



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG

Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

VERÖFFENTLICHUNGEN
des Instituts für Geotechnik
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

Herausgeber: H. Klapperich

Heft 2015-2

Nutzung gering tragfähiger Böden
für geokunststoffbewehrten Erdbau
*Versuche zur Interaktion Geokunststoff/Boden -
Wirkungsgröße, bodenverbessernde Maßnahmen*

von Sebastian Althoff

Freiberg 2015

Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Herbert Klapperich

Anschrift: TU Bergakademie Freiberg
Institut für Geotechnik
Gustav-Zeuner-Straße 1
09596 Freiberg
Telefon: 03731 39-3614
Fax: 03731 39-3501
E-Mail: sekr_bm@ifgt.tu-freiberg.de
Internet: www.ifgt.tu-freiberg.de

Herstellung: Druckerei Wagner
Verlag und Werbung GmbH
Printed in Germany

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Herausgeber ist es nicht gestattet, das Werk oder Teile daraus nachzudrucken oder auf fotomechanischem oder elektronischem Wege zu vervielfältigen.

Für den Inhalt ist der Autor allein verantwortlich.

© Institut für Geotechnik - TU Bergakademie Freiberg - 2015

ISSN 1611-1605

Vorwort

Der Einsatz von Geokunststoffen im Bauwesen zeigt wachsende Marktanteile - auch basierend auf Forschungsleistungen im Grundlagenbereich wie auch in praxisdienlicher Anwendungsforschung.

Eine wesentliche Erweiterung gelingt mit der vorliegenden Dissertationsschrift von Dr.-Ing. Althoff zu beiden obigen Aspekten. Die Nutzung gering tragfähiger Böden mit dem Ziel der Verbesserung durch Bewehrung mittels Geokunststoffen und deren Untersuchung und Analyse hat Neuwertigkeitscharakter.

Das "Verbundverhalten von Geokunststoffen in bindigen Böden" wurde durch die DFG gefördert und war Grundlage für die Arbeiten von Sebastian Althoff am Institut für Geotechnik. Die wissenschaftliche Aufbereitung erfolgte nach seinen 3 Jahren in Freiberg berufsbegleitend.

Mein Dank gilt meinen Kollegen und Mitberichtern im Promotionsverfahren Prof. Müller-Rochholz, Münster, Prof. Bathurst, Kanada und Prof. Stolz, Schweiz.

Die experimentellen Untersuchungen mit optimierter Versuchstechnik des am Institut entwickelten "Interaktionsprüfgeräts - IPG" wurden für verschiedene Lockergesteine und mit am Markt vorhandenen Geogittern für die Versuchstypen Scher-, Reibungs- und Herausziehversuche einschließlich Bodenmischungen durchgeführt. Der kooperativen Unterstützung der wesentlichen Geokunststoff-Hersteller sei herzlich gedankt.

Die vorliegende Arbeit ist auch ein Beitrag für die Weiterentwicklung von Bemessungskonzepten wie die anstehende Fortschreibung bzw. Überarbeitung der EBGEO.

Mit dem Wunsch für eine gewinnbringende Lektüre schließe ich meinen Glückwunsch für den "frischen Doktor" ein.



Herbert Klapperich



Gutachter, Mitglieder der Promotionskommission und der Doktorand

von links nach rechts:

- Prof. Dr. Jürgen **Schmidt** (Promotionskommission)
- Prof. Dr.-Ing. Jochen **Müller-Rochholz** (Gutachter)
- Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Herbert **Klapperich** (Gutachter)
- Dipl.-Ing. (FH) Sebastian **Althoff** (Doktorand)
- Prof. Dr. Carsten **Drebenstedt** (Vorsitzender)
- Prof. Dr.-Ing. Frank **Dahlhaus** (Promotionskommission)

Nutzung gering tragfähiger Böden für geokunststoffbewehrten Erdbau

*Versuche zur Interaktion Geokunststoff/Boden -
Wirkungsgröße, bodenverbessernde Maßnahmen*

Der Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

eingereichte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Althoff

geboren am 30.03.1982 in Haltern

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Herbert Klapperich

Prof. Dr.-Ing. Jochen Müller-Rochholz

Prof. Ph. D. Richard J. Bathurst

Prof. Dipl. Ing. ETH/SIA usic Martin Stolz

Niederhasli, den 28.11.2014

Vorwort des Verfassers

“Wir müssen die Natur nicht als unseren Feind betrachten, den es zu beherrschen und überwinden gilt, sondern wieder lernen, mit der Natur zu kooperieren. Sie hat eine viereinhalb Milliarden lange Erfahrung. Unsere ist wesentlich kürzer.“

Hans-Peter Dürr (1929-2014), dt. Physiker, 1987 Right Livelihood Award (“Alternativer Nobelpreis“)

Zunächst erscheint das zuvor genannte Zitat von Hans-Peter Dürr in einer Arbeit über Geokunststoffe unpassend, erst auf den zweiten Blick zeigt sich, wie gut die Worte zu Geokunststoffen und insbesondere zu der vorliegenden Arbeit passen. Aufgrund der positiven CO₂-Bilanz von Geokunststoffen im Vergleich zu konventionellen Baustoffen [50] und der Tatsache, dass Geokunststoffe mit dem Boden interagieren bzw. “kooperieren“ anstatt starr und unflexibel zu sein, eignet sich dieses Zitat in meinen Augen vortrefflich. Beispielhaft sind an dieser Stelle die Konstruktionen aus kunststoffbewehrter Erde zu nennen, die aufgrund ihrer hohen internen Standsicherheit sowie ihrer Flexibilität auch sehr starke Erdbeben überstehen.

Für die Erstellung der Dissertation benötigte ich über fünf Jahre. Mein Thema “die Geokunststoffe“ haben mich aber auch schon vor dieser Zeit vielseitig interessiert und wurden konsequent mit den unterschiedlichen Themenschwerpunkten verfolgt und vertieft: Angefangen mit dem Wahlpflichtfach “Geokunststoffe“ bei Prof. Dr. Müller-Rochholz während des Studiums, über die Diplomarbeit am Royal Military College of Canada, mit dem Thema *“Investigation of direct shear testing of segmental retaining wall units“*, meine mehrjährige Tätigkeit als Produktmanager bei einem Geokunststoffproduzenten, die Betreuung des Forschungsvorhabens zum Verbundverhalten von Geokunststoffen an der TU Bergakademie Freiberg sowie seit einigen Jahren als technischer Redakteur und Administrator des Industrieverbands Geokunststoffe e.V. und mittlerweile als stellvertretender Abteilungsleiter der Abteilung Geosynthetics der Schoellkopf AG. Auf diesem Weg mit abwechslungsreichen Stationen habe ich früh Einblick in verschiedene Arbeitsbereiche und Tätigkeiten erhalten. So konnte ich wertvolle Erfahrungen sammeln, die mich im Laufe der Zeit sensibilisiert haben, Synergien zu erkennen, und nach Möglichkeit in die Arbeit einfließen zu lassen.

Bei der Ausarbeitung dieser wissenschaftlichen Untersuchung habe ich besonderen Wert auf die praxisbezogene Verwertbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse und Daten

gelegt. Auch deshalb habe ich im versuchstechnischen Teil mit sieben Produzenten zusammen gearbeitet, um in den Versuchsanordnungen allgemein gültige Erkenntnisse und herstellerunabhängige Ergebnisse zu gewinnen. Sehr herzlich möchte ich mich bei den Mitarbeitern der Produzenten für ihre Anregungen, Diskussionen sowie für die Zurverfügungstellung von Materialien bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meinem Erstgutachter Herrn Prof. Dr.-Ing. Herbert Klappe-
rich, meinem Zweitgutachter Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Müller-Rochholz sowie Priv.-
Doz. Dr.-Ing. habil. Nandor Tamaskovics für das mir entgegengebrachte Vertrauen, die
sehr gute Zusammenarbeit, die Anregungen und die ausgezeichnete fachliche Unter-
stützung. Herrn Prof. Ph. D. Richard J. Bathurst danke ich ganz herzlich, dass er mich
an seinem Institut und Labor in die Geokunststoffforschung eingeführt hat und bei
Fragen zur Verfügung stand. Ein besonderer Dank gebührt auch meinem jetzigen
Arbeitgeber (Schoellkopf AG, Rümlang, Schweiz), der mir die Freiräume gegeben hat
diese Dissertation neben meiner beruflichen Tätigkeit fertigzustellen.

Weiterhin möchte ich mich bei all meinen Kollegen am Institut für Geotechnik bedan-
ken, insbesondere bei Detlev Tondera und Dr.-Ing. Ernst-Dieter Hornig für die anre-
genden Diskussionen sowie bei Ingo Türschmann, Ute Fliege, Jens Kaden, Roy John
und Helga Vanselow für Ihren Einsatz. Bedanken möchte ich mich auch bei den ande-
ren Doktoranden des Instituts für Geotechnik für die guten Ideen sowie für die Unter-
stützung bei der Durchführung der Versuche, wie auch bei Gerd Münzberger für seine
technische Unterstützung. Großen Dank auch an Dorothee Heidrich, die mir bei den
formalen Angelegenheiten weitergeholfen hat. Ein Dank gilt auch den Mitarbeitern
anderer Institute, die mich bei den verschiedensten Aufgaben unterstützt haben, zu
nennen wären unter anderen Dr.-Ing. Sebastian Szczyrba und Dr.-Ing. Axel Ruiken.
Ferner sei den fleißigen Korrekturlesern gedankt.

Die Ausfertigung der Arbeit bedeutete einen sehr großen zeitlichen Aufwand (arbeiten
auch am Wochenende und Feiertagen etc.), wodurch ich teilweise nicht genug Zeit für
meine Frau Sonja, meine Eltern, meine Familie und Freunde hatte. Bei diesen möchte
ich mich ganz herzlich für deren Unterstützung, Geduld und Verständnis bedanken.

Sebastian

Kurzfassung

Geokunststoffe sind beständige Produkte aus Polymeren, die in Boden eingelegt werden um geotechnische Probleme zu lösen. Eine Kategorie der Geokunststoffe sind Geogitter, bei denen die Längs- und Querelemente eine offene, gitterförmige Struktur bilden und die meist zur Bodenbewehrung eingesetzt werden. Ihre Verwendung zur Bewehrung von gering tragfähigen Böden für kunststoffbewehrte Erd- und Stützbauwerke kann enorme ökologische und ökonomische Vorteile bieten. Trotz der Tatsache, dass die Verwendung von Geogittern in den letzten Jahren stark zugenommen hat, sind die Grundlagen zum Bau und zur Bemessung limitiert. Besonders die Schlüsselfrage, wie Geogitter und verschiedene Lockergesteine in unterschiedlichen Belastungssituationen interagieren, ist ingenieurmäßig nur lückenhaft untersucht worden.

Im Rahmen dieser Dissertation wurde deshalb in über 250 großmaßstäblichen Scher-, Herauszieh- und Reibungsversuchen das Verbundverhalten Geokunststoff/Lockergestein eingehend untersucht. Dazu wurden 14 handelsübliche Geogitter, die teilweise auch modifiziert wurden, in dem Interaktionsprüfgerät des Institutes für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg mit verschiedenen Böden systematisch getestet.

Die vielen Versuchsanordnungen und die aus ihnen abgeleiteten Überlegungen und gewonnenen Erkenntnisse belegten, dass die wichtigsten Parameter interagieren (Bild K.1), und zwar in verschiedenen Abhängigkeiten wie weitere Variationen der Bodenparameter (Kornverteilung, Wassergehalte, Verdichtung, Bindemittelzusatz etc.), der unterschiedlichen Geogitterparameter (Oberflächenbeschaffenheit, Struktur, etc.) und der Belastung gezeigt haben. Darüber hinaus wurde das Interaktionsprüfgerät für zukünftige Versuche weiterentwickelt (Entkopplung des Versuchseinbaus vom Versuchsgerät usw.). Der Fokus der Forschungsarbeit lag dabei in der Schaffung von Grundlagenkenntnissen für den gemeinsamen Einsatz von bindigen Lockergesteinen und Geokunststoffen.

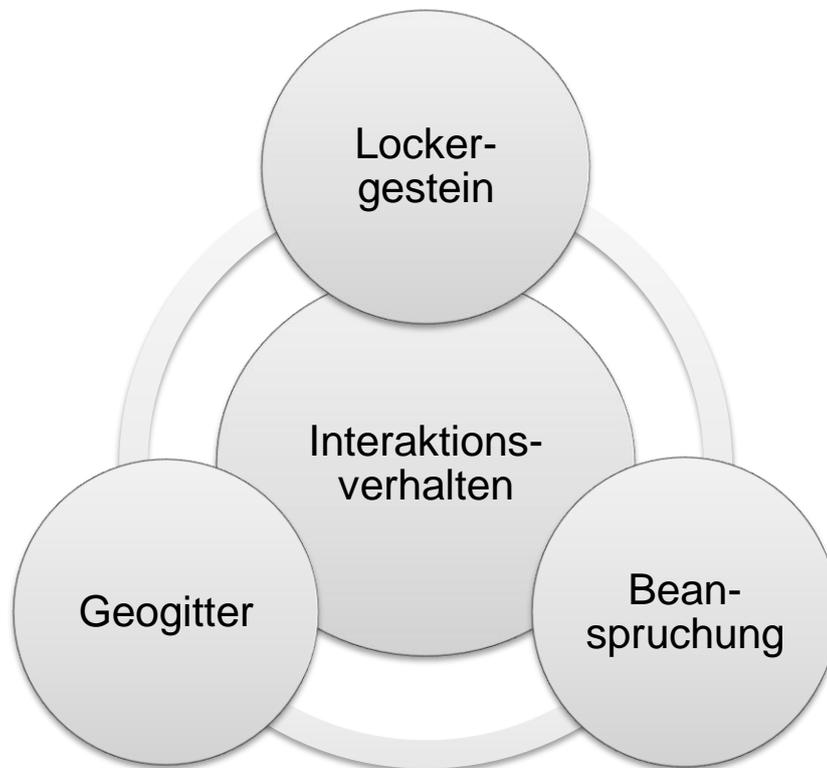


Bild K.1 Interaktionsverhalten beeinflussende Faktoren

Bei rolligen Böden zeigte sich, dass die Rautiefe sich stärker (positiv) auf die Widerstände auswirkt als bei den bindigen Böden. Hingegen waren bei bindigen Böden die Auswirkungen durch eine Erhöhung der Querelemente deutlicher. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass dreidimensionale Querelemente das Verbundverhalten verbessern und Tests an Geogittern mit einem größeren Verhältnis von Öffnungsweite zu Maschenweite zeigten höhere Adhäsionswerte. Die Reibungsversuche hatten einen gleichmäßigeren Verlauf und geringere Streuungen zwischen den unterschiedlichen Geogittern, weshalb aufgrund der deutlicheren Unterschiede zwischen den Produkten bei den Herausziehversuchen detaillierte Schlussfolgerungen gezogen werden konnten.

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zur Verbesserung der Bemessungsgrundlagen und ermöglicht ein detaillierteres Verständnis des Verbundverhaltens. Des Weiteren werden Vorschläge ausgearbeitet die im Labor erzielten Ergebnisse auf die Baupraxis zu übertragen, wie zum Beispiel durch das Vermeiden von Trennflächen zwischen Geogitter und Boden bei der Verdichtung.

Abstract

Use of soil with weak bearing capacity for geosynthetically reinforced earthwork -

Investigation of geosynthetic/soil interaction behavior -

Action quantity, soil improved arrangements

Geosynthetics are durable polymeric products placed in soil to help solve civil engineering problems; one category of these is geogrids. Geogrids are polymers formed into an open, grid-like configuration and function primarily as soil reinforcement. Their use to reinforce soil with weak bearing capacity could have big ecological and economical advantages. Although geogrid use has grown in recent years, there is still limited design information available due to the wide variety of design configurations and soil variability. One of the key factors lacking for more widespread engineering implementation is a greater understanding of the interaction between various geogrids and soil combinations when exposed to different load effects.

In more than 250 shear, pull-out, and friction tests, this interaction behavior was examined in detail. Fourteen general geogrids (sometimes additionally modified) using different soil types were systematically tested in the Interaction Testing Device at the Geotechnical Institute of the TU Bergakademie Freiberg. Combining the huge quantity of test results with a theoretical analysis, the main parameters which affect soil behavior could be defined, and are illustrated below in Diagram K.2. Furthermore the Interaction Testing Device could be improved for test in future.

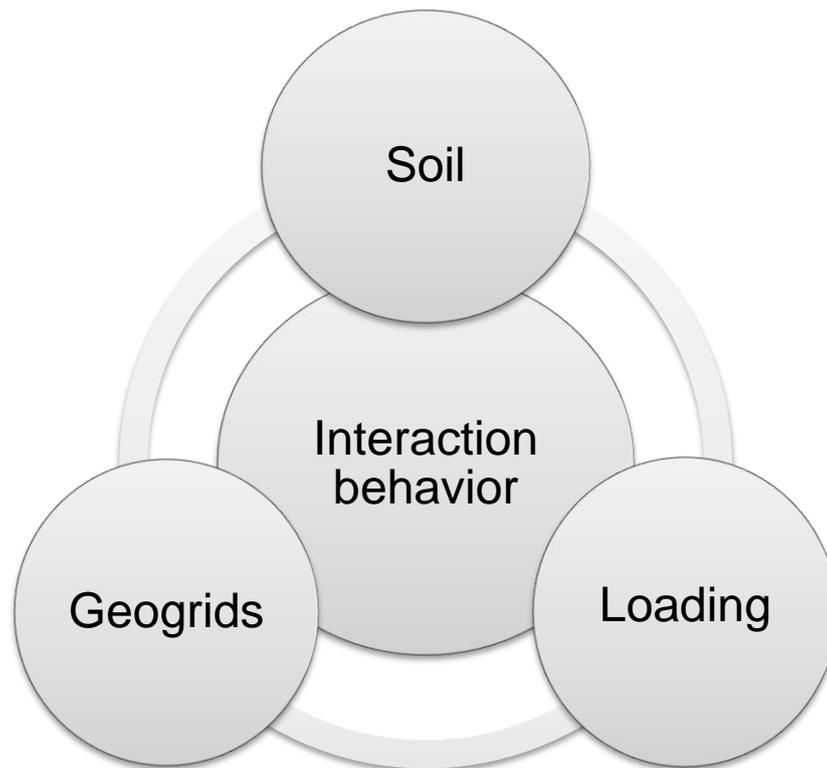


Diagram K.2 main interaction parameters

Our analysis showed us that the roughness of the geogrid has more of a beneficial impact on the strength of frictional soils than it does for silty soils. Silty soils however, were more affected by the height of cross elements in the geogrid than other types. It was also observed that 3D elements in the cross machine direction improve the interaction behavior. Tests with geogrids which have a bigger ratio of opening size to mesh size showed higher adhesion values. The friction test results were more regular, had a uniform progress and had smaller differences between geogrid configurations. Therefore, conclusions with higher certainty could be drawn from the pull-out tests with the differential results.

The present research contributes to the limited design information to help provide a better understanding of the interaction behavior. Furthermore, suggestions are given to use the laboratory detected results in real-world applications, one of which is the way of compaction to minimize the potential for creating a slip-surface between the geogrid and soil.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	V
Abstract	VII
Inhaltsverzeichnis	IX
Verzeichnis der Anhänge	XII
Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XVII
Abkürzungsverzeichnis	XIX
Symbolverzeichnis	XX
1 Einleitung	1
1.1 Einbettung und Betrachtung zum Stand des Wissens.....	1
1.1.1 Normative Einordnung	2
1.1.2 Einsatzmöglichkeiten von Bewehrungsgeokunststoffen	3
1.1.3 Verbund zwischen Geokunststoff und Lockergestein	12
1.1.4 Wirkungsweise und numerische Erfassung von Geogittern	19
1.2 Problemstellung	22
1.3 Ziele und Lösungswege	23
1.3.1 Arbeitsschwerpunkte und Arbeitshypothesen	23
1.3.2 Theoretische und experimentelle Untersuchungen	24
2 Versuchstechnik	26
2.1 Das Interaktionsprüfgerät (IPG).....	26
2.2 Versuchsarten	29

2.3	Versuchsdurchführung.....	31
2.4	Versuchsauswertung	33
3	Experimentelle Vorarbeiten	38
3.1	Auswahl des Lockergesteins	38
3.2	Auswahl der Geogitter	42
3.3	Auswahl des Bindemittels.....	45
3.4	Experimentelle Voruntersuchungen	46
3.4.1	Experimentelle Untersuchungen zur Klärung der Versuchsgeschwindigkeit ..	46
3.4.2	Experimentelle Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse	47
3.4.3	Experimentelle Untersuchungen zur Mehrstufentechnik	49
4	Hauptuntersuchungen	55
4.1	Programm und Ergebnisse der Scherversuche	55
4.2	Programm und Ergebnisse Reibungsversuche (IRV)	60
4.2.1	IRV unter Verwendung des Schluffs aus Canitz mit einem Sandgehalt von 50% (CS5).....	60
4.2.2	IRV unter Verwendung des Kaolins (KL)	63
4.2.3	Schlussfolgerungen aus den Reibungsversuchen.....	66
4.3	Programm und Ergebnisse Herausziehversuche (IPV)	68
4.3.1	IPV unter Verwendung von Schluff aus Canitz mit einem Sandgehalt von 50% (CS5).....	69
4.3.2	IPV unter Verwendung des Kaolins.....	73
4.3.3	IPV unter Verwendung des Hohenbockaer Glassands	76
4.3.4	Schlussfolgerungen aus den Herausziehversuchen.....	79
4.4	Ergebnisse der Hauptversuchsserie	84

5	Detailuntersuchungen	87
5.1	Untersuchung der Oberflächenbeschaffenheit der Geogitter	87
5.2	Untersuchungen zum Einfluss der Querelemente	92
5.3	Versuchsprogramm und Versuchsergebnisse mit Bodenbehandlung	100
5.4	Betrachtungen zu dem Einfluss einer geschwächten Lockergesteinszone...	110
6	Geräteentwicklung	114
7	Zusammenfassung	117
7.1	Untersuchungen und Ergebnisse	117
7.2	Schlussfolgerungen	121
8	Ausblick	127
9	Literaturverzeichnis	128
9.1	Normen und technische Richtlinien	128
9.2	Literatur	130

Verzeichnis der Anhänge

A	Ergebnisse der Großrahmenscherversuche.....	A-1
B	Ergebnisse der Großrahmenreibungversuche mit CS5	B-1
C	Ergebnisse der Großrahmenreibungversuche mit KL	C-1
D	Ergebnisse der Großrahmenherausziehversuche mit CS5	D-1
E	Ergebnisse der Großrahmenherausziehversuche mit KL	E-1
F	Ergebnisse der Großrahmenherausziehversuche mit HB	F-1

Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1	Wirkungsweise eines Geokunststoffs als Tragschichtbewehrung aus [6]	4
Bild 1.2	Freigelegter Geokunststoff in einer Baustraße, nach mehrfachem Befahren	5
Bild 1.3	Spannungsverteilung unter einer bewehrten bzw. unbewehrten Schottertragschicht aus [48]	6
Bild 1.4	Ideale Kornverteilung für ungebundene Tragschichten nach [N23] aus [48].....	7
Bild 1.5	Geokunststoffbewehrte Stützkonstruktion mit Bezeichnungen aus [N16]	9
Bild 1.6	Erstellung einer KBE-Konstruktion, Sportplatz in der Schweiz aus [7]	10
Bild 1.7	Bewehrter Erdkörper mit zwei möglichen Versagensmechanismen aus [N16]	11
Bild 1.8	Detaildarstellung der Mechanismen zwischen aktivem und passivem Bereich aus [9]	12
Bild 1.9	Spannungsabhängige Verbundbeiwerte für Reibung nach [33]	13
Bild 1.10	Anwendung des deutschen und des amerikanischen Kriteriums für die optimale Maschenweite aus [38]	14
Bild 1.11	Mechanismen der Kraftübertragung in Abhängigkeit der Form nach [70] aus [81].....	15
Bild 1.12	Einfluss des Abstandes zwischen den Querelementen nach [28] aus [71].....	17
Bild 1.13	Ansatz zur Beschreibung der tragfähigkeitserhöhenden Wirkung mittels zusätzlicher Kohäsion nach [85] aus [81].....	19
Bild 1.14	Ansatz zur Beschreibung der tragfähigkeitserhöhenden Wirkung mittels zusätzlicher Stützwirkung nach [41] aus [81]	20
Bild 2.1	Geokunststoff-Boden-Interaktionsprüfgerät (IPG).....	26

Bild 2.2	Schnitt des Interaktionsprüfgerätes	28
Bild 2.3	Inlayrahmen zur Entkopplung des Probeneinbaus	29
Bild 2.4	Schematische Darstellung der Schubspannungen: a) im Herausziehversuch; b) im Reibungsversuch; c) im Scherversuch	34
Bild 2.5	Streubereich im Reibungsversuch zwischen Sand und Geotextil nach [32] (Ringanalyse 1995 und 1996) aus [89]	37
Bild 3.1	Körnungslinie und Proctorkurve des Canitz-Schluffs (Can)	38
Bild 3.2	Körnungslinie und Proctorkurve des Canitz-Schluffs mit 50% Sand (CS5)	39
Bild 3.3	Analyseergebnisse der externen Laborprüfung aus [96]	40
Bild 3.4	Körnungslinie und Proctorkurve des Kaolins (KL).....	41
Bild 3.5	Körnungslinie und Proctorkurve des Hohenbockaer Glassands (HB)	42
Bild 3.6	Erfahrungswerte zur Stabilisierung mit Mischbindern aus [107].....	45
Bild 3.7	Darstellung von Scherversuchen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten	47
Bild 3.8	Wiederholung von Mehrstufen- und Einstufen-Scherversuchen mit Lockergestein CS5.....	48
Bild 3.9	Wiederholung eines Herausziehversuchs mit Geogitter 11	49
Bild 3.10	Mehrstufenherausziehversuche mit Geogrid 5 im τ/σ -Diagramm	51
Bild 3.11	Mehrstufenherausziehversuche mit Geogitter 3 im τ/σ -Diagramm	52
Bild 3.12	Mehrstufenherausziehversuche mit Geogitter 2 im τ/σ -Diagramm	53
Bild 3.13	Mehrstufenreibungversuche mit Geogitter 8 im τ/σ -Diagramm.....	53
Bild 4.1	τ/σ -Diagramm der Scherversuche an CS5	56
Bild 4.2	Aufnahmen des Mat. 6 (links) und des Mat. 8 nach dem Reibungsversuch mit Kaolin	68

Bild 4.3	Aufnahmen des Mat. 12 nach dem Herausziehversuch mit CS5	73
Bild 4.4	Schubspannungsverläufe verschiedener Geogitter im Herausziehversuch bei einer Normalspannung von ca. 30 kN/m ² und dem Bodenmaterial CS5	84
Bild 4.5	Schubspannungsverläufe verschiedener Geogitter im Reibungsversuch bei einer Normalspannung von ca. 25 kN/m ² und dem Bodenmaterial CS5	86
Bild 5.1	Bestimmung der Rautiefe der biaxialen Produkte (Materialien 2, 4, 6, 8, 10, 12)	88
Bild 5.2	Bestimmung der Rautiefe der einaxialen Produkte (Materialien 1, 3, 5, 7, 9, 11)	89
Bild 5.3	Bestimmung der gemittelten Rautiefe R_z aus [36]	90
Bild 5.4	Unterschiedliche Profile mit gleichem Mittelrauwert aus [36]	91
Bild 5.5	Mobilisierter Bereich vor den Querelementen "Pflug-Effekt" aus [113]	93
Bild 5.6	Materialien 3, 5 und 9 nach dem Entfernen der Querelemente	95
Bild 5.7	Korrelationsanalyse Schubspannung/normierte Rautiefe der Herausziehversuche mit CS5 bei einer Normalspannung von 10 kN/m ² (oben) und 30 kN/m ² (unten)	98
Bild 5.8	Projektbilder mit kombinierten Einsatz von Geokunststoffen und Bodenbehandlung aus [47] und [84]	101
Bild 5.9	Gemeinsamer Einsatz von Geogittern und Bodenbehandlung über Pfählen bei der Ertüchtigung der Bahnstrecke Hamburg - Berlin aus [95]	102
Bild 5.10	Für die Homogenisierung und fürs Mischen verwendeter Zwangsmischer	103
Bild 5.11	τ/σ -Diagramm der Scherversuche an dem behandelten CS5	104
Bild 5.12	Schubspannungsverläufe verschiedener Herausziehversuche mit Mischbinder bei einer Normalspannung von 10 kN/m ²	105

Bild 5.13	Horizontalverschiebungen der Wegaufnehmer und der Klemmeinheit in einem Herausziehversuch mit Mischbinder und "Klebeverbund")	106
Bild 5.14	τ/σ -Diagramm der Scherversuche an behandelten bindigem Lockergestein, aber mit Trennfläche in Höhe der Scherzone.....	109
Bild 5.15	Ergebnisse der einaxialen Druckversuch nach DIN 18136 an CS5 mit und ohne Mischbinder.....	110
Bild 5.16	τ/σ -Diagramm der Scherversuche an CS5, aber mit Trennfläche in Höhe der Scherzone	111
Bild 5.17	Bilder eines Scherversuchs mit Trennfläche an CS5, bei dem die Trennfläche zu hoch angeordnet wurde	112
Bild 5.18	Bilde eines Scherversuchs mit Trennfläche an CS5, bei dem die Trennfläche sich in Höhe der Scherzone befunden hat.....	112
Bild 6.1	Großtriaxialgerät TA-3D (Probe, Druckluftkissen, Seitenplatten)	115
Bild 6.2	Großtriaxialgerät TA-3D (Draufsicht, Messtechnik).....	116
Bild 7.1	Interaktionsverhalten beeinflussende Faktoren.....	122
Bild 7.2	EDV-gestützte Bemessung der Böschungstabilität nach Bishop.....	124
Bild 7.3	Scherfugen in Detailausschnitten im unbewehrten und geogitterbewehrten Boden aus [81].....	125

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Technische Parameter des Interaktionsprüfgerätes.....	27
Tab. 2.2	Einbaubedingungen	32
Tab. 3.1	Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen am CS5.....	39
Tab. 3.2	Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen am KL.....	41
Tab. 3.3	Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen am HB.....	41
Tab. 3.4	Geometrische Eigenschaften der einaxialen Geogitter.....	43
Tab. 3.5	Geometrische Eigenschaften der biaxialen Geogitter	43
Tab. 4.1	Ergebnisse der Scherversuche (ISV)	57
Tab. 4.2	Gegenüberstellung der Scherversuche mit den unterschiedlichen Bodenmaterialien unter Berücksichtigung des Weges beim Maximalwert der Schubspannung	58
Tab. 4.3	Reihenfolge der Ergebnisse der Scherversuche an verschiedenen Lockergesteinen.....	59
Tab. 4.4	Statistische Auswertung der einaxialen Reibungsversuche mit CS5	61
Tab. 4.5	Ergebnisse der Reibungsversuche (IRV) mit Bodenmaterial CS5	62
Tab. 4.6	Statistische Auswertung der biaxialen Reibungsversuche mit CS5	63
Tab. 4.7	Statistische Auswertung der einaxialen Reibungsversuche mit KL	64
Tab. 4.8	Ergebnisse der Reibungsversuche (IRV) mit Bodenmaterial KL	65
Tab. 4.9	Statistische Auswertung der biaxialen Reibungsversuche mit KL	66
Tab. 4.10	Statistische Auswertung der einaxialen Herausziehversuche mit CS5	70
Tab. 4.11	Ergebnisse der Herausziehversuche (IPV) mit Bodenmaterial CS5.....	71

Tab. 4.12	Statistische Auswertung der biaxialen Herausziehversuche mit CS5	72
Tab. 4.13	Statistische Auswertung der einaxialen Herausziehversuche mit KL	74
Tab. 4.14	Ergebnisse der Herausziehversuche (IPV) mit Bodenmaterial KL	75
Tab. 4.15	Statistische Auswertung der biaxialen Herausziehversuche mit KL	76
Tab. 4.16	Statistische Auswertung der einaxialen Herausziehversuche mit HB	77
Tab. 4.17	Ergebnisse der Herausziehversuche (IPV) mit Bodenmaterial HB.....	78
Tab. 4.18	Statistische Auswertung der biaxialen Herausziehversuche mit HB	79
Tab. 5.1	Ergebnisse der Rautiefenermittlung	91
Tab. 5.2	Ergebnisse der Herausziehversuche mit und ohne Querelemente (QE) ...	96
Tab. 5.3	Schubspannung bei 10 kN/m ² der Herausziehversuche mit den Materialien 9, 13, 14 mit und ohne Querelemente (QE) und CS5	99
Tab. 5.4	Ergebnisse der Scherversuche an CS5 mit und ohne Mischbinder	105
Tab. 5.5	Ergebnisse der Herausziehversuche (IPV) mit Bodenmaterial CS5 und Bodenbehandlung	108
Tab. 7.1	Aufstellung der durchgeführten experimentellen Versuche	120

Abkürzungsverzeichnis

2-D	zweidimensionale	HB	Hohenbockaer Glassand
3-D	dreidimensionale	IPG	Interaktionsprüfgerät
bzgl.	bezüglich	KBE	kunststoffbewehrte Erde
bzw.	beziehungsweise	KL	Kaolin
Can	Canitz-Schluff	PET	Polyester
CS3	Canitz-Schluff mit 30 % Sand	PP	Polypropylen
CS5	Canitz-Schluff mit 50 % Sand	PVA	Polyvinylalkohol
d. h.	das heißt	QE	Querelemente
DGGT	Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.	SO ₄	Sulfatgehalt
GZ 1	Grenzzustand der Tragfähigkeit	u. a.	unter anderem
GZ 2	Grenzzustand der Gebrauchs tauglichkeit	V	Versuch
		z. B.	zum Beispiel

Symbolverzeichnis

A_{GEO}	Fläche des Geokunststoffs	R_{cQ}	Querelementebeiwert für Kohäsion
A_{Scher}	Fläche des Scherkastens	$R_k(\sigma')$	spannungsabhängiger Verbundbeiwert
c	Kohäsion	R_{max}	maximale Einzelrautiefe
c_{oQE}	Adhäsion ohne Querelemente	R_z	gemittelte Rautiefe
c_{REF}	Kohäsion des Referenzversuchs	$R_z(i)$	größten Profilsitzen
d_{50}	Korndurchmesser bei 50% Siebdurchgang	R_φ	Verbundbeiwert des Reibungswinkels
d_{80}	Korndurchmesser bei 80% Siebdurchgang	$R_{\varphi Q}$	Querelementebeiwert für Reibung
F	Herausziehkraft	S	Dehnsteifigkeit
I_P	Plastizitätszahl	w_E	Einbauwassergehalt
I_r	Einzelmessstrecke	w_L	Fließgrenze
I_{SK}	Länge des Herausziehkastens	w_{OPT}	Optimaler Wassergehalt
I_w	Maschenweite des Geogitters	w_P	Ausrollgrenze
$maxQ_d$	dichteste Lagerung	z	Ordinatenwert
m_E	Einbaumenge (feucht)	Z_{s0r}	Herausziehkraft ohne Querelementen
m_{Ed}	Einbaumenge (trocken)	Z_{si}	Herausziehkraft mit i Querelementen
$minQ_d$	lockerste Lagerung	q_{dE}	Einbaudichte (trocken)
p_{si}	Pflugfaktor	q_{PR}	Proctordichte
R_a	arithmetische Mittelrauwert	q_S	Korndichte
$R_{B,k0}$	charakteristischer Wert der Kurzzeitfestigkeit des Geokunststoffes	σ	Spannung
R_c	Verbundbeiwerte der Kohäsion		

σ'	wirksame Spannung	τ_{REF}	Schubspannung des Referenzversuchs
σ_{max}	Schubspannung bei der die charakteristische Kurzzeitfestigkeit des Geogitters erreicht wird	φ	Reibungswinkel
		φ_{oQE}	Reibungswinkel ohne Querelemente
τ	Schubspannung	φ_{REF}	Reibungswinkel des Referenzversuchs

1 Einleitung

1.1 Einbettung und Betrachtung zum Stand des Wissens

Geokunststoffe haben die Geotechnik in den letzten Jahrzehnten wie kein anderes Bauprodukt beeinflusst und verändert [2]. Zu Beginn wurden Geokunststoffe nur fürs "Trennen" eingesetzt, beispielsweise für die Separierung zweier Bodenschichten. Heute steht "Geokunststoffe" als Oberbegriff für die ursprünglich als Geotextilien bezeichneten Produkte, welche für die Funktionen Trennen, Dichten, Filtern, Dränen, Bewehren, Schützen gegen Oberflächenerosion und Schützen gegen Penetration von Dichtungsbahnen eingesetzt werden [N13]. Mit der neuen Bezeichnung wird nun berücksichtigt, dass nicht alle Produkte ein textiles Herstellungsverfahren haben [66]. Gebräuchliche Geokunststoffe sind unter anderem: Vliesstoffe, Geogitter, Bändchengewebe, Drahtwirrlagen, Filtergewebe, Bentonitmatten, Geozellen und Dichtungsbahnen. Die DIN EN ISO 10318 [N13] zeigt weiterhin auf, welche Anwendungen mit Geokunststoffen möglich sind: Rückhaltebecken und Staudämme, Klärteiche und Sedimentationsanlagen, Kanäle, Feststoffdeponien, Straßen, Gründungen und Stützbauwerke, Eisenbahnunterbau, Erosionsschutzsysteme, Tunnel und erdberührte Bauwerke sowie Dränanlagen. Trotz der sehr vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Geokunststoffen und der sich daraus ergebenden Einsparmöglichkeiten sind Geokunststoffe immer noch ein Nischenprodukt, was sich unter anderem in der Tatsache zeigt, dass das Know-how hinsichtlich Bemessung usw. bei den Produzenten häufig umfangreicher ist als bei den Ingenieurbüros.

Für die sehr häufig vorkommende Funktion Bewehren werden für die Bewehrungsgeokunststoffe abhängig von den Anforderungen und Belastungen verschiedene Polymere eingesetzt. Nach Müller-Rochholz et al. [65] sind dies: Polyamid (PA), Aramid, Polyethylen (PE), Polyester (PET), Polypropylen (PP), Polyvinylalkohol (PVA), Glas, Karbon. Durch die Wahl der Rohstoffe können Eigenschaften wie z. B. Beständigkeit, Kurzzeit- und Langzeitverhalten, Dehnung usw. wesentlich beeinflusst werden [39]. Die Idee, den Boden durch die Einlage von Produkten zu verstärken ist nicht neu. Schon im 4. und 5. Jahrtausend vor Christus wurde Schilf und Stroh zur Verstärkung von Erde und Lehm eingesetzt. Als bedeutendes Beispiel für diese Bauweise gilt der ca. 1400 vor Christus erbaute Turm zu Babel (ca. 80 m hoch) in Mesopotamien (u. a. [14]). Aber erst nach 1960 wurde die Idee (Boden durch die Einlage von Produkten zu verstärken)

durch Vidal wieder aufgegriffen [99]. Seit dieser Zeit werden die dafür eingesetzten Produkte sowie Bemessungsverfahren stetig weiterentwickelt und angepasst.

Der Stand des Wissens bezüglich der Nutzung gering tragfähiger Böden für kunststoffbewehrte Erd- und Stützbauwerke, insbesondere hinsichtlich der Interaktion Geokunststoff bindiges Lockergestein, wird in den nachfolgenden Kapiteln betrachtet. Da das Verbundverhalten nicht bzw. nicht detailliert in den nationalen sowie internationalen Normen behandelt wird, wird in Kapitel 1.1.1 (Normative Einordnung) nicht auf die internationalen Regelungen im Detail eingegangen sondern der Stand der Technik kurz dargestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei bei den Regelungen in Deutschland. Von den vielen Einsatzmöglichkeiten, die Geokunststoffe bieten, wird im zweiten Unterkapitel "Einbettung und Betrachtung zum Stand des Wissens" insbesondere auf die Trag-schichtbewehrung und kunststoffbewehrte Erde (KBE) eingegangen. Die in dieser Arbeit gewonnenen Grundlagenkenntnisse finden hauptsächlich bei KBE-Konstruktionen ihre Anwendung. Damit die Geokunststoffe bei einem geokunststoffbewehrten Erdbauwerk Kräfte aufnehmen und somit die Tragfähigkeit erhöhen können, ist die Wechselwirkung zwischen Boden und Geogitter maßgeblich. Im Kapitel "Verbund zwischen Geokunststoff und Lockergestein" werden daher die Mechanismen zwischen beiden Elementen (Geokunststoff und Lockergestein) thematisiert. Das letzte Unterkapitel (Kapitel 1.1.4) betrachtet den Verbundstoff Geokunststoff/Boden, also die Wirkung, die die Kombination der beiden sehr unterschiedlichen Stoffe bewirkt und welche Ansätze es gibt, diesen "neuen Stoff" numerisch zu erfassen.

1.1.1 Normative Einordnung

Mit der letzten Fassung der "Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen" (EBGEO) [N16] ist dem Ingenieur ein umfassendes Werk an die Hand gegeben worden, in dem die gängigen Bauweisen mit Geokunststoffen geregelt werden. Die EBGEO erfreut sich einer großen Akzeptanz in der Fachwelt und stellt das aktuellste und umfassendste Werk zur Bemessung mit Geokunststoffen dar. Durch die englische Übersetzung der EBGEO gewinnt die Empfehlung auch international an Bedeutung.

Die EBGEO beruht auf der DIN 1054 (in der Fassung 2005-1) [N2] und den mitgeltenden Normen. Europäisch ist die Berechnung und Bemessung von bewehrten Schüttkörpern in der EN 1997-1 (Eurocode 7-1) [N17] geregelt. Nationale Regelungen dürfen nur noch widerspruchsfreie Ergänzungen zur europäischen Normung (Eurocode 7-1) darstellen. Die aktuelle Fassung der DIN 1054 (2010-12) [N3] hat daher auch den

Zusatz im Titel "Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1 [N12] und versteht sich als Anwendungsregel zum Eurocode 7-1. Detailliert ist die Bedeutung der normativen Änderungen auf die Nachweisführung, Teilsicherheitsbeiwerte etc. in [N16] beschrieben. Da sich diese Arbeit als Grundlagenforschung bzgl. des Verbundverhaltens von Geokunststoffen versteht, wird auf die unterschiedlichen internationalen Bemessungsverfahren und Richtlinien, wie zum Beispiel British Standard, ASTM, Chinesische Normen usw. nicht weiter eingegangen.

1.1.2 Einsatzmöglichkeiten von Bewehrungsgeokunststoffen

Für Geokunststoffe mit der Funktion "Bewehren" gibt es zwei Hauptanwendungsgebiete, zum Einen als Tragschichtbewehrung und zum Anderen in kunststoffbewehrten Erdkonstruktionen (KBE-Konstruktion). Weitere Anwendungen finden sich aber auch im Deponiebau sowie bei Bauten auf gering tragfähigem Untergrund. In der Literatur finden sich aber auch viele kombinierte Anwendungen, wie etwa die Kyoto-Straße, ein neues Straßenkonzept auf weichem Untergrund, welches 2005 in Giessenburg (NL) gebaut wurde [97]. In diesem Pilotversuch wurde ein extrem flacher Damm auf Holz-Pfählen gegründet und geogitterbewehrt auf gering tragfähigem und setzungsempfindlichem Untergrund erstellt. Oder die Versuche von Zheng et al. [110] die sich auf einen Expressway in China beziehen, bei denen ebenfalls vertikale Tragglieder mit einer Geokunststoffbewehrung kombiniert wurden.

Für die zuvor genannten Bewehrungsaufgaben sind Geogitter am gebräuchlichsten, aber auch Produkte mit einer flächigen Struktur, wie z. B. Bändchengewebe oder eventuell auch Vliese können fürs Bewehren eingesetzt werden [105].

Damit Bewehrungsgeokunststoffe Zugkräfte aufnehmen können sind aber bei allen Einsatzgebieten gewisse Verformungen notwendig. Zum einen haben Geokunststoffe gewisse Initialdehnungen bis sie Zugkräfte aufnehmen können, welche unter anderem vom Herstellungsverfahren und Rohstoff abhängig sind, und zum anderen muss ein kraftschlüssiger Verbund zwischen Lockergestein und Geokunststoff entstehen, wozu es ebenfalls einer Verformung bedarf. Lackner et al. [61] zeigen, dass durch eine spezielle Verdichtung eine Vorspannung des Geokunststoffs erzeugt werden kann, wodurch die Verformungen reduziert werden können. Auch andere Autoren beschreiben in Ihren Veröffentlichungen Verfahren zur Reduzierung der Verformung. Detert et al. berichten von einer Vorspannung mit dem Bagger [27] und Wehrli beschreibt eine

Vorspannung durch einen Verankerungsgraben bei einem mit Geogittern rückverankertem Brückenwiderlager [104].

Alleine in Deutschland werden pro Jahr mehrere Millionen Quadratmeter Geogitter als Bewehrung ungebundener Tragschichten eingebaut [49]. Als Tragschichtbewehrungen hat der Bewehrungsgeokunststoff die Aufgabe, die Tragfähigkeit einer Schicht zu erhöhen bzw. bei gleicher Tragfähigkeit die notwendige Schichtstärke zu reduzieren, Setzungen zu vergleichmäßigen sowie Bereiche mit geringen Tragfähigkeiten zu überbrücken, wodurch der Einsatz von mineralischem Tragschichtmaterial häufig reduziert werden kann und ein wirtschaftlicher Vorteil entsteht [10]. Um dies zu erreichen muss durch den Geokunststoff eine Rückverankerung und Lastverteilung erfolgen. Für diese tragfähigkeitserhöhende Wirkung bedarf es aber einer ausreichenden Verformung [79]. Feldversuche in der Schweiz [103] haben gezeigt, dass bei einer Baustraße, auf weichem bis sehr weichem Untergrund, Dehnungen in den Geokunststoffen von 1-2% auftreten. Weiterhin wurde aus den Feldversuchen in der Schweiz abgeleitet, dass die zur Bewehrung eingesetzten Produkte eine gewisse Dehnsteifigkeit ($S=400-600$ kN/m) haben sollten ([79] und [N22]). Eine Dehnsteifigkeit von 400 kN/m entspricht einer Kraftaufnahme von mindestens 8 kN/m bei 2% Dehnung.

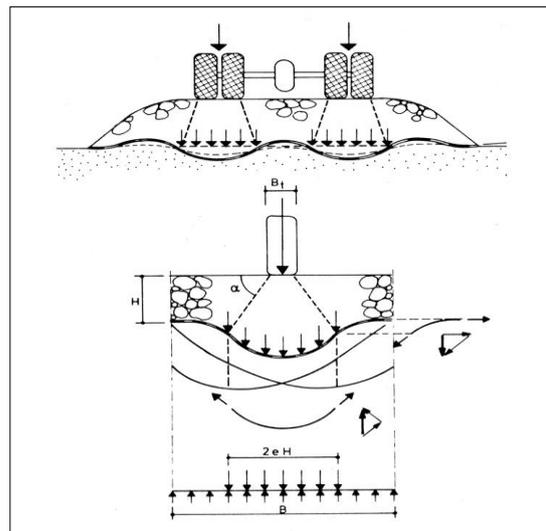


Bild 1.1 Wirkungsweise eines Geokunststoffs als Tragschichtbewehrung aus [6]
(*effectiveness of geosynthetics as reinforcement in a bearing layer from [6]*)

Rolliges Lockergestein kann sehr gut Druckkräfte, aber nahezu keine Zugkräfte aufnehmen. Das System "Geokunststoff/Lockergestein" kann Zugkräfte aufnehmen, wodurch Setzungen reduziert und die Lastverteilung optimiert wird. Das Einlegen einer Geogitterlage zur Verbesserung des Lastverformungsverhaltens ist insbesondere in

Bereichen mit gering tragfähigen Böden heute übliche Praxis [62]. Bild 1.1 zeigt schematisch die Wirkungsweise einer Geokunststoffbewehrung in einer Foundationsschicht. Der freigelegte Geokunststoff in Bild 1.2, aufgenommen nach mehrfachem Befahren einer temporären Baustraße, zeigt eben diese zuvor schematische dargestellte Verformung des Geokunststoffes.



Bild 1.2 Freigelegter Geokunststoff in einer Baustraße, nach mehrfachem Befahren
(*geosynthetic in a construction road after multiple pass overs*)

Die Schottertragschicht bewirkt eine Lastverteilung, wodurch die den weichen bzw. gering tragfähigen Untergrund belastenden Spannungen reduziert werden (Bild 1.3). Der Geokunststoff wirkt über dem Untergrund wie eine Membran (*“Membrane Effect“*, u. A. [110]), die Belastung ruft eine Dehnung in der Bewehrung hervor und es treten begrenzte Setzungen in dem belasteten Bereich auf. Der nicht belastete Bereich der Bewehrung (außerhalb des Lastausbreitungswinkels) wirkt als Verankerung und reduziert die vertikalen Verformungen im Bereich der Belastung. Die Verankerungswirkung wird durch Schubspannungen an beiden Seiten des Geokunststoffs erzeugt, welche durch Reibung und/oder Verzahnung in das Lockergestein übertragen werden. Weiterhin kann durch ein Geogitter auch die Tragschicht stabilisiert werden. Die stabilisierende Wirkung von Geokunststoffen wird aktuell in den verschiedenen Ausschüssen (z. B. ISO, CEN, DIN, FGSV usw.) intensiv diskutiert [60]. In dem technischen Report TR041 [N18] der EOTA ist die Stabilisation definiert als die Beschränkung der Bewegung der Partikel einer ungebundenen granularen Schicht unter Auflast, welche durch „Interlock-

ing-Mechanismen“ der Geogitterstruktur hervorgerufen wird. Die *EOTA Technical Reports* wurden entwickelt als Referenzdokument für *“European Technical Approval Guidelines“*.

Auf die Interaktionsmechanismen wird ausführlich in Kapitel 1.1.3 “Verbund zwischen Geokunststoff und Lockergestein“ eingegangen.

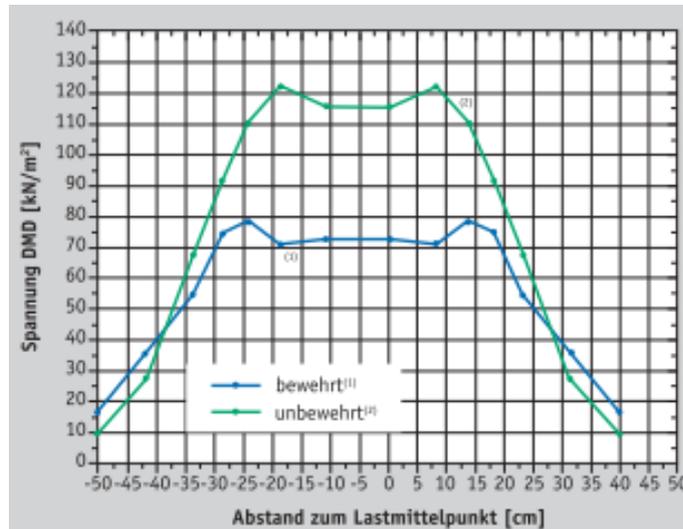


Bild 1.3 Spannungsverteilung unter einer bewehrten bzw. unbewehrten Schottertragschicht aus [48]
(*stress distribution under a gravel bearing layer with and without geosynthetics from [48]*)

Das Kraft-Dehnungsverhalten nimmt unter anderem Einfluss auf die Setzungen an der Oberfläche, geringere Dehnungen bedeuten dabei kleinere Setzung und Verformungen auf der Tragschicht ([24] & [37]). Die im eingebauten Zustand auftretenden Dehnungen sind aber nicht direkt aus dem Zugversuch am breiten Streifen nach DIN EN ISO 10319 (2008) [N14] übertragbar, da neben dem Kraftdehnungsverhalten noch weitere Eigenschaften des Geokunststoffs sowie des Lockergesteins die Dehnung des Geokunststoffs im eingebauten Zustand beeinflussen, weshalb verschiedene Geokunststoffhersteller produktspezifische Bemessungsdiagramme haben, die die makroskopischen Effekte berücksichtigen [48]. Bei Dauerbauwerken muss zusätzlich zu der Dehnung des Geokunststoffes das Zeitstand-Verhalten (Kriechen) berücksichtigt werden [6] und [65].

Damit eine Fundations- bzw. Tragschicht wirtschaftlich bemessen werden kann, sind folgende projektspezifische Angaben nötig (aus [105], modifiziert):

- Vorgesehener Aufbau
- Tragfähigkeitsanforderung an die Oberseite der Tragschicht
- Beschreibung und Tragfähigkeit des Untergrunds
- Belastung (Last, Häufigkeit und Dauer)
- Eventueller Rückbau
- Stand des Grundwasserspiegels

Da die Tragfähigkeit des Untergrunds teilweise (aus den verschiedensten Gründen) nicht in Feldversuchen ermittelt wird, werden in der Broschüre des IVGs [48], in dem Beitrag von Floss (Über den Zusammenhang zwischen Verdichtung und dem Verformungsmodul von Böden) [30] sowie der RIL 836 [N21] Richtwerte für den Verformungsmodul angegeben. Weiterhin gibt die TL SoB-StB 04 [N23] Hinweise zu der idealen Kornverteilung für ungebundene Tragschichten (Bild 1.4), unter anderem sollte der Schlämmkornanteil ($< 0,063$ mm) weniger als 7% betragen.

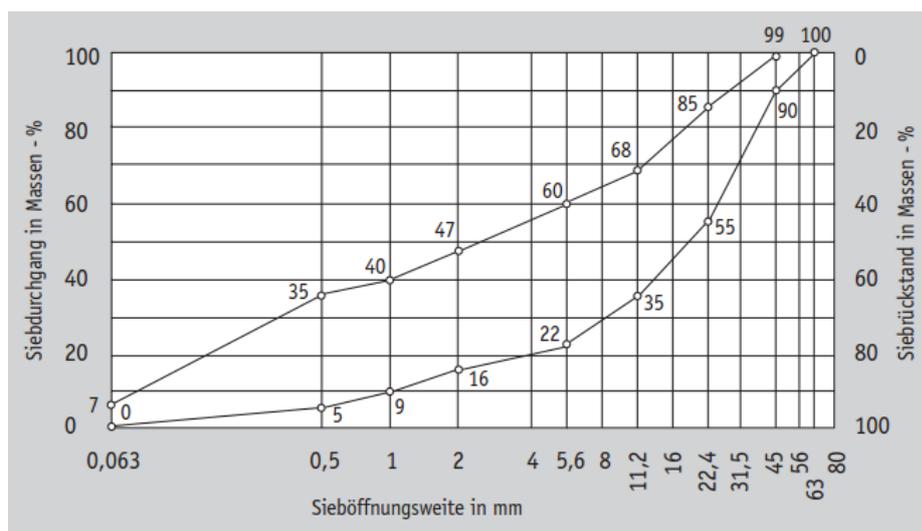


Bild 1.4 Ideale Kornverteilung für ungebundene Tragschichten nach [N23] aus [48]
(*optimal grain size distribution for unbounded bearing layers to [N23] from [48]*)

Aufgrund der unterschiedlichen technischen Werte, Eigenschaften und Funktionsweisen der auf dem Markt verfügbaren Geokunststoffe, ist es äußerst schwierig, die Produkte direkt anhand von technischen Datenblättern untereinander zu vergleichen. Zwar gibt es Mindestanforderungen an die Produkte ([79] und [N22]), aber der Hinweis in der

EBGEO [N16], dass keine allgemeingültigen Bemessungsregeln vorliegen, lässt erahnen, wie komplex das Tragverhalten von bewehrten Tragschichten ist.

Die Anforderungen an ein geeignetes Produkt werden maßgeblich von der gewünschten Tragfähigkeit auf der Tragschicht beeinflusst. Hierbei wird die Leistungsfähigkeit des Geokunststoffs im eingebauten Zustand, also im Verbund "Geokunststoff-Boden" beurteilt. Da die Leistungsfähigkeit von sehr vielen projekt- und produktspezifischen Parametern abhängig ist, verweist die EBGEO explizit auf die Erfahrungswerte der Hersteller [N16]. Den in der EBGEO angegebenen Werten (mögliche Achsübergänge und Schichtmächtigkeit der bewehrten Tragschicht) für den Aufbau einer Tragschicht liegt ein sehr konservativer Ansatz zugrunde, wie unter anderem eine Gegenüberstellung möglicher Achsübergänge nach EBGEO und nach produktspezifischen Bemessungsdiagrammen zeigt [48]. Der produktspezifische Ansatz ergab ein Mehrfaches der nach EBGEO ermittelten Achsübergänge.

Damit aber eine Tragschicht die geforderte Tragfähigkeit erreicht, ist neben dem Schüttmaterial, dem Geokunststoff und der Aufbauhöhe auch die Verdichtung ein wesentlicher Faktor. Hinweise zur Verdichtung geben die DIN 18300 "VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Erdarbeiten" [N8] sowie ZTVE-StB [31], unter anderem darf das einzubauende Größtkorn nicht größer als $\frac{2}{3}$ der Schütthöhe sein. Der Plattendruckversuch [N5] ist zur Überprüfung der Verdichtung sowie der Tragfähigkeit das gebräuchlichste Verfahren. Trotz ausreichender Verdichtungsenergie kommt es bei Baumaßnahmen aber immer wieder vor, dass die geforderte Verdichtung und Tragfähigkeit nicht erreicht wird. Meist ist in diesen Fällen ein zu hoher Wassergehalt des Schüttmaterials (mit Feinkornanteil) die Ursache [106]. Das Wasser verhindert bzw. behindert die Verdichtung des Lockergesteins [98]. Der zu hohe Wassergehalt des Schüttmaterials kann in der Höhe des Grundwasserspiegels begründet sein, wodurch eine gesonderte Maßnahme notwendig wird, oder mit den Witterungsverhältnissen zusammen hängen. Eine weitere Ursache für eine zu geringe Tragfähigkeit kann darin bestehen, dass der Plattendruckversuch mit einem zu geringen zeitlichen Abstand von der Erstellung der Tragschicht durchgeführt wurde [106].

Zuvor wurde die Wirkungsweise von Geokunststoffen als Bewehrung von Tragschichten aus ungebundenen Gemischen erläutert. Das zweite Hauptanwendungsgebiet von Bewehrungsgeokunststoffen sind KBE-Konstruktionen. Bei Bauwerken aus kunststoffbewehrter Erde werden als Bewehrung fast ausschließlich Geogitter verwendet, da

diese sich aufgrund der offenen Struktur sowie der guten technischen Eigenschaften besonders eignen (siehe dazu auch Kapitel 1.1.3, Verbund zwischen Geokunststoff und Lockergestein). Bild 1.5 zeigt den Aufbau einer solchen kunststoffbewehrten Erdkonstruktion, mit den in den Füllböden eingelegten Bewehrungslagen, durch die ein bewehrter Erdkörper entsteht. Für die Front einer solchen Konstruktion gibt es die verschiedensten Ausbildungen: Paneele, Blockelemente, Formsteine, geschweißte Stahlgitter, Gabionen und das Umschlagverfahren bzw. die Polsterwandbauweise. Darüber hinaus stellen Izawa et al. ein Verfahren vor, bei dem in der Front eine Kombination aus Boden, Zement und Fasern (*soil, cement & short fibres*) eingesetzt wird, wodurch die Kraftaufnahme und die Dauerhaftigkeit erhöht und die Herstellungskosten sowie die Entsorgung von Bodenmaterial reduziert werden [51]. Positive Effekte auf die Scherparameter des mit Fasern aufbereiteten Lockergesteins konnte auch Hornig nachweisen [45].

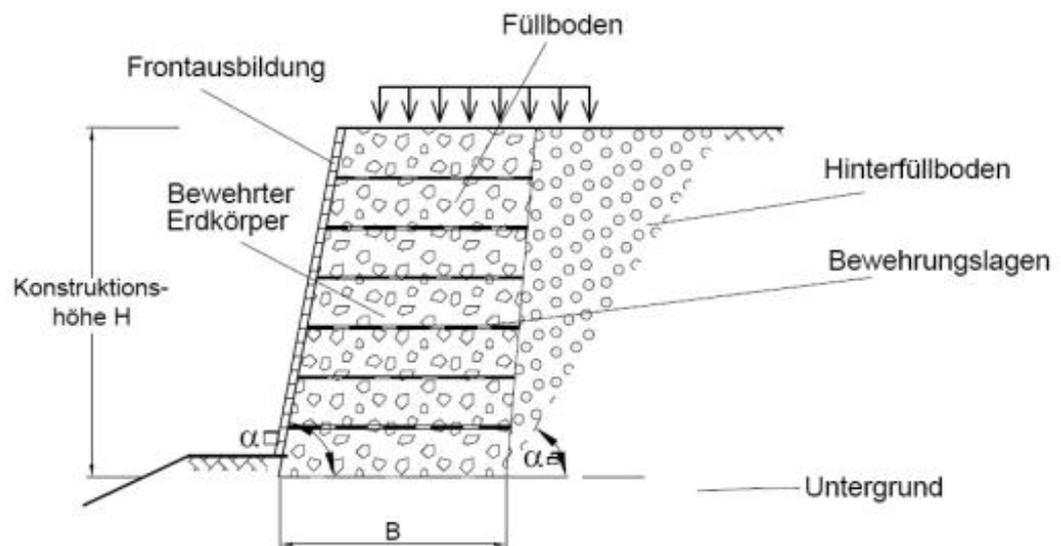


Bild 1.5 Geokunststoffbewehrte Stützkonstruktion mit Bezeichnungen aus [N16] (*geosynthetically reinforced supporting structure from [N16]*)

Für den Entwurf einer KBE-Konstruktion bei normalen Baugrundverhältnissen werden in der EBGEO [N16] Richtwerte genannt: für einen Vorentwurf wird eine Bewehrungslänge von 70% der Bauwerkshöhe empfohlen sowie ein Lagenabstand von 30 bis 60 cm. Diese Werte gelten aber nur für annähernd horizontales Gelände und rolliges Lockergestein als Füllmaterial.

In Bild 1.6 sind zwei Fotos von der Erstellung einer bewehrten Stützkonstruktion dargestellt (s. a. [8]). Die Front in dieser Baumaßnahme wurde mit vorgebogenen Stahlgit-

terelementen (unverzinkt) realisiert, die auch als verlorene Schalung dienen. Die verwendeten Geogitter wurden lagenweise eingebaut, im Frontbereich umgeschlagen (so dass der vordere Bereich zusätzlich gehalten wird) und das Füllmaterial lagenweise verdichtet. Weiterhin ist auf den Bildern die Drainagematte (weißes Produkt) zu sehen, welche hinter dem Füllkörper eingebaut wurde, um Porenwasserüberdrücke sowie Ausschwemmungen von Feinanteilen zu vermeiden [7].



Bild 1.6 Erstellung einer KBE-Konstruktion, Sportplatz in der Schweiz aus [7]
(*construction of a geosynthetic reinforced steep slope, sports field in Switzerland from [7]*)

Die Idee hinter der KBE-Bauweise ist, dass durch den lagenweisen Einbau von Produkten, die Zugkräfte aufnehmen können, mögliche Gleitflächen unterbrochen werden. In Bild 1.7 sind zwei Bruch- bzw. Gleitkörper dargestellt, die die beiden möglichen inneren Versagensmechanismen darstellen. In Fall "A" wird von dem Bruchkörper keine der Geokunststofflagen geschnitten und der "aktive Bereich" würde auf der Geokunststofflage abgleiten. Dieser Versagensmechanismus (A) wird mit dem Verfahren der Starrkörperbruchmechanismen oder Blockgleitmethode nach DIN 4084 [N9] berechnet [23]. Die für diesen Versagensfall maßgeblichen Geokunststoffeigenschaften können im Reibungsversuch (Kapitel 2.1) ermittelt werden.

Der zweite Versagensmechanismus ist in Bild 1.7 mit "B" gekennzeichnet, die Kreisgleitfläche (nach Bishop [N9]) schneidet die Geokunststofflagen, der aktive Bereich würde auf der kreisförmigen Gleitlinie abrutschen. Die Geokunststoffbewehrung, welche in den passiven Bereich der bewehrten Konstruktion reicht, wirkt aber zurückhaltend (Bild 1.8). Dieser Teil der Bewehrung fungiert als Verankerung und wird auf Herausziehen beansprucht. Im Labor kann der maximale Herausziehungswiderstand im Herausziehversuch bzw. Pull-Out-Versuch ermittelt werden (Kapitel 2.1).



Bild 1.7 Bewehrter Erdkörper mit zwei möglichen Versagensmechanismen aus [N16]
(geosynthetically reinforced steep slope with two failure mechanisms from [N16])

Der Boden kann methodisch verbessert werden, wodurch er zusätzliche Zugkräfte aufnehmen kann, die es ermöglichen, übersteile Böschungen (bis 90°) zu errichten. Ohne Geokunststoffe bzw. ohne konventionelle Stützkonstruktionen wäre das nicht möglich. Weiterhin sind KBE-Konstruktionen sehr gutmütig bei Erdbeben (u. A. [35] und [51]). Der überwiegende Teil der zu erwartenden Verformungen tritt bereits während der Bauwerkserstellung ein ([44] und [112]) und KBE-Konstruktionen verfügen über erhebliche Reserven hinsichtlich Geländebruch [22]. Ein Grund für die deutlich höhere Belastbarkeit ist, dass für die Bemessung ein linearer Ansatz ([113] und [N16]) verwendet wird, also die Annahme, dass mit einer Verlängerung der Verankerungslänge der Herauszieh Widerstand linear ansteigt. Auf diese Thematik wird in Kapitel 1.1.3 explizit eingegangen. Huang und Bathurst haben eine große Anzahl Pull-out-Testergebnisse zusammengestellt, welche für statistische Auswertungen verwendet werden können. Sie bemängeln aber, dass es zu wenig objektspezifische Ergebnisse von Herausziehversuchen gibt [46].

Nach DIN 1054 [N3] ist die Bemessung nach zwei Nachweiskonzepten zu führen. Zum Einen ist es der Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZ 1) und zum Anderen der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZ 2). Im Grenzzustand 1 wird der Verlust der Lagesicherheit, das Versagen von Bauwerken und Bauteilen sowie der Verlust der Gesamtstandsicherheit des Bauwerks untersucht. Dazu werden für den Nachweis Grenzzustandsbedingungen mit Bemessungseinwirkungen, Bemessungswerten für die Scherfestigkeit und ggf. Bemessungswiderstände aufgestellt [N3]. Im GZ 2 sind Verschiebungen und Verformungen zu untersuchen, die häufig in Abhängigkeit von Größe, Dauer und Häufigkeit der Einwirkungen stehen [N3].

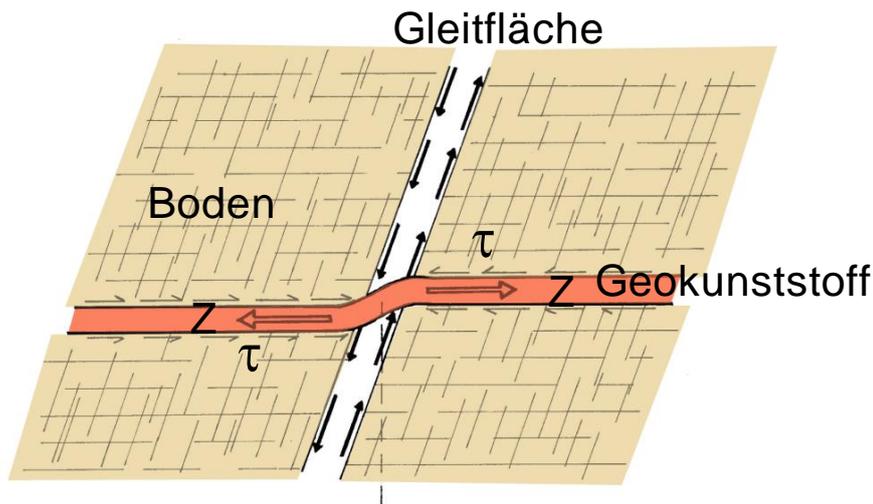


Bild 1.8 **Detaildarstellung der Mechanismen zwischen aktivem und passivem Bereich aus [9]**
(detail of the mechanics between the active and passive zone from [9])

In der aktuellen Ausgabe der EBGeo [N16] sind die Horizontalbewegungen mit maximal 1-2% der Wandhöhe angegeben. Die Definition der Kriterien für die Gebrauchstauglichkeit haben aber immer in Übereinstimmung von Bauherr und Tragwerksplaner zu erfolgen, weshalb die so festgelegten Bedingungen auch deutlich strenger ausfallen können [40].

1.1.3 Verbund zwischen Geokunststoff und Lockergestein

Sowohl beim Einsatz von Bewehrungsgeokunststoffen als Tragschichtbewehrung, als auch als Bewehrungselement in einer KBE-Konstruktion ist die Interaktion Geokunststoff/Lockergestein, wie im Kapitel 1.1.2 erwähnt, von großer Bedeutung. In diesem Kapitel wird nun das Verbundverhalten betrachtet, also die Mechanismen, die im lokalen Bereich direkt zwischen Geogitter und Lockergestein auftreten. Auf Produkte mit einer flächigen Struktur, wie z. B. Bändchengewebe oder Vliese (Kapitel 1.1) wird in diesem Kapitel nicht detailliert eingegangen, da sich ihr Verbundverhalten deutlich von dem der Geogitter mit ihrer offenen Struktur unterscheidet. Tamáskovics et al. konnten aber zeigen, dass der Kohäsionsanteil bei Reibungs- und Herausziehversuchen bei Geotextilgeweben geringer ist als bei Geogittern [92]. Hinweise zu den spannungsabhängigen Reibungswinkeln zwischen flächigen Geokunststoffen und Lockergestein finden sich in dem schon 1984 veröffentlichten Beitrag "Das Reibungsverhalten von Geotextilien in bindigen und nicht bindigen Boden" von Gerett [33]. In den Untersuchungen wurden Gewebe, mechanisch und thermisch verfestigte Vliese in Kombina-

tion mit Sand, Kaolin und Ton bei verschiedenen Spannungen getestet (Bild 1.9). In bindigen Böden können sich Porenwasserüberdrücke aufbauen, welche den Scherwiderstand Geokunststoff/Lockergestein reduzieren [34]. Spezielle "multifunktionale Drainage-Bewehrungs- Geocomposites" wurden von Clancy untersucht. Durch die drainierende Funktion der Geogitter konnten das Verbundverhalten verbessert und die Porenwasserüberdrücke abgebaut werden [26]. Tanchaisawat et. al, führten Versuche an einer 6 m hohen und aus Bangkok-Clay aufgebauten KBE-Konstruktion durch. Dabei stellten sie die höchsten Porenwasserdrücke nach 15 Tagen fest, die im Anschluss stark abnahmen. Auch die Setzungen waren mit ca. 12 cm verhältnismäßig gering [93].

Bodenart	Normalspannungsbereich [kN/m ²]	Reibungswinkel (Boden)	Verbundbeiwert für Reibung		
			Gewebe	mech. v. V.	therm. v. V.
Sand	10 - 50	37,5°	0,79	0,92	0,90
	50 - 100	36,4°	0,82	0,94	0,93
	100 - 200	32,6°	0,92	0,96	0,90
Kaolin	10 - 50	29,6	0,90	0,98	0,98
	50 - 100	27,6	0,85	0,90	0,92
	100 - 200	24,8	0,83	0,90	0,93
Ton	50 - 100	21,5	0,61	0,64	0,69

mech. v. V.: mechanisch verfestigte Vliese
therm. v. V.: thermisch verfestigte Vliese

Bild 1.9 Spannungsabhängige Verbundbeiwerte für Reibung nach [33]
(*stress dependent bond factor for friction due to [33]*)

Gewisse Verformungen sind für Bewehrungsgeokunststoffe erforderlich, damit die Geokunststoffe Zugkräfte aufnehmen können und so ihre bewehrende Funktion aktiviert wird. Auf die dazu notwendige Verformung hat die Dehnsteifigkeit einen Einfluss (siehe dazu auch Kapitel 1.1.2). Im SVG-Handbuch ist als Richtwert eine relativ hohe Initialdehnung im Geokunststoff von 4% genannt. Dieses Deformationskriterium geht davon aus, dass der Bodenbruch (unbewehrt) im Allgemeinen bei einer Deformation von 3% eintritt [79]. Allen und Bathurst geben in ihrem Artikel ein etwas strengeres Deformationskriterium an. Bei den Kriterien für eine gute und verformungsarme KBE-Konstruktion nennen sie unter anderem eine geringe Geokunststoffdehnung, welche

sie im Normalfall mit kleiner 3% angeben [3]. Hinweise zu der optimalen Maschenweite liefern verschiedene Regelwerke, so wird in der EBGEO 97 [N15]

$$0,6 \cdot l_w \geq d_{80} \quad \text{Gl. (1.1)}$$

als Kriterium empfohlen, wobei l_w die Maschenweite des Geogitters ist und d_{80} der Korndurchmesser bei 80% Siebdurchgang. In den Vereinigten Staaten von Amerika ist

$$l_w > 3,5 \cdot d_{50} \quad \text{Gl. (1.2)}$$

als Kriterium gebräuchlich [58] und [83], also das 3,5 fache des Korndurchmessers bei 50% Siebdurchgang (d_{50}). Zur einfacheren Vergleichbarkeit der in Deutschland und den USA angewendeten Kriterien hat Hangen [38] die Formel aus der EBGEO (Gl. (1.2)) umgestellt.

$$l_w > 1,7 \cdot d_{80} \quad \text{Gl. (1.3)}$$

Beiden Kriterien liegen Untersuchungen zur Schubspannungsübertragung von Geogittern zugrunde, in denen die Maschenweite mit dem Korndurchmesser verglichen wurde. Beispielhaft wurden in der nachfolgenden Abbildung die deutschen und amerikanischen Kriterien auf die Körnungslinie eines gebräuchlichen Lockergesteins angewendet.

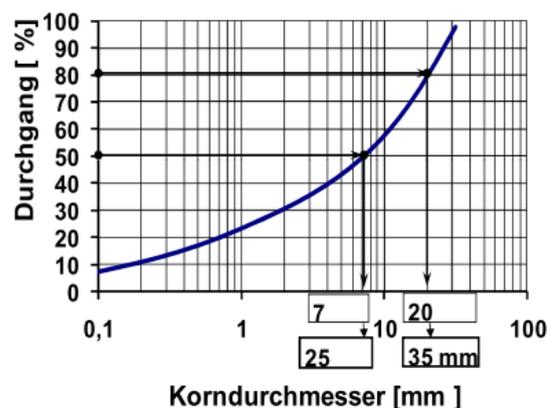


Bild 1.10 Anwendung des deutschen und des amerikanischen Kriteriums für die optimale Maschenweite aus [38]
(*use of the German and US criteria for the optimum aperture size [38]*)

Nach Gl. (1.2) ergibt sich somit für das Lockergestein aus Bild 1.10 eine Maschenweite von ca. 25 mm und aus Gl. (1.3) eine Maschenweite von ca. 35 mm. Diese Unter-

schiede zwischen dem deutschen und dem amerikanischen Kriterium zeigen, dass es nur bedingt möglich ist aus den geometrischen Verhältnissen auf Herauszieh- und Schubspannungsübertragung zu schließen. Die Anwendung beider Kriterien auf das bei der Versuchsserie verwendete Lockergestein zeigt, dass die verwendeten Geogitter deutlich die Anforderungen erfüllen, was bei der Verwendung eines bindigen Lockergesteins nicht verwundert.

Die Kraftübertragung zwischen Lockergestein und Bewehrungsprodukt ist von großer Bedeutung. Die unterschiedlichen Einflussfaktoren des Verbundes sind eine Funktion der Form des Bewehrungsproduktes [70]. In Bild 1.11 sind für unterschiedliche Produkte die Mechanismen der Kraftübertragung angegeben.

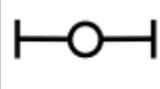
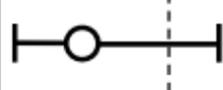
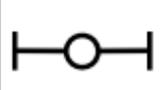
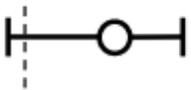
Art der Bewehrung	Mechanismus	
	Reibung	Erddruck
Glatter Metallstreifen		
Gerippter Metallstreifen		
Geotextil		
Geogitter		

Bild 1.11 Mechanismen der Kraftübertragung in Abhängigkeit der Form nach [70] aus [81]
(*mechanism of strength transfer depending on the shape due to [70] from [81]*)

Bei glatten Metallstreifen kann die Bewehrungswirkung nur über Reibung erfolgen, was auch für Geotextilien mit ihrer flächigen Struktur gilt. Anders verhalten sich gerippte Metallstreifen, bei denen die Übertragung der Kräfte zusätzlich zu der Reibung auch noch über die Rippen erfolgt vor denen sich ein Erddruck aufbaut (u. A. [20]). Bei Geogittern kann sich dieser Erddruck vor den Querelementen aufbauen, wodurch abhängig von der Machart der Geogitter teilweise ein Großteil der Bewehrungswirkung durch den Erddruck bereitgestellt wird.

Der Anteil, der von den Querelementen bzw. durch den Erddruck übernommen wird, ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Einen Einfluss haben sowohl das Lockergestein als auch der Abstand sowie die Dicke der Querelemente und die Kraftaufnahme über die Länge nicht gleichmäßig. Untersuchungen von Palmeira und Milligan [72] haben gezeigt, dass die Querelemente das Lockergestein in einem Bereich vor den Querelementen beeinflussen können, das der sechsfachen Dicke der Querelemente entspricht.

Der Einfluss, den der Abstand der Querelemente hat, wird in Bild 1.12 deutlich. Hier sind drei von Dyer [28] durchgeführte Herausziehversuche dargestellt, bei denen das Lockergestein durch gebrochenes Glas ersetzt wurde. Mithilfe einer speziellen Fototechnik war es so möglich, die Spannungen sichtbar zu machen. In Versuch "a" war der Abstand zwischen den Querelementen sehr groß und die Spannungsverteilung vor den beiden Querelementen war gleichmäßig. In Versuch "b" wurde der Abstand zwischen den Querelementen reduziert, wodurch sich die Spannungen vor den beiden Querelementen gegenseitig beeinflussen und nicht mehr unterschieden werden kann, welche Bereiche auf welches Querelement zurückzuführen sind. Der letzte Versuch (c) zeigt ein längeres Gitter mit sechs Querelementen. Bei dieser Versuchsanordnung ist das Interaktionsverhalten gebrochenes Glas/Gitter deutlich komplexer. Hinter den Querelementen bilden sich dunkle Zonen, also Regionen mit geringen Spannungen. Durch die Bewegung des Gitters kommt es zu einer Spannungskonzentration vor den Querelementen (Erddruck) und einer Auflockerung hinter den Querelementen. Die Regionen mit geringen Spannungen variieren in der Größe, was in der gegenseitigen Beeinflussung der Querelemente begründet ist.

Bei den zuvor vorgestellten Untersuchungen von Dyer wurde ein Metallgitter verwendet. Die Mechanismen die bei einem Geogitter auftreten, sind im Vergleich zu dem Metallgitter noch deutlich komplizierter, da in den Geogittern Dehnungen und Verformungen auftreten, die nicht linear sind. Abhängig von der Machart kann auch die Oberflächenbeschaffenheit einen Einfluss haben. Beispielsweise können sich Anteile des Bodenmaterials in die Beschichtung eines gewobenen Geogitters eindrücken.

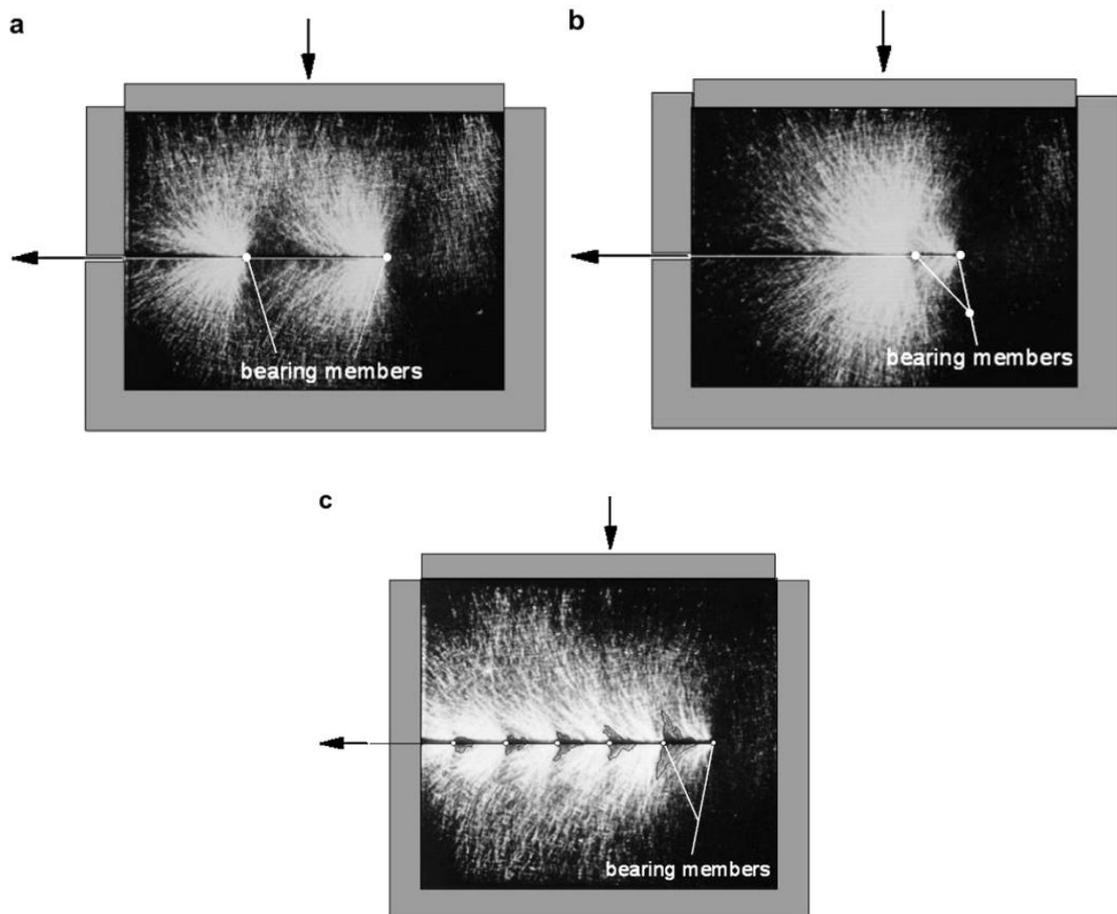


Bild 1.12 Einfluss des Abstandes zwischen den Querelementen nach [28] aus [71]
(influence of the distance between cross elements due to [28] from [71])

Das Fehlen von Erkenntnissen und Grundlagen sowie die sich gegenseitig beeinflussenden Mechanismen zeigen sich auch bei der Bemessung einer KBE-Konstruktion. Die Dimensionierung wird heute in aller Regel mittels eines linearen Lastabtragungsansatzes durchgeführt. Untersuchungen an der RWTH Aachen haben aber gezeigt, dass dieses Vorgehen sehr konservativ ist und nur viel kürzere Produkte für die Lastabtragung notwendig sind [112]. Weiterhin wird in den Arbeiten aus Aachen ein Widerstand sowie ein Verdrehen (Torsion) der Querelemente beschrieben [113]. Dieses als "Pflugeffekt" bezeichnete Phänomen erhöht zusätzlich den Erdwiderstand und geht erheblich über das Maß der Grenzflächenreibung hinaus.

Kritisch zu den heutigen Bemessungsverfahren äußert sich auch Müller in seinem 2013 erschienenen Artikel [63], in dem er insbesondere die Mechanismen (speziell auf die Querelemente und Knotenpunkte), die bei dem Einsatz von Bewehrungsgittern aus Kunststoff zum Schutz vor hangparallelem Gleiten bei langen und steilen Böschungen auftreten, betrachtet. Diese besondere Beanspruchung ergibt sich zum Beispiel bei

Deponieoberflächenabdichtungen, bei denen die Rekultivierungsschicht durch Geogitter gehalten wird. Um die Prozesse besser zu verstehen werden einige Produkte (starre Reibungsgitter, dehnbare Geogitter und starre Erddruckgitter) definiert und an diesen theoretisch die Mechanismen beim Herausziehen diskutiert. Mit dem Ergebnis, dass bei echten Geogittern durch die Dehnung der Erdwiderstand ungleichmäßig mobilisiert wird und das Versagen der Querelemente nach und nach erfolgt. Weiterhin wurde festgestellt, dass hauptsächlich die Steifigkeit und Festigkeit der Verbindungen den Herauszieh Widerstand beeinflussen und die einzelnen Faktoren sich gegenseitig beeinflussen, wodurch ein Verschmieren und Ausrunden der Ergebnisse erfolgt. Diese theoretischen Überlegungen decken sich auch mit den schon 2001 von Alagiyawanna et al. [1] durchgeführten Versuchen, in welchen festgestellt wurde, dass aufgrund der Dehnung in Längsrichtung (unterschiedlich über die Länge) auch der Einfluss der Querelemente über die Länge variiert.

Der lineare Ansatz, also die Zunahme des Herauszieh Widerstandes mit der Länge des Geogitters entspricht nicht der Wirklichkeit ([29], [63] und [112]), vielmehr werden die Geogitter sehr lokal aktiviert (sowohl beim Herausziehen als auch bei der Stützwirkung). Es bedarf einer Bodenverformung und Geogitterdehnung, um die Stützwirkung der Geogitter zu aktivieren, dann wirken die Geogitter aber im Nahbereich, wie die Modellversuche im ebenen Verformungszustand zum Erddruck auf die Außenhaut von Ruiken et al. [80] zeigen.

Die Aktivierung der Geogitter ist auch von der Herstellungsart abhängig. So gibt es gewobene Geogitter, extrudiert und anschließend verstreckte, Gelege/Maschenwaren sowie gelegte Produkte, die in den Kreuzungspunkten verschweißt werden [66]. Diese verschiedenen Geogitterarten unterscheiden sich in der Dehnsteifigkeit, Ausbildung der Kreuzungspunkte, Oberflächenbeschaffenheit, Maschenweite und Kurzzeitfestigkeit. Weiterhin sind die Produkte unterschiedlich flexibel und die Querelemente zeigen ein unterschiedliches Torsionsverhalten.

In Kapitel 5.2 werden umfangreiche Herausziehversuche an Geogittern zu der Bedeutung der Querelemente vorgestellt und in Kapitel 7.2 auf die Bemessung einer KBE-Konstruktion eingegangen.

1.1.4 Wirkungsweise und numerische Erfassung von Geogittern

Zur Beschreibung der tragfähigkeitserhöhenden Wirkungsweise von geogitterbewehrten Böden gibt es zwei grundsätzliche Ansätze. Zum einen wird der verstärkende Effekt mit einer zusätzlichen Kohäsion verglichen (u. A. [99]). Bild 1.13 zeigt die schematische Darstellung dieses Ansatzes in einem τ/σ -Diagramm, zum anderen wird von einer zusätzlichen Stützwirkung durch die Bewehrung ausgegangen.

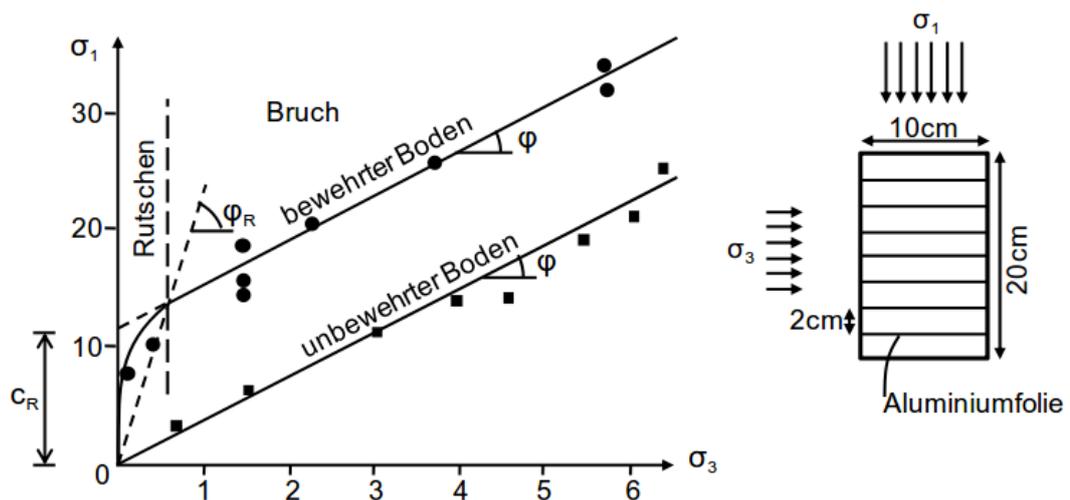


Bild 1.13 Ansatz zur Beschreibung der tragfähigkeitserhöhenden Wirkung mittels zusätzlicher Kohäsion nach [85] aus [81]
(*illustration of increasing bearing capacity with additional cohesion due to [85] from [81]*)

Bild 1.14 (Darstellung der Mohr'schen Spannungskreise für den Bruchzustand) zeigt dieses Verfahren, in welchem der unbewehrte Boden mit "a" und der bewehrte Boden mit "b" gekennzeichnet ist. Die Erhöhung der Tragfähigkeit bei unverändertem Zell- druck ist mit $\Delta\sigma_1$ angegeben.

Ruiken hat die festigkeitserhöhenden Effekte von Geogittern sehr ausführlich beschrieben [81], daher wird an dieser Stelle nicht im Detail auf dieses Thema eingegangen.

Nach EBGEO kann der Erddruck an der Front in Abhängigkeit von der Verformbarkeit der Frontelemente abgemindert werden. Pries et al. [74] zeigen anhand einer 12 m hohen und mit Messtechnik ausgestatten Lärmschutzwand, dass der wirklich an der Front auftretende Erddruck noch deutlich unter dem nach EBGEO abgeminderten Wert liegt. Auch Ruiken [81] konnte bei den im Rahmen seiner Dissertation durchgeführten Modellversuchen am Ausschnitt einer geogitterbewehrten Stützkonstruktion deutlich

reduzierte Erddruckwerte auf der Rückseite des Facings durch die Geogitterbewehrung feststellen. Darüber hinaus wiesen Bathurst et al. [17] nach, dass die errechneten Spannungen in den Geogittern dreimal größer waren als die gemessenen. Am Royal Military College in Kingston, Canada wurden für diese Versuchsserie insgesamt elf maßstäbliche KBE-Konstruktionen erstellt.

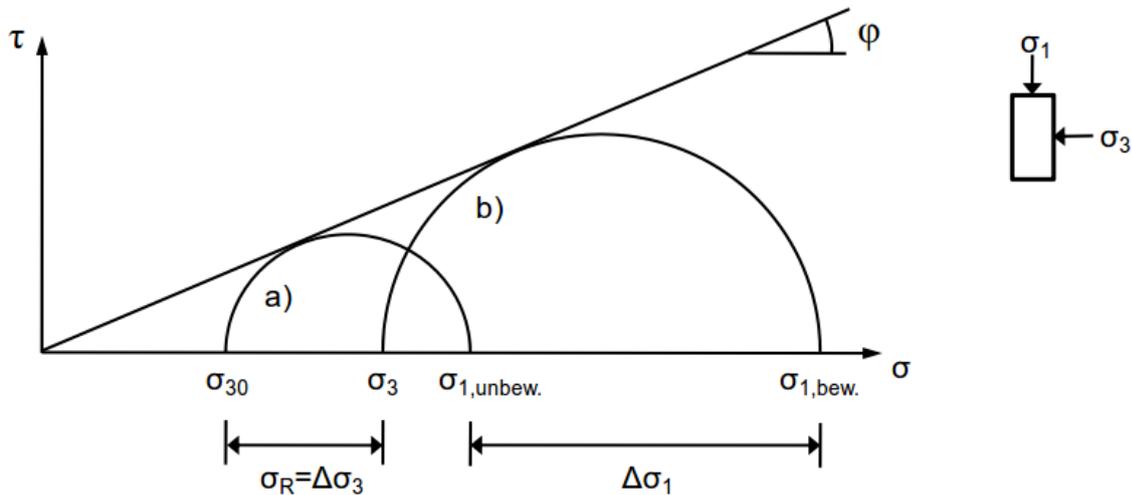


Bild 1.14 Ansatz zur Beschreibung der tragfähigkeitserhöhenden Wirkung mittels zusätzlicher Stützwirkung nach [41] aus [81]
(*illustration of increasing bearing capacity with additional supporting effect due to [41] from [81]*)

Auch Bussert hat in seiner Arbeit eine Differenz zwischen den berechneten und den in situ gemessenen Werten, insbesondere bei den Verformungen und Dehnungen, festgestellt. In Bemessungen werden nur das Versagen der Tragfähigkeit betrachtet, die Verformungen hingegen nicht [24]. Weiterhin werden die Eigenschaften der Geokunststoffe zu wenig in die Bemessungen einbezogen.

Im Gegensatz zu Geotextilien ist bei Geogittern der Interlocking-Effekt dominant. Das Interlocking stellte sich als Schlüsselmechanismus heraus, wobei aber das Wissen über diesen Mechanismus limitiert ist. Aufgrund der Penetration des Bodenmaterials in die Geogitterstruktur eignet sich eine Kontinuums-Methode zur numerischen Untersuchung des Verbundes nicht [59]. Weitere Faktoren, die verhindern, dass der Verbund Geogitter/Lockergestein mit einer FE-Methode nicht hinreichend untersucht werden kann, sind die Ungleichheit der Kontaktfläche und die Verdichtungsenergie, die Dehnungen und Spannungen in dem Geogitter hervorrufen. Aufgrund dieser unterschiedlichen Dehnungen und Spannungen ist es nach Bussert auch nicht möglich, die

Dehnsteifigkeit sowie die Produktdehnung von Geogittern als sicheren und seriösen Faktor in eine Bemessung einfließen zu lassen [25].

Konietzky et al. ist es mit DEM (Discrete element modeling) gelungen das Interlocking für ein 18 x 18 x 70 cm Modell zu modellieren [59]. Stahl hat in seiner Dissertation [88] die numerische Modellierung granularer Böden/Geogitter weiterentwickelt, indem er z. B. die Kornform der Bodenkörner mit der "Clumb-Logik" optimiert hat. Mit diesen speziellen labor- und modelltechnischen Entwicklungen ist es möglich präzise Aussagen zum Verbundverhalten unter verschiedenen Belastungssituationen zu machen. Die diskreten Verfahren haben aber den Nachteil, dass aufgrund der Vielzahl der Partikel der Rechenaufwand extrem groß ist. Weiterhin ist es aktuell nicht möglich ganze Baumaßnahmen wie z. B. eine KBE-Konstruktion zu simulieren, mit dem DEM ist es lediglich möglich, einzelne spezielle Elemente einer solchen Konstruktion zu abbilden.

Von Wolffersdorff fasst in seiner Arbeit [102] die Anforderungen an moderne numerische Verfahren für geokunststoffbewehrte Konstruktionen wie folgt zusammen:

- Realitätsnahe Erfassung des Spannungs-Verformungs-Verhaltens von Geogittern.
- Realitätsnahe Erfassung der Interaktion zwischen Geogitter und umgebenden Baugrund (3D-Modelle).
- Realitätsnahe Erfassung des Spannungs-Verformungs-Verhaltens des gesamten Tragsystems von Geogittern zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit (Verformungsnachweis) sowie der kombinierte Nachweis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit.

Von Wolffersdorff weist aber auch darauf hin, dass es einen Mangel an Ergebnissen aus konkreten Projekten gibt, die zur Validierung der numerischen Berechnungen herangezogen werden könnten. Weiterhin wird ein Forschungsbedarf bei dem Verbundverhalten Geokunststoff/Lockergestein gesehen. Ergänzt werden müsste diese Aufstellung auch noch um die wirtschaftliche/ökonomische Komponente sowie die Rechenzeit.

Auch Herle sieht aktuell die numerische Erfassung geotechnischer Fragestellungen von geokunststoffbewehrten Konstruktionen noch nicht hinreichend gelöst, was er an folgendem Beispiel verdeutlichte: Das bodenmechanische Verständnis ist selbst bei

manchen einfacheren Fällen so limitiert, dass teilweise keine zuverlässigen Prognosen über die Verformungen möglich sind [42]. Werden jetzt auch noch Geokunststoffe in die Berechnungen einbezogen, so wird der Sachverhalt noch deutlich komplexer.

1.2 Problemstellung

Nach EBGEO [N16] sind für vorwiegend ruhend beanspruchte Bauwerke grobkörnige und gemischtkörnige Bodenarten sowie die feinkörnigen Bodenarten UL, UM, TL, TM (Bodenklassifikation nach DIN 18196 [N7]) grundsätzlich verwendbar, sofern die spezifische Eignung nachgewiesen werden kann und eine ausreichende Verdichtbarkeit (Anforderungen an die Verdichtbarkeit in [31]) möglich ist. Auch andere Böden und Sonderlösungen können eingesetzt werden, sind aber gesondert nachzuweisen. Dabei sind insbesondere die Tragfähigkeit, das Verformungsverhalten, die Frostgefährdung, das Entwässerungsverhalten sowie die Erosionsempfindlichkeit zu betrachten. Gerade der Einsatz von anstehenden bindigen Böden hat aber erhebliche wirtschaftliche sowie ökologische Vorteile und reduziert die CO₂-Emission [50]. Die Erfahrungen zum Einsatz dieser teilweise gering tragfähigen Böden sind aber sehr limitiert.

Eine Möglichkeit zur Verwendung dieser "schlechten" Böden ist die Verbesserung ihrer Eigenschaften mit Geogittern sowie der kombinierte Einsatz von Geogittern und eine Verbesserung der Bodenkennwerte mit Kalk und Zement. Bei KBE-Konstruktionen betragen die Kosten für das Hinterfüllmaterial ca. 40-60% der Gesamtkosten des Bauwerks [34]. Daran zeigt sich das Einsparpotenzial durch die Verwendung von anstehende bzw. leicht verfügbaren Böden.

Sowohl das Verbundverhalten zwischen bindigen Böden und Geogittern als auch die Interaktion Geogitter/behandeltes Lockergestein ist gegenwärtig noch ein weitestgehend unerforschter Bereich. Durch den Einsatz der Geogitter entsteht ein neuer Baustoff, welcher sich nicht allein durch die Eigenschaften des Bodens und des Geogitters beschreiben lässt, sondern vielmehr als ein System mit Wechselwirkungen aus beiden Produkten mit ihren Spezifikationen verstanden werden muss. So ist es beispielsweise nicht zielführend die Böden und Geogitter getrennt voneinander zu betrachten oder gar die teilweise sehr unterschiedlichen Geogitter nur anhand von wenigen Parametern zu beschreiben.

Zusammenfassend bedarf es, zur genaueren Beschreibung des "Systems geokunststoffbewehrter Boden/Geogitter", genauere Erkenntnisse, wie sich das Verbund-

verhalten der Böden und der Geokunststoffe bei verschiedener Beschaffenheit und in wechselnden Kombinationen auswirkt.

1.3 Ziele und Lösungswege

Der vorliegende Beitrag verfolgt das generelle Ziel, Lockergesteine mit bindigen Anteilen in Kombination mit Geokunststoffen genauer zu untersuchen und Grundlagen zu schaffen, gering-tragfähiges Lockergestein als vollwertigen Füllboden für geokunststoffbewehrte Erdkörper zu nutzen, wodurch aufwändiger Materialtransport ganz oder zumindest teilweise entfallen kann. Untersucht werden die verschiedenen Einflussfaktoren der Geogittergeometrie auf die Verbundparameter zwischen Geokunststoff und Boden. Weiterhin sollen für die praktische Anwendung des Bauverfahrens Erkenntnisse gewonnen werden, die ein besseres Verständnis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit ermöglichen.

Für die experimentellen Untersuchungen wurde das Großrahmenschergerät des Instituts für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg und die dazugehörige Technik genutzt. Bei diesem Versuchsgerät handelt es sich um ein universelles Interaktionsprüfgerät (IPG) zur Untersuchung des Verbundverhaltens zwischen Geokunststoffen und Lockergestein. In Kapitel 2.1 werden das am Institut für Geotechnik entwickelte Prüfgerät näher betrachtet und die vorgenommenen Modifikationen erläutert.

Zur Verbesserung der in Kapitel 1.2 "Problemstellung" beschriebenen Situation werden in Kapitel 1.3 Ziele und Lösungswege sowie Arbeitsschwerpunkte und -hypothesen aufgestellt und in den nachfolgenden Kapiteln verifiziert. Dies umfasst theoretische und experimentelle Untersuchungen, wobei der Schwerpunkt versuchsorientiert ist, da ein Defizit bei den Grundlagen existiert. Aufgrund des großen Umfangs der Thematik liegt das Augenmerk beim Kurzzeitverhalten von KBE-Konstruktionen.

1.3.1 Arbeitsschwerpunkte und Arbeitshypothesen

1. Bestimmung von Geokunststoffparametern, die für das Verbundverhalten Geokunststoff und bindiger Boden signifikant sind: Das Verbundverhalten von Geokunststoffen und bindigen Lockergesteinen ist sehr komplex und ist von einer Vielzahl von Geokunststoffparametern abhängig.

2. Erlangen von Erkenntnissen über das Verbundverhalten eingebetteter Geokunststoffe in bindigen Böden (unbehandelt oder mit Bindemittel bearbeitet): Der ständig wachsende Mangel an "guten" granularen Reibungsböden und die Verfügbarkeit von lokalen kohäsiven Böden haben in den letzten Jahren ein wachsendes Interesse an lokalen "schlechten" in-situ Böden als Füllboden hervorgerufen. Die Verbundwirkung des geogitterbewehrten und bindemittelverbesserten oder auch unbehandelten bindigen Bodens bedarf weiterer wissenschaftlicher Untersuchungen, um ein tieferes Verständnis der Wechselbeziehungen der Materialien zu erhalten und auf diese gewonnenen Erkenntnisse zurückgreifen zu können.
3. Weiterentwicklung des Interaktionsprüfgeräts (IPG): Von entscheidender Bedeutung bei der Untersuchung von Lockergesteinen mit Bodenbehandlung ist die Reaktionszeit der Probe bis zur Versuchsdurchführung. Weiterhin soll ein ökonomischer Ablauf der Versuche ermöglicht werden.
4. Praxisbezug und Praxisanwendung: Entwicklung von einfachen und praxistauglichen Optimierungen für die Nutzung und Gewinnung gering tragfähiger Böden für kunststoffbewehrte Erd- und Stützbauwerke sowie ihre sichere und wirtschaftliche Bemessung und Dimensionierung. Schaffung von Grundlagen zur verbesserten theoretischen Modellierung.
5. Konstruktion und Bau eines Großgeräts zur Erzeugung von dreidimensionalen Spannungszuständen: Bei den meisten Geokunststoffanwendungen (z. B. Tragschichtbewehrung) erfolgte die Krafteinleitung in das Geogitter über das Lockergestein. Bei den gängigen Versuchen (Herauszieh- und Reibungsversuch) ist dies genau umgekehrt, da das Geogitter direkt belastet wird. Um die Realität möglichst gut im Labor abzubilden, muss die Belastung dreidimensional durch den Boden auf das Geogitter erfolgen. Darüber hinaus wird es erst in dem Großtriaxialgerät (TA-3D) möglich sein, Porenwasserdrücke in bindigen Lockergesteinen mit hoher Wassersättigung zu messen.

1.3.2 Theoretische und experimentelle Untersuchungen

Der experimentelle Teil der Arbeit besteht aus einem Hauptteil, in dem Scherversuche (ISV), Reibungsversuche (IRV) und Herausziehversuche (IPV) an dem ausgewählten Lockergestein durchgeführt werden, sowie aus verschiedenen Detailuntersuchungen.

Folgende Untersuchungen werden durchgeführt:

1. Scherversuche unter Variation der Geschwindigkeit zur Ermittlung des Einflusses der Versuchsgeschwindigkeit.
2. Scherversuche an den Lockergesteinen unter Modifikation der Einbaubedingungen. Diese Versuche dienen als Referenzwert für die Versuche mit den Geokunststoffen.
3. Systematische Untersuchung der biaxialen und einaxialen Geogitter in Reibungsversuchen zur Bestimmung von Reibungsbeiwerten zwischen Geokunststoff und Boden (für das Abscheren) und Adhäsionsbeiwerten Geokunststoff/Boden (für das Abscheren). Die Prüfungen erfolgten bei verschiedenen Laststufen und gesondert für verschiedene Geogitter.
4. Systematische Untersuchung der biaxialen und einaxialen Geogitter in Herausziehversuchen, zur Bestimmung von Reibungsbeiwerten Geokunststoff/Boden (für das Herausziehen) und Adhäsionsbeiwerten Geokunststoff/Boden (für das Herausziehen). Die Prüfungen erfolgten bei verschiedenen Laststufen und gesondert für jedes der Geogitter.
5. Verifizierung der in Mehrstufenversuchen ermittelten Ergebnisse insbesondere in Hinblick auf die in der Versuchsserie getesteten Geogitter.
6. Untersuchung des Einflusses von Bodenbehandlung mit Kalk und Zement auf das Verbundverhalten im Reibungs- und Herausziehversuch. Systematisch wurden einzelne Geogitter in Kombination mit Behandlung des Lockergesteins mit Kalk und Zement untersucht.
7. Detailuntersuchungen zur Oberflächenbeschaffenheit der Geogitter, Einfluss der Querelemente sowie Betrachtungen zum Einfluss einer geschwächten Lockergesteinszone.
8. Zu den experimentellen Untersuchungen sind die theoretischen Überlegungen hinzu zu nehmen, die über das Interaktionsverhalten gewonnen wurden und zur Entwicklung des neuartigen Großtriaxialgeräts (TA-3D) geführt haben (Kapitel 8).

2 Versuchstechnik

2.1 Das Interaktionsprüfgerät (IPG)

In Bild 2.1 ist das Geokunststoff-Boden-Interaktionsprüfgerät dargestellt. Die technischen Parameter des Versuchsgerätes sind in der Tab. 2.1 zusammengefasst, detailliert wurde die Entwicklung dieses Gerätes in [14] beschrieben.



Bild 2.1 Geokunststoff-Boden-Interaktionsprüfgerät (IPG)
(*geosynthetic interaction testing device (IPG)*)

In Bild 2.2 ist das Interaktionsprüfgerät schematisch dargestellt, welches nachfolgend näher erläutert wird. Der untere (2) und obere (3) Scherrahmen des Großrahmenschergerätes fasst insgesamt ein Gesamtvolumen von $V = 50 \text{ dm}^3$ und bedarf zur Durchführung eines Versuches eine typische Einbaufeuchtmasse der Probe (1) von $m = 80 - 120 \text{ kg}$. Die Vorbereitung des Versuchsmaterials durch Homogenisierung und Einstellen des Wassergehaltes erfolgt mit einer Großmischanlage. Die Installation der Probe (1) in das Versuchsgerät wird mit einem lagenweisen Einbau und mittels Verdichtung vorgenommen, damit eine hohe Dichte in der Größenordnung der Proctordichte erreicht werden kann. Über die Kontrolle der Einbaumasse und des Volumens der Einzellagen kann die Einbaudichte genau kontrolliert werden. Die Bewegung der konstruktiven Teile des Interaktionsprüfgerätes beim Probeneinbau und -ausbau erfolgt mit einem Kran.

Die Normalbelastung wird in die Probe über eine steife Platte (4) eingetragen und kann über den Luftdruck in einer Druckblase (6) geregelt werden. Die Normalspannung in der Scherebene wird nicht aus der Größe des Luftdruckes in der Druckblase (6) ermittelt, sondern aus der gemessenen Widerlagerkraft der Druckblase (6) an vier Punkten.

Dieser Aufbau ist konform zu der von Bathurst et al. als widerspruchsfrei bezeichneten Lastaufbringung, welche sie bei verschiedenen Scherversuchen eingesetzt haben [16].

Tab. 2.1 Technische Parameter des Interaktionsprüfgerätes
(*technical parameters of the geosynthetic interaction testing device*)

Scherkastengröße (Inlayrahmen)	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

Die konstruktive Gestaltung des Interaktionsprüfgerätes ermöglicht eine Aufweitung des Scherspalt zwischen dem unteren (2) und oberen (3) Scherrahmen während des Versuches, wenn die vertikale Bewegung des oberen Scherrahmens bei allen Versuchsarten freigegeben wird. Der obere Scherrahmen wird während der Bewegung durch die vertikale Führung (7) gehalten. Beim schwebenden oberen Scherrahmen (3) wird zunächst ein Mindestwert der Scherspaltweite eingefordert, die sich durch Heben des oberen Scherrahmens (3) im Versuchsverlauf erhöhen kann. Durch Freigabe der Bewegung des oberen Scherrahmens (3) und der Verwendung eines Schmiermittels werden mechanische Effekte aus der Reibung des untersuchten Materials an der Wandung des oberen Scherrahmens (3) im Versuchsverlauf vermindert. Der obere Scherrahmen (3) verfügt weiterhin über eine Gewichtskompensation, damit keine Effekte durch das Eigengewicht in den Versuch eingetragen werden. Durch Unterbinden der vertikalen Beweglichkeit des oberen Scherrahmens (3) kann der Scherspalt während des Versuches konstant gehalten werden.

Die Scherbelastung wird in die untersuchte Probe (1) oder in den Verbund der Probe (1) und des Geokunststoffes (10) in der Scherebene eingetragen, indem der untere Scherrahmen (2) relativ zum oberen Scherrahmen (3) über die horizontale Führung (8) auf Schienen (9) verschoben wird. Eine homogene Scherbelastung der Probe (1) wird durch zwei gitterartige Scherwiderlager unterstützt, die an der Oberkante der Probe (1) auf der probenseitigen Oberfläche der Belastungsplatte (4) sowie an der Unterkante der Probe (1) auf der probenseitigen Oberfläche des unteren Scherrahmens (2) angebracht sind. Bei einem Großrahmenherausziehversuch wird der untersuchte Geokunst-

stoff (10) durch eine Klemmbanke oder Rollklemme (11) gehalten und aus dem Lockergesteinsverbund herausgezogen. In diesem Fall wird die horizontale Beweglichkeit des unteren Scherrahmens (2) unterbunden.

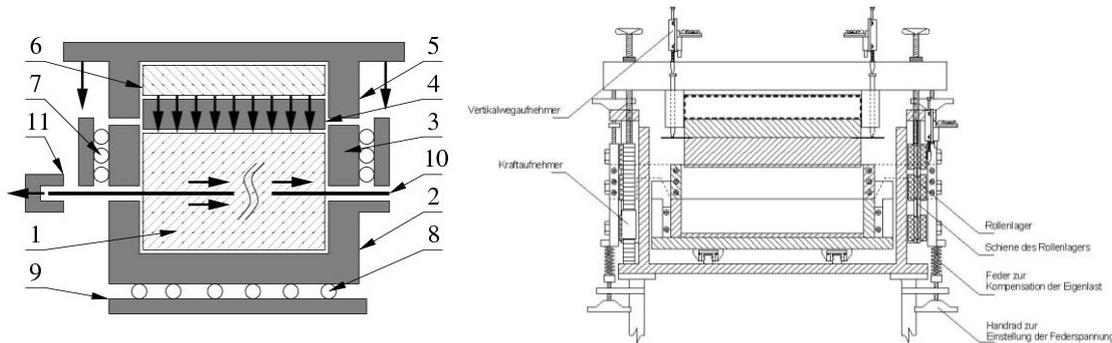


Bild 2.2 Schnitt des Interaktionsprüfgerätes
(*profile of geosynthetic interaction testing device*)

Neu entwickelt wurde der in Bild 2.3 dargestellte Inlayrahmen. Der Inlayrahmen ermöglicht es, das Herstellen der Probe vom Versuchsgerät zu entkoppeln. Der untere (16) und obere (15) Teilrahmen kann mit den Schrauben (12) verbunden werden. Die zweigeteilte Konstruktion des Rahmens ermöglicht es, sowohl Proben für Scherversuche als auch Proben für Herauszieh- und Reibungsversuche außerhalb des Interaktionsprüfgerätes herzustellen. Mit den Ringschrauben (13) kann dann der Inlayrahmen in das Prüfgerät gehoben werden. Durch die Einstellplatten (14) hängt sich der obere Teil des Inlayrahmens (15) an dem oberen Kasten des Scherrahmens (3) auf. Dadurch wird gewährleistet, dass sich der obere Inlayrahmen beim Einstellen der Scherspaltweite mit dem Scherrahmen bewegt und eine Mindestweite eingestellt werden kann. Darüber hinaus ist durch die Einstellplatten gewährleistet, dass sich bei einem Versuchsaufbau mit schwebendem Rahmen beide oberen Rahmen in vertikaler Richtung bewegen können. Die ursprüngliche Scherkastenfläche von 500 x 500 mm wird durch den Einsetzrahmen auf 437 x 437 mm reduziert.

Die Verwendung des Inlayrahmens bietet viele Vorteile, weil die Versuche flexibler geplant und die Umrüstzeiten zwischen unterschiedlichen Versuchen wesentlich verkürzt werden. Besondere Bedeutung haben die Inlayrahmen bei der Verwendung von mit Bindemitteln behandelten Proben, da diese ein stark zeit-abhängiges Verhalten zeigen und teilweise erst nach 28 Tagen geprüft werden können. Ohne die Verwendung der Inlayrahmen wäre für die Reaktionszeit das Interaktionsprüfgerät blockiert. Die Entkopplung des Versuchseinbaus bietet weiterhin den Vorteil, dass die mechanische Beanspruchung des Interaktionsgerätes durch die Verdichtungsenergie entfällt

und der Einbau in einem vom Scherlabor getrennten Raum, der für die Schmutzentwicklung ausgelegt ist, durchgeführt werden kann. Die Inlayrahmen haben sich in der Praxis bewährt und bieten aus ökonomischer Sicht enorme Vorteile.



Bild 2.3 Inlayrahmen zur Entkopplung des Probeneinbaus
(*inlay-frame for decoupled arrangement of sample installation*)

Die Entwicklung dieser Inlayrahmen ist ein wichtiges Ergebnis dieser Arbeit, da sie eine herausragende Bedeutung für die Technik und Durchführung von Versuchen in Großrahmenschergeräten spielen. Neben den in Kapitel 2.2 beschriebenen Versuchsarten ermöglicht das Interaktionsprüfgerät eine Reihe weiterer spezieller Versuchsformen zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften des Verbundes zwischen Geokunststoff und Lockergestein.

2.2 Versuchsarten

Zur Untersuchung des Verbundverhaltens von Geokunststoffen in Lockergesteinen wurden die folgenden Versuchsarten im Interaktionsprüfgerät durchgeführt:

- **Großrahmenscherversuche mit kompakter Lockergesteinszone in der Scherebene ISV:** Das Versuchsmaterial wird zum Einbau in den Scherrahmen des Großrahmenschergerätes in sechs Schichten unterteilt, um die vorgeschriebene Einbaudichte lagenweise zu erfüllen. Die beiden Schichten in der Umgebung der Scherebene werden jedoch zugleich eingebaut, wodurch in der Scherebene eine kompakte Lockergesteinszone entsteht. Unter diesen Einbaubedingungen werden Scherfestigkeitswerte ermittelt, die dem natürlichen Zustand des ausgewählten Lockergesteins entsprechen. Sie bilden die Grundlage eines Standsicherheitsnachweises für ein Lockergesteinsbauwerk ohne

Bewehrung sowie den Referenzwert der Scherfestigkeit für die Ermittlung von Verbundbeiwerten.

- **Großrahmenscherversuche mit getrennter Lockergesteinszone in der Scherebene ISV-VT:** Das Versuchsmaterial wird zum Einbau in den Scherrahmen des Großrahmenschergerätes in sechs Schichten unterteilt, um die vorgeschriebene Einbaudichte lagenweise zu erreichen. Die beiden Schichten in der Umgebung der Scherebene werden getrennt eingebaut, wodurch eine geschwächte Lockergesteinszone in Höhe der Scherebene entsteht (Trennfläche). Durch Vergleich der ermittelten Scherfestigkeiten zwischen Versuchen mit kompakter und getrennter Scherebene sowie zwischen Versuchen mit einem Geokunststoff in der Scherebene lässt sich sowohl der Scherfestigkeitsverlust durch eine baubedingte Trennfläche, als auch das mechanische Verhalten des Geokunststoffes in der Scherebene bewerten. Das Scherfestigkeitsverhalten von Lockergesteinen mit einer getrennten Lockergesteinszone in der Scherebene ist bei Lockergesteinen aus geotechnischer Sicht sehr bedeutsam. Bei dem lagenweisen Verdichten von bindigen Lockergesteinen, wie bei der Errichtung von geokunststoffbewehrten Erdkörpern werden Trennflächen geschaffen, an denen eine verminderte Scherfestigkeit zu erwarten ist.
- **Großrahmenreibungversuche IRV:** Das Versuchsmaterial wird zum Einbau in den Scherrahmen des Großrahmenschergerätes in sechs Schichten unterteilt, um die vorgeschriebene Einbaudichte lagenweise einzufordern. Nach Einbau der ersten drei Schichten in den unteren Scherrahmen wird der zu untersuchende Geokunststoff in Höhe der Scherebene auf dem unteren Scherrahmen befestigt, der obere Scherrahmen aufgesetzt und die restlichen drei Schichten werden eingebaut. Unter den Bedingungen dieser Versuche werden Scherfestigkeiten ermittelt, die für den Fall gelten, dass das Lockergestein auf der Trennfläche abgeschert wird, in dem sich der Geokunststoff befindet.
- **Großrahmenherausziehversuche IPV:** Das Versuchsmaterial wird zum Einbau in den Scherrahmen des Großrahmenschergerätes in sechs Lagen eingebracht, um die vorgeschriebene Einbaudichte lagenweise einzufordern. Nach Einbau der ersten drei Schichten in den unteren Scherrahmen wird der zu untersuchende Geokunststoff in der Höhe der Scherebene auf den unteren Scherrahmen aufgelegt, der obere Scherrahmen aufgesetzt und die restlichen drei Schichten werden eingebaut. Im Versuchsverlauf wird der Geokunststoff durch

eine geeignete Klemmbacke gefasst und aus dem Lockergesteinsverbund herausgezogen. Hierbei werden Scherfestigkeiten ermittelt, die für den Fall gelten, dass der Geokunststoff aus dem Lockergesteinsverbund herausgezogen wird. Wegen der geometrischen Größe der Scherkästen des Interaktionsprüfgerätes werden Großrahmenherausziehversuche in der Art durchgeführt, dass der Geokunststoff sich über die gesamte Länge der Scherkästen in der Scherebene befindet und bei der Belastung durch die Probe durchgezogen wird. Beschrieben ist dieser Herausziehversuch in der DIN 60009 [N10].

- **Großrahmenherausziehversuche ohne Querelemente IPV-R:** Das Durchführen des Versuchs entspricht dem Vorgehen beim Großrahmenherausziehversuch, mit dem einzigen Unterschied, dass bei den Geogittern die Querelemente vollständig entfernt werden. Diese modifizierte Versuchsanordnung war notwendig, um den Einfluss der Querelemente (Kapitel 5.2) zu erforschen.

2.3 Versuchsdurchführung

In Kapitel 2.2 sind die Versuchsarten zur Erforschung des Verbundverhaltens zusammengefasst. Die Versuche im Großrahmenschergerät wurden unter konstanten bodenmechanischen Bedingungen durchgeführt (Tab. 2.2). Bei den Versuchen im Großrahmenschergerät wurde das Probenmaterial vor dem Einbau auf den ausgewählten Einbauwassergehalt gebracht. Die Dichte der Probe wurde während der Versuchsserie konstant gehalten, blieb aber wegen der im Vergleich zum Proctorversuch (DIN 18 127 [N4]) niedrigeren verfügbaren Verdichtungsenergie beim Einbau unterhalb der Proctordichte. Die bodenphysikalischen Einbaubedingungen sind in Tab. 2.2 zusammengefasst.

Mit Ausnahme des Wassergehalts bei dem HB wurde der Einbauwassergehalt nahe am optimalen Wassergehalt gewählt, so dass eine Einbaudichte nahe der Proctordichte erreicht werden konnte. Aufgrund des niedrigen Wassergehalts bei den Versuchen mit dem HB ist die Einbaudichte in diesen Versuchen verhältnismäßig gering.

Tab. 2.2 Einbaubedingungen
(*installation conditions*)

Eigenschaften	Zeichen	Einheit	CS5	CS5 mit M13	KL	HB
Einbauwassergehalt	w_E	[1]	0,113	0,113	0,282	0,025
Einbaudichte (trocken)	Q_{dE}	[kg/m ³]	1860	1790	1370	1430

Die Großrahmenversuche wurden mit schwebendem oberem Scherrahmen und Gewichtskompensation des oberen Scherrahmens ausgeführt. Zur Verminderung von Reibungseffekten wurde die probenseitige Oberfläche beider Scherrahmen zusätzlich mit einem Schmiermittel behandelt. Das Mindestmaß des Scherspalt betrug bei Scherversuchen 1 mm und konnte sich während des Versuchsverlaufes durch Freigabe der Bewegung des gewichtskompensierten oberen Scherrahmens entsprechend den mechanischen Bedingungen einstellen. Bei den Reibungs- und Herausziehversuchen wurde ein Scherspalt von der Dicke des untersuchten Geogitters plus 1,5 mm eingestellt.

Nachfolgend ist die detaillierte Vorgehensweise bei der Durchführung von Scher- oder Reibungsversuchen beschrieben:

- Einbau der Probe mit dem vorgeschriebenen Einbauwassergehalt und der Einbautrockendichte.
- Konsolidation der Probe mit der entsprechenden Normalspannung.
- Scherbelastung der Probe bis zum Erreichen der gewünschten Scherverschiebung oder bis zum Erreichen der Restscherfestigkeit.

Die Untersuchung der Restfestigkeit bei Scher- und Reibungsversuchen im Großrahmenschergerät wird erschwert, weil die exakte Regelung der Normalspannung aufgrund der Spannungsverteilung in der Probe bei einer großen Scherverschiebung nicht mehr möglich ist. Zusätzlich kommt es bei größeren Verschiebungen zur Zerstörung der Struktur einiger der untersuchten Geogittern (Reibungs- und Herausziehversuch). Die Auswertung und Diskussion der Versuchsergebnisse berücksichtigt deshalb nur den Vergleich von Spitzenscherfestigkeiten. Die Restscherfestigkeit wurde nicht ermittelt.

Die Schergeschwindigkeit von $v = 1 \text{ mm/min}$ wurde bei allen Versuchsarten konstant gehalten. Detailliert wird in Kapitel 3.4.1 auf die Versuchsgeschwindigkeit eingegangen.

2.4 Versuchsauswertung

Die Auswertung von Scher-, Reibungs- und Herausziehversuchen im Interaktionsprüfgerät erfolgt zunächst durch Berechnung der Scherparameter des MOHR-COULOMB'schen Versagenskriteriums

$$\tau = \sigma \cdot \tan \varphi + c \quad \text{Gl. (2.1)}$$

in dem τ die Schubspannung beim Bruch, σ die Normalspannung in der Scherebene, φ den Reibungswinkel und c die Kohäsion darstellt. Dieser übliche und lineare Ansatz ist aber in der Geotechnik nur innerhalb eines bestimmten Spannungsbereiches gültig [109].

Bei der Ermittlung der Schubspannung ist die Scherfläche korrekt zu berücksichtigen. Bei Großrahmenherausziehversuchen greifen Schubspannungen an beiden Seiten des Geokunststoffes an (Bild 2.4 a). Zur Ermittlung der Schubspannung ist somit die Fläche der Geokunststoffs (A_{GEO}) zweimal zu berücksichtigen (Gl. (2.2)). Da der Geokunststoff durch die Probe gezogen wird, ist wiederum keine Korrektur der Scherfläche in Abhängigkeit vom Herausziehweg erforderlich. Bei einem Reibungs- oder Scherversuch, wie in Bild 2.4 b und c dargestellt, entstehen Schubspannungen nur in einer Ebene, weshalb die Schubspannung für diese Versuche mit Gl. (2.3) zu ermitteln sind.

$$\tau = \frac{F}{2 \cdot A_{GEO}} \quad \text{Gl. (2.2)}$$

$$\tau = \frac{F}{A_{Scher}} \quad \text{Gl. (2.3)}$$

In den zuvor gezeigten Gleichungen ist τ die Schubspannung, F die Herausziehkraft und A die Fläche des Geokunststoffes bzw. des Scherkastens. Schematisch dargestellt sind die bei den drei Versuchsarten auftretenden Schubspannungen in Bild 2.4.

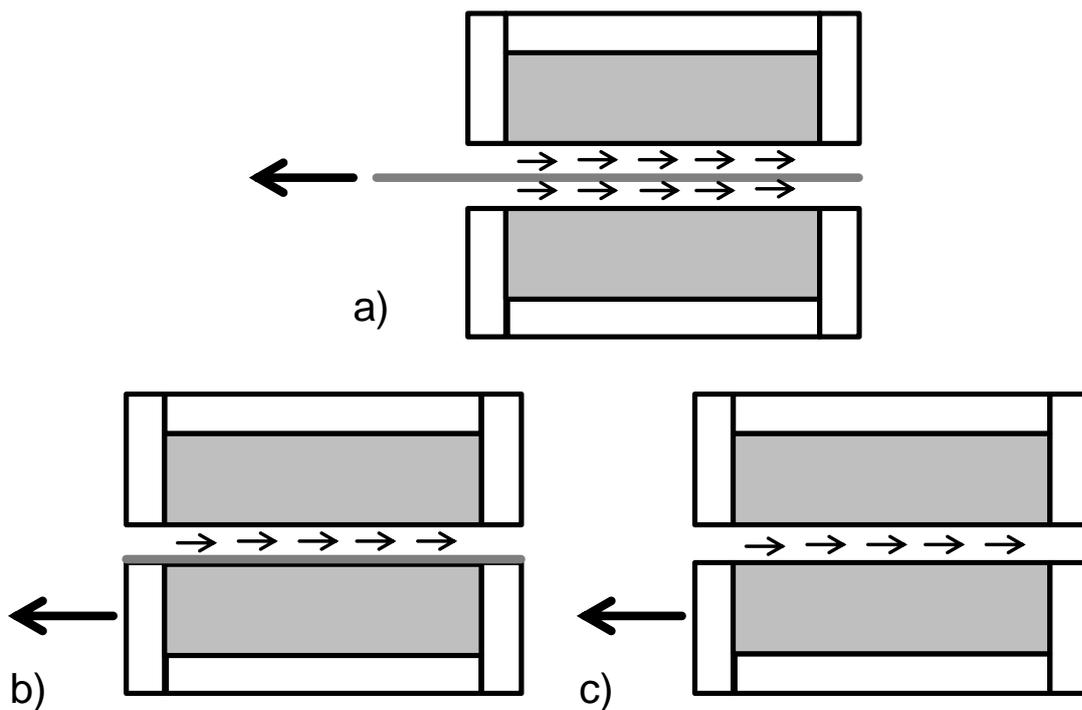


Bild 2.4 Schematische Darstellung der Schubspannungen: a) im Herausziehversuch; b) im Reibungsversuch; c) im Scherversuch
 (schematic description of strains: a) pull-out test; b) friction test; c) shear test)

Zur Bewertung der Verbundwirkung der untersuchten Geokunststoffe können Verbundbeiwerte grundsätzlich nach zwei Verfahren berechnet werden:

- **Partielle Verbundbeiwerte:** die Verbundbeiwerte werden aus dem Verhältnis der mechanischen Kennwerte der Scherfestigkeit unmittelbar errechnet

$$R_{\varphi} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_{REF}} ; R_c = \frac{c}{c_{REF}} \quad \text{Gl. (2.4)}$$

in dem die Größen φ den Reibungswinkel sowie c die Adhäsion (bzw. Kohäsion) in den zu bewertenden Versuchen und die Größen φ_{REF} den Reibungswinkel sowie c_{REF} die Kohäsion im Referenzversuch darstellen. Die Verbundbeiwerte des Reibungswinkels R_{φ} und der Kohäsion R_c bewerten die individuellen Scherfestigkeitsanteile in der Verbundwirkung.

- **Spannungsabhängige Verbundbeiwerte:** Die Bestimmung der Verbundbeiwerte erfolgt durch Berechnung des Verhältnisses

$$R_k(\sigma') = \frac{\tau(\sigma')}{\tau_{REF}(\sigma')} = \frac{\sigma' \cdot \tan\varphi + c}{\sigma' \cdot \tan\varphi_{REF} + c_{REF}} \quad \text{Gl. (2.5)}$$

in dem die Größen φ den Reibungswinkel sowie c die Adhäsion (bzw. Kohäsion) in den zu bewertenden Versuchen und die Größen φ_{REF} den Reibungswinkel sowie c_{REF} die Kohäsion der im Bruchzustand gemessenen Schubspannungen in den zu bewertenden Versuchen $\tau(\sigma')$, bezogen auf einen Wert in einem Referenzversuch $\tau_{REF}(\sigma')$ darstellen. Die Berechnung der spannungsabhängigen Verbundbeiwerte $R_k(\sigma')$ erfolgt aus den theoretischen Werten der Schubspannung im Bruchzustand $\tau(\sigma')$ und $\tau_{REF}(\sigma')$, die jeweils aus der Regressionsanalyse der Versuchsergebnisse bestimmt wurden. Die Auswertung der spannungsabhängigen Verbundbeiwerte $R_k(\sigma')$ kann damit auf einem beliebigen Spannungsniveau der wirksamen Normalspannung σ' erfolgen. Gleichzeitig werden die versuchsbedingten Streuungen der im Bruchzustand gemessenen Schubspannungen aus der Auswertung eliminiert.

Im Kapitel 5.4 (Betrachtungen zu dem Einfluss einer geschwächten Lockergesteinszone) wird diskutiert, wie die Scherparameter (φ_{REF} und c_{REF}) zu ermitteln sind, insbesondere wegen der Thematik "Scherversuch mit vorgegebener Trennfläche". Ein Vorteil der partiellen Verbundbeiwerte nach Gl. (2.4) ist die separate Bewertung des Verhaltens der Festigkeitsanteile aus der Reibung sowie aus der Kohäsion des Lockergesteins und des Geokunststoff/Lockergesteinsverbundes. Die alternativen, spannungsabhängigen Verbundbeiwerte nach der Gl. (2.5) erfassen die Festigkeit im Geokunststoff/Lockergesteinsverbund integral und ermöglichen wiederum eine Einsicht in das Verbundverhalten in Abhängigkeit von der wirksamen Normalspannung σ' in der Kontaktfläche.

In der EBGEO [N16] erfolgt die Auswertung nach Gl. (2.4). Dies ist auch das Verfahren mit dem die Auswertung der Ergebnisse in der vorliegenden Arbeit erfolgte. In Gl. (2.5) wird die Kohäsion bzw. Adhäsion immer mit berücksichtigt. Dies kann zu einer Überschätzung des Verbundes führen, da in einer erdstatischen Berechnung die Kohäsion bzw. Adhäsion nur angesetzt werden darf, wenn sichergestellt ist, dass diese dauerhaft wirkt. Die mögliche Überschätzung der Kohäsion muss aber auch bei der Verwendung von Gl. (2.4) einbezogen werden.

Die in den nachfolgenden Kapiteln aufgeführten Scherparameter wurden teilweise mit der Mehrstufentechnik (siehe dazu auch Kapitel 3.4.3, Experimentelle Untersuchungen zur Mehrstufentechnik) ermittelt. Ergebnisse die aufgrund einer zu geringen Versuchszahl oder aus anderen Gründen nur bedingt aussagekräftig bzw. mit Unsicherheiten behaftet sind, wurden gesondert gekennzeichnet. Außerdem unterliegen alle im Interaktionsprüfgerät durchgeführten Tests einer versuchsbedingten Streuung. Zur Streuung von Scherversuchen sowie von Reibungsversuchen mit Geokunststoffen liegen verschiedenste Untersuchungen vor (unter anderem [32], [101] und [73]). Stowahse wertete die Arbeiten der unterschiedlichen Autoren aus und fasste die Ergebnisse zusammen [89]. Insbesondere die von der Untergruppe 1 des Arbeitskreises 5.1 "Kunststoffe in der Geotechnik und im Wasserbau" der DGGT durchgeführte Ringanalyse lieferte einen umfassenden Überblick zu den Abweichungen und Streubreiten der Versuche. Bild 2.5 zeigt, dass in den Ringanalysen (1995 wenig Vorgaben zur Versuchsdurchführung und 1996 detailliertere Angaben zu den Versuchsrandbedingungen) signifikante Unterschiede in den Ergebnissen zu verzeichnen sind. Auch durch die spezifischeren Randbedingungen konnten die Streuungen nur geringfügig minimiert werden (Bild 2.3 und Bild 2.5). Deutlich ist zu erkennen, dass die Streubreiten mit höheren Normalspannungen zunehmen. Nach [73] könnten Geräteeinflüsse diese höhere Variation bedingen. Die in den Ringanalysen gewonnenen Erkenntnisse werden auch durch die Untersuchungen von Jones [54] bestätigt, die vergleichbare Streuungen ergaben.

In den Ringanalysen zeigte sich aber auch, dass die Wiederholungsversuche der einzelnen Labors Variationskoeffizienten von weniger als 10% aufweisen und dies unabhängig vom Normalspannungsniveau. Philipp kommt in seiner Arbeit über Meßunsicherheiten bei bodenphysikalischen Untersuchungen [73] ebenfalls zu entsprechenden Ergebnissen. Werden die von den verschiedenen Autoren gewonnenen Erkenntnisse zur Reproduzierbarkeit auf die in dieser Arbeit beschriebenen Versuche (Scherversuche, Reibungsversuche und Herausziehversuche) übertragen, so ist mit einer Versuchsstreuung von 10 % zurechnen. Diese zufällige Streuung der Ergebnisse muss bei der Reproduktion bzw. bei der Wiederholung von Versuchen sowie bei der Auswertung und Beurteilung berücksichtigt werden.

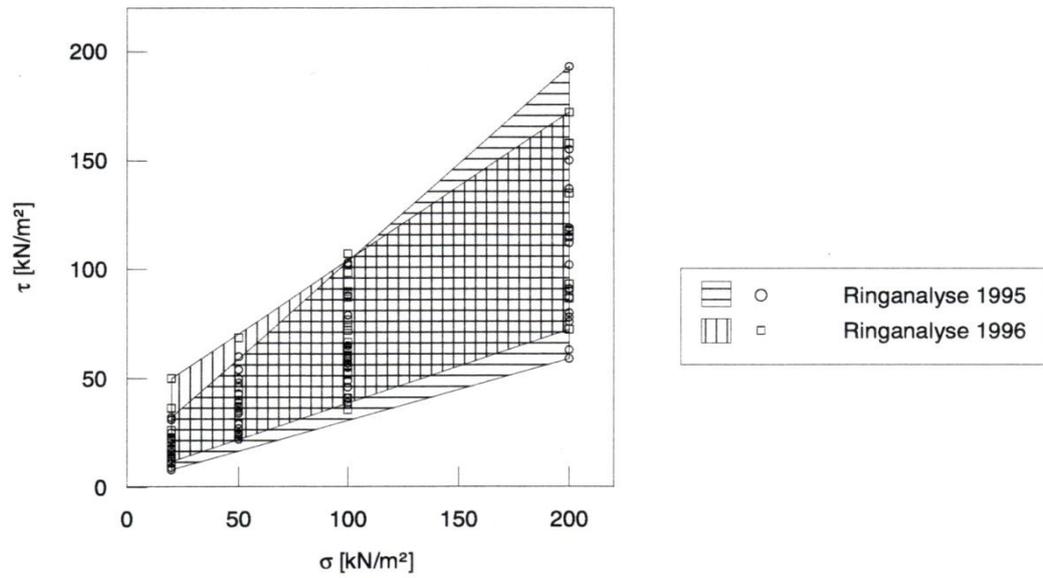


Bild 2.5 Streubereich im Reibungsversuch zwischen Sand und Geotextil nach [32] (Ringanalyse 1995 und 1996) aus [89]
(variance of friction test between sand and geotextile due to [32] (ring analysis 1995 and 1996) from [89])

3 Experimentelle Vorarbeiten

3.1 Auswahl des Lockergesteins

Aufgrund des großen Bedarfs an Lockergestein bei der Durchführung von Versuchen im Interaktionsprüfgerät (IPG) wurde ein Lockergestein ausgewählt, das kontinuierlich und in gleichbleibender Qualität bezogen werden kann. Weiterhin waren für die Auswahl des Lockergesteins die Handhabung und Eignung für eine Bodenbehandlung (mit Kalk und Zement) ausschlaggebend. Aufgrund der zuvor beschriebenen Kriterien fiel die Auswahl auf einen Schluff aus Canitz (Can, Bild 3.1), welcher von einem Mischwerk in Löthain in gleichbleibender Qualität bezogen werden konnte.

Der Großteil der Versuche wurde mit einem Sandgehalt von ca. 50% (CS5, Bild 3.2) durchgeführt, dieser wurde aber auch variiert. Die mechanischen Eigenschaften wurden in gängigen bodenmechanischen Laborversuchen ermittelt Tab. 3.1 (siehe dazu auch [94]). Dabei wurden die Einbaudichte und der Wassergehalt variiert. Dieses Arbeitsprogramm schloss auch die Eignungsprüfung für die Bodenverfestigung mit ein.

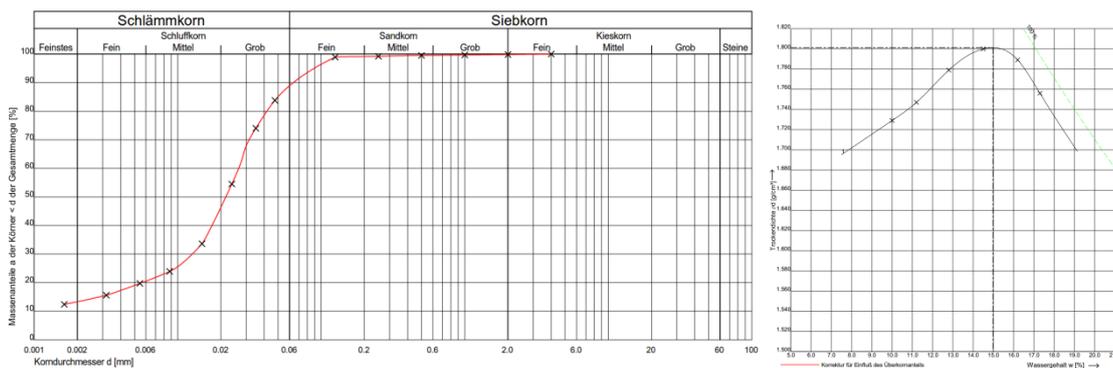


Bild 3.1 Körnungslinie und Proctorkurve des Canitz-Schluffs (Can)
(*grain size distribution and proctor curve of Canitz-Schluff (Can)*)

Beim CS5 handelt es sich um einen schwach tonigen und stark sandigen Schluff mit einem Wasserdurchlässigkeitsbeiwert von $9,3 \times 10^{-10}$ m/s. Die Konsistenzgrenzen und die Plastizitätszahl des Materials zeigen eine leichte Plastizität.

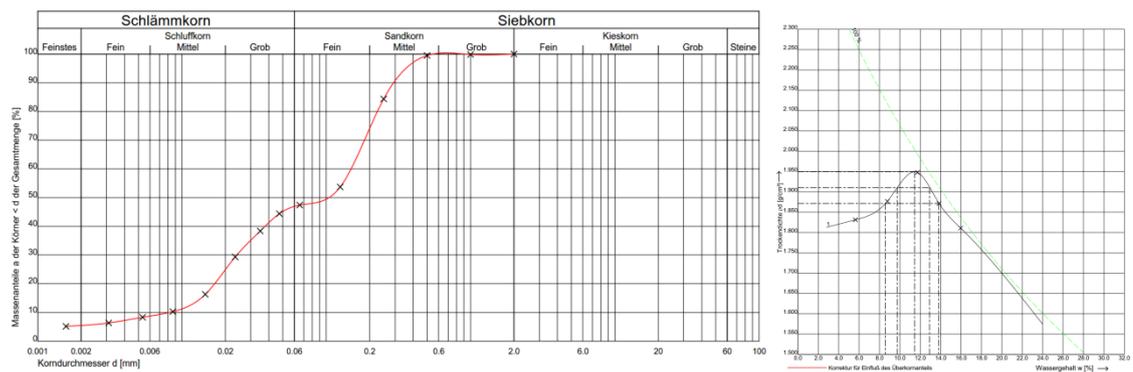


Bild 3.2 Körnungslinie und Proctorkurve des Canitz-Schluffs mit 50% Sand (CS5)
(*grain size distribution and proctor curve of Canitz-Schluff with 50% sand (CS5)*)

Tab. 3.1 Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen am CS5
(*results of soil-mechanical tests with CS5*)

Eigenschaften:	Zeichen:	Maßeinheit:	Versuchsergebnisse:
Korndichte	q_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	q_{PR}	[kg/m ³]	1.946

Bei sulfat- (Gips) oder sulfidhaltigen (Pyrit) Böden kann es nach der Zugabe eines Mischbinders (beinhaltet Kalziumhydroxid) zu einer Bildung von Ettringit (prismatische oder nadelige Kristalle) kommen [100]. Entsteht Ettringit vor der Verdichtung, wird lediglich das Bindemittel nicht optimal ausgenutzt. Bildet sich aber das Ettringit nach der Verdichtung, können durch die starke Volumenzunahme enorme Quelldrücke und Hebungen entstehen [107]. Das Merkblatt "Bodenverfestigung und Bodenverbesserungen mit Bindemitteln" [N19] weist auf diese Problematik nicht hin. In der Literatur finden sich verschiedene Werte für einen noch zulässigen Sulfatgehalt (SO_4). Es wird empfohlen ab einem Sulfatgehalt von 0,5% weitere Untersuchungen durchzuführen. Um eine unerwartete Volumenvergrößerung aufgrund einer Ettringitbildung im Vorfeld auszuschließen, wurde der Canitz-Schluff in einem externen Labor detailliert untersucht Bild 3.3. Die Analyse ergab mit 170 mg/kg einen sehr niedrigen Sulfatgehalt, weshalb eine Ettringitbildung ausgeschlossen werden konnte.

Probe		Boden
Labor-Nr.:		110003526
Parameter	Einheit	anl
Trockenrückstand	Ma.-%	94,4
Sulfat säurelöslich	mg/kg	170
Chlorid säurelöslich	mg/kg	12,7
Nitrat (CaCl ₂ -Extr.)	mg/kg	2,2
Carbonat nach Scheibler	Ma.-%	2,1
Schmelzaufschluß		
Mg	Ma.-%	0,4
Ca	Ma.-%	1,1
K	Ma.-%	0,9
Na	Ma.-%	0,5
Al	Ma.-%	2,4

(Ho, v) und (Hu,v) = Brenn- bzw. Heizwert bei konstantem Volumen

Bild 3.3 Analyseergebnisse der externen Laborprüfung aus [96]
(*analysis results of external laboratory tests from [96]*)

Neben den Versuchsserien an CS5 zur Komplettierung der Hauptuntersuchungen, wurden auch ergänzende Versuche mit anderen Lockergesteinen (Schluff aus Canitz mit einem Sandgehalt von 30% (CS3) und dem reinen Schluff (Can)) durchgeführt. Der optimale Wassergehalt von Can beträgt 15,0%, der von CS3 12,2%. Weiterhin wurden, zur besseren Wertung und Vergleichbarkeit der Ergebnisse, Versuche am Hohenbockaer Glassand (HB) sowie an Kaolin (KL) ausgeführt. Kaolin ist ein feines weißes Gestein mit einem Hauptbestandteil Kaolinit, welches auch in der Porzellanherstellung eingesetzt wird. In dem nachfolgenden Bild 3.4 ist die Körnungslinie sowie die Proctorkurve dieses Materials dargestellt und in Tab. 3.2 sind die Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen zusammengefasst. Die Fließgrenze und die Plastizitätszahl weisen auf einen mittel bis ausgeprägt plastischen, anorganischen Ton hin. Der Korndurchmesser des Größtkorns des Kaolins ist kleiner 0,06 mm.

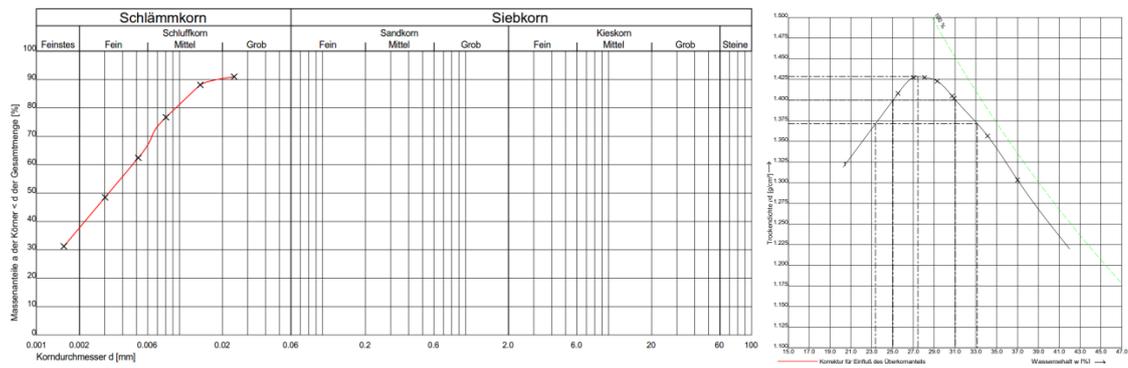


Bild 3.4 Körnungslinie und Proctorkurve des Kaolins (KL)
(*grain size distribution and proctor curve of Kaolin (KL)*)

Tab. 3.2 Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen am KL
(*results of soil-mechanical tests with KL*)

Eigenschaften:	Zeichen:	Maßeinheit:	Versuchsergebnisse:
Korndichte	q_s	[kg/m ³]	2.640
Ausrollgrenze	w_P	[1]	0,298
Fließgrenze	w_L	[1]	0,520
Plastizitätszahl	I_P	[1]	0,222
Optimaler Wassergehalt	w_{OPT}	[1]	0,274
Proctordichte	q_{PR}	[kg/m ³]	1.428

Bei dem Hohenbockaer Glassand handelt es sich um einen weißen, enggestuften (0,1 bis 0,6 mm) Feinsand (Bild 3.5 und Tab. 3.3), der auch bei der Variation des Sandgehaltes des Schluffs aus Canitz eingesetzt wurde. Der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert nach Beyer beträgt $4,7 \times 10^{-4}$ m/s.

Tab. 3.3 Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen am HB
(*results of soil-mechanical tests with HB*)

Eigenschaften:	Zeichen:	Maßeinheit:	Versuchsergebnisse:
Korndichte	q_s	[kg/m ³]	2.640
Optimaler Wassergehalt	w_{OPT}	[1]	0,150
Proctordichte	q_{PR}	[kg/m ³]	1.609
Lockerste Lagerung	$minq_d$	[kg/m ³]	1.415
Dichteste Lagerung	$maxq_d$	[kg/m ³]	1.707



Bild 3.5 Körnungslinie und Proctorkurve des Hohenbockaer Glassands (HB)
(*grain size distribution and proctor curve of Hohenbockaer Glassand (HB)*)

3.2 Auswahl der Geogitter

Zwölf verschiedene Geogitter von sechs verschiedenen Herstellern kamen bei der Hauptversuchsreihe zum Einsatz. Die Produkte wurden so ausgesucht, dass die große Vielfalt der am Markt verfügbaren Geogitter möglichst gut abgedeckt wurde. Die ausgewählten Produkte verfügten über Kurzeitfestigkeiten zwischen 30 und 200 kN/m, deckten die gängigen Herstellungsverfahren ab und hatte mit HDPE, PET, PP und PVA vier verschiedene Rohstoffe. In den Tab. 3.4 und Tab. 3.5 sind spezielle geometrische Eigenschaften dieser zwölf Produkte zusammengefasst. Insbesondere bei der Interpretation der Ergebnisse in den nachfolgenden Kapiteln wird auf diese Werte zurückgegriffen. Als Maß, inwieweit ein Geogitter zwei Bodenschichten voneinander trennt, wurde der Verhältnswert aus der Fläche der Öffnung zur Fläche der Masche (Verhältnis Öffnungsweite zu Maschenweite) ermittelt. Zu diesem Zweck wurden die Geogitter vermessen, die Fläche der Öffnung wird näherungsweise aus dem Produkt der Öffnungsweite in Längs- und Querrichtung ermittelt. Die Fläche der Masche wird aus dem Abstand von der Mitte eines Querelements (bzw. Längselements) bis zur Mitte des nächsten Querelements (bzw. Längselements) bestimmt. Die ebenfalls in den Tabellen enthaltene "gemittelte Höhe der Querelemente" wurde als Maß für die Höhe der Querelemente definiert. Zur Ermittlung wurde die Höhe der Geokunststoffe an zwei Punkten (in der Mitte der Querelemente sowie auf den Knotenpunkten) gemessen und gemittelt.

Tab. 3.4 Geometrische Eigenschaften der einaxialen Geogitter
(*geometrical parameters of uniaxial geogrids*)

Geogitter	1	3	5	7	9	11
Verhältnis Öffnungsweite zu Maschenweite [%]	47,2	63,7	63,8	72,4	64,0	60,2
gemittelte Höhe der Querelemente [mm]	1,27	2,05	1,81	1,50	2,25	1,65

Die getesteten zwölf Geogitter wurden komplettiert durch zwei weitere Geogitter, die aufgrund ihrer Beschaffenheit für Detailuntersuchungen sowie für spezifische Versuche genutzt wurden. Weiterhin wurden für einige Versuche die Querelemente der Geogitter entfernt, um detailliertere Kenntnisse über das Lastabtragungsverhalten zu erhalten (siehe dazu auch Kapitel 5.2).

Tab. 3.5 Geometrische Eigenschaften der biaxialen Geogitter
(*geometrical parameters of biaxial geogrids*)

Geogitter	2	4	6	8	10	12
Verhältnis Öffnungsweite zu Maschenweite [%]	66,2	63,8	61,5	78,5	80,2	90,5
gemittelte Höhe der Querelemente [mm]	1,27	1,25	1,10	1,30	1,82	4,00

Zur Sicherstellung, dass die getesteten Produkte auch mit den von den Herstellern erhaltenen Produktdaten übereinstimmen, wurden die technischen Daten mit Prüfberichten von externen und internen Prüfeinrichtungen abgeglichen.

Material 1: einaxiales Geogitter aus Polyester Multifilamenten, mit einer Kurzzeitfestigkeit laut Datenblatt von > 150 kN/m in der Zugrichtung und > 30 kN/m quer zur Zugrichtung und einer Dehnung bei Bruch, ebenfalls laut Datenblatt, von $< 11\%$ ($\pm 3\%$) in Zugrichtung und $< 12\%$ ($\pm 3\%$) in der Querrichtung.

Material 2: biaxiales Geogitter aus Polyester Multifilamenten, mit einer Kurzzeitfestigkeit in beiden Richtungen laut Datenblatt von > 40 kN/m und einer Dehnung bei Bruch, ebenfalls laut Datenblatt, von $< 11\%$ ($\pm 3\%$) in Zugrichtung und $< 12\%$ ($\pm 3\%$) in der Querrichtung.

Material 3: einaxiales gelegtes Geogitter aus Polyester, mit einer Kurzzeitfestigkeit laut Datenblatt von > 120 kN/m in der Zugrichtung und > 40 kN/m quer zur Zugrichtung. Die Dehnung bei Nennfestigkeit laut Datenblatt ist $< 8\%$ in beiden Richtungen.

Material 4: biaxiales gelegtes Geogitter aus Polypropylen, mit einer Kurzzeitfestigkeit in beiden Richtungen laut Datenblatt von > 40 kN/m und einer Dehnung bei Nennfestigkeit, ebenfalls laut Datenblatt, von $< 8\%$ in beiden Richtungen.

Material 5: einaxiales gelegtes Geogitter aus Polyester, mit einer Kurzzeitfestigkeit laut Datenblatt von > 188 kN/m in der Zugrichtung. Die Dehnung bei Nennfestigkeit laut Datenblatt ist $< 6\%$ in der Zugrichtung. Die Kurzzeitfestigkeit und Dehnung in der Querrichtung ist auf dem Datenblatt nicht angegeben.

Material 6: biaxiales gelegtes Geogitter aus Polypropylen, mit einer Kurzzeitfestigkeit in beiden Richtungen laut Datenblatt von > 40 kN/m und einer Dehnung bei Nennfestigkeit, ebenfalls laut Datenblatt, von $< 8\%$ in beiden Richtungen.

Material 7: einaxiales Geogitter aus Polyester Multifilamenten, mit einer Kurzzeitfestigkeit laut Datenblatt von > 160 kN/m in der Zugrichtung und > 25 kN/m quer zur Zugrichtung. Die Dehnung bei Nennfestigkeit laut Datenblatt ist $< 10,5\%$ in der Zugrichtung und $< 12\%$ in der Richtung quer dazu.

Material 8: biaxiales Geogitter aus Polyester Multifilamenten, mit einer Kurzzeitfestigkeit in beiden Richtungen laut Datenblatt von > 35 kN/m und einer Dehnung bei Bruch, ebenfalls laut Datenblatt, von $< 10,5\%$ in Zugrichtung und $< 10\%$ in der Querrichtung.

Material 9: einaxiales Geogitter aus Polyvinylalkohol und Polyamid Multifilamenten, mit einer Kurzzeitfestigkeit laut Datenblatt von > 150 kN/m in der Zugrichtung und > 30 kN/m quer zur Zugrichtung. Die Dehnung bei Nennfestigkeit laut Datenblatt ist $< 6\%$ in der Zugrichtung und $< 20\%$ in der Richtung quer dazu.

Material 10: biaxiales Geogitter aus Polyester Multifilamenten, mit einer Kurzzeitfestigkeit in beiden Richtungen laut Datenblatt von > 40 kN/m und einer Dehnung bei Nennfestigkeit, ebenfalls laut Datenblatt, von $< 10\%$ in beiden Richtungen.

Material 11: einaxiales gestrecktes Geogitter aus high-density Polyethylen (PEHD), mit einer Kurzzeitfestigkeit laut Datenblatt von $> 52,8$ kN/m und einer Dehnung bei Bruch von $11 (\pm 3)\%$ ebenfalls laut Datenblatt.

Material 12: biaxiales gestrecktes Geogitter aus Polypropylen, mit einer Kurzzeitfestigkeit in beiden Richtungen laut Datenblatt von 30 kN/m (Mittelwert) und einer Dehnung bei Nennfestigkeit, ebenfalls laut Datenblatt, von 5,8% in beiden Richtungen.

Material 13: einaxiales Geogitter aus Polyester Multifilamenten, mit einer Kurzzeitfestigkeit laut Datenblatt von > 150 kN/m in der Zugrichtung und > 30 kN/m quer zur Zugrichtung und einer dreidimensionalen Struktur. Die Dehnung bei Nennfestigkeit laut Datenblatt ist < 12,5% in der Zugrichtung und < 25% in der Richtung quer dazu.

Material 14: einaxiales Geogitter aus Polyester Multifilamenten, mit einer Kurzzeitfestigkeit laut Datenblatt von > 150 kN/m in der Zugrichtung und > 30 kN/m quer zur Zugrichtung. Die Dehnung bei Nennfestigkeit laut Datenblatt ist < 10% in der Zugrichtung und < 10% in der Richtung quer dazu.

3.3 Auswahl des Bindemittels

Mit Zement verfestigte Böden zeigen eine schnelle Zunahme der Druckfestigkeit und des Steifemoduls [107]. 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 Bild 3.6 dargestellten Erfahrungswerte für das Mischungsverhältnis Kalk zu Zement ergeben. In Anlehnung an diese Tabelle wurde ein Kalk-Zementverhältnis von 30 zu 70 zur Stabilisierung von 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

Bild 3.6 Erfahrungswerte zur Stabilisierung mit Mischbindern aus [107]
(*experimental data for soil improvement with lime and cement from [107]*)

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

wurde ein hydraulisches Spezialbindemittel zur Verbesserung von fein- bis gemischt-körnigen Böden aus gebranntem Schiefer und hochreaktivem Feinkalk [75]. Untersuchungsergebnisse anderer Autoren ([19] & [76]) haben weiterhin gezeigt, dass die Festigkeit durch die Zugabe von Zement nahezu linear mit dem Zementgehalt anwächst, während sich bei Zugabe von Kalk ab etwa 2–4% Kalkgehalt keine weitere Zunahme der Festigkeit und des Elastizitätsmoduls mehr ergibt. In den von Becker et al. durchgeführten Versuchen konnte gezeigt werden, dass sich die vom Kalk gebundene Wassermenge mit steigendem Bindemittelgehalt vergrößert, pro 1 M.-% Bindemittel ergab sich zwischen 0,5 bis 1,0 M.-% gebundenes Wasser [18].

Zement ruft sofort eine Hydratation hervor, daher ist eine sofortige Verdichtung des behandelten Lockergestein für die angestrebte Festigkeit unerlässlich. Nach 24 Stunden hat sich ein schwer verdichtbares Korngemisch gebildet [21]. Daher wurden in der vorliegenden Versuchsserie die Proben unmittelbar nach dem Mischen mit dem Zwangsmischer (Bild 5.10) eingebaut.

3.4 Experimentelle Voruntersuchungen

Im Vorfeld der eigentlichen Versuchsserie waren verschiedene Voruntersuchungen notwendig, die im folgenden Kapitel näher beschrieben werden.

3.4.1 Experimentelle Untersuchungen zur Klärung der Versuchsgeschwindigkeit

Die in den Normen für den direkten Scherversuch (DIN 18137-3) [N6], für die Bestimmung des Herauszieh Widerstandes (DIN EN 13738) [N11] sowie die in der DIN 60009 [N10] genannten Versuchsgeschwindigkeiten weichen voneinander ab, aber in allen Normen heißt es, dass Porenwasserüberdrücke zu vermeiden sind. Nach den zuvor genannten Normen lag die niedrigste Scher- bzw. Herausziehgeschwindigkeit für das zu untersuchende Lockergestein bei 0,05 mm/min. Eine solch niedrige Geschwindigkeit ist sehr unwirtschaftlich und führt zu sehr langen Versuchszeiten. Aufgrund des relativ geringen Wassergehalts (zwischen 11 und 13%) mit dem die Versuche eingebaut wurden, ist die Gefahr von Porenwasserüberdrücken gering. Daher wurden Untersuchungen zu einer möglichen Erhöhung der Versuchsgeschwindigkeit durchgeführt. Diese Untersuchungen hatten das Ziel, die Versuchsreihe mit einer höheren Geschwindigkeit als 0,05 mm/min durchführen zu können.

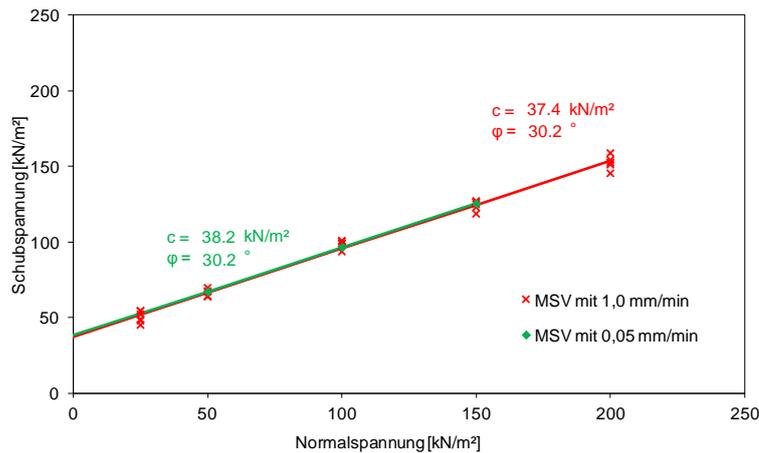


Bild 3.7 Darstellung von Scherversuchen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten (*shear test with different velocities*)

Die im Bild 3.7 dargestellten Ergebnisse eines Mehrstufenversuchs (MSV) mit einer Schergeschwindigkeit von 0,05 mm/min und die Ergebnisse aus mehreren Mehrstufenversuchen mit einer Versuchsgeschwindigkeit von 1,00 mm/min zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Die sehr geringen Abweichungen können mit den Versuchs- und Einbaubedingungen erklärt werden, somit konnte die geplante Versuchsserie mit der höheren und deutlich wirtschaftlicheren Scher- bzw. Herausziehgeschwindigkeit durchgeführt werden.

3.4.2 Experimentelle Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

In dem Zwischenbericht des DFG-Forschungsprojektes [56] wurde die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse im Interaktionsprüfgerät ausführlich geprüft und mit sehr gut bewertet. Seit dieser Prüfung wurden an dem Interaktionsprüfgerät einige bauliche Veränderungen vorgenommen und die Untersuchungen wurden an einem anderen Lockergestein durchgeführt, daher wurde die Reproduzierbarkeit auch an der aktuellen Konfiguration sowie unter der Verwendung der Mehrstufentechnik geprüft. In Bild 3.8 sind links zwei Scherversuche mit der Mehrstufentechnik und gleicher Versuchskonfiguration dargestellt, das rechte Diagramm zeigt drei Wiederholungsversuche (Einstufenversuche) mit einer Normalspannung von 25 kN/m². Auch bei den Einstufenversuchen (rechts dargestellt) handelt es sich um Scherversuche.

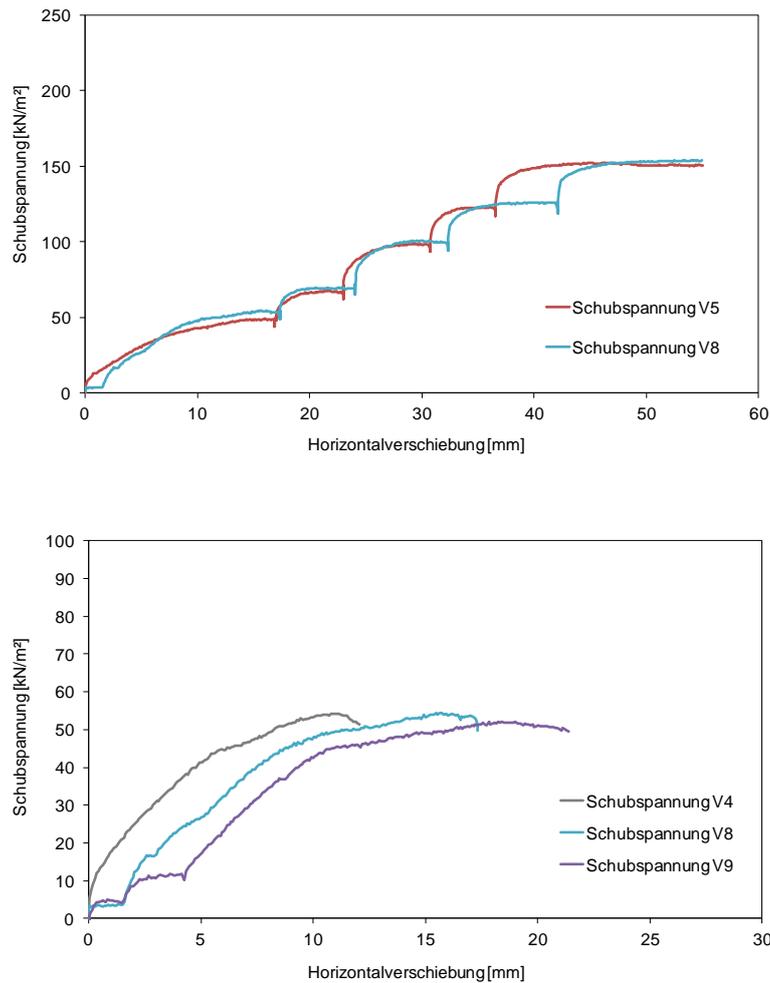


Bild 3.8 Wiederholung von Mehrstufen- und Einstufen-Scherversuchen mit Lockergestein CS5 (*repetition of multistep- and normal-shear tests with CS5*)

Sowohl die Mehrstufenversuche als auch die Einstufenversuche, die mit dem optimierten Versuchsgerät und dem aktuellen Material durchgeführt wurden, zeigten eine sehr gute Reproduzierbarkeit. Die ermittelten Schubspannungen wiesen in den Wiederholungsversuchen nur sehr geringe Schwankungen auf.

Zusätzlich zu den Wiederholungen der Scherversuche wurde auch die Reproduzierbarkeit von Herausziehversuchen geprüft. Bild 3.9 zeigt die Wiederholung eines Herausziehversuchs mit Material 11. Das Diagramm belegt, dass es grundsätzlich möglich ist mit dem Interaktionsprüfgerät reproduzierbare Herausziehversuche durchzuführen. Auf die detaillierte Betrachtung der Herausziehversuche mit den unterschiedlichen Materialien sowie auf die Reibungsversuche wird in Kapitel 4 eingegangen.

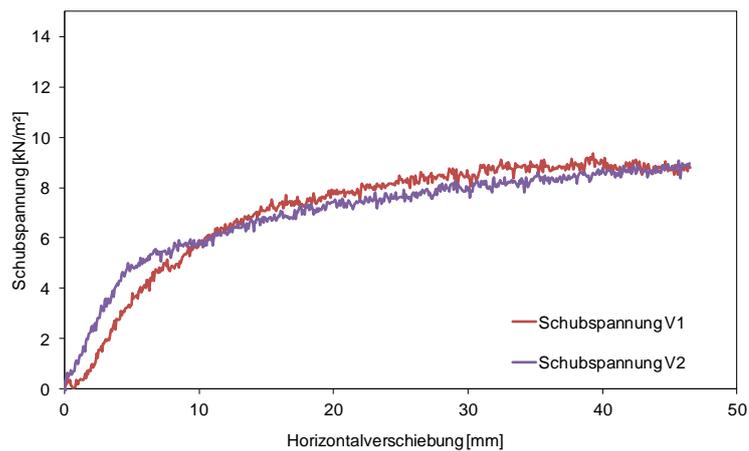


Bild 3.9 Wiederholung eines Herausziehversuchs mit Geogitter 11
(*repetition of pull-out test with geogrid 11*)

3.4.3 Experimentelle Untersuchungen zur Mehrstufentechnik

Als Mehrstufenversuch wird ein Herauszieh-, Reibungs- oder Scherversuch bezeichnet, bei dem nach dem Peak-Wert und vor dem Erreichen der Restscherfestigkeit die Normalspannung erhöht wird und dann der Versuch vorgesetzt wird, wodurch mit einem Versuchseinbau mehrere Schubspannungswerte ermittelt werden können (u. A. [4], [90], [91]). Schon Bergado et al. verwendeten für ihre Versuchsserie *“Prediction of pullout resistance and pullout force displacement relationship for inextensible grid reinforcements”* eine Vorform der Mehrstufentechnik. In der Versuchsserie wurden mit einem Versuchseinbau mehrere Tests durchgeführt [20].

Bei einem Mehrstufenversuch wurde der in Kapitel 2.3 beschriebene Versuchsablauf wie folgt modifiziert:

- Einbau der Probe mit dem vorgeschriebenen Einbauwassergehalt und der Einbautrockendichte.
- Konsolidation der Probe mit der ersten Laststufe der Normalspannung.
- Scherbelastung der Probe bis zum Erreichen der Bruchlast, ohne die Probe durch eine weitere Scherverschiebung zu schädigen.
- Rekonsolidation der Probe mit der nächsten Laststufe der Normalspannung.

- Erneute Scherbelastung der Probe bis zum Erreichen der Bruchlast, ohne die Probe durch eine weitere Scherverschiebung zu schädigen.
- Wiederholung der Rekonsolidations- und Scherbelastungsschritte im Vorbruchbereich bis zum Erreichen der maximalen Normalspannungslaststufe.

In dem Konzept für die Versuchsserie wurden die Tests mit der im Kapitel 3.3.10. des Zwischenberichts [56] beschriebenen und als gut vertretbaren Alternative zu Einstufenversuchen bezeichneten Mehrstufentechnik eingeplant. Weiterhin dienten die experimentellen Untersuchungen dazu, die Anwendbarkeit der Mehrstufentechnik an diversen Produkten zu überprüfen.

Die in dem Zwischenbericht betrachteten Vergleichsversuche (Reibungs- und Herausziehversuche) wurden mit einem hochzugfesten Polyvinylalkohol-Geogitter aus Multifilamenten und einer Kurzzeitfestigkeit von 750 kN/m durchgeführt. Die bei den aktuellen Untersuchungen verwendeten Geogitter haben Kurzzeitfestigkeiten von 30 bis 200 kN/m, unterscheiden sich in den Rohstoffen (HDPE, PET, PP und PVA), haben verschiedene Herstellungsverfahren sowie verschiedene Wirkungsmechanismen.

Bei der Durchführung der Herausziehversuche mit den verschiedenen Geogittern der sechs Hersteller zeigte sich, dass die Mehrstufentechnik nur bedingt geeignet ist. Bei dem in den Vergleichsversuchen des Zwischenberichts verwendeten Geogitter (FT) handelt es sich um ein Produkt, bei dem der Verbund Geokunststoff/Boden hauptsächlich über Reibung auf den Längselementen erfolgt und die Querstränge nur eine vergleichsweise geringe Wirkung haben. Das Produkt hat bei einer Kurzzeitfestigkeit in Längsrichtung von 750 kN/m nur eine Kurzzeitfestigkeit in Querrichtung von 50 kN/m. Ein Ausfall der Querstreben, wie es bei den sehr großen Verschiebungswegen in einem Mehrstufenversuch teilweise geschieht, hätte bei diesem Produkt nur eine relativ geringe Auswirkung auf die Schubspannung und damit auf das Verbundverhalten. Hingegen hat das Versagen der Querstreben bei anderen Produkten zum Teil einen starken Abfall der Schubspannung zur Folge. Gerade bei Produkten, bei denen der Quotient aus Kurzzeitfestigkeit in Längsrichtung zur Kurzzeitfestigkeit in Querrichtung klein ist (gegen eins geht) und die Oberfläche des Gitters glatt ist, hat ein Versagen der Querstreben einen stärkeren Einfluss. Detailliert wird der Einfluss der Querelemente in Kapitel 5.2 (Untersuchungen zum Einfluss der Querelemente) betrachtet.

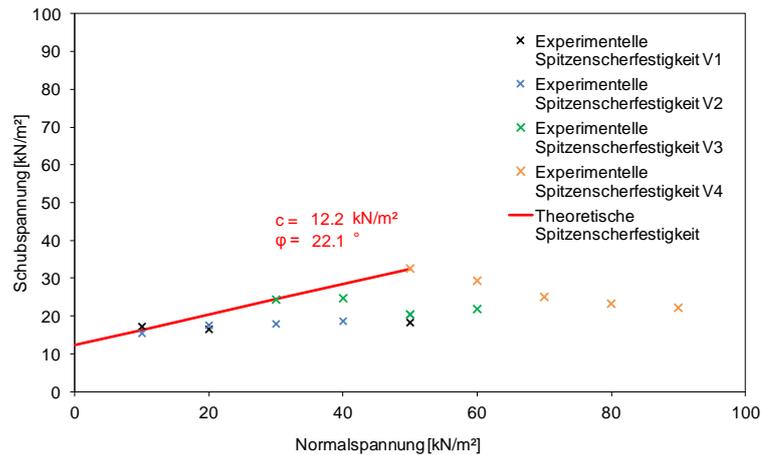


Bild 3.10 Mehrstufenherausziehversuche mit Geogrid 5 im τ/σ -Diagramm
(*multistep pull-out test with geogrid 5 in τ/σ -diagram*)

Beispielhaft sind in Bild 3.10, Bild 3.11 und Bild 3.12 verschiedene Mehrstufenherausziehversuche dargestellt, die zeigen, inwieweit die Versuche bzw. Geogitter für die Mehrstufentechnik geeignet sind. Im Bild 3.10 sind vier Versuche bei unterschiedlichen Laststufen dargestellt. Deutlich ist bei diesem Produkt (Material 5) ein Abfall bzw. kein weitere Anstieg nach der ersten Laststufe festzustellen. Aufgrund dieser Tatsache ist das Material in dieser Kombination nicht für die Mehrstufentechnik geeignet und es mussten weitere Versuche durchgeführt werden, aus welchen nur die erste Laststufe in die Regression einbezogen wurde.

Das Bild 3.11 zeigt eine Versuchsreihe mit Material 3. Die Auswertung der ermittelten Schubspannungen zeigte, dass sowohl die erste als auch die zweite Laststufe der Mehrstufenversuche mit diesem Material in die Bestimmung der Scherparameter einbezogen werden kann, der Abfall der Schubspannung ist erst nach der zweiten Laststufe zu verzeichnen. Diese Beispiele belegen, dass die Mehrstufentechnik nicht uneingeschränkt zu richtigen Ergebnissen führt bzw. die gemessenen Schubspannungen interpretiert werden müssen.

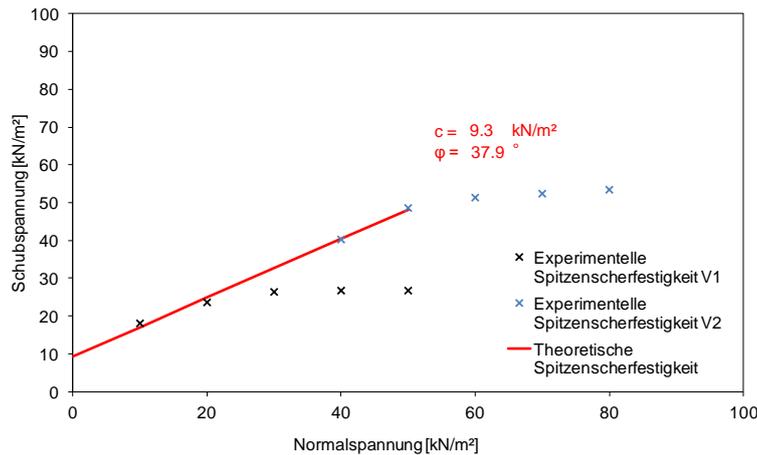


Bild 3.11 Mehrstufenherausziehversuche mit Geogitter 3 im τ/σ -Diagramm (multistep pull-out test with geogrid 3 in τ/σ -diagram)

Das in Bild 3.12 dargestellte Produkt eignet sich hingegen sehr gut für die Mehrstufentechnik. Die Betrachtung der Geogitter nach der Durchführung der Versuche zeigte, dass die Querstränge noch intakt waren. Beachtet werden muss aber, dass es sich bei dem in Bild 3.12 dargestellten Produkt um ein biaxiales Geogitter handelt, das in einem anderen Normalspannungsbereich untersucht wurde. Unter diesen Bedingungen, mit diesem Produkt und mit dem verwendeten Lockergestein wäre nur ein Mehrstufenversuch zur Bestimmung der Scherparameter notwendig. Der Zustand des Geokunststoffs nach dem Versuch gibt zwar einen Hinweis über die Eignung des Materials für die Mehrstufentechnik, jedoch nur in Kombination mit einem weiteren Mehrstufenversuch, beginnend mit einer höheren ersten Laststufe, kann sichergestellt werden, dass die Ergebnisse nicht von dem ersten Versuch abweichen.

In den zuvor gezeigten Beispielen wurden Herausziehversuche bezüglich der Eignung für die Mehrstufentechnik untersucht. Da sich Reibungsversuche hinsichtlich Versagensmechanismen und Belastung der Geogitter unterscheiden, hat auch die Betrachtung des Reibungsversuchs bezüglich einer Eignung für die Mehrstufentechnik zu erfolgen. Exemplarisch für die Mehrstufenreibungsversuche wurden die Versuche mit Material 8 ausgewählt (Bild 3.13). Das Diagramm zeigt einen Mehrstufenversuch (V1) bei den Laststufen 25, 50, 100, 150 sowie 200 kN/m² und einen Wiederholungsversuch (V2) bei den Laststufen 75, 125 sowie 175 kN/m². Durch die höhere erste Laststufe des zweiten Versuchs konnte gezeigt werden, dass die Ergebnisse des ersten Mehrstufenversuchs auf dem Niveau des zweiten Versuchs lagen.

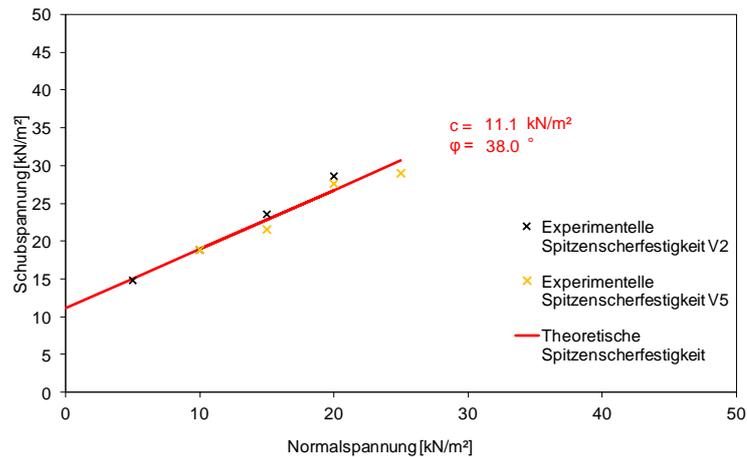


Bild 3.12 Mehrstufenherausziehversuche mit Geogitter 2 im τ/σ -Diagramm (multistep pull-out test with geogrid 2 in τ/σ -diagram)

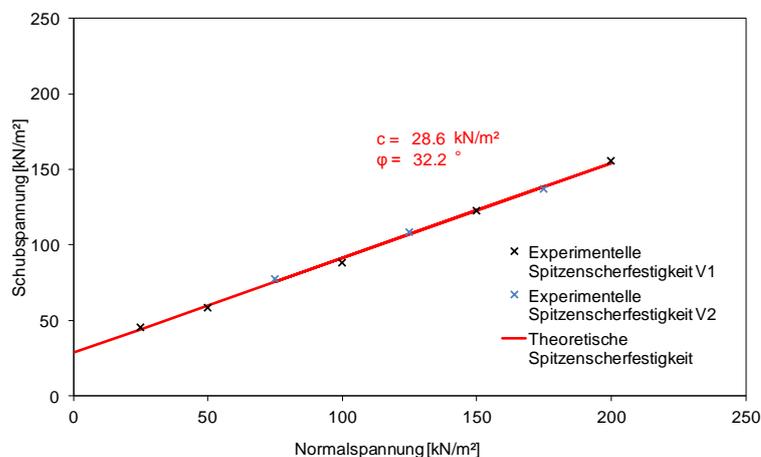


Bild 3.13 Mehrstufenreibungversuche mit Geogitter 8 im τ/σ -Diagramm (multistep pull-out test with geogrid 8 in τ/σ -diagram)

Die in den beiden Versuchen ermittelten Ergebnisse lassen sich sehr gut durch eine Regressionsgerade darstellen. Somit kann dargelegt werden, dass die Mehrstufentechnik bei den Reibungsversuchen grundsätzlich möglich ist. Die genaue Betrachtung der unterschiedlichen Materialien erfolgt in Kapitel 4.2. Grundsätzlich kann aber festgestellt werden, dass in den Mehrstufenreibungversuchen eine geringe Schädigung der Geogitter auftritt und sich somit die Mehrstufentechnik besser für die Reibungsversuche eignet als für die Herausziehversuche und daher die Scherparameter im Reibungsversuch grundsätzlich mit einem geringeren Aufwand bestimmt werden können.

Die Durchführung eines Mehrstufenversuchs im Vergleich mit einem gewöhnlichen Versuch bedeutet nur einen geringfügigen Mehraufwand, da die Probe nicht neu eingebaut werden muss. Sie kann aber deutliche versuchstechnische Erleichterungen bedeuten. Bei der Gesamtbetrachtung des Aufwandes und des möglichen Nutzens der Mehrstufentechnik wird der Vorteil ersichtlich, einen Versuch direkt mit mehreren Laststufen durchzuführen.

4 Hauptuntersuchungen

Aufgrund der Vielzahl der durchgeführten Versuche wird nicht auf jeden Versuch im Einzelnen eingegangen werden. Vielmehr werden die Besonderheiten dargestellt, um Schlussfolgerungen ziehen zu können. Insbesondere zeigte sich auch, dass eine Korrelationsanalyse keine einheitliche Aussage zulässt. Nachfolgend wird überprüft, welche Geogitter bei welcher Versuchsanordnung die höchsten und niedrigsten Werte lieferten, getrennt nach biaxialen und einaxialen Produkten. Damit soll auf keinen Fall gezeigt werden, welche Produkte schlecht oder besonders gut sind, es sollen tendenzielle Aussagen ermöglicht werden. Weiterhin sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass alle durchgeführten Untersuchungen gewissen Streuungen unterliegen und es daher nicht zulässig ist, anhand von Einzelergebnissen Aussagen über getestete Produkte zu machen. Die Versuchsanordnungen erlauben nur tendenzielle Schlussfolgerungen.

4.1 Programm und Ergebnisse der Scherversuche

In Kapitel 3.1 wurde erläutert, welche Gründe zu der Wahl der verwendeten Lockergesteine führten. Die mit Abstand meisten Versuche wurden mit CS5 durchgeführt. Das folgende Diagramm veranschaulicht die Ergebnisse der Scherversuche im Großrahmenschergerät für dieses Lockergestein (Bild 4.1). Die Versuche ergaben eine Kohäsion von $37,4 \text{ kN/m}^2$ und einen Reibungswinkel von $30,2^\circ$. Die in den Scherversuchen mit CS5 erlangten Ergebnisse dienen als Referenzwert, die in den nachfolgenden Kapiteln zur Ermittlung der Verbundbeiwerte (nach Gl. (2.4)) herangezogen werden.

In Tab. 4.1 sind neben den Werten von CS5 auch die Scherparameter der anderen getesteten Lockergesteine zusammengefasst. Die Versuche mit Mischbinder werden in Kapitel 5.3 (Versuchsprogramm und Versuchsergebnisse mit Bodenbehandlung) ausführlich beschrieben, in Bild 5.11 ist auch die Ermittlung der Scherparameter dargestellt. Die τ/σ -Diagramme der anderen in Tab. 4.1 aufgeführten Lockergesteine befinden sich im Anhang A.

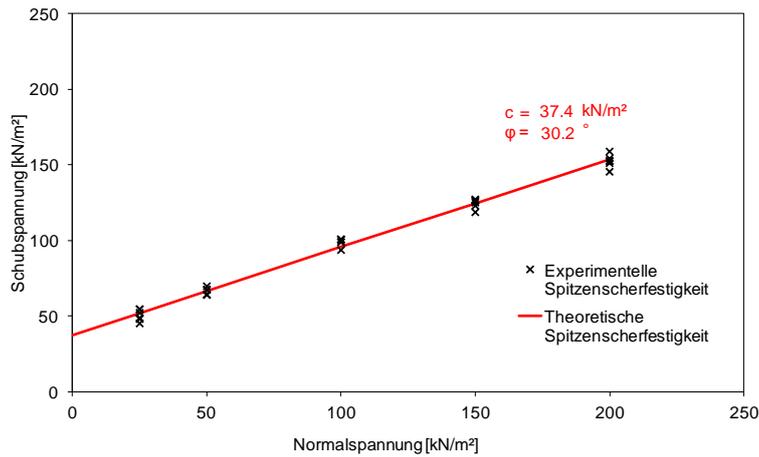


Bild 4.1 τ/σ -Diagramm der Scherversuche an CS5
(τ/σ -diagram of shear test with CS5)

Die Betrachtung aller im IPG durchgeführten Scherversuche hat gezeigt, dass die ermittelten Kohäsionswerte eher als zu hoch zu bewerten sind. Die Gründe für diese erhöhte Kohäsion sind mannigfaltig und haben je nach getestetem Lockergestein verschiedene bzw. sich überlagernde Ursachen. Die Versuche an dem Hohenbockaer Glassand (HB) haben gezeigt, dass die ermittelte Kohäsion (Tab. 4.1) nicht den für einen Sand zu erwartenden Werten entspricht. Einen Teil dieser Kohäsion lässt sich mit dem als "Scheinkohäsion" benannten Phänomen erklären, also dem Zusammenhalt der Sandkörner durch Kapillarkräfte [87]. Da aber der Wassergehalt in der Versuchsserie mit dem HB relativ gering war, müssen noch andere Einflüsse die hohe Kohäsion bedingt haben.

Tab. 4.1 Ergebnisse der Scherversuche (ISV)
(*shear tests results*)

Versuchstyp	Locker- gestein	Zuschlags- stoff	Wasser- gehalt [%]	Versuchs- geschwindigkeit [mm/min]	Normal- spannungsberich [kN/m ²]	Anzahl Versuche	Reibungs- winkel [°]	Kohäsion [kN/m ²]
Scherversuch	CS5	--	11,3	1,0	25-200	6	30,2	37,4
Scherversuch	CS5	M13 (14)	11,3	1,0	25-200	2	39,2*	70,0*
Scherversuch	CS3	--	12,2	1,0	25-200	3	33,5	25,9
Scherversuch	Can	--	13,7	1,0	31,5-206,5	2	34,1	16,3
Scherversuch	HB	--	2,5	1,0	25-200	1	32,1	16,5
Scherversuch	KL	--	28,2	1,0	25-200	2	11,2	20,5
* ohne den Wert der ersten Laststufe (Mehrstufenversuch) ermittelt.								

Die Beobachtungen im IPG, das über einen sehr großen Scherrahmen (43,7 x 43,7 cm) verfügt, legen nahe, dass das Scheren in einer Zone erfolgt, also nicht nur auf einer kleinen und genau definierten Ebene. Weiterhin werden strukturelle Faktoren eine Auswirkung haben. Bei dem Schluff aus Canitz mit einem Sandgehalt von 50% zeigte sich, dass durch die Zugabe des Sandes im Vergleich mit dem CS3 und dem Can die Kohäsion erhöht wird und der Reibungswinkel abnimmt. Diese erst einmal so nicht zu erwartenden Ergebnisse scheinen ebenfalls ihre Ursache in der großen Scherzone sowie in den Kapillarkräften zu haben.

Tab. 4.2 Gegenüberstellung der Scherversuche mit den unterschiedlichen Bodenmaterialien unter Berücksichtigung des Weges beim Maximalwert der Schubspannung
(*comparison of shear test with different soils*)

Scherversuche mit Bodenmaterial	Normal- spannung	Schub- spannung	Anzahl Versuche	Weg (bis Peak)
	[kN/m ²]	[kN/m ²]		[mm]
CS5	25	50,3	3	10,9
CS5 + M13	25	107,7	2	3,95
CS3	25	39,5	3	7,2
Can	31,5	38,4	2	3,4
HB	25	30,3	1	6,73
KL	25	24,4	1	8,33

Aufgrund der Vielzahl getesteter Produkte sowie der großen Anzahl an Ergebnissen wurde zusätzlich zu den Tab. 4.1 und Tab. 4.2 in Tab. 4.3 die Reihenfolge der Produkte bei den verschiedenen Tests (Weg bis zum Erreichen der maximalen Schubspannung, Maximale Schubspannung, Höhe des Reibungswinkels und Höhe der Kohäsion) zusammengefasst. Dabei wurden eine hohe Schubspannung, eine hoher Reibungswinkel sowie eine hohe Kohäsion positiv bewertet. Weiterhin wurde ein kurzer Weg bis zum Maximum (Peak) der Schubspannung positiv beurteilt. Die maximale Schubspannung bei den Versuchen mit dem Schluff aus Canitz (Can) wurden bei einer etwas höheren Normalspannung durchgeführt.

Tab. 4.3 Reihenfolge der Ergebnisse der Scherversuche an verschiedenen Lockergesteinen
(*sequence of results from shear tests with different soils*)

Scherversuche mit Bodenmaterial	Schub- spannung	Reibungs- winkel	Kohäsion	Weg (bis Peak)
CS5	2	5	2	6
CS5 + M13	1	1	1	2
CS3	3	3	3	4
Can	4	2	6	1
HB	5	4	5	3
KL	6	6	4	5

Tab. 4.3 zeigt, dass das mit einem Mischbinder behandelte Lockergestein in fast allen Bereichen zu den besten Werten führte, da aber das Thema Bodenbehandlung in Kapitel 5.3 ausführlich behandelt wird, wird an dieser Stelle auf die Versuche mit dem Mischbinder nicht weiter eingegangen.

Das sehr feinkörnige Kaolin hat mit einem Reibungswinkel von $11,2^\circ$ den niedrigsten Wert der Testreihe, auch der Weg bis zum Maximum der Schubspannung bei diesem Bodenmaterial ist verhältnismäßig lang, was den Erwartungen entsprach. Die Kohäsion lag aber unter den Werten der Schluffe mit den erhöhten Sandgehalten (CS3 und CS5). Die Ergebnisse zeigen auch, dass der Reibungswinkel des Hohenbockaer Glasands unter denen des Schluffs liegt. Durch die Erhöhung des Sandgehalts bei dem Schluff nimmt der Reibungswinkel, bei der Kohäsion verhält sich dieser Sachverhalt genau umgekehrt, durch Erhöhung des Sandanteils nimmt die Kohäsion des Schluffs (CS3 und CS5) zu. Nach dem MOHR-COULOMB'schen Versagenskriterium (Gl. (2.1)) haben auf die Schubspannung sowohl die Normalspannung, der Reibungswinkel sowie die Kohäsion Einfluss, somit ist eine hohe Schubspannung nicht gleichbedeutend mit einem hohen Reibungswinkel, wie an dem CS5 festgestellt werden kann. Ferner konnte bei der Betrachtung der Wege, die nötig waren, um das Maximum (Peak) der Schubspannung zu erreichen, festgestellt werden, dass bei den untersuchten Lockergesteinen mit einer höheren Kohäsion der Weg bis zum Peak länger war als bei jenen mit einer geringeren Kohäsion. Die Versuche mit der geringeren Kohäsion hatten zudem ein stärkeres Maximum. Je stärker die Volumenzunahme (Dilatanz) während des Versuchs, desto stärker die Verzahnung [89]. Mit einer Vertikalbewegung von durchschnittlich ca. 2,0 mm hatten die Versuche mit Material CS5 die größte Dilatanz. Die Reihenfolge der weiteren Materialien war wie folgt: CS5 (ca. 2,0 mm), CS3 (ca. 0,9

mm), Can (ca. 0,4 mm), HB (ca. 0 mm) und KL (- 0,2 mm). Die so ermittelte Verzahnung der Produkte deckt sich auch mit der Höhe der ermittelten Schubspannungen, das CS5 wies in den Testreihen die höchste Schubspannung sowie Dilatanz auf, hingegen KL die kleinste und eine negative Volumenzunahme.

4.2 Programm und Ergebnisse Reibungsversuche (IRV)

Die τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche befinden sich im Anhang, die Versuche mit dem CS5 in Anhang B und die mit dem KL in Anhang C.

4.2.1 IRV unter Verwendung des Schluffs aus Canitz mit einem Sandgehalt von 50% (CS5)

In Tab. 4.5 sind die Ergebnisse der Reibungsversuche an den zwölf Geogittern mit dem CS5 zusammen gefasst. Die Tabelle enthält ebenfalls die Resultate des Materials 13, welches für ergänzende Auswertungen herangezogen wurde. Für einen besseren Überblick erfolgte die Auswertung der Scher- und Verbundparameter getrennt nach ein- sowie biaxialen Produkten. Aus diesem Grund sind auch die einaxialen Produkte in der Tab. 4.5 grau hinterlegt. Mit Ausnahme des Materials 11, welches deutlich geringere Zugfestigkeiten hat, haben alle getesteten einaxialen Produkte eine Zugfestigkeit die größer 150 kN/m ist. Das Material 11 hatte auch im Vergleich zu den anderen (einaxialen) Produkten, den mit Abstand geringsten Verbundbeiwert für Reibung. Aufgrund der zuvor beschriebenen Punkte, wurde Material 11 nicht in der statistischen Auswertung (Tab. 4.4) berücksichtigt. Die statistische Auswertung belegt, dass die ermittelten Reibungswinkel (der einaxialen Produkte) und somit auch die für die Bemessung relevanten Verbundbeiwerte für Reibung relativ nahe zusammenliegen (Tab. 4.4). Die Abweichung des Minimal- bzw. Maximalwerts zum Mittelwert liegt bei rund 11,5% und somit im Bereich des zufälligen Fehlers, der mit rund 10% angenommen werden muss (Kapitel 2.4, Versuchsauswertung) und dies obwohl sich die Maschenweite, die Produktionsart, die Oberflächenbeschaffenheit sowie die Flexibilität der Produkte teilweise erheblich unterscheiden.

Tab. 4.4 Statistische Auswertung der einaxialen Reibungsversuche mit CS5
(*statistical evaluation of uniaxial friction tests with CS5*)

Geogitter	Reibungs- winkel	Adhäsion	Verbund- beiwert der Reibung	Verbund- beiwert der Kohäsion
	[°]	[kN/m ²]		
1	28,6	17,0	0,936	0,455
3	25,5	31,2	0,820	0,834
5	27,9	27,4	0,910	0,733
7	31,2	26,5	1,041	0,709
9	31,1	27,3	1,036	0,730
Mittelwert	28,86	25,88	0,949	0,692
Standardabweichung	2,13	4,73	0,083	0,126
Min. Wert	25,5	17,0	0,820	0,455
Max. Wert	31,2	31,2	1,041	0,834

Bei den Verbundbeiwerten für Kohäsion ist die Variationsweite erheblich größer. Beispielsweise beträgt die Standardabweichung der Adhäsion 4,73. Mit 0,455 hat Material 1 den kleinsten Verbundbeiwert für Kohäsion, dieses Material hat im Gegensatz zu allen anderen Materialien ein sehr kleines Verhältnis von Öffnungs- zu Maschenweite, die Oberfläche ist also verhältnismäßig stark geschlossen. Die Ergebnisse bei diesem Produkt legen die Vermutung nahe, dass das Verhältnis von Öffnungs- zu Maschenweite einen klaren Einfluss auf die Adhäsion hat.

Tab. 4.5 Ergebnisse der Reibungsversuche (IRV) mit Bodenmaterial CS5
(results of the friction tests with CS5)

Versuchstyp	Lockergestein	Geogitter	Wassergehalt [%]	Versuchsgeschwindigkeit [mm/min]	Normalspannungsbereich [kN/m ²]	Reibungswinkel [°]	Kohäsion [kN/m ²]
Reibungsversuch	CS5	01	11,3	1,0	25-200	28,6	17,0
Reibungsversuch	CS5	02	11,3	1,0	25-200	29,2	28,6
Reibungsversuch	CS5	03	11,3	1,0	25-200	25,5	31,2
Reibungsversuch	CS5	04	11,3	1,0	25-200	31,3	26,1
Reibungsversuch	CS5	05	11,3	1,0	25-200	27,9	27,4
Reibungsversuch	CS5	06	11,3	1,0	25-200	28,4	29,1
Reibungsversuch	CS5	07	11,3	1,0	25-200	31,2	26,5
Reibungsversuch	CS5	08	11,3	1,0	25-200	32,2	28,6
Reibungsversuch	CS5	09	11,3	1,0	25-200	31,1	27,3
Reibungsversuch	CS5	10	11,3	1,0	25-200	29,1	32,0
Reibungsversuch	CS5	11	11,3	1,0	25-200	16,2	33,8
Reibungsversuch	CS5	12	11,3	1,0	25-200	28,2	30,0
Reibungsversuch	CS5	13	11,3	1,0	25-200	29,0	41,3
Die einaxialen Produkte sind grau hinterlegt.							

Für die biaxialen Versuche mit dem CS5 wurden die Ergebnisse in Tab. 4.6 statistisch ausgewertet. Alle untersuchten Produkte hatten Kurzzeitfestigkeiten zwischen 30 und 40 kN/m. Die Auswertung zeigt, dass die Unterschiede zwischen den Produkten bei dieser Versuchsart und bei diesem Lockergestein sehr gering sind. Die ermittelten Verbundbeiwerte für Reibung liegen alle zwischen 0,9 und 1,1, was einem guten bis sehr guten Verbund entspricht. Die Verbundbeiwerte für Kohäsion lagen zwischen 0,70 und 0,85.

Tab. 4.6 Statistische Auswertung der biaxialen Reibungsversuche mit CS5
(*statistical evaluation of biaxial friction tests with CS5*)

Geogitter	Reibungswinkel	Adhäsion	Verbundbeiwert der Reibung	Verbundbeiwert der Kohäsion
	[°]	[kN/m ²]		
2	29,2	28,6	0,960	0,765
4	31,3	26,1	1,045	0,698
6	28,4	29,1	0,929	0,778
8	32,2	28,6	1,082	0,765
10	29,1	32,0	0,956	0,856
12	28,2	30,0	0,921	0,802
Mittelwert	29,73	29,07	0,982	0,777
Standardabweichung	1,49	1,77	0,060	0,047
Min. Wert	28,20	26,10	0,921	0,698
Max. Wert	32,20	32,00	1,082	0,856

4.2.2 IRV unter Verwendung des Kaolins (KL)

Wie schon bei der Auswertung der Versuche (IRV) mit dem CS5, erfolgte eine Betrachtung getrennt zwischen einaxialen und biaxialen Produkten sowie unter Ausschluss von Material 11. Einen Überblick über alle mit dem Kaolin durchgeführten Reibungsversuche gibt Tab. 4.8. Die im Reibungsversuch ermittelten Reibungswinkel der verschiedenen einaxialen Geogitter liegen wie beim Kaolin selbst, sehr niedrig. Der Mittelwert beträgt 11,04° und die Standardabweichung 1,11°. Der Schwankung zwischen Minimal- und Maximalwert liegt sogar bei ca. 28%, ebenfalls bezogen auf den Mittelwert. Trotz dieser relativ starken Streuung ist der minimale Verbundbeiwert für

Reibung bei 0,845 und somit auf einem üblichen für Bemessungen angesetzten Niveau (Tab. 4.7).

Tab. 4.7 Statistische Auswertung der einaxialen Reibungsversuche mit KL
(*statistical evaluation of uniaxial friction tests with KL*)

Geogitter	Reibungs- winkel	Adhäsion	Verbund- beiwert der Reibung	Verbund- beiwert der Kohäsion
	[°]	[kN/m ²]		
1	11,4	14,2	1,018	0,693
3	9,5	13,9	0,845	0,678
5	10,1	12,0	0,900	0,585
7	12,6	15,7	1,129	0,766
9	11,6	15,2	1,037	0,741
Mittelwert	11,04	14,20	0,986	0,693
Standardabweichung	1,11	1,28	0,101	0,062
Min. Wert	9,5	12,0	0,845	0,585
Max. Wert	12,6	15,7	1,129	0,766

Die ermittelten Adhäsionswerte verhalten sich hinsichtlich der Streuung ähnlich wie die Reibungswinkel, wobei aber die daraus ermittelten Verbundbeiwerte deutlich niedriger liegen (Mittelwert von $0,693 \pm 0,062$).

Tab. 4.8 Ergebnisse der Reibungsversuche (IRV) mit Bodenmaterial KL
(results of the friction tests with KL)

Versuchstyp	Lockergestein	Geogitter	Wassergehalt [%]	Versuchsgeschwindigkeit [mm/min]	Normalspannungsbereich [kN/m ²]	Reibungswinkel [°]	Kohäsion [kN/m ²]
Reibungsversuch	KL	01	28,2	1,0	20-100	11,4	14,2
Reibungsversuch	KL	02	28,2	1,0	20-100	12,5	14,6
Reibungsversuch	KL	03	28,2	1,0	20-100	9,5	13,9
Reibungsversuch	KL	04	28,2	1,0	20-100	9,3	15,1
Reibungsversuch	KL	05	28,2	1,0	20-100	10,1	12,0
Reibungsversuch	KL	06	28,2	1,0	20-100	4,9	14,9
Reibungsversuch	KL	07	28,2	1,0	20-100	12,6	15,7
Reibungsversuch	KL	08	28,2	1,0	20-100	13,5	14,8
Reibungsversuch	KL	09	28,2	1,0	20-100	11,6	15,2
Reibungsversuch	KL	10	28,2	1,0	20-100	5,7	16,7
Reibungsversuch	KL	11	28,2	1,0	20-100	8,7	12,3
Reibungsversuch	KL	12	28,2	1,0	20-100	11,9	18,8
Reibungsversuch	KL	13	28,2	1,0	20-100	10,7	19,5
Reibungsversuch	KL	14	28,2	1,0	20-100	10,5	19,2
Die einaxialen Produkte sind grau hinterlegt.							

Die in Tab. 4.9 zusammengefassten Werte der biaxialen Reibungsversuche an dem Kaolin (KL) zeigen geringe Streuungen bei der Adhäsion und somit auch bei den daraus ermittelten Verbundbeiwerten für Kohäsion, welche zwischen 0,7 und 0,9 liegen. Wie schon bei den Reibungsversuchen mit dem CS5 festgestellt, haben auch die Versuche mit dem KL gezeigt, dass ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem Verhältnis von Öffnungs- zu Maschenweite besteht, der sich positiv auf den Verbundbeiwert der Kohäsion auswirkt.

Tab. 4.9 Statistische Auswertung der biaxialen Reibungsversuche mit KL
(*statistical evaluation of biaxial friction tests with KL*)

Geogitter	Reibungswinkel	Adhäsion	Verbundbeiwert der Reibung	Verbundbeiwert der Kohäsion
	[°]	[kN/m ²]		
2	12,5	14,6	1,120	0,712
4	9,3	15,1	0,827	0,737
6	4,9	14,9	0,433	0,727
8	13,5	14,8	1,212	0,722
10	5,7	16,7	0,504	0,815
12	11,9	18,8	1,064	0,917
Mittelwert	9,63	15,82	0,860	0,772
Standardabweichung	3,32	1,50	0,301	0,073
Min. Wert	4,9	14,6	0,433	0,712
Max. Wert	13,5	18,8	1,212	0,917

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Produkten fallen bei dieser Versuchsart erheblich aus. Der größte im Versuch ermittelte Reibungswinkel lag bei 13,5° und somit fast dreimal so hoch wie der niedrigste Wert 4,9°, womit auch die Verbundbeiwerte sehr weit auseinander liegen (0,3 bis 1,2).

4.2.3 Schlussfolgerungen aus den Reibungsversuchen

Sowohl bei Versuchen mit dem Schluff (CS5) als auch bei Versuchen mit dem Kaolin konnte festgestellt werden, dass das Verhältnis von Öffnungs- zu Maschenweite sich

auf die Adhäsion auswirkt. Geogitter mit verhältnismäßig großer Öffnung haben einen hohen Adhäsionswert und solche mit kleinen einen eher geringeren Wert.

Bei den einaxialen Produkten konnte beobachtet werden, dass bei beiden Bodenmaterialien die gleichen Geogitter die niedrigsten Reibungswinkel im Test hatten (Material 3 und 5). Auch die höchsten Werte wurden bei beiden Böden mit den gleichen Gittern (7 und 9) ermittelt. Bei den biaxialen Produkten zeichnete sich ein nicht ganz so eindeutiges Bild ab. Material 6 lieferte eher niedrige Reibungswinkel, hingegen gehörte Material 8 in beiden Versuchsreihen zu den mit den höchsten Werten. Ein eindeutiger Parameter, der für die Höhe des Verbundbeiwerts für Reibung verantwortlich ist, konnte aus diesen beiden Versuchsreihen nicht ermittelt werden, da eine Vielzahl von Parametern zwischen den einzelnen Produkten variierten. Die Betrachtung der Produkte mit den höheren Werten und der Geogitter mit den niedrigeren Werten zeigte aber, dass die glatteren und unflexiblen Produkte tendenziell niedrigere Werte ergaben. Das Herstellungsverfahren der Geogitter hatte keinen Einfluss auf die Höhe der Ergebnisse, wie zum Beispiel der Vergleich zwischen den mit demselben Verfahren hergestellten Materialien 4 und 6 zeigte.

Trotz der vielen Parameter, in denen sich die Geogitter unterscheiden, zeigten die Versuche mit CS5, im Ergebnis kaum Unterschiede. Wie zuvor schon erwähnt (Kapitel 4.2.2), waren die Variationen bei dem Kaolin deutlich größer und dabei insbesondere bei den Versuchen mit den biaxialen Geogittern. Bei diesen Versuchen betragen die niedrigsten Verbundbeiwerte für Reibung nur 0,4 bzw. 0,5 und das, obwohl der in den Scherversuchen ermittelte Referenzwert des Kaolins mit $11,2^\circ$ sehr niedrig liegt. In Bild 4.2 sind Fotos nach der Versuchsdurchführung (IRV mit Kaolin, biaxiale Geogitter) gegenübergestellt. Auf der linken Seite ein Versuch mit dem Material 6, welches einen sehr niedrigen Verbundbeiwert für Reibung (0,4) ergeben hat und auf der rechten Seite Material 8 mit dem ein Verbundbeiwert für Reibung von 1,2 ermittelt wurde.

Das Geogitter 6 liegt eingebettet in dem Kaolin und es ist eine vergleichsweise glatte und ebene Fläche zu erkennen. Anders die Situation auf dem rechten Bild, das Geogitter ist nicht eingebettet, sondern liegt vielmehr auf der Kaolin-Schicht. Bei Material 6 scheint sich eine Scherfläche auf dem Geogitter gebildet zu haben, welche durch die Fläche der relativ glatten Längs- und Querelemente noch reduziert wird. Bei Material 8 ist keine Scherfläche zu erkennen, das Bild lässt eher darauf schließen, dass eine während des Versuchs entstehende Scherfläche immer wieder durch das Geogitter

gestört wurde. Dies würde auch die erheblichen Unterschiede bei den Verbundbeiwerten zwischen den Produkten erklären.



Bild 4.2 Aufnahmen des Mat. 6 (links) und des Mat. 8 nach dem Reibungsversuch mit Kaolin
(picture of geogrid 6 and 8 after friction test with KL)

Die in den Reibungsversuchen mit CS5 ermittelten Verbundbeiwerte liegen mit Ausnahme des Materials 11 auf einem bei Bemessungen üblichen Niveau. Bei dem bindigen Material ist die Beurteilung deutlich komplexer und es lassen sich aus den durchgeführten Versuchen keine allgemeingültigen Aussagen treffen.

Zusätzlich zu den zwölf Produkten wurden auch noch Reibungsversuche mit Material 13 an CS5 sowie KL durchgeführt, auf diese Versuche wird in dem Kapitel 5.2 eingegangen, welches sich ausführlich mit den Querelementen befasst. Das zusätzliche Material 14, welches nahezu die gleiche Geometrie hat wie Material 9, aber aus anderen Rohstoffen hergestellt worden ist, wurde im Reibungsversuch nur mit dem KL getestet. Die ermittelten Reibungswinkel ($11,6^\circ$ und $10,5^\circ$) liegen verhältnismäßig nahe zusammen und da die Versuche im Großrahmenschergerät auch gewissen Streuungen unterliegen, kann aus diesen Ergebnissen kein Rückschluss auf den Einfluss des Rohstoffs gezogen werden.

4.3 Programm und Ergebnisse Herausziehversuche (IPV)

Die τ/σ -Diagramme zu den nachfolgend aufgeführten Herausziehversuchen befinden sich im Anhang, die Versuche mit CS5 in Anhang D, die Versuche mit KL in Anhang E und die Versuche mit HB in Anhang F.

Wie schon bei der Auswertung der Reibungsversuche, erfolgte die statistische Betrachtung der Ergebnisse bei den Herausziehversuchen getrennt für die einaxialen und biaxialen Produkte ohne das Material 11, das aufgrund der stark abweichenden Kurzzeitfestigkeit nicht berücksichtigt wurde. In den anschließenden Kapiteln gibt es für jedes Bodenmaterial eine Tabelle mit den spezifischen Randbedingungen und Ergebnissen der Einzelversuche (Tab. 4.11, Tab. 4.14, Tab. 4.17) sowie für jedes Bodenmaterial eine Tabelle mit den Ergebnissen der statistischen Auswertung für die einaxialen (Tab. 4.10, Tab. 4.13, Tab. 4.16) und biaxialen Produkte (Tab. 4.12, Tab. 4.15, Tab. 4.18). Ergänzend zu den zwölf Materialien der Hauptversuchsserie sind in den Tabellen mit den Versuchsrandbedingungen auch die Materialien 13 und 14 aufgetragen.

Mit den ermittelten Scherparametern (Tab. 4.10, Tab. 4.13, Tab. 4.16) wurde systematisch überprüft, ob die während der Versuche aufgetragenen Normalspannungen nicht den Wert der maximalen Normalspannung überschritt, bei welchem das getestete Geogitter bis zum charakteristischen Wert der Kurzzeitfestigkeit belastet werden würde. Durch mehrfaches Umstellen wurde zu diesem Zweck Gl. (4.1) hergeleitet.

$$\sigma_{\max} = \frac{\frac{R_{B,k0}}{2 \cdot l_{SK}} - c}{\tan(\varphi)} \quad \text{Gl. (4.1)}$$

In dieser Gleichung ist σ_{\max} die Schubspannung bei welcher der charakteristische Wert der Kurzzeitfestigkeit des Geogitters erreicht wird. $R_{B,k0}$ ist der charakteristische Wert der Kurzzeitfestigkeit des Geogitters, l_{SK} die Länge des Herausziehkastens (0,437 m) sowie c und φ die zuvor in den Versuchen ermittelten Scherparameter (Kohäsion und Reibungswinkel).

4.3.1 IPV unter Verwendung von Schluff aus Canitz mit einem Sandgehalt von 50% (CS5)

In Tab. 4.10 erfolgt die statistische Auswertung der einaxialen Herausziehversuche mit dem CS5. Die Standardabweichung bei den Reibungswinkeln und dieser Versuchsart ist verhältnismäßig hoch, bezogen auf den Mittelwert beträgt die Standardabweichung 21% (7,43° bezogen auf 35,24°). Insbesondere der mit Material 5 ermittelte Reibungswinkel ist im Vergleich zu den anderen Produkten sehr niedrig. Der Verbundbeiwert für Reibung des Materials 5 liegt nur bei ca. 0,70 und ist somit der einzige unter 1,0.

Tab. 4.10 Statistische Auswertung der einaxialen Herausziehversuche mit CS5
(*statistical evaluation of uniaxial pull-out tests with CS5*)

Geogitter	Reibungs- winkel	Adhäsion	Verbund- beiwert der Reibung	Verbund- beiwert der Kohäsion
	[°]	[kN/m ²]		
1	41,1	9,5	1,499	0,254
3	37,9	9,3	1,338	0,249
5	22,1	12,2	0,698	0,326
7	42,6	14,0	1,580	0,374
9	32,5	16,2	1,095	0,433
Mittelwert	35,24	12,24	1,242	0,327
Standardabweichung	7,43	2,64	0,319	0,071
Min. Wert	22,1	9,3	0,698	0,249
Max. Wert	42,6	16,2	1,580	0,433

Bei allen Versuchen mit den einaxialen Produkten und dem CS5 zeigte sich, dass die ermittelten Adhäsionswerte deutlich unter den Kohäsionswerten des Lockergesteins lagen (Verbundbeiwerte für Kohäsion zwischen 0,25 und 0,43).

Tab. 4.11 Ergebnisse der Herausziehversuche (IPV) mit Bodenmaterial CS5
(results of the pull-out tests with CS5)

Versuchstyp	Locker- gestein	Geo- gitter	Wasser- gehalt [%]	Versuchs- geschwindigkeit [mm/min]	Normal- spannungs- bereich [kN/m ²]	Anzahl Versuche	Reibungs- winkel [°]	Kohäsion [kN/m ²]
Herausziehversuch	CS5	01	11,3	1,0	10-40	2	41,1	9,5
Herausziehversuch	CS5	02	11,3	1,0	5-25	3	35,7	11,6
Herausziehversuch	CS5	03	11,3	1,0	10-50	2	37,9	9,3
Herausziehversuch	CS5	04	11,3	1,0	5-25	3	39,0	10,7
Herausziehversuch	CS5	05	11,3	1,0	10-50	4	22,1	12,2
Herausziehversuch	CS5	06	11,3	1,0	5-20	2	31,7	9,5
Herausziehversuch	CS5	07	11,3	1,0	10-40	2	42,6	14,0
Herausziehversuch	CS5	08	11,3	1,0	5-25	6	45,0	10,7
Herausziehversuch	CS5	09	11,3	1,0	10-50	3	32,5	16,2
Herausziehversuch	CS5	10	11,3	1,0	5-25	4	33,4	14,6
Herausziehversuch	CS5	11	11,3	1,0	10-50	5	17,3	7,5
Herausziehversuch	CS5	12	11,3	1,0	5-27,5	3	23,7	18,6
Herausziehversuch	CS5	13	11,3	1,0	10-50	4	33,3	19,6
Herausziehversuch	CS5	14	11,3	1,0	10-40	2	32,0	10,8

Die einaxialen Produkte sind grau hinterlegt.

Auch bei den in Tab. 4.12 dargestellten biaxialen Versuchen waren die Unterschiede zwischen den Reibungswinkeln relativ hoch (Standardabweichung 6,55) der maximale ermittelte Reibungswinkel ($45,0^\circ$) lag fast doppelt so hoch wie der niedrigste Wert ($23,7^\circ$). Mit Ausnahme von Material 12 lagen aber alle Verbundbeiwerte für Reibung über Eins. Das Material 12, mit dem niedrigsten ermittelten Reibungswinkel, hatte aber mit $18,6 \text{ kN/m}^2$ den höchsten Adhäsionswert in der Testreihe. Im Vergleich mit dem ungestörten Lockergestein ist dieser Wert aber deutlich niedriger (Verbundbeiwert für Kohäsion bei Material 12: 0,497).

Tab. 4.12 Statistische Auswertung der biaxialen Herausziehversuche mit CS5
(*statistical evaluation of biaxial pull-out tests with CS5*)

Geogitter	Reibungswinkel	Adhäsion	Verbundbeiwert der Reibung	Verbundbeiwert der Kohäsion
	[°]	[kN/m ²]		
2	35,7	11,6	1,235	0,310
4	39,0	10,7	1,391	0,286
6	31,7	9,5	1,061	0,254
8	45,0	10,7	1,718	0,286
10	33,4	14,6	1,133	0,390
12	23,7	18,6	0,754	0,497
Mittelwert	34,75	12,62	1,215	0,337
Standardabweichung	6,55	3,10	0,296	0,083
Min. Wert	23,7	9,5	0,754	0,254
Max. Wert	45,0	18,6	1,718	0,497

Die Verbundbeiwerte für Reibung, die aus den Herausziehversuchen (biaxiale Produkte) mit dem CS5 bestimmt wurden, lagen mit Ausnahme eines Produkts über Eins. Bei dem Produkt, mit dem die Reibungsbeiwerte aus den Scherversuchen nicht erreicht wurden, bildete sich in den Versuchen eine Scherfuge unmittelbar über und unter dem Geogitter aus (Bild 4.3). Die niedrigeren Verbundbeiwerte ergeben sich, weil die Längselemente und die Querelemente diese neu entstandene Scherfläche noch zusätzlich reduzieren.



Bild 4.3 **Aufnahmen des Mat. 12 nach dem Herausziehversuch mit CS5**
(image of geogrid 12 after pull-out test with CS5)

4.3.2 IPV unter Verwendung des Kaolins

Die Scherversuche mit dem KL (Kohäsion von $20,5 \text{ kN/m}^2$ und Reibungswinkel $11,2^\circ$) haben gezeigt, dass dieses Lockergestein deutlich schlechtere Scherparameter aufweist als das CS5. Auch die im Herausziehversuch ermittelten Reibungswinkel liegen deutlich unter den Werten, die in den Versuchen mit dem CS5 ermittelt wurden. Darüber hinaus sind die Verbundbeiwerte für Reibung ebenfalls deutlich niedriger. Die Auswertung der Verbundbeiwerte für Kohäsion bei dem KL zeigte, dass zwar die Adhäsionswerte im Vergleich zu den Versuchen mit dem CS5 niedrig sind, aber die Verbundbeiwerte auf einem vergleichbaren Niveau liegen. Sowohl bei den ermittelten Reibungswinkeln als auch bei den Adhäsionswerten (einaxialen Produkte) zählten die Materialien 3 und 5 zu den Produkten mit den niedrigsten Werten.

Tab. 4.13 Statistische Auswertung der einaxialen Herausziehversuche mit KL
(statistical evaluation of uniaxial pull-out tests with KL)

Geogitter	Reibungs- winkel	Adhäsion	Verbund- beiwert der Reibung	Verbund- beiwert der Kohäsion
	[°]	[kN/m ²]		
1	8,8	7,6	0,782	0,371
3	4,9	7,2	0,433	0,351
5	5,1	5,3	0,451	0,259
7	8,1	8,9	0,719	0,434
9	6,8	10,1	0,602	0,493
Mittelwert	6,74	7,82	0,597	0,381
Standardabweichung	1,56	1,62	0,140	0,079
Min. Wert	4,9	5,3	0,433	0,259
Max. Wert	8,8	10,1	0,782	0,493

Tab. 4.14 Ergebnisse der Herausziehversuche (IPV) mit Bodenmaterial KL
(results of the pull-out tests with KL)

Versuchstyp	Lockergestein	Geogitter	Wassergehalt [%]	Versuchsgeschwindigkeit [mm/min]	Normalspannungsbereich [kN/m ²]	Reibungswinkel [°]	Kohäsion [kN/m ²]
Herausziehversuch	KL	01	28,2	1,0	20-100	8,8*	7,6*
Herausziehversuch	KL	02	28,2	1,0	10-30	7,4*	8,0*
Herausziehversuch	KL	03	28,2	1,0	10-30	4,9*	7,2*
Herausziehversuch	KL	04	28,2	1,0	10-30	7,1*	8,1*
Herausziehversuch	KL	05	28,2	1,0	10-30	5,1*	5,3*
Herausziehversuch	KL	06	28,2	1,0	10-30	8,1*	5,9*
Herausziehversuch	KL	07	28,2	1,0	20-100	8,1*	8,9*
Herausziehversuch	KL	08	28,2	1,0	10-30	8,7*	9,0*
Herausziehversuch	KL	09	28,2	1,0	20-100	6,8*	10,1*
Herausziehversuch	KL	10	28,2	1,0	10-30	8,5*	5,5*
Herausziehversuch	KL	11	28,2	1,0	10-30	5,6*	2,1*
Herausziehversuch	KL	12	28,2	1,0	10-30	12,8*	10,2*
Herausziehversuch	KL	13	28,2	1,0	20-100	7,3*	11,3*
Herausziehversuch	KL	14	28,2	1,0	20-100	8,0*	7,4*

Die einaxialen Produkte sind grau hinterlegt.
* aus nur einem Mehrstufenversuch ermittelt, wodurch nur bedingt aussagekräftig.

Mit Ausnahme von Material 12 liegen die Reibungswinkel der Versuche (Herausziehversuch der biaxialen Produkte mit dem KL) recht nahe zusammen (Tab. 4.15). Material 12 weicht sowohl beim Reibungswinkel als auch beim Adhäsionswert erheblich nach oben ab. Material 12 ist auch das einzige biaxiale Produkt bei dieser Versuchskonfiguration, das einen Verbundbeiwert für Reibung größer Eins aufweist.

Tab. 4.15 Statistische Auswertung der biaxialen Herausziehversuche mit KL
(*statistical evaluation of biaxial pull-out tests with KL*)

Geogitter	Reibungswinkel	Adhäsion	Verbundbeiwert der Reibung	Verbundbeiwert der Kohäsion
	[°]	[kN/m ²]		
2	7,4	8,0	0,656	0,390
4	7,1	8,1	0,629	0,395
6	8,1	5,9	0,719	0,288
8	8,7	9,0	0,773	0,439
10	8,5	5,5	0,755	0,268
12	12,8	10,2	1,147	0,498
Mittelwert	8,77	7,78	0,780	0,380
Standardabweichung	1,89	1,64	0,172	0,080
Min. Wert	7,1	5,5	0,629	0,268
Max. Wert	12,8	10,2	1,147	0,498

Bei den in Tab. 4.15 dargestellten Adhäsionswerten weichen neben dem Material 12 noch die Materialien 6 und 8 deutlich vom Mittelwert ab und zwar bei beiden Produkten zum Minimalwert hin.

4.3.3 IPV unter Verwendung des Hohenbockaer Glassands

Bei den einaxialen Produkten zeigt sich, wie schon bei den anderen Versuchsreihen, dass teilweise erhebliche Unterschiede zwischen den Produkten zu verzeichnen sind. So liegt der höchste ermittelte Reibungswinkel (Tab. 4.16) mehr als doppelt so hoch wie der niedrigste Reibungswinkel.

Tab. 4.16 Statistische Auswertung der einaxialen Herausziehversuche mit HB
(*statistical evaluation of uniaxial pull-out tests with HB*)

Geogitter	Reibungs- winkel	Adhäsion	Verbund- beiwert der Reibung	Verbund- beiwert der Kohäsion
	[°]	[kN/m ²]		
1	20.7	8.3	0.602	0.503
3	28.7	3.0	0.873	0.182
5	19.1	2.3	0.552	0.139
7	13.3	12.6	0.377	0.764
9	23.1	6.5	0.680	0.394
Mittelwert	20.98	6.54	0.617	0.396
Standardabweichung	5.03	3.75	0.162	0.227
Min. Wert	13.3	2.3	0.377	0.139
Max. Wert	28.7	12.6	0.873	0.764

Die Adhäsionswerte bei dieser Versuchsanordnung fallen niedrig aus und variieren recht stark, wie auch die Verbundbeiwerte (für Reibung und Kohäsion).

Tab. 4.17 Ergebnisse der Herausziehversuche (IPV) mit Bodenmaterial HB
(results of the pull-out tests with HB)

Versuchstyp	Lockergestein	Geogitter	Wassergehalt [%]	Versuchsgeschwindigkeit [mm/min]	Normalspannungsbereich [kN/m ²]	Reibungswinkel [°]	Kohäsion [kN/m ²]
Herausziehversuch	HB	01	2,5	1,0	20-100	20,7*	8,3*
Herausziehversuch	HB	02	2,5	1,0	10-30	33,1*	0,0*
Herausziehversuch	HB	03	2,5	1,0	10-30	28,7*	3,0*
Herausziehversuch	HB	04	2,5	1,0	10-30	29,2*	2,3*
Herausziehversuch	HB	05	2,5	1,0	10-30	19,1*	2,3*
Herausziehversuch	HB	06	2,5	1,0	10-30	27,2*	3,0*
Herausziehversuch	HB	07	2,5	1,0	20-100	13,3*	12,6*
Herausziehversuch	HB	08	2,5	1,0	10-30	28,3*	3,4*
Herausziehversuch	HB	09	2,5	1,0	20-100	23,1*	6,5*
Herausziehversuch	HB	10	2,5	1,0	10-30	27,9*	2,7*
Herausziehversuch	HB	11	2,5	1,0	10-30	22,9*	1,9*
Herausziehversuch	HB	12	2,5	1,0	10-30	24,3*	6,4*
Herausziehversuch	HB	13	2,5	1,0	50-100	32,6*	20,9*
Herausziehversuch	HB	14	2,5	1,0	25-100	16,0*	9,1*

Die einaxialen Produkte sind grau hinterlegt.
* aus nur einem Mehrstufenversuch ermittelt, wodurch nur bedingt aussagekräftig.

Im Vergleich zu den einaxialen Produkten streuen die Reibungswinkel der biaxialen Produkte im Herausziehversuch mit dem HB nicht so stark, die Standardabweichung liegt bei 2,62°, dies entspricht ca. 10% bezogen auf den Minimalwert (28.33°). Die Aufstellung der ermittelten Verbundbeiwerte zeigt, dass der niedrigste Verbundbeiwert für Reibung bei 0,72 liegt.

Tab. 4.18 Statistische Auswertung der biaxialen Herausziehversuche mit HB
(*statistical evaluation of biaxial pull-out tests with HB*)

Geogitter	Reibungswinkel	Adhäsion	Verbundbeiwert der Reibung	Verbundbeiwert der Kohäsion
	[°]	[kN/m ²]		
2	33,1	0,0	1,039	0,000
4	29,2	2,3	0,891	0,139
6	27,2	3,0	0,819	0,182
8	28,3	3,4	0,858	0,206
10	27,9	2,7	0,844	0,164
12	24,3	6,4	0,720	0,388
Mittelwert	28,33	2,97	0,862	0,180
Standardabweichung	2,62	1,88	0,095	0,114
Min. Wert	24,3	0,0	0,720	0,000
Max. Wert	33,1	6,4	1,039	0,388

Die Adhäsionswerte liegen bei allen Versuchen deutlich unter den Kohäsionswerten des HBs, somit fallen die Verbundbeiwerte für Kohäsion sehr niedrig aus.

4.3.4 Schlussfolgerungen aus den Herausziehversuchen

Bei den Herausziehversuchen mit den einaxialen Produkten gehörte Material 5 immer zu den Produkten mit dem geringsten ermittelten Reibungswinkel. In den Versuchen mit den biaxialen Produkten zeigte sich kein so einheitliches Bild, vielmehr lieferte Material 12 bei den Versuchen mit dem CS5 sowie HB den niedrigsten Wert und bei den Versuchen unter Verwendung des KLs den höchsten Reibungswinkel. In den Versuchen mit dem KL gehörten die Materialien 2 und 4 zu den Produkten mit einem niedrigen Wert.

Die höchsten Reibungswinkel der einaxialen Produkte wurden auch für die drei Bodenarten (CS5, KL und HB) ermittelt. Unter Verwendung des CS5s konnten die größten Reibungswinkel mit den Gittern 1 und 7 festgestellt werden. Auch bei der Verwendung des KLs wurden die höchsten Werte bei diesen Produkten gemessen. Das Material 3 lieferte bei der Versuchskonfiguration mit dem HB den höchsten Reibungswinkel und gehörte bei den Versuchen mit dem KL zu den Produkten mit den niedrigsten Reibungswinkeln. Bei den biaxialen Geogittern wurden die höchsten Reibungswinkel unter Verwendung des CS5s mit Material 8 gemessen, bei dem KL mit Material 12 und bei dem HB mit Material 2.

Die Betrachtung der Minimal- und Maximalwerte zeigt sehr deutlich, dass die Interaktion zwischen Lockergestein und Geogitter auch sehr stark von dem Lockergestein abhängig ist. Im Kapitel 1.1.3 (Verbund zwischen Geokunststoff und Lockergestein) wird beschrieben, dass sich der Herausziehwiderstand aus Reibung und Erddruck zusammensetzt. Die Versuche ergaben, dass die Mechanismen der Kraftübertragung abhängig vom Lockergestein unterschiedlich stark zum Herausziehwiderstand beitragen. Sehr deutlich wird dies beim Material 12, welches bei den Böden mit hohem Sandanteil (CS5 und HB) die niedrigsten Reibungswinkel lieferte und bei dem KL den höchsten Wert. Aufgrund der hohen Querelemente (den höchsten im Test, siehe dazu auch Tab. 3.5) und der vergleichsweise harten und glatten Oberfläche ist dieses Produkt hinsichtlich der Kraftübertragung den Erddruck- (Querelemente-) Geogittern zuzuordnen, welche einen Großteil des Herausziehwiderstandes durch den Erddruck vor den Querelementen mobilisieren (siehe dazu auch Kapitel 1.1.3 und 5.2). Bei dem bindigen KL ist die Reibung zwischen Geogitter und Lockergestein sehr gering, was sich auch schon an dem niedrigen Reibungswinkel des KLs ($11,2^\circ$) zeigt. Daher fällt es nicht ins Gewicht, dass die Oberfläche des Materials 12 sehr glatt ist. Hingegen begünstigen die hohen Querelemente die Bildung des Erddrucks vor den Elementen und die im Vergleich zu den anderen Produkten hohen Reibungswinkel werden ermöglicht. Umgekehrt ist die Situation bei den Lockergesteinen mit einem hohen Reibungswinkel (CS5 und HB), die Reibung an der Oberfläche der Produkte hat einen großen Anteil an dem Herausziehwiderstand, weshalb bei dieser Versuchsanordnung andere Produkte deutlich bessere Reibungswerte ergaben.

Die zuvor geschilderten Mechanismen können auch durch die Versuche mit Material 5 bestätigt werden. Dieses glatte Produkt (in Tab. 5.1, Ergebnisse der Rautiefenermittlung, gehörte es zu den Produkten mit der geringsten Rautiefe) mit flachen Querelementen war in allen Herausziehversuchen (mit CS5, KL und HB) bei den Produkten mit

den niedrigsten ermittelten Reibungswinkeln. Aufgrund der glatten Oberfläche konnte sich in den Versuchen mit den Lockergesteinen bei denen die Reibung einen verhältnismäßig großen Anteil an dem Herausziehwiderstand hat, nur eine geringe Oberflächenreibung einstellen, so dass die Elemente quasi durch das Lockergestein "gleiten". Weiterhin kann sich aufgrund der geringen Höhe der Querelemente nur ein geringer Erddruck vor diesen Elementen aufbauen. Durch das Verdrehen der Querelemente während des Versuchs kann sich zwar die Fläche, vor der der Erddruck entsteht, vergrößern, dies ist aber immer abhängig von dem Herausziehweg sowie der Beschaffenheit der Querelemente. Detaillierter wird dieser Punkt in Kapitel 5.2 aufgegriffen.

Damit die Herausziehversuche mit dem CS5 sowie dem HB hohe Reibungswinkel ergaben, waren sowohl Anteile aus Erddruck vor den Querelementen sowie Reibung auf den Geogittern notwendig. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl Produkte mit den unterschiedlichsten Herstellungsverfahren zu den Geogittern mit den höchsten ermittelten Reibungswinkeln gehören können.

Der Vergleich der Herausziehversuche mit den einaxialen Produkten mit den Herausziehversuchen mit den biaxialen Produkten hat gezeigt, dass die Verbundbeiwerte (für Reibung und Kohäsion) bei dem CS5 als auch dem KL recht nah zusammen liegen. Anders ist dies bei dem HB, die Mittelwerte für Reibung liegen bei dieser Bodenart und den biaxialen Produkten deutlich über den Werten der einaxialen Geogitter. Einzelne einaxiale Geogitter ergaben sehr niedrige Reibungswinkel (Material 5 und 7), was bei den biaxialen Produkten nicht der Fall war. Daher ist auch die Standardabweichung deutlich höher. Die Betrachtung und der Vergleich dieser Versuche (Material 5 und 7) belegt, dass die Zugfestigkeit beider Produkte in Querrichtung zu den niedrigsten aller getesteten Geogitter gehört. Weiterhin ist bei diesen Produkten die gemittelte Höhe der Querelemente (Tab. 3.4) niedrig. Die Materialien 5 und 7 scheinen aufgrund ihrer geometrischen Eigenschaften keinen allzu guten Verbund mit dem HB einzugehen. Die Vermutung liegt nah, dass insbesondere die Querelemente (Anteil Reibung und Erddruck) darauf einen Einfluss haben.

Die Adhäsion variierte zwischen den Produkten und Bodenarten erheblich, durch den Vergleich der Adhäsionswerte mit den geometrischen Eigenschaften (Tab. 3.4 und Tab. 3.5) der Geogitter konnte festgestellt werden, dass tendenziell Geokunststoffe mit einem größeren Verhältnis von Öffnungsweite zu Maschenweite höhere Adhäsionswerte haben. Ein flächenmäßig größerer Kontakt zwischen oberer und unter Bodenschicht

führt in den Versuchen zu einem höheren Adhäsionswert. Beispielhaft sei an dieser Stelle das Geogitter mit der Nummer 12 genannt, welches bei allen Herausziehversuchen (mit CS5, KL und HB) die höchsten Adhäsionswerte lieferte. Die Verbundbeiwerte für Kohäsion belegen aber, dass in dieser Versuchsserie die Geogitter die Kohäsion nachteilig beeinflussen. So sind die Verbundbeiwerte der Kohäsion immer kleiner eins. Bei der Betrachtung der Höhe der Längs- und Querelemente und der Höhe der Adhäsionswert konnte kein Zusammenhang zwischen diesen Werten festgestellt werden.

Auch die Herausziehversuche wurden durch die Versuche an den Materialien 13 und 14 ergänzt. Wie schon bei den Reibungsversuchen, wird wegen der speziellen dreidimensionalen Struktur im Kapitel zu den Querelementen (5.2) auf die Versuche mit Material 13 eingegangen. Die Versuche mit Material 14, welches sich hinsichtlich der Geometrie, Oberflächenbeschaffenheit, Kurzzeitzugfestigkeit und Herstellungsart kaum vom Material 9 unterscheidet, aber aus anderen Rohstoffen hergestellt wurde, werden an dieser Stelle diskutiert. Bei Material 9 ist die Kette (*machine direction*) aus Polyvinylalkohol (PVA) und der Schuss (*cross machine direction*) aus Polyamid (PA) Multifilamenten hergestellt, bei Material 14 ist sowohl die Kette als auch der Schuss aus Polyester (PET) Multifilamenten. Aufgrund dieser unterschiedlichen Rohstoffe ergeben sich, wie in Kapitel 3.23.1 (Auswahl der Geogitter) beschrieben, unterschiedliche Dehnungen bei der Nennfestigkeit. Bei Material 9 sind die Dehnungen laut Datenblatt < 6 % in der Produktionsrichtung und < 20% in der Richtung quer dazu sowie < 10% in beiden Richtungen bei Material 14. Separat für die drei Bodenarten (CS5, KL und HB) wurden die Versuche mit den beiden Geogittern verglichen und Unterschiede herausgearbeitet. Die Herausziehversuche mit dem CS5 und den beiden Geogittern ergaben nahezu gleiche Reibungswinkel für beide Produkte. Zusätzlich wurde der Weg der Klemmeinheit betrachtet, der notwendig war, um die maximale Schubspannung bei den einzelnen Laststufen erreichen. Hierbei zeigte sich, dass der Weg bei Material 14, welches die deutlich steiferen Querelemente aufweist, erheblich geringer ist. Der Herausziehweg sowie der Reibungswinkel bei den Versuchen mit dem KL hingegen ergaben nur minimale Unterschiede zwischen den beiden Geogittern. Bei den Versuchen mit dem HB zeigte sich im Vergleich zu den Versuchen mit dem CS5 ein umgekehrtes Verhalten. Der zum Erreichen des Maximalwertes der Schubspannung notwendige Herausziehweg war bei dem Material 9 mit seinen dehnsteiferen Längselementen geringer. Weiterhin lieferte Material 9 auch die höheren Reibungswinkel.

In Bild 4.4 sind die Schubspannungsverläufe der Herausziehversuche an den einaxialen Geogittern mit CS5 und einer Normalspannung von ca. 30 kN/m² gegen den Weg

der Klemmeinheit aufgetragen. Bei einigen Versuchen beträgt der Weg bis zum Erreichen der maximalen Schubspannung über 40 mm. Ausgehend von den in Kapitel 1.1.3 genannten Kriterien für die Gebrauchstauglichkeit (4% nach SVG-Handbuch [79]) sind die Verformungen deutlich außerhalb des Gebrauchstauglichkeitsbereichs. Die Länge des Scherkastens beträgt 437 mm dazu noch die Länge des Geogitters bis zur Klemmeinheit, so dass von einer Gesamtlänge der Probe von 600 mm ausgegangen werden kann. Somit wären nur rund 24 mm bis zum Erreichen der Gebrauchstauglichkeit notwendig. Da aber in dieser Arbeit das Interaktionsverhalten ganzheitlich betrachtet werden soll, wird auf die Gebrauchstauglichkeit an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

Das Material 3 hat in Bild 4.4 den raschesten Anstieg der Schubspannung, das Ergebnis wird aber etwas relativiert, da dieses Produkt bei einer Normalspannung von 40 kN/m² getestet wurde und die anderen Materialien bei Normalspannungen von maximal 30 kN/m² (die Normalspannungen sind in der Legende von Bild 4.4 angegeben). Hinsichtlich des Weges der notwendig ist, um die Kräfte aus dem Geogitter in den Boden zu leiten, sind erhebliche Unterschiede zwischen den Produkten zu verzeichnen.

Die Länge des Herausziehweges sowie die Höhe der Schubspannung scheinen dabei nicht von der Kurzzeitfestigkeit oder der Dehnsteifigkeit abhängig zu sein, sondern von der Oberflächenbeschaffenheit und der Ausbildung der Querelemente. Der Vergleich zwischen den Materialien 9, 13 und 14 belegt, dass nicht das Produkt mit der höchsten Dehnsteifigkeit den steilsten Anstieg in dem Diagramm hat, also die raschestes Einleitung der Kräfte aus dem Gitter in den Boden, sondern das Produkt mit der dreidimensionalen Struktur. Weiterhin haben die relativ glatten Produkte 5 und 11 eine sehr langsame Krafteinleitung.

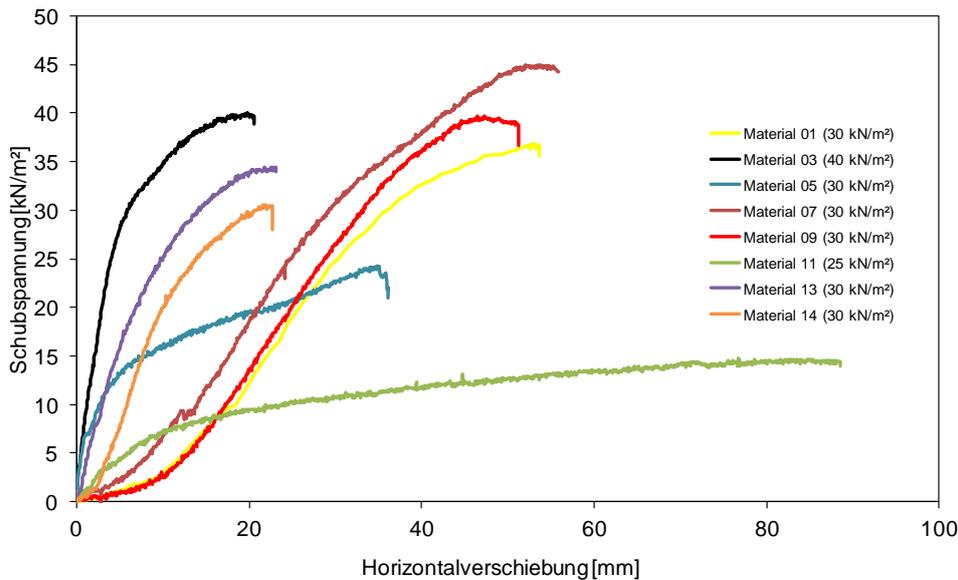


Bild 4.4 Schubspannungsverläufe verschiedener Geogitter im Herausziehversuch bei einer Normalspannung von ca. 30 kN/m² und dem Bodenmaterial CS5 (*shear stress progress in pull-out tests with different geogrids, approx. 30 kN/m² normal load and CS5*)

4.4 Ergebnisse der Hauptversuchsserie

In allen aufgeführten und verwiesenen Diagrammen im Kapitel 4, sind nur die Schubspannungen aufgetragen, die bei der Verbundparameterermittlung einbezogen wurden. Bei der Durchführung der für die Versuchsserie notwendigen Reibungs- und Herausziehversuche zeigten sich die enormen Vorteile der neu entwickelten Inlayrahmen (Bild 2.3). Mit Hilfe der Inlayrahmen konnten die Versuche bei gleichzeitig reduzierter Verschmutzung des Labors sowie niedriger mechanischer Belastungen des IPGs beim Probeneinbau, deutlich flexibler und schneller durchgeführt werden.

In Kapitel 4.1 wurde schon auf die hohe Kohäsion insbesondere bei den Scherversuchen mit dem Hohenbockaer Glassand (HB) und dem Schluff aus Canitz mit einem Sandgehalt von 50% (CS5) eingegangen (Scheinkohäsion, Kapillarkräfte und Scherzone). Die in den Reibungsversuchen als auch in den Herausziehversuchen ermittelten Adhäsionswerte lagen unter den in den Scherversuchen ermittelten Kohäsionswerten. Bei beiden Versuchsarten (IPV und IRV) konnte aber festgestellt werden, dass tendenziell Geokunststoffe mit einem größeren Verhältnis von Öffnungsweite zu Maschenweite höhere Adhäsionswerte ergeben. So gehörte das selbe Material (Material 12) bei allen Versuchsarten und unter Verwendung aller Bodenarten zu den Produkten mit den

höchsten ermittelten Verbundbeiwerten für Kohäsion. Unterschiede zwischen Reibungsversuchen und Herausziehversuchen zeigten sich aber in der Höhe der ermittelten Verbundbeiwerte für Kohäsion. Bei den Reibungsversuchen lag der durchschnittliche Verbundbeiwert für Kohäsion bei 0,73 und bei den Herausziehversuchen nur bei 0,33. Eine mögliche Ursache für die erheblichen Unterschiede zwischen den beiden Versuchsarten ist die unterschiedliche Krafteinleitung. So erfolgt die Krafteinleitung bei einem Herausziehversuch von dem Gitter in den Boden. Anders ist die Situation in einem Reibungsversuch, bei dem das Geogitter am unteren Scherrahmen fixiert ist und dieser untere Rahmen bewegt wird (Bild 2.4 b). Weiterhin könnte die Ermittlung der Schubspannung einen Einfluss haben (Gl. (2.2) bzw. Gl. (2.3)). In vorhergehenden Versuchen konnten Tamáskovics et al. ebenfalls feststellen, dass Reibungsversuche tendenziell höhere Verbundbeiwerte ergaben als Herausziehversuche [92].

In Anlehnung an die Herausziehversuche mit CS5, die in Bild 4.4 dargestellt sind, wurden in Bild 4.5 die Schubspannungsverläufe der Reibungsversuche an den einaxialen Geogittern mit CS5 und einer Normalspannung von ca. 25 kN/m² gegen den Weg der Klemmeinheit aufgetragen. Für die bessere Vergleichbarkeit dieser beiden Diagramme wurde die Achsenskalierung aus Bild 4.4 in Bild 4.5 beibehalten. Auffällig ist, dass die Geogitter im Reibungsversuch ein viel ausgeglicheneres Verhalten zeigen, als im Herausziehversuch. Der Anstieg der Schubspannung ist im Reibungsversuch viel gleichmäßiger. Trotzdem sind zwischen den Produkten Unterschiede zu erkennen und das bei den Herausziehversuchen festgestellte Phänomen tritt auch bei den Reibungsversuchen wieder auf. So ist erneut nicht das Produkt mit der höchsten Dehnsteifigkeit oder Kurzzeitfestigkeit das Produkt, das die höchsten Werte sowie den steilsten Anstieg der Schubspannung zu verzeichnen hat, sondern das Geogitter mit der dreidimensionalen (räumlichen) Struktur. Unterschiede zwischen den Versuchsarten zeigten sich aber bei Material 5. Hatte es noch im Herausziehversuch einen flachen Anstieg der Schubspannung und einen verhältnismäßig niedrigen Maximalwert, gehörte es bei den Reibungsversuchen zu den Produkten mit den besten Ergebnissen. Eine mögliche Ursache für das bessere Abschneiden bei dieser Versuchsart könnte in dem als Pflugeffekt [113] bezeichneten Verdrehen der Querelemente begründet sein.

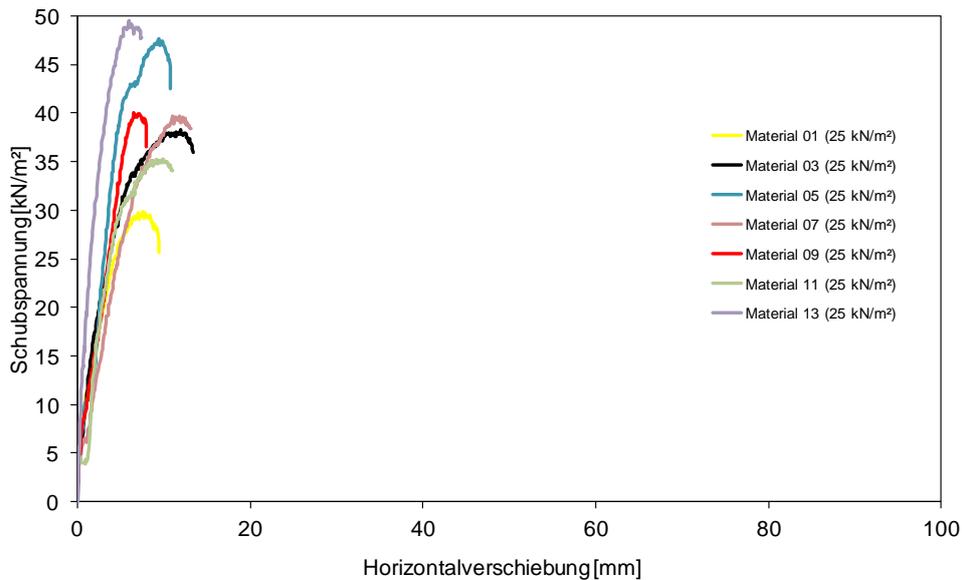


Bild 4.5 Schubspannungsverläufe verschiedener Geogitter im Reibungsversuch bei einer Normalspannung von ca. 25 kN/m² und dem Bodenmaterial CS5
(*shear stress progress in friction tests with different geogrids, approx. 25 kN/m² normal load and CS5*)

Aufgrund der unterschiedlichen Kräfteinleitung, werden die Geokunststoffe bei den beiden Versuchsarten (IPV und IRV) auch unterschiedlich stark geschädigt, wie bereits in dem Kapitel zur Mehrstufentechnik (Kapitel 3.4.3) beschrieben. Es konnte beobachtet werden, dass bei den IRV die Geogitter eine geringere Schädigung erfahren, weshalb sich bei dieser Versuchsart die Mehrstufentechnik auch besser eignet.

Die Reibungsversuche an den Geogittern wurden im Gegensatz zu den Herausziehversuchen nur mit den Bodenmaterialien CS5 und KL durchgeführt. Dieselben Geokunststoffe, deren Reibungswinkel untersucht wurden, zeigen weitestgehend die höchsten bzw. die niedrigsten Reibungswinkel, unabhängig vom verwendeten Boden (CS5 oder KL) und der Versuchsart.

5 Detailuntersuchungen

5.1 Untersuchung der Oberflächenbeschaffenheit der Geogitter

Bei der Auswertung der Reibungs- und Herausziehversuche der Hauptversuchsserien ist ein Zusammenhang zwischen der Höhe der ermittelten Verbundparameter und der Oberflächenbeschaffenheit festgestellt worden. Dies deckt sich auch mit dem Merkblatt über die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaues (M Geok E, 2005) [N20]. Hier werden neben den Komponenten der Geokunststoffe, deren Anordnung, die Rohstoffe, die Art und Verfestigung bzw. Bindung der Fasern und Garne, die Ausbildung der Kreuzungspunkte, die Maschenweite, die Stegausbildung und der Oberflächenstruktur auch das Verbundverhalten als beeinflussender Faktor genannt. Aufgrund dieser Tatsache wurde ein Verfahren gesucht, mit dem die Oberflächeneigenschaften genau und reproduzierbar beschrieben werden können. Bei der Auswahl des Verfahrens bereitete unter anderem die sehr unterschiedliche Profilierung der Geokunststoffe von wenigen μm bis zu über 400 μm Probleme sowie die Tatsache, dass die Produkte teilweise transparent sind und es so zu Problemen bei der Vermessung mit einem Laser kommen kann. Wegen der Profilierung konnte das im Stahl- und Maschinenbau übliche Linearvorschubgerät mit Rauheitstaster nicht zum Einsatz kommen. Da das mechanische Verfahren sich nicht eignete, wurde ein laseroptisches Meßsystem verwendet. Das verwendete Gerät verfügt über einen beweglichen Tisch, mit dem die Probe unter dem Laserstrahl hindurchgeführt und die Rautiefe gemessen werden konnte [57]. In Bild 5.1 sind die Rautiefen gemessen quer zu den Längselementen, der biaxialen Geogitter, dargestellt und in Bild 5.2 die Rautiefen der einaxialen Produkte (ebenfalls quer zu den Längselementen gemessen).

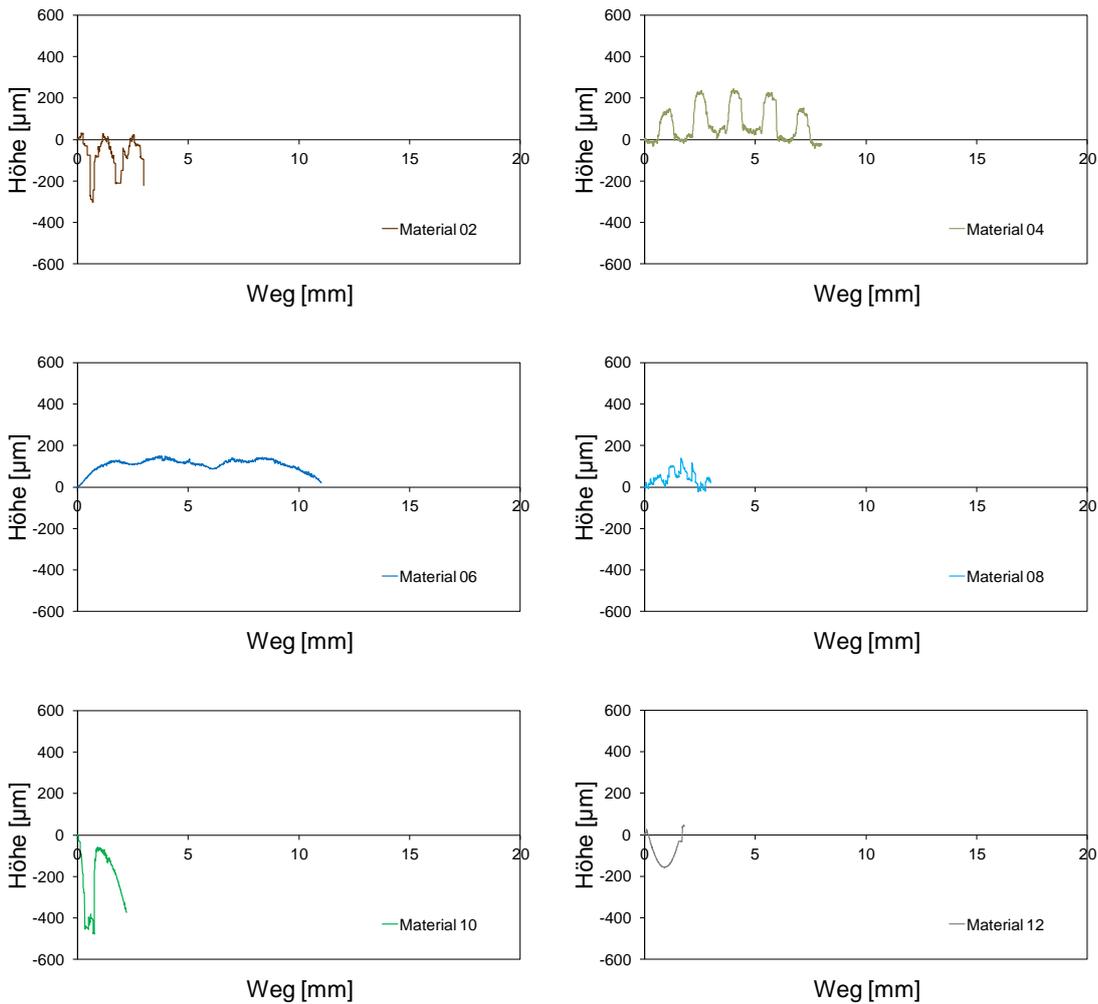


Bild 5.1 Bestimmung der Rautiefe der biaxialen Produkte (Materialien 2, 4, 6, 8, 10, 12)
(determination of roughness depth of the biaxial geogrids)

Die Abbildungen zeigen sehr deutlich die unterschiedlichen Oberflächentopographien der Produkte. So ist zum Beispiel bei Material 11 nahezu kein Höhenunterschied festzustellen, hingegen sind bei Material 1, bei derselben Achsenskalierung, die einzelnen Multifilamente des gewebten Produktes sehr deutlich zu erkennen.

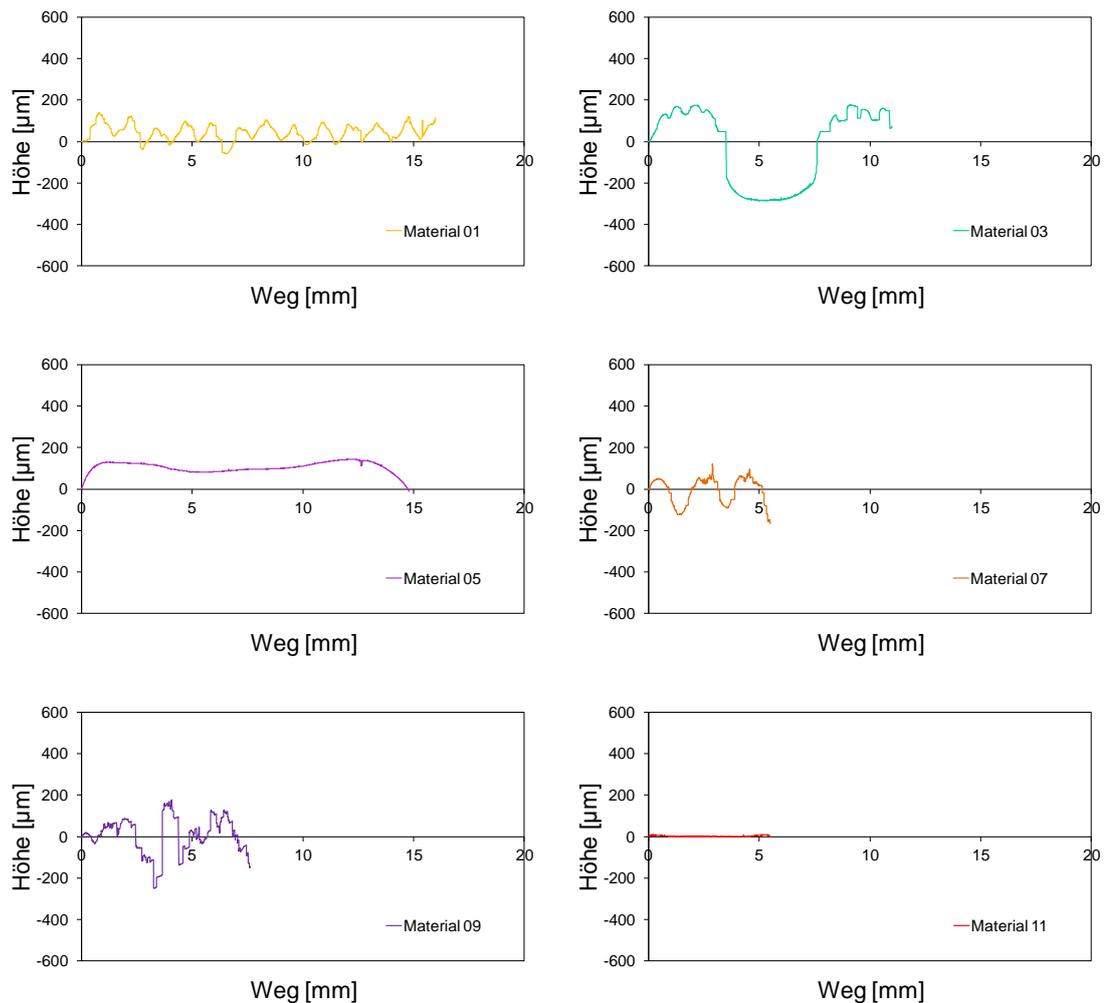


Bild 5.2 Bestimmung der Rautiefe der einaxialen Produkte (Materialien 1, 3, 5, 7, 9, 11)
(determination of roughness depth of the uniaxial geogrids)

Die Oberflächenmesstechnik kennt verschiedene Rauheitskenngrößen [36], von denen aufgrund der Komplexität der Thematik an dieser Stelle nur drei genannt werden: Zum einen der arithmetische Mittelrauwert R_a , der definiert ist als das arithmetische Mittel der Ordinatenwerte l_z des Rauheitsprofils innerhalb der Einzelmessstrecke l_r ,

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} l_z(x) dx. \quad \text{Gl. (5.1)}$$

Zum anderen die gemittelte Rautiefe R_z , die als arithmetisches Mittel der Differenz der Höhe der größten Profilsitzen und der Tiefe des größten Profiltals $R_z(i)$ innerhalb der fünf Einzelmessstrecken l_r definiert ist,

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_z(i) \quad \text{Gl. (5.2)}$$

In Bild 5.3 ist schematisch dargestellt, wie die gemittelte Rautiefe R_z bestimmt wird.

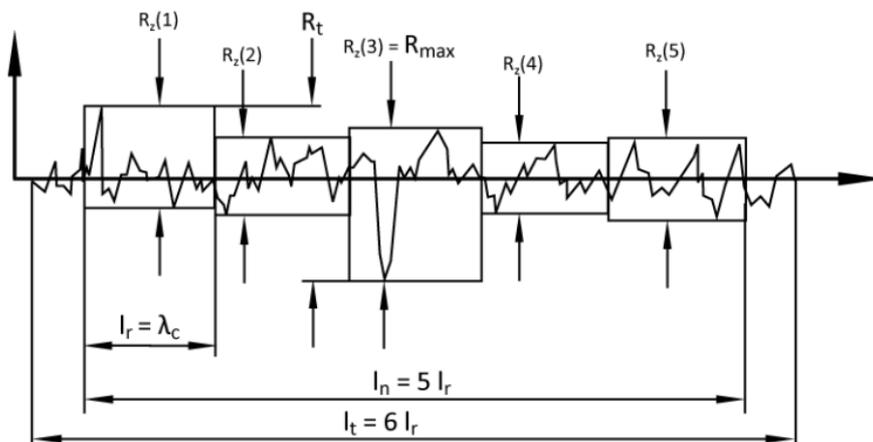


Bild 5.3 Bestimmung der gemittelten Rautiefe R_z aus [36]
(determination of average surface roughness R_z from [36])

Weiterhin noch die maximale Einzelrautiefe R_{max} , welche die größte Einzelrautiefe angibt.

Bild 5.4 zeigt deutlich die Unterschiede der zuvor genannten Verfahren. So ergeben sich für die drei nachfolgend gezeigten Oberflächen nahezu die gleichen Mittelrauwerte sowie maximalen Einzelrautiefen, wohingegen sich die gemittelte Rautiefe deutlich unterscheidet. Dies ist damit begründet, dass bei dem arithmetischen Mittelrauwert die Abweichung von dem Mittelwert bestimmt wird, somit kann dieser Wert nicht zwischen verschiedenen Profilformen unterscheiden und R_{max} gibt nur den größten Einzelwert an.

Bei der gemittelten Rautiefe wird die Profillinie in fünf Einzelmessstrecken unterteilt und für jeden Teilabschnitt die größte Differenz zwischen Spitze und Tal bestimmt, somit erfasst dieses Verfahren auch die Profiloberfläche und eignet sich sehr gut für den Vergleich der Produkte untereinander.

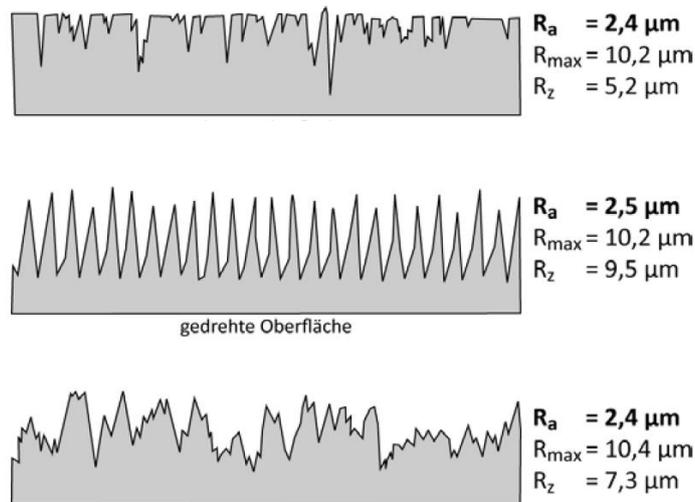


Bild 5.4 Unterschiedliche Profile mit gleichem Mittelrauwert aus [36]
(different profiles with the same root mean square)

Für die Beurteilung und als Maß für die Oberfläche der Geokunststoffe die gemittelte Rautiefe R_z gewählt. Die Ergebnisse der Rautiefenbestimmung sind in Tab. 5.1 zusammengefasst. Die dargestellten Abbildungen (Bild 5.1 und Bild 5.2) geben sehr gut die Besonderheiten der Produkte wieder und durch die in Tab. 5.1 angegebene gemittelte Rautiefe kann die Struktur der Produkte mit einem Zahlenwert beschrieben werden.

Tab. 5.1 Ergebnisse der Rautiefenermittlung
(results of root mean square)

Material:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
gemittelte Rautiefe R_z [μm]:	136	221	190	200	26	46	143	87	216	203	4	56

Die in Tab. 5.1 dargestellten Ergebnisse bestätigen weitestgehend die subjektiv ermittelte Rauheit und geben einen reproduzierbaren Messwert für die Oberflächenbeschaffenheit an. Das gewählte laseroptische Meßsystem ermöglichte aber nur eine zweidimensionale (2-D) Betrachtung der Längselemente (quer zu der Zugrichtung gemessen). Das Fehlen der dritten Dimension zeigt zugleich auch die Grenzen der gewählten Meßmethode. Bei einigen Produkten entspricht zwar die gemittelte Rautiefe quer zur Zugrichtung weitestgehend auch der Beschaffenheit der Produkte in Längsrichtung, aber eine vollständige Beurteilung ist mit dem System nicht möglich. Weiter-

hin kann die Oberflächenhärte, wie nachfolgend im Kapitel 5.2 erwähnt, nicht erfasst werden. Die Oberflächenhärte hat zum Beispiel einen Einfluss, wenn sich Körner in die Beschichtung eindrücken [67].

5.2 Untersuchungen zum Einfluss der Querelemente

Speziell der Einfluss der Querelemente und die Reibung an den Längselementen der Geogitter hat eine große Bedeutung für das Verbundverhalten [55]. Da verschiedenste Geogitter geprüft wurden, führte dies zu deutlichen Unterschieden im Interaktionsverhalten. So gibt es Geogitter, bei denen der Widerstand vorwiegend über Reibung (Reibungsgitter) erfolgt und Produkte bei denen der Widerstand größtenteils durch die Querelemente hervorgerufen wird (Querelementgitter bzw. Erddruckgitter). Gerade bei den "Querelementgittern" hat ein Versagen der Knotenpunkte bzw. der Querstränge einen großen Einfluss auf das Verbundverhalten. Aber auch wenn die Bedeutung der Querstreben bei den Reibungsgittern geringer ist, so haben sie dennoch einen gewissen Einfluss und tragen, wenn auch mit einem geringen Teil, zum Verbund bei.

In Untersuchungen an der RWTH Aachen konnte gezeigt werden, dass der Herausziehwiderstand eines Geogitters sehr stark von den Querelementen beeinflusst wird. Zu diesem Zweck wurden die Ergebnisse von Versuchen an einem Produkt mit und ohne Querelementen verglichen. Eine Vergrößerung der Oberfläche von 7% (durch ein Querelement) bewirkte einen Anstieg des Herausziehwiderstandes von 50-100%. Dies belegt, dass der Herausziehwiderstand neben der Reibung an der Oberfläche eines Geogitters von weiteren Mechanismen beeinflusst wird [113]. Um den Zuwachs durch die Querelemente zu erfassen, wurde ein Verhältniswert eingeführt. Dieser Pflugfaktor ist definiert als

$$p_{Si}(\sigma_n) = \frac{Z_{Si}}{Z_{S0r}}, \quad \text{Gl. (5.3)}$$

in dem Z_{Si} die Herausziehkraft mit i Querstäben ist und Z_{S0r} die Herausziehkraft einer Probe ohne Querelemente [112] & [113]. Die Verspannungszone zwischen den Querelementen, also der Bereich der durch die Querelemente mobilisiert wird ("Pflug-Effekt") ist in Bild 5.5 dargestellt. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass der zusätzliche Widerstand der Querelemente durch die Beständigkeit der Knoten beschränkt ist

und die hinteren Querelemente aufgrund der geringeren Verschiebung (Dehnung des Geogitters) weniger Belastung erfahren.

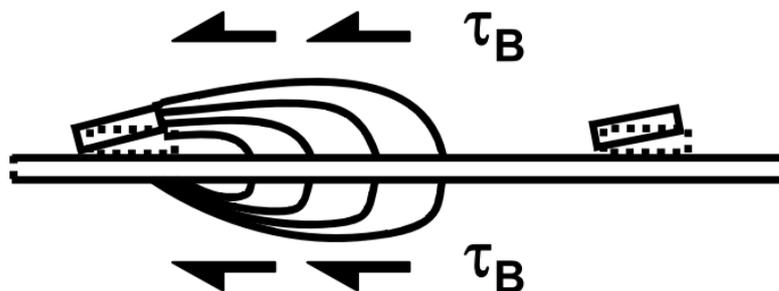


Bild 5.5 Mobilisierter Bereich vor den Querelementen "Pflug-Effekt" aus [113]
(*activated sector in front of the cross elements from [113]*)

Das Untersuchen der genauen Wirkung der Querelemente ist äußerst komplex [71]. Zwar ist es möglich, für einen Versuch die Querelemente zu entfernen und diesen mit einem Versuch mit Quersträngen zu vergleichen, aber dies sagt noch nichts über die Mechanismen in den Querelementen und Knotenpunkten aus. In den Verbindungsstellen zwischen Quer- und Längselementen besteht keine starre Verbindung, genauso sind die Querelemente nicht starr und es kommt zu Verformungen und Verdrehungen [63], die bei den durchgeführten Kurzzeitversuchen (Reibungs- und Herausziehversuchen) nicht erfasst werden konnten. Durch diese Verformungen, Dehnungen und das teilweise Versagen der Knotenpunkte kommt es zu einem "Verschmieren" der Ergebnisse. Darüber hinaus kann es zu einem Versagen der Verbindungsstellen kommen, ohne dass die Schubspannung oder der Herausziehwiderstand abfällt, da die Längselemente und die nachfolgenden Querelemente die Kräfte aufnehmen [63].

Die zuvor geschilderten Mechanismen und Probleme werden insbesondere bei Verankerungsgräben im Deponiebau deutlich. Zurzeit (2014) gibt es für diese spezielle Beanspruchung eine Interimslösung, welche über die in der EBGeo [N16] genannten Anforderungen deutlich hinaus geht [52]. Hinweise zu den Grenzen der Verankerungslänge sowie zu den Einwirkungen finden sich in den Zulassungsscheinen [64]. Gegenwärtig wird an der RWTH Aachen an einem differenzierten Verbundmodell der Interaktion zwischen Geogitter und Boden gearbeitet, mit welchem eine sichere Be-

messung von Verankerungsgräben möglich sein wird, die aber weniger konservativ als die aktuelle Interimslösung ist [52].

Einen ersten Schritt zur ganzheitlichen Erfassung der Mechanismen zwischen Geogitter und Lockergestein für eine Bemessung lieferten Jacobs et al. [53]. Mit dem neu entwickelten Modell ist es möglich, bei einem speziellen Geogitter (Quer- und Längselemente sind extrudiert und miteinander verschweißt) aus Laborversuchen die Herausziehverschiebung und Herausziehverformung sowie die Kräfte an jedem Punkt des Geogitters zu bestimmen. Zur Ermittlung der für das Modell notwendigen Parameter sind drei Schritte notwendig. Als erstes müssen in einem Kurzzeitzugversuch (z. B. nach [N14]) oder einem Kriechtest, wenn Langzeitbelastungen modelliert werden sollen, das Kraft-Dehnungsverhalten ermittelt werden. Anschließend ist in einem Herausziehversuch an dem Geogitter ohne Querelemente der verschiebungsabhängige Reibungswinkel des Produktes zu bestimmen. Im dritten Teil wird dann in einem Herausziehversuch an dem Geogitter mit nur einem Querelement und durch den Vergleich mit den Ergebnissen aus den Herausziehversuchen ohne Querelemente die Länge des Bereichs ermittelt, in welchem sich der Erddruck vor dem Querelement aufbaut. Weitere Untersuchungen müssen zeigen, inwieweit der Ansatz nach Jacobs et al. [53] auf andere Geokunststoffe und Böden übertragbar ist. Für das jetzige Modell wird zur Kalibrierung der Funktion, die den Reibungswiderstand in Abhängigkeit des Weges beschreibt (Tangens-Hyperbolicus-Funktion) nur die Dehnsteifigkeit des Geokunststoffs verwendet, weiterhin wird eine Funktion für verschiedene Normalspannungsbereiche genutzt.

Nachfolgend wird auf einige labortechnische Detailuntersuchungen eingegangen, die einen Beitrag dazu liefern sollen, das Verbundverhalten und insbesondere die Mechanismen der Querelemente besser zu verstehen.

Versuche ohne Querelemente (Materialien 3,5, 9)

Mit den Materialien 3, 5 und 9 wurden zusätzlich zu den "normalen" Herausziehversuchen (mit intaktem Geogitter) noch Versuche mit entfernten Querelementen durchgeführt. Diese Versuche wurden unter Verwendung des Bodenmaterials CS5 und im Normalspannungsbereich von 10 bis 50 kN/m² durchgeführt. Bild 5.6 zeigt die Geogitter mit den entfernten Querelementen, große Bedeutung wurde dabei auf die vollständige Entfernung der Querelemente gelegt.

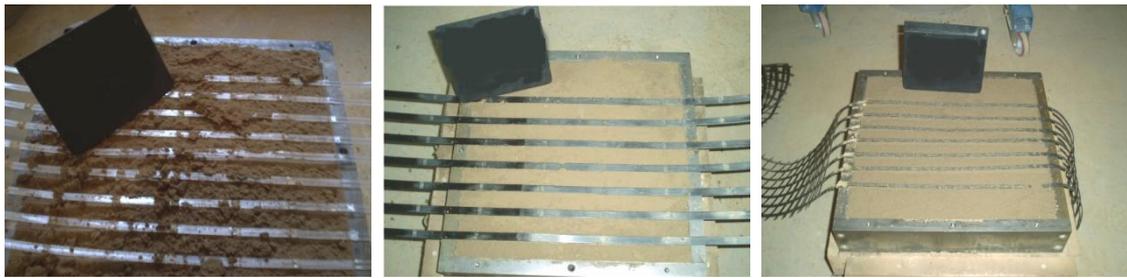


Bild 5.6 Materialien 3, 5 und 9 nach dem Entfernen der Querelemente
(*geogrids 3, 5 and 9 after removing of the cross elements*)

In Tab. 5.2 sind die Ergebnisse der Versuche ohne Querelemente zusammengefasst. Deutlich ist bei allen Materialien zu erkennen, dass die Querelemente einen großen Anteil an dem Herauszieh Widerstand haben (bzw. an der Höhe der ermittelten Schubspannung). Nach dem Entfernen der Querelemente war eine signifikante Reduktion der Schubspannung zu verzeichnen (Tab. 5.2). Diese Versuche verdeutlichen den großen Einfluss der Querelemente, wobei es erhebliche Unterschiede zwischen den Produkten gibt. Abhängig von dem Geogittertyp und der Normalspannung beträgt die Schubspannung nur noch 19,5% bis 58,6% der bei dem gleichen intakten Geogitter gemessenen Schubspannung. Weiterhin ist die Variation der ermittelten Schubspannungen zwischen den getesteten Geogittern bei den Herausziehversuchen ohne Querelemente wesentlich höher als bei den Herausziehversuchen mit den vollständigen Geogittern. Bei einer Normalspannung von 10 kN/m^2 liegt der minimale Schubspannung bei $3,18 \text{ kN/m}^2$ und der maximale Wert bei $12,19 \text{ kN/m}^2$, ähnlich deutlich sind die Unterschiede bei der höheren Laststufe von 30 kN/m^2 .

Die in Tab. 5.2 angegebenen Quotienten aus der Schubspannung eines Versuchs ohne Querelemente und eines Versuchs mit Querelementen entsprechen dem nach Gl. (5.3) berechnetem Pflugfaktor, da die Herausziehkraft dividiert durch den konstanten Wert der Fläche die Schubspannung ergibt (Gl. (2.2)).

Tab. 5.2 Ergebnisse der Herausziehversuche mit und ohne Querelemente (QE)
(*results of the pull-out tests with and without cross elements*)

	Material 3	Material 5	Material 9
τ bei 10 kN/m ² mit QE [kN/m ²]	18,03	16,31	21,20
τ bei 10 kN/m ² ohne QE [kN/m ²]	6,81	3,18	12,19
τ bei 30 kN/m ² mit QE [kN/m ²]	32,60	24,31	36,33
τ bei 30 kN/m ² ohne QE [kN/m ²]	11,07	7,33	21,30
Quotient aus τ ohne und mit QE bei 10 kN/m ²	0,377	0,195	0,575
Quotient aus τ ohne und mit QE bei 30 kN/m ²	0,340	0,302	0,586
Reibungswinkel mit QE [°]	33,4	22,1	32,5
Reibungswinkel ohne QE [°]	12,8	11,7	24,7
Quotient aus $\tan \varphi$ ohne und mit QE	0,344	0,510	0,722

Weiterhin ist in der Tabelle noch der neu definierte Querelementebeiwert für Reibung

$$R_{\varphi Q} = \frac{\tan \varphi_{oQE}}{\tan \varphi} \quad \text{Gl. (5.4)}$$

angegeben, wo φ_{oQE} die Größe des Reibungswinkels ohne Querelemente angibt und φ den Reibungswinkel, der in Versuchen mit Querelementen ermittelt wurde. Der Querelementebeiwert hat den Vorteil, dass unabhängig von der Spannung ein Abminderungsfaktor bestimmt werden kann. Nicht in Tab. 5.2 angegeben, ist der ebenfalls neu definierte Querelementebeiwert für Kohäsion

$$R_{cQ} = \frac{c_{oQE}}{c} \quad \text{Gl. (5.5)}$$

wo c_{oQE} die Adhäsion ohne Querelemente angibt und c die Adhäsion mit Querelementen. Die Querelementebeiwerte (Gl. (5.4) und Gl. (5.5)) sind aber eher ein theoretischer Wert, da bei den Laboruntersuchungen für ein konkretes Objekt, bei dem der Ausfall der Querelemente berücksichtigt werden muss, direkt die Scherparameter an dem Geogitter ohne Querelemente bestimmt werden können und diese dann mit den Scherparametern des Lockergesteins verglichen werden könnten. Dieses Vorgehen hätte den Vorteil, dass die Versuche nicht mit als auch ohne Querelemente durchgeführt werden müssten.

Bedeutung würden die Querelementbeiwerte erlangen, wenn die Hersteller der Produkte darlegen könnten, dass es einen minimalen Querelementbeiwert für Reibung bei ihren Produkten gibt, der für alle Bodenarten gilt, so könnte mit diesem der Herausziehwiderstand abgemindert werden. Bei dem Verbundbeiwert für Reibung (Gl. (2.4)) haben die Hersteller mittlerweile große Erfahrungen mit ihren Produkten, so dass es für die meisten Baumaßnahmen nicht notwendig ist, die Verbundparameter Geogitter/Lockergestein für das an einer Baustelle anstehende Bodenmaterial im Labor zu untersuchen.

Die Geogitter 3 und 9 ergaben für das untersuchte Lockergestein (CS5) im Herausziehversuch mit intakten Querelementen ähnliche Reibungswinkel. Bei den Versuchen ohne Querelemente zeigte sich bei Material 3 ein viel deutlicherer Abfall des Reibungswinkels, was sich in Querelementbeiwerten für Reibung von 0,344 bei dem Material 3 und 0,722 bei dem Material 9 ausdrückt. Der bei Material 3 ohne Querelemente ermittelte Reibungswinkel liegt recht nah bei dem an Material 5 ohne Querelemente ermittelten Wert und dies obwohl der Reibungswinkel bei den intakten Produkten bei Material 3 deutlich höher war. Ferner unterscheidet sich die Oberflächenbeschaffenheit zwischen diesen Materialien sehr deutlich. Der hohe Reibungswinkel des beschichteten Produkts mit Querelementen (Material 9) bestätigte sich, auch wenn die Querelemente fehlten. Dieses Geogitter hatte mit 0,722 den höchsten Querelementbeiwert für Reibung in der Testserie mit dem CS5.

Die Korrelation der Schubspannungen ermittelt im Herausziehversuch ohne Querelemente mit der gemittelten Rautiefe (Tab. 5.1) wird nachfolgend überprüft. In Bild 5.7 sind die Ergebnisse der Korrelationsanalyse, getrennt für die bei einer Normalspannung von 10 kN/m² und 30 kN/m² ermittelten Schubspannungen, zusammengefasst. Für eine bessere Übersichtlichkeit sind die Rautiefen in diesen Diagrammen normiert.

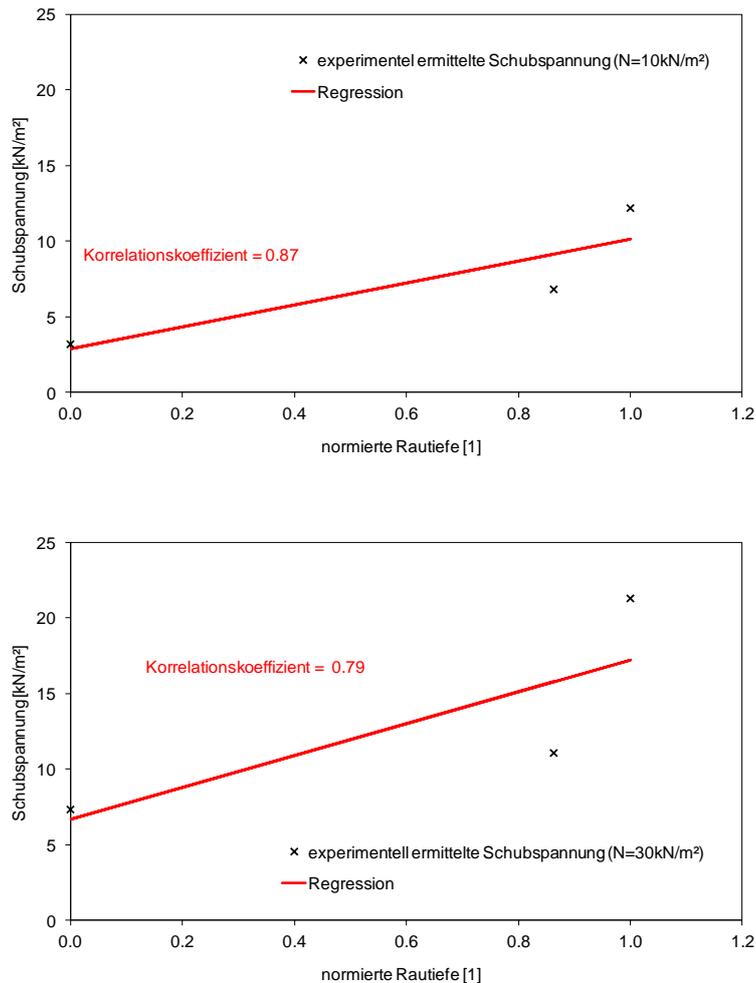


Bild 5.7 Korrelationsanalyse Schubspannung/normierte Rautiefe der Herausziehversuche mit CS5 bei einer Normalspannung von 10 kN/m² (oben) und 30 kN/m² (unten)
(correlation analysis of shear strain/standardized roughness in pull-out tests with CS5 and a normal load of 10 and 30 kN/m²)

Die Darstellungen in Bild 5.7 belegen eine Zunahme der Schubspannung mit zunehmender Rautiefe der Produkte. Die ebenfalls in den Diagrammen angegebenen Korrelationskoeffizienten zeigen aber, dass der Zusammenhang zwischen den Werten mit Unsicherheiten behaftet ist. Die Streuung ist teilweise auch in dem Verfahren zur Ermittlung der Rautiefe begründet, welches quer zu den Zugelementen erfolgt und die dreidimensionale Struktur der Zugelemente nicht berücksichtigt. Weiterhin werden bei dieser Gegenüberstellung die Abmessungen (Abstand und Breite usw.) der Zugelemente nicht mit einbezogen. Das Verfahren zur Ermittlung der Rautiefe hat ebenfalls keine Möglichkeit die Härte der Oberfläche des Geokunststoffs sowie die Flexibilität mit einzubeziehen. Somit kann zum Beispiel die Tatsache, dass sich einzelne Körner in die Beschichtung und/oder in die Struktur des Geokunststoffs drücken, nicht erfasst wer-

den. Zwar ist bei dem untersuchten bindigen Material dieser Einfluss geringer als bei einem rolligen Lockergestein, aufgrund des Sandanteils in dem CS5 wird das Interaktionsverhalten vermutlich aber gleichwohl beeinflusst.

Detaillierte Betrachtung der Versuche mit den Geogittern 9, 13 und 14

In Kapitel 4 konnte aufgezeigt werden, dass bei dem Produkt mit der dreidimensionalen Struktur sowohl im Reibungsversuch als auch im Herausziehversuch unter Verwendung des CS5 die direkteste Schubspannungsmobilisierung stattgefunden hat. Der positive Einfluss der räumlichen Struktur bei den Versuchen mit dem CS5 wird auch durch Tab. 5.3 bestätigt. In Tab. 5.3 sind die Schubspannungen bei einer Normalspannung von 10 kN/m² mit und ohne Querelemente für die Produkte 9, 13 und 14 aufgeführt sowie der Quotient der Schubspannungen ohne und mit Querelement aufgetragen. Durch die räumlichen Querelemente erhöht sich die maximale Schubspannung, was auch durch den Quotienten (mit und ohne Querelemente) belegt wird. Abhängig von der Bodenart und der Normalspannungsniveau zeigte sich aber, dass eine direktere Schubspannungsmobilisierung nicht bei allen Bodenarten auszumachen war.

Tab. 5.3 Schubspannung bei 10 kN/m² der Herausziehversuche mit den Materialien 9, 13, 14 mit und ohne Querelemente (QE) und CS5
(*shear strain results of pull-out test at 10kN/m² with and without cross elements*)

	Material 9	Material 13	Material 14
τ bei 10 kN/m ² mit QE [kN/m ²]	21,20	26,88	17,02
τ bei 10 kN/m ² ohne QE [kN/m ²]	12,19	12,61	11,69
Quotient aus τ ohne und mit QE	0,575	0,469	0,687

Der Vergleich der im Herausziehversuch ermittelten Scherparameter zeigt, dass bei den Versuchen mit CS5 alle drei Produkte nahezu identische Reibungswinkel ergaben, wobei die Adhäsion bei Material 13 höher als bei den anderen beiden Produkten war (Tab. 4.11). Auch bei den Versuchen mit dem KL lagen die Reibungswinkel bei den Geogittern recht nahe zusammen und der Adhäsionswert war bei Produkt 13 am höchsten, wobei die Höhe der Scherparameter bei dem KL deutlich geringer ausfiel. Bei den Versuchen mit Boden HB hatte von den drei Produkten das Geogitter mit der dreidimensionalen Struktur (Material 13) die mit Abstand höchsten Scherparameter.

Bei dieser Bodenart zeigten sich die Vorteile der räumlichen Struktur des Geogitters mit der Nummer 13 besonders deutlich.

Schlussfolgerungen aus den Detailuntersuchungen zu den Querelementen

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Struktur und Oberflächenbeschaffenheit der Geokunststoffe einen großen Einfluss auf das Verbundverhalten (Geokunststoff/Lockergestein) haben. Die Feststellungen decken sich mit den Erfahrungen von Herle, der in anderen Bereichen der Bodenmechanik und des Grundbaus (z. B. beim Phänomen Setzungsfließen) ebenfalls die große Bedeutung der Struktur der Materialien festgestellt hat [43]. Die räumliche Struktur des Materials 13 führte nicht bei allen Versuchen zu besseren Ergebnissen (höhere Adhäsion und Reibungswinkel sowie schnelle Schubspannungsmobilisierung), nachteilig hat die dreidimensionale Struktur sich aber auf die Ergebnisse nicht ausgewirkt. Somit kann bei gewissen Gegebenheiten das Interaktionsverhalten durch eine spezielle räumliche Struktur des Geogitters verbessert werden.

In den Betrachtungen noch nicht berücksichtigt ist, wie sich die Verbindung der Längselemente zu den Querelementen auf die bis zum Versagen der Verbindung mögliche Verschiebung (Scher- und Herausziehverschiebung) auswirkt. Weiterhin wird das Versagen der Querstreben beeinflusst durch die Auflast, das verwendete Lockergestein, die Verdrehung der Querelemente sowie weitere Faktoren.

5.3 Versuchsprogramm und Versuchsergebnisse mit Bodenbehandlung

Die mitunter nur schwer einzuschätzenden Eigenschaften von bindigem Lockergestein (teilweise sehr hoher Wassergehalt, das breiige/plastische Verhalten, die Setzungseigenschaften und der geringe Reibungswinkel) machen solche Böden schwer handhabbar und lassen sie sogar oft als ungeeignet für die Verwendung erscheinen. Unter diesen Rahmenbedingungen könnte der gemeinsame Einsatz eines Mischbinders und von Geokunststoffen die richtige Lösungsstrategie darstellen.

Projekte mit dem kombinierten Einsatz von Geokunststoffen und Bodenbehandlung sind noch sehr selten. Bild 5.8 zeigt zwei Lärmschutzwelle aus der Literatur ([47]) und

[84]) bei denen Geokunststoffe in Kombination mit einer Bodenbehandlung eingesetzt wurden. Weitere finden sich in [5] und [74].



Bild 5.8 Projektbilder mit kombinierten Einsatz von Geokunststoffen und Bodenbehandlung aus [47] und [84] (*projects with geosynthetics and soil improvement from [47] and [84]*)

Bei beiden zuvor gezeigten Projekten wurden durch Zugabe des Bindemittels die Scherparameter so optimiert, dass die geokunststoffbewehrten Dämme wirtschaftlich erstellt werden konnten. Bei der Bahnstrecke Hamburg - Berlin bei Büchen wurden die vorhanden Säulen genutzt und das Tragsystem durch den kombinierten Einsatz von dehnsteifen sowie hydrolysebeständigen Geogittern mit zementverbessertem Boden ertüchtigt (siehe Bild 5.9). Das mineralische Tragsystem mit zugfesten Geogittern ermöglichte eine Vergleichmäßigung und Minimierung der Setzungen sowie einen schnellen Baufortschritt (u. a. [95]).

Wissenschaftlich ist der gemeinsame Einsatz von bindigem Lockergestein und Geokunststoffen noch weitestgehend unerforscht. Zwar haben Aydogmus und Klapperich schon 2008 [15] Versuche zu diesem Thema gemacht, dabei untersuchten sie aber Produkte mit sehr hohen Zugfestigkeiten (größer 700 kN/m). Vorhergehende Untersuchungen in Freiberg ([11] und [12]) zeigten, dass sich die Eigenschaften und das Verbundverhalten von einaxialen Geogittern mit sehr hoher Zugfestigkeit, wie sie 2008 untersucht wurden, deutlich von Geogittern mit geringeren Zugfestigkeiten unterscheiden. Speziell der Einfluss der Querelemente und die Reibung an den Längselementen der Geogitter hat eine große Bedeutung für das Verbundverhalten [55]. Weiterhin betrug die Zumischung in den Versuchen von 2008 sechs Massenprozent des Bindemittels und die Zeit vom Probeneinbau bis zum Herausziehen des Geogitters nur 14 Stunden.

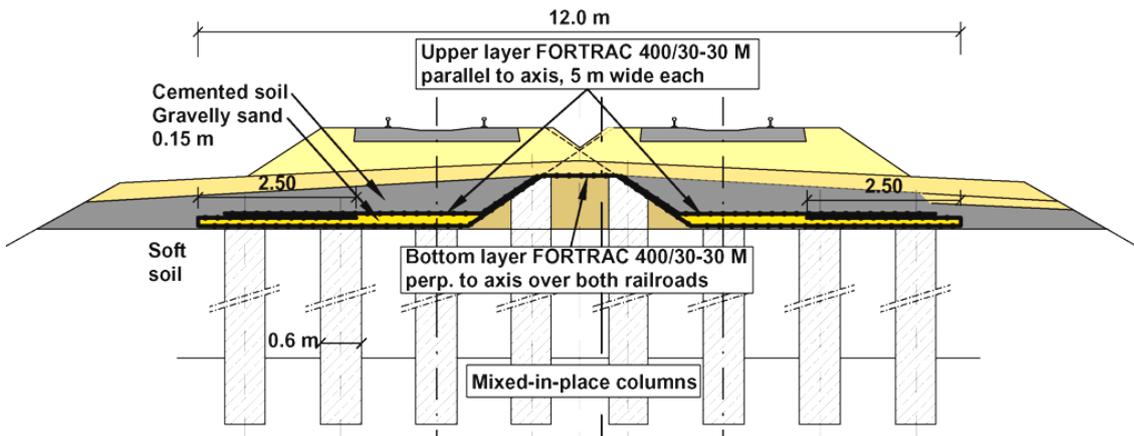


Bild 5.9 Gemeinsamer Einsatz von Geogittern und Bodenbehandlung über Pfählen bei der Ertüchtigung der Bahnstrecke Hamburg - Berlin aus [95]
(combined use of geosynthetics and soil improvement on top of piles, improving the Hamburg railway - Berlin)

In der aktuellen Versuchsserie mit Bodenbehandlung wurde darauf geachtet, dass die Bedingungen der Realität im Bauwesen entsprechen sowie häufig verwendete und handelsübliche Geogitter getestet werden. Die Randbedingungen für die Versuche mit Mischbinder sind im Kapitel 3.3 "Auswahl des Bindemittels" beschrieben.

Im dem Versuchsprogramm wurden fünf verschiedene (handelsübliche) Geokunststoffe von drei verschiedenen Geokunststoffherstellern untersucht. Diese waren bereits ohne Mischbinder getestet worden (siehe dazu Kapitel 4 Hauptuntersuchung). Da bei der Untersuchung das Verbundverhalten im Vordergrund stand, wurden die chemische Beständigkeit sowie die Eignung der verwendeten Produkte für den Einsatz im alkalischen Milieu nicht näher untersucht.

Bei der gemeinsamen Verwendung von Geokunststoffen und Bodenbehandlung in einer Baumaßnahme ist die chemische Beständigkeit unbedingt zu prüfen. Insbesondere die Hydrolysebeständigkeit von Polyester ist zu beachten. Die molare Masse des verwendeten Polyesters (PET) sowie die Anzahl der Carboxylendgruppen gibt einen Hinweis auf die Hydrolysebeständigkeit eines Geokunststoffs aus Polyester [67]. Bei anderen Rohstoffen wie Polypropylen (PP) und Polyvinylalkohol (PVA) hat die Hydrolyse keinen Einfluss. Mit einer das Verbundverhalten beeinflussenden chemischen Reaktion ist aber innerhalb der vierzehntägigen Versuchszeit nicht zu rechnen. Die chemischen Einflüsse sowie die Auswirkungen für den Abminderungsfaktor A_4 (nach EBGeo [55]) wurden 2009 von Retzlaff, Hering und Herold beschrieben [78]. Für zertifizierte Produkte liefert das *British Board of Agrément* (BBA) Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit des pH-Werts [11].

Bei der Herstellung der Proben für die Versuche wurde darauf geachtet, dass die im Labor erzeugten Bedingungen möglichst den Gegebenheiten auf der Baustelle entsprechen. Dazu wurde der Mischbinder mit Hilfe eines Zwangsmischers (Bild 5.10) dem bindigen Lockergestein untergemischt und anschließend das so behandelte Material lagenweise in den Versuchsrahmen eingebaut. Dieses Vorgehen ermöglichte eine konstante Einbaudichte, die im Bereich der Proctordichte lag.

Für die Versuche mit Geogitter erfolgte der Einbau des behandelten Lockergesteins (CS5) in sechs Lagen, wovon jede verdichtet wurde. Dabei wurde die dritte Lage so eingebaut, dass diese auf Höhe der Scherfuge abschließt und das Geogitter in der Ebene der Fuge eingelegt werden kann. Das Geogitter liegt somit auf dem ebenen und verdichteten Boden, was auch der Situation im Feld entspricht.



Bild 5.10 Für die Homogenisierung und fürs Mischen verwendeter Zwangsmischer
(*mixer used for soil homogenization*)

Unter den zuvor beschriebenen Bedingungen wurden Scherversuche als auch Herausziehversuche an dem behandelten bindigen Lockergestein durchgeführt und anschließend mit den Ergebnissen der Versuche mit dem unbehandelten Bodenmaterial (ohne Zugabe von Kalk und Zement) (Kapitel 4) verglichen.

Zur Bestimmung der Scher- und Verbundparameter aus den Versuchen mit Bodenbehandlung wurde ein Verfahren angewendet, das den ersten, stark variierenden Maximalwert (Peak-Wert) eines Mehrstufenversuchs (Kapitel 3.4.3) nicht mit 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, welche auf der sicheren Seite liegen ([11] und [57]). In Bild 5.11 sind die Ergebnisse der Scherversuche mit Mischbinder grafisch dargestellt. Nach dem zuvor erläuterten Verfahren, ergaben sich für das behandelte Material ein Reibungswinkel von $39,2^\circ$ und eine Kohäsion von $70,0 \text{ kN/m}^2$ (Bild 5.11).

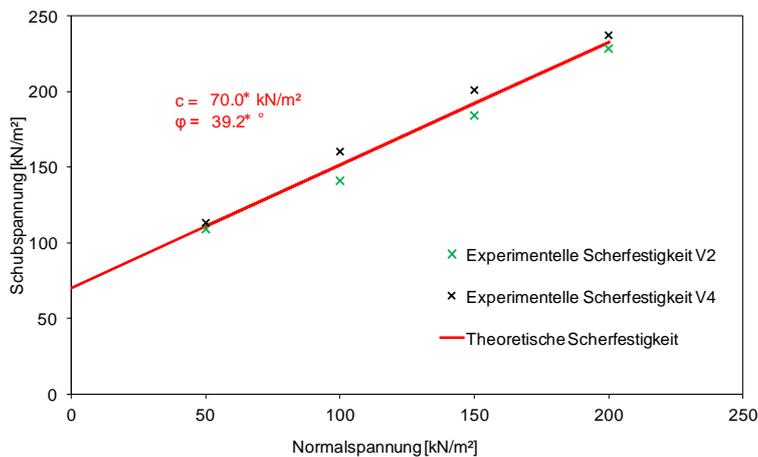


Bild 5.11 τ/σ -Diagramm der Scherversuche an dem behandelten CS5
(τ/σ -Diagram of the shear test with CS5 and soil improvement)

Das in dem gleichen Versuchsgerät untersuchte Bodenmaterial (CS5) ohne Zusatz eines Bindemittels ergab einen Reibungswinkel von $30,2^\circ$ und eine Kohäsion von $37,4 \text{ kN/m}^2$ (Bild 4.1). Diese Werte belegen, dass die gewählte Vergütungsstrategie eine deutliche Verbesserung der Scherparameter bewirkt. Auch die Betrachtung der in Tab. 5.4 aufgetragenen Verschiebungswege (der Verschiebungsweg, der notwendig ist, um den Maximalwert der Schubspannung zu erreichen) zeigt ein verbessertes Verbundverhalten. Die Zugabe des Mischbinders macht das Bodenmaterial steifer und weniger plastisch, wodurch die Verschiebungswege reduziert werden. Ebenfalls in Tab. 5.4 dargestellt sind die in den Versuchen ermittelten maximalen Schubspannungen, die bei den Versuchen mit Mischbinder um den Faktor Zwei höher liegen.

Tab. 5.4 Ergebnisse der Scherversuche an CS5 mit und ohne Mischbinder
(*results of shear tests on CS5 with and without soil improvement*)

Versuchstyp	Normalspannung	Schubspannung	Anzahl Versuche	Weg (bis Peak)
	[kN/m ²]	[kN/m ²]		[mm]
Scherversuch ohne Mischbinder	25	50,3	3	10,9
Scherversuch mit Mischbinder	25	107,7	2	3,95

Die höheren Schubspannungen bei kleineren Verformungen, wie sie bei den Scherversuchen mit dem behandelten Boden ermittelt wurden, konnten bei den Herausziehversuchen mit den behandelten Proben nur bedingt festgestellt werden. Vielmehr konnten bei den Versuchen sehr große Unterschiede in den Ergebnissen (Herausziehwiderrstand und Herausziehweg) beobachtet werden. Versuche, die unter identischen Bedingungen und mit dem gleichen Geogitter durchgeführt wurden, variierten teilweise sehr stark. Weiterhin sind tendenzielle Unterschiede zwischen den Produkten feststellbar. Zur Verdeutlichung sind in Abbildung Bild 5.12 verschiedene Versuche bei einer Normalspannung von 10 kN/m² zusammengefasst.

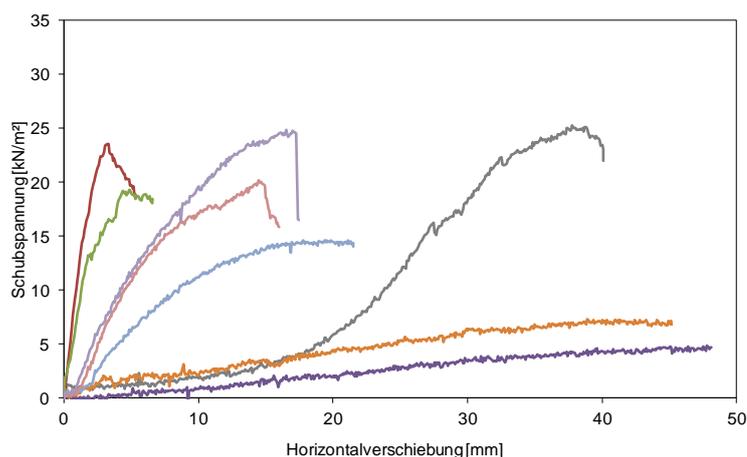


Bild 5.12 Schubspannungsverläufe verschiedener Herausziehversuche mit Mischbinder bei einer Normalspannung von 10 kN/m²
(*shear stress progress in pull-out test with different geogrids and soil improvement, approx. 10 kN/m² normal load and CS5*)

Die Höhe der Schubspannungen sowie der Verlauf der in Bild 5.12 aufgetragenen Versuche, ließ weder Rückschlüsse auf die Kurzzeitfestigkeit der Geogitter noch auf das Herstellungsverfahren der Produkte zu. In einigen Versuchen kam es zu einer Art "Klebeverbund", also einer quasi festen Einspannung des Geogitters, wodurch ein sehr

steiler Anstieg der Schubspannung bei sehr geringer Horizontalverschiebung erfolgte. In diesen Versuchen (mit Verklebung) sind die auftretenden Horizontalverschiebungen der Klemmeinheit größtenteils auf die Dehnungen in den Geogittern zurückzuführen.

In Bild 5.13 wurde die Verschiebung der Klemmeinheit gegen die Verschiebung der Wegaufnehmer für den Versuch mit dem geringsten Weg bis zur maximalen Schubspannung aufgetragen. Diese Darstellung belegt die Verklebung des Geogitters mit dem behandelten Lockergestein. Trotz der Verschiebung der Klemmeinheit bewegen sich die Wegaufnehmer, die an dem Geogitter befestigt sind, zunächst nicht (siehe dazu auch [13]). Erst nach dem Erreichen der maximalen Schubspannung bei ca. 3,5 mm kommt es zu einer Lösung der Verklebung und die Wegaufnehmer zeigen allmählich eine Verschiebung des Geogitters. Diese Bewegung des Geogitters wird zuerst von den Wegaufnehmern 1 und 2 angezeigt (Bild 5.13), welche am nächsten zu der Klemmeinheit angeordnet sind. Dies belegt, dass der Verbund (bindiges Lockergestein/Geogitter) durch das Herausziehen zuerst im vorderen Bereich gelöst wird. Damit wird bestätigt, dass die vorderen Querelemente in einem Herausziehversuch eher und stärker belastet werden.

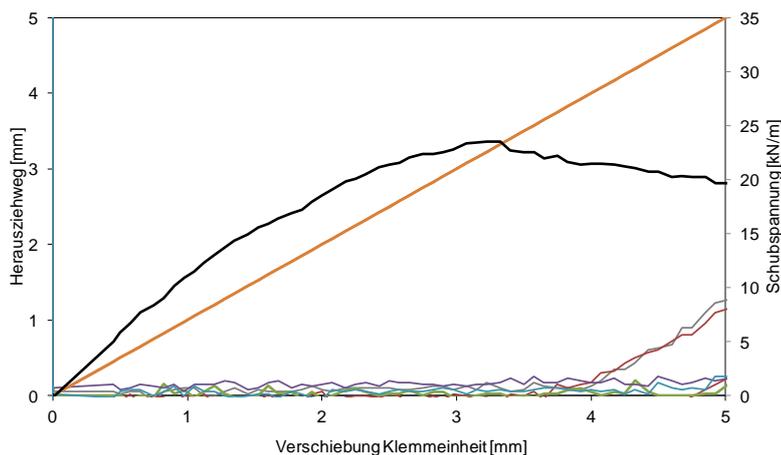


Bild 5.13 Horizontalverschiebungen der Wegaufnehmer und der Klemmeinheit in einem Herausziehversuch mit Mischbinder und “Klebeverbund“
(horizontal displacement of transducers and clamp in a pull-out test with soil improvement)

Diese Verklebung zwischen Geogitter und Lockergestein war aber nur bei einigen Versuchen zu beobachten, in anderen Versuchen war dieser Mechanismus nur in abgeschwächter Form oder gar nicht aufgetreten. So gab es Versuche, bei denen ein “Klebeverbund“ zu verzeichnen war, aber die bis zum Lösen der Verklebung gemesse-

ne Schubspannung unter der Restscherfestigkeit lag. In anderen Versuchen wiederum wurden die Geogitter durch die obere und untere Schicht des behandelten Lockergesteins hindurch gezogen ohne dass eine Anfangsverklebung erfolgte. Der Vergleich der Schubspannungen, die in den Herausziehversuchen mit Mischbinder ermittelt wurden, mit denen die im Scherversuch bestimmt wurden, zeigt, dass die Herausziehversuche deutlich geringere Schubspannungen ergeben. Weiterhin zeigen die Herausziehversuche ohne Mischbinder eine deutlich bessere Reproduzierbarkeit als die Herausziehversuche mit Mischbinder.

Der Vergleich der in Tab. 5.5 zusammengefassten Scherparameter der Herausziehversuche mit Mischbinder mit den Herausziehversuchen an demselben Bodenmaterial ohne Bodenbehandlung (Tab. 4.11) zeigt, dass es auch bei den Herausziehversuchen mit Mischbinder deutliche Unterschiede bei den Reibungswinkeln zwischen den Produkten gibt (Maximalwert $39,7^\circ$ und Minimalwert $19,1^\circ$). Der Maximalwert wurde bei einem Geogitter aus Multifilamenten bestimmt. Bei diesem Geogitter haben sich die Scherparameter durch die Zugabe des Mischbinders erhöht. Eine Erhöhung des Reibungswinkels war nicht bei allen getesteten Produkten festzustellen, bei zwei Produkten fiel der Reibungswinkel in den Herausziehversuchen mit Bodenbehandlung sogar etwas niedriger aus. Auch Tamáskovics et al. hatten in Ihrer Veröffentlichung schon von niedrigeren Verbundwerten bei Versuchen mit Vergütung berichtet [92]. Die bei Material 9 festgestellte positive Beeinflussung des Reibungswinkels erscheint bei diesem Produkt als logisch, da im Vergleich zu den extrudierten Produkten mit ihrer geschlossenen Struktur bei dem Produkt aus Multifilamenten ein besserer Verbund Geokunststoff/behandeltes Lockergestein entstehen kann.

Ein positiver Effekt durch die Behandlung des Lockergestein mit Kalk und Zement war nicht bei allen Versuchsserien mit Mischbinder feststellbar, wie der Vergleich belegt, der im Herausziehversuch mit Mischbinder, die ermittelten Reibungswinkel mit den Reibungswinkeln des unbehandelten Lockergesteins (ISV am CS5: $\varphi = 30,2^\circ$) vergleicht. Eine Begründung für die Höhe der ermittelten Reibungsbeiwerte könnte in den für ein bindiges Lockergestein sehr guten Reibungswerten des unbehandelten Lockergesteins liegen. Das lässt vermuten, dass bei Böden mit schlechteren Ausgangsparametern eine deutlichere Verbesserung auszumachen wäre. Weiterhin stellt sich ein "Klebeverbund", wie zuvor beschrieben, im Labormaßstab nur bedingt ein, möglicherweise bildet sich diese Verklebung unter Baustellenbedingungen eher aus. Weiterhin ist zu vermuten, dass das nicht getestete Geogitter mit der Nummer 13 aufgrund seiner dreidimensionalen Struktur das Verbundverhalten positiv beeinflussen würde.

Tab. 5.5 Ergebnisse der Herausziehversuche (IPV) mit Bodenmaterial CS5 und Bodenbehandlung
(results of pull-out tests with CS5 and soil improvement)

Versuchstyp	Locker- gestein	Zuschlags- stoff	Geo- gitter	Wasser- gehalt [%]	Versuchs- geschwindigkeit [mm/min]	Normal- spannungs- bereich [kN/m ²]	Reibungs- winkel [°]	Kohäsion [kN/m ²]
Herausziehversuch	CS5	M13 (14)	03	11,3	1,0	20-70	32,0*	16,3*
Herausziehversuch	CS5	M13 (14)	04	11,3	1,0	20-50	28,4*	12,0*
Herausziehversuch	CS5	M13 (14)	09	11,3	1,0	20-70	39,7*	17,4*
Herausziehversuch	CS5	M13 (14)	11	11,3	1,0	20-55	19,1*	7,8*

* Ohne den Wert der ersten Laststufe (Mehrstufenversuch) ermittelt.

Die Annahme, dass der Verbund durch das Verdichten des behandelten Lockergesteins in Höhe der Scherzone gestört wird, bestätigt der in Bild 5.14 dargestellte Versuch. Für diesen Scherversuch erfolgte der Einbau äquivalent zu der Probenherstellung bei den Herausziehversuchen, also mit Verdichtung in Höhe der Scherzone. Die nach diesem Vorgehen ermittelten Scherparameter ($\varphi=33,5^\circ$ und $c=35,7 \text{ kN/m}^2$) des mit Bindemittel behandelten Lockergesteins liegen deutlich unter den Werten mit der homogenen Scherzone ($\varphi=39,2^\circ$ und $c=70,0 \text{ kN/m}^2$).

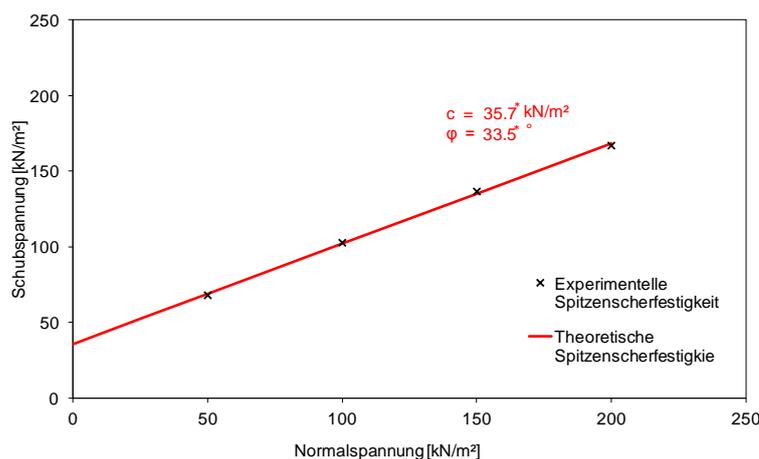


Bild 5.14 τ/σ -Diagramm der Scherversuche an behandeltem bindigem Lockergestein, aber mit Trennfläche in Höhe der Scherzone
(τ/σ -Diagramm of the shear tests with soil improvement, but with separation plane within height of the shear plane)

Bei der Betrachtung der in den Versuchen mit Mischbinder ermittelten Reibungswinkel sowie der Kohäsion muss aber beachtet werden, dass trotz der nicht bei allen Materialien erkennbaren Verbesserung durch die Zugabe des Kalks und des Zements, die Verbundbeiwerte für Reibung im Bereich von 1,0 liegen und somit ein guter Verbund gewährleistet ist. Weiterhin können bindige Böden, die im Ausgangszustand nicht für das Bauwerk hätten verwendet werden können und umgelagert hätten werden müssen, durch die Zugabe des Mischbinders handhabbar gemacht werden. Was eindrucksvoll durch die einaxialen Druckversuche (Bild 5.15) bestätigt wird. Durch die Zugabe von 3% (bezogen auf die Gesamtmasse) Mischbinder (M13) erhöhte sich die Druckfestigkeit auf das 20 fache. Von ca. 150 kPa auf ca. 3.000 kPa (nach 28 Tagen). Durch den Mischbinder wird Wasser gebunden, wodurch sich die Eigenschaften des Lockergesteins verbessern, dass aber durch die zeitlich begrenzte Erwärmung aufgrund der Bindemittelzugabe die Verdunstung des Bodenwassers beeinflusst wird,

konnte in Untersuchungen an der Bauhaus-Universität in Weimar nicht festgestellt werden [86]. Zusätzlich wird durch die Zugabe des Mischbinders eine höhere Unempfindlichkeit gegen Wasser geschaffen sowie die Frostbeständigkeit erhöht [98].

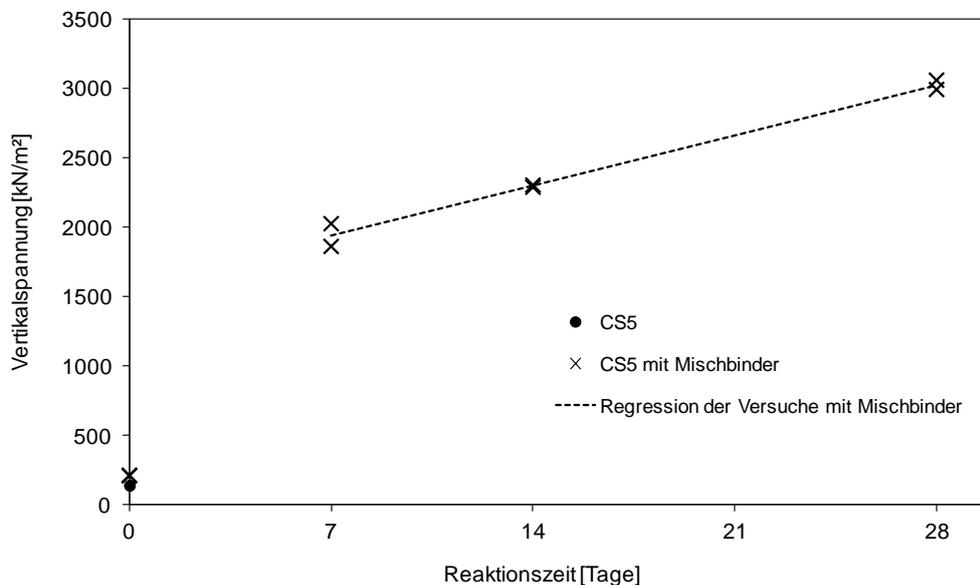


Bild 5.15 Ergebnisse der einaxialen Druckversuch nach DIN 18136 an CS5 mit und ohne Mischbinder
(*oedometer test according to DIN 18136 with CS5 and soil improvement*)

5.4 Betrachtungen zu dem Einfluss einer geschwächten Lockergesteinszone

Bei der Probenherstellung für einen Herausziehversuch (oder Reibungsversuch) wird das Geogitter auf den verdichteten Boden gelegt und anschließend die nächste Lage des Lockergesteins eingebaut, hingegen wird bei einem Scherversuch die Scherzone homogen ohne Trennfläche hergestellt [11]. Da für die Ermittlung des Verbundbeiwertes die Scherparameter aus beiden Versuchsarten mit ihren unterschiedlichen Aufbauten verglichen werden, wurden auch modifizierte Scherversuche durchgeführt. In Kapitel 2.2 (Versuchsarten) wird diese modifizierte Versuchsart "ISV-VT" (Großrahmenscherversuch mit getrennter Lockergesteinszone in der Scherebene) vorgestellt, bei dieser Versuchsanordnung wird durch die Verdichtung in Höhe der Scherebene die Lockergesteinszone geschwächt. Also eine Trennfläche geschaffen, wie sie auch in den Herausziehversuchen entsteht.

Der in Bild 5.16 dargestellte Scherversuch mit Trennfläche (VT) und CS5 zeigt, dass auch durch das Verdichten in der Scherzone die ermittelten Scherparameter deutlich geringer ausfallen ($\varphi=25,2^\circ$ und $c=27,1 \text{ kN/m}^2$). Die so ermittelten Scherparameter des CS5 liegen rund $5,0^\circ$ und 10 kN/m^2 unter den Werten der Versuche mit intakter Scherzone ($\varphi=30,2^\circ$ und $c=37,4 \text{ kN/m}^2$).

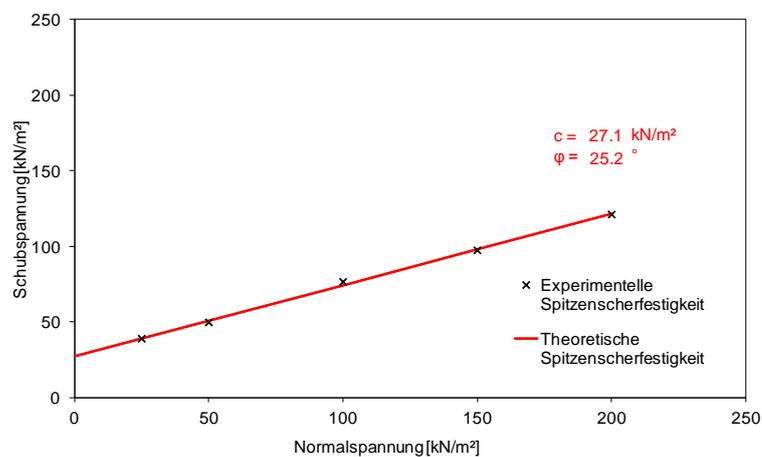


Bild 5.16 τ/σ -Diagramm der Scherversuche an CS5, aber mit Trennfläche in Höhe der Scherzone
(τ/σ -Diagramm of the shear tests with CS5, but with separation plane within height of the shear plane)

Die niedrigeren Werte sind dadurch begründet, dass durch die Verdichtung eine glatte und feste Oberfläche entsteht, die den Verbund und die Verzahnung der beiden getrennt eingebauten Schichten erheblich stört. Die Versuche mit getrennter Scherzone haben weiterhin gezeigt, dass die Höhe der Trennfläche (also die Höhe der dritten eingebauten Schicht) einen sehr großen Einfluss auf die Scherparameter hat. Wird die Trennfläche etwas zu hoch oder zu niedrig angeordnet, erfolgt das Abscheren nicht in der bewusst geschwächten Ebene, sondern in der ungestörten Zone und die ermittelten Parameter sind auf dem Niveau der Versuche ohne Trennfläche. Bild 5.17 zeigt die Scherfläche nach einem Scherversuch bei dem die Trennfläche zu niedrig angeordnet wurde. Die Scherung erfolgte im ungestörten Bereich, deutlich sind die verschiedenen Bruchflächen zu erkennen, die belegen, dass das Abscheren nicht auf der vorgegebenen Trennfläche erfolgte.



Bild 5.17 Bilder eines Scherversuchs mit Trennfläche an CS5, bei dem die Trennfläche zu hoch angeordnet wurde
(images of a shear test with separation plane and CS5, but with incorrect height of the separation plane)

Andere Versuche bei denen die Trennfläche genau in Höhe der Scherzone angeordnet wurde, zeigen eine viel homogenere und ebenere Scherfläche (Bild 5.18), was auch die Scherparameter reduziert (Bild 5.16). Die Höhe der Trennfläche genau in der Höhe der Scherzone anzuordnen ist aber aufgrund der Setzungen, die während der Konsolidation auftreten entsprechend schwierig. Die zu erwartenden Setzungen müssen bekannt sein, damit die Trennfläche beim Einbau, entsprechend der zu erwartenden Setzung, über der Scherebene angeordnet werden kann, damit nach der Konsolidation die Trennfläche genau auf der Höhe der Scherebene ist.



Bild 5.18 Bilde eines Scherversuchs mit Trennfläche an CS5, bei dem die Trennfläche sich in Höhe der Scherzone befunden hat
(picture of a shear test with separation plane and CS5 (correct height of the separation plane))

Die Betrachtung des Einflusses der Lockergesteinszone hat dargelegt, dass dieser Faktor bei der Auswertung von Laborergebnissen, bei der Bemessung sowie auf der

Baustelle berücksichtigt werden muss. Würden aber für die Ermittlung der Verbundbeiwerte nach Gl. (2.4) nicht die im Scherversuch mit homogener Scherzone ermittelten Werte verwendet, sondern die Werte aus Versuchen mit Trennfläche, wäre dies bei einer Bemessung mit nicht kalkulierbaren Unsicherheiten behaftet. Daher wurden bei der vorliegenden Ausarbeitung zur Ermittlung der Verbundparameter immer die nach dem "klassischen Verfahren" ermittelten Scherparameter verwendet.

Zusätzlich zu den zuvor geschilderten Versuchen mit Trennfläche, wurden auch Versuche durchgeführt, in denen die Trennfläche angeraut wurde. Die Scher- bzw. Herausziehparameter konnten durch das Anrauen der Verdichtungsfläche deutlich erhöht werden. Dies gilt auch für die Versuche mit Mischbinder.

6 Geräteentwicklung

Bei Versuchen mit vollgesättigten Boden zeigte sich, dass das Interaktionsgerät für diese Versuche nicht geeignet ist. Während der Scherung bewegen sich der obere und untere Scherrahmen gegeneinander, wodurch ein Spalt zwischen diesen entsteht. Durch diesen Spalt kann das, durch den hohen Wassergehalt sehr plastisch gewordene bindige Lockergestein, entweichen. Dieses Entweichen des Lockergesteins macht eine Untersuchung samt Porenwasserdruck-Messungen (PWD-Messung) mit korrekten Entwässerungsrandbedingungen im Interaktionsgerät bei hohen Wassergehalten unmöglich. Auch eine Modifikation des Interaktionsprüfgeräts, so dass an diesem PWD-Messungen durchgeführt werden können, ist nicht durchführbar. Die Untersuchung dieser Mechanismen und der dreidimensionalen Spannungszustände werden als bedeutungsvoll eingeschätzt. Dabei kommt der Regelung des Spannungszustandes eine wichtige Bedeutung zu. Gewöhnliche Großgeräte erzeugen maximal biaxiale Belastungen (2-D), aufgrund der Anisotropie der Geogitter ist die Erforschung des Verbundverhaltens daher nur begrenzt möglich. Die wirklichkeitsnahen Spannungszustände (in drei Dimensionen) können nur mit einem Großtriaxialgerät erzeugt werden. Da ein solches Gerät noch nicht existiert, wurde im Zuge meiner Tätigkeit ein innovatives Großtriaxialgerät (TA-3D) auf dem Stand der Forschung entwickelt und aufgebaut, damit Geokunststoffe in Kombination mit bindigen Lockergestein mit hundertprozentiger Wassersättigung untersucht werden können.

Mit dem TA-3D wird es möglich sein, Dehnungen an Geokunststoffen sowie Verformungen und Spannungen an den Lockergesteinsproben zu messen und die Porenwasserdrücke während des Versuchs aufzuzeichnen. Für die Untersuchung des Verformungsverhaltens sowie der Gebrauchstauglichkeit ist es von großer Bedeutung die Beanspruchung des Geokunststoffes wirklichkeitsnah abzubilden. Dies wird erst in einem Triaxialversuch möglich, in dem die Belastungen durch das Lockergestein in den Geokunststoff eingetragen werden. Die Untersuchungen an dem Gesamtsystem sind notwendig, um weitere Erkenntnisse über die Wirkungsweise des Geokunststoffs und das Interaktionsverhalten zu erlangen.

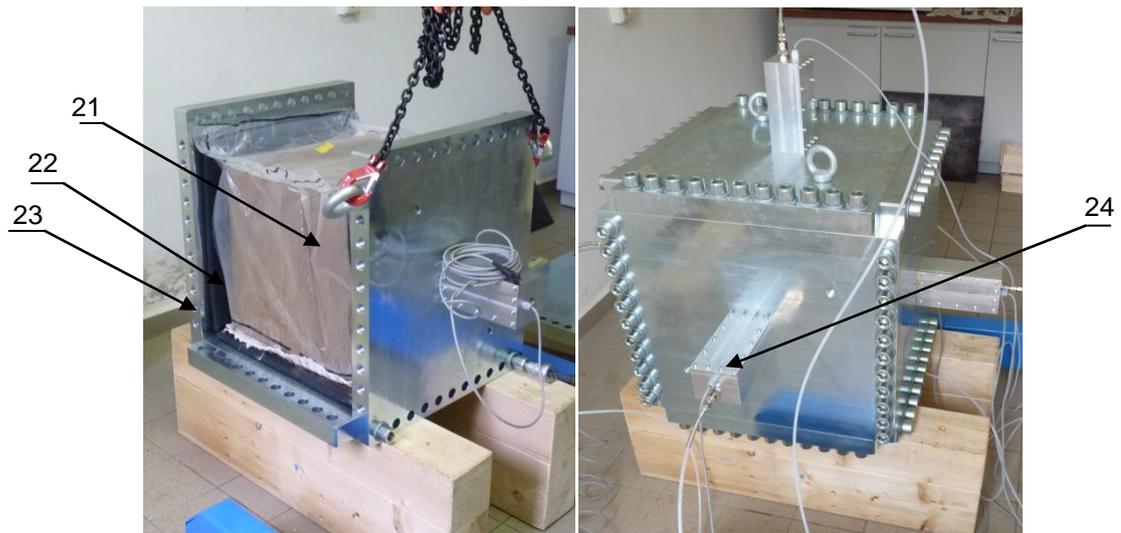


Bild 6.1 Großtriaxialgerät TA-3D (Probe, Druckluftkissen, Seitenplatten)
(*large triaxial cell TA-3D (sample, air cushion, plates)*)

Nachfolgend wird das neu entwickelte und fertiggestellte Großtriaxialgerät (TA-3D) des Freiburger Instituts für Geotechnik beschrieben. Die Versuchsapparatur zur Erzeugung von echten dreidimensionalen Spannungszuständen (Bild 6.1) besteht aus vier Hauptkomponenten: der Probe (21), den sechs Industriedruckkissen (22) mit denen die Seiten der Probe separat belastet werden können, den sechs massiven Seitenplatten (23), die eine Verformung des Großtriaxialgerät verhindern und eine Belastung von sechs Bar zulassen, sowie den sechs Druckboxen (24), in denen Wegaufnehmer angeordnet sind um die Verformungen der Probe zu messen. Die Druckboxen sind nötig, damit durch die einzige Öffnung in den Industriedruckkissen sowohl die Verformung gemessen, als auch die Kissen befüllt werden können. Die Probe befindet sich in einer luftdichten PE-Folie, sodass die Probe für die Montage der Seitenplatten evakuiert werden kann.

Insgesamt verfügt die in Bild 6.2 rechts dargestellte Messtechnik über vier Druckregelventile, so dass die Ober- und Unterseite der Probe separat und die beiden gegenüberliegenden Seitenteile im Tandembetrieb angesteuert werden können. Die separate Ansteuerung der Ober- und Unterseite ist aufgrund des großen Eigengewichts der Probe notwendig.

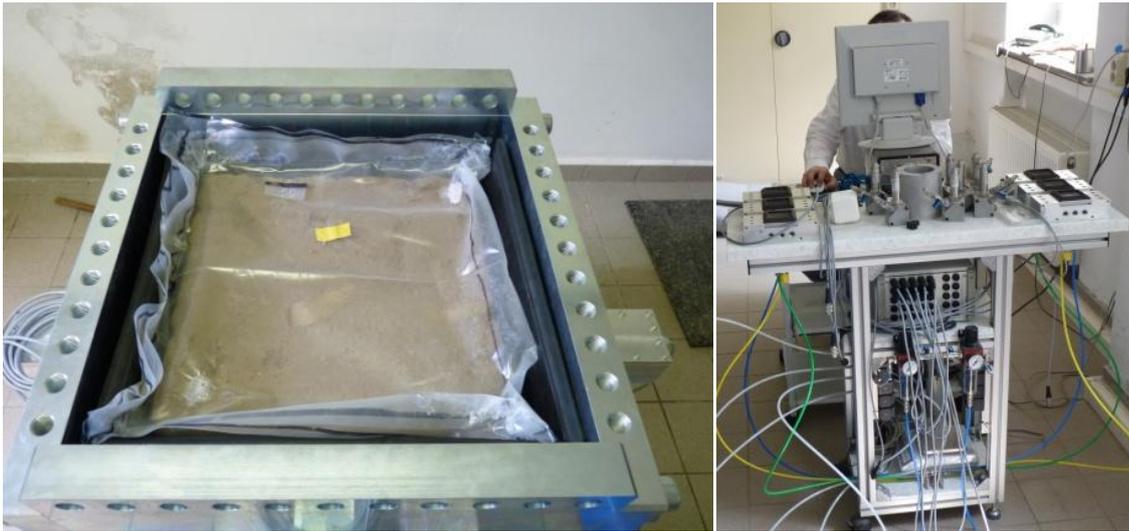


Bild 6.2 Großtriaxialgerät TA-3D (Draufsicht, Messtechnik)
(*large triaxial cell TA-3D (plan view, measuring equipment)*)

Das Versuchsgerät wird es ermöglichen vollständig wassergesättigte bindige Proben mit oder ohne Geokunststoffbewehrung zu untersuchen. Es wird möglich sein die Versuchsprobe mit mehreren Geokunststofflagen zu bewehren, die Porenwasserdrücke zu messen und die Dehnungen im Geogitter sowie die Verformungen im Lockergestein zu bestimmen. Zielsetzung hierbei: die bodenverbessernden Eigenschaften der Geogitter genauer zu erfassen, sowohl für Tragschichten als auch für KBE-Konstruktionen. Angedacht ist es auch die drainierende Wirkung der Geokunststoffe und insbesondere der Kombinationsprodukte aus Geogitter und Vlies aufzuzeigen.

7 Zusammenfassung

7.1 Untersuchungen und Ergebnisse

Geokunststoffgeometrie und Reibungsbeiwerte

In Kapitel 4 und 5 werden alle Versuche, die mit verschiedenen Lockergesteinen und unterschiedlichen Geogittern durchgeführt wurden, detailliert beschrieben. Eine Übersicht über die durchgeführten Untersuchungen liefert Tab. 7.1. Bei der Auswertung der Versuche zeigte sich, dass die Herausziehversuche eine spezifischere Auswertung zulassen, da die Ergebnisse zwischen den durchgeführten Untersuchungen stärker variieren. Die Reibungsversuche zeigten zwischen den getesteten Produkten geringere Variationen. Insbesondere bei den biaxialen Geogittern waren die Unterschiede bei den ermittelten Verbundbeiwerten für Reibung verhältnismäßig gering. Bei den einaxialen Produkten führen eher glatte, flache und unflexible Produkte zu geringen Reibungsbeiwerten. Die unterschiedliche Einbettung der Geogitter nach den Versuchen wird in Bild 4.2 ersichtlich. Weiterhin wurde festgestellt, dass die Schädigung an den Geogittern nach den Reibungsversuchen deutlich geringer war und der Anstieg der Schubspannung deutlich gleichmäßiger erfolgte als bei den Herausziehversuchen. Tendenziell konnte beobachtet werden, dass bei Produkten mit einem großen Verhältnis von Öffnungsweite zu Maschenweite die Adhäsion höher ausfällt. Dies war auch bei den Herausziehversuchen festzustellen, wobei die Herausziehversuche aber niedrigere Adhäsionswerte ergaben als die Reibungsversuche. Die unterschiedliche Kraft-einleitung ist für die niedrigeren Werte im Herausziehversuch ursächlich. Grundsätzlich konnte aber festgestellt werden, dass der Kohäsionswert, der im Scherversuch ermittelt wurde, durch die Geokunststoffe reduziert wird (niedriger Adhäsionswerte in den Reibungs- und Herausziehversuchen im Vergleich zu den Scherversuchen).

Bei den Herausziehversuchen mit den einaxialen Geogittern gehörte ein glattes und sehr flaches Produkt immer zu den Produkten mit den niedrigsten Reibungsbeiwerten. Das biaxiale Geogitter, welches bei den Versuchen mit den Böden CS5 und HB zu den Geokunststoffen mit niedrigsten Reibungsbeiwerten gehörte, lieferte bei den Versuchen mit dem KL den höchsten Wert. Es konnte festgestellt werden, dass das Interaktionsverhalten sehr stark von dem Lockerstein abhängig ist. Die Anteile des Herausziehwiderstandes aus Reibung und Erddruck variieren dabei in Abhängigkeit

von dem Bodenmaterial. Bei Lockergesteinen mit einem hohen Reibungswinkel (wie CS5 und HB) hat die Oberflächenreibung einen großen Anteil am Herausziehwidertand.

Die in Kapitel 5.1 ermittelte Höhe der gemittelten Rautiefe (Kapitel 5.2) hat einen nachweisbaren Einfluss auf die Oberflächenreibung. Durch eine größere Rautiefe wurde die Reibung an der Oberfläche erhöht.

Querelemente

Auf den mobilisierbaren Erddruckanteil haben die Höhe der Querelemente, die Zugfestigkeit in Querrichtung als auch das Verdrehen der Elemente einen Einfluss. Bei Geogittern mit einer niedrigen Zugfestigkeit in Querrichtung sowie mit einer niedrigen gemittelten Höhe der Querelemente (Tab. 3.4 und Tab. 3.5) konnte durchschnittlich weniger Erddruck aufgebaut werden. Zusätzlich wird der Erddruck vor den Querelementen durch das Verdrehen der Querelemente tangiert, dieser Einfluss ist aber stark vom Verschiebungsweg sowie von der Ausführung der Querelemente (Flexibilität usw.) abhängig. Da sich die Verformungen, Dehnungen und Verschiebungen der Querelemente überlagern, sind in den durchgeführten Versuchen die einzelnen Faktoren nicht getrennt zu benennen. Der neu definierte Querelementebeiwert liefert aber eine Möglichkeit den Einfluss der Querelemente zu erfassen.

Dehnung und Dehnsteifigkeit

Unter anderem durch den Vergleich der Materialien 9 und 14, welche sich fast ausschließlich durch den Rohstoff unterscheiden sowie durch die große Anzahl an Versuchen mit den unterschiedlichen Geogittern, konnte aufgezeigt werden, dass die Dehnsteifigkeit der Geogitter keinen Einfluss auf den Scher- bzw. Herausziehweg hat, der notwendig ist, um den Maximalwert der Schubspannung (Peak-Wert) zu erreichen. Auch ein Zusammenhang zwischen der Höhe der Schubspannung und dem Herstellungsverfahren konnte nicht festgestellt werden (Kapitel 4.3.4 "Schlussfolgerungen aus den Herausziehversuchen").

In einem weiteren Schritt sollte die Dehnungen bestimmt werden, denen die im Boden befindlichen Geokunststoffe unterworfen sind. Zu diesem Zweck wurden die Ergebnis-

se der vorderen Wegaufnehmer gemittelt, genauso wie die Ergebnisse der Hinteren und anschließend die Differenz durch den Abstand der Wegaufnehmer geteilt. Diese Dehnung wurde sowohl bei der 5 kN/m² als auch bei der 20 kN/m² Laststufe bestimmt. Bei der niedrigeren Laststufe konnte diese Dehnung zwar noch für alle Produkte bestimmt werden, zeigte aber kein eindeutiges Ergebnis. Bei der höheren Laststufe konnte die Dehnung nicht bei allen Produkten bestimmt werden, da die Querstreben teilweise versagten und so die Wegaufnehmer keine Ergebnisse lieferten.

Der Vergleich der Produkte 9, 13 und 14, welche mit und ohne Querelemente untersucht wurden, offenbarte einen Vorteil der dreidimensionalen Querelemente bei den Versuchen mit dem Bodenmaterial CS5 und dem HB. Die in Tab. 5.3 angegebenen Schubspannungen bei Herausziehversuchen mit dem CS5 zeigen die deutliche Erhöhung der Schubspannung durch die räumlichen Querelemente und belegen auch, dass nach dem Entfernen der Querelemente die Produkte 9, 13 und 14 nahezu dieselben Herauszieh widerstände aufweisen.

Bindemittelzugabe

Die Versuchsreihen, bei denen der Mischbinder auf das Lockergestein abgestimmt war sowie die Tests bei denen Sand zugegeben wurde, haben gezeigt, dass gering tragfähige und bindige Böden für den kunststoffbewehrten Erdbau nutzbar gemacht werden können; d.h. dass aufwändige Umlagerungen von Böden, die nicht den baulichen Anforderungen entsprechen, entfallen können. Es ist sogar davon auszugehen, dass die im Labor ermittelten Vorteile in der Baupraxis noch deutlicher ausfallen.

Tab. 7.1 **Aufstellung der durchgeführten experimentellen Versuche**
(*experimental testing schedule*)

Geo- gitter	Versuchstyp und Lockergestein									
	IRV-CS5	IRV-KL	IRV-HB	IPV-CS5	IPV-KL	IPV-HB	IPV-CS3	IPV-R-CS5	IPV-CS5- M13	
1	X	X	O	X	X	X	O	O	O	
2	X	X	O	X	X	X	O	V	O	
3	X	X	O	X	X	X	X	X	X	
4	X	X	O	X	X	X	X	O	X	
5	X	X	O	X	X	X	O	X	O	
6	X	X	O	X	X	X	O	O	O	
7	X	X	O	X	X	X	O	O	O	
8	X	X	O	X	X	X	O	O	O	
9	X	X	O	X	X	X	X	X	X	
10	X	X	O	X	X	X	X	O	O	
11	X	X	O	X	X	X	O	O	X	
12	X	X	O	X	X	X	O	O	O	
13	X	X	X	X	X	X	O	X	O	
14	O	X	O	X	X	X	O	X	O	
	X → Versuche durchgeführt					O → keine Versuche durchgeführt				

7.2 Schlussfolgerungen

Bei einer Vielzahl von Baumaßnahmen (wie z. B. KBE-Konstruktionen) ist es möglich auch die anstehenden bindigen Böden zu nutzen, wie die durchgeführten Versuche und Untersuchungen belegen. Unter Abwägung der objektspezifischen Randbedingungen können durch die Verwendung des anstehenden bindigen Bodens in Kombination mit Geokunststoffen klare wirtschaftliche und ökologische Vorteile erzielt werden, da sich vielfach Transporte erübrigen.

Schlamm kann zwar nicht alleine durch den Einsatz von Geokunststoffen in einen "guten Reibungsboden" verwandelt werden, aber bei vielen Gegebenheiten kann der Einsatz von Geokunststoffen eine wirtschaftliche Alternative darstellen. Maßgebend bei feinkörnigen Böden ist meist der Wassergehalt. Ein zu hoher Wassergehalt verhindert eine ausreichende Verdichtung und die damit einhergehenden Setzungen können die Gebrauchstauglichkeit einer KBE-Konstruktion beeinträchtigen. Weiterhin sind die Scherparameter (Reibungswinkel und Kohäsion) von bindigen Böden verhältnismäßig gering. Möglichkeiten die Eigenschaften mit Mischbinder zu optimieren wurden in den vorherigen Kapiteln ausführlich beschrieben. Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von Recyclingmaterial aus Bau- und Abbruchmaßnahmen, um die Scherparameter und bodenmechanischen Eigenschaften zu verbessern [68].

In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, dass es möglich ist, bindige Böden zu "optimieren" (hinsichtlich Wassergehalt, Sandanteil, Einsatz von Mischbindern etc.). Wie die Tests gezeigt haben entsprechen Böden mit einem hohen Feinkornanteil dank der eingesetzten Geokunststoff nahezu denen von Sand. Unterschiede zwischen den eingesetzten Geogittern werden in Kapitel 7.1 "Untersuchungen und Ergebnisse" beschrieben. In dem nachfolgenden Bild 7.1 sind die wesentlichen das Verbundverhalten beeinflussenden Faktoren zusammengefasst.

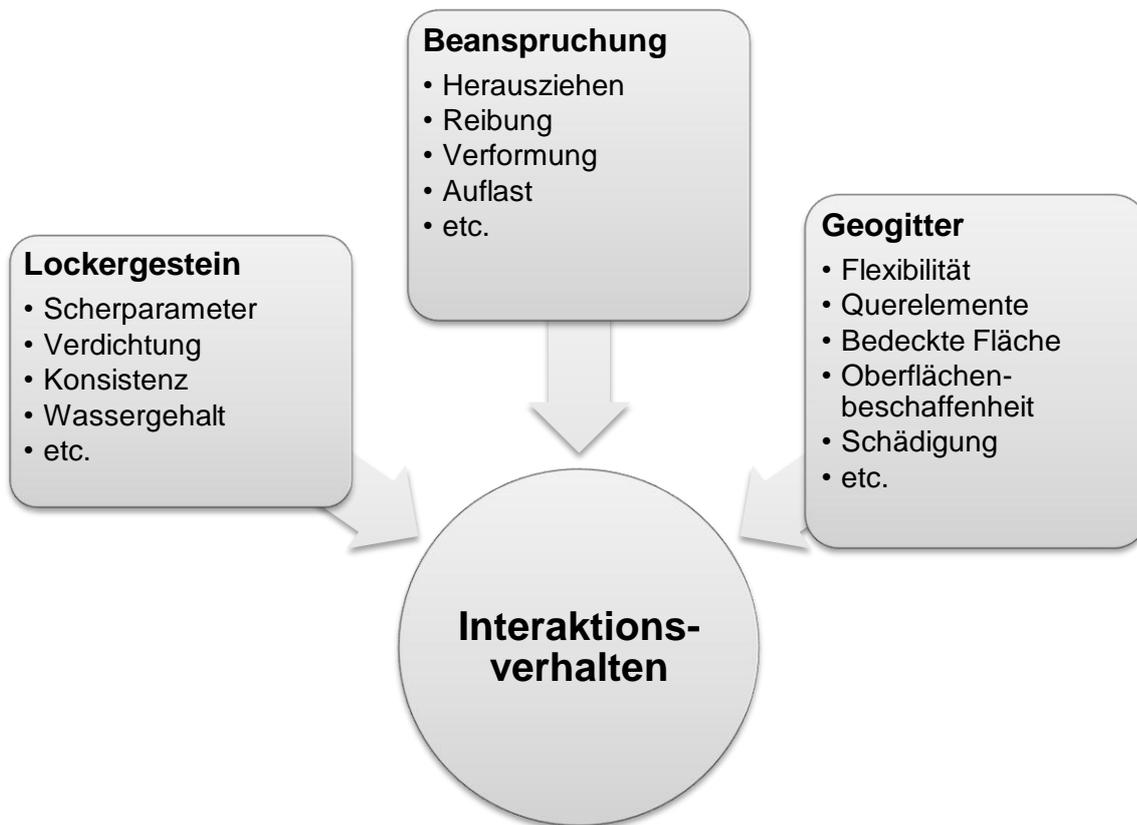


Bild 7.1 Interaktionsverhalten beeinflussende Faktoren
(*main interaction parameters*)

Das Interaktionsverhalten wird sowohl vom Lockergestein, der Beanspruchung als auch den Geogittern beeinflusst. In Bild 7.1 sind die Haupt-Parameter noch in die Detail-Parameter aufgeschlüsselt, die auch in Wechselwirkung zueinander stehen. So ist beispielsweise der Detail-Parameter "Querelemente" der Geogitter abhängig von den Detail-Parametern des Lockergesteins oder die Schädigung der Geogitter abhängig von der Verformung. Nicht in der Grafik aufgeführt sind die geogitterspezifischen Parameter Dehnsteifigkeit und Herstellungsverfahren, da im Rahmen der gemachten Experimente ein Zusammenhang bzw. ein Einfluss auf das Interaktionsverhalten nicht aufgezeigt werden konnte. Ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem Verhältnis Öffnungsweite zu Maschenweite mit den Adhäsionswerten konnte aber festgestellt werden, weshalb bei den Geogittern die "bedeckte Fläche" angegeben ist. Die aufgeführten Parameter haben aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit, beispielsweise könnten andere Versuchsanordnungen noch weitere Einflussgrößen aufzeigen, weshalb bei allen Parameter-Gruppen in Bild 7.1 noch ein "etc." angegeben ist.

Die an den Böden mit Mischbinder durchgeführten Scherversuche sowie einaxialen Druckversuche belegten die deutliche Verbesserung durch den Einsatz des Mischbinders. Die unter labormaßstäblichen Bedingungen durchgeführten Tests zur Ermittlung der Scherparameter des behandelten Bodens in Kombination mit Geogittern zeigte aber, dass die Ergebnisse bei den Versuchen mit den verhältnismäßig kleinen Abmessungen stark schwanken und insbesondere die Verdichtung in Höhe der Scher- bzw. Herausziehebene stark das Ergebnis beeinflusst. Die Verdichtung speziell in der Ebene, in der sich auch das Geogitter befindet, hat sich auch bei den Versuchen ohne Bindemittelzusatz gezeigt (Kapitel 5.4, Betrachtungen zu dem Einfluss einer geschwächten Lockergesteinszone). Für die Praxis muss dies bedeuten, dass es möglichst zu vermeiden ist, eine Trennfläche durch die Verdichtung zu schaffen, welche die Interaktion Geogitter/Lockergestein behindert. Durch das mittige Einlegen des Geogitters in eine zu verdichtende Bodenschicht könnte beispielsweise das Verbundverhalten deutlich verbessert werden. Die Umsetzung birgt aber aufgrund des Baustellenablaufs gewisse Schwierigkeiten bzw. erhöhten Aufwand.

Weiterhin kann der Einsatz von Geogittern mit speziellen räumlichen Strukturen das Verbundverhalten verbessern. Die schnellere Einleitung der Spannungen aus dem Bodenmaterial in den Geokunststoff könnte sich bei Projekten in kleineren Verformungen ausdrücken. Abgesehen von den neu gewonnenen technischen Grundlagen zeigte sich, dass die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Inlayprüftechnik große Vorteile bietet. Der Einsatz von Inlayrahmen auch bei anderen bodenmechanischen Versuchsgeräten scheint sinnvoll.

Überlegungen zur Bemessung

In Kapitel 1.1.2 und 1.1.3 wurde gezeigt, dass der heute zur Anwendung kommende lineare Bemessungsansatz sehr konservativ ist, viele Reserven hat und nicht der Wirklichkeit entspricht. Bild 7.2 zeigt die Bemessung nach Bishop mit Hilfe eines EDV-Programms. Iterativ überprüft das Programm verschiedene Gleitflächen hinsichtlich des Verhältnisses zwischen Einwirkungen und Widerständen.

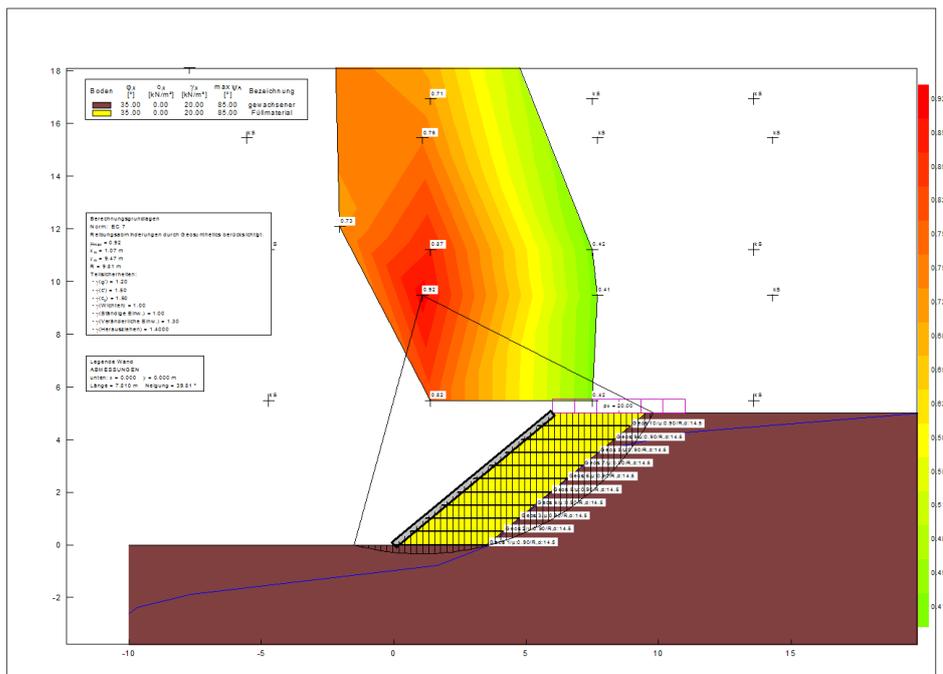


Bild 7.2 EDV-gestützte Bemessung der Böschungstabilität nach Bishop
(dimensioning of slope stability (Bishop) using electronic software)

Bild 1.7 (B) stellt dar, wie das Geogitter auf Herausziehen beansprucht wird. In Bild 1.8 sind vergrößert die Gleitfläche sowie die in der Bemessung angesetzten Kräfte und Spannungen dargestellt (heutiges Modell). Bei der Betrachtung der aktuellen Forschungsergebnisse stellt sich die Frage, ob das in Bild 1.8 dargestellte und in den Bemessungen verwendete Modell der Wirklichkeit entspricht.

Die unter anderem in Bild 7.3 dargestellten Untersuchungen von Ruiken zeigen, dass bei einer geogitterbewehrten Probe nicht nur eine Scherfuge bzw. Gleitfläche entsteht, sondern mehrere die nacheinander in den Bereichen entstehen, in denen der Gesamtwiderstand am geringsten ist. In Untersuchungen im ebenen Verformungszustand konnte die Stützwirkung anhand einer Gewölbekonstruktion sowie reduzierter horizontaler Verformungen durch die Geogitter festgestellt werden (u. a. [81], [82] und [74]). In Reibungs- und Scherversuchen konnte festgestellt werden (Kapitel 4), dass sich die Scherfuge einen "Weg sucht" bei dem die Widerstände am geringsten sind, ähnlich sind die mehreren Gleitlinien bei dem geogitterbewehrten Boden in Bild 7.3 zu verstehen.

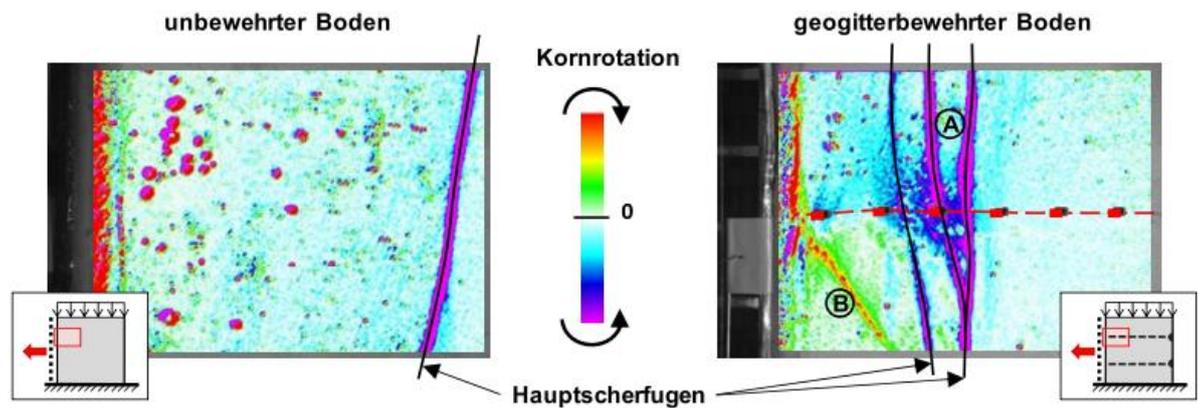


Bild 7.3 Scherfugen in Detailausschnitten im unbewehrten und geogitterbewehrten Boden aus [81]
(shear gaps in geosynthetic using reinforced and not reinforced soil from [81])

Dies bedeutet für den in Bild 1.8 gezeigten Geokunststoff, dass die Kräfte nicht an einer Stelle von dem aktiven in den passiven Bereich übertragen werden müssen, sondern vielmehr die Kräfte an mehreren Stellen übertragen werden sowie eine Einleitung der Kräfte in den Geokunststoff in einer größeren Zone erfolgt. Im bewehrten Boden wandert die Lage der Scherfuge, also die Grenze zwischen aktivem und passivem Bereich, in Abhängigkeit vom Gesamtwiderstand. Wenn nun die Kraftübertragung im Geogitter vom aktiven in den passiven Bereich nicht an einer Stelle erfolgt, könnte dies bedeuten, dass eine geringere Zugfestigkeit des Geokunststoffs ausreicht, um die Kräfte aufzunehmen und weniger Kräfte verankert werden müssten. Dies ist aber nicht notwendigerweise der Fall, da sich die Kräfte über die Geogitterlänge summieren können. Entscheidend für diesen Ansatz ist, ob die in das Geogitter eingetragenen Kräfte in der Nähe des Eintrags abgebaut werden können oder sich mit anderen Kräften überlagern und aufsummieren.

Ein relativ direkter Abbau der in die Geogitter eingeleiteten Kräfte, würde sich auch mit den Erkenntnissen aus der Anwendung von Geokunststoffen als Bewehrungselement in Tragschichten decken. In Tragschichten wirken Geokunststoffe im Nahbereich und haben eine stabilisierende Funktion. Zweilagig eingesetzt wirkt der bewehrte Boden plattenähnlich (Setzungen vergleichmäßigend) [10]. Da auch bei KBE-Konstruktionen, die sich im grundsätzlichen Aufbau nicht groß von Tragschichten unterscheiden, mit diesen Mechanismen zu rechnen ist, kann angenommen werden, dass die Geogitter die Verformungen reduzieren, im Nahbereich wirken und die Entstehung einer Gleitfläche verzögert/erschwert wird.

Zusammenfassung der Ergebnisse der Arbeit

1. Geokunststoffparameter, die das Verbundverhalten beeinflussen, wurden definiert sowie das Interaktionsverhalten beeinflussende Faktoren herausgearbeitet.
2. Grundlagenkenntnisse für den gemeinsamen Einsatz von bindigen Lockergestein und Geokunststoffen wurden geschaffen.
3. Das Interaktionsprüfgeräts (IPG) wurde weiterentwickelt (u. A. Inlayrahmen und Inlaytechnik) und konnte für die Versuchsreihen verwendet werden.
4. Ein Bezug zur Baupraxis wurde hergestellt. Praxistaugliche Optimierungen für die Nutzung und Gewinnung gering tragfähiger Böden sowie ihre sichere und wirtschaftliche Bemessung und Dimensionierung wurden geschaffen.
5. Ein Großtriaxialgerät wurde geplant, entwickelt und gebaut. Erste Versuche, bei denen die Krafteinleitung in das Geogitter über das Lockergestein bei gleichzeitiger Messung der Porenwasserdrücke erfolgt, könnten zeitnah durchgeführt werden.

8 Ausblick

Neben der Durchführung der in Kapitel 6 "Geräteentwicklung" beschriebenen Versuche im TA-3D wären ergänzende Versuche im Interaktionsprüfgerät, bei denen spezielle Details an einzelnen und modifizierten Geogittern durchgeführt würden, sinnvoll. Da die Vielzahl der auftretenden Faktoren und Mechanismen sich gegenseitig beeinflussen, könnten z. B. ergänzende Versuche von Geogittern mit dreidimensionaler Struktur (z. B. Material 13) und Bodenbehandlung, Versuche zum Verdrehen der Querelemente und deren Steifigkeit durchgeführt werden. Weiterhin ist es notwendig, dass die in dieser Arbeit für das Kurzzeitverhalten gewonnenen Kenntnisse auch auf Langzeitverhalten übertragen werden.

Nach dem heutigen Bemessungskonzept wird ein Verbundbeiwert für Reibung R_φ (Gl. (2.4)) ermittelt, welcher den Verbund Geokunststoff/Lockergestein beim Herausziehen beschreibt. Nicht berücksichtigt wird bei diesem Vorgehen die nicht lineare Krafteinleitung über die Länge des Geokunststoffs (Kapitel 1.1.3 und [63]), wie sie zum Beispiel in Bild 5.13. aufgezeigt wird, sowie von Gleitflächen und die Auswirkungen, denen Geokunststoffe im Nahbereich ausgesetzt sind. Im Abschnitt "Überlegungen zur Bemessung" werden einige Ideen und Ansätze genannt, mit denen eine Bemessung für KBE-Konstruktionen näher an der Realität erfolgen könnte. Besonderes Augenmerk muss dabei auf die sich bildenden Gleitfugen, die Wirkung im Nahbereich sowie die Abtragung der Kräfte über die Länge gelegt werden, mit dem Ziel die Reserven in KBE-Konstruktionen besser zu nutzen und die Bauweise noch wirtschaftlicher zu machen. Die Kalibrierung der einzelnen Faktoren spielt dabei eine zentrale Rolle.

Aufgrund der Kinematik bei Nagelwänden (Gleitfuge und Nagel etwa senkrecht zu einander), haben Renk und Kolymbas [77] ein neuartiges Verfahren ausgearbeitet, bei dem durch den Ansatz von Mantelreibung entlang der Nägel dem Boden eine zusätzliche haltende Spannung eingeprägt wird. Da die Mechanismen bei einer KBE-Konstruktion teilweise identisch zu den bei einer Nagelwand sind, könnte auch der von Renk und Kolymbas vorgestellte Ansatz auf eine mögliche Übertragbarkeit auf die KBE-Bauweise überprüft werden.

9 Literaturverzeichnis

9.1 Normen und technische Richtlinien

- [N1] BBA (2013): British Board of Agrément, Approval inspection testing certification, Technical approvals for construction, Agrément Certificate, Walford, United Kingdom.
- [N2] DIN 1054 (2005-1): Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [N3] DIN 1054 (2010-12): Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau - Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [N4] DIN 18127 (1997): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [N5] DIN 18134 (2012): Baugrund – Versuche und Versuchsgeräte – Plattendruckversuch. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [N6] DIN 18137-3 (2002): Baugrund – Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 3: Direkter Scherversuch. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [N7] DIN 18196 (2011-05): Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [N8] DIN 18300 (2012): VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Erdarbeiten. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [N9] DIN 4084 (2009): Baugrund - Geländebruchberechnung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [N10] DIN 60009 (2011): Geokunststoffe - Prüfung und Bestimmung des Verbundbeiwerts mit Boden im Herausziehversuch. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [N11] DIN EN 13738 (2005-02): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Bestimmung des Herausziehwiderstandes aus dem Boden, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [N12] DIN EN 1997-1 (2014-03): Eurocode 7 - Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [N13] DIN EN ISO 10318 (2006-04): Geokunststoffe - Begriffe , Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [N14] DIN EN ISO 10319 (2008): Geokunststoffe - Zugversuch am breiten Streifen , Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [N15] EBGEO (1997): Empfehlung Bewehrungen aus Geokunststoffen. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT), Ernst & Sohn Verlag, Berlin.
- [N16] EBGEO (2010): Empfehlung für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrung aus Geokunststoffen. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT), Ernst & Sohn Verlag, Berlin.
- [N17] EN 1997-1 (2004-01): Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik, Eurocode 7-1, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [N18] EOTA TR041 (2012): Non-reinforcing hexagonal geogrid for the stabilization of unbound granular layers by way of interlock with the aggregate, European Organisation for Technical Assessment, www.eota.eu.

-
- [N19] Merkblatt über Bodenverfestigung und Bodenverbesserungen mit Bindemitteln (2004), Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen , FGSV-Nr.: FGSV 551, FGSV Verlag GmbH, Köln.
 - [N20] Merkblatt über die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaues (2005): M Geok E, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, FGSV-Nr.: FGSV 535, FGSV Verlag GmbH, Köln.
 - [N21] Ril 836 (2008): Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instand halten, DB Netz AG.
 - [N22] SN 670 242 (2005): Geokunststoffe - Anforderungen für die Funktion Bewehren , SNV Schweizerische Normen-Vereinigung, Winterthur, Schweiz.
 - [N23] TL SoB-StB 04 (2004): Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau, Ausgabe 2004/Fassung 2007, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag GmbH, Köln.

9.2 Literatur

- [1] ALAGIYAWANNA A.M.N., SUGIMOTO M., SATO S., TOYOTA H. (2001): Influence of longitudinal and transverse members on geogrid pullout behavior during deformation. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 19 (2001), S. 483-507.
- [2] ALKAYYAL H., ALTHOFF S., TAMASKOVICS N., KLAPPERICH H., AWWAD T. (2014): Supporting Structures Reinforced by Geogrids – the Engineering Challenge. Proceedings of the 10th International conference on Geosynthetics (ICG), Berlin, Germany.
- [3] ALLEN T. M., BATHURST R. J. (2002): Observed Long-Term Performance of Geosynthetic Walls and Implications for Design. *Geosynthetics International*, Vol. 9 (5-6), pp. 567-606.
- [4] ALTHOFF S. (2010): Contribution to use multi-stage large shear-frame tests to investigate the interaction-behaviour between geosynthetics and cohesive soil. *Geotechnical Engineering 20, View of Young European Geotechnical Engineers*, ISBN: 978-80-7204-686-7, Brno, Czech Republic, pp. 260-265.
- [5] ALTHOFF S. (2011): Use of poor soil for Geosynthetic-Reinforced-Soil-Structures. St. Petersburg State Mining Institute, Topical Issues of Rational Use of Natural Resources, St. Petersburg.
- [6] ALTHOFF S. (2012): Fundationsschichtbewehrung – Geokunststoffe im Gesamtsystem, 1. Schweizer Fachtagung für Bauen mit Geokunststoffen, HTW Chur, Chur, Schweiz.
- [7] ALTHOFF S. (2013): Bewehren mit Geokunststoffen – Ausschreibung und Bemessung, 2. Schweizer Fachtagung für Bauen mit Geokunststoffen, HTW Chur, Chur, Schweiz.
- [8] ALTHOFF S. (2013): Bewehren mit Geokunststoffen, der bauingenieur, Ausgabe April 2013, pp. 26-27, fachkom gmbh, Langnau, Schweiz.
- [9] ALTHOFF S. (2013): Standsicherheit von Böschungen – Stützbauwerke und Bemessung. Vorlesung 16.11.13, 5. Semester Bauingenieurwesen, Berner Fachhochschule, Burgdorf, Schweiz.
- [10] ALTHOFF S. (2013): Wirtschaftliche Fundationsschichten mit Geokunststoffen, der bauingenieur, Ausgabe Oktober 2013, pp. 50-52, fachkom gmbh, Langnau, Schweiz.
- [11] ALTHOFF S., KLAPPERICH H., TAMÁSKOVICS N (2011): Beitrag zum Verbundverhalten von Geokunststoffen in bindigen Böden mit Bindemittelverbesserung. VSVI NRW Seminar, Geokunststoffe im Straßenbau, Münster.
- [12] ALTHOFF S., KLAPPERICH H., TAMÁSKOVICS N (2011): Neue Erkenntnisse beim Verbund- & Systemverhalten von Geokunststoffen in bindigen Böden mit Bindemittelverbesserung. 7. Geokunststoff-Kolloquium, Dresden
- [13] ALTHOFF S., KLAPPERICH H., TAMÁSKOVICS N (2012): Geokunststoffe - Forschungsergebnisse zur kombinierten Baugrundverbesserung, 2. Symposium - Baugrundverbesserung in der Geotechnik, TU Wien, ISBN: 978-3-9501738-1-9, pp. 387-398.
- [14] AYDOGMUS T. (2006): Beitrag zum Interaktionsverhalten von Geokunststoffen und Lockergestein. Dissertationsschrift, Veröffentlichung des Institutes für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg; Herausgeber: H. Klapperich, H. Konietzky; Heft 2006-6, pp. 1-177.
- [15] AYDOGMUS T., KLAPPERICH H. (2008): Laboratory testing of interaction performance of PVA geogrids embedded in stabilized cohesive soils. Proceedings of the 4th European Geosynthetics Conference, Paper number 169 Edinburgh, Scotland.
- [16] BATHURST R. J., ALTHOFF S., LINNENBAUM P. (2008): Influence of Test Method on Direct Shear Behaviour of Segmental Retaining Wall Units. *Geotechnical Testing Journal*, 31(2), pp. 1-9.
- [17] BATHURST R. J., NERNHEIM A., WALTERS D. L., ALLEN T. M., BURGESS P., SAUNDERS D. D (2009): Influence of reinforcement stiffness and compaction on the performance of four geosynthetic-reinforced soil walls. *Geosynthetics International* 2009, Vol.16, No.1, pp. 43-59.

- [18] BECKER A., VRETTOS C. (2012): Laboruntersuchungen zur Bodenverbesserung mittels Zugabe von Kalk-Zement-Mischungen, 2. Symposium - Baugrundverbesserung in der Geotechnik, TU Wien, ISBN: 978-3-9501738-1-9, pp. 313-319.
- [19] BELL F. G. (1998): The geotechnical properties and behaviour of a pro-glacial lake clay, and its cementitious stabilization. *Geotechnical & Geological Engineering*, ISSN: 0960-3182, Vol. 16, Issue 3, pp. 167-199.
- [20] BERGADO D. T.; CHAI J-C.; MIURA N. (1996): Prediction of pullout resistance and pullout force displacement relationship for inextensible grid reinforcements. *Soils and foundations* Vol. 36, No. 4, Japanese Geotechnical Society, pp.11-22
- [21] BRANDL H. (1967): Der Einfluss des Frostes auf kalk- und zementstabilisierte feinkörnige Böden, Dissertation, Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, Nr. 8, Technische Hochschule Wien.
- [22] BRÄU G., BAUER A. (2001): Versuche im Boden mit gering dehnbaren Geogittern. 7. Informations- und Vortragstagung über „Kunststoffe in der Geotechnik“.
- [23] BUß J. (2010): Handbuch GGU-Stability, Version 9, Böschungsbruchberechnungen und Berechnungen von Bodenvernagelungen und Bewehrte-Erde-Wänden nach DIN 4084, DIN 4084 (neu) und DIN 4084-2009, Civilserve GmbH, Steinfeld.
- [24] BUSSERT F. (2006): Verformungsverhalten geokunststoffbewehrter Erdstützkörper - Einflussgrößen zur Ermittlung der Gebrauchstauglichkeit. Dissertationsschrift, Heft 13/2006, Schriftenreihe des Instituts für Geotechnik und Markscheidewesen, TU Clausthal.
- [25] BUSSERT F. (2009): Recent research into the actual behavior of geogrids in reinforced soil. 2009 Jubilee symposium on polymer geogrid reinforcement, London.
- [26] CLANCY J. M. (2010): Analysis of pullout resistance of a novel multifunctional geosynthetic in a fine grained marginal fill. *Geotechnical Engineering 20*, View of Young European Geotechnical Engineers, ISBN: 978-80-7204-686-7, Brno, Czech Republic, pp. 254-259.
- [27] DETERT O., WEHRLI E., CEJKA A. (2008): Innovative applications of geogrids as tie-back anchors for vertical walls. *Proceedings of the 4th European Geosynthetics Conference (EuroGeo4)*, Edinburgh, UK.
- [28] DYER M. R. (1985): Observation of the stress distribution in crushed glass with applications to soil reinforcement, University of Oxford, Oxford, UK.
- [29] FARRAG K., MORVANT M. (2004): Evaluation of Interaction Properties of Geosynthetics in Cohesive Soils: Lab and Field Pull Out Tests. LTRC, Technical Summary, Report 380.
- [30] FLOSS R. (1973): Über den Zusammenhang zwischen Verdichtung und dem Verformungsmodul von Böden. *Straßen und Autobahn*, Heft 10.
- [31] FLOSS R. (2012): Handbuch ZTVE-STB, Kommentar und Leitlinien mit Kompendium Erd- und Felsbau. 4. Auflage, Kirschbaum, ISBN 978-3-7812-1707-2.
- [32] GARTUNG E., NEFF H. K. (1997): Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponiebauwerke" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT). *Bautechnik*, Heft 74, pp. 564 ff.
- [33] GRETT H.-D (1984): Das Reibungsverhalten von Geotextilien in bindigen und nicht bindigen Boden, Sonderdruck aus Heft 59 (1984) der Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, ISSN 0340-0077.
- [34] GRUBER J. (2009): Stabilisierung von Rutschhängen mit hochzugfesten Geoverbundstoffen. Beitrag zum 24. Christian Veder Kolloquium; Stabilisierung von Rutschhängen, Böschungen und Einschnitten, Graz, pp. 247-261.
- [35] GÜLER E., ALEXIEW D., BASBUG E. (2011): Dynamisches Verhalten von geogitterbewehrten Wänden aus Segmentblöcken unter Erdbebenbelastung. 12. Informations- und Vortragstagung der Fachsektion "Kunststoffe in der Geotechnik" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), München.
- [36] HAAS W. (2009): Allgemeines Praktikum Maschinenbau und Hauptfachversuch, Oberflächenbeurteilung Rauheitsmessung. Uni Stuttgart Institut für Maschinenelemente.

- [37] HAN J., LESHCHINSKY D., SHAO Y. (2002): Influence of tensile stiffness of geosynthetic reinforcements on performance of reinforced slopes. Proceedings of the 7th International conference on Geosynthetics (ICG), pp. 1523 - 1526, Nice, France.
- [38] HANGEN H. (2010): Eigenschaften von Geokunststoffen - Geokunststoffbewehrungen - Anforderungen und Eigenschaften. Huesker EBGeo Fachseminar, Berlin.
- [39] HANGEN H. (2013): Eigenschaften von Geokunststoffen, 2. Schweizer Fachtagung für Bauen mit Geokunststoffen, HTW Chur, Chur, Schweiz.
- [40] HANGEN H., Retzlaff J., Lenke P., van Duijnen P. G. (2012): Nachweis der Gebrauchstauglichkeit von geosynthetisch bewehrten Stützkonstruktion. 10. Sächsisches Bautextilien-Symposium, BAUTEX 2012, Bauen mit Geokunststoffen, 2012, Chemnitz.
- [41] HAUSMANN M. R., LEE I.K. (1976): Strength characteristics of reinforced soil. International Symposium: New Horizons in Construction Materials, Bethlehem, PA, USA, Envo Publ. Co, Inc, Lehigh Valley, Vol. 1.
- [42] HERLE I. (2014): persönlicher Schriftverkehr, 08.09.14.
- [43] HERLE I. (2014): persönliches Besprechung in Burgdorf, Schweiz (am 20.05.14).
- [44] HEROLD A. (2001): Das erste Straßenbrückenwiderlager in Deutschland als Permanentkonstruktion in der Bauweise KBE - Kunststoffbewehrte Erde. 7. Informations- und Vortragstagung über „Kunststoffe in der Geotechnik“.
- [45] HORNIG E.-D. (2013): Bodenbewehrung mit Kunststofffasern. 6. Symposium Umweltgeotechnik & 7. Freiburger Geotechnik-Kolloquium "Ressourcen & Geotechnik", TU Bergakademie Freiberg, Freiberg.
- [46] HUANG B., BATHURST R. J. (2009): Evaluation of Soil-Geogrid Pullout Models Using a Statistical Approach. Geotechnical Testing Journal, Vol. 32, No.6, available online at: www.astm.org.
- [47] ILCHMANN C., URBANSKI D., VOLLMERT L. (2009): Ausführung und messtechnische Begleitung eines 12 m hohen Lärmschutzwalls. 11. Informations- und Vortragstagung der Fachsektion "Kunststoffe in der Geotechnik" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), München.
- [48] IVG INDUSTRIEVERBAND GEOKUNSTSTOFFE E. V. (2012): Straßen-, und Wegebau mit Geogittern - Sicher, wirtschaftlich, umweltfreundlich, Broschüre des Industrieverband Geokunststoffe e. V., Obernburg.
- [49] IVG INDUSTRIEVERBAND GEOKUNSTSTOFFE E. V. (2013): Straßen- und Wegebau mit Geogittern; Zeitschrift: Straße und Autobahn 10.2013; Organ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, der Bundesvereinigung der Straßenbau- und Verkehrsingenieure und der der Österreichischen Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr.
- [50] IVG INDUSTRIEVERBAND GEOKUNSTSTOFFE E. V. (2014): Lebenszyklusanalysen von Bauweisen mit Geokunststoffen im Vergleich zu Bauweisen mit konventionellen Baustoffen, Broschüre des Industrieverband Geokunststoffe e. V., Obernburg.
- [51] IZAWA J., ITO H., SAITO T., UENO M., KUWANO J. (2009): Development of rational seismic design method for geogrid-reinforced soil wall combined with fibre-mixed soil-cement and its applications. Geosynthetics International, Vol.16, No.4, pp. 286-300.
- [52] JACOBS F., ZIEGLER M., Vollmert L. (2014): Fortschreibung der Bemessung geokunststoffbewehrter Erdkörper - Anforderungen an Prüfungen für ein differenziertes Verbundverhalten. 11. Sächsisches Bautextilien-Symposium, BAUTEX 2014, Bauen mit Geokunststoffen, Chemnitz.
- [53] JACOBS F., ZIEGLER M., Vollmert L., Ehrenberg H. (2014): Explicit Design of Geogrids with a Nonlinear Interface Model. 10th International Conference on Geosynthetics, Berlin.
- [54] JONES D. R. V. (1998): The Stability of Geosynthetics in Landfill Lining Systems ,PhD-Thesis, Veröffentlichung der Nottingham Trent University.

- [55] KLAPPERICH H., ALTHOFF S., TAMÁSKOVICS N. (2012): Geokunststoffe in der Bauwelt – "design" im konstruktiven Ingenieurbau. 10. Sächsisches Bautextilien-Symposium, BAUTEX 2012, Bauen mit Geokunststoffen, 2012, Chemnitz.
- [56] KLAPPERICH H., AYDOGMUS T. (2008): Zwischenbericht des DFG-Forschungsprojektes KL506/5-1, Verbundverhalten von Geokunststoffen in bindigen Böden, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Bonn.
- [57] KLAPPERICH H., TAMÁSKOVICS N., ALTHOFF S. (2011): Zwischenbericht des DFG-Forschungsprojektes KL506/5-2, Verbundverhalten von Geokunststoffen in bindigen Böden, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Bonn.
- [58] KOERNER, R.M. (2005): Designing with Geosynthetics, 5th Edition. Pearson Prentice Hall.
- [59] KONIETZKY H., TE KAMP L., GROEGER T., JENNER C. (2004): Use of DEM to model the interlocking effect of geogrids under static and cyclic loading. Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods - 2004: 2nd Int. PFC Symposium, Kyoto, Japan. Taylor & Francis, pp. 3-11.
- [60] KROTH H. (2014): persönliche Kommunikation über die stabilisierende Wirkung von Geokunststoffen (am 22.06.2014).
- [61] LACKNER C., SEMPRICH S. (2010): Prestressed geosynthetic reinforced soil by compaction. Proceedings of the 9th International conference on Geosynthetics (ICG), pp. 717 - 720, Brazil.
- [62] MEYER N., EMERSLEBEN A. (2007): Lastverteilung durch geokunststoffbewehrte Schüttungen auf weichem Untergrund, 5. Geokunststoff-Kolloquium der NAUE GmbH & Co. KG, Januar 2007, pp. 63-71.
- [63] MÜLLER W. (2011): Zur Bemessung der Verankerung von Bewehrungsgittern aus Kunststoff beim Schutz von Böschungen vor hangparallelem Gleiten. Bautechnik, Heft 6, 2011, Ernst & Sohn Verlag.
- [64] 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.
- [65] MÜLLER-ROCHHOLZ J. (2005): Geokunststoffe im Erd- und Straßenbau, Werner Verlag, ISBN 3-8041-4397-0.
- [66] MÜLLER-ROCHHOLZ J. (2008): Geokunststoffe im Erd- und Verkehrswegebau, 2. Auflage, Werner Verlag, ISBN 978-3-8041-4343-2.
- [67] MÜLLER-ROCHHOLZ J. (2011): persönliche Besprechung in Münster (am 19.11.2011).
- [68] NACIRI O. (2009): Appropriation of recycled material and locally won soil as fill in geogrid reinforced structures: case studies. 2nd International Seminar, Earthworks in Europe, Royal Geographical Society, London, UK.
- [69] NERNHEIM A. (2005): Interaktionsverhalten von Geokunststoffen und Erdstoffen bei statischen und zyklischen Beanspruchungen. Heft 11/2005, Schriftenreihe des Instituts für Geotechnik und Markscheidewesen, TU Clausthal.
- [70] PALMEIRA E. M. (1987): The Study of Soil-Reinforcement Interaction by Means of Large Scale Laboratory Tests, University of Oxford, Oxford, UK.
- [71] PALMEIRA E. M. (2009): Soil-geosynthetic interaction: Modelling and analysis, Geotextiles and Geomembranes, Vol. 27 (2009), pp 368-390.
- [72] PALMEIRA E. M., MILLIGAN G. W. E (1989): Scale and other factors affecting the results of pull-out tests of grids buried in sand, Geotechnique 39 (3), pp. 511-524.
- [73] PHILIPP H. (1991): Zur Meßunsicherheit im Labor ermittelter bodenphysikalischer Kennwerte, geotechnik, Nr. 14, Zeitschrift herausgegeben von der DGGT, pp. 184-189.

- [74] PRIES J. K., MESHKINGHALAM S. (2010): Prognose und Verifizierung von zeitlichen veränderlichen Spannungszuständen an der Außenhaut einer KBE Konstruktion. 31. Baugrundtagung – Forum für junge Geotechnik-Ingenieure, München, pp. 89-95
- [75] PUBLIKATION DER HOLCIM (SÜDDEUTSCHLAND) GMBH (2010): Bodenbehandlung, Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln.
- [76] RAHN W., REIK G., ISMAIL A. (2008): Möglichkeiten der Bodenverbesserung und -verfestigung beim Bau von Hochleistungsverkehrswegen. TIEFBAU, ISSN: 0944-8780, Jahrgang: 120, Nr. 5, Erich Schmidt Verlag GmbH & Co., pp. 270-277.
- [77] RENK D., KOLYMBAS D. (2011): Zur Dimensionierung von Nagelwänden. geotechnik, Heft 3, 34. Jahrgang, 2011, Organ der DGGT, pp. 169-188.
- [78] RETZLAFF J., HERING A., HEROLD A. (2011): Welche pH-Werte sind in der Praxis realistisch und haben diese Auswirkungen auf A₄? VSVI-Seminar 2009: Geokunststoffe im Straßenbau, Münster
- [79] RÜEGGER R., HUFENUS R. (2003): Bauen mit Geokunststoffen, Ein Handbuch für den Geokunststoff-Anwender, Schweizerischer Verband für Geokunststoffe (SVG), ISBN 3-9522774-01.
- [80] RUIKEN A. (2010): Untersuchungen am Verbundbaustoff „Geogitterbewehrter Boden“. 9. Sächsisches Bautextilien-Symposium, BAUTEX 2010, Bauen mit Geokunststoffen, 2010, Chemnitz.
- [81] RUIKEN A. (2013): Zum Spannungs-Dehnungsverhalten des Verbundbaustoffs „geogitterbewehrter Boden“. Dissertationsschrift, Veröffentlichung der Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.
- [82] RUIKEN A., ZIEGLER M., H. EHRENBURG, S. HÖHNY (2011): Grundlegende Untersuchungen zum Spannungs-Verformungsverhalten des Geogitterbewehrten Bodens. 12. Informations- und Vortragstagung der Fachsektion "Kunststoffe in der Geotechnik" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), München.
- [83] SARSBY R. W. (1985): The Influence of Aperture Size/Particle Size on the Efficiency of Grid Reinforcement, Proceedings of the 2nd Canadian Symposium on Geotextiles and Geomembranes, Edmonton, Canada, Geotechnical Society of Edmonton, pp. 7-12.
- [84] SCHÄFER R., HÖFER U. (2010): Kombiniertes Einsatz Clevere Verknüpfung: Bewehrte Erde plus Bodenverfestigung zur Herstellung von Steilwandböschungen. Deutsches Ingenieurblatt, Nr.: 5, 2010, pp. 26-29.
- [85] SCHLOSSER F., DELAGE P. (1987): Reinforced soil retaining structures and polymeric materials. The application of polymeric reinforcement in soil retaining structures - NATO Advanced Research Workshop of Polymeric Reinforcement in Soil Retaining Structures, Kingston, Ontario, Canada.
- [86] SCHOLZ-SOLBACH K. (2004): Thermische Effekte der tiefgründigen Bodenstabilisierung mit Branntkalk-Boden-Säulen. Dissertationsschrift, Veröffentlichung der Fakultät für Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar.
- [87] SEITE „KOHÄSION (BODENMECHANIK)“, WIKIPEDIA, DIE FREIE ENZYKLOPÄDIE: Bearbeitungsstand: 1. Dezember 2013, 12:38,. URL: [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Koh%C3%A4sion_\(Bodenmechanik\)&oldid=125023824](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Koh%C3%A4sion_(Bodenmechanik)&oldid=125023824) (Abgerufen: 23. Januar 2014, 12:38).
- [88] STAHL M. (2011): Interaktion Geogitter-Boden: Numerische Simulation und experimentelle Analyse. Dissertationsschrift, Veröffentlichung des Institutes für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg; Herausgeber: H. Klapperich; Heft 2011-5 pp. 1-166.
- [89] STOEWAHSE C. (2001): Ermittlung des Reibungsverhaltens von Geokunststoffen und Erdstoffen im Rahmenschergerät. Dissertationsschrift, Veröffentlichung des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau der Universität Hannover (Heft 56).
- [90] TAMÁSKOVICS N. (2009): Experimentelle Untersuchung des Verbundverhaltens von Geokunststoffen. 11. Informations- und Vortragstagung der Fachsektion "Kunststoffe in der Geotechnik" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), München, pp. 1-6.
- [91] 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.

- [92] TAMÁSKOVICS N., KLAPPERICH H. (2010): Verbundverhalten von Geokunststoffen in bindigem Boden. 9. Sächsisches Bautextilien-Symposium, BAUTEX 2010, Bauen mit Geokunststoffen, 2010, Chemnitz.
- [93] TANCHAISAWAT T., BERGADO D. T., VOOTTIPRUEX P. (2009): 2D and 3D simulation of geogrid-reinforced geocomposite material embankment on soft Bangkok clay. *Geosynthetics International*, Vol.16, No.6, pp. 420-432.
- [94] THIEM E., JOHN R. (2008): Mechanische Eigenschaften der Lockergesteine, Praktikumsanleitung, Institut für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg.
- [95] TOST S., KEMPFERT H.-G., BRÜNGER F. (2004): Ertüchtigung einer Bahnstrecke mittels einem optimierten, geogitterbewehrten Tragschichtsystem über teilvermörtelten Stopfsäulen (TVSS). Planung, Bauausführung, Beobachtung. Vortragsband der Baugrundtagung Leipzig, DGGT, Verlag Glückauf Essen VGE, pp. 253-260
- [96] ULBRICHT A. (2010): Prüfbericht Nr.: 11000636, Untersuchung einer Probe nach Vorgaben des Auftraggebers, EUROFINS Umwelt Ost GmbH Niederlassung Freiberg, Halsbrücke.
- [97] VAN EEKELEN S. M. J., ALEXIEW D. (2007): Die Kyoto-Straße: Ein Großversuch, Messungen und Berechnungen. 09. Informations- und Vortragstagung der Fachsektion "Kunststoffe in der Geotechnik" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), München.
- [98] VEITH G. (2002): Effiziente Kaltaufbereitung von Baustoffen für den Straßenbau. *tis. Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau*, ISSN: 0941-1038, Jahrgang: 44, Nr. 5, pp. 22-25.
- [99] VIDAL H. (1969): The Principle of Reinforced Earth. American Society of Civil Engineers, Geotechnical Special Publication, Vol. 118, pp. 1331-1346.
- [100] VOLLMERT L. (2010): persönliche Besprechung in Freiberg (am 07.01.10).
- [101] VON SOOS P, ENGEL J. (2009): Eigenschaften von Boden und Fels – ihre Ermittlung im Labor, Grundbau- Taschenbuch Teil 1, Geotechnische Grundlagen, 7. Auflage, pp. 123-218.
- [102] VON WOLFFERSDORFF P. A. (2010): Zu den Möglichkeiten der Finite-Elemente-Modellierung bei mit Geogittern bewehrten Dämmen auf Pfählen/Säulen. Huesker EBGEO Fachseminar, Berlin.
- [103] VSS-Forschungsprojekt 2000/450 (2009): Bemessungsgrundlagen für das Bewehren mit Geokunststoffen, Bericht-Nr. 1239, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich, Schweiz.
- [104] WEHRLI E. (2007): Geogitter rückverankertes Brückenwiderlager bei der Gross-Sägerei Stallinger in Domat-Ems. Schoellkopf-News, Rümlang.
- [105] WEHRLI E. (2007): Temporäre Baupisten auf schlecht tragfähigem Untergrund. VSVI NRW Seminar, Geokunststoffe im Straßenbau, Münster.
- [106] WEHRLI E. (2014): persönliches Besprechung in Rümlang, Schweiz (am 07.07.14).
- [107] WITT K. J. (2002): Zement – Kalk – Stabilisierung von Böden. Geotechnik Seminar, Weimar.
- [108] WITT K. J. (2010): Erwünschte und unerwünschte Reaktionsmechanismen bei der Bodenstabilisierung mit Bindemitteln. 5. Fachtagung Zementstabilisierter Böden, Chemnitz.
- [109] WU W. (2007): Großrahmenscherversuche zur Bestimmung des Reibungsverhaltens Geogitter gegenüber Boden, PPP Nordautobahn. Geotechnischer Bericht, Universität für Bodenkultur Wien.
- [110] ZHENG J. J., CHEN B. G., LU Y. E., ABUSHARAR S. W., YIN J. H. (2009): The performance of an embankment on soft ground reinforced with geosynthetics and pile walls. *Geosynthetics International* 2009, Vol.16, No.3, pp. 173-182.
- [111] ZIEGLER M., RUIKEN A. (2009): Materialverhalten des Verbundbaustoffs "geogitterbewehrter Boden" aus großen triaxialen Druckversuchen. *geotechnik*, Heft 3, 32. Jahrgang, 2009, Organ der DGGT.

- [112] ZIEGLER M., TIMMERS V. (2003): Herausziehversuche an gelegten Geogittern - Perspektive für einen erweiterten Bemessungsansatz. 3. Geokunststoff-Kolloquium, Adorf.
- [113] ZIEGLER M., TIMMERS V. (2004): A new approach to design geogrid reinforcement. Third European Geosynthetics Conference, München.

Anhang

A Ergebnisse der Großrahmenscherversuche

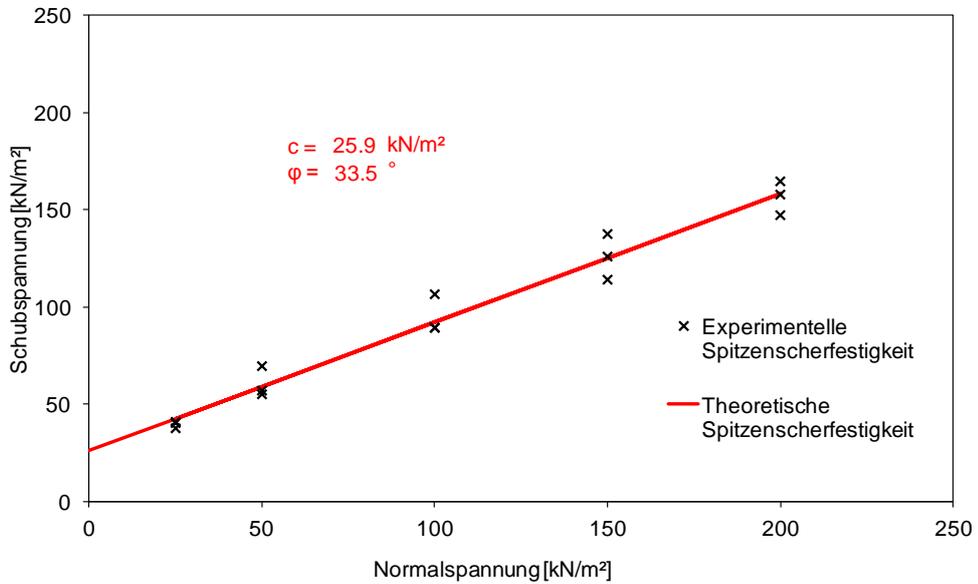


Bild A.1 τ/σ -Diagramm der Scherversuche an dem CS3
(τ/σ -Diagramm of shear tests with CS3)

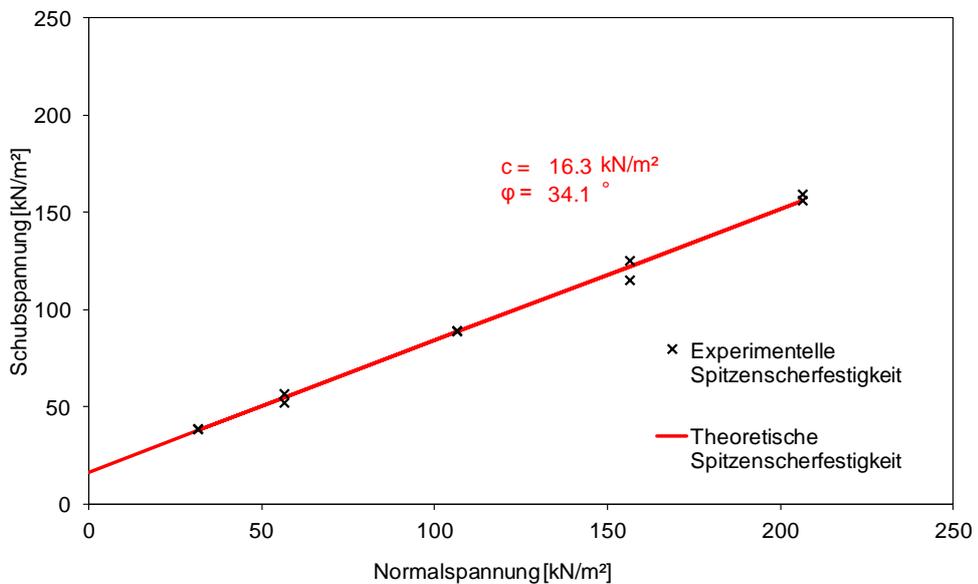


Bild A.2 τ/σ -Diagramm der Scherversuche an dem Can
(τ/σ -Diagramm of shear tests with Can)

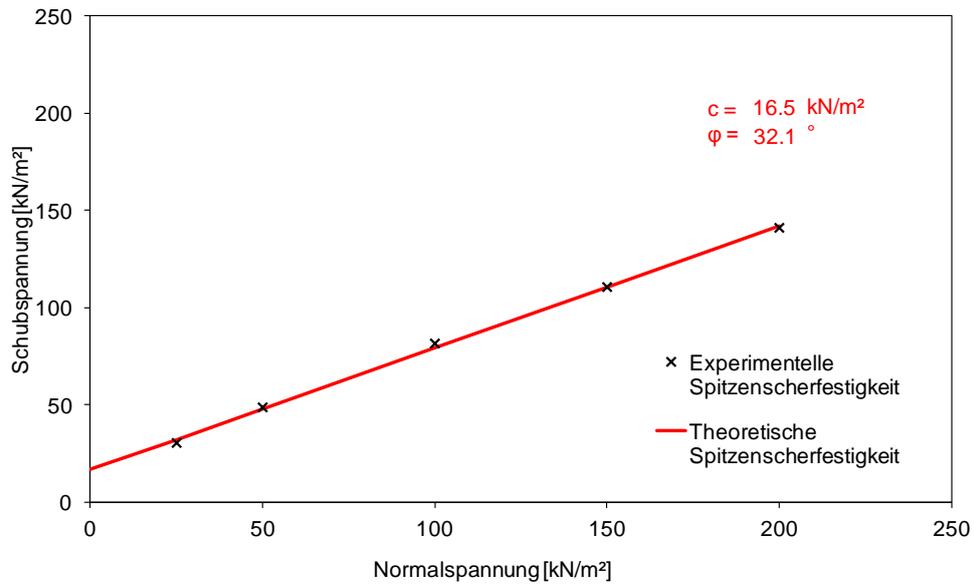


Bild A.3 τ/σ -Diagramm der Scherversuche an dem HB
(τ/σ -Diagram of shear tests with HB)

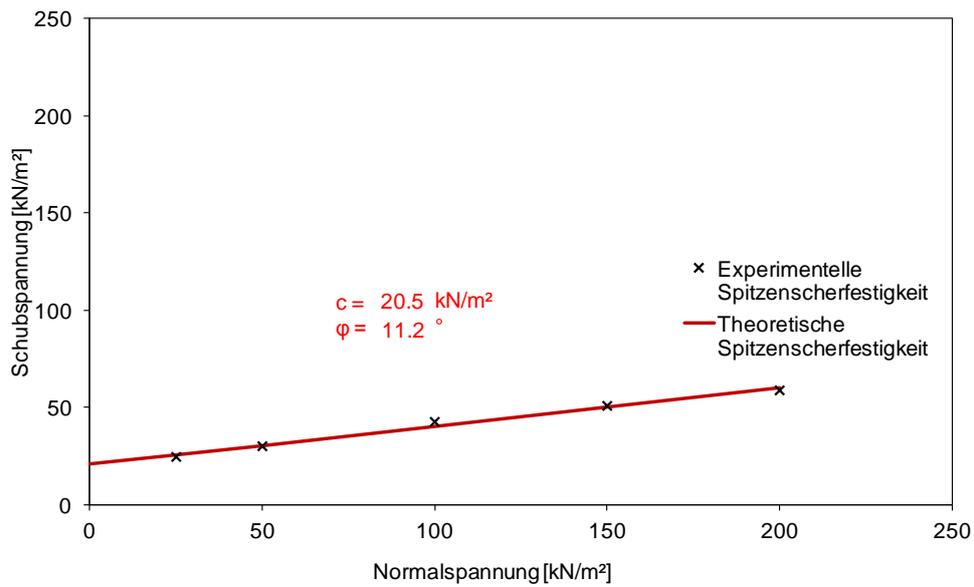


Bild A.4 τ/σ -Diagramm der Scherversuche an dem KL
(τ/σ -Diagram of shear tests with KL)

B Ergebnisse der Großrahmenreihungsversuche mit CS5

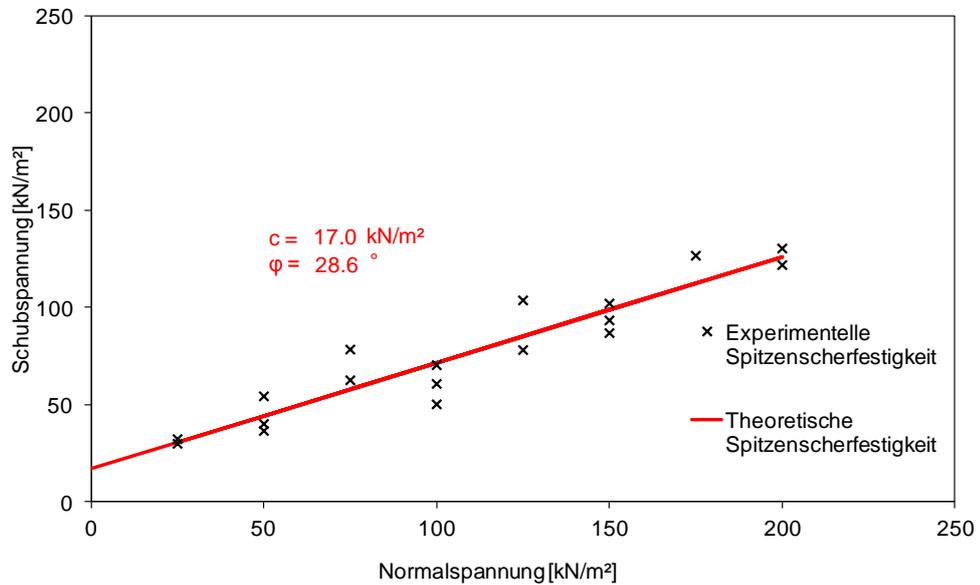


Bild B.1 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem CS5 und Material 1
(τ/σ -Diagram of friction tests with CS5 and geogrid 1)

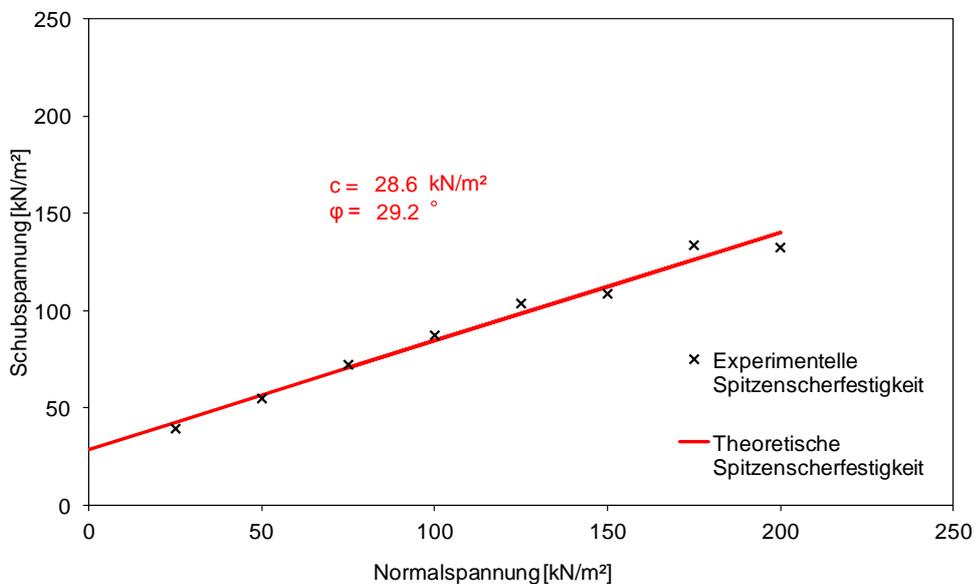


Bild B.2 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem CS5 und Material 2
(τ/σ -Diagram of friction tests with CS5 and geogrid 2)

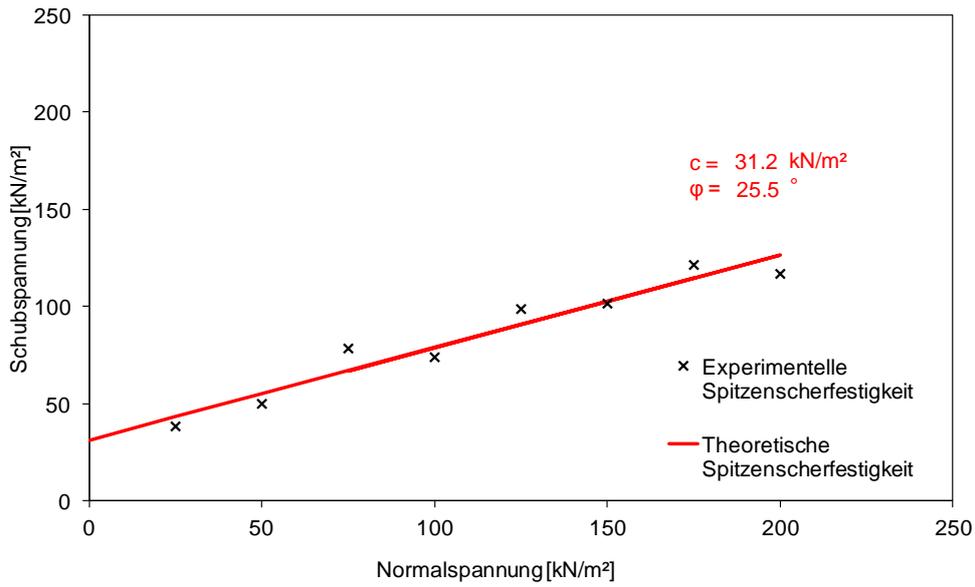


Bild B.3 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem CS5 und Material 3
 (τ/σ -Diagram of friction tests with CS5 and geogrid 3)

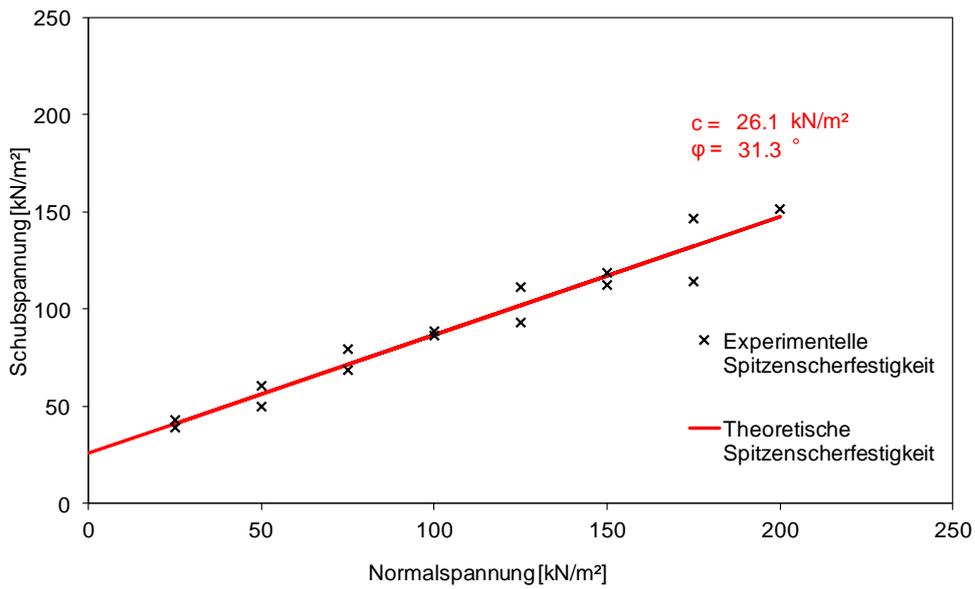


Bild B.4 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem CS5 und Material 4
 (τ/σ -Diagram of friction tests with CS5 and geogrid 4)

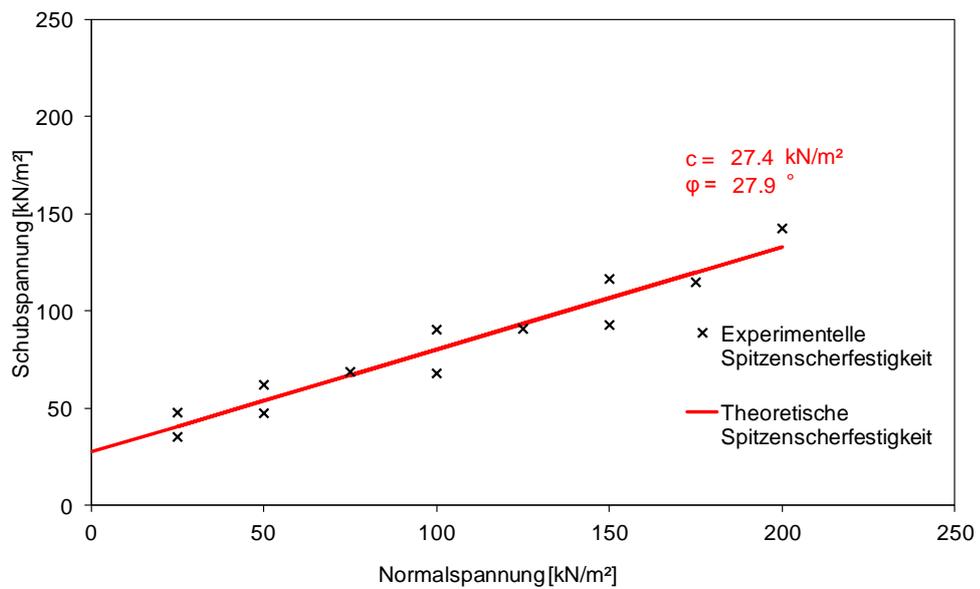


Bild B.5 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem CS5 und Material 5
(τ/σ -Diagram of friction tests with CS5 and geogrid 5)

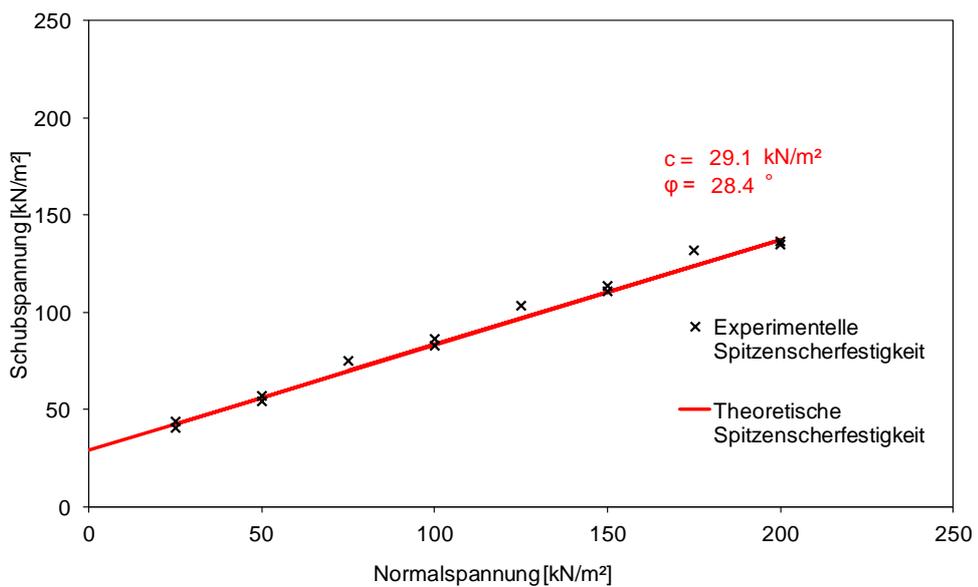


Bild B.6 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem CS5 und Material 6
(τ/σ -Diagram of friction tests with CS5 and geogrid 6)

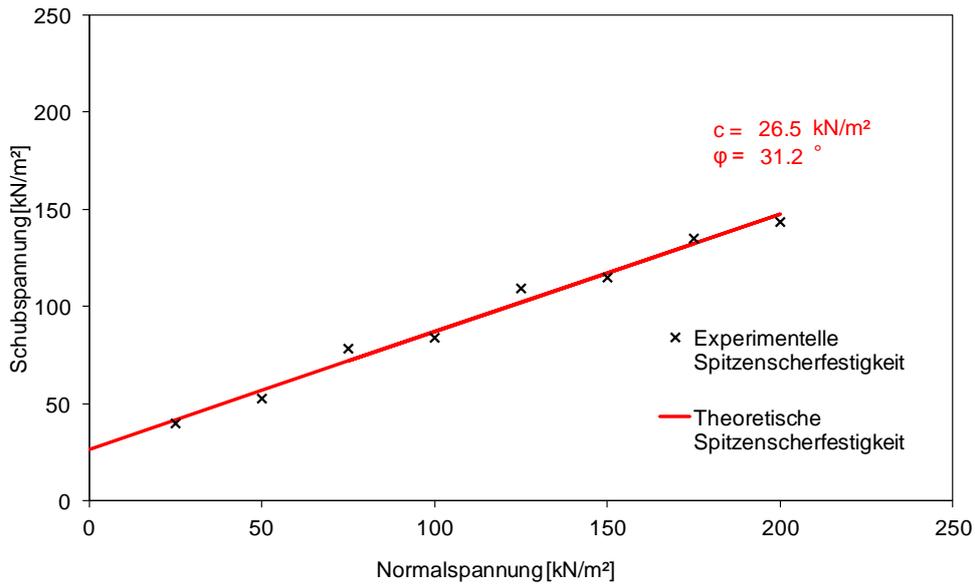


Bild B.7 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem CS5 und Material 7
 (τ/σ -Diagram of friction tests with CS5 and geogrid 7)

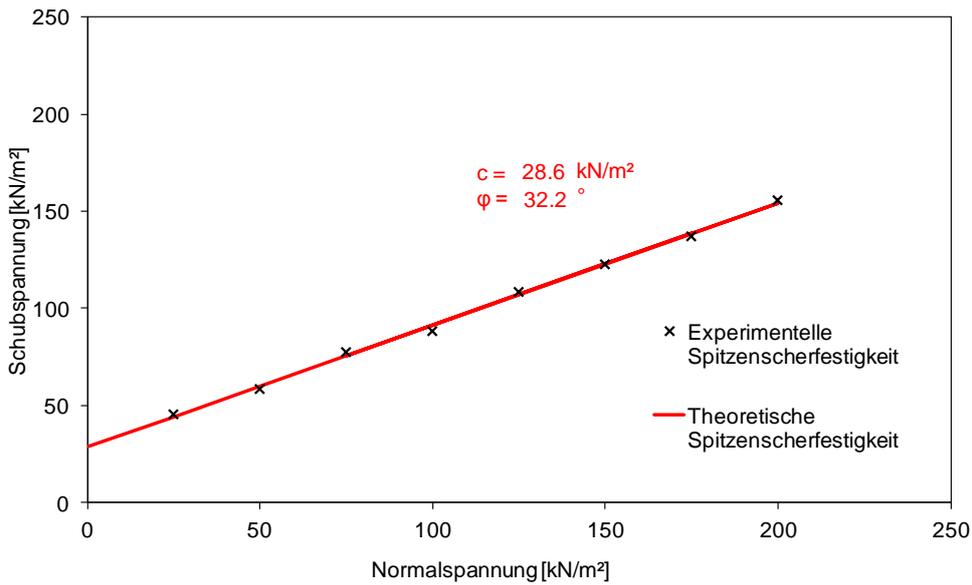


Bild B.8 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem CS5 und Material 8
 (τ/σ -Diagram of friction tests with CS5 and geogrid 8)

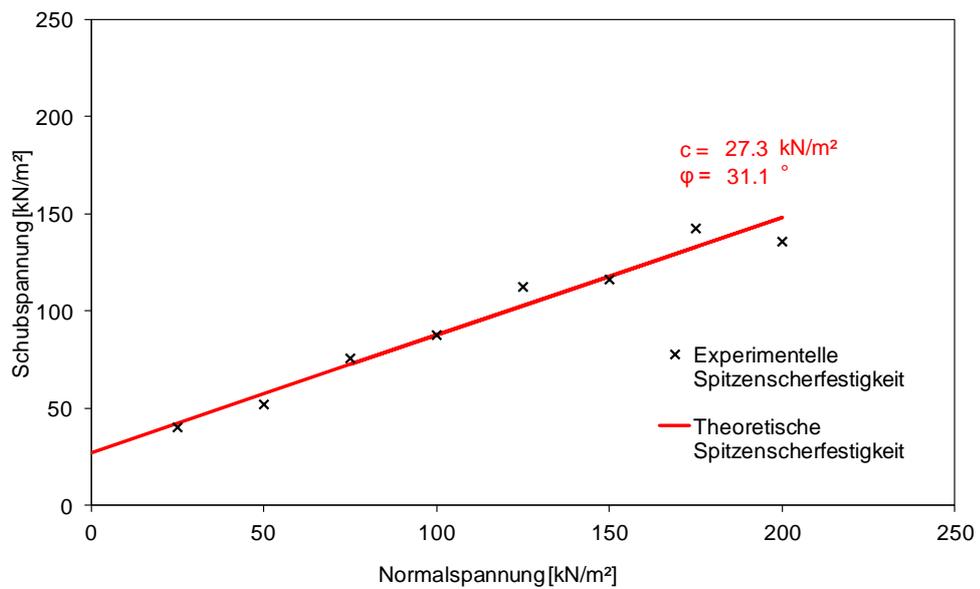


Bild B.9 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem CS5 und Material 9
(τ/σ -Diagram of friction tests with CS5 and geogrid 9)

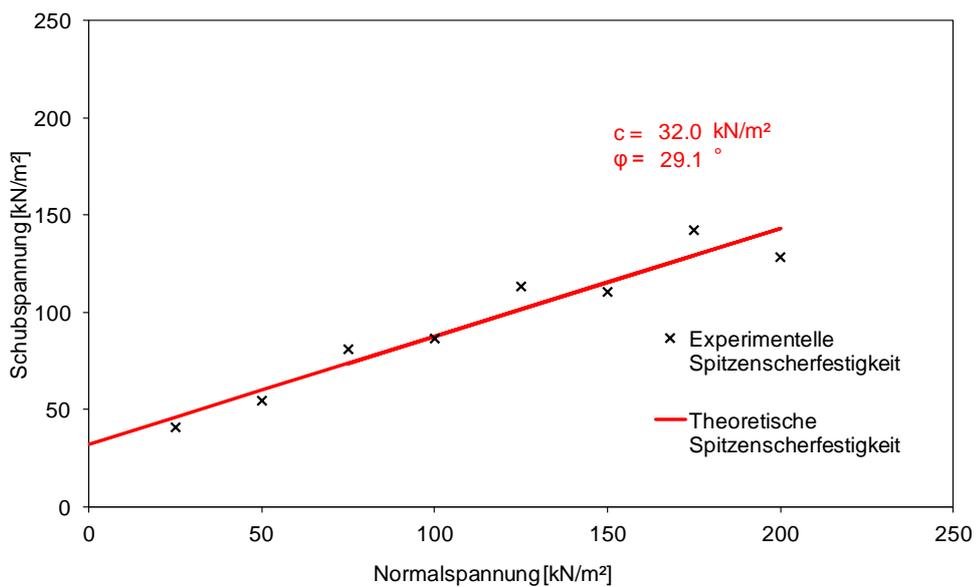


Bild B.10 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem CS5 und Material 10
(τ/σ -Diagram of friction tests with CS5 and geogrid 10)

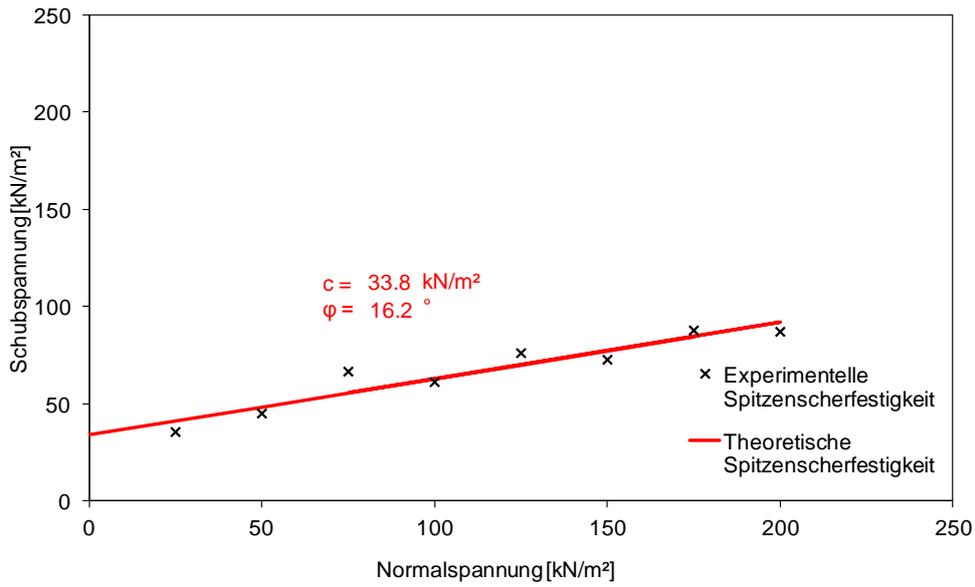


Bild B.11 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem CS5 und Material 11
 (τ/σ -Diagram of friction tests with CS5 and geogrid 11)

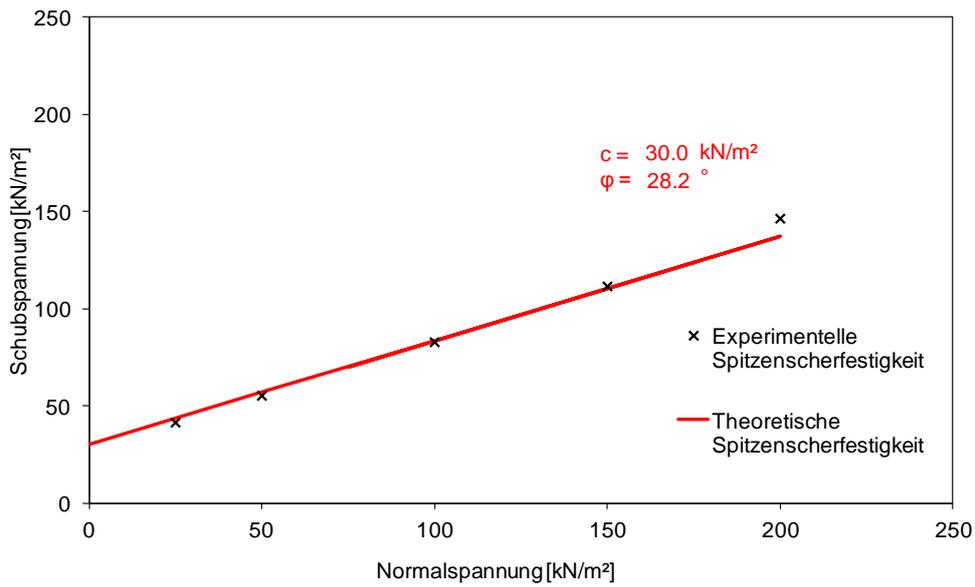


Bild B.12 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem CS5 und Material 12
 (τ/σ -Diagram of friction tests with CS5 and geogrid 12)

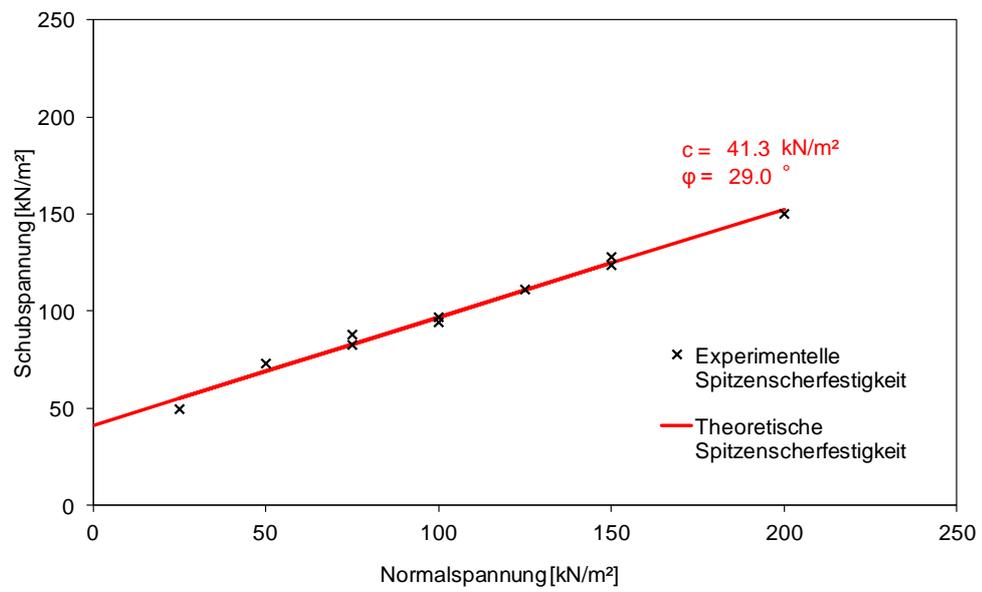


Bild B.13 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem CS5 und Material 13
(τ/σ -Diagram of friction tests with CS5 and geogrid 13)

C Ergebnisse der Großrahmenreihungsversuche mit KL

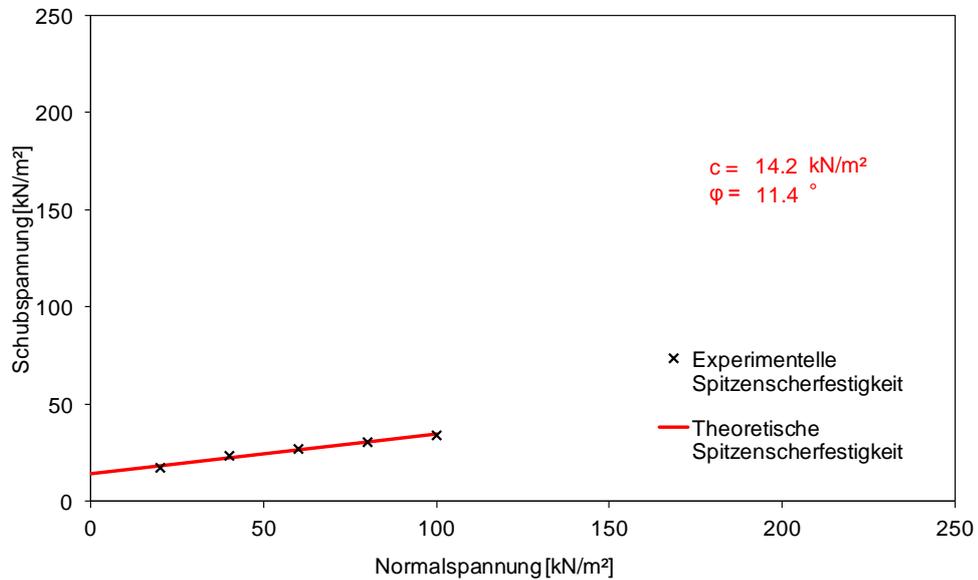


Bild C.1 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem KL und Material 1
(τ/σ -Diagram of friction tests with KL and geogrid 1)

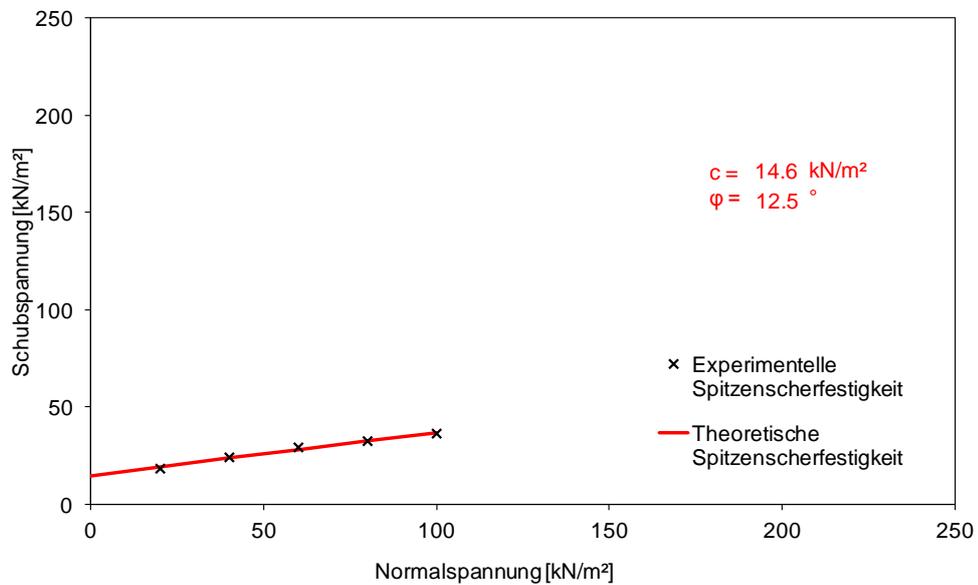


Bild C.2 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem KL und Material 2
(τ/σ -Diagram of friction tests with KL and geogrid 2)

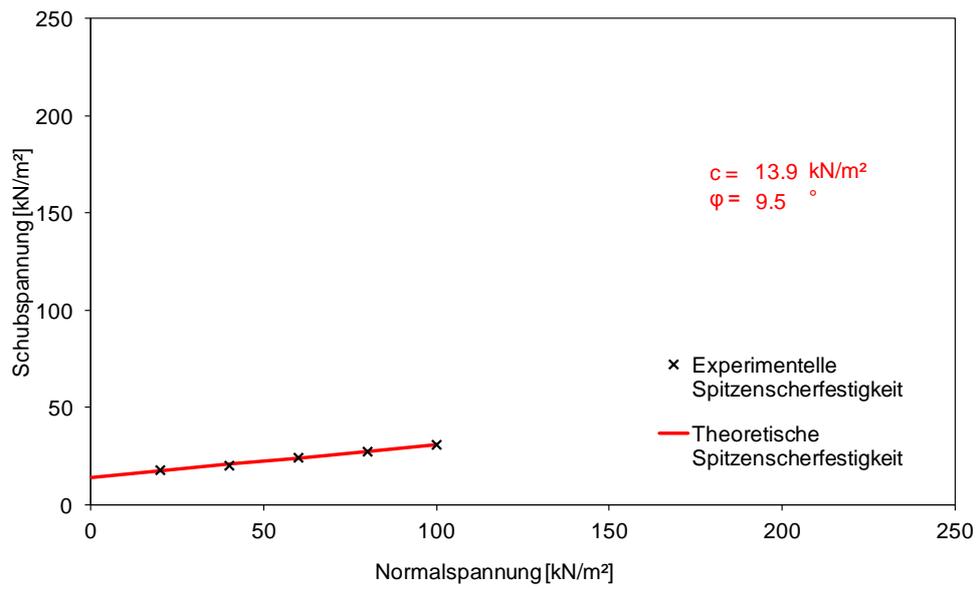


Bild C.3 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem KL und Material 3
 (τ/σ -Diagram of friction tests with KL and geogrid 3)

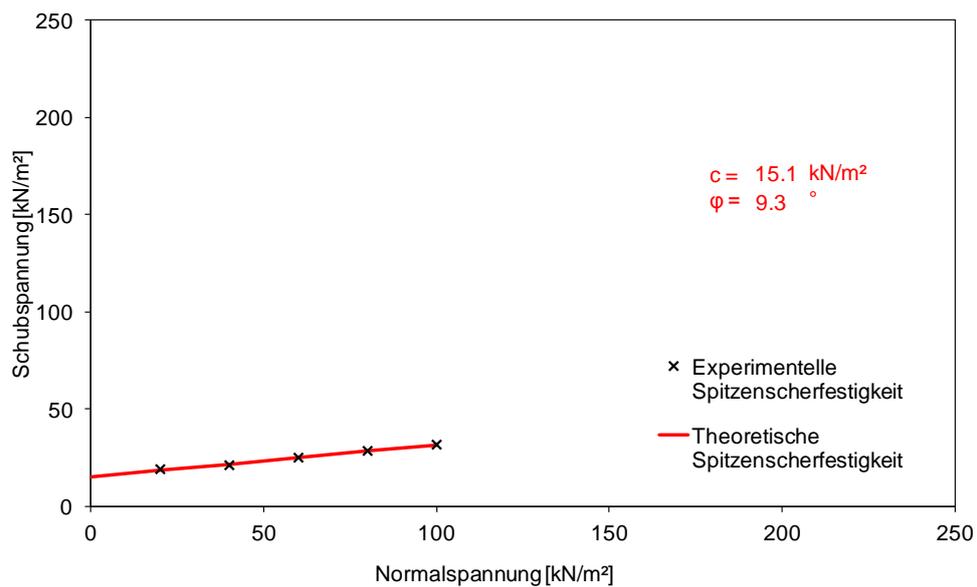


Bild C.4 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem KL und Material 4
 (τ/σ -Diagram of friction tests with KL and geogrid 4)

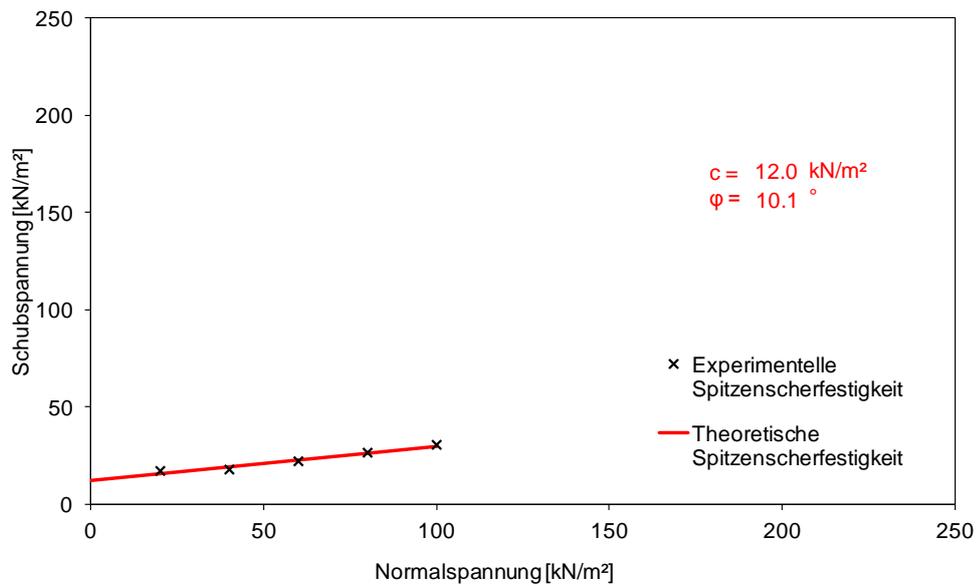


Bild C.5 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem KL und Material 5
(τ/σ -Diagram of friction tests with KL and geogrid 5)

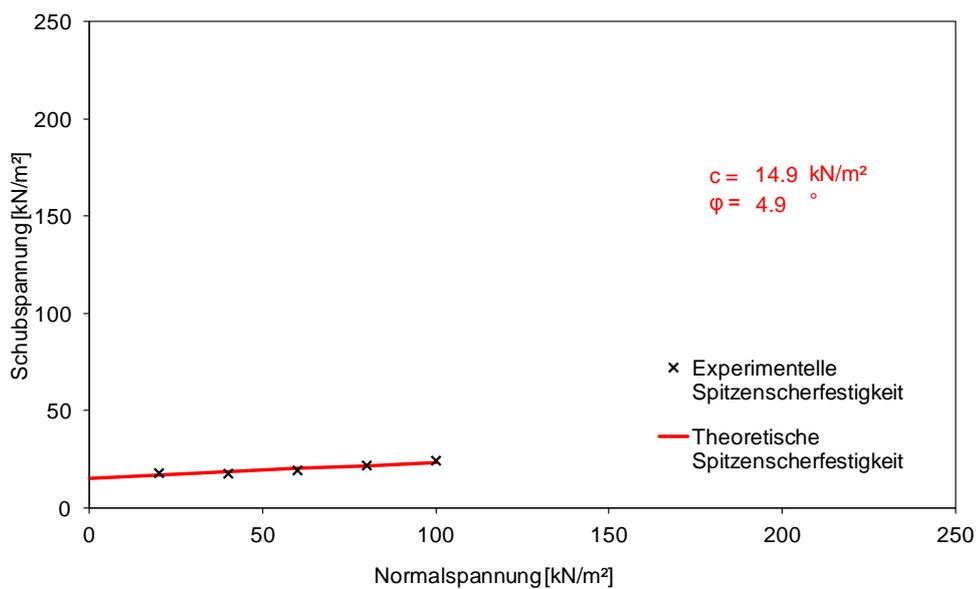


Bild C.6 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem KL und Material 6
(τ/σ -Diagram of friction tests with KL and geogrid 6)

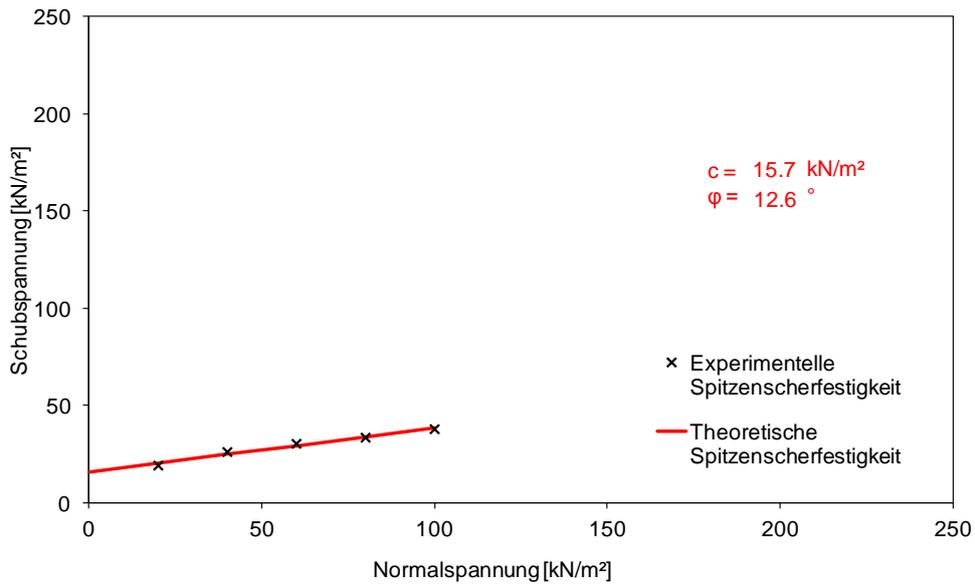


Bild C.7 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem KL und Material 7
 (τ/σ -Diagram of friction tests with KL and geogrid 7)

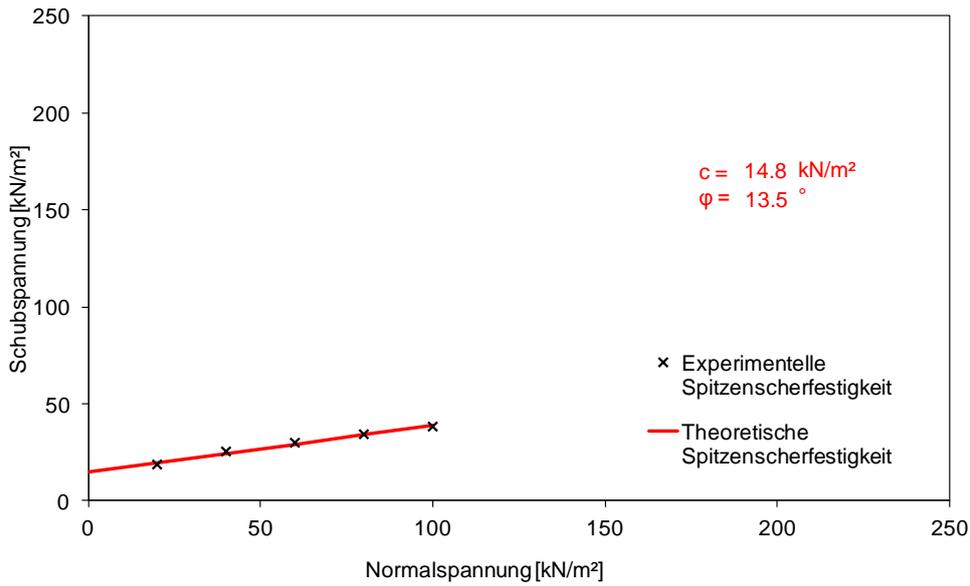


Bild C.8 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem KL und Material 8
 (τ/σ -Diagram of friction tests with KL and geogrid 8)

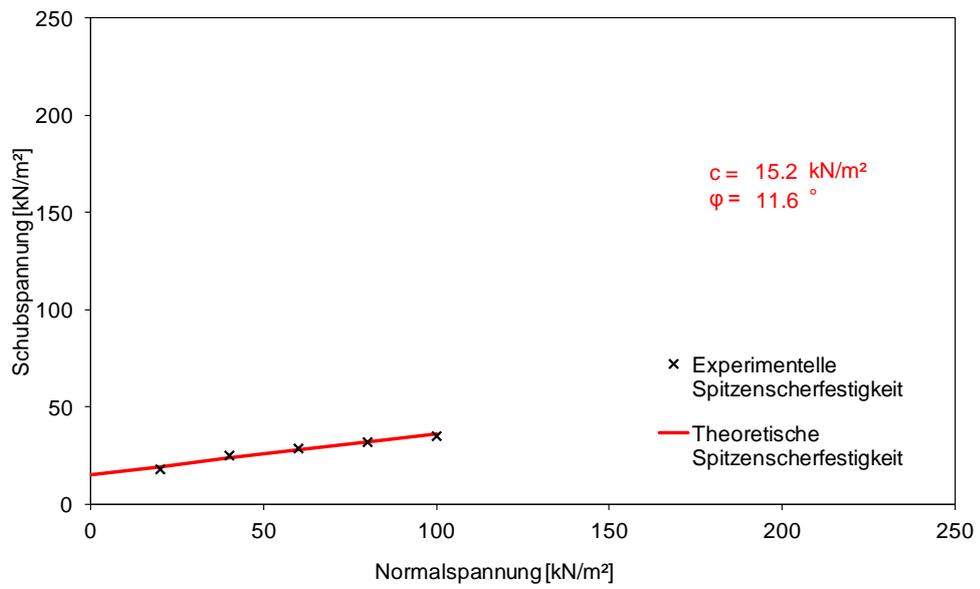


Bild C.9 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem KL und Material 9
(τ/σ -Diagram of friction tests with KL and geogrid 9)

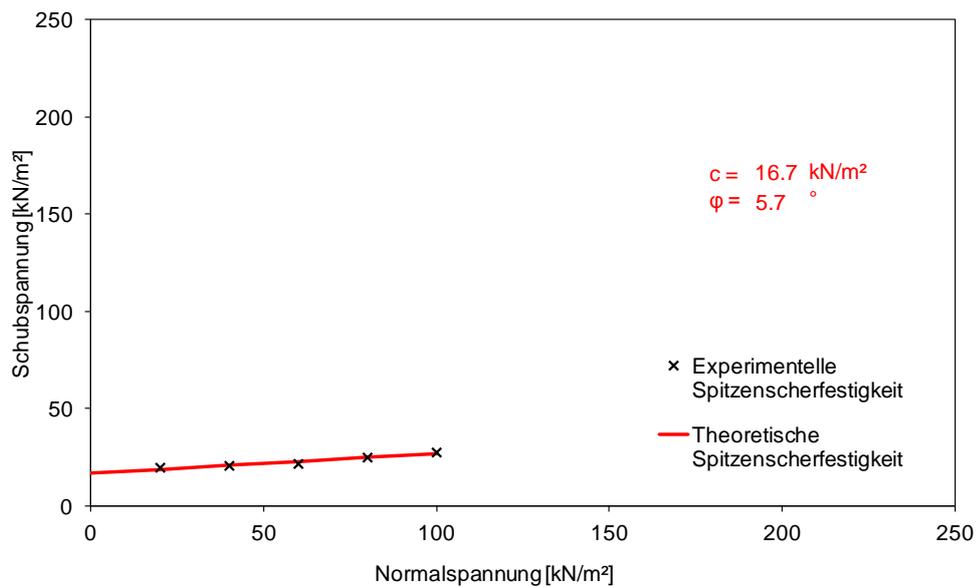


Bild C.10 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem KL und Material 10
(τ/σ -Diagram of friction tests with KL and geogrid 10)

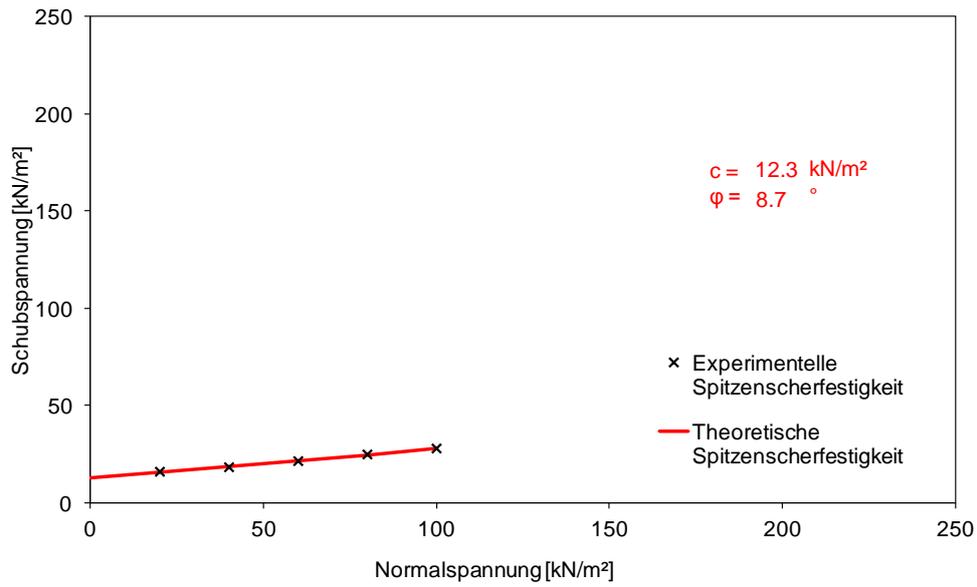


Bild C.11 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem KL und Material 11
(τ/σ -Diagram of friction tests with KL and geogrid 11)

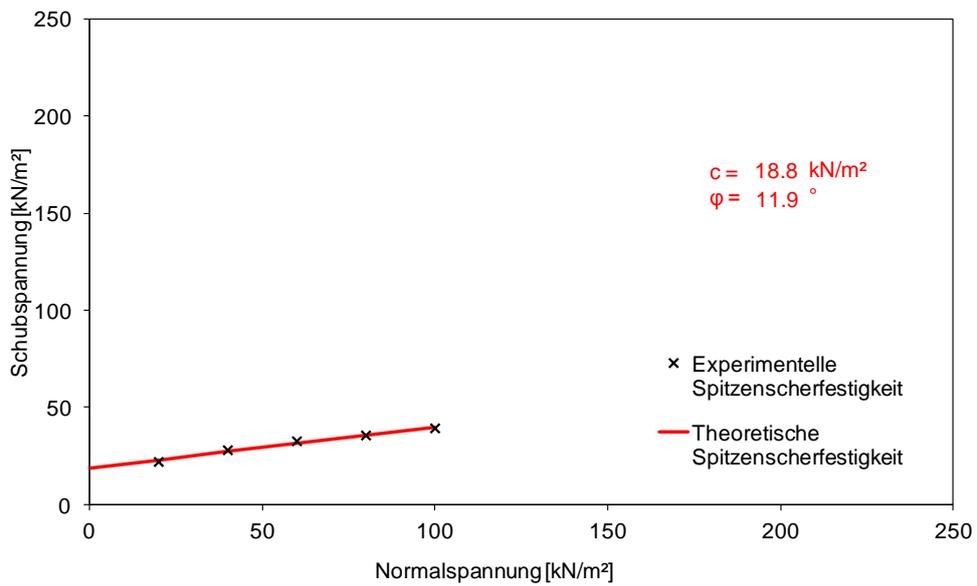


Bild C.12 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem KL und Material 12
(τ/σ -Diagram of friction tests with KL and geogrid 12)

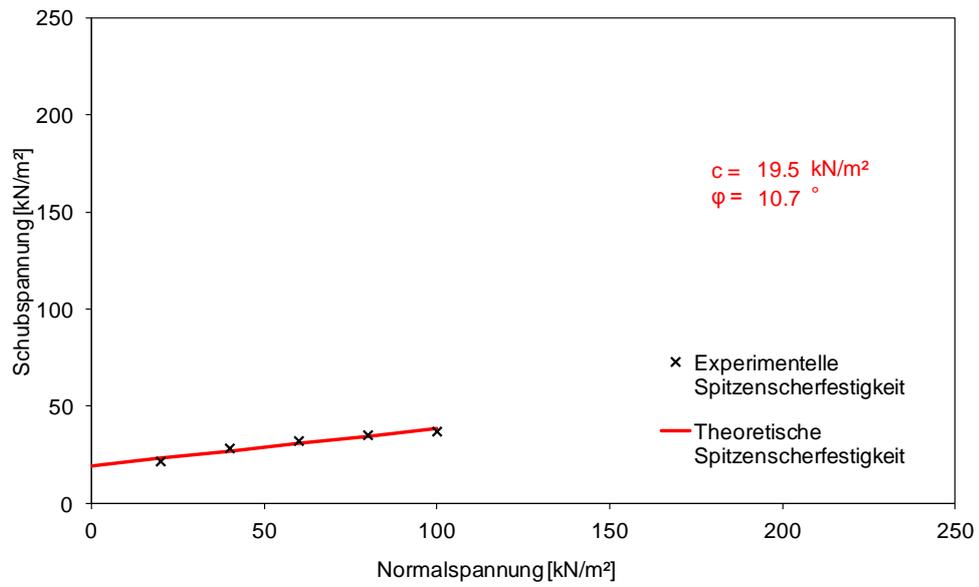


Bild C.13 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem KL und Material 13
(τ/σ -Diagram of friction tests with KL and geogrid 13)

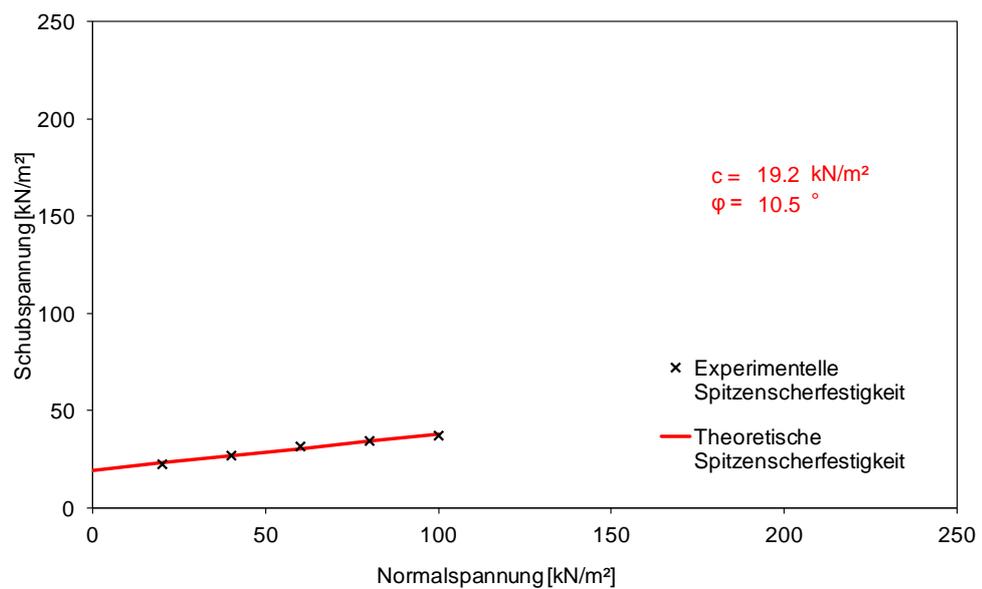


Bild C.14 τ/σ -Diagramm der Reibungsversuche mit dem KL und Material 14
(τ/σ -Diagram of friction tests with KL and geogrid 14)

D Ergebnisse der Großrahmenherausziehversuche mit CS5

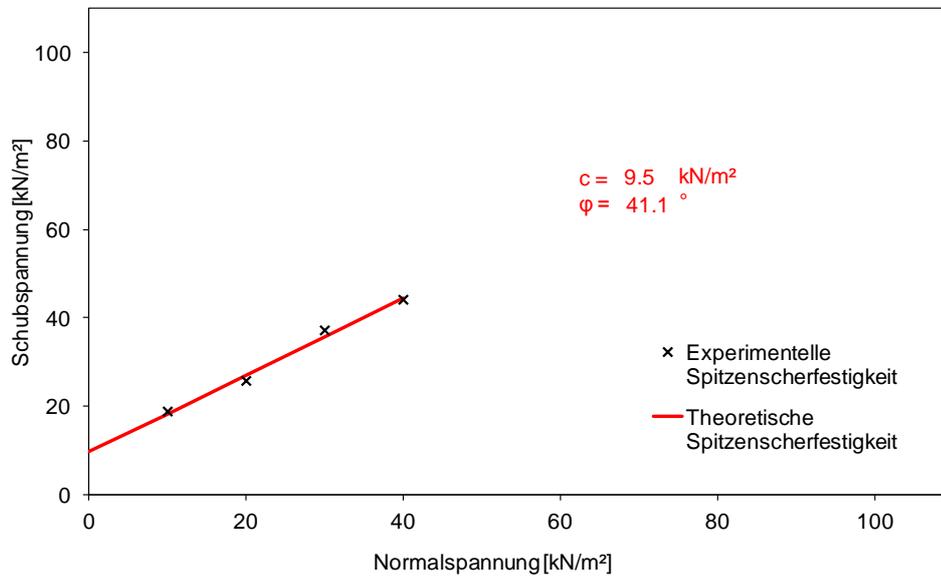


Bild D.1 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem CS5 und Material 1
(τ/σ -Diagramm of pull-out tests with CS5 and geogrid 1)

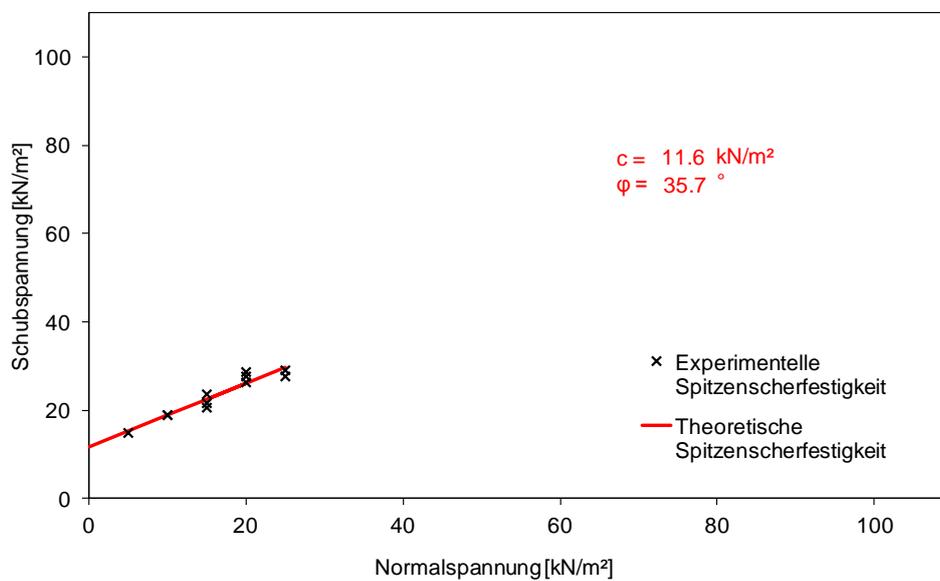


Bild D.2 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem CS5 und Material 2
(τ/σ -Diagramm of pull-out tests with CS5 and geogrid 2)

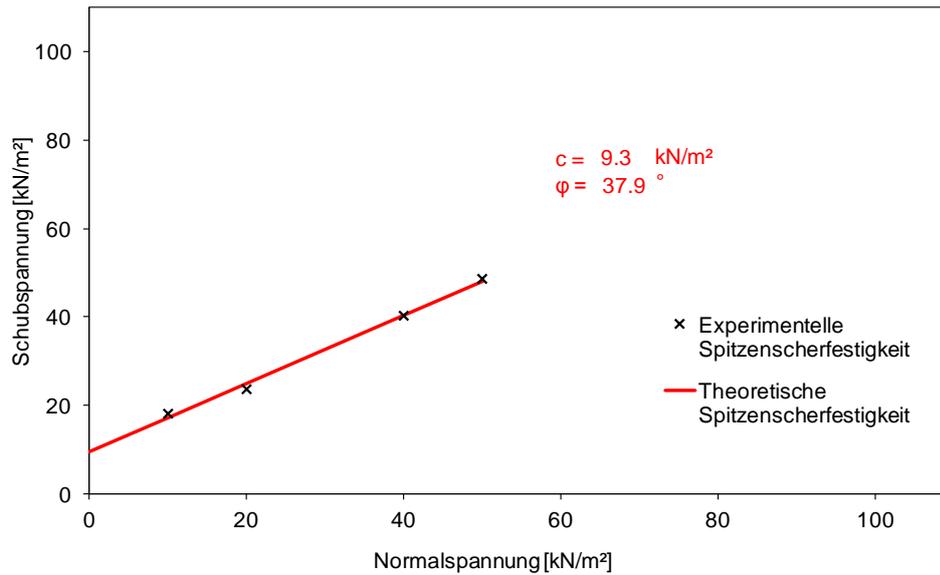


Bild D.3 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem CS5 und Material 3
 (τ/σ -Diagram of pull-out tests with CS5 and geogrid 3)

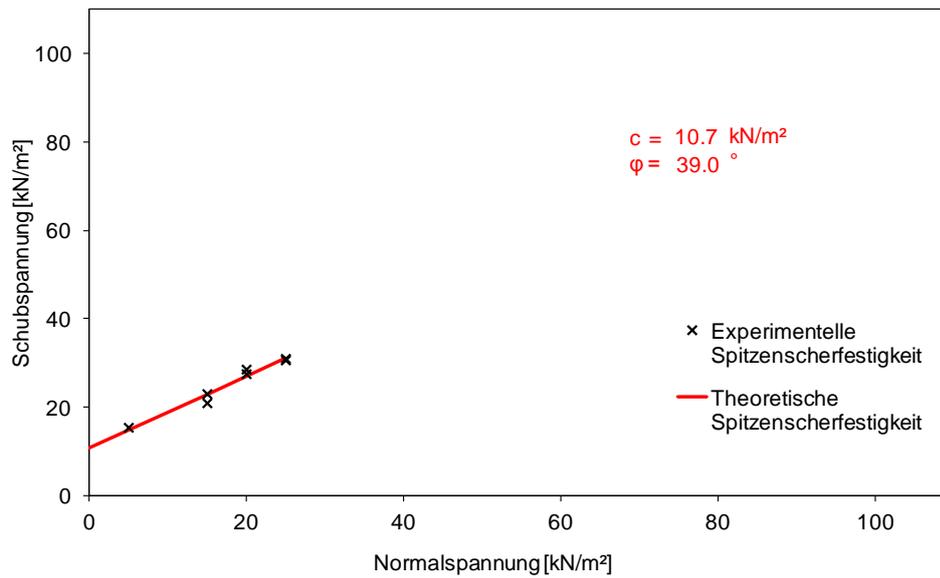


Bild D.4 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem CS5 und Material 4
 (τ/σ -Diagram of pull-out tests with CS5 and geogrid 4)

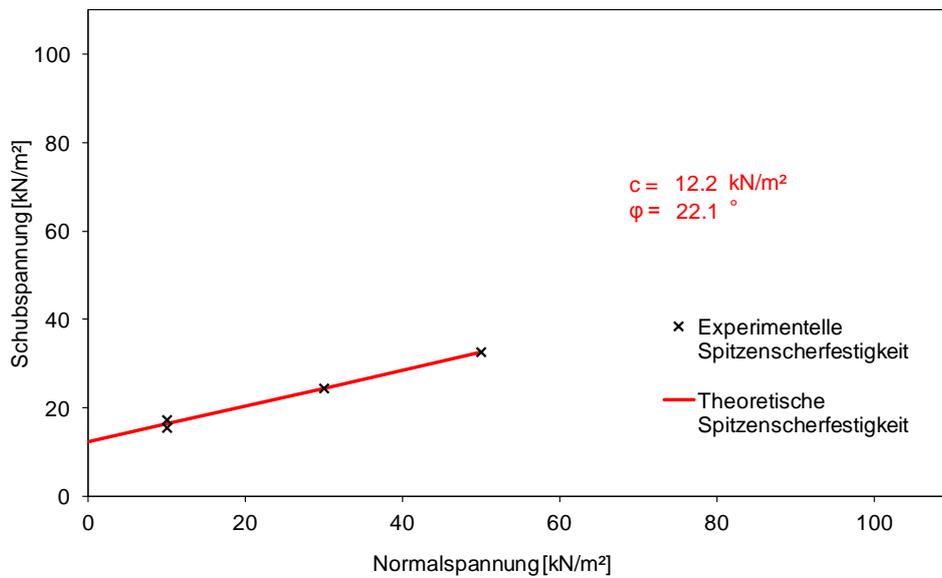


Bild D.5 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem CS5 und Material 5
(τ/σ -Diagram of pull-out tests with CS5 and geogrid 5)

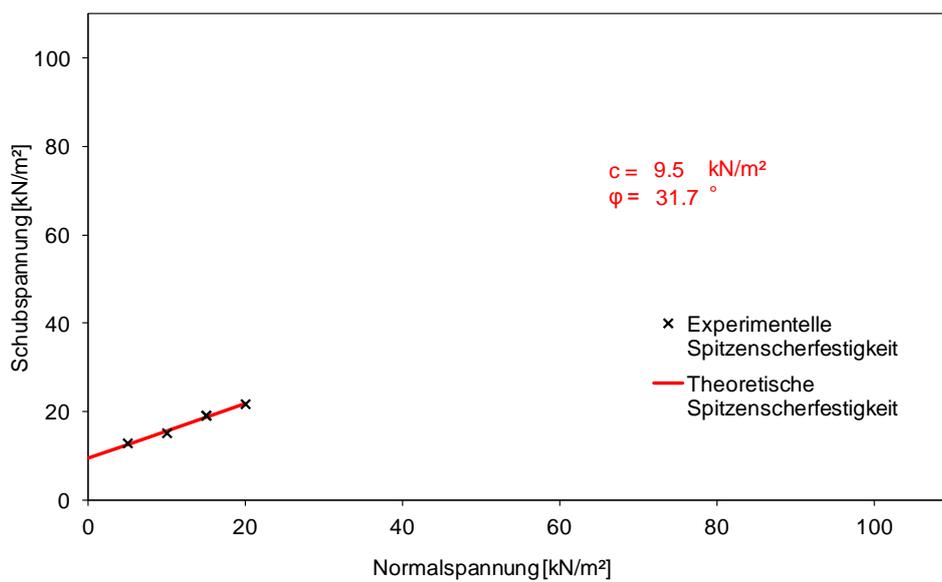


Bild D.6 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem CS5 und Material 6
(τ/σ -Diagram of pull-out tests with CS5 and geogrid 6)

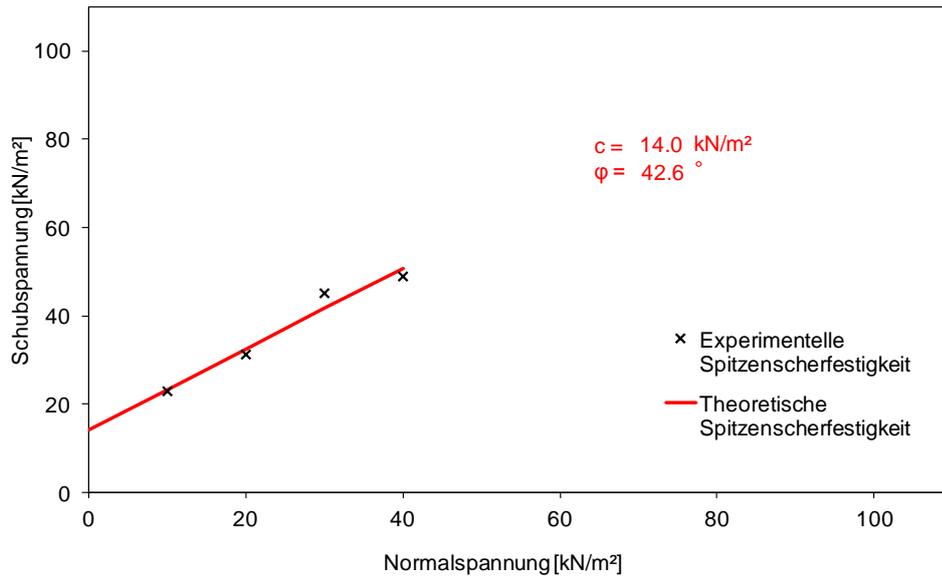


Bild D.7 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem CS5 und Material 7 (τ/σ -Diagram of pull-out tests with CS5 and geogrid 7)

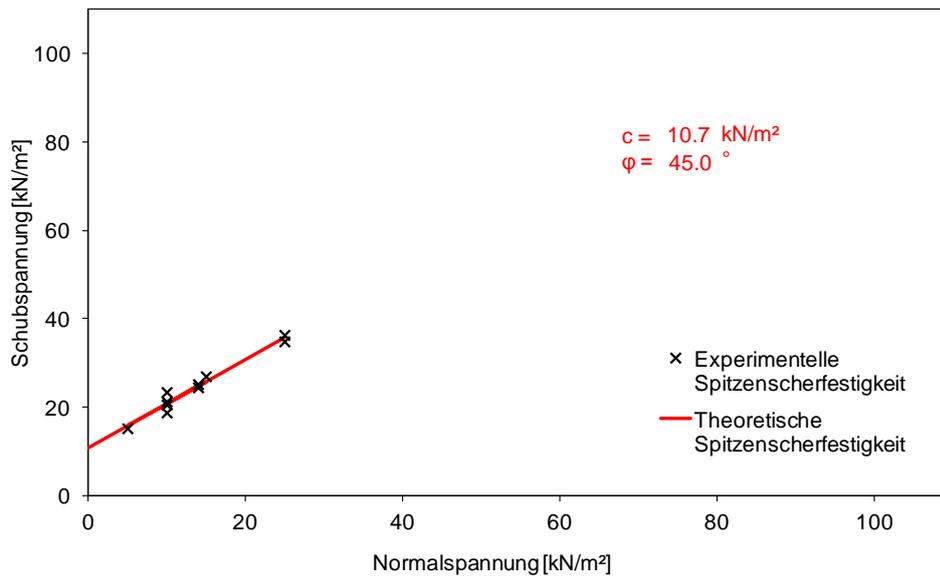


Bild D.8 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem CS5 und Material 8 (τ/σ -Diagram of pull-out tests with CS5 and geogrid 8)

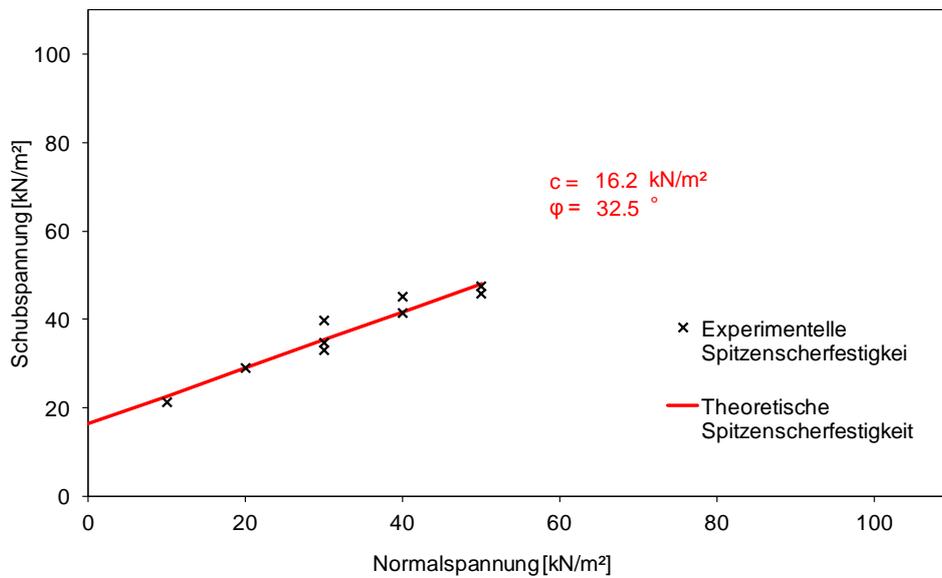


Bild D.9 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem CS5 und Material 9
(τ/σ -Diagram of pull-out tests with CS5 and geogrid 9)

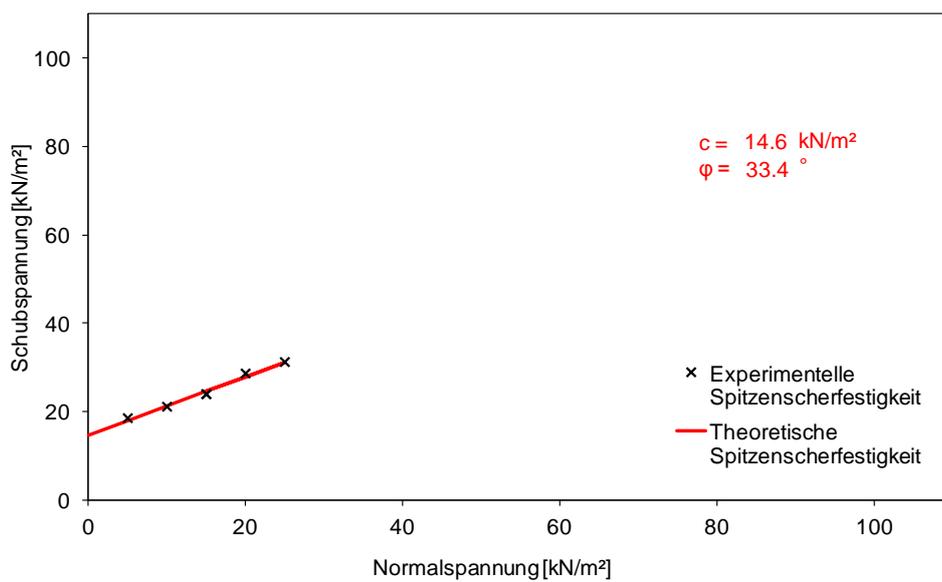


Bild D.10 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem CS5 und Material 10
(τ/σ -Diagram of pull-out tests with CS5 and geogrid 10)

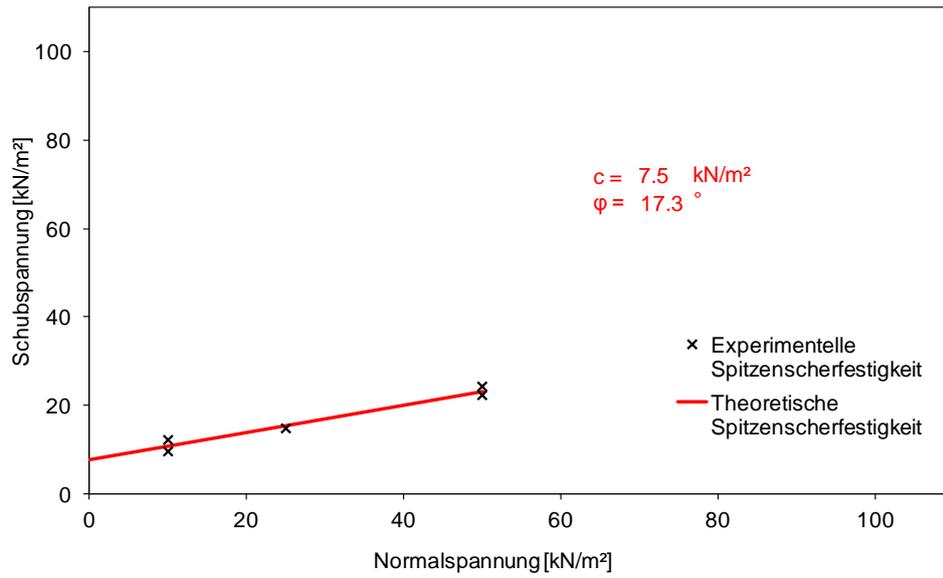


Bild D.11 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem CS5 und Material 11
 (τ/σ -Diagram of pull-out tests with CS5 and geogrid 11)

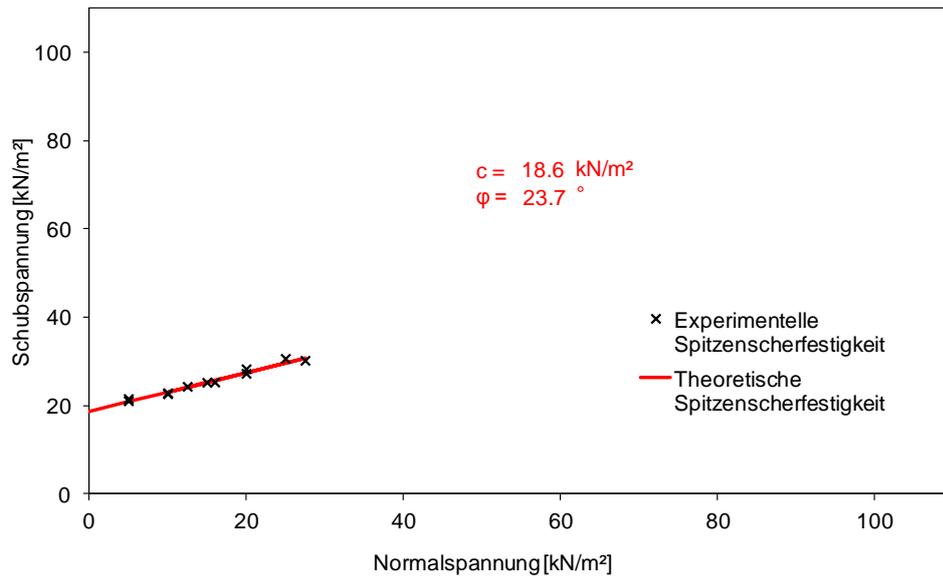


Bild D.12 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem CS5 und Material 12
 (τ/σ -Diagram of pull-out tests with CS5 and geogrid 12)

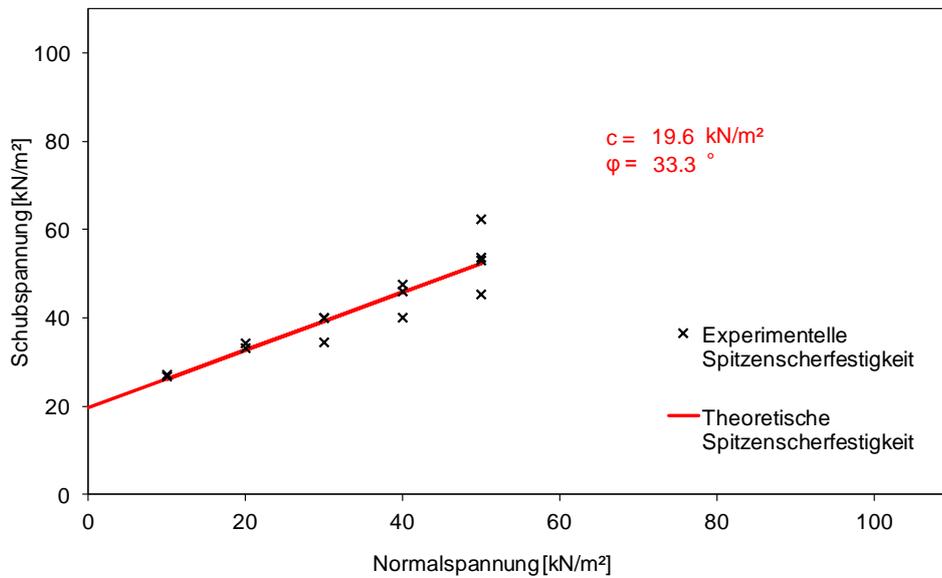


Bild D.13 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem CS5 und Material 13
(τ/σ -Diagram of pull-out tests with CS5 and geogrid 13)

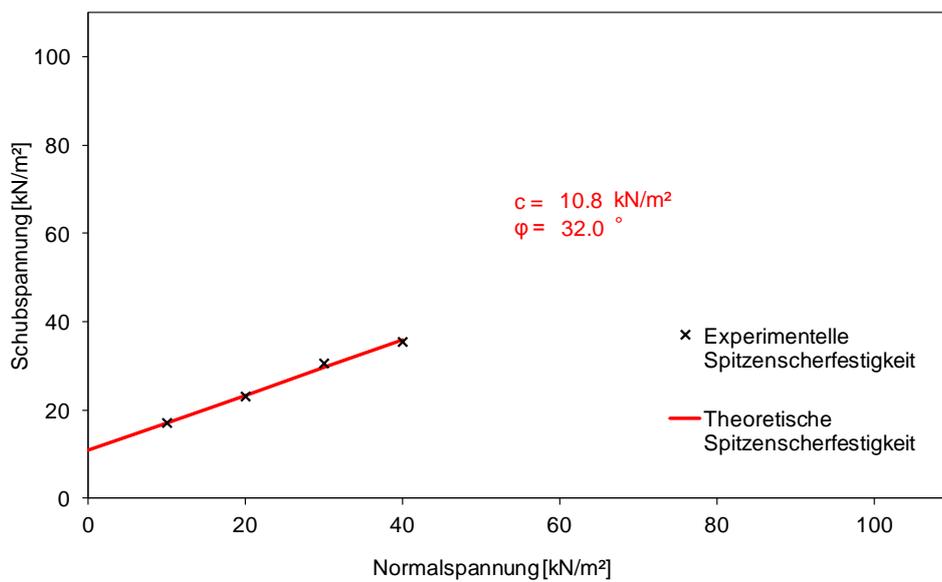


Bild D.14 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem CS5 und Material 14
(τ/σ -Diagram of pull-out tests with CS5 and geogrid 14)

E Ergebnisse der Großrahmenherausziehversuche mit KL

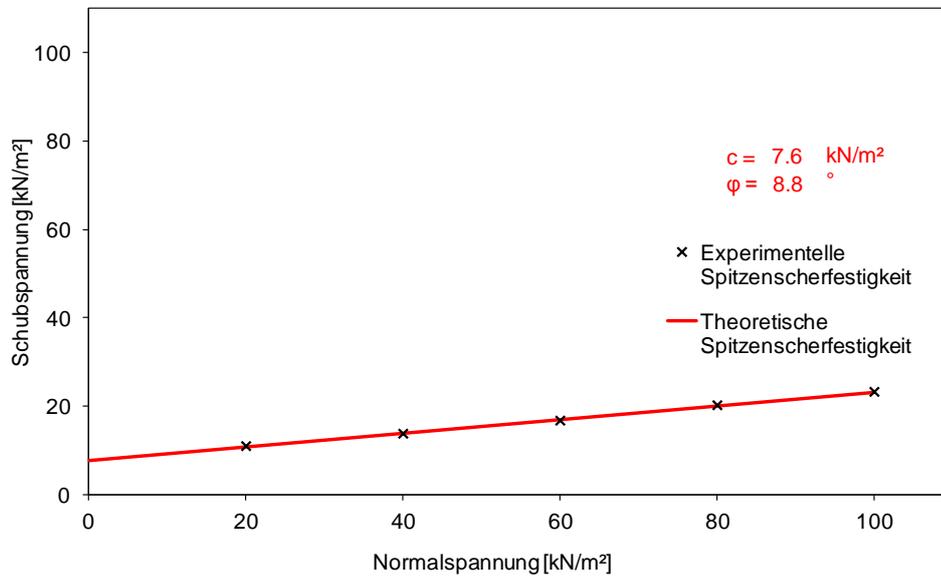


Bild E.1 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem KL und Material 1
(τ/σ -Diagramm of pull-out tests with KL and geogrid 1)

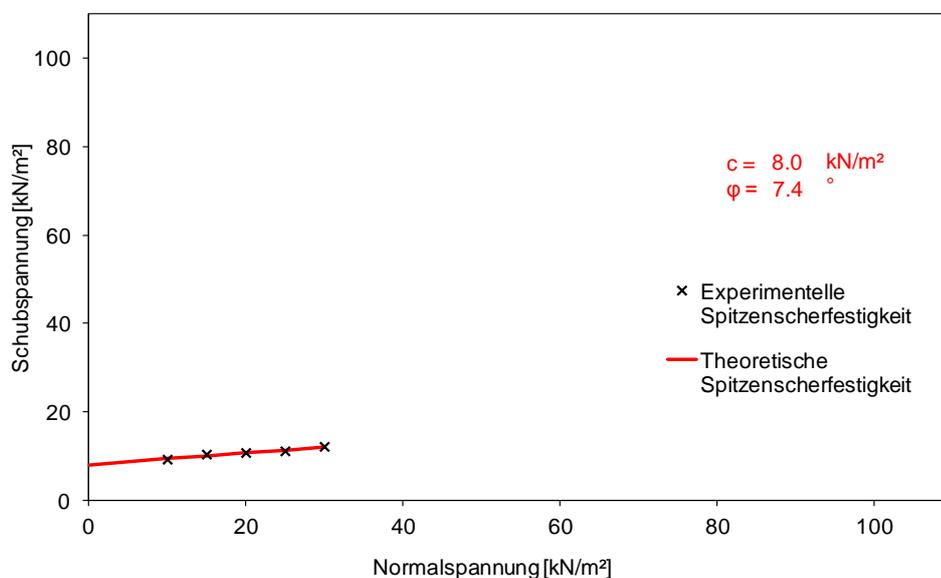


Bild E.2 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem KL und Material 2
(τ/σ -Diagramm of pull-out tests with KL and geogrid 2)

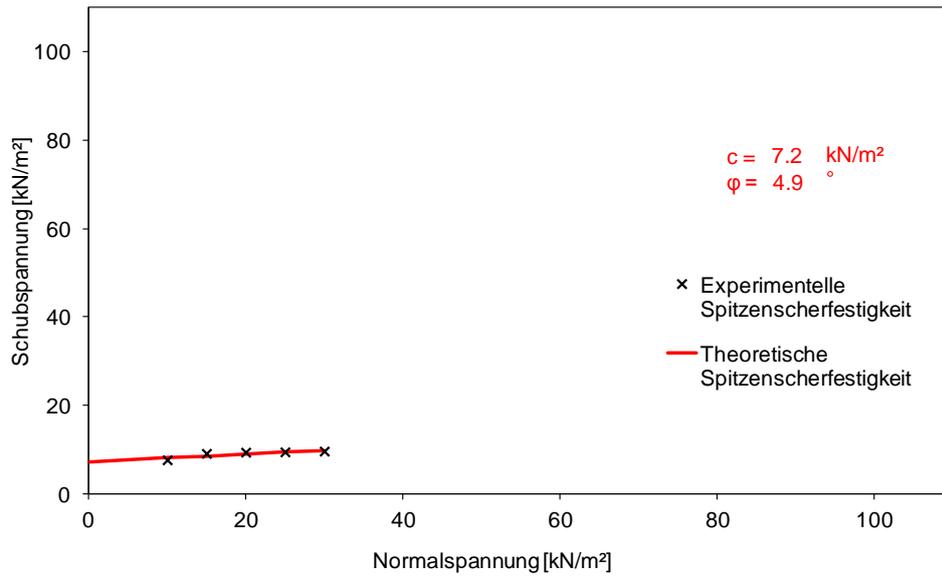


Bild E.3 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem KL und Material 3
(τ/σ -Diagram of pull-out tests with KL and geogrid 3)

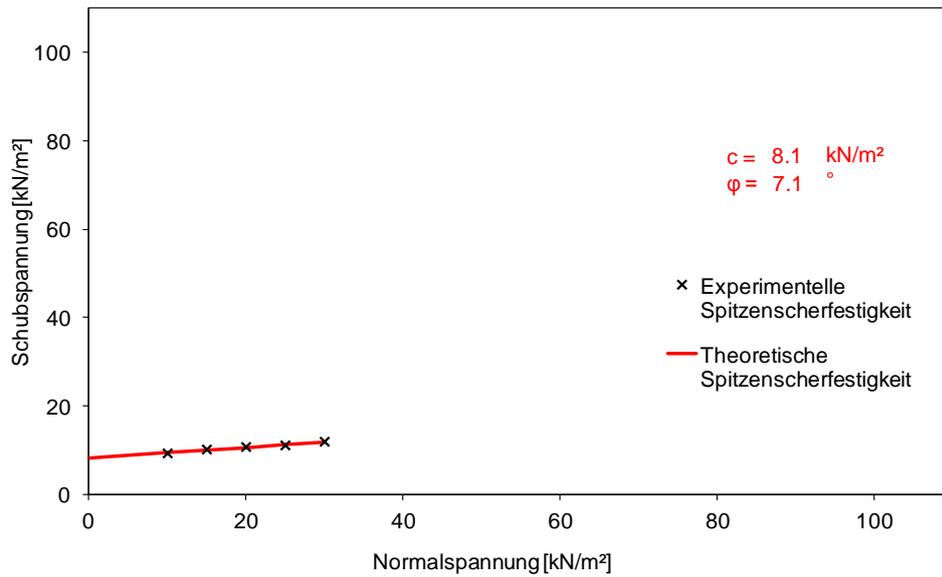


Bild E.4 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem KL und Material 4
(τ/σ -Diagram of pull-out tests with KL and geogrid 4)

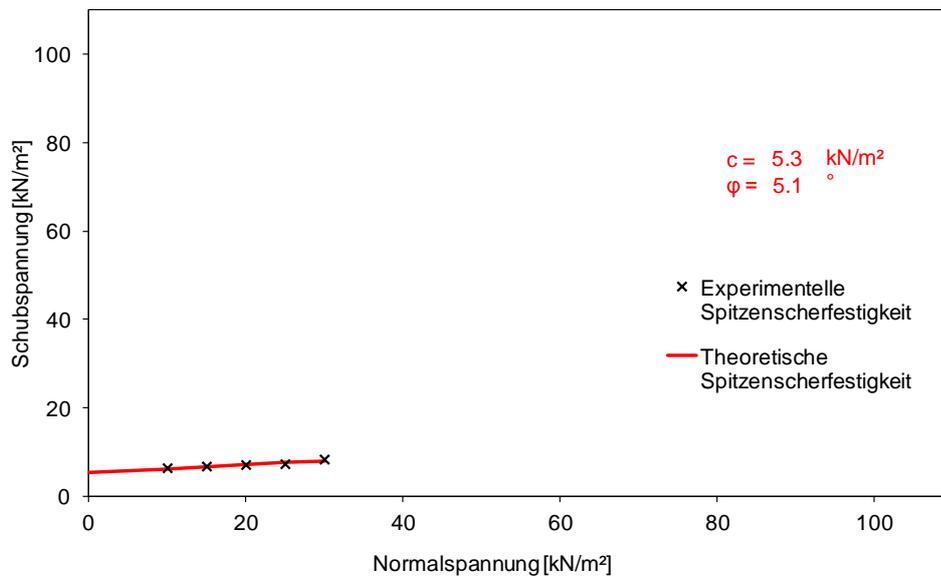


Bild E.5 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem KL und Material 5
(τ/σ -Diagram of pull-out tests with KL and geogrid 5)

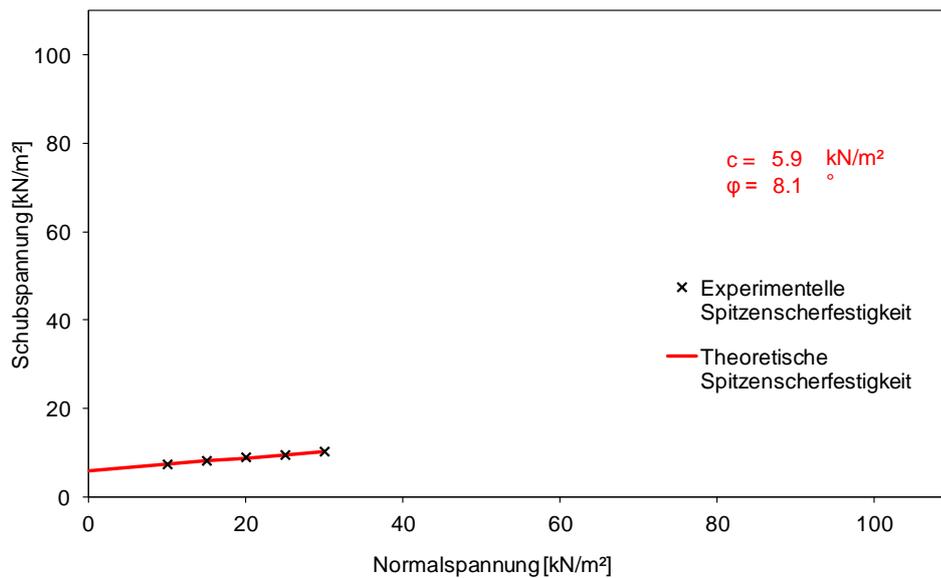


Bild E.6 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem KL und Material 6
(τ/σ -Diagram of pull-out tests with KL and geogrid 6)

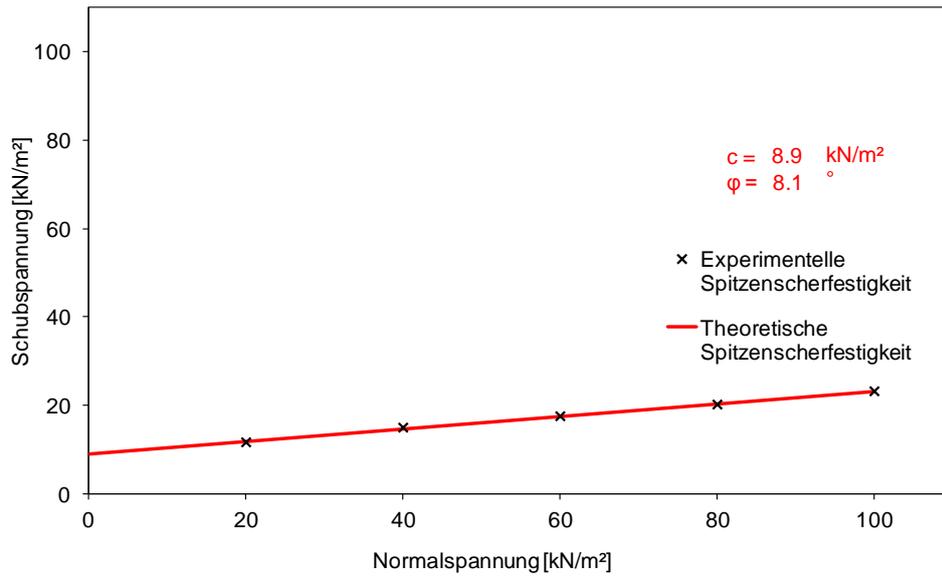


Bild E.7 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem KL und Material 7
(τ/σ -Diagram of pull-out tests with KL and geogrid 7)

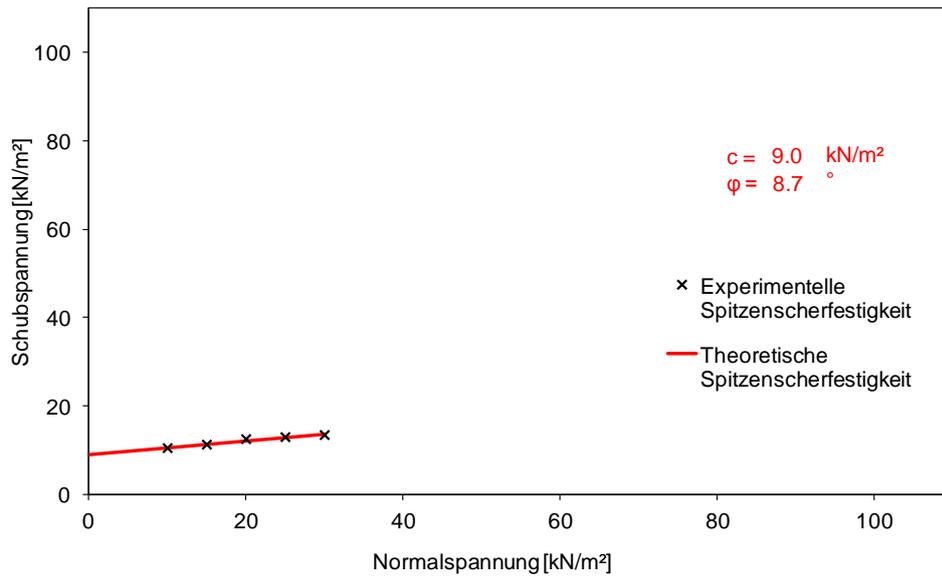


Bild E.8 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem KL und Material 8
(τ/σ -Diagram of pull-out tests with KL and geogrid 8)

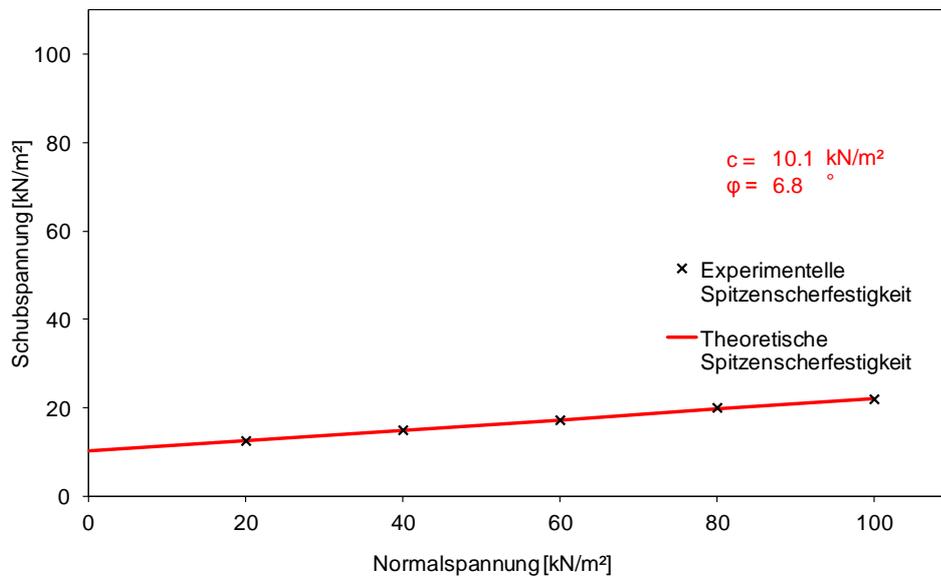


Bild E.9 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem KL und Material 9
(τ/σ -Diagram of pull-out tests with KL and geogrid 9)

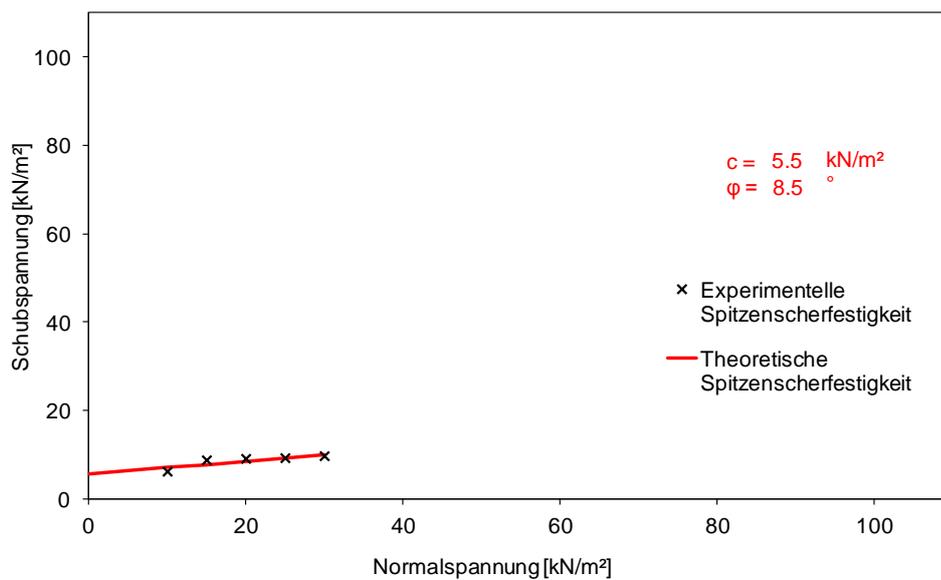


Bild E.10 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem KL und Material 10
(τ/σ -Diagram of pull-out tests with KL and geogrid 10)

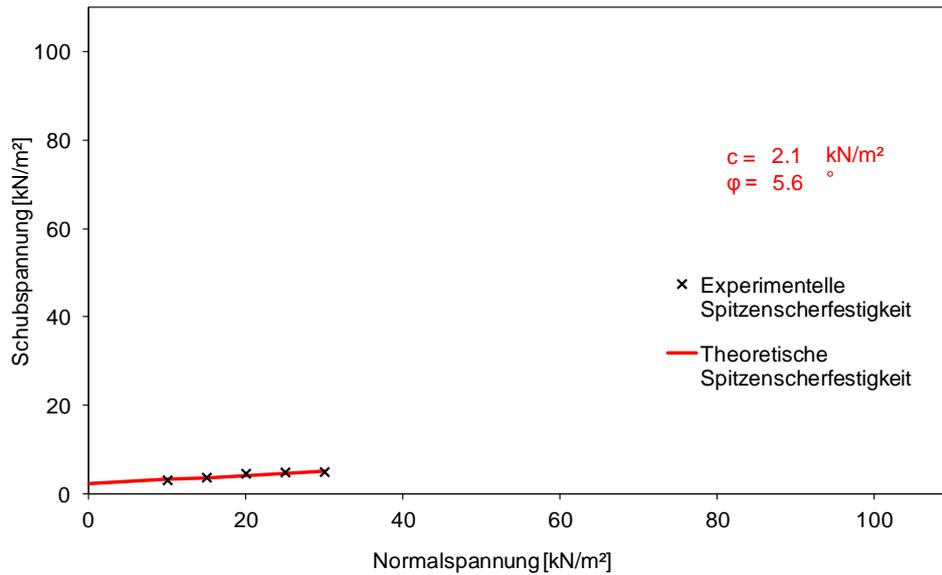


Bild E.11 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem KL und Material 11
(τ/σ -Diagram of pull-out tests with KL and geogrid 11)

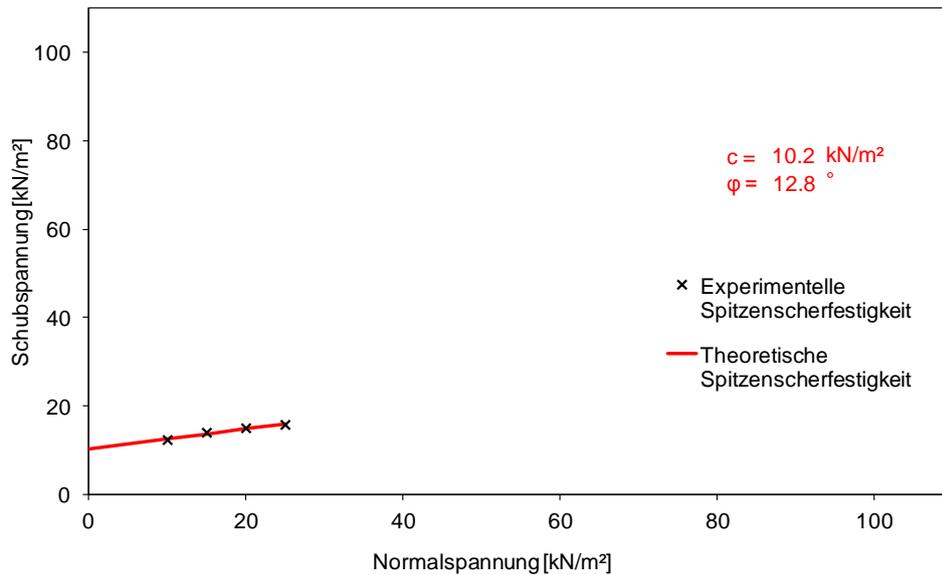


Bild E.12 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem KL und Material 12
(τ/σ -Diagram of pull-out tests with KL and geogrid 12)

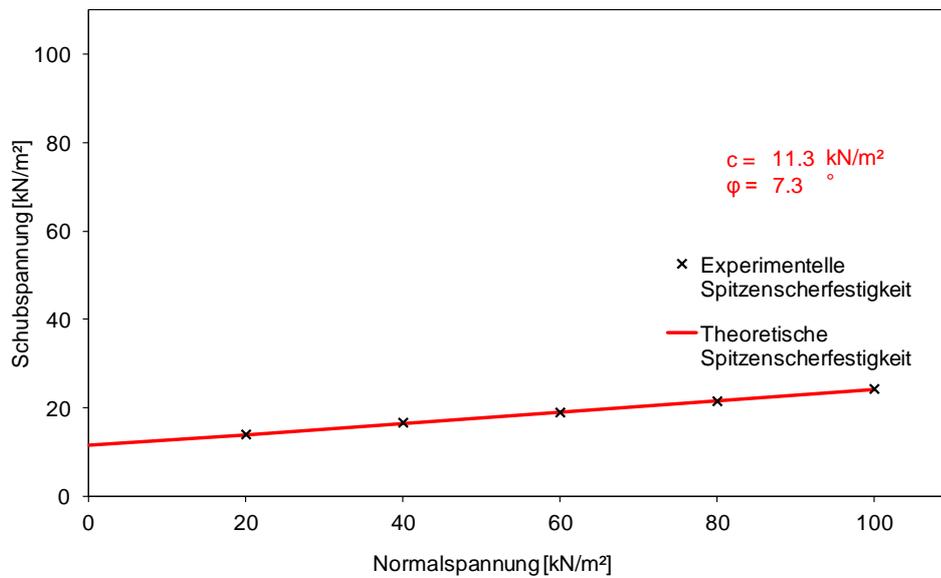


Bild E.13 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem KL und Material 13
(τ/σ -Diagram of pull-out tests with KL and geogrid 13)

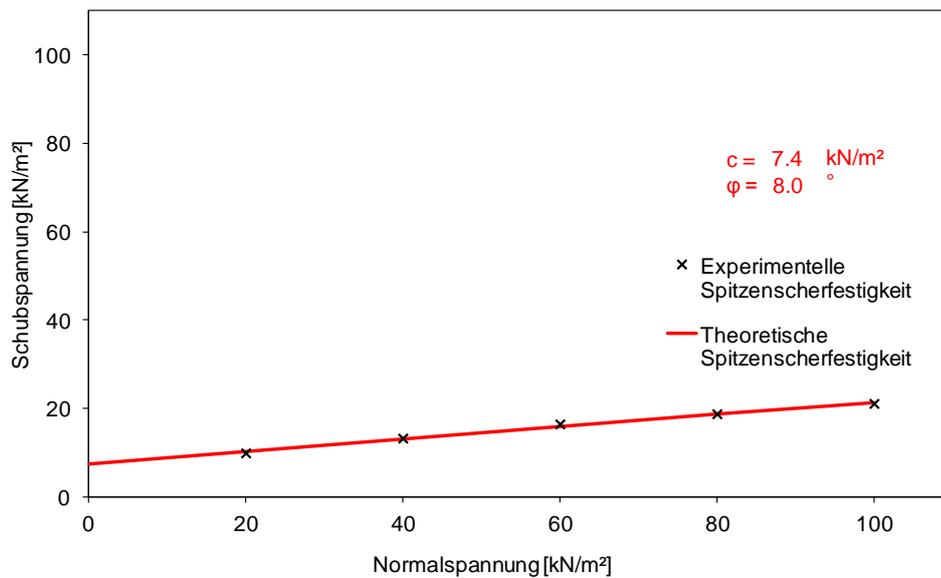


Bild E.14 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem KL und Material 14
(τ/σ -Diagram of pull-out tests with KL and geogrid 14)

F Ergebnisse der Großrahmenherausziehversuche mit HB

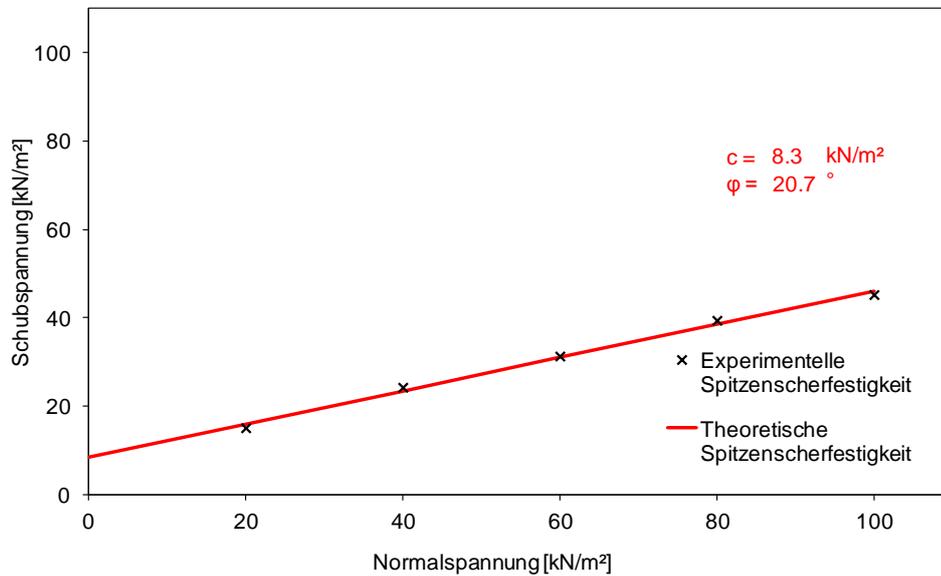


Bild F.1 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem HB und Material 1
(τ/σ -Diagramm of pull-out tests with HB and geogrid 1)

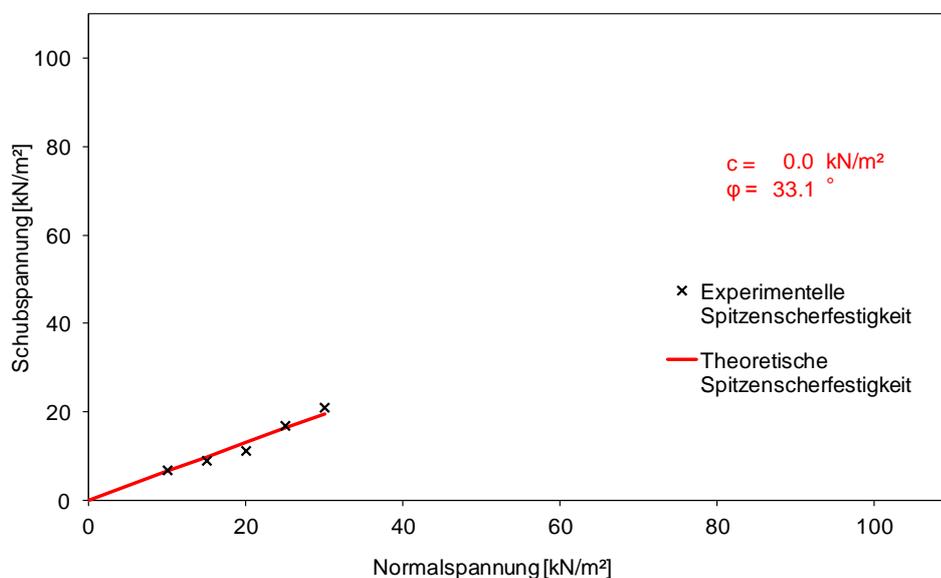


Bild F.2 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem HB und Material 2
(τ/σ -Diagramm of pull-out tests with HB and geogrid 2)

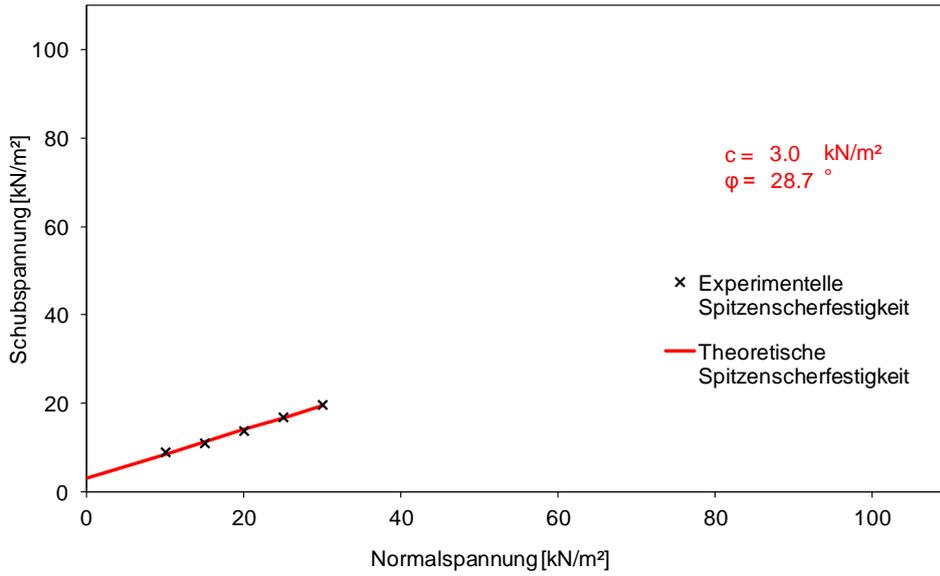


Bild F.3 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem HB und Material 3
 (τ/σ -Diagram of pull-out tests with HB and geogrid 3)

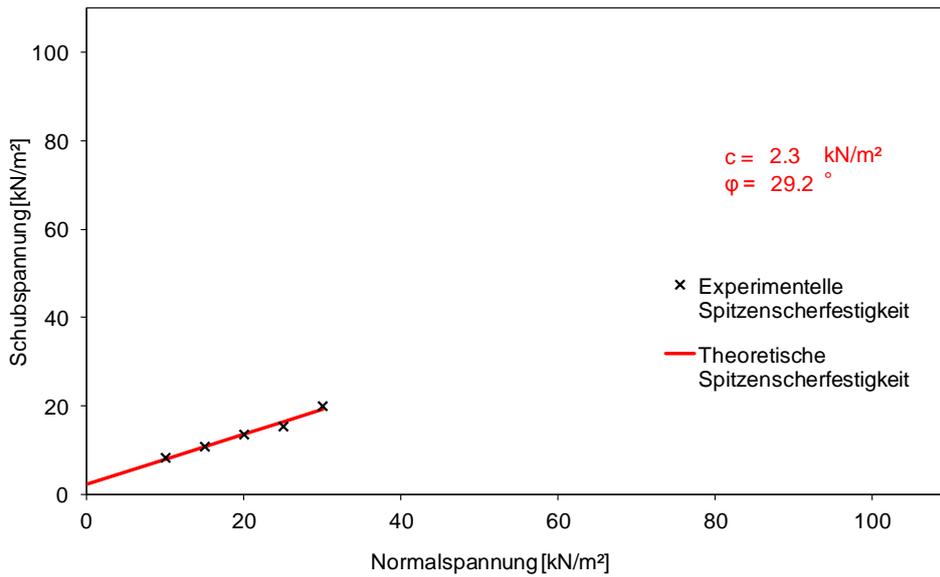


Bild F.4 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem HB und Material 4
 (τ/σ -Diagram of pull-out tests with HB and geogrid 4)

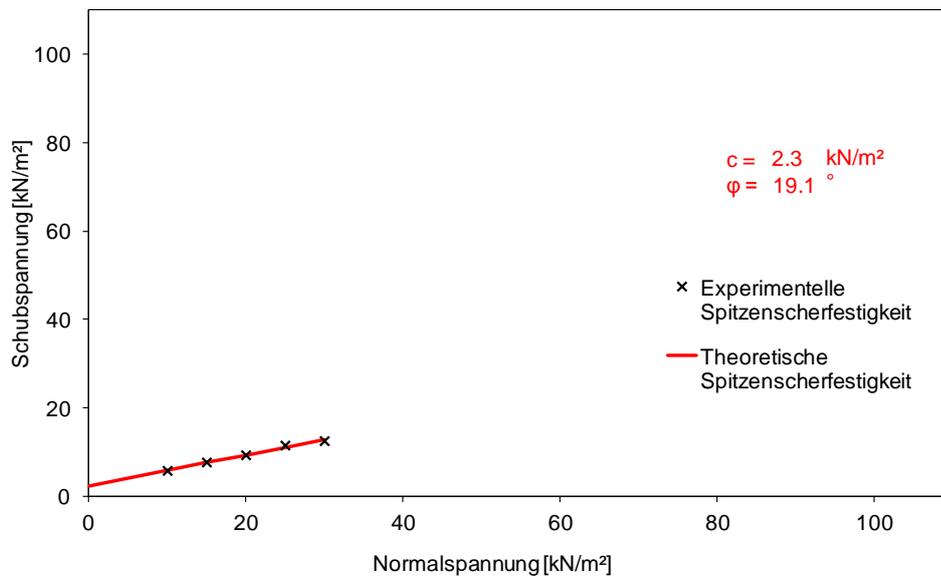


Bild F.5 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem HB und Material 5
(τ/σ -Diagramm of pull-out tests with HB and geogrid 5)

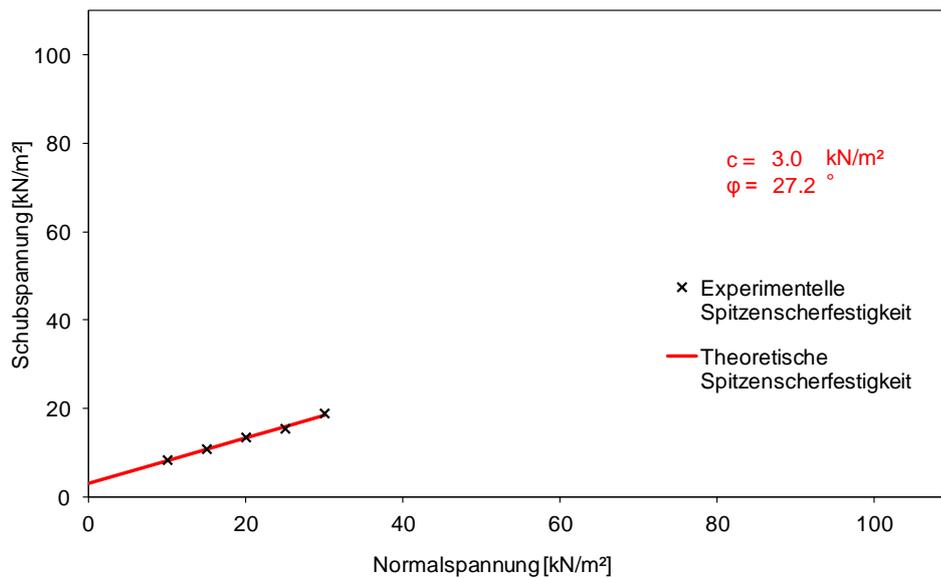


Bild F.6 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem HB und Material 6
(τ/σ -Diagramm of pull-out tests with HB and geogrid 6)

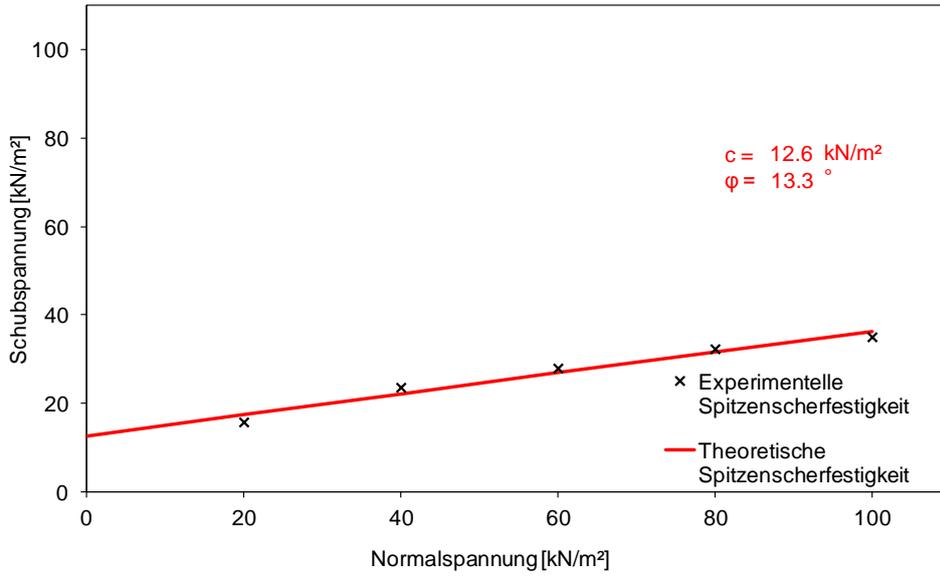


Bild F.7 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem HB und Material 7
 (τ/σ -Diagram of pull-out tests with HB and geogrid 7)

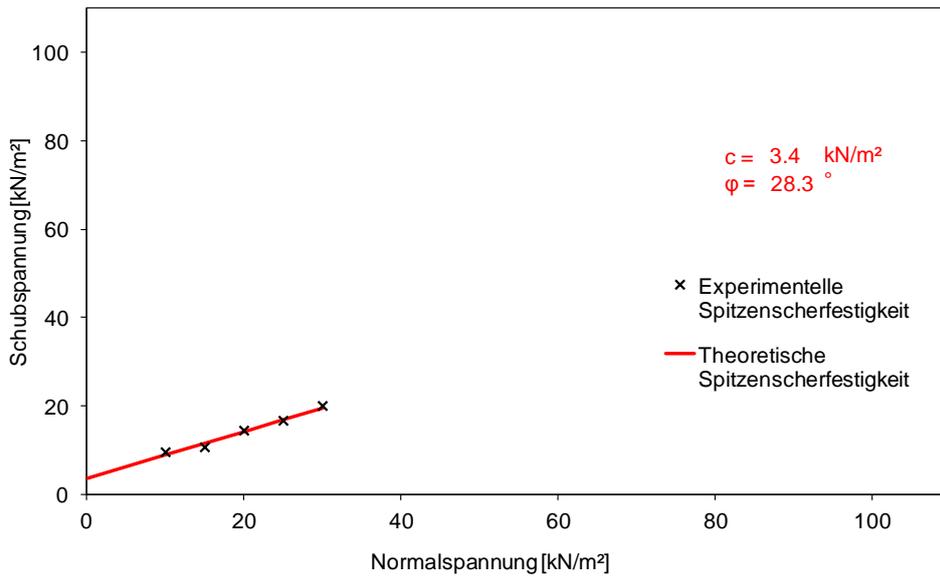


Bild F.8 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem HB und Material 8
 (τ/σ -Diagram of pull-out tests with HB and geogrid 8)

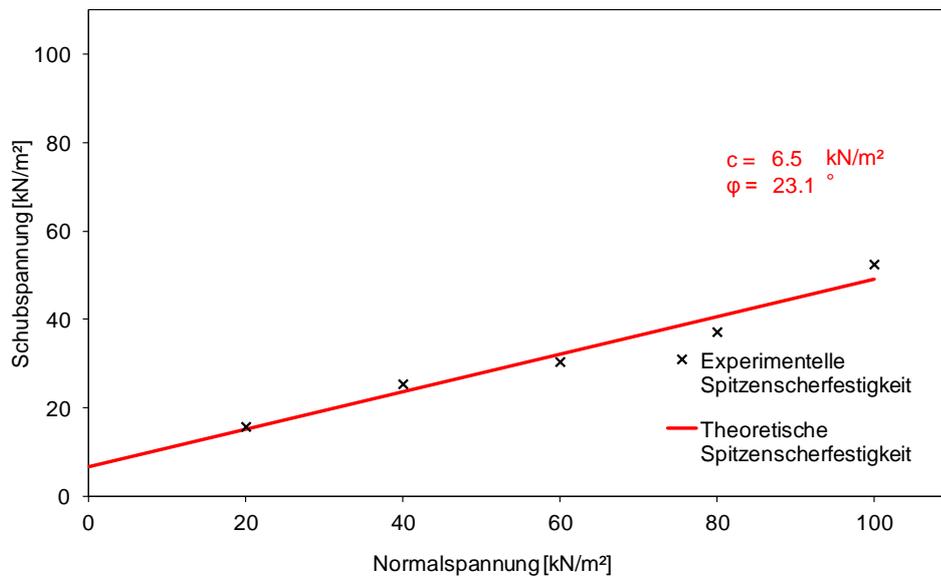


Bild F.9 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem HB und Material 9
(τ/σ -Diagram of pull-out tests with HB and geogrid 9)

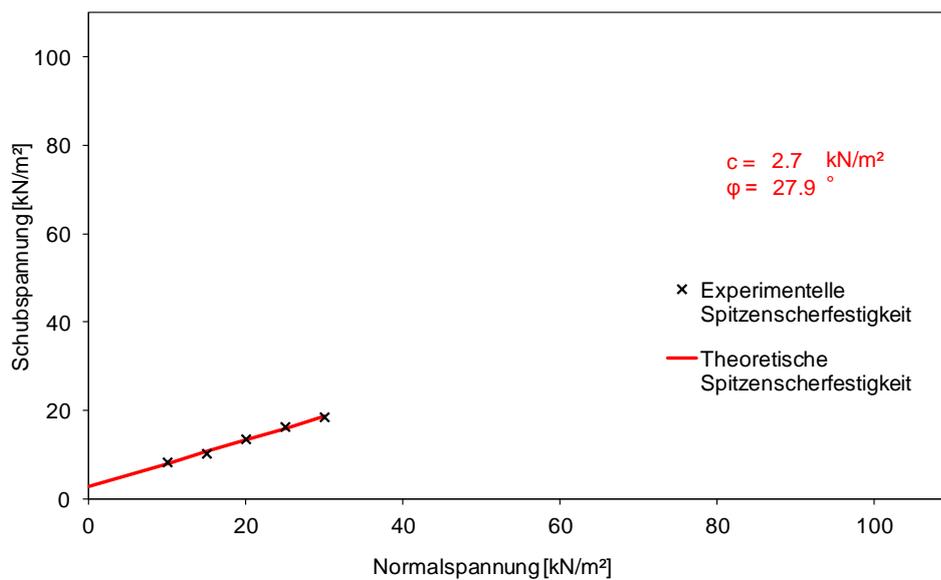


Bild F.10 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem HB und Material 10
(τ/σ -Diagram of pull-out tests with HB and geogrid 10)

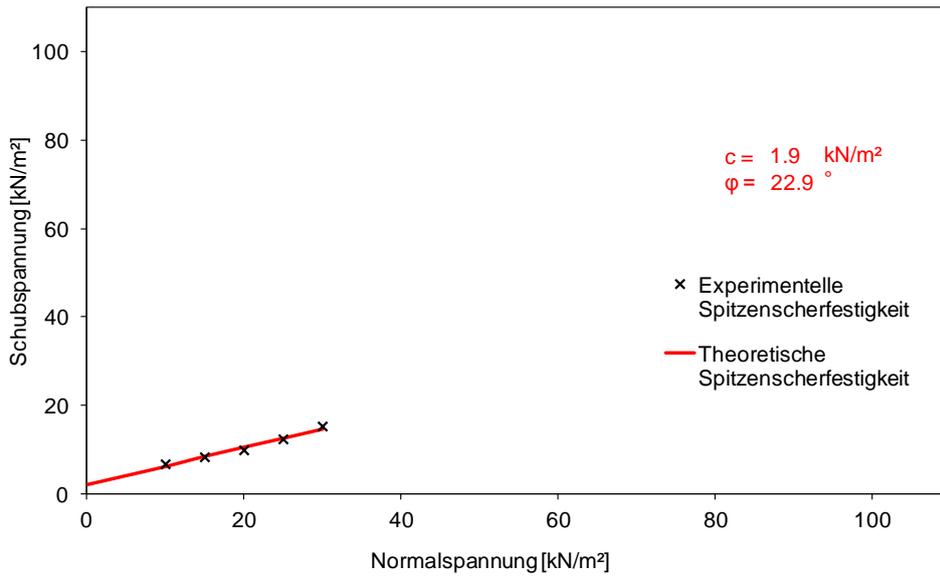


Bild F.11 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem HB und Material 11
 (τ/σ -Diagram of pull-out tests with HB and geogrid 11)

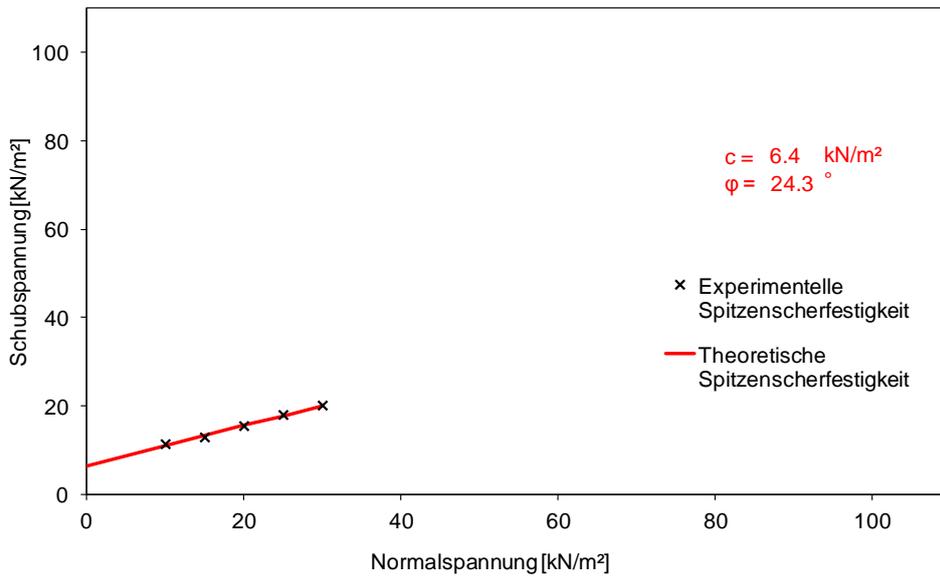


Bild F.12 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem HB und Material 12
 (τ/σ -Diagram of pull-out tests with HB and geogrid 12)

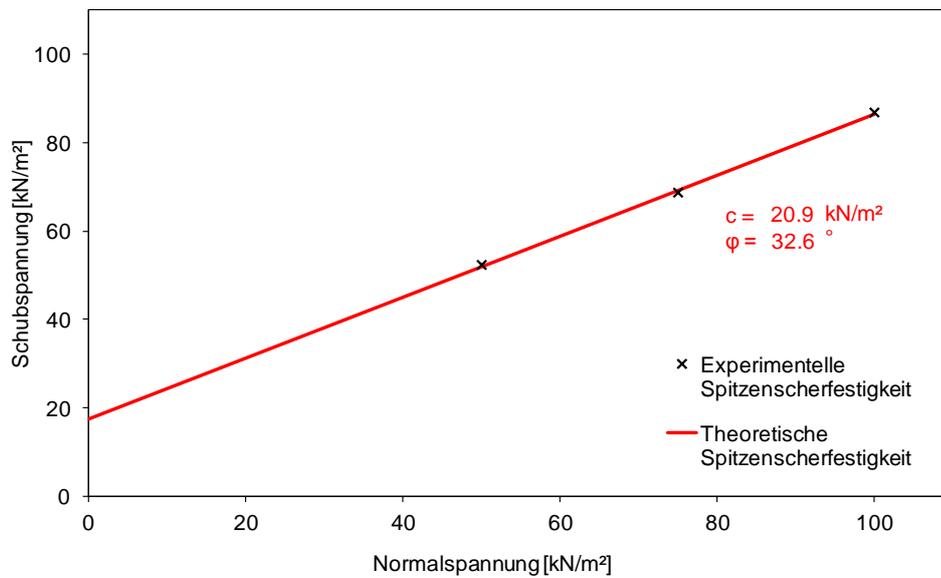


Bild F.13 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem HB und Material 13
(τ/σ -Diagram of pull-out tests with HB and geogrid 13)

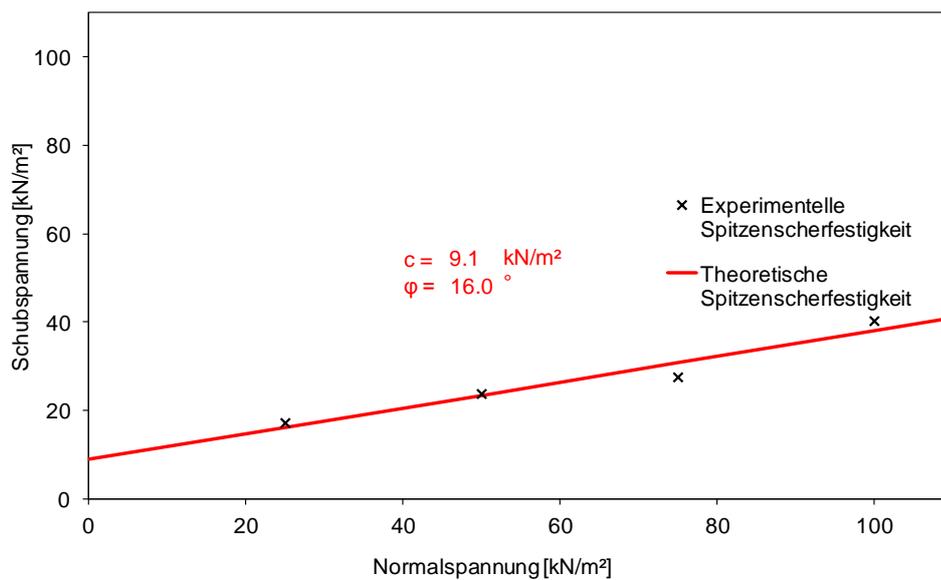


Bild F.14 τ/σ -Diagramm der Herausziehversuche mit dem HB und Material 14
(τ/σ -Diagram of pull-out tests with HB and geogrid 14)