

Fachthemen

Oliver Detert  
Hartmut Hangen

DOI: 10.1002/bate.200810063

## Mono- und biaxiale Spannungszustände in geokunststoffbewehrten Erdbauwerken und ihre Bemessungsrelevanz

In früheren Veröffentlichungen wurde berichtet, dass sich bestimmte Geokunststoffe infolge eines biaxialen Spannungszustands, sowohl kurz- als auch langfristig, deutlich dehnsteifer verhalten als bei einem rein monoaxialen Spannungszustand. Im Hinblick auf die Fragestellung, welche Konsequenzen sich aus der Übertragung eines solchen Materialverhaltens für die Bemessung von geokunststoffbewehrten Erdkörpern ergeben können, werden im Rahmen des vorliegenden Beitrags typische geokunststoffbewehrte Konstruktionen hinsichtlich ihrer Spannungszustände analysiert. Hierzu werden sowohl generelle Überlegungen als auch Ergebnisse aus umfangreichen numerischen Studien, Labor- und Feldversuchen dargestellt und diskutiert. Die durchgeführten Untersuchungen führen zu der Erkenntnis, dass rein biaxiale Spannungszustände, wie sie im Labor untersucht wurden, in geokunststoffbewehrten Erdbauwerken selbst unter idealen Randbedingungen nur sehr lokal begrenzt auftreten. Sie besitzen somit keine Relevanz für die Bemessung von geokunststoffbewehrten Erdbauwerken.

**Uni- and bi-axial loading conditions in geosynthetic reinforced soil structures and their design relevance.** *Recent publications have focussed on the improved performance of certain geosynthetics under short- and long-term biaxial loading conditions. It was reported that the geosynthetic reinforcements act as a result of biaxial loading clearly stiffer as under uni-axial loading. In the course of this publication the relevance of such material performance in the design of typical geosynthetic reinforced soil structures will be evaluated. Therefore the loading conditions of the reinforcements will be analysed. The evaluation will not only be based on the principles of geotechnical engineering but also on extensive numerical analyses as well as laboratory- and field-tests.*

*The analyses showed, that real biaxial loading conditions, as adapted for the laboratory tests, are to be observed only very limited and locally even assuming ideal boundary conditions. Therefore bi-axial loading conditions do not have any design relevance.*

### 1 Einleitung

Der Einsatz von Geokunststoffen als Bewehrungselement in Böden gehört mittlerweile zu den anerkannten und etablierten Bauverfahren. Über Reibung und/oder Verzahnung werden Kräfte in die Geokunststoffe eingeleitet. In Abhängigkeit vom konkreten Bauwerk und dessen Belastung wird dies unterschiedlich ausgeprägte mono- oder biaxiale Spannungszustände im Geokunststoff hervorrufen.

Der derzeitige Kenntnisstand zum Einfluss des Spannungszustands auf das reine Materialverhalten von Geokunststoffbewehrungen wurde z. B. in [1], [2] publiziert. Dort wird berichtet, dass in Abhängigkeit vom Herstellungsverfahren der Bewehrungsprodukte unter einer biaxialen Beanspruchung ein verändertes Materialverhalten zu beobachten sei. Rückschlüsse aus diesen Ergebnissen wurden dann exemplarisch auf die Bestimmung der Bauteilwiderstände der Bewehrung, also z. B. die Ermittlung der Bemessungsfestigkeit, übertragen [2].

Im Hinblick auf die Möglichkeiten einer generellen Übertragbarkeit dieser Vorgehensweise, aber auch als Beitrag zum besseren Verständnis der komplexen Spannungszustände geokunststoffbewehrter Erdkörper wurden diese genauer analysiert.

### 2 Spannungszustände der Geokunststoffbewehrungen in Abhängigkeit vom Anwendungsgebiet

Die Beanspruchung von Geokunststoffbewehrungen hängt stark von der Anwendung bzw. der konkreten Bewehrungsaufgabe ab. Im Folgenden sollen verschiedene typische Bewehrungsaufgaben [3], [4], [5] näher betrachtet werden um festzustellen, ob Aussagen zu den Spannungszuständen und im Besonderen zu dem Belastungsverhältnis der beiden senkrecht zueinander stehenden Bewehrungsrichtungen der Produkte gemacht werden können.

#### 2.1 Antigleitbewehrung bzw. Bewehrung böschungspareller Gleitflächen

Bei der Überdeckung von Dichtungselementen in Böschungsbereichen, z. B. im Deponiebau, werden Geokunststoffbewehrungen eingesetzt, um ein böschungsparalleles Abgleiten der Bodenüberdeckung zu verhindern (Bild 1).

Häufig wird in diesem Zusammenhang von Antigleitbewehrungen gesprochen. Über Reibung und Verzahnung „hängt“ sich die Überdeckung an der Bewehrung auf und wird so am Abrutschen gehindert.

Aufgrund der Gravitationskraft und der daraus resultierenden Bewegungsrichtung der Bodenüberdeckung erfährt die Bewehrung in diesem Anwendungsgebiet ausschließlich eine Beanspruchung in Richtung der Böschungsfällinie, jedoch keine Beanspruchung senkrecht zur Fällinie. Eine entsprechende Verlegung der Bewehrung vorausgesetzt, beträgt das Belastungsverhältnis bezo-

O. Detert/H. Hangen - Mono- und biaxiale Spannungszustände in geokunststoffbewehrten Erdbauwerken und ihre Bemessungsrelevanz

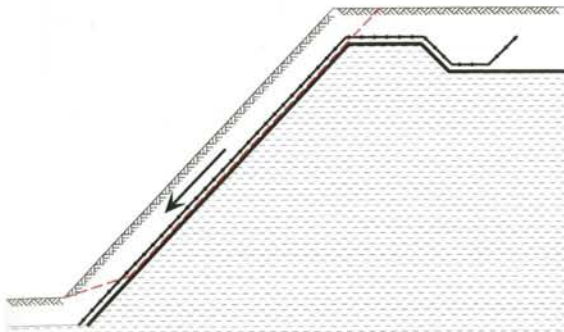


Bild 1. Antischiebungsbewehrung, mögliche Gleitlinie in rot  
Fig. 1. Anti sliding reinforcement, potential failure line is marked red

gen auf die beiden Bewehrungsrichtungen des Geokunststoffs demnach 1 : 0. Es handelt sich um einen rein monoaxialen Spannungszustand.

## 2.2 Bewehrung von Böschungen und Stützkonstruktionen

Zu den bekanntesten Anwendungen von Geokunststoffbewehrungen zählt die Herstellung übersteiler Böschungen und Stützkonstruktionen. Unter Verwendung von Geokunststoffen lassen sich Böschungsneigungen realisieren, die die innere Scherfestigkeit des Bodens deutlich übersteigen würden. Mögliche Böschungsbrüche werden durch eingelegte Bewehrungsbahnen verhindert (Bild 2). Die in der Böschung auftretenden Zug- und/oder Scherspannungen werden von der Bewehrung im sog. aktiven Böschungsbereich aufgenommen und in den hinteren passiven Böschungsbereich abgeleitet. Die Hauptzugrichtung der Bewehrung steht senkrecht zur Längsachse der Böschung. In Längsrichtung der Böschung stützt sich der Boden selbst, da es sich bei derartigen Konstruktionen in der Regel um langgestreckte Linienbauwerke handelt, also ein ausgeprägter ebener Spannungszustand herrscht. Dies führt zu einer ähnlichen Beanspruchung bzw. einem vergleichbaren Belastungsverhältnis der Geokunststoffbewehrung wie unter Abschn. 2.1 beschrieben.

Der Gedanke, dass infolge einer räumlich begrenzten Verkehrslast dennoch biaxiale Spannungszustände auftreten, ist naheliegend. Abgesehen davon, dass es sich jedoch

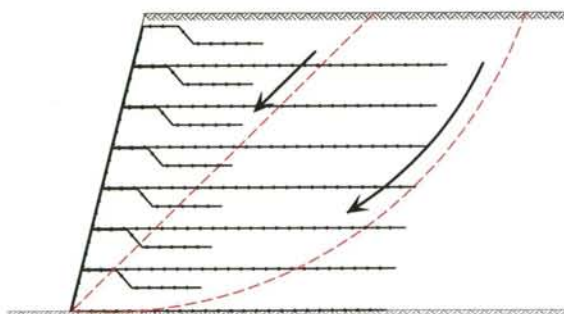


Bild 2. Bewehrte Böschung, mögliche Böschungsbrüche in rot  
Fig. 2. Reinforced soil retaining structure, potential failure lines are marked red

bei Verkehrslasten um räumlich und zeitlich begrenzte Lasten handelt, ein biaxialer Spannungszustand somit nur vorübergehend herrschen würde, sind Verkehrslasten im Verhältnis zu den ständigen Einwirkungen bei dieser Bauweise auch in ihrer absoluten Größe eher von untergeordneter Bedeutung. Darüber hinaus ist eine direkte Erfassung des Belastungsverhältnisses für alle Bereiche einer Stützkonstruktion insbesondere unter Berücksichtigung der Tiefenwirkung einer Verkehrslast äußerst schwierig.

## 2.3 Basisbewehrung bei Dammgründungen auf weichem Untergrund

Beim Bau von Dämmen auf gering tragfähigem Untergrund können verschiedene Probleme auftreten: Entweder ist die Tragfähigkeit so gering, dass es bereits bei niedriger Bauhöhe zum Grundbruch kommt, oder eine ausreichende Tragfähigkeit stellt sich erst nach einer gewissen Konsolidierungszeit ein. Durch die Verwendung einer Geokunststoffbewehrung in der Basis kann die Tragfähigkeit deutlich vergrößert und die Schüttgeschwindigkeit des Damms erhöht werden. Die Notwendigkeit und Dauer von Konsolidierungspausen kann somit deutlich reduziert werden oder ganz entfallen. Die Aufgabe der Bewehrungsprodukte besteht bei dieser Anwendung primär darin, einen Grund- bzw. Geländebruch zu verhindern (Bild 3). Wie auch in den Abschnitten 2.1 und 2.2 beschrieben, wird eine Bewegung senkrecht zur Längsachse des Bauwerks verhindert. In Längsrichtung des Damms stützt sich der Boden wiederum selbst.

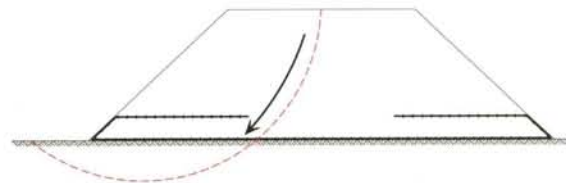


Bild 3. Basisbewehrung unter einem Damm, möglicher Geländebruch in rot  
Fig. 3. Basic reinforcement of an embankment, potential failure line marked red

Die Bewehrung erfährt somit auch bei diesem Anwendungsgebiet eine deutlich monoaxiale Beanspruchung. Infolge von lokal begrenzten Setzungen und Sackungen kann es zu biaxialen Spannungszuständen kommen, jedoch ist eine genaue Prognose der Position und der Ausmaße dieser Setzungen bzw. Sackungen sowie des daraus resultierenden Belastungsverhältnisses kaum realisierbar.

Aufgrund der beschriebenen Beanspruchungen werden in den oben genannten Anwendungsgebieten in der Praxis hauptsächlich anisotrope (monoaxiale) Bewehrungsprodukte mit ausgeprägter Lastabtragungsrichtung eingesetzt.

## 2.4 Tragschichtbewehrung, Bewehrung über vertikalen Traggliedern, Erdfallüberbrückung

Neben den genannten Anwendungsgebieten hat sich der Einsatz von Geokunststoffen auch in weiteren geotechni-

O. Detert/H. Hangen · Mono- und biaxiale Spannungszustände in geokunststoffbewehrten Erdbauwerken und ihre Bemessungsrelevanz

schen Aufgabenbereichen etabliert. Dazu zählen die Anwendungsgebiete Tragschichtbewehrung, Basisbewehrung bei Dammgründungen auf vertikalen Traggliedern sowie die Erdfallsicherung. Eine anschauliche Herleitung und Beschreibung der auftretenden Belastungszustände ist hier nicht ohne weiteres möglich. Für die Untersuchung dieser Anwendungsbereiche wurden daher numerische Simulationen durchgeführt.

**2.5 Untersuchung der Beanspruchung bzw. der Belastungsverhältnisse komplexer Anwendungsgebiete mittels numerischer Simulationen**

Eine eingehende Untersuchung komplexer geotechnischer Belastungssituationen erfolgt derzeit in der Regel mit Hilfe numerischer Simulationen. Für eine nähere Betrachtung der vorliegenden räumlichen Problematik wurden aus diesem Grunde dreidimensionale Studien mit numerischen Methoden durchgeführt. Um eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten und eine redundante Beurteilungsbasis zu schaffen, wurde dieselbe Aufgabenstellung mit unterschiedlichen Programmsystemen bearbeitet. Verwendet wurden hierbei die Programmsysteme ABAQUS [6], FLAC 3D [8], eine erweiterte Version von PLAXIS 3D TUNNEL [7] sowie das Programm FB3 [9].

**Simulation einer Erdfallsicherung**

In den ersten Studien mit ABAQUS [10], FLAC 3D [11] und PLAXIS 3D TUNNEL [12] wurde eine Erdfallsicherung simuliert.

Untersucht wurde ein kreisrunder Erdfall mit einem Durchmesser von  $D = 2,0$  m in einem Modell mit den Abmessungen  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ . Die Modellgrenzen wurden so gewählt, dass sich Einflüsse von den Rändern nicht auf die Ergebnisse im Erdfallbereich auswirken. Der Untergrund wurde als steifes, kohäsives Material modelliert, so dass sich ein stabiler zylinderförmiger Erdfall einstellen konnte. Eine Membran mit gitterartigem, orthotropem Tragverhalten simuliert die Bewehrung über dem Erdfall. Der Membran wurde in zwei orthogonal zueinander stehenden Richtungen gleiche Dehnsteifigkeiten zugeordnet, im Folgenden Richtungen 1 und 2 genannt. Die Belastung aus Überdeckungsboden und Auflast wurde als gleichmäßig verteilte schlaffe Last oder als Kombination aus Bodenmaterial mit dem Stoffgesetz nach *Mohr-Coloumb* und der gleichmäßig verteilten schlaffen Last simuliert. Um mögliche Einflüsse der Schubmodule, Geogitterdehnsteifigkeiten, Modellierung der Belastung sowie der Kontaktzone zwischen Bewehrung und Boden bzw. Auflast festzustellen, wurden ausführliche Parameterstudien durchgeführt.

Erwartungsgemäß war ein Einfluss auf die Absolutgrößen festzustellen, jedoch bleibt die Kernaussage dieser Untersuchungen bzgl. des Belastungsverhältnisses davon unbeeinträchtigt. Für die Auswertung der Berechnungsergebnisse wurde das Verhältnis der Belastung in den Richtungen 1 und 2 entlang der Achse in Richtung 1 vom Erdfallmittelpunkt bis zum Erdfallrand gebildet (Bilder 4 und 5).

In Bild 5 ist deutlich zu erkennen, dass im Erdfallmittelpunkt ein Belastungsverhältnis von  $1 : 1$ , also „rein biaxial“ vorliegt. Bereits bei einer geringen Entfernung vom

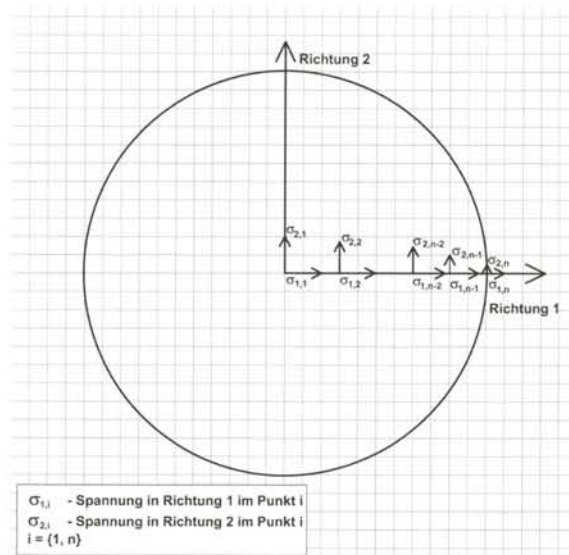


Bild 4. Schema zur Auswertung der Belastungszustände  
Fig. 4. Definition of coordinate system and forces for presentation of calculation results

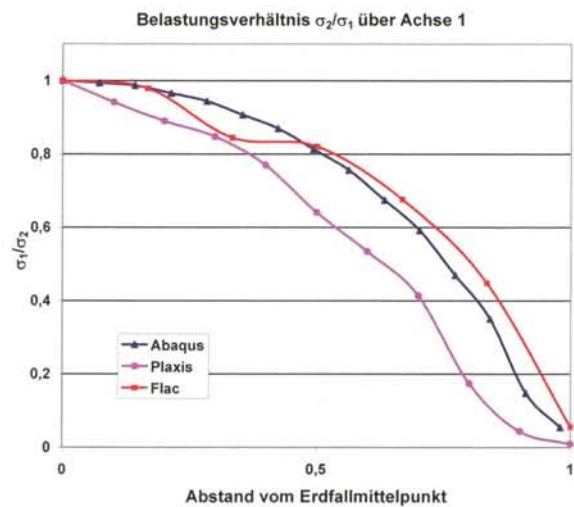


Bild 5. Belastungsverhältnisse ausgehend vom Erdfallmittelpunkt zum Rand  
Fig. 5. Stress-ratio in function of the distance from the centre-point of the void

Erdfallmittelpunkt zeigt sich jedoch eine kontinuierliche Abnahme des Belastungsverhältnisses, so dass am Erdfallrand bereits ein Belastungsverhältnis von nahezu  $1 : 0$ , also „rein monoaxial“ vorliegt.

In [13] werden Ergebnisse einer numerischen Erdfallsimulation vorgestellt, bei der anisotrope Bewehrungsprodukte simuliert wurden. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass sich die maximalen Belastungsgrade der Bewehrung in Längs- (41 %) und Querrichtung (52 %) trotz geometrischer Symmetrie deutlich unterscheiden. Dies bedeutet, dass bei Verwendung von anisotropen Bewehrungs-

O. Detert/H. Hangen · Mono- und biaxiale Spannungszustände in geokunststoffbewehrten Erdbauwerken und ihre Bemessungsrelevanz

produkten nicht einmal im Erdfallmittelpunkt ein 1 : 1-Belastungsverhältnis der Bewehrung vorliegt.

**Simulation einer Tragschichtbewehrung**

Mit dem Programmsystem FB3 [14] wurden in einer weiteren numerischen Studie die Spannungszustände in einer Tragschichtbewehrung unter einer starren, runden Platte untersucht. In dem gewählten Modell sollte in diesem Fall über einer verhältnismäßig weichen Bodenschicht eine Geogitterbewehrung und eine 30 cm dicke Tragschicht abgebildet werden. Als Belastung wurde eine Lastplatte mit einem Durchmesser von  $d = 30$  cm und einer Belastung von  $p = 500$  kN/m<sup>2</sup> modelliert. Die Abbildung des Geogitters erfolgte in Form von Stabelementen, wobei die Dehnsteifigkeit der Bewehrung in beiden zueinander senkrechten Koordinatenrichtungen gleich groß war.

Mit dem Ziel, Aussagen zum Verlauf des Belastungsverhältnisses zu bekommen, wurden die Berechnungsergebnisse wieder als Verhältniswert über einer Koordinatenachse dargestellt (Bild 6). Ausgehend von einem Verhältnis 1 : 1 ist auch in diesem Modell eine schnelle Abnahme des Verhältniswertes der Spannungen zu erkennen.

**Simulation bewehrter Gründungspolster über vertikalen Traggliedern**

Auf die numerische Simulation von Basisbewehrungen bei Dammgründungen über vertikalen Traggliedern wurde nach Auswertung der vorliegenden Ergebnisse aus der Simulation der Erdfallüberbrückung und der Tragschichtbewehrung zunächst verzichtet. Ergebnisse von neueren Arbeiten zu diesem Gründungssystem zeigen aber, dass ein konstantes Belastungsverhältnis allein aufgrund der sich einstellenden Spannungskonzentration über den Pfählen (Gewölbewirkung) nicht zu erwarten ist und Bereiche mit ideal biaxialen Verhältnissen nur sehr begrenzt sein dürfen.

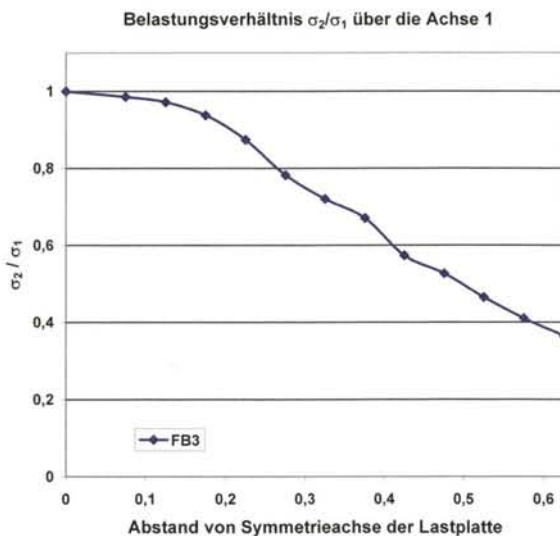


Bild 6. Belastungsverhältnis ausgehend von der Symmetrieachse einer Lastplatte  $d = 30$  cm  
Fig. 6. Stress-ratio in function of the distance from the axis of the loading plate

**2.6 Zusammenfassung der Ergebnisse**

Die Analyse verschiedener Anwendungsgebiete hat ergeben, dass entweder ausgeprägte monoaxiale Spannungszustände herrschen oder biaxiale Spannungszustände mit einem nicht konstantem Belastungsverhältnis.

Im Hinblick auf die Bedeutung für die Bemessung von geokunststoffbewehrten Erdkörpern werden diese Erkenntnisse im Folgenden in Verbindung mit den Ergebnissen aus biaxialen Zug- und Kriechversuchen weiter betrachtet. Zum besseren Verständnis dieser Ausführungen erfolgt zunächst eine Zusammenfassung des derzeitigen Kenntnisstandes über biaxiale Zug- und Kriechversuche an Geogittern.

**3 Biaxiale Zug- und Kriechversuche und die Bedeutung des Belastungsverhältnisses**

In [1], [2] werden Ergebnisse von mono- und biaxialen Zug- und Kriechversuchen an Geogittern mit gleichen Festigkeitseigenschaften längs und quer präsentiert und miteinander verglichen.

Bild 7 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen in Form eines Zugkraft-Dehnungsdiagramms. Aufgetragen sind die Belastungsgrade eines Geogitters über der Dehnung, jeweils für einen monoaxialen Kurzzeitzugversuch sowie die Isochronen für 120 Jahre, als Ergebnis monoaxialer (Belastungsverhältnis 1 : 0) und rein biaxialer Kriechversuche (Belastungsverhältnis 1 : 1). Die Aussage des Diagramms ist, dass sich das untersuchte Geogitter unter einer biaxialen Belastung im Verhältnis 1 : 1 dehnsteifer verhält als unter einer monoaxialen Belastung, also einem Verhältnis von 1 : 0. Darüber hinaus kann eine höhere Langzeitstandfestigkeit abgeleitet werden. Um die praktische Bedeutung dieser Ergebnisse für die Ermittlung von Bauteilwiderständen, z. B. der Bemessungsfestigkeit einer Geokunststoffbewehrung, erkennen zu können, wurden die Isochronenkurven in [2] vereinfachend für die Ermittlung des Abminderungsfaktors  $A_1$  (Zeitstandbruch) herangezogen. Für eine Belastungsdauer von 120 Jahren ergeben sich die in Tabelle 1 angegebenen Faktoren.

Für eine Bemessung würde dies bedeuten, dass bei einem biaxialen Belastungsverhältnis von 1 : 1 und einer Belastungsdauer von 120 Jahren eine um 15 % höhere Bemessungsfestigkeit angesetzt werden könnte als für einen monoaxialen 1 : 0 Belastungszustand. Die Berücksichti-

Tabelle 1. Vereinfachte Bestimmung von Abminderungsfaktoren für Kriechbruch gemäß [2]  
Table 1. Simplified derivation of reduction factors for creep rupture as per [2]

Belastungsverhältnis Längs/Quer [-]	zulässiger Belastungsgrad (aus Bild 7) [%]	Abminderungsfaktor für Kriechbruch $A_1$ (120 Jahre) [-]
1 : 1	75,0	1,33
1 : 0	65,0	1,53
Verhältnis $A_{1,bias,1:0}/A_{1,bias,1:1}$	1,53/1,33	1,15

O. Detert/H. Hangen · Mono- und biaxiale Spannungszustände in geokunststoffbewehrten Erdbauwerken und ihre Bemessungsrelevanz

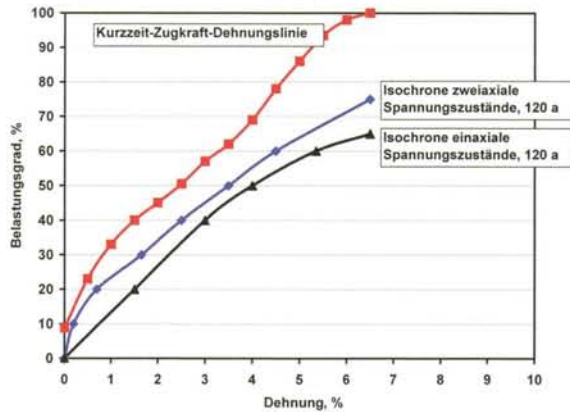


Bild 7. Kurzzeit-Zugkraft-Dehnungslinie und Isochronen aus mono- und biaxialen Kriechversuchen nach [2]  
Fig. 7. Results of constant strain rate (CRS) testing and isochronous stress-strain curves for uni-axial and bi-axial loading conditions as per [2]

gung „biaxialer“ Materialkennwerte wäre damit durchaus wirtschaftlich.

Die in Abschn. 2 aufgeführten Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, dass bei vielen Anwendungen ein nahezu rein monoaxialer 1 : 0 Belastungszustand vorliegt und nur sehr lokal konzentriert überhaupt ein 1 : 1 biaxialer Belastungszustand anzutreffen ist. Soll eine vom Spannungszustand abhängige Ermittlung des Bauteilwiderstands/Materialverhaltens bei der Bemessung für solche Fälle erwogen werden, muss die Frage geklärt werden, wie sich das Materialverhalten bei einem vom rein monoaxialen oder rein biaxialen Belastungsverhältnis abweichenden Verhältnis, z. B. 1 : 0,5, verändert. Sinnvoll wäre z. B. anzunehmen, dass die Isochrone für dieses Verhältnis zwischen den beiden in Bild 7 dargestellten Grenz-Isochronen verläuft und analog der Abminderungsfaktor für Kriechen, also:

$$A_{1\text{monoax},1:0} \leq A_{1\text{biax},1:0,5} \leq A_{1\text{biax},1:1}$$

Um genauere Aussagen über den Einfluss des Belastungsverhältnisses auf das Kriechverhalten und die Langzeitstandfestigkeit treffen zu können, sind weitere Untersuchungen erforderlich. Als weiterer entscheidender Einflussparameter könnte auch das Steifigkeitsverhältnis (längs/quer) der Bewehrung selbst von Bedeutung sein.

Im Hinblick auf eine praktische Umsetzung von biaxialen Kennwerten bei der Bemessung besteht somit die Gefahr, dass beim Ansatz eines unter einer rein biaxialen Beanspruchung (Verhältnis 1 : 1) ermittelten  $A_1$ -Wertes die Bemessungsfestigkeit überschätzt wird. Es stellt sich ferner die Frage, welche Kennwerte gewählt werden müssen, wenn das Belastungsverhältnis nicht bekannt bzw. nicht ausreichend genau prognostizierbar ist oder sich im Verlaufe der Nutzungsdauer ändert.

Auf Basis des allgemein verwendeten Sicherheitsverständnisses ist hier nur die konservative Vorgehensweise zur Ermittlung der Kennwerte vertretbar, d. h. für ein Belastungsverhältnis von 1 : 0, damit der Gefahr einer unsicheren oder Fehleinschätzung vorgebeugt wird.

#### 4 Ausführungsaspekte, Labor- und Feldversuche

Neben den oben aufgeführten, rein theoretischen Überlegungen gibt es auch baupraktische Aspekte, die eine Berücksichtigung eines veränderten biaxialen Materialverhaltens für geotechnische Anwendungen in Frage stellen.

##### 4.1 Überlappungen und Verankerungen

Bei den oben vorgestellten numerischen Untersuchungen wurden optimale Randbedingungen für eine 1 : 1 Belastung z. B. im Erdfallereignis vorausgesetzt (u. a. gleichmäßig verteilte Last, kreisrunder Erdfall). Ferner wurde angenommen, dass die Bewehrung zumindest im Bereich der Lasteinleitung und Verankerung großflächig homogen ist und Überlappungen oder Systemränder keine Unstetigkeiten darstellen. Tatsächlich sind alle handelsüblichen Geokunststoffe sowohl produktionsbedingt als auch aus baupraktischen Überlegungen in ihren Abmessungen begrenzt. Die zur Zeit am Markt erhältlichen Bewehrungsprodukte haben maximale Breiten von ca. 5,0 m. Die Rollenlängen fallen je nach Produkttypen unterschiedlich aus. Nur in Ausnahmefällen reicht die Breite einer einzigen Bahn aus, um die geotechnische Problemstellung zu lösen, meist müssen mehrere Bahnen nebeneinander verlegt werden. Bei diesen üblicherweise rein konstruktiven, also planmäßig nicht kraftübertragenden Überlappungen wird eine seitliche Überlappungslänge von 50 cm empfohlen, z. B. in [3]. Dies soll u. a. sicherstellen, dass die Bewehrung auch nach der Bodenüberdeckung tatsächlich vollflächig verlegt wurde. Bei einer Erdfallsicherung soll die Überlappung zudem verhindern, dass sich bei der Ausbildung der Tragmembran eine Öffnung zwischen den einzelnen Lagen ergibt und somit Boden entweichen könnte.

Bei einer projektbezogenen Untersuchung wurde dies im Bersttopf näher betrachtet. Neben der Erkenntnis, dass es zu keiner Öffnung zwischen den Bahnen kommt, zeigt Bild 8 deutlich, dass im Bereich der Überlappung die Dehnung/Verformung aufgrund der doppelten Materiallage und somit höheren Dehnsteifigkeit eindeutig geringer ist, als in den Nachbarbereichen. Allein aufgrund der unterschiedlichen Dehnsteifigkeiten werden sich in den Überlappungsbereichen Belastungsverhältnisse in den Bewehrungen einstellen, welche sich deutlich von einem biaxialen 1 : 1 Verhältnis unterscheiden.

Neben konstruktiven, seitlichen Überlappungen müssen aufgrund der geometrischen Randbedingungen teilweise auch kraftübertragende Überlappungen, primär in Produktionsrichtung der Bewehrung, ausgeführt werden.



Bild 8. Überlappungsbereich im Bersttopfversuch  
Fig. 8. Simulation of overlap using burst strength equipment

O. Detert/H. Hangen · Mono- und biaxiale Spannungszustände in geokunststoffbewehrten Erdbauwerken und ihre Bemessungsrelevanz

Insbesondere bei Anwendungen mit verhältnismäßig hohen erforderlichen Zugkräften (z. B. Erdfallsicherungen), kann die Kraftübertragung i. Allg. nicht mehr durch konstruktive Verbindungselemente wie Steckstäbe, Nähte o. ä. sichergestellt werden. Die Kraftübertragung kann hier nur durch einen von der Auflast, den Bodenparametern und den Verbundeigenschaften der Bewehrung abhängigen Reibungsverbund erreicht werden. In der Praxis können durchaus Übergreifungslängen von mehr als der drei- bis vierfachen Rollenbreite erreicht werden. Wie bereits am Beispiel des Berstversuchs zu erkennen war, sind aber gerade in diesen Bereichen äußerst komplexe Spannungs-/Verformungsverhältnisse zu erwarten. Die Annahme ideal biaxialer 1 : 1 Belastungs- bzw. Verformungszustände ist deshalb hier selbst bei völlig axialsymmetrischer Einwirkung unzutreffend.

#### 4.2 Geometrische Randbedingungen

In den vorgestellten numerischen Studien wurden ideale Geometrien (kreisrunder Erdfall und gleichmäßig, axial-symmetrisch verteilte Belastung) vorausgesetzt und dennoch kein durchgehendes 1 : 1-Belastungsverhältnis festgestellt. Derartige Randbedingungen sind in der Natur nur höchst selten zu erwarten. Erdfalltrichter können sich z. B. im Randbereich auflockern, in ovaler oder länglicher Form auftreten, und Belastungen können sehr ungleichmäßig über der Bewehrungsebene verteilt sein.

#### 4.3 Beschädigungen

Alle in [1], [2] beschriebenen Prüfungen zum mechanischen Verhalten von Geogittern unter biaxialer Belastung erfolgten ausschließlich an völlig unbeschädigtem Probenmaterial. Sowohl Baustellenerfahrungen als auch Laborversuche zeigen jedoch, dass Beschädigungen am Geogitter als Folge des Bodeneinbaus und der Bodenverdichtung niemals völlig ausgeschlossen werden können. Bei der gängigen Vorgehensweise zur Bestimmung der Bemessungsfestigkeit einer Bewehrung wird dies durch produkt- und bodenabhängige Abminderungsfaktoren berücksichtigt. Fraglich ist in diesem Zusammenhang, welchen Einfluss eine potentielle Beschädigung, z. B. die Lösung eines Kreuzungspunktes, auf die Ergebnisse biaxialer 1 : 1-Zugversuche haben könnte.

#### 5 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit der Analyse der auftretenden Spannungszustände in geokunststoffbewehrten Erdbauwerken und deren Bedeutung für die Bemessung und Berechnung.

Mit Hilfe verschiedener numerischer Studien und auf Grundlage genereller Überlegungen wurde ermittelt, dass ein rein biaxiales 1 : 1-Belastungsverhältnis nur bei einzelnen Anwendungen stark lokal konzentriert sowie z. T. zeitlich begrenzt auftritt. In den gängigen Anwendungsgebieten liegt überwiegend ein monoaxialer Spannungszustand vor.

Eine zuverlässige Beschreibung des Belastungsverhältnisses ist in allen Fällen schwierig und keinesfalls konstant. Der Übergang zwischen einzelnen Spannungszuständen ist kontinuierlich, so dass ein repräsentatives, bemessungsrelevantes Belastungsverhältnis nicht angegeben werden kann.

Dazu kommen wichtige bautechnische Aspekte, z. B. die Unmöglichkeit, eine durchgehende, homogene Bewehrung zu realisieren.

Soll das vom Spannungszustand abhängige Materialverhalten bei einer Bemessung berücksichtigt werden, muss deshalb äußerst vorsichtig geprüft werden, inwiefern ein potentieller Biaxialeffekt auf die geotechnische Anwendungen tatsächlich übertragen werden kann. Besonders riskant erscheint ein genereller Ansatz eines Biaxialeffekts auch deshalb, weil die in 1 : 1-Zugversuchen abgeleitete Belastbarkeit eine spürbare Verbesserung des Tragverhaltens bedeuten würde, eine Fehleinschätzung jedoch sicherheitsrelevante Folgen nach sich ziehen kann. Auch bleibt fraglich, ob die in jüngster Zeit vielfach zitierten Tragkraftreserven geokunststoffbewehrter Konstruktionen tatsächlich maßgeblich auf den z. B. in [2] zitierten Biaxialeffekt zurückzuführen und aktuelle Forschungsaktivitäten in dieser Richtung wirklich zielführend sind.

Motivation des vorliegenden Beitrages ist, die mitunter auch in Fachkreisen entstandene Unsicherheit in Bezug auf das biaxiale Tragverhalten von geokunststoffbewehrten Erdkörpern auszuräumen und praxisbezogene Transparenz zu schaffen.

#### Literatur

- [1] McGown, A., Kupec, J.: A new approach to the assessment of the behaviour of geogrids subject to biaxial loading. Proceedings of the Third European Geosynthetics Conference, EUROGEO 3, (2004), München, S. 643–648.
- [2] Heerten, G., Kupec, J., Vollmert, L.: Der Einfluss biaxialer Spannungszustände auf das Kriechverhalten von Geogittern, FS-KGEO 05, München, (2005), S. 131–135.
- [3] FGSV (2005): Merkblatt über die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaus, M. Geok. E 2005, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- [4] DGGT: Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen – EBGEO, Verlag Berlin: Verlag Ernst & Sohn 1997.
- [5] BS 8006: Code of practice for Strengthened/reinforced soils and other fills, British Standard (1995).
- [6] www.abaqus.com
- [7] www.plaxis.com
- [8] www.itascacg.com/flac/
- [9] www.wbionline.de
- [10] Arwanitaki, A.: Erdfallsimulation mit dem Systemprogramm Abaqus, 2006/2007, Ruhr-Universität Bochum, Korrespondenz und interner Bericht.
- [11] Aydogmus, T.: Technische Universität Bergakademie Freiberg: Erdfallsimulation mit dem Systemprogramm Flac 3D, 2007, Korrespondenz und interner Bericht.
- [12] von Wolfersdorff, P.-A.: Numerischen Untersuchungen zum Tragverhalten von biaxialen Geogittern mit der Finite-Elemente-Methode, Plaxis Tunnel 3D, Abschlussbericht 2007, Baugrund Dresden, (unveröffentlicht).
- [13] Lüke, J., Wittke, M., Delsemme, D.: Bemessung einer Geokunststoffbewehrung zur Überbrückung von Erdfällen mit Hilfe von dreidimensionalen, geometrisch nichtlinearen FE-Berechnungen, Geotechnik 1/2002, S. 37–42.
- [14] Wittke, W.: Geometrisch nichtlineare FE-Berechnungen zum Vergleich des Tragverhaltens zweiaxialer und mehraxialer Geokunststoffbewehrungen, Abschlussbericht 2007, WBI Aachen (unveröffentlicht).

#### Autoren dieses Beitrages:

Dipl.-Ing. Oliver Detert, Dipl.-Ing. Hartmut Hangen, HUESKER Synthetic GmbH, Fabrikstraße 13–15, 48712 Gescher, www.huesker.com