

## Entwicklung eines Bemessungsverfahrens für die Bodenbewehrung mit Vliesstoffen auf der Grundlage der bei Zug- und Zugkriechversuchen mit Bodenkontakt gewonnenen Parameter

FA 5.111

Forschungsstelle: Technische Universität München, Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik (Prof. Dr.-Ing. R. Floss)

Bearbeiter: Bauer, A. / Bräu, G.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: Mai 2000

### 1. Aufgabenstellung

Dieser Forschungsauftrag hatte zum Ziel, ein Bemessungsverfahren für den Einsatz von Vliesstoffen als Bewehrung von Böden zu entwickeln. Grundlage sollten dabei die Ergebnisse von Zugversuchen mit den Vliesstoffen sein, die im Boden unter Auf-

last durchgeführt werden. Die dazu notwendige Versuchstechnik wurde schon in dem 1994 abgeschlossenen Forschungsauftrag FE 5.094 G90C „Untersuchungen zum Kraft-Dehnungsverhalten von Geotextilien unter Bodeneinbaubedingungen“ verwendet und hat dabei ihre Eignung nachgewiesen. Die Vorgehensweise dieser Forschungsarbeit gliederte sich in drei Schwerpunkte.

### 2. Untersuchungsmethodik und Untersuchungsergebnisse

#### 2.1 Untersuchung des Kraft-Dehnungsverhaltens von Geotextilien

Der versuchstechnische Schwerpunkt lag auf der Durchführung von Zugversuchen mit Boden unter Variation der Auflast zur Untersuchung des Kraft-Dehnungsverhaltens von Geokunststoffen unter axialer Zugbeanspruchung. Bei den Versuchen

kamen unterschiedliche Böden und Geotextilien mit unterschiedlichen Herstellungsarten und Rohstoffen zum Einsatz. Untersucht wurde sowohl das Verhalten bei kurzzeitiger Belastung bis zum Bruch, als auch das Langzeitverhalten bei konstanter Last. Aus den Untersuchungsergebnissen der Versuche mit Bodeneinbettung lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Das Kraft-Dehnungsverhalten von Geweben wird durch die Einbettung in den Boden und die Bodenauflast relativ wenig verändert.
- Das Kraft-Dehnungsverhalten von Vliesstoffen wird durch die Bodeneinbettung und die Bodenauflast maßgeblich verändert. Diese Veränderung tritt bei mechanisch verfestigten Vliesstoffen stärker auf als bei thermisch verfestigten.
- Die Kriechverformungen werden durch den Boden und die Bodenauflast reduziert, die mechanischen Eigenschaften der verwendeten Polymere sind aber von großer Bedeutung.

Die Beeinflussung des Kraft-Dehnungsverhaltens von Geotextilien im Boden lässt sich auf mehrere Ursachen zurückführen. Bodenteilchen lagern sich in die Geotextilstruktur ein und behindern so die Verformung und Ausrichtung der Fasern unter Zugbeanspruchung. Die regellos angeordneten Fasern bei Vliesstoffen werden in ihrer Lage fixiert. Diese Fixierung ist um so stärker, je höher die Auflast ist und je leichter sich Bodenteilchen in die Geotextilstruktur einlagern können. Durch die Auflast werden die Fasern aneinandergedrückt. Ungleichmäßige Zugbeanspruchung der einzelnen Fasern verursacht so in Abhängigkeit von der Auflast zwischen diesen Fasern Reibung. Die Reibung kann als innere Reibung oder auch innerer Verbund bezeichnet werden. Diese innere Reibung wirkt der Zugbeanspruchung entgegen und erhöht so die Dehnsteifigkeit. Der Einfluss ist direkt von der Bodenauflast abhängig. Da sich das mechanische Verhalten der Geotextilrohstoffe nicht verändert, wird durch den Einfluss des Bodens die Konstruktionsdehnung der Geotextilprodukte reduziert. Somit ist der Einfluss des Bodens und der Bodenauflast um so größer, je größer die Konstruktionsdehnung im Zugversuch ohne Bodeneinbettung ist.

Im Zeitstandsverhalten zeigen sich sehr deutlich die mechanischen Eigenschaften der Rohstoffe. Die Kriechverformungen der Polyolefine sind deutlich größer als die des Polyesters.

Insgesamt kann aus den Ergebnissen gefolgert werden, dass man bei Geweben auf Versuche im Kontakt mit Boden im Allgemeinen nicht angewiesen ist. Bei Vliesstoffen dagegen ist die Untersuchung im Boden notwendig, um realitätsnahe Bewehrungseigenschaften zu erhalten.

Zur weiteren Auswertung der Versuchsergebnisse wurden Materialgesetze zur Beschreibung des Kraft-Dehnungsverhaltens und des Langzeitverhaltens entwickelt. Diese Materialgesetze sind geeignet, die Dehnsteifigkeit von Geotextilien im Boden unter Auflast zu beschreiben. Sie wurden primär für den Einsatz in numerischen Verfahren entwickelt, können aber auch in Bemessungsverfahren eingesetzt werden. Auf Basis dieser Gesetze wurden für verschiedene Vliesstoffe Diagramme dargestellt, die einen Zusammenhang zwischen der auf Dauer zulässigen Zugkraft und der Bodenauflast herstellen und so zur Abschätzung der Gebrauchsfähigkeit in einem Bauwerk herangezogen werden können.

## 2.2 Berechnungen mit FEM und Lamellenprogramm

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Anwendung dieser Materialgesetze in erdstatischen und numerischen Untersuchungen. Zur Überprüfung der abgeleiteten Materialgesetze und zur weiteren und genaueren Beurteilung der Zugversuche wurde ein bei der Bundesanstalt für Straßenwesen durchgeführter Belastungsversuch mit einer vliesstoffbewehrten Steilböschung mit der Methode der Finiten Elemente (FEM) nachgerechnet. Dazu musste das FEM-Programm um die abgeleiteten Gesetze zur Beschreibung des Kraft-Dehnungsverhaltens der Geotextilien im Boden erweitert werden. Das FEM-Programm gehört zur Programmgruppe der sogenannten Anfangssteifigkeiten, die Gesamtsteifigkeitsmatrix wird nur einmal erstellt und bleibt

während der Berechnungen konstant. Überschreitungen im Spannungszustand unter Verwendung viskoplastischer Materialgesetze werden dabei im Lastvektor berücksichtigt und iterativ abgebaut. Da sich sowohl beim Boden, besonders aber bei den Geotextilien die Steifigkeiten in Abhängigkeit vom Spannungszustand verändern, musste u. a. das Programmsystem so erweitert werden, dass während der Berechnungen auch die Gesamtsteifigkeitsmatrix veränderlich ist.

Der Boden wurde durch isoparametrische Elemente und einem Bruchgesetz nach Mohr-Coulomb mit assoziierter Fließregel, die Geotextilien wurden mit Stabelementen modelliert. Der Verbund und die Kraftübertragung zwischen Boden und Geokunststoff wurde durch sogenannte thin-layer-Elemente realisiert. Diese Elemente sind ein Spezialfall von Kluftelementen und gewährleisten eine kontrollierte Schubspannungsübertragung zwischen Boden und Bewehrung, wobei auch durch unterschiedliche Eingabe von E-Modul und Schubmodul eine Verschieblichkeit parallel zur Kluft gewährleistet werden kann.

Durch den Vergleich der Messergebnisse im Großversuch mit den FEM-Berechnungen konnte der Nachweis erbracht werden, dass die FEM-Modellierung und die Materialgesetze die tatsächlichen Verhältnisse gut beschreiben.

Mit der Modellierung dieser Versuchsböschung und mit weiteren Böschungsgeometrien wurden Parameterstudien durchgeführt. Aus diesen wurde der Einfluss von Auflasten, Bodensteifigkeit, Geotextilsteifigkeit, Wandneigung und den Scherparametern des Bodens abgeleitet und damit das Tragverhalten der bewehrten Steilböschung genauer untersucht. Da schon bei geringen Auflasten bei einer Steilböschung die Scherfestigkeit des Bodens in der Gleitfuge fast vollständig ausgenutzt wird und weitere Auflasten durch Zugkräfte im Geokunststoff aufgenommen werden, sind die Scherparameter des Bodens entscheidend für das Verformungsverhalten der Steilböschungen. Die Geotextilzugkräfte werden dann in weniger beanspruchten Bodenbereichen verankert, es wird mehr Bodenmasse zur Lastabtragung herangezogen. Weiterhin hat sich gezeigt, dass extreme Steigerungen der Geotextilzugfestigkeit zu keiner wesentlichen Verbesserung des Systemverhaltens führen. Die Ursache liegt darin, dass die hohen Zugfestigkeiten nicht ausgenutzt werden konnten, da die dafür notwendigen großen Verankerungslängen nicht zur Verfügung standen.

Durch diese Berechnungen konnte nachgewiesen werden, dass das Tragverhalten und damit auch die Verformungen einer bewehrten Steilböschung mit numerischen Verfahren wie der FEM beschrieben werden können. Diese Verfahren sind allerdings für praxisgerechte Berechnungen sehr aufwendig. Es wurde daher ein Berechnungsmodell vorgeschlagen und programmiert, mit dem die Verformungen einer Steilböschung ermittelt werden können. Ausgegangen wird dabei von einem direkten Zusammenhang zwischen den Verschiebungen der Front und den Dehnungen der Geotextilien. Die horizontalen Verschiebungen der Front sind im Gebrauchszustand näherungsweise gleich groß wie das Integral der Geotextilnehmungen. Die Gleitungen zwischen Boden und Bewehrung sind gering.

Das Programm ist vom Grundprinzip her ein Lamellenprogramm, wobei die einzelnen Lamellen einen Bruchkörper unterteilen. Die Form des Bruchkörpers wird durch die Böschungsoberfläche und die Neigungen der einzelnen Lamellen beschrieben. Die Lamellengrenzen sind jeweils vertikal. Die Anzahl der Lamellen ergibt sich aus der Anzahl der Geotextillagen und der Geometrie der Böschung. Die Geometrie der Böschung ist durch die ebene Auflagerfläche, die ebene Böschungsoberfläche und durch eine einheitliche Böschungsneigung bestimmt. Der Boden wird durch die Wichte und den Reibungswinkel beschrieben, eine Kohäsion kann nicht berücksichtigt werden. Die Böschungsoberfläche kann durch eine vollflächige und gleichmäßige Auflast belastet werden. Man gibt neben der Böschungsgeometrie (Höhe, Böschungsneigung, Anzahl und Höhenlage der Geotextilien) nur die Neigung der Gleitfläche zwischen den Bewehrungslagen an. Das Programm unterteilt diese

Struktur in einzelne Lamellen und berechnet aus Gleichgewichtsbedingungen um die Lamellen dann die notwendigen Geotextilzugkräfte der einzelnen Lagen und stellt diese grafisch dar. Die Geotextildehnungen werden vom Programm nach dem Materialgesetz nichtlinear und auflastabhängig errechnet. Zur Berechnung der Wandverformungen werden die Dehnungen der Geotextillagen aufintegriert und ebenfalls dargestellt. Da die Geotextilzugkräfte und damit das Berechnungsergebnis von den Neigungen der Gleitflächen abhängen, ist es entscheidend, dass der Anwender eine realistische Gleitflächenform eingibt. Diese Gleitflächenform kann z. B. aus einer Standsicherheitsberechnung abgeleitet werden.

Wie einige Berechnungsbeispiele und der Vergleich mit FEM-Berechnungen gezeigt haben, kann das Lamellenprogramm die Wandverformungen einer vliesstoffbewehrten Steilböschung ermitteln und so die Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks nachweisen. Das Programm ersetzt jedoch nicht eine Standsicherheitsuntersuchung.

### 2.3 Auswertung von Probelastungen

Der dritte Schwerpunkt der Forschungsarbeit war die Auswertung von Probelastungen an geokunststoffbewehrten Steilböschungen, die für temporäre Zwecke im Rahmen einer Autobahnbaustelle errichtet wurden. Zum Einsatz kamen dabei ein Gitter und ein Verbundstoff. Die beiden Steilböschungen lagen über einen Zeitraum von 2 Jahren unmittelbar unter der Verkehrsbeanspruchung der Autobahn. Nach Fertigstellung der Brücke wurden die Steilböschungen nicht mehr benötigt, es bestand somit die Möglichkeit von Probelastungen und Probenahmen während des Rückbaus der Steilböschungen. Obwohl es sich bei den Bewehrungstypen nicht um Vliesstoffe handelte, stellten diese großmaßstäblichen Versuche eine wesentliche Ergänzung nicht nur für diese Forschungsarbeit dar und erlaubten die wechselseitige Übertragung und Bewertung von Ergebnissen aus Labor, Entwurf und Anwendung. Es wurde wegen dieser einmaligen Gelegenheit kurzfristig eine Erweiterung des Forschungsvorhabens beantragt und genehmigt. Im Rahmen dieser Erweiterung waren folgende Untersuchungsschwerpunkte vorgesehen:

- Auswertung der Belastungsversuche
- Entnahme von Proben der Bewehrungen
- Laborversuche mit den Bewehrungsproben
- Standsicherheits- und Verformungsberechnungen.

Zur Auslegung der Belastungseinrichtung wurde auf Erfahrungen aus anderen Probelastungen und auf Standsicherheitsberechnungen zurückgegriffen. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde eine Versuchseinrichtung vorgesehen, die mit 4 Hydraulikzylindern von jeweils 1 MN maximale Pressenkraft die Steilböschung belasten kann. Als Widerlager für die Hydraulikpressen wurden jeweils 6 Anker vertikal gebohrt. Die Lastfläche bestand aus flächig verlegten Holzbalken, die mit Stahlträgern ausgesteift wurden. Sie hatte eine Abmessung von 2,5 x 2,0 m und damit eine Fläche von 5,0m<sup>2</sup>. Mit der maximalen Last der Hydraulikzylinder von insgesamt 4 MN ergab sich somit eine maximale Flächenpressung von 800 kPa.

Die umfangreichen Verformungsmessungen an der Böschungsfrent und an der Oberfläche haben überraschend geringe Verformungen auch bei der maximalen Flächenpressung von 800 kPa gezeigt. So hat sich die Belastungseinrichtung dabei um ca. 33 mm gesetzt, die horizontalen Verformungen an der Front lagen mit ca. 4 mm noch deutlich geringer. Ein Bruchzustand der Steilböschung konnte während der Probelastung nicht verursacht werden. Zusammenfassend kann man aus den Messergebnissen folgern, dass die Steilböschungen noch erhebliche Tragreserven aufwiesen.

Aus den Bewehrungslagen wurden Proben sowohl im Front- als auch im Mittelbereich entnommen. Im Labor wurden die Restfestigkeiten der Bewehrungen bestimmt. Bei den Proben aus der Front sollte der Einfluss der Witterungseinflüsse untersucht werden. Die aus dem Mittelbereich entnommenen Proben lagen im auf Zug beanspruchten Bereich der Bewehrungen. Ein Festigkeitsverlust ist damit neben der Einbaubeanspruchung vor allem auch auf die Einflüsse der Verkehrslasten zurückzuführen.

Im Frontbereich ergaben sich im Mittel Festigkeitsverluste von ca. 10 %. Bei den aus dem Mittelbereich entnommenen Proben stellte sich bei den obersten beiden Lagen ein Festigkeitsverlust von bis zu 40 % ein, der neben der reinen Einbaubeschädigung auch auf die dynamischen Einwirkungen der Verkehrslast zurückgeführt werden kann. Der Einflussbereich der Verkehrslasten reichte somit bis in eine Tiefe von ca. 1,5 m.

Zur Ergänzung der Versuchsergebnisse und zur Abschätzung der Tragreserven der bewehrten Steilböschungen wurden Berechnungen mit einem Standsicherheitsprogramm und mit dem im Rahmen dieser Forschung entwickelten Lamellenprogramm durchgeführt. Auf FEM-Berechnungen wurde hier verzichtet, da wegen der begrenzten Lastflächen eine sehr aufwändige räumliche Modellierung notwendig gewesen wäre.

Obwohl das Lamellenprogramm für die Berechnung von Gebrauchszuständen vollflächig belasteter Steilböschungen und nicht zur Nachrechnung von räumlich begrenzten Lastflächen mit sehr hohen Flächenpressungen entwickelt wurde, haben die Vergleichsberechnungen eine zumindest zufriedenstellende Übereinstimmung gezeigt. Die Standsicherheitsberechnungen haben ebenso wie die Schlussfolgerungen aus den Verformungsmessungen bewiesen, dass die beiden Steilböschungen noch erhebliche Tragreserven hatten.

### 3. Folgerungen für die Praxis

In dem Forschungsvorhaben wurde ein Bemessungsverfahren für den Einsatz von Vliesstoffen als Bewehrung von Böden entwickelt. Grundlage war dabei u. a. die genaue Kenntnis des Kraft-Dehnungsverhaltens von Vliesstoffen im Boden unter Auflast. Mit diesem Berechnungsmodell können die Verformungen von vliesstoffbewehrten Böschungen berechnet und damit die Gebrauchstauglichkeit nachgewiesen werden. Es wurde ein PC-Programm mit diesem Berechnungsmodell für die Anwendung in der Praxis bei einfachen Fällen erstellt. In Absprache mit dem Forschungsgeber wird dieses Programm interessierten Anwendern zur Verfügung gestellt und kann über die Technische Universität München, Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik, bezogen werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass Vliesstoffe bei entsprechender Bodenauflast und unter Zugbeanspruchung des Gebrauchszustandes Dehnsteifigkeiten aufweisen, die denen von Geweben oder Geogittern nur wenig nachstehen. Vliesstoffe können daher für die Bewehrung von Steilböschungen eingesetzt werden. Da Vliesstoffe preisgünstiger sind als Gewebe oder Geogitter, ist diese Bauweise besonders wirtschaftlich.

Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit machen deutlich, dass das Verformungsverhalten vliesstoffbewehrter Steilböschungen nicht durch die getrennte Betrachtung von Boden und Geotextil berechnet werden kann. Die Eigenschaften der beiden Bestandteile werden durch den gegenseitigen Kontakt verändert. Diese Veränderung der Materialeigenschaften durch die Verbundwirkung hat einen großen Einfluss auf das Verformungsverhalten und damit auf die Gebrauchstauglichkeit von bewehrten Steilböschungen und darf bei Berechnungsansätzen nicht vernachlässigt werden. □