

Beitrag zum Verbundverhalten von Geokunststoffen in bindigen Böden mit Bindemittelverbesserung

Dipl. – Ing. (FH) Sebastian Althoff, Univ. – Prof. Dr. – Ing. Herbert Klapperich,
Priv. – Doz. Dr. – Ing. habil. Nándor Tamáskovics

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik,
Gustav-Zeuner-Straße 1, D-09599 Freiberg

1 Einleitung

Geokunststoffe erlangen in der Geotechnik einen immer größeren Einfluss. Insbesondere die Verwendung von Geogittern wächst stetig. Darüber hinaus werden zunehmend Böden mit natürlicher oder “künstlicher“ (durch eine Bodenstabilisierung herbeigeführte) Kohäsion verwendet [5]. Somit erhält auch das Verbundverhalten Geogitter zu bindigen Lockergestein mit Bindemittelstabilisierung eine immer größere Bedeutung. Der gegenwärtige Erkenntnisstand auf diesem Gebiet ist aber nicht zufriedenstellend.

In einer umfangreichen Versuchsserie wurde das Verbundverhalten bindemittelstabilisiertes Lockergestein / Geokunststoff untersucht und es werden Schlussfolgerungen für die Bemessung, Anwendung und weitere Untersuchung gezogen. Darüber hinaus wird ein Verfahren vorgestellt, Scher-, Reibungs- und Herausziehversuche, die bei der Zugabe von Kalk und Zement sehr zeitintensiv sind, wirtschaftlich und mit geringem Zeitaufwand durchzuführen.

2 Bodenphysikalische Untersuchungen

In Vorbereitung der Versuche im Großrahmenschergerät wurden bodenphysikalische Untersuchungen an dem ausgewählten bindigen Lockergestein Canitz-Schluff (CS5) durchgeführt, deren Ergebnisse in der Tabelle 1 zusammengestellt sind. In Abbildung 1 sind die ermittelten Kornverteilungskurven für das untersuchte Lockergestein abgebildet. Beim CS5 handelt es sich um einen schwach tonigen und stark sandigen Schluff. Die Konsistenzgrenzen und die Plastizitätszahl des Materials zeigen eine leichte Plastizität.

Eigenschaften:	Zeichen:	Maßeinheit:	Versuchsergebnisse:
			CS5
Korndichte	ρ_s	[kg/m ³]	2.600
Ausrollgrenze	w_p	[1]	0,135
Fließgrenze	w_L	[1]	0,176
Plastizitätszahl	I_p	[1]	0,0406
Optimaler Wassergehalt	w_{opt}	[1]	0,113
Proctordichte	ρ_{Pr}	[kg/m ³]	1946

Tabelle 1: Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen

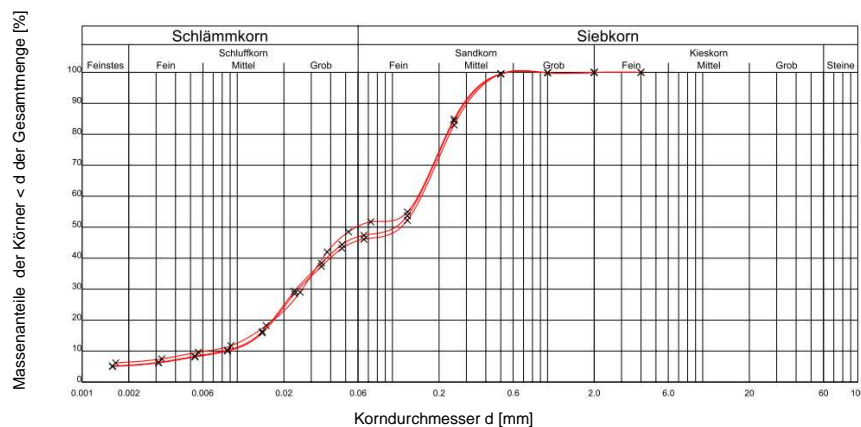


Abbildung 1: Kornverteilungskurve des CS5

Die Dichte der Proben wurde während der Versuchsserie konstant gehalten, blieb aber wegen der im Vergleich zum Proctorversuch niedrigeren verfügbaren spezifischen Verdichtungsenergie beim Einbau in das Interaktionsprüfgerät unterhalb der Proctordichte. Zur günstigen Verdichtbarkeit wurde der Wassergehalt auf den optimalen Wassergehalt von $w = 0,113$ [1] erhöht, um die Bildsamkeit des Lockergesteins beim Materialeinbau in das Versuchsgerät zu begünstigen.

3 Das Interaktionsprüfgerät

Das Interaktionsprüfgerät (IPG) des Instituts für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg ermöglicht sowohl die Durchführung von Großrahmenscherversuchen (ISV) zur Ermittlung der Scherfestigkeit an reinem Lockergestein als auch Großrahmenreibungsversuche (IRV) und Großrahmenherausziehversuche (IPV) zur Ermittlung der Scherfestigkeit eines Geokunststoff / Lockergestein–Verbundes. Die allgemeinen technischen Parameter des IPGs sind in Tabelle 2 zusammengefasst [2].

Scherkastengröße	L=437, W=437, H=200 [mm]
Normalspannungsbereich	0–600 kN/m ²
Schubspannungsbereich	0-600 kN/m ²
Maximale Scher- & Herausziehkraft	125 kN
Maximale Scherverschiebung	400 mm
Schergeschwindigkeit	0,000001–12,5 mm/min

Tabelle 2: Technische Parameter des IPGs

Untersuchungen an Lockergesteinen mit Zement und Kalk–Stabilisierung sind sehr zeitintensiv, da die Reaktion des Kalks und des Zements in mehreren Phasen und erst zeitlich versetzt eintritt. Wird eine stabilisierte Probe in das IPG eingebaut, muss die Reaktionszeit abgewartet werden und das IPG kann in dieser Zeit nicht verwendet werden.

Aufgrund dieses Umstandes wurde die Inlay-Technik entwickelt, mit diesem neuartigen experimentellen Verfahren kann die Probenherstellung von dem IPG entkoppelt werden. Mit der Inlay-Technik ist es möglich, die Proben für Scher-, Reibungs- und Herausziehversuche mit und ohne Stabilisierung außerhalb des Gerätes herzustellen und erst nach der gewünschten Reaktionszeit für die Versuchsdurchführung in das Gerät zu installieren. Der aus zwei Teilrahmen bestehende Inlay-Kasten ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Inlay-Rahmen haben sich in der Praxis bewährt und zur Sicherung der experimentellen Flexibilität hat das Institut für Geotechnik zehn solcher Inlay-Rahmen anfertigen lassen.

Ausdrücklich wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass das auf den Fotos in Abbildung 2 zu sehende Geogitter nicht in Verbindung zu den hier dargestellten Ergebnissen steht. Bei den Aufnahmen handelt es sich um Bilder, die während einer anderen Versuchsreihe aufgenommen wurden.



Abbildung 2: Fotos des Inlay-Rahmens

4 Reibungs- bzw. Verbundverhalten

Die Auswertung von Großrahmenscherversuchen, Großrahmenreibungsvorsuchen und Großrahmenherausziehversuchen im Interaktionsprüfgerät erfolgt zunächst durch Berechnung der Scherparameter des MOHR-COULOMB'schen Versagenskriteriums

$$\tau = \sigma' \cdot \tan \varphi' + c'$$

wo τ die Schubspannung beim Bruch, σ' die wirksame Normalspannung in der Scherebene, φ' den Bruchwert des Reibungswinkels und c' den Bruchwert der Kohäsion beschreibt. Bei der Ermittlung der Schubspannung ist die Scherfläche korrekt zu berücksichtigen. In Versuchen mit dem Großrahmenschergerät hat sich gezeigt, dass die Korrektur der Größe der Scherfläche in Abhängigkeit des eingetragenen Scherweges sowohl beim Großrahmenscherversuch als auch beim Großrahmenreibungsvorsuch zu falschen Ergebnissen führt [7]. In den vorliegenden Versuchen wurde deshalb keine Scherflächenkorrektur vorgenommen. Bei der Ermittlung der Scherfläche in den Großrahmenherausziehversuchen muss berücksichtigt werden, dass Schubspannungen an beiden Seiten des Geokunststoffes angreifen. Weil der Geokunststoff durch die Probe durchgezogen wird, ist wiederum keine Korrektur der Scherfläche in Abhängigkeit vom Herausziehweg erforderlich.

In der "Empfehlung für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrung aus Geokunststoffen (EBGEO)" [5] wird die Verbundwirkung vereinfacht durch den Reibungsbeiwert $f_{sg,k}$ erfasst, der wie folgt definiert ist:

$$f_{sg,k} = \lambda \cdot \tan \varphi_k$$

mit

λ	Verbundbeiwert für Reibung $\lambda = \frac{\tan \delta}{\tan \varphi}$
$\tan \varphi$	Reibungsbeiwert Boden (Messergebnis)
$\tan \delta$	Reibungsbeiwert Geokunststoff / Boden (Messergebnis)

Die Verbundwirkung der Kohäsion kann durch den Scherbeiwert $f_{scg,k}$ erfasst werden, der wie folgt definiert ist:

$$f_{scg,k} = \lambda_c \cdot c_k$$

mit

λ_c	Verbundbeiwert für Kohäsion $\lambda_c = \frac{a}{c}$
a	Adhäsion Geokunststoff / Boden (Messergebnis)
c	Kohäsion Boden (Messergebnis)
c_k	charakteristische Kohäsion Boden

Wird bei der Bemessung der Adhäsionsanteil angesetzt, so muss die dauerhafte Wirkung über die gesamte Nutzungsdauer gewährleistet sein [5] und [1].

Bei der Bestimmung des Verbundbeiwertes sind zwei Fälle zu unterscheiden. Auf der einen Seite das Abscheren auf der Kontaktfläche Geokunststoff / Boden und auf der anderen Seite das Herausziehen des Geokunststoffes aus dem Boden. Das Abscheren auf der Kontaktfläche Geokunststoff / Boden kann in einem Reibungsversuch untersucht werden. Bei einem Reibungsversuch wird der Geokunststoff in der Scherebene fixiert und anschließend werden

beide Teile des Scherkastens gegeneinander verschoben. Das Herausziehen des Geokunststoffs wird in einem Herausziehversuch (Pullout-Versuch) nachgebildet, dazu werden der obere und der untere Teil des Scherkastens miteinander verbunden und der Geokunststoff, nach dem Einstellen des Scherspalt, aus dem Lockergestein gezogen. Die experimentelle Erfahrung zeigt, dass der Verbundbeiwert für Reibung λ zwischen 0,5 und 1,0 liegt [5]. In der hier beschriebenen Versuchsserie, werden nur Herauszieh- und Scherversuche betrachtet, Reibungsversuche werden in einer späteren Versuchsserie folgen.

Die Abmessungen der Kästen sollten in Anlehnung an DIN EN 12957-1 [4] und den Entwurf der DIN 60009 [3] 300 · 300 mm bis 500 · 500 mm betragen. Vorzugsweise sind die Scherbeiwerte Geokunststoff / Boden und Boden / Boden in dem gleichen Versuchsgerät durchzuführen. Die in den Normen für den direkten Scherversuch (DIN 18137-3) und für die Bestimmung des Herausziehwiderstandes (Entwurf DIN 60009) genannten Versuchsgeschwindigkeiten weichen voneinander ab. Da aber ein Verbundbeiwert für den Geokunststoff aus dem Vergleich der beiden Versuchstypen erfolgen soll, wurden sowohl die Scherversuche als auch die Reibungsversuche mit einer Geschwindigkeit von $v = 1,0$ mm/min durchgeführt. Aufgrund der hohen Durchlässigkeit des zu untersuchenden Lockergesteins stellen Porenwasserüberdrücke kein Problem dar.

5 Bodenstabilisierung

Mit Zement verfestigte Böden zeigen eine schnelle Zunahme der Druckfestigkeit und des Steifemoduls. Dies ist damit begründet, dass sich in den Porenräumen ein Zementsteinskelett bildet. Bei feinkörnigen Böden ist daher der Zementbedarf sehr hoch. Kalk hingegen hat nur eine moderate Erhöhung der Deformationskennwerte und die Verfestigung tritt erst im Laufe der Zeit ein. Im Gegensatz zu einer Zementstabilisierung (Zementsteinskelett) ruft Kalk aber eine Verfestigung der Aggregate durch eine Puzzolanreaktion des Kalkhydrats hervor [9]. Untersuchungen von Witt haben die in Tabelle 3 dargestellten Erfahrungswerte für das Mischungsverhältnis Kalk zu Zement ergeben [8]. In Anlehnung an diese Tabelle wurde ein Kalk-Zementverhältnis von 30 zu 70 zur Stabilisierung des CS5 gewählt. Damit können die Vorteile beider Bindemittel genutzt werden.

	GE - SE - GW - SW - GU - SU - GU* - SU* - UL - TL - UM - TM - UA - TA
Kalk/Zement	0/100 → 20/80 → 30/70 → 40/60 → 50/50 → 70/30
Menge	2% - 6% , je nach Ziel der Stabilisierung

Tabelle 3: Erfahrungswerte zur Stabilisierung mit Mischbindern nach [8]

In einaxialen Kompressionsversuchen wurde weiterhin festgestellt, dass eine 3%-Zugabe des Mischbinders (M13) bezogen auf die Gesamtfeststoffmasse (der feuchten Probe) eine praktikable Vergütungsstrategie beim Versuchsmaterial CS5 darstellt.

6 Versuchsprogramm und Ergebnisse

In der hier beschriebenen Versuchsserie zur Untersuchung des Verbundverhaltens Geokunststoff / Lockergestein mit Mischbinder wurde die Mehrstufentechnik angewendet. Bei der Mehrstufentechnik handelt es sich um ein am Institut für Geotechnik der TU Bergaka-

demie Freiberg entwickeltes Verfahren, Scher- und Verbundparameter wirtschaftlich und mit geringem Zeitaufwand zu bestimmen [6].

In Tabelle 4 sind das Versuchsprogramm, die Versuchsbedingungen und die Versuchsergebnisse dargestellt. Die Versuche wurden unter nahezu identischen Bedingungen an dem Versuchsmaterial (CS5) in dem IPG unter Verwendung der Inlay-Rahmen durchgeführt. Bei den Versuchen mit Stabilisierung wurden dem CS5 mit Hilfe eines Zwangsmischers drei Massenprozent des Mischbinders zugegeben. Die Versuche an diesen Proben wurden nach einer Reaktionszeit von 14 Tagen durchgeführt. Bei dem verwendeten Geokunststoff handelte es sich um ein einaxiales, hochzugfestes Geogitter aus PET.

Versuch:	Versuchsbedingungen:			Versuchsergebnisse:	
	ρ_d [kg/m ³]	w_E [1]	Laststufen [kN/m ²]	φ'_f [°]	c'_f [kN/m ²]
Großrahmenscherversuche mit Mischbinder (ISV)					
ISV-CS5-M1314-V2	1733	0,113	25,50,100,150,200	38,7*	65,2*
ISV-CS5-M1314-V4	1733	0,113	25,50,100,150,200	39,5*	74,7*
ISV-CS5-M1314-V7	1789	0,113	200,250,300,350,400	37,5*	83,2*
ISV-CS5-M1314-VT1	1808	0,112	25,50,100,150,200	33,5*	35,7*
Großrahmenherausziehversuche mit Mischbinder (IPV)					
IPV-CS5-M1314-V1	1855	0,113	10,20,30,40,50	35,8	15,0
IPV-CS5-M1314-V2	1807	0,113	30,40,50,60,70	34,1	11,2
IPV-CS5-M1314-V3	1807	0,113	10,20,30,40,50	38,2	11,5
Großrahmenscherversuche ohne Mischbinder (ISV)					
Aus sechs weiteren ISV bestimmt	1928	0,113	25,50,100,150,200	30,2	37,4
Großrahmenherausziehversuche ohne Mischbinder (IPV)					
Aus zwei weiteren IPV bestimmt	1903	0,111	10,20,40,50	37,9	9,3
ρ_d	Einbautrockendichte		c'_f	Kohäsion aus Mehrstufenversuch	
w_E	Einbauwassergehalt, bei Versuchen mit Mischbinder vor der Zugabe		M1314	Versuch mit 3 M-% Mischbinder, Reaktionszeit 14 Tage	
φ'_f	Reibungswinkel aus Mehrstufenversuch bei ISV ohne erste Laststufe		V "xx"	Versuchsnummer	
VT1	Versuch mit Trennfläche		*	ohne den Wert der ersten Laststufe ermittelt	

Tabelle 4: Übersicht des Versuchsplans und der Versuchsergebnisse

Die Maximalwerte der Schubspannung der Herausziehversuche für die jeweilige Laststufe sind in Abbildung 3 aufgetragen. Die einzelnen Messwerte lassen sich mit guter Näherung durch eine Regressionsgerade abbilden, die ebenfalls in dem Diagramm aufgetragen ist. Die erste Laststufe der Bodenproben mit Mischbinder streuen sehr stark. Aufgrund dieser Tatsache wurden bei den Mehrstufenversuchen die Schubspannungen für die erste Laststufe nicht eingezeichnet (Abbildung 4) und auch nicht in der Regression berücksichtigt. Bei den mit diesem Verfahren erhaltenen Scherparametern handelt es sich nicht um die Spitzenwerte, sondern vielmehr um die Scherparameter, die an der Restscherfestigkeit bestimmt wurden. Diese liegen auf der sicheren Seite.

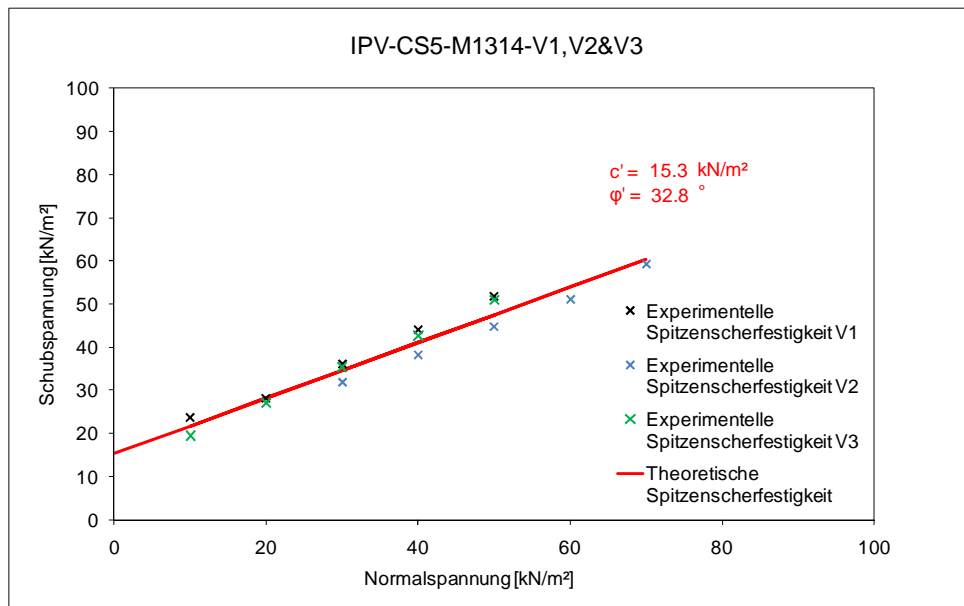


Abbildung 3: Ergebnisse Großrahmenherausziehversuche mit Mischbinder

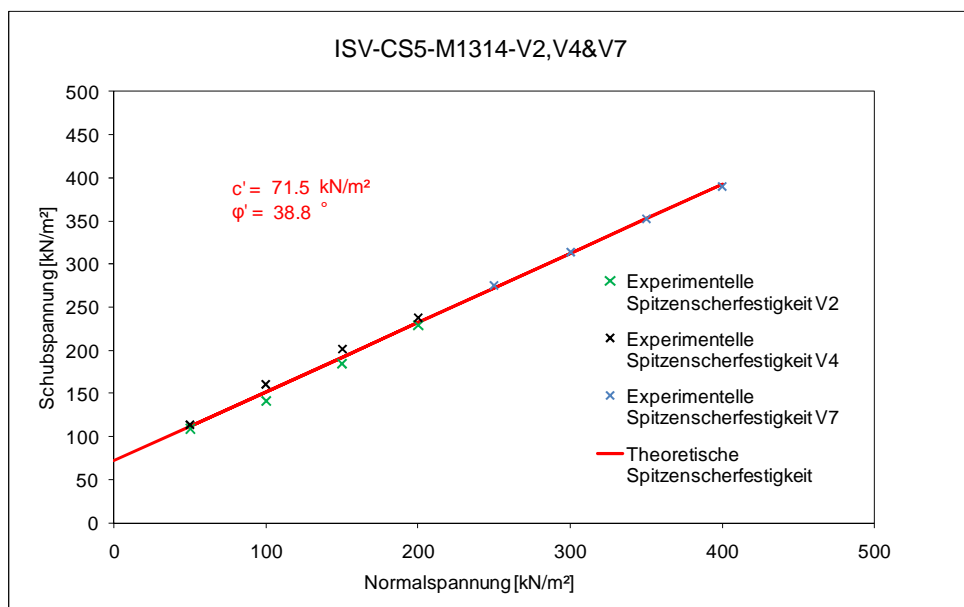


Abbildung 4: Ergebnisse Großrahmenscherversuche mit Mischbinder

Die in den Diagrammen dargestellten Versuchsergebnisse zeigen, dass sich die Mehrstufentechnik für diese Versuchsserie sehr gut eignet und reproduzierbare Ergebnisse liefert. Die in den Versuchen ISV-CS5-M1314-V2 & V4 mit der Mehrstufentechnik bestimmten Schubspannungen liegen auf einer Regressionsgeraden mit den Ergebnissen aus ISV-CS5-M1314-V7, der mit einer höheren ersten Laststufe begonnen wurde.

Der Vergleich der Scherparameter aus den Scherverversuchen mit Mischbinder ($\varphi'_f = 38,8^\circ$; $c'_f = 71,5 \text{ kN/m}^2$) mit den Parametern aus den Herausziehversuchen mit Mischbinder ($\varphi'_f = 32,8^\circ$; $c'_f = 15,3 \text{ kN/m}^2$) zeigt, dass die Herausziehversuche eine deutlich geringere Kohäsion ($\lambda_c = \frac{15,3}{71,5} = 0,214$) und einen geringeren Reibungswinkel ($\lambda = \frac{\tan 32,8}{\tan 38,8} = 0,802$) haben. Diese deutliche Reduzierung, insbesondere der Kohäsion, muss über die Verbundbeiwerte in der

Bemessung berücksichtigt werden. Die ermittelten Verbundbeiwerte bedeuten aber nicht, dass Geokunststoffe nicht im Zusammenhang mit einer Bodenstabilisierung verwendet werden sollen, weil teilweise das auf der Baustelle vorhandene Lockergestein erst durch die Stabilisierung verwendbar wird. Darüber hinaus zeigt der Vergleich der Herausziehversuche mit Mischbinder mit den Scherversuchen ohne Mischbinder ($\frac{\tan 32,8}{\tan 30,2} = 1,11$; $\frac{15,3}{37,4} = 0,410$) eine Erhöhung der Scherparameter. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass durch den Einbau eines Geogitters die Adhäsion Geokunststoff / Boden bei den Versuchen mit Mischbinder gestört wird. Dies ist besonders auffällig, da bei den Scherversuchen mit Mischbinder die Kohäsion sehr hoch ist. Die Störung der Adhäsion ist aber nicht alleine die Folge des Geogitters, sondern der Versuchsaufbau hat auch einen großen Anteil. In einem Herausziehversuch wird das Geogitter auf den verdichteten Boden gelegt und anschließend die nächste Lage eingebaut, hingegen wird bei einem Scherversuch die Scherzone homogen ohne Trennfläche hergestellt. Um dies zu verdeutlichen, wurde der Versuch ISV-CS5-M1314-VT1 durchgeführt, in diesem wurde in der Höhe der Scherzone verdichtet, also eine Trennfläche, wie sie auch in den Herausziehversuchen entsteht, geschaffen. Die Ergebnisse zeigen, dass die geringe Adhäsion in den Herausziehversuchen sowohl durch die Trennfläche als auch durch das Geogitter zustande kommt.

Zusätzlich ist bei der Verwendung von Geokunststoffen in Verbindung mit einer Bodenstabilisierung auf die Langzeitbeständigkeit der Geokunststoffe in einem alkalischen Milieu zu achten. Beständigkeitsuntersuchungen wurden im Rahmen dieser Versuchsserie nicht durchgeführt.

7 Schlussfolgerungen

Aus den vorliegenden Untersuchungen folgen einige wichtige Erkenntnisse zur Untersuchung, Bemessung und Verwendung von Geokunststoffen in bindigen Böden mit Bindemittelstabilisierung:

1. **Kombination von Geokunststoffen und Bodenstabilisierung ist eine sinnvolle Bauweise.** Teilweise werden bindige Lockergesteine erst durch den Einsatz einer Bodenstabilisierung handhabbar. Die Ergebnisse zeigen, dass der Verbundbeiwert für Reibung durch die Verwendung eines Mischbinders erhöht werden kann ($\frac{\tan 32,8}{\tan 30,2} = 1,11$).
2. **Mehrstuferentechnik, eine wirtschaftliche Versuchsmethode zur Untersuchung des Verbundverhaltens.** Für die hier dargestellte Versuchsserie hat die Mehrstuferentechnik enorme Vorteile, sie ist eine geeignete Versuchsmethode, die reproduzierbare und schlüssige Ergebnisse liefert.
3. **Inlay-Rahmen machen die Versuchsserie im IPG erst möglich.** Die Inlay-Technik ist eine sehr gute und in der Praxis bewährte Erweiterung für das IPG, die eine Versuchsserie mit langen Reaktionszeiten beherrschbar macht.
4. **Scherversuche und Herausziehversuche bei gleicher Geschwindigkeit.** Für die Bestimmung von Verbundparametern aus Scher- und Herausziehversuchen ist es sinnvoll, nicht nur dasselbe Gerät zu verwenden, sondern auch die Versuche mit der gleichen Versuchsgeschwindigkeit durchzuführen.

5. **Verdichtung erzeugt Trennfläche.** Durch die Verdichtung in der Höhe der Scherzone wird eine Trennfläche erzeugt, wodurch die Kohäsion bzw. die Adhäsion im Scher- und Herausziehversuch reduziert wird.
6. **Geogitter in der Scherfläche reduziert die Adhäsion.** Bei der Bestimmung des Verbundbeiwertes für Kohäsion zeigte sich, dass das Geogitter in der Scherfuge einen negativen Einfluss auf den Kohäsions- bzw. Adhäsionsanteil hat.

Danksagung

Für die finanzielle Unterstützung der DFG im Rahmen des Forschungsvorhabens "Verbundverhalten von Geokunststoffen in bindigen Böden", den Co-Autoren für die fachliche Unterstützung sowie den Herstellern für die Zurverfügungstellung der Produkte sei an dieser Stelle gedankt.

Literatur

- [1] Aydogmus T, Alexiew D., Klapperich H. (2005): **Über das Verbundverhalten von zementstabilisiertem bindigem Boden mit PVA Geogittern im Schermodus**, FS-KGEO 2005, München.
- [2] Aydogmus T. (2006): **Beitrag zum Interaktionsverhalten von Geokunststoffen und Lockergestein**. Veröffentlichung des Institutes für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg; Herausgeber: H. Klapperich, H. Konietzky; Heft 2006-6 pp. 1-177.
- [3] DIN 60009 ENTWURF (2009-03): **Geokunststoffe - Prüfung und Bestimmung des Verbundbeiwerts mit Boden im Herausziehversuch**. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [4] DIN EN ISO 12957-1 (2005): **Geokunststoffe - Bestimmung der Reibungseigenschaften - Teil 1 Scherkastenversuch**. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [5] EBGEO ENTWURF (2010): **Empfehlung für den Entwurf und die Berechnung von Erdköpern mit Bewehrung aus Geokunststoffen**. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V.
- [6] Tamáskovics N. (2009): **Multi-stage Large Shear-Frame Tests to the Fast Interface Parameter Determination for Geosynthetics**. 10th International Symposium on Environmental Geotechnology and Sustainable Development, Bochum 2009.
- [7] Tamáskovics N., Klapperich H. (2010): **Verbundverhalten von Geokunststoffen in bindigem Boden**. 9. Sächsisches Bautextilien-Symposium BAUTEX 2010 Bauen mit Geokunststoffen, Chemnitz.
- [8] Witt K. J. (2002): **Zement – Kalk – Stabilisierung von Böden**. Geotechnik Seminar, Weimar.
- [9] Witt K. J. (2010): **Erwünschte und unerwünschte Reaktionsmechanismen bei der Bodenstabilisierung mit Bindemitteln**. 5. Fachtagung Zementstabilisierter Böden, Chemnitz.