

# BESTIMMUNG DER VERBUNDEIGENSCHAFTEN – INNOVATIVES VERSUCHSKONZEPT MIT 12 GEOGITTERN

Dipl. – Ing. (FH) Sebastian Althoff

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Freiberg

Prof. Dr. – Ing. Herbert Klapperich & Priv. – Doz. Dr. – Ing. habil. Nándor Tamáskovics

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Freiberg

**KURZFASSUNG:** Am Institut für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg wird seit vielen Jahren das Verbundverhalten von Geokunststoffen und Lockergestein untersucht. In einem Forschungsvorhaben werden zwölf verschiedene Geogitter von sechs verschiedenen Herstellern systematisch geprüft, mit dem Ziel, Geokunststoffparameter zu definieren, die das Verbundverhalten beeinflussen. Detailliert beschreibt der Beitrag die Bestimmung des Verbundbeiwertes für Reibung und Kohäsion und erläutert die Versagensmechanismen. Darüber hinaus wird eine Verbundformel für Reibung und eine Verbundformel für Kohäsion hergeleitet, mit der der Verbundbeiwert mit guter Übereinstimmung zu den gemessenen Werten errechnet werden kann.

## 1 EINLEITUNG

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wird das Verbundverhalten von Lockergestein und Geokunststoff intensiv untersucht. Zwölf verschiedene Geogitter von sechs verschiedenen Herstellern kommen bei dieser umfangreichen Versuchsserie zum Einsatz. Die Produkte wurden so ausgesucht, dass die große Vielfalt der am Markt verfügbaren Geogitter möglichst gut abgedeckt wird. Die ausgewählten Produkte haben Kurzzeitfestigkeiten zwischen 30 und 200 kN/m, decken die gängigen Herstellungsverfahren ab und haben mit HDPE, PET, PP und PVA vier verschiedene Rohstoffe.

Mit dem gewählten Versuchskonzept und Versuchsprogramm wird erforscht, welchen Einfluss die unterschiedlichen Geokunststoffparameter auf das Verbundverhalten haben. Aus den gewonnenen Ergebnissen werden Schlussfolgerungen für die Bemessung, Anwendung sowie für weitere Untersuchungen gezogen.

## 2 DAS INTERAKTIONSPRÜFGERÄT

Das am Institut für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg entwickelte Interaktionsprüfgerät (IPG) ermöglicht sowohl die Durchführung von Großrahmenscherversuchen (ISV) zur Ermittlung der Scherfestigkeit an reinem Lockergestein als auch Großrahmenreibungversuche (IRV) und Großrahmenherausziehversuche (IPV) zur Ermittlung der Scherfestigkeit des Verbundes Geokunststoff und Lockergestein. Die allgemeinen, technischen Parameter des IPGs sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Technische Parameter des IPGs

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

Mit innovativen Ideen wurde das Prüfgerät weiterentwickelt. Das Eigengewicht des Auflastrahmens wurde mittels Druckfedern kompensiert und die Messtechnik optimiert. Somit ist eine genauere Bestimmung der Verformungen des Geogitters möglich. Aus ökonomischer Sicht besonders bewährt hat sich die Einführung der "Inlay-Technik". 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 einer gewünschten Reaktionszeit die Proben in das Gerät zu installieren. Der aus zwei Teilrahmen bestehende Inlay-Kasten ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Inlay-Rahmen haben sich in der Praxis als zuverlässig erwiesen und zur Sicherung der experimentellen Flexibilität verfügt das Institut für Geotechnik über zehn solcher Inlay-Rahmen.



Abbildung 1: Fotos des Inlay-Rahmens

## 3 BODENPHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN

Im Vorfeld der Versuche im Großrahmenschergerät wurden bodenphysikalische Untersuchungen an dem ausgewählten, bindigen Lockergestein Canitz-Schluff (CS5) durchgeführt, deren Ergebnisse in der Tabelle 2 zusammengestellt sind. In Abbildung 2 sind die ermittelten Kornverteilungskurven für das untersuchte Lockergestein abgebildet. Beim CS5 handelt es sich um einen schwach tonigen und stark sandigen Schluff, der durch die Zugabe von Feinsand künstlich optimiert wurde. Die Konsistenzgrenzen und die Plastizitätszahl des Materials zeigen eine leichte Plastizität.

Tabelle 2: Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen

Eigenschaften:	Zeichen:	Maßeinheit:	Ergebnisse:
			<b>CS5</b>
<b>Korndichte</b>	$\rho_s$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2.600
<b>Ausrollgrenze</b>	$W_p$	[1]	0,135
<b>Fließgrenze</b>	$W_L$	[1]	0,176
<b>Plastizitätszahl</b>	$I_p$	[1]	0,0406
<b>Optimaler Wassergehalt</b>	$W_{opt}$	[1]	0,113
<b>Proctordichte</b>	$\rho_{Pr}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	1946

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.

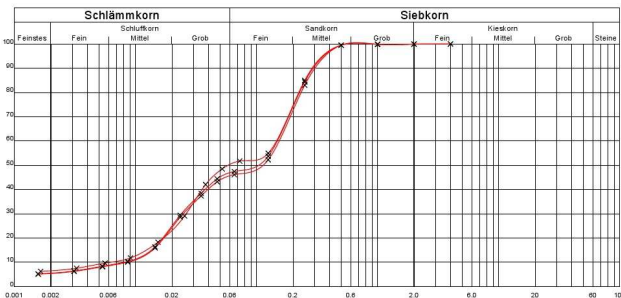


Abbildung 2: Kornverteilungskurve des CS5

Der Canitz-Schluff wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens auch mit Kalk und Zement stabilisiert. Das Mischungsverhältnis Kalk zu Zement wurde in Anlehnung an die Erfahrungswerte in Tabelle 3 mit 30 zu 70 angenommen. Die Erkenntnisse zu dem Verbundverhalten von Geokunststoffen und Lockergestein mit Bodenstabilisierung wurden auf dem VSVI Seminar 2011 in Münster präsentiert [1].

Tabelle 3: Erfahrungswerte zur Bodenstabilisierung [7]

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

#### 4 REIBUNGS- BZW. VERBUNDVERHALTEN

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

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

wo  $\tau$  die Schubspannung beim Bruch,  $\sigma'$  die wirksame Normalspannung in der Scherebene,  $\varphi'$  den Bruchwert des Reibungswinkels und  $c'$  den Bruchwert der Kohäsion beschreibt. In Versuchen mit dem Interaktionsprüfgerät hat sich gezeigt, dass die Korrektur der Größe der Scherfläche in Abhängigkeit des eingetragenen Scherweges sowohl beim Großrahmenscherversuch als auch beim Großrahmenreibungversuch zu falschen Ergebnissen führt [6]. In den vorliegenden Versuchen wurde deshalb keine Scherflächenkorrektur vorgenommen.

Bei der Ermittlung der Scherfläche muss berücksichtigt werden, dass Schubspannungen bei einem Herausziehversuch an beiden Seiten des Geokunststoffes angreifen. Somit muss für die Rückrechnung des Herausziehwiderstandes ( $F$ ) aus der Schubspannung ( $\tau$ ) die Fläche ( $A$ ) des Geogitters doppelt berücksichtigt werden.

$$F = \tau \cdot 2 \cdot A$$

Da 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

- $\lambda$  Verbundbeiwert für Reibung  $\lambda = \tan \delta / \tan \varphi$
- $\tan \varphi$  Reibungsbeiwert Boden (Messergebnis)
- $\tan \delta$  Reibungsbeiwert Geokunststoff / Boden (Messergebnis)
- $\tan \varphi_k$  charakteristischer Reibungsbeiwert Boden

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

- $\lambda_c$  Verbundbeiwert für Kohäsion  $\lambda_c = a / c$
- $a$  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 [2].

Bei der Bestimmung des Verbundbeiwertes sind zwei Fälle zu unterscheiden. Auf der einen Seite das Abscheren auf der Kontaktfläche Geokunststoff und Boden und auf der anderen Seite das Herausziehen des Geokunststoffes aus dem Boden. Das Abscheren auf der Kontaktfläche Geokunststoff und Boden kann in einem Reibungsversuch untersucht werden. Im Reibungsversuch wird der Geokunststoff in der Scherebene fixiert und anschließend werden beide Teile des Scherkastens gegeneinander verschoben. Das Herausziehen des Geokunststoffes 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 eines Scherspalt, aus dem Lockergestein gezogen. Die experimentelle Erfahrung zeigt, dass der Verbundbeiwert für Reibung  $\lambda$  meist zwischen 0,5 und 1,0 liegt [5].

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 [5]. 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 der Verbundbeiwert Geokunststoff und Lockergestein aus dem Vergleich der beiden Versuchstypen erfolgt, wurden so-

wohl die Scherversuche als auch die Reibungsversuche mit einer Geschwindigkeit von  $v = 1,0 \text{ mm/min}$  durchgeführt. Aufgrund der hohen Durchlässigkeit des zu untersuchenden Lockergesteins stellen Porenwasserüberdrücke kein Problem dar.

## 5 VERSUCHSPROGRAMM UND ERGEBNISSE

In die Betrachtung und Auswertung für diese Veröffentlichungen sind die Ergebnisse aus Herausziehversuchen mit fünf unterschiedlichen, einaxialen Geogittern sowie die Ergebnisse aus einer Vielzahl von Großrahmenscherversuchen eingeflossen, um eine Verbundformel für das untersuchte Lockergestein in Verbindung mit den untersuchten Geogittern aufzustellen.

Die Scherparameter aus den Großrahmenscherversuchen sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Wiederholungsversuche zeigen sehr kleine Schwankungsbreiten, die Schubspannung weist einen linearen Anstieg mit der Normalspannung auf und die gemessenen Werte korrelieren sehr gut. Für die Berechnung der Verbundbeiwerte ( $\lambda$  und  $\lambda_c$ ) wurden die ermittelten Scherparameter aus den Scherversuchen als Bezugswert herangezogen.

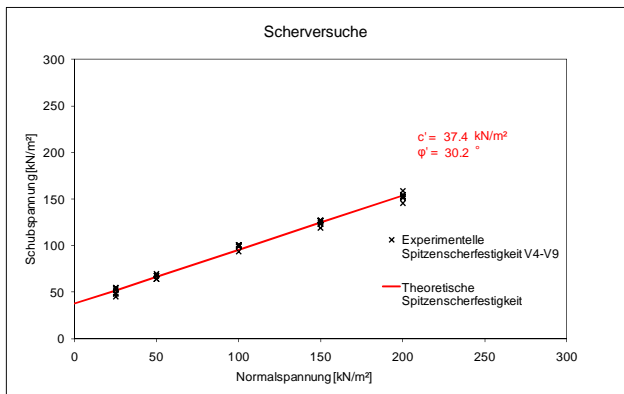


Abbildung 3: Großrahmenscherversuche (unbewehrt)

Auf Wunsch der Hersteller der untersuchten Geokunststoffe wurden die Ergebnisse nur anonymisiert dargestellt. In Abbildung 4 sind die Schubspannungen der untersuchten Geogitter bei den unterschiedlichen Laststufen aufgetragen. Jedes der untersuchten Geogitter wurde wenigstens bei drei verschiedenen Normalspannungen geprüft. Dabei stellte sich heraus, dass die erzielten Schubspannungen deutlich zwischen den Produkten schwanken, wobei aber alle Produkte gut funktionieren. Dies zeigt sich an der über die Schubspannungen durchgeführte Korrelation, die einen Korrelationskoeffizienten von  $R = 0,86$  ergab, sowie an dem mit dieser Korrelation ermittelten Reibungswinkel von  $35,7^\circ$ , der sogar über dem Reibungswinkel des Bodens liegt.

Aufgrund der unterschiedlichen Normalspannungsbereiche zwischen den Scher- und Herausziehversuchen erfolgte die Skalierung der Achsen in den Abbildungen nicht einheitlich.

Für die Entwicklung einer Verbundformel wurden die Geogitter vermaßt und Parameter definiert. Betrachtet wurden: Querschnittsfläche der Bündel/Stäbe (MD & CMD), Fläche der Masche, Fläche der Gitteröffnung, Knotendicke, Knotenhöhe, Kurzzeitfestigkeit, Bruchdehnung MD, Zugkraft bei 2% Dehnung, Rohstoff, Herstellungsart und Rauheit. Bei der Rauheit wurde zwischen glatt, rau und einem Zwischenwert unterschieden.

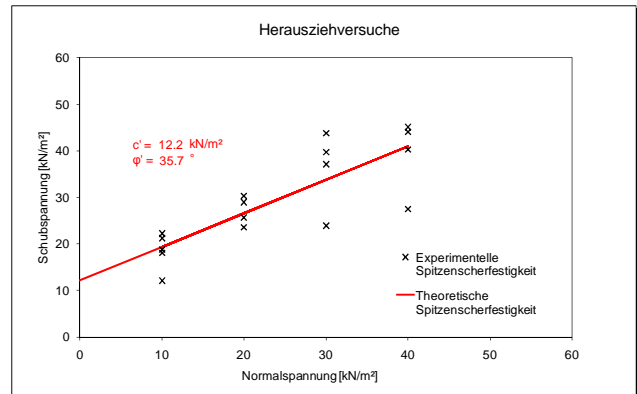


Abbildung 4: Großrahmenherausziehversuche (bewehrt)

Um die Produkte weiter zu anonymisieren und um einheitliche, dimensionslose Faktoren zu erhalten, wurde die nachfolgende Formel verwendet:

$$\Pi = \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}}$$

In dieser Formel ist  $E$  der Parameter des Geogitters und  $E_{\min}$  und  $E_{\max}$  der maximale und minimale Wert für die Parameter der untersuchten Geogitter. Durch diese Skalierung liegen alle Faktoren  $\Pi$  zwischen 0 und 1 und haben keine Einheit.

Nach der Bestimmung der Faktoren wurde eine Korrelationsanalyse für die unterschiedlichen Parameter separat für  $\lambda$  und  $\lambda_c$  durchgeführt. Beispielhaft ist diese Korrelationsanalyse mit dem Verbundbeiwert für Reibung  $\lambda$  und den Faktoren berechnet aus den Flächen der Maschen in Abbildung 5 dargestellt. Der in der Abbildung dargestellte Korrelationskoeffizient  $R$  wurde bei der Korrelationsanalyse immer mit bestimmt.

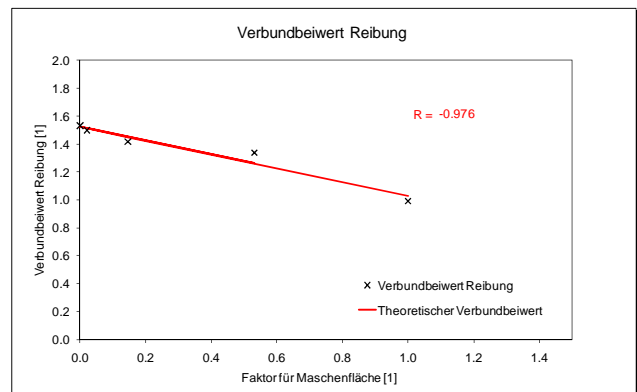


Abbildung 5: Beispiel einer Korrelationsanalyse

Unter Zuhilfenahme dieser Darstellungen und einer Plausibilitätskontrolle wurden die Parameter ermittelt, die den größten Einfluss auf das Verbundverhalten haben. Separat für den Verbundbeiwert für Reibung und Kohäsion sind diese Parameter samt Korrelationskoeffizient in Tabelle 4 aufgeführt.

Im nächsten Schritt wurde unter Zuhilfenahme eines Statistikprogramms eine mehrfache Regression durchgeführt. Dabei wurden aufgrund der Vielzahl an Eingangswerten und der geringen Anzahl an Gleichungen verschiedene Konstellationen untersucht, mit der Absicht, Verbundformeln für das Verbundverhalten ( $\lambda$  und  $\lambda_c$ ) zu ermitteln, die die in den Versuchen bestimmten Werte möglichst gut abbilden.

Tabelle 4: Mit Korrelationsanalyse ermittelte Parameter

Verbundbeiwert Reibung $\lambda$	
Parameter	Korrelationskoeffizient R
Fläche der Masche	-0,98
Kurzzeitfestigkeit	0,94
Rauheitsgrad	0,96

Verbundbeiwert Kohäsion $\lambda_c$	
Parameter	Korrelationskoeffizient R
Knotenpunktdicke	-0,997
Kurzzeitfestigkeit	0,91
Rauheitsgrad	0,88

Die nach diesem Verfahren ermittelten Formeln wurden einer Plausibilitätskontrolle unterzogen und für die bessere Handhabung vereinfacht. Die so erhaltene Formel für den Verbundbeiwert für Reibung lautet:

$$\lambda = \frac{4}{3} - \frac{1}{3} \cdot A + \frac{1}{5} \cdot F$$

Die Formel für den Verbundbeiwert für Kohäsion lautet:

$$\lambda_c = \frac{1}{10} \left( \frac{13}{10} + \frac{7}{10} \cdot R + \frac{13}{10} \cdot F \right)$$

In diesen Formeln ist  $F$  der Faktor, berechnet aus den Kurzzeitfestigkeiten,  $A$  der Faktor aus der Maschenfläche und  $R$  der Faktor aus der Rauheit. Die mit der Formel ermittelten Verbundbeiwerte für Reibung weichen maximal 3,8% von dem gemessenen Wert ab. Insofern sind die mit dieser Formel ermittelten Verbundbeiwerte nahezu identisch mit den gemessenen Werten. Die mit der Verbundformel für Kohäsion ermittelten Werte zeigen eine größere Abweichung, diese betrug maximal 18,3%. Für die Größe der Abweichung können zwei Gründe genannt werden, zum einen hat der Probeneinbau bei der Adhäsion einen größeren Einfluss und zum anderen waren die betrachteten  $\lambda_c$  Werte mit 0,14 bis 0,36 sehr klein. Die in der Versuchsserie ermittelten  $\lambda$  Werte lagen mit 1,0 bis 1,5 deutlich höher.

Für die Berechnung der Faktoren wurden die in Tabelle 5 genannten Minimal- und Maximalwerte der Geogitter eingesetzt.

Tabelle 5: Wertebereich der Verbundformel

Faktor	$E_{min}$	$E_{max}$
Maschenfläche A	ca. 600 mm <sup>2</sup>	ca. 6.000 mm <sup>2</sup>
Kurzzeitfestigkeit F	ca. 50 kN/m	ca. 200 kN/m
Rauheitsgrad R	0 [1]	1 [1]

Durch das Durchführen der zuvor beschriebenen Skalierung liegen die Faktoren  $A$ ,  $F$  und  $R$  in einem Wertebereich zwischen 0 und 1. Aufgrund dieser einheitlichen Dimension kann der Einfluss der einzelnen Faktoren auf das Verbundverhalten eingeschätzt werden. Es zeigte sich, dass weder  $A$  oder  $F$  für die Reibung noch  $R$  oder  $F$  für die Kohäsion in den Formeln vernachlässigbar sind.

Ausdrücklich wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Verbundformeln nur für die untersuchten Geogitter und nur in Verbindung mit dem verwendeten Lockergestein gelten. Somit ist eine Übertragung auf andere Produkte und andere Geogitter nicht möglich. Darüber hinaus gelten diese Verbundformeln nur für die Versagenssituation Herausziehen.

## 6 AUSBLICK

Die in diesem Beitrag veröffentlichten Ergebnisse stellen einen Zwischenbericht dar, die Forschung auf diesem Gebiet geht unverändert weiter. In naher Zukunft werden insbesondere Herausziehversuche mit den biaxialen Produkten sowie Reibungsversuche durchgeführt, um die Korrelationsanalyse und mehrfache Regressionsanalyse auf eine größere Anzahl von Produkten anzuwenden. Darüber hinaus sollen die für die Versagenssituation Herausziehen vollzogenen Untersuchungen auch auf die Versagenssituation Abscheren erweitert werden.

Die Rauheit der Geogitter soll genauer definiert und weitere Parameter in der Auswertung berücksichtigt werden. Im Rahmen dieser Untersuchungen soll zum Beispiel der Einfluss der Querstreben genauer betrachtet werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist es, das Verbundverhalten genauer beschreiben zu können, so dass die in den Versuchen ermittelten Ergebnisse und Erkenntnisse auf andere Geogitter und andere Böden übertragen werden können und eine allgemeine Verbundformel zur Bestimmung der Verbundbeiwerte aufgestellt werden kann.

## 7 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.

## 8 LITERATUR

[1]	Althoff S, Klapperich H., Tamáskovics N. (2011): <b>Beitrag zum Verbundverhalten von Geokunststoffen in bindigen Böden mit Bindemittelverbesserung</b> . VSVI-Seminar 2011: Neue Anwendungen von Geokunststoffen im Straßenbau, Münster.
[2]	Aydogmus T, Alexiew D., Klapperich H. (2005): <b>Über das Verbundverhalten von zementstabilisiertem bindigem Boden mit PVA Geogittern im Schermodus</b> , FS-KGEO 2005, München.
[3]	DIN 60009 ENTWURF (2009): <b>Geokunststoffe - Prüfung und Bestimmung des Verbundbeiwerts mit Boden im Herausziehversuch</b> . Beuth Verlag GmbH, Berlin.
[4]	DIN EN ISO 12957-1 (2005): <b>Geokunststoffe - Bestimmung der Reibungseigenschaften - Teil 1 Scherkastenversuch</b> . Beuth Verlag GmbH, Berlin.
[5]	EBGEO ENTWURF (2010): <b>Empfehlung für den Entwurf und die Berechnung von Erdköpern mit Bewehrung aus Geokunststoffen</b> . Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V.
[6]	Tamáskovics N., Klapperich H. (2010): <b>Verbundverhalten von Geokunststoffen in bindigem Boden</b> . 9. Sächsisches Bautextilien-Symposium BAUTEX 2010 Bauen mit Geokunststoffen, Chemnitz.
[7]	Witt K. J. (2002): <b>Zement - Kalk - Stabilisierung von Böden</b> . Geotechnik Seminar, Weimar.