

WERNER, G. und RESL, S., Chemie Linz AG, Austria

**STABILITÄTSMCHANISMEN IN GEOTEXTILVERSTÄRKTEN ERDSTÜTZKONSTRUKTIONEN**

**STABILITY MECHANISMS IN GEOTEXTILE REINFORCED EARTH-STRUCTURES**

**MECANISMES DE STABILITE DANS LES SOUTENEMENTS EN TERRE RENFORCES PAR GEOTEXTILES**

Im vorliegenden Bericht wird das Ergebnis eines Belastungsversuches an einer geotextilverstärkten Erdstützkonstruktion theoretischen Überlegungen über mögliche involvierte Stabilitätsmechanismen gegenübergestellt.

Der Belastungsversuch zeigte, daß trotz 1,7 facher Überbelastung der rechnerischen Bruchlast kein Bruchzustand herbeigeführt werden konnte, und daß es auch keinerlei Hinweise auf Kriechvorgänge im mechanisch verfestigten PP-Spinnvlies Polyfelt TS 400 gab.

Der Autor beweist, daß durch die Aufteilung der kritischen Gleitfläche in Einzelbruchflächen sowie durch Berücksichtigung einer Gewölbebildung zwischen den Geotextiltrennlagen eine erhöhte Böschungstabilität nachgewiesen werden kann, die mit konventionellen Berechnungsmethoden der Bodenmechanik nicht erfaßbar ist. Krafteintragungslänge und effektive Einspannlänge des Verbundsystems Geotextil-Boden liegen im cm-Bereich, wodurch bereits bei kleinsten Verschiebungen eine Aktivierung der max. Geotextilzugfestigkeit erreicht würde.

Einleitung

Probebelastungen an geotextilverstärkten Erdstützkonstruktionen (Polsterdämmen) zeigen, daß die tatsächliche Bruchlast weit über der rechnerischen Bruchlast liegen muß. Dieses Phänomen beweist, daß der Einfluß des Funktionsmechanismus des Geotextils auf die Stabilität derartiger Konstruktionen nicht mit "Terre Armée" und auch nicht mit anderen konventionellen Berechnungsmethoden zu erfassen ist.

Der Autor bietet im folgenden Bericht zwei Lösungsansätze zur Erfassung der Stabilitätsmechanismen in geotextilverstärkten Erdstützkonstruktionen an:

- a) der Bruchzustand der Gesamtkonstruktion resultiert aus dem von unten nach oben fortschreitenden Versagen der Einzellaugen
- b) Im Bereich der Gleitfuge führt die Gewölbebildung zur Induzierung einer Horizontalspannung.

Die theoretischen Überlegungen zu den Stabilitätsmechanismen werden mit dem Ergebnis eines Belastungsversuches an einer geotextilverstärkten Erdstützkonstruktion von 2,40 m Höhe verglichen, bei der der Versuchsdam auf den 1,7fachen Wert der rechnerischen Bruchlast überbelastet wurde. Als Geotextil für den Versuchsdam, bei dem der Bruchzustand nicht herbeigeführt werden konnte, war das mechanisch verfestigte Polypropylenvlies Polyfelt TS 400 (350 g/m<sup>2</sup>) verwendet worden.

1) Belastungsversuch Polsterdamm

Der Polsterdamm, der im Jahre 1981 für Versuchszwecke errichtet worden war, befand sich zum Zeitpunkt des Belastungsversuches im Frühjahr 1984 bereits drei Jahre extremen Klimaschwankungen und Umwelteinflüssen ausgesetzt. Damm- und Belastungsgeometrie können Abbildung 1.1. entnommen werden, die bodenmechan. Kennwerte des stark schluffigen Kies-Sand-Schüttmaterials waren mit  $\phi = 21^\circ$ ,  $c = 20 \text{ KN/m}^2$ ,  $\gamma = 19,3 \text{ KN/m}^3$  definiert. Als Geotextil war ein mechanisch verfestigtes Polypropylenvlies mit folgenden Materialkennwerten verwendet worden:

The following report compares the results of a full-scale load test on a geotextile reinforced earth structure with theoretical considerations concerning possible stability mechanisms involved in it.

The load test showed, that in spite of overloading to 1,7 times the theoretical failure load no failure occurred in the earth structure, nor was any creep of the continuous filament needle punched polypropylen geotextile Polyfelt TS 400 in evidence.

The author proves that an increased stability against slip failure of the embankment can be achieved by splitting up the critical slip surface into individual multilayer slip surfaces, as well as taking into account the arching effect between the geotextile layers, which cannot be evaluated by means of conventional calculation methods. The considerations show, that the section of geotextile effected by the force and the embedment length of the geotextile/soil system are to be found within the range of cms, so that already insignificant displacements would activate the full tensile strength of the geotextile.

Flächengewicht	g/m <sup>2</sup>	DIN 58855	350
Reißfestigkeit	KN/m	DIN 53815	16
Reißdehnung	%	DIN 53815	80
Grabfestigkeit	N	DIN 53838	1200

Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften der Vliestype

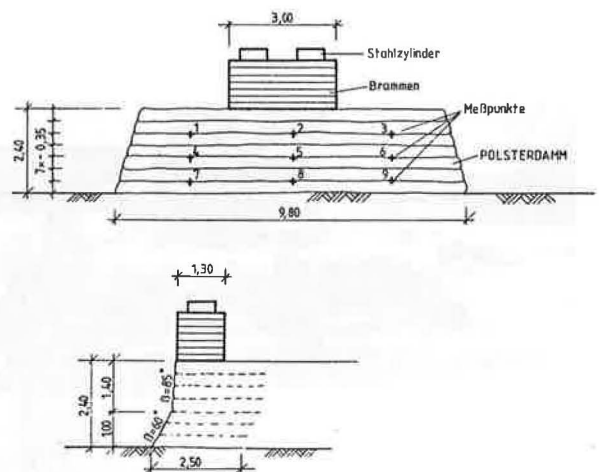


Abb. 1.1. Damm- und Belastungsgeometrie

Zur Belastung des Polsterdammes wurden 7 Stahlbrammen mit je 3 x 1,3 x 0,2 m sowie 2 Stahlzylinder von 0,8 m Durchmesser verwendet, was einer Gesamtbelastung von 510 KN bzw. 130 KN/m<sup>2</sup> entsprach (Abb. 1.2.). Die Belastung von 130 KN/m<sup>2</sup> entsprach der 1,7fachen rechnerischen Bruchlast, ohne daß der Bruchzustand oder die kritische Verformung erreicht werden konnte.

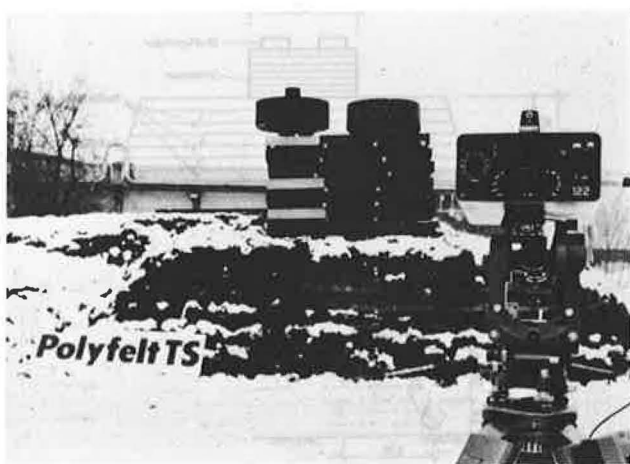


Abb. 1.2. Belastungsversuch Polsterdamm

Auf der Vorderseite des Polsterdammes wurden 9 Meßpunkte befestigt, um die zu erwartenden Verschiebungen der geotextilverstärkten Erdstützkonstruktion kontrollieren zu können. Die Lastaufbringung erfolgte in drei Etappen:

- Laststufe 1 mit 170 KN
- Laststufe 2 mit 400 KN
- Laststufe 3 mit 510 KN

wobei zwischen Laststufe 1 und 2 ein Zeitabstand von 15 Min. und zwischen Laststufe 2 und 3 ein Zeitabstand von 30 Min. lag. Die Verformungen der Polsterdammoberfläche wurden dann kontinuierlich vermessen, Abb. 3 zeigt die drei Meßprofile nach einem Beobachtungszeitraum von 3 Tagen. Eine Extrapolation der Endsetzungen für die Dammitte ergibt aus dem halblogarithmischen Zeit-Setzungsverlauf für den Meßpunkt 2 eine max. Vertikalverschiebung  $e_{v2} = 15$  cm für den Meßpunkt 5 eine max. Vertikalverschiebung  $e_{v5} = 11$  cm für den Meßpunkt 8 eine max. Vertikalverschiebung  $e_{v8} = 4$  cm

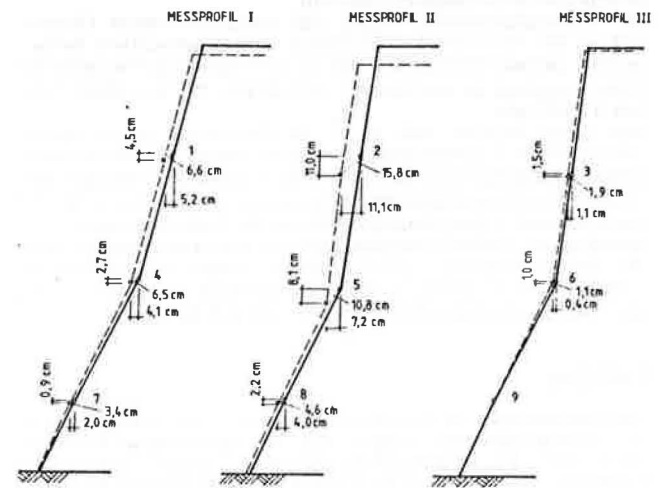


Abb. 1.3. Meßprofile der Polsterdammverschiebung

Im weiteren Versuchsverlauf wurden Vliesproben aus dem Polsterdamminnenen sowie von der Polsterdammoberfläche entnommen, um etwaige Festigkeitsverluste oder Materialveränderungen infolge örtl. Überbeanspruchungen aus dem Bauzustand, Gebrauchszustand oder der Versuchsdurchführung festzustellen. Die Überprüfung der Streifenzugfestigkeit nach DIN 53857 zeigte, daß die Vliesproben aus dem Polsterdamminnenen keine Veränderungen gegenüber den ursprünglichen mechan. Eigenschaften aufwiesen.

Dieses Ergebnis ist insofern von Bedeutung, da die Proben aus jenen Bereichen der radialen Scherung entnommen worden sind, wo die Krafteinleitung und Beanspruchung des Vlieses entsprechend konventionellen Stabilitätsbetrachtungen am Größten sein müßte. Diese Beobachtung stimmt mit den Untersuchungen über den Versuchspolsterdamm in Colorado überein (1), wo an einer 100 m langen und 5 m hohen geotextilverstärkten Erdstützkonstruktion von der Colorado Division of Highways Belastungsversuche durchgeführt worden sind. Auch dort konnten an der mit unterschiedlichen Vliestypen ausgeführten Stützkonstruktion trotz einer 6 m hohen Überschüttung (= 100 KN/m<sup>2</sup>) keinerlei Instabilitäten und nach einem Beobachtungszeitraum von 3 Jahren noch keine Hinweise auf Kriechverformungen festgestellt werden. Eben die Tatsache, daß kein Kriechverformungen in derartigen Erdstützkonstruktionen auftreten, beweist, daß zur Erfassung des komplexen Wirkungsmechanismus Geotextil-Boden außer der Geotextilzugfestigkeit noch andere stabilitätserhöhende Mechanismen berücksichtigt werden müssen.

2. Erdstatische Berechnung

Um die Ergebnisse der Probelastung interpretieren zu können, wurde die Standsicherheit nach konventionellen Berechnungsmethoden untersucht.

Die Berechnung erfolgte nach dem Lamellenverfahren von Bishop für kreisförmige Gleitflächen. Die einzelnen Vlieslagen wurden als Horizontalkräfte in der Größe von einem Viertel der Zugfestigkeit in Rechnung gestellt. Als Sicherheitsfaktor für die Bodenkennwerte  $\phi$  und  $c$  wurde 1,0 gewählt, da eine Aussage über die Bruchlast getroffen werden mußte.

In der Berechnung werden für das Schüttmaterial die unter 1. angeführten Parameter ( $\phi = 21^\circ$ ,  $c = 20 \text{ KN/m}^2$ ,  $\gamma = 19,3 \text{ KN/m}^3$ ) eingesetzt, und für das Vlies  $Z = Z/4 = 16/4 = 4,0 \text{ KN/m}$ .

Porenwasserdruck wurde keiner in Rechnung gestellt. Bei einer Belastung von  $q = 130 \text{ KN/m}^2$  ergaben sich für die jeweiligen Gleitflächen folgende Sicherheiten (siehe Abb. 2.1.):

Gleitfläche	Sicherheit
1	0,83
2	0,76
3	0,67
4	0,83

Tabelle 2: Sicherheit der kritischen Gleitfläche

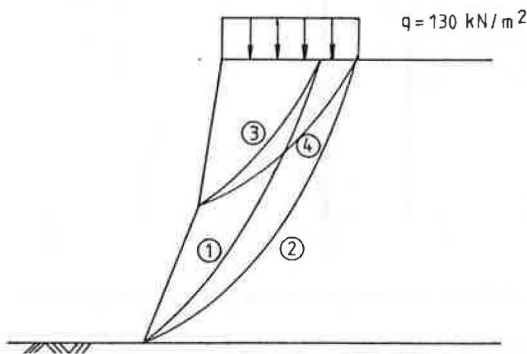


Abb. 2.1. Untersuchte Gleitkreise

Demnach ergibt sich für die maßgebende kritische Gleitfläche 3 eine Sicherheit von  $f_s = 0,67$ . Die rechnerische Bruchlast errechnet sich für  $f_s = 1,0$  zu  $q_{BR} = 75 \text{ kN/m}^2$ , was beim vorliegenden Belastungsversuch eine Überschreitung der Bruchlast um 70 % bedeutet. Daß dabei kein Böschungsbruch eingetreten ist, zeigt, daß herkömmliche Berechnungsverfahren ungeeignet sind, das Stabilitätsverhalten von geotextilverstärkten Erdstützkonstruktionen richtig zu erfassen. In den folgenden Kapiteln werden zwei grundsätzliche Lösungsansätze zur Diskussion gestellt.

3. Bruch der Einzellagen

In den konventionellen Berechnungsmethoden wird vorausgesetzt, daß der gesamte Damm als Einheit versagt, der Gleitkeil rutscht also als Ganzes ab. Betrachtet man nun die einzelnen Lagen getrennt und setzt man voraus, daß sich in jeder einzelnen Lage eine gekrümmte Gleitfläche ausbildet, so kann mit Hilfe konventioneller Berechnungsmethoden für die aus Einzelbruchflächen bestehende Gleitlinie ein weitaus höherer Sicherheitsfaktor errechnet werden als für die kontinuierliche Gesamtbruchfläche.



Abb. 3.1. a) Bruch des gesamten Damms (links)  
b) Bruch der einzelnen Lagen (rechts)

Der Bruch beginnt bei der untersten Lage und schreitet dann sukzessive nach oben fort. Abb. 3.2. zeigt diese unterste Lage mit ihrer Bruchfläche.

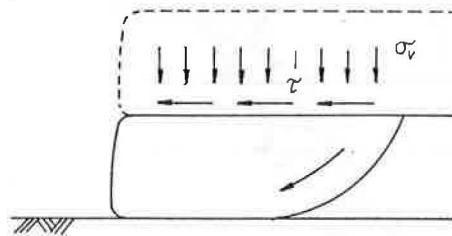


Abb. 3.2. Bruch einer Einzellage

Für den ungünstigsten Gleitkreis aus Abschnitt 2) (Gleitkreis Nr. 3) wurde unter Annahme einer möglichen Bruchfigur gemäß Abb. 3.1. die Standsicherheitsberechnung durchgeführt. Dabei stieg der Sicherheitsfaktor von 0,67 auf 1,00, da auf Grund der im Durchschnitt flacheren Gleitflächen die rückhaltenden Kräfte aus der Reibung stark erhöht werden.

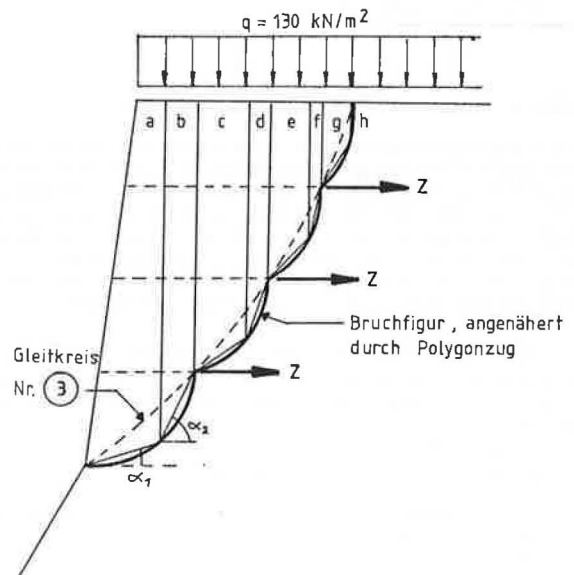


Abb. 3.3. Stabilitätsberechnung für Einzelbruchflächen mit Lamelleneinteilung

4. Überlegungen zur Gewölbebildung im Bereich der Gleitfläche

a) Möglicher Wirkungsmechanismus

Bei Belastung des Dammes kommt es in irgendeiner Gleitfläche zur Überschreitung der zulässigen Schubspannungen, d. h. ein Bruch tritt ein. Durch die dabei auftretenden Verformungen wird einerseits eine Zugkraft in den Geotextilien induziert, gleichzeitig führt die auftretende Gewölbebildung zwischen den Lagen zu einer Horizontalspannung  $\sigma_h$  im Boden, die, wie im Abschnitt 4 b) anschließend erläutert wird, den Bruchvorgang stoppt. Der Kräfteverlauf ist in Abb. 4. 1. dargestellt.

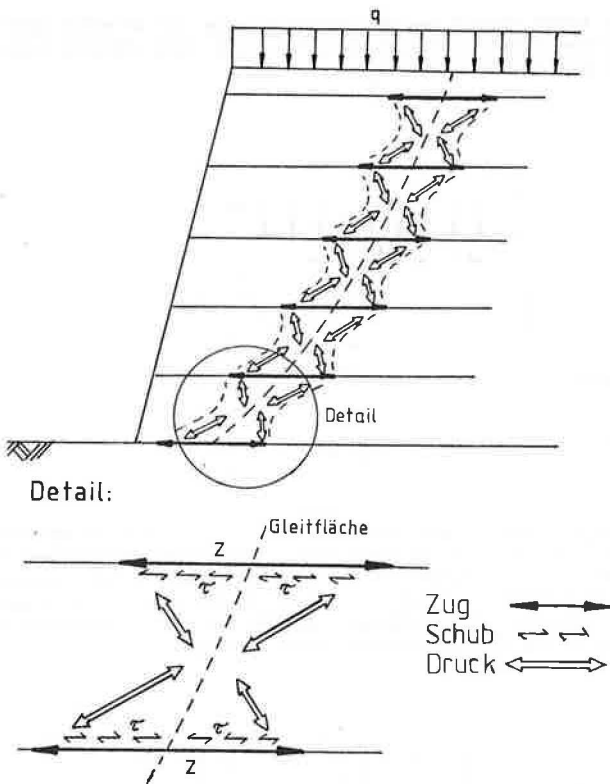


Abb. 4.1. Kräfteverlauf im Bereich der Gleitfläche

Da bei Polsterdämmen keinerlei Kriechverformungen beobachtet werden konnten, ist zwangsläufig anzunehmen, daß sich die Zugkraft im Geotextil mit der Zeit abbaut und die Belastung von den Gewölben alleine getragen wird. Dies kann nur so erklärt werden, daß sich der Boden infolge der hohen "Auflagerkräfte" der Gewölbe sehr stark verdichtet und dadurch eine äußerst hohe Scherfestigkeit erreicht. In der Praxis konnte diese starke Verdichtung wiederholt beobachtet werden.

b) Der Spannungszustand im Bereich der Gleitfläche

Betrachtet man ein Volumenelement des Bodens im Bruchzustand im Bereich der Gleitfuge, so zeigt sich ohne Geotextilien folgender Spannungszustand

$$\begin{aligned} \sigma_v &= q + \gamma \cdot h & \dots & \text{Vertikalspannung (1)} \\ \sigma_h &= 0 & \dots & \text{Horizontalspannung (2)} \end{aligned}$$

Die Horizontalspannung ist deshalb 0, da sich der Bruchkörper nach außen hin bewegen kann. Dieser Spannungszustand läßt sich im Mohr'schen Spannungskreis entsprechend Abb. 4.2. darstellen.

Stellt man nun Geotextilien in Rechnung, die in horizontalen Lagen im Abstand t eingebaut sind, so wird infolge der Zugkraft

Z durch Gewölbebildung zwischen den Lagen eine Horizontalspannung  $\sigma_h = Z/t$  im Boden induziert. Durch diesen zweidimensionalen Spannungszustand wird in der Gleitfuge die vorhandene Schubspannung  $\tau_{G,vorh}$  verringert und die zulässige Schubspannung  $\tau_{G,zul} = c + \sigma_n \cdot \tan \varphi$  erhöht. Es ergibt sich dadurch eine wesentlich höhere Sicherheit zu

$$f_s = \frac{\tau_{G,zul}}{\tau_{G,vorh}} = \frac{\tau_0 + \Delta \tau_1}{\tau_0 - \Delta \tau_2}$$

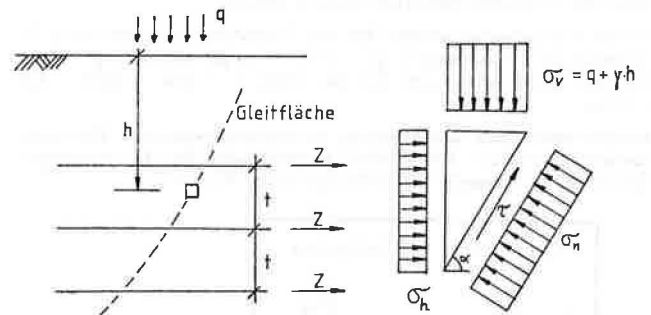


Abb. 4.2. Spannungszustand in der Gleitfuge

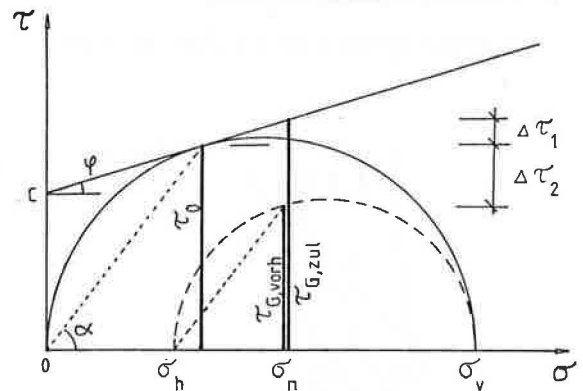
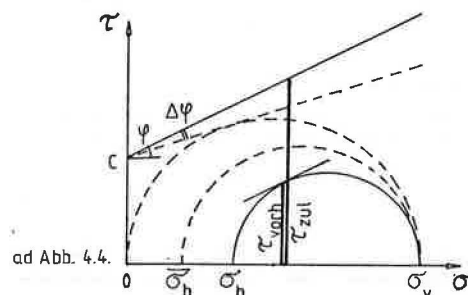


Abb. 4.3. Mohr'scher Spannungskreis mit und ohne Geotextilien

Ein weiterer stabilitätserhöhender Effekt könnte sich aus dem Verdichtungsvorgang der einzelnen Lagen ergeben: Fährt man mit dem Verdichtungsgerät über die Schüttlage, so sind die Bodenkörner bestrebt, seitlich auszuweichen. Durch die Reibung an der rauhen Oberfläche des Vlieses werden sie daran gehindert, ein höherer Verdichtungsgrad - und damit ein höherer Reibungswinkel - wird damit in der unmittelbaren Umgebung des Vlieses erreicht. Zieht man noch in Betracht, daß die Horizontalspannung  $\sigma_h = Z/t$  nicht gleichmäßig verteilt, sondern in der Umgebung der Geotextillagen konzentriert ist, so ergibt sich ein äußerst hochfester Verbundbereich aus Vlies und Boden, der in der Lage ist, hohe Schubspannungen aufzunehmen (siehe Abb. 4.4.).



ad Abb. 4.4.

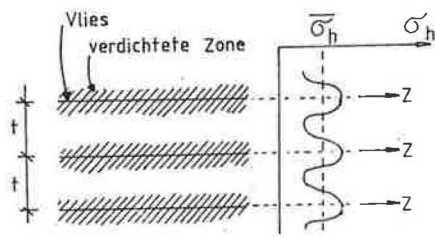


Abb. 4.4. Spannungszustand im Bereich der hochverdichteten Verbundzone

c) Lasteintragung der Geotextilzugkraft in den Boden

Betrachtet man nun den Kräfteverlauf im Bereich der Gleitfläche, so stellt sich die Frage, in welchem Bereich die Zugkraft des Geotextils auf den Boden übertragen wird. Dazu folgende Überlegung (Abb. 4.5.).

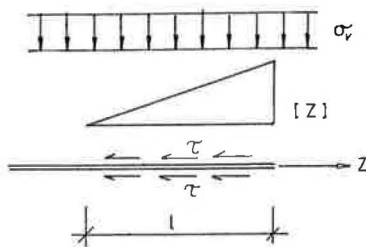


Abb. 4.5. Lasteintragung der Geotextil-Zugkraft in den Boden

$$Z = 2 \cdot \tau \cdot l \quad (3)$$

$$\tau = \sigma_v \cdot \tan \varphi_{G-B} \quad (4)$$

wobei  $\varphi_{G-B}$  = Reibungswinkel Geotextil-Boden ( $\varphi_{G-B}$  kann für das mechan. verfestigte Vlies gleich  $\varphi_{Boden}$  gesetzt werden)

Die Krafteintragungslänge  $l$  ergibt sich somit zu

$$l = \frac{Z}{2 \cdot \sigma_v \cdot \tan \varphi_{G-B}} \quad (5)$$

Für den konkreten Fall des Versuchsdammes mit  $Z = 4 \text{ KN/m}$ ,  $\sigma_v = 130 \text{ KN/m}^2$  und  $\varphi_{G-B} = 21^\circ$  wird

$$l = \frac{4}{2 \cdot 130 \cdot \tan 21^\circ} = 0,04 \text{ m} = 4 \text{ cm}$$

D. h., daß das Geotextil nur in einem sehr kleinen Bereich in Spannung gerät und demzufolge auch die effektive Einspannlänge im cm-Bereich liegen muß. Da auch die Horizontalverformungen der Polsterdammsschichten im Bruchzustand im cm-Bereich liegen, würde dies unabhängig von der Gewölbebildung bedeuten, daß die max. Geotextilzugfestigkeit in Stabilitätsberechnungen eingesetzt werden kann. Die auftretenden Verschiebungen genügen also, um bei entsprechend kurzer Einspannlänge die volle Geotextilzugfestigkeit zu aktivieren.

Zusammenfassung

Geotextilverstärkte Erdstützkonstruktionen zeigen ein Stabilitätsverhalten, das mit herkömmlichen Berechnungsmethoden der Bodenmechanik nicht erfaßbar ist. Einer der Hauptgründe dafür ist das mangelhafte Wissen um die Materialeigenschaften des Verbundmaterials Geotextil-Boden. Semi-empirische Annäherungen scheinen wie schon so oft vorher in der Bodenmechanik notwendig zu sein, um die komplexen Wirkungsmechanismen erfassen zu können.

Die Belastungsversuche haben bisher folgende zwei wesentliche Ergebnisse gebracht:

- die vorhandene Bruchlast liegt weit über der rechnerischen Bruchlast; im konkreten Fall konnte trotz einer rechnerischen Sicherheit von  $f_s = 0,67$  für die kritische Gleitfläche kein Böschungsbruch herbeigeführt werden
- es gibt keine Hinweise auf Kriechvorgänge im Geotextil

Die zwei zur Diskussion gestellten Lösungsansätze zeigen, daß

- a) bei Unterteilung der kritischen Gleitfläche in Einzelbruchflächen der Reibungsanteil in der Summe der rückhaltenden Kräfte derart erhöht wird, daß im konkreten Fall der Sicherheitsfaktor von  $f_s = 0,67$  auf  $f_s = 1,0$  ansteigt.
- b) die Gewölbebildung zwischen den Geotextillagen eine Horizontalspannung  $\sigma_h$  im Boden induziert und dadurch die Scherfestigkeit des Bodens im Bereich der Gleitfläche erhöht wird. Durch die hohen Auflagekräfte der Gewölbe wird der Boden im Bereich der Gleitfläche so stark verdichtet, daß durch die erhöhte Scherfestigkeit die Belastung von den Gewölben alleine getragen werden kann.
- c) die Krafteintragungslänge und die effektive Einspannlänge des Verbundsystems Geotextil-Boden im cm-Bereich liegen, wodurch bereits bei kleinsten Verschiebungen die volle Geotextilzugfestigkeit aktiviert wird. Die Krafteintragungslänge für den konkreten Fall beträgt auf beiden Seiten der Gleitlinie je 4 cm.

Literaturhinweis:

(1) Barret R. K., Geotextiles in Earth Reinforcement  
Geotechnical Fabrics Report,  
March/April 1985