

Kurzfassung

Fortschreibung der Bemessung geokunststoffbewehrter Erdkörper – Anforderungen an Prüfungen für ein differenziertes Verbundmodell

Dipl.-Ing. Felix Jacobs, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler
RWTH Aachen, Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen
Dipl.-Ing. Lars Vollmert
BBG Bauberatung Geokunststoffe GmbH & Co. KG, Espelkamp-Fiestel

1 Einführung

Zur praktikablen Bemessung von geogitterbewehrten Erdkörpern wird in den EBGEO (2010) für die Ermittlung des Herausziehwidestands des Geogitters aus dem umgebenden Boden näherungsweise ein linearer Zusammenhang zwischen Herausziehwidestand und Verankerungslänge angenommen. Im Rahmen des Zulassungsverfahrens für Geogitter zum Einsatz bei Deponien der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) wurde von Müller (2011) herausgearbeitet, dass diese Näherung nicht zwangsläufig als gegeben unterstellt werden kann. In den meisten Fällen kann vor dem Hintergrund der weltweit üblichen und langjährigen Erfahrung mit der Anwendung dieser Lösung aber davon ausgegangen werden, dass die gewählte und im Bauwesen übliche Näherungslösung für die meisten Anwendungsfälle ausreichend und zumeist auch auf der sicheren Seite liegend angenommen werden darf. Da bei Nachweisen für Geokunststoffe im Deponiebau jedoch außergewöhnlich lange und über den heute bekannten Anwendungsdauern liegende Lebensdauernachweise >100 Jahre gefordert werden, müssen der Verbund und die daraus resultierende Geogitterbeanspruchung insbesondere bei Verankerungsgräben mit geringer Auflastspannung explizit betrachtet werden.

Im Verankerungsgraben, in dem die über die Böschungslänge im Geogitter kumulierte Zugkraft auf kurzer Länge zu verankern ist, muss das Herausziehen vom Geogitter aus dem umgebenden Boden untersucht werden. Im Gegensatz zu geogitterbewehrten Stützkonstruktionen besteht das System aus nur einem Geogitter und aufgrund der geringen Überdeckung mit Boden ist hier das Herausziehverhalten für den Grenzzustand der Tragfähigkeit maßgebend (Jacobs u.a., 2013). Daher eignet sich diese Anwendung für die Untersuchung des nichtlinearen Verbundverhaltens, bevor zukünftig auch Herausziehsituationen in komplexeren Anwendungen, wie den genannten geogitterbewehrten Stützkonstruktionen, damit betrachtet werden.

Im Beitrag wird dazu eine vereinfachende Interimslösung aus dem Zulassungsschein der BAM für Geogitter vorgestellt, die für Nachweise für Verankerungsgräben und Stützkonstruktionen an Deponien angewendet werden muss. Neben dieser Interimslösung wird

ein bereits von Ziegler & Timmers (2003) vorgestelltes und von Müller (2011) aufgegriffenes Modell zur Interaktion von Geogitter und Boden weitergeführt, um die Interimslösung in naher Zukunft zu ersetzen.

2 Interimslösung für geogitterbewehrte Konstruktionen im Deponiebau

Als Interimslösung im Rahmen der vorläufigen Zulassung von Geogittern zum Einsatz bei Deponien müssen neben der Bemessung nach EBGEO (2010) weitere Bestimmungen eingehalten werden. Für sogenannte Erddruckgitter – Geogitter, die einen wesentlich Anteil der Herausziehkraft über die Querelemente abtragen – ergeben sich diese wie folgt (s. auch Abb. 1): Zum einen muss der nach EBGEO (2010) bemessene Verankerungsgraben eine gewisse Verankerungslänge aufweisen ($L_{A,EBGEO} \geq L_{A,min}$), um damit in Abhängigkeit vom Füllboden, Geogitter und Auflastspannung einen gewissen charakteristischen Minimalherausziehewiderstand zu erreichen ($R_{t,k,EBGEO} \geq R_{t,k,min}$). Dabei ist diese untere Grenze des noch zulässigen Herausziehewiderstands aus Versuchsergebnissen abgeleitet worden. Zum anderen ist die erlaubte, charakteristische Einwirkung nach oben auf 50 % des minimalen Herausziehewiderstands begrenzt ($E_{k,EBGEO} \leq E_{k,max} = 1/2 R_{t,k,min}$). Beide Grenzen sind in Abhängigkeit von Füllboden, Geogitter und Auflast in Diagrammform in den Zulassungsscheinen gegeben (Müller & Wöhlecke, 2013). Von Niehues u.a. (2013) wird über erste Beispiele der rechnerischen Umsetzung in der Planung und baupraktische Erfahrungen berichtet.

In Abb. 1 ist qualitativ abgebildet, wie sich zum einen die Bemessung eines Verankerungsgrabens nach EBGEO (2010) und der vorläufigen Zulassung darstellt und wie sich zum anderen der tatsächliche Verlauf des Herausziehewiderstands entlang der Verankerungslänge nach Müller (2011) ausbildet. Es wird deutlich, dass der vermutete Herausziehewiderstand mit dem Einhalten der Bestimmungen der Interimslösung deutlich auf der sicheren Seite liegt, allerdings die EBGEO den Betrag des Herausziehewiderstandes und/oder der erforderlichen bzw. tatsächlich aktivierten Verankerungslänge gegebenenfalls über- oder unterschätzen. Von Vollmert u.a. (2012) wurde gezeigt, dass bereits bei verhältnismäßig geringen Kräften ein großer Bereich der Verankerungslänge aktiviert wird. Da die für die Langzeitbetrachtung relevante Materialbeanspruchung unmittelbar vom tatsächlichen Kraftverlauf abhängt, sind die Überlegungen zu einem differenzierten Verbundmodell fortzuführen.

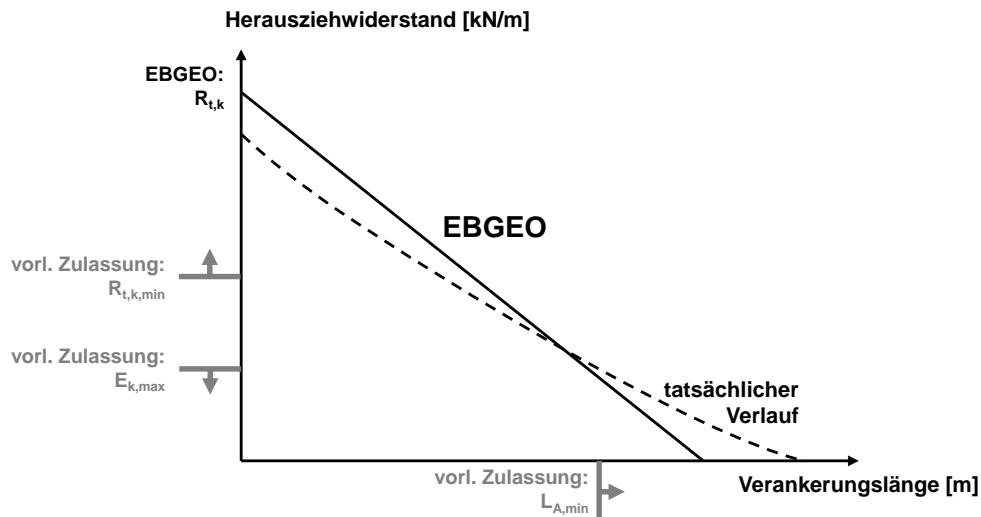


Abb. 1 Qualitative Darstellung des sich entlang der Verankerungslänge entwickelnden Herauszieh Widerstands

3 Differenziertes Verbundmodell der Interaktion zwischen Geogitter und Boden

Zum Lastabtragungsverhalten von Geogittern wurden bereits viele grundsätzliche Untersuchungen mit Herausziehversuchen durchgeführt, die alle übereinstimmend zwei Mechanismen der Kraftübertragung beschreiben:

- Reibung auf den Längselementen
- verschiebungsabhängig mobilisierter Widerstand vor den Querelementen

Ziegler & Timmers (2003) beschrieben den Beitrag der Querelemente mit einem einfachen und plausiblen Modell, das von Müller (2011) in der Simulation eines Herausziehversuchs umgesetzt wurde.

Darin wird das flächige Geogitter eindimensional abgebildet und in Segmente unterteilt. Diese Segmente sind entweder reine Geogitterlängssegmente oder Geogitterlängssegmente, an denen ein Querelement angreift und der mobilisierte Erdwiderstand über Verbindungsstellen in das Längssegment eingeleitet wird. Die Kraft (pro Meter Gitterbreite) Z_i bzw. die Verschiebung u_i an einem Rand des jeweiligen Segments lassen sich wie folgt berechnen:

$$Z_i = Z_{i-1} + 2 \cdot \Delta L \cdot B_1 \cdot \sigma_N \cdot \tan(\delta(u_{i-1})) \cdot n_g + Z_{K,i}(u_{i-1}) \quad [\text{kN/m}] \quad (1)$$

$$u_i = u_{i-1} + \varepsilon(Z_i) \cdot \Delta L \quad [\text{m}] \quad (2)$$

mit ΔL für die Segmentlänge, B_1 für die Längselementbreite, σ_N für die Normalspannung auf den Längssegmenten, n_g für die Längselementanzahl je Meter und $Z_{K,i}$ für die über das Querelement in das Längselement eingeleitete Kraft.

Die Kraft- und Verschiebungsverläufe entlang eines oder in der Tiefe beliebig vieler so diskretisierter Geogitterlängselemente können bei Vorgabe von Randbedingungen und den Funktionen $\delta(u)$, $Z_K(u)$ und $\varepsilon(Z)$ aus Gl. (1) und (2) berechnet werden. $\delta(u)$ steht dabei für den

verschiebungsabhängig mobilisierten Reibungswinkel auf den Oberflächen der Geogitterlängselemente und $\varepsilon(Z)$ für die kraftabhängige Dehnung des Geogitters in Längsrichtung. Der vor einem Geogitterquerelement erzeugte Erdwiderstand $Z_K(u)$ wird von Ziegler & Timmers (2003) wie in Abb. 2 dargestellt erklärt: Bei der Verschiebung eines Gitterelements quer zum Boden wird davor ein Erdwiderstand mobilisiert, der mit zunehmender Relativverschiebung mit der mobilisierten Fläche anwächst, da der Widerstand vereinfachend als das Integral der auf der mobilisierten Fläche wirkenden Schubspannungen τ_B angenommen wird. Dieser mobilisierte Querwiderstand wird über die Verbindungsstellen in die Längssegmente übertragen (s. Gl. (1)), wo er als Knotenkraft Z_K nach Abb. 2 wie folgt auftritt:

$$\begin{aligned} Z_{K,i} &= 2 \cdot \int_A \tau_B \, dA \cdot n_g = 2 \cdot \int_A \sigma_N \cdot \tan \varphi_B \, dA \cdot n_g & [\text{kN/m}] & \quad (3) \\ &= 2 \cdot \sigma_N \cdot \tan \varphi_B \cdot e_{yB} \cdot \text{mob } L(u_{i-1}) \cdot n_g \end{aligned}$$

mit τ_B für die Schubspannung auf der mobilisierten Fläche, φ_B für den Reibungswinkel des Bodens, e_{yB} und $\text{mob } L$ nach Abb. 2.

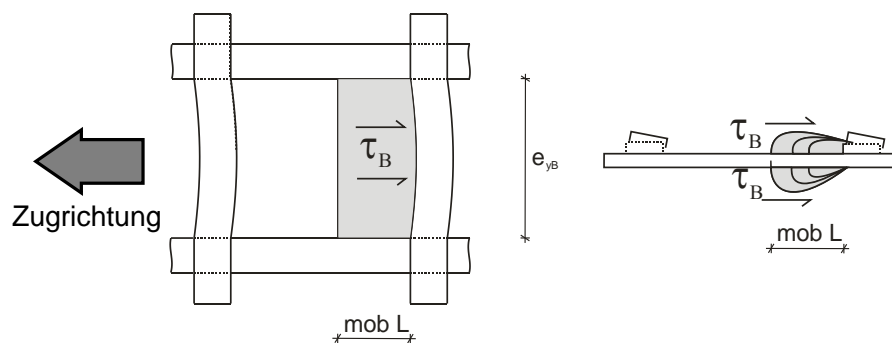


Abb. 2 Modell des Erdwiderstands vor einem Geogitterquerelement als Schubspannung ober- und unterhalb einer mobilisierten Fläche (nach Ziegler & Timmers, 2003)

4 Erforderliche Prüfungen für Eingangsfunktionen des Verbundmodells

Neben Kurzzeit-Zugversuchen für das Kraft-Dehnungsverhalten und Längsfestigkeit des Geogitters, Zugkriechversuchen zur Berücksichtigung des Einflusses der Belastungsdauer und Zug-Scherversuchen für die Festigkeit der Verbindungsstellen sind vor allem Herausziehversuche in Anlehnung an DIN 6009: 2011-05 mit angepassten Geogitterproben notwendig, um die Eingangsfunktionen für das in Abschnitt 3 beschriebene Verbundmodell zu entwickeln.

4.1 Mobilisierter Reibungswinkel zwischen Boden und Geogitterlängsstab aus S0-Versuchen

Die verschiebungsabhängige mobilisierte Reibung zwischen Boden und Geogitterlängselement wird mit Hilfe von Herausziehversuchen an sogenannten S0-Proben – Geogitter ohne Querelemente – bestimmt. Da somit in einem S0-Versuch als Kraftübertragungsmechanismus nur Reibung auf den Geogitterlängselementen wirkt, kann die gemessene

Zugkraft an der Geogitterklemme Z_{KI} für jede Geogitterverschiebung an der Klemme u_{KI} direkt in einen mittleren Reibungswinkel $\delta(u_{KI})$ umgerechnet werden. Obwohl hier der mobilisierte Reibungswinkel in Abhängigkeit von der Klemmenverschiebung erhalten wird, kann diese Beziehung für dehnsteife Geogitter direkt als Eingangsfunktion $\delta(u_i)$ in Gl. (1) eingesetzt werden, da in dem kurzen Versuchskasten entlang des Geogitters annähernd gleiche Verschiebungen vorliegen. Für dehnweiche Geogitter kann die aus der Messung evaluierte Kurve $\delta(u_{KI})$ nicht direkt als Eingangsfunktion $\delta(u_i)$ verwendet werden, sondern ihre Steigung im Anfangsbereich ist mittels Kalibrierung anzupassen.

Die sich aus den S0-Versuchen ergebenden mobilisierten Reibungswinkel sind nicht unabhängig von der Auflastspannung, sondern nehmen mit zunehmender Auflast ab. Bei Durchführung von S0-Versuchen mit verschiedenen Auflasten kann in der Anwendung des Modells für die jeweils vorliegenden Normalspannungen interpoliert werden.

Versuche, bei denen die Längselemente der Geogitter nebeneinander aufgeklebt und als Gesamtfläche im Reibungsversuch untersucht werden, sind nicht zielführend, da mit diesem Versuch das räumliche Verbundverhalten nicht erfasst werden kann.

4.2 Mobilisierte Länge des Erdwiderstands vor einem Geogitterquerelement aus S1-Versuchen

Das Modell zur Erdwiderstandsentwicklung geht gemäß Abb. 2 von einer mobilisierten Fläche vor dem Querelement aus, auf deren Ober- und Unterseite Scherspannungen in den Boden übertragen werden. Somit ergibt sich nach Gl. (3) die Knotenkraft Z_K zwischen Längs- und Querelement aus der vor dem Querelement mobilisierten Länge. Im Labor kann der Widerstand eines Querstabs in Abhängigkeit seiner Verschiebung u_Q mit Hilfe von S0- und S1-Versuchen (Geogitterprobe mit einem Querelement) ermittelt werden. Dazu wird die Querelementverschiebung mit Wegaufnehmern direkt an der Position des Querelements gemessen. Die Differenz der gemessenen Zugkräfte von S1- und S0-Versuch jeweils bezogen auf die Verschiebung der Querelementposition ergibt dann den vom Querelement erzeugten Widerstand:

$$Z_K(u_Q) = Z_{S1}(u_Q) - Z_{S0}(u_Q) \quad [\text{kN}] \quad (4)$$

Gleichsetzen und Umstellen der Gleichungen (3) und (4) nach der mobilisierten Länge liefert:

$$\text{mob } L(u_Q) = \frac{Z_{S1}(u_Q) - Z_{S0}(u_Q)}{2 \cdot \sigma_N \cdot \tan \varphi_B \cdot e_{yB}} \quad [\text{m}] \quad (5)$$

Der gemessene Verlauf der mobilisierten Länge über der Querelementverschiebung ist dabei näherungsweise unabhängig von der Auflastspannung. Bei den Versuchen mit nur einem Querelement ist die Lage der einzelnen Körner vor diesem Querelement entscheidend, sodass die S1-Versuche einer gewissen Streuung unterliegen. Es wird daher empfohlen mehrere Versuche (z.B. bei unterschiedlichen Auflastspannungen) durchzuführen, um eine gemittelte Funktion der mobilisierten Länge für das Verbundmodell zu erhalten.

4.3 Modellüberprüfung mit SV-Versuchen

Abb. 2 zeigt, dass die vor einem Querelement mobilisierte Fläche maximal bis zum nächstvorderen Querelement reichen kann, während in einem S1-Versuch größere Flächen des Erdwiderstands mobilisiert und damit nach Gl. (5) größere mobilisierte Längen ermittelt werden können. Als natürliche Grenze ist daher die Funktion $L(u_Q)$ aus Gl. (5) mit dem Abstand zweier Querelemente zu deckeln.

Um die Qualität der gesamten Modellierung zu überprüfen, wird daher auch empfohlen, Herausziehversuche mit regulären Geogitterproben (SV) durchzuführen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Interimslösung sorgt für die Einhaltung eines hohen Sicherheitsniveaus bei der Bemessung von Verankerungsgräben, solange das tatsächliche Verhalten mit stark linearisierten Näherungslösungen noch unzureichend beschrieben wird. Mit dem vorgestellten Verbundmodell kann die statisch unbestimmte Situation des Herausziehens des Geogitters bei einem Herausziehversuch oder in einem Verankerungsgraben unter Berücksichtigung der Verschiebungsrandbedingungen gelöst werden. Das nichtlineare Verbundverhalten wird der Realität entsprechend angenähert und die Verschiebungs- und Kraftverläufe sowie die Beanspruchungen der Verbindungsstellen entlang des Geogitters können für jede gegebene Einwirkung des Geogitters bestimmt werden. Es werden mit diesem Modell somit nicht nur der Grenzzustand der Tragfähigkeit betrachtet, sondern auch statisch und kinematisch kompatible Gebrauchszustände. Die zur Entwicklung der Eingangsfunktionen des Verbundmodells notwendigen Prüfungen wurden vorgestellt.

In naher Zukunft ist mit dem entwickelten Modell eine sichere Bemessung von Verankerungsgräben von geogitterbewehrten Böschungen und Abschätzung der Verformungszustände im Gebrauchszustand möglich. Ebenfalls denkbar ist die Übertragung des Modells auf die Bemessung von geogitterbewehrten Stützkonstruktionen unter expliziter Betrachtung der Einwirkungen und Widerstände jeder einzelner Bewehrungslage.

Literatur

Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (2010), Empfehlung für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen - EBGEO. Berlin: Ernst & Sohn 2010

Jacobs, F., Wang, Z. & Ziegler, M. (2013), Untersuchungen zur Beanspruchung der Geogitter bei geogitterbewehrten Stützkonstruktionen. 13. Informations- und Vortragstagung über „Kunststoffe in der Geotechnik“, März 2013, München, *Sonderheft der Zeitschrift Geotechnik*

Müller, W. (2011), Zur Bemessung der Verankerung von Bewehrungsgittern aus Kunststoff beim Schutz von Böschungen vor hangparallelem Gleiten. *Bautechnik*, 88.6, S. 347-361

Müller, W. & Wöhlecke, A. (2013), Langzeitverhalten von Kunststoff-Dränelementen und Bewehrungsgittern und die Anforderungen der Deponieverordnung. 29. Fachtagung „Die sichere Deponie - Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen“, 2013, Würzburg

Niehues, C., Vollmert, L. & Werth, K. (2013), Bewehrungsgitter als Teil des Abdichtungssystems nach Dep V – Bemessungsregeln und baupraktische Erfahrungen. 23. Karlsruher Deponie- und Altlastenseminar, 2013, ICP Karlsruhe

Vollmert, L., Werth, K., Emersleben, A. & Holm, B. (2012), In-Situ-Beanspruchungen eines Geogitters im Verankerungsbereich einer Oberflächenabdichtung am Beispiel der Pochsandhalde Zellerfelder Tal. 28. Fachtagung „Die sichere Deponie - Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen“, 2012, Würzburg

Ziegler, M. & Timmers, V. (2003), Neues Bemessungskonzept für die Bemessung der Verankerungslänge von Geogitter. 8. Informations- und Vortragstagung über „Kunststoffe in der Geotechnik“, März 2003, München, *Sonderheft der Zeitschrift Geotechnik*

