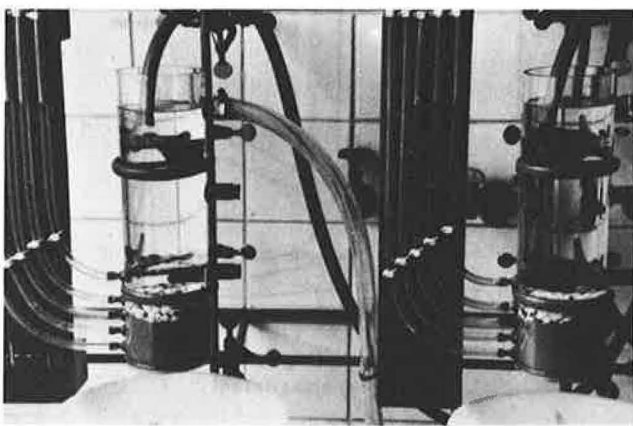


Abb. 2: Filterprüftopf f. laminare Strömung

2.1.3. Ergebnisse

Als Prüfboden wurden verschiedene Mischungen aus Glaskugeln hergestellt und in die Durchlässigkeitszelle eingebaut (Bild 3)

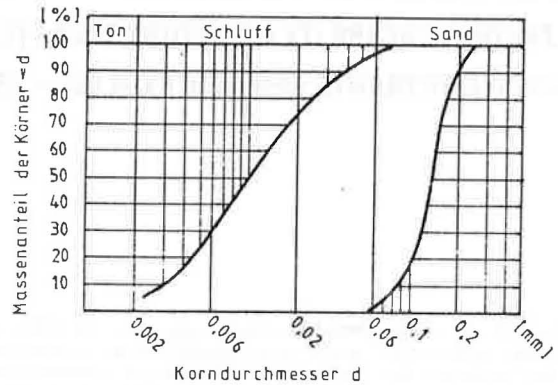


Abb. 3.: Bereich der untersuchten Testböden

Der hydraulische Gradient *i* betrug anfangs 2 und wurde dann auf 4 und 6 gesteigert. Die Belastungsdauer je Einstellung betrug in den meisten Fällen 24 Stunden oder mehr. Gemessen wurde der Boden- und Wasserdurchgang.

Folgende Überlegung wurde dazu angestellt: Bei einem Drainagerohr mit einem Durchmesser von 10 cm darf die maximale Verschmutzungshöhe 1 cm ausmachen. Dies entspricht etwa dem Gewicht des Bodens von 2000 g/lfm. Umgerechnet auf die Oberfläche der Prüfzelle ergibt dies ca. 12 g. Da die Prüfungs- dauer nur in wenigen Fällen 72 Std. übersteigt, wird der maximal zulässige Bodendurchgang mit 6 g festgelegt, wobei dieser abnehmende Tendenz aufweisen muß. In Tabelle 2 sind die bisherigen Ergebnisse gesammelt.

Aus den Ergebnissen läßt sich erkennen, daß der Ungleich- förmigkeitsgrad die Filterstabilität beeinflusst (vergleiche Ver- suchsnummer 18 mit 56). Mit abnehmender Korngröße wird nicht unbedingt eine kleinere Öffnungsweite notwendig, da die Strömungsenergie derart reduziert wird, daß ein Transport von Bodenteilchen nicht möglich ist. Dies gilt für den Bereich $k < 10^{-5}$ cm/sec. Beeinflusst wird die Filterstabilität auch vom hydraulischen Gradienten. Dies ist besonders bemerkbar bei Versuch 18: Während bei einem Gradienten von $i = 2$ kein Bodendurchgang bemerkbar ist, kommt es bei $i = 6$ zum kompletten Durchgang. Diese Abhängigkeit der Filterstabilität von der Fließgeschwindigkeit weist darauf hin, daß bei höherer Durchlässigkeit strengere Kriterien notwendig sind. Eine Ver- stopfungstendenz konnte an den durchgeführten Versuchen nicht festgestellt werden. Bei jenen Proben die einen sehr geringen Wasserdurchgang aufweisen, liegt dies am geringen *k*-Wert, ein übermäßiger Anstieg des Druckes im Piezometer direkt über dem Geotextil war nicht erkennbar.

3. Untersuchungen für multidirektionelle Strömung

Wechselt die Wasserströmung häufig ihre Richtung (Wellen- schlag) ist eine Verspannung der Bodenpartikel nicht möglich. Zur Sicherung der Filterstabilität sind Öffnungsweiten im Geo- textil notwendig, die zumindest einen Teil des zu schützenden Bodens zurückhalten. Dieser Anteil verhindert einerseits die Ausspülung der feineren Partikel (mit Ausnahme der im Grenz- bereich Geotextil-Boden befindlichen), andererseits verringert er die Wasserenergie die zur Ausspülung der weiter im Inneren des Bodens befindlichen feinen Bodenkörner notwendig ist. Einige der vorhandenen Filterregeln für diese Art der Belastung geben ein Verhältnis der Öffnungsweite zu einem für die jeweilige Regel entscheidenden Korndurchmesser des Bodens an. Ähnlich wie bei monodirektionellem Strömungszustand sind jedoch auch hier mehrere Parameter für die Dimensionierung entscheidend:

- Bodenart (Korngrößenverteilung, Korngröße, Kohäsion)

Geo- textil	Versuchs- Nr.	Prüfboden				Bodendurchgang (g) bei hydraulischem Gradient i =			stabil
		U	d ₅₀	d ₈₅	D _w / d ₅₀	2	4	6	
A	18/1	1,7	0,039	0,052	3,1	0,0(24)	9,1(96)	43,1(4)	nein
	18/2	1,7	0,039	0,052	3,1	0,0(24)	8,9(72)	18,0(24) 5,3(24) 13,1(120) 4,3(24)	nein
	18/3	1,7	0,039	0,052	3,1	-	-	11,2(24) 37,2(72) 23,2(24)	nein
	17	2,0	0,140	0,180	0,9	0,0(24)	0,0(24)	0,0(24)	ja
	53	2,1	0,043	0,087	2,8	0,8(24)	-	2,3(24) 0,0(18)	ja
	55	2,1	0,043	0,087	2,8	-	-	3,3(24) 1,6(72) 0,0(24)	ja
	52	3,7	0,072	0,170	1,7	0,5(16)	-	1,3(72) 0,0(24)	ja
	54	4,4	0,010	0,036	12,0	1,5(24)	-	18,6(24) 4,1(72)*	nein
	60	4,3	0,035	0,055	3,4	11,8(24)	-	3,3(26) 0,0(26)	nein
	56	4,5	0,033	0,051	3,6	3,0(4)	-	4,5(2) 2,8(120)	nein
58	5,1	0,041	0,130	2,9	0,0(24)	-	0,4(24) 1,5(24) 0,0(46)	ja	
B	19/1	1,7	0,039	0,052	2,8	1,5(24)	3,7(24)	11,8(96)	nein
	19/2	1,7	0,039	0,052	2,8	1,0(24)	1,9(24)	8,3(96)	nein
	59	3,4	0,037	0,055	3,0	1,0(24)	-	1,2(24) 1,1(24) 0,0(70)	ja
	61	4,9	0,028	0,048	3,9	1,0(24)	-	2,6(26) 0,70(26) 0,85(24)	nein
	51	41,0	0,145	0,370	0,8	0,0(24)	-	0,0(96)*	ja
C	20/1	1,7	0,039	0,052	2,1	1,2(24)	0,0(96)	3,9(552)	ja
	20/2	1,7	0,039	0,052	2,1	0,7(24)	0,0(96)	1,2(552)	ja
	57	4,3	0,013	0,044	6,2	0,0(4)	-	0,0(120)*	ja

Werte in Klammern geben die Prüfungsdauer in Stunden an
* sehr geringer Wasserdurchgang

Tabelle 2: Ergebnisse aus Filterversuch bei monodirektionaler Strömung

- Hydraulische Belastung
- Einbauzustand des Geotextils (Kontakt zum Untergrund)
- Art des Geotextils

3.1. Filterversuche bei turbulenter Strömung

Die größte Belastung des Filters ist im Bereich der Wellen, d. h. an der Uferböschung. Aus diesem Grund sollte dieser Teil besonders untersucht werden.

3.1.1. Verwendete Geotextilien

Es wurden die gleichen Materialien verwendet wie für monodirektionale Strömung.

3.1.2. Versuchsgerät

Der Prüfboden wurde in einem quadratischen Behälter mit einer Tiefe von 5 cm eingebaut. Das Geotextil wurde darübergelegt und seitlich fixiert. Als zusätzliche Belastung (zur Simulation des Deckwerkes) wurde ein Stahlgitter aufgelegt. Die Oberfläche ist in ihrer Neigung beliebig verstellbar (zur Simulation von Böschungsneigungen). Dieser so hergerichtete Behälter wurde mit einer bestimmten Frequenz unter Wasser getaucht und herausgezogen. (Bild 4)

3.1.3. Ergebnisse

Die Eintauch- und Herausziehgeschwindigkeit betrug 0,2 m/sec eine Pause von 10 Sekunden wurde dazwischengeschaltet. Je Versuch wurden 11000 Tauchungen ausgeführt. Die durchschnittliche Eintauchtiefe betrug 35 cm. Es zeigte sich, daß durch Setzungen und/oder Ausspülungen eine durch das Geotextil fixierte stabile Lagerung nicht mehr gewährleistet war. In den freien Raum zwischen Boden und Geotextil (dieses ist am Rand des Behälters fixiert und kann die Setzungen nicht mitmachen) kam es zu Turbulenzen, die den Aufbau eines natürlichen Filters behinderten. Das d₉₅ des Bodendurchganges entsprach dabei dem d₉₅ des Geotextils (Prüfmethode CE-MAGREF). Dies ist an sich nicht verwunderlich, da sich die Prüfmethode von der hydraulischen Belastung her ähnlich sind. Der unterschiedliche Neigungswinkel des Prüfbehälters beeinflusste den Bodendurchgang. Bei größerem Winkel wurde eine

größere Fläche an das Geotextil gedrückt, die erodierbare Oberfläche war verhältnismäßig klein, da der Boden versuchte eine horizontale Lagerung zu erreichen. Nach ersten Versuchen mit mehreren Neigungen wurden die weiteren mit einer Neigung von 1 : 4 durchgeführt. Nach Beendigung eines Versuches war die Oberfläche des kohäsionslosen Prüfbodens gleichmäßig leicht gewellt. (Bild 5)

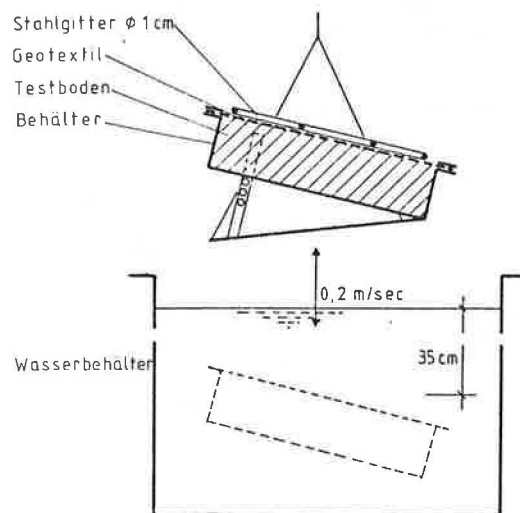


Abb. 4: Prüfgerät für turbulente Strömung

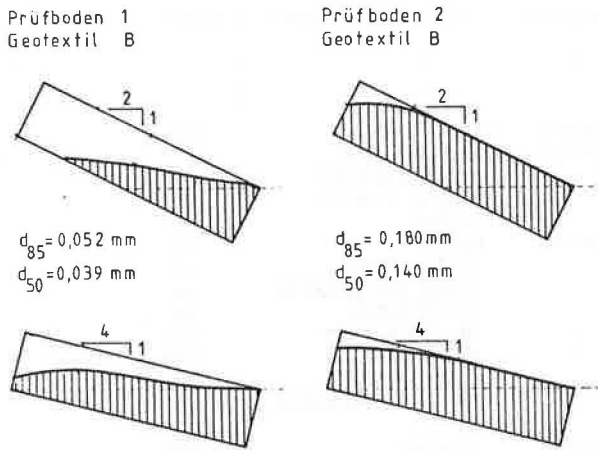


Abb. 5: Erosion der Prüfböden unter turbulenter Strömung

Bindige Böden, die sich als nicht stabil erwiesen, zeigten dagegen Erosionsrinnen. Mit zunehmender Plastizität nimmt die Erosionsgefahr ab. Bei einer Plastizität $I = 30 \%$ trat nach anfänglichen Ausspülungen Stabilität ein.

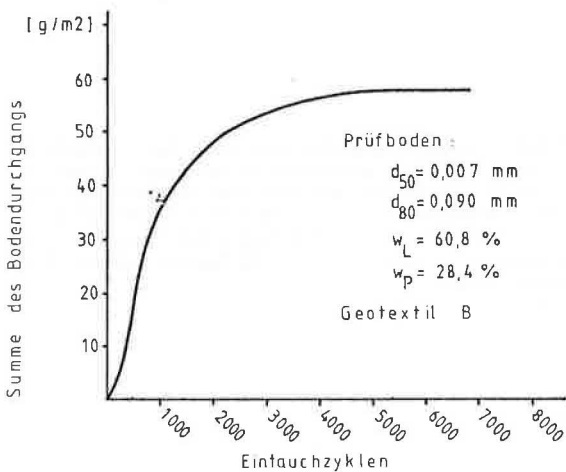


Abb. 6: Erosion eines kohäsiven Bodens unter turbulenter Strömung

Unter der Voraussetzung, daß eine gewisse Ausspülung tolerierbar ist (Setzungen von einigen wenigen Zentimetern haben üblicherweise keinen Einfluß auf die Standsicherheit von Uferböschungen) und daß das Geotextil nicht vollflächig durch ein Deckwerk an den Untergrund gepresst wird (größere Zwischenräume im Deckwerk) ist eine Öffnungsweite des Geotextils zu wählen, die gewährleistet, daß ein Teil des Bodens sicher zurückgehalten wird. Dieser Teil ist abhängig von der Ungleichförmigkeit des Bodens: Wird ein Verhältnis zwischen Öffnungsweite und d_{50} gewählt, so sind bei sehr gleichförmigen Böden ($U = 3$) strengere Kriterien zu wählen, als bei ungleichförmigen. Im ersten Fall kann durch geringfügige Schwankungen der Werte die Stabilität verloren gehen, im zweiten Fall ist auf alle Fälle eine ausreichende Bodenmenge vorhanden, die zurückgehalten wird. Bei ausreichend bindigen Böden genügt bei Belastungen, die den Versuchsbedingungen entsprechen, ein Geotextil mit einer Öffnungsweite von $D_w = 0,11 \text{ mm}$. Auf diesem Gebiet sind weitere Untersuchungen durchzuführen.

4. Ausgeführte Objekte

Anhand einiger praktischer Beispiele soll gezeigt werden, daß der Korndurchmesser von bindigen Böden nicht in dem selben Ausmaß wie bei kohäsionslosen Böden maßgebend dafür ist, welche Öffnungsweite das Geotextil aufzuweisen hat.

4.1. Entwässerungskanäle Kenia

Konstruktionsaufbau: Die Kanäle wurden mit einem Geotextil und darüberliegenden Gabionen ausgekleidet. Konstruktionen ohne Geotextil wurden bisher innerhalb kurzer Zeit zerstört.
Verwendetes Geotextil: mechan. verfestigtes Vlies (PP-Endlosfasern)

$D_w = 0,09 \text{ mm}$
 $t_G = 2,6 \text{ mm}$

Untergrund: Laterit (kohäsiv)

$d_{85} = 0,020 \text{ mm}$
 $d_{50} = 0,0016 \text{ mm}$

Ergebnis: Nach 2-jähriger Beobachtung konnten keinerlei Schäden festgestellt werden.

4.2. Uferverbauung Singapore River

Konstruktionsaufbau: Auf dem schlammigen Untergrund wurde das Geotextil verlegt, darüber wurde eine ca. 250 mm starke Steinschichtung eingebaut.

Verwendetes Geotextil: mechan. verfestigtes Vlies (PP-Endlosfaser)

$D_w = 0,11 \text{ mm}$
 $t_G = 2,1 \text{ mm}$

Untergrund: Schlamm

$d_{85} = 0,08 - 1,10 \text{ mm}$ $w_f = 60,8 \%$
 $d_{50} = 0,0062 - 0,0220 \text{ mm}$ $w_a = 28,4 \%$

Ergebnis: Nach 2-jähriger Beobachtung sind keine Schäden festgestellt worden. Die Filterfunktion wird durch das Geotextil erfüllt.

4.3. Uferverbauung Kramnitzbach

Konstruktion: Das Geotextil wurde an der Böschung verlegt. Im Normalwasserbereich wurde eine Steinschichtung aus bis zu 2000 kg schweren Steinen vorgesehen. Im Hochwasserbereich werden Grassoden auf das Geotextil verlegt.

Verwendetes Geotextil: mechan. verfestigtes Vlies (PP-Endlosfaser)

$D_w = 0,10 \text{ mm}$
 $t_G = 2,40 \text{ mm}$

Untergrund: Lehm

$d_{85} = 0,22 \text{ mm}$ $w_f = 32,2 \%$
 $d_{50} = 0,075 \text{ mm}$ $w_a = 26,7 \%$

Ergebnis: Nach 9-jähriger Beobachtung wurden keine Schäden festgestellt. Das Geotextil hat seine Funktion als Filter erfüllt. Im Bereich des Hochwassers wurde das Geotextil durch die Wurzeln des Grases fixiert. In benachbarten Bereichen ohne Geotextil kam es zu Erosionsschäden.

4.4. Uferverbauung des Flußes Rodl (Österreich)

Konstruktionsaufbau: Das Geotextil wurde direkt auf die Uferböschung verlegt und mit Pflöcken gesichert. Darüber wurden Granitblöcke mit einem Gewicht bis zu 2000 kg eingebaut. Maximale Fließgeschwindigkeit liegt bei 3 m/sec.

Verwendetes Geotextil: mechan. verfestigtes Vlies (PP-Endlosfaser)

$D_w = 0,08 \text{ mm}$
 $t_G = 3,0 \text{ mm}$

Untergrund: Sand, Lehm, stark wechselnd

$d_{85} = 0,3 - 4,0 \text{ mm}$
 $d_{50} = 0,025 - 0,6 \text{ mm}$

Ergebnis: Nach 12-jähriger Beobachtung konnten keine Schäden festgestellt werden. Die Uferböschung ist stark bewachsen.

5. Zusammenfassung

Die Filterversuche bei monodirektionaler Strömung ergaben einen gewissen Zusammenhang zwischen der Öffnungsweite des Geotextils und dem mittleren Korndurchmesser d_{50} des Bodens sowie dessen Ungleichförmigkeit. Die Versuche wurden unter extremen Bedingungen durchgeführt (Glaskugel, hoher Gradient), sodaß die Werte bereits eine gewisse Sicherheit aufweisen. Das Verhältnis ist am geringsten bei sehr gleichförmigen Böden und steigt dann an. Für den Bereich zwischen $U = 2$ und $U = 5$, in welchem die Versuche durchgeführt wurden, ist bei dünnen Vliesen (bis ca. 2 mm) ein Verhältnis $D_W/d_{50} = 3$ zulässig, bei dickeren Vliesen wird dieser Wert noch erhöht. Für bindige Böden konnte keine eindeutige Regelung gefunden werden, da deren Durchlässigkeit derartig gering ist, daß kein Bodendurchgang festgestellt werden konnte: $D_W < 0,12$ mm.

Für den Schutz von Böschungen ist die Dimensionierung vom Deckwerk abhängig. Ist die vollflächige Anpressung des Geotextils nicht gewährleistet, ist die Öffnungsweite d_{95} jene Weite, die Bodenteilchen dieser Größe noch zurückhält und somit fähig ist, einen natürlichen Filter aufzubauen. Dieser Wert ist in Abhängigkeit von der zulässigen Ausspülung und dem Ungleichförmigkeitsgrad für das jeweilige Projekt festzulegen. Für bindige Böden beträgt die Plastizitätszahl $I_p = 30$ %, um unter den beschriebenen Prüfbedingungen für multidirektionale Strömung mit Geotextil B stabil zu sein. Die Untersuchung der praktischen Beispiele zeigte, daß bei geringerer Plastizität bei einer Korngröße $d_{95} = D_W$ ebenfalls keine Erosionsprobleme auftraten.

Ist die vollflächige Anpressung des Geotextils gewährleistet, sind die Filterregeln wesentlich weniger streng. Unter den beschriebenen Bedingungen ist ein Verhältnis von $D_W/d_{95} = 1$ ausreichend für kohäsionslose Böden.

Diese Angaben gelten selbstverständlich nur für Geotextilien die den hier untersuchten in ihrem Aufbau ähnlich sind. Der Einfluß der Strömungsenergie auf die Auswahlkriterien ist noch zu untersuchen.

Literatur

1. Teindl H., Filterkriterien von Geotextilien, Straßenforschung Heft 153, Bundesministerium f. Bauten und Technik, Wien 1980
2. Heerten G., Geotextilien im Wasserbau - Prüfung, Anwendung, Bewährung
Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küstenschutz der Universität Hannover, Heft 52, Hannover 1981
3. Giroud J.P., Filter Criteria for Geotextiles, 2. Int. Conference on Geotextiles, V. I.
Las Vegas 1982
4. Londiere D., Fayoux D., Filtration et Drainage au Moyen de Geotextiles - Essais et Specifications, 2. Int. Conference on Geotextiles, V. I.,
Las Vegas 1982
5. Brochier P., Comportement des Geotextiles en Filtration et en Separation, Ecole Polytechnique de Montreal 1984