

Großrahmenscherversuche in Mehrstufentechnik - eine wirtschaftliche Lösung zur Bestimmung der Scherwiderstandes von mehrschichtigen Deponieabdichtungssystemen

Nándor Tamáskovics

TU Bergakademie Freiberg
Institut für Geotechnik

Zusammenfassung

Zur Untersuchung des Interaktionsverhaltens von Geokunststoffen mit groben Strukturelementen und Lockergesteinen sind Versuche in einem speziellen Großrahmenschergerät (Interaktionsprüfgerät) erforderlich. Der große Scherrahmen des Gerätes bedingt einen sehr hohen experimentellen und zeitlichen Aufwand bei der Durchführung einer Versuchsserie und macht damit Großrahmenscherversuche wirtschaftlich nachteilhaft. In einer gezielten Vergleichsversuchsserie wurde untersucht, inwiefern die Optimierung des versuchstechnischen Aufwandes beim Einsatz eines Großrahmenschergerätes durch die Anwendung einer speziellen Mehrstufentechnik möglich ist. Die Vergleichsversuche mit unterschiedlichen Versuchsarten an diversen bindigen Lockergesteinen und an einem hochfesten Geogitter zeigen, dass das Ergebnis von Mehrstufenversuchen mit dem Ergebnis von Einstufenversuchen nahezu identisch ist und leicht auf der sicheren Seite liegt. Großrahmenscherversuche als Mehrstufenversuche sind sehr wirtschaftlich, zeiteffektiv und stellen die Berechtigung von Einstufenversuchen unter den untersuchten Bedingungen sogar in Frage.

1 Einleitung

In dem heutigen modernen Deponiebau spielen Geokunststoffe eine zunehmend wichtige Rolle und können sowohl für Aufgaben, wie die Trennung, Drainage, Abdichtung und Bewehrung von unterschiedlichen Lockergesteinen als auch zur Verhinderung von Suffosion und Erosion verwendet werden. Zum Nachweis der Standsicherheit von Deponiekonstruktionen sind vielfach Informationen zum mechanischen Verhalten des Verbundes zwischen verschiedenen Geokunststoffen und Lockergesteinsarten erforderlich. Zum Reibungsverhalten in der Kontaktfläche zwischen unterschiedlichen Geokunststoffarten liegt oft herstellerseitig experimentell gestützte Information vor. Durch die Diversität der eingebauten Lockergesteinsarten sind jedoch generelle Aussagen über das Verbundverhalten zwischen Geokunststoffen und Lockergesteinen nur begrenzt möglich.

Zur Untersuchung des Interaktionsverhaltens von Geokunststoffen mit groben Strukturelementen und Lockergesteinen sind Versuche in einem speziellen Großrahmenschergerät (Interaktionsprüfgerät) erforderlich. Der große Scherrahmen des Gerätes bedingt einen sehr großen experimentellen und zeitlichen Aufwand bei der Durchführung einer Versuchsserie und macht damit Großrahmenscherversuche wirtschaftlich nachteilhaft. In einer Vergleichsversuchsserie aus Großrahmenscherversuchen an diversen Lockergesteinen, aus Großrahmenreibungsv

| Eigenschaft: | Zeichen: | Maßeinheit: | Versuchsergebnis: | | |
|------------------------|-------------|-------------|-------------------|----------------|-----------------|
| | | | Rotliegendes III | Rotliegendes I | Rotliegendes IB |
| Korndichte | ρ_s | $[kg/m^3]$ | 2775 | 2757 | ~ 2757 |
| Ausrollgrenze | w_P | [1] | 0,2328 | 0,2916 | 0,2850 |
| Fließgrenze | w_L | [1] | 0,3320 | 0,5313 | 0,5702 |
| Plastizitätszahl | I_P | [1] | 0,0892 | 0,2397 | 0,2852 |
| Optimaler Wassergehalt | w_{opt} | [1] | 0,1010 (0,1162) | 0,1830 | 0,1922 |
| Proctordichte | ρ_{Pr} | $[kg/m^3]$ | 2020 | 1695 | 1714 |

Tabelle 1: Ergebnis der bodenphysikalischen Untersuchungen am Rotliegenden III, I und IB

zwischen einem Geogitter und einem Lockergestein sowie aus Großrahmenherausziehversuchen eines Geogitters aus einem Lockergestein wurde untersucht, inwiefern die Optimierung des versuchstechnischen Aufwandes beim Einsatz eines Großrahmenschergerätes durch die Anwendung einer speziellen Mehrstufentechnik möglich ist. Als Versuchsmaterial wurden drei unterschiedliche bindige Lockergesteine Rotliegendes I, IB und III aus dem Großraum Chemnitz verwendet. Als Geokunststoff wurde ein hochfestes Geogitter eingesetzt.

2 Bodenphysikalische Untersuchungen

In Vorbereitung der Versuche im Großrahmenschergerät wurden bodenphysikalische Untersuchungen an den ausgewählten bindigen Lockergesteinen Rotliegendes I, IB und III durchgeführt, deren Ergebnis in der Tabelle 1 zusammengestellt ist. Im folgenden Bild 1 sind die ermittelten Kornverteilungskurven und Proctorkurven für die untersuchten Lockergesteine dargestellt. Beim Rotliegenden I und IB handelt es sich um einen stark tonigen und sandigen Schluff. Das Rotliegende III ist ein stark sandiger Schluff mit einem geringen Tonanteil. Die aus der Kornverteilungskurve angedeuteten Plastizitätseigenschaften werden durch die ermittelten Konsistenzgrenzen und Plastizitätszahlen bestätigt. Die Konsistenzgrenzen und die Plastizitätszahl des Materials Rotliegendes I zeigt eine mittlere, die des Materials Rotliegendes IB eine ausgeprägte und die des Materials Rotliegendes III eine leichte Plastizität.

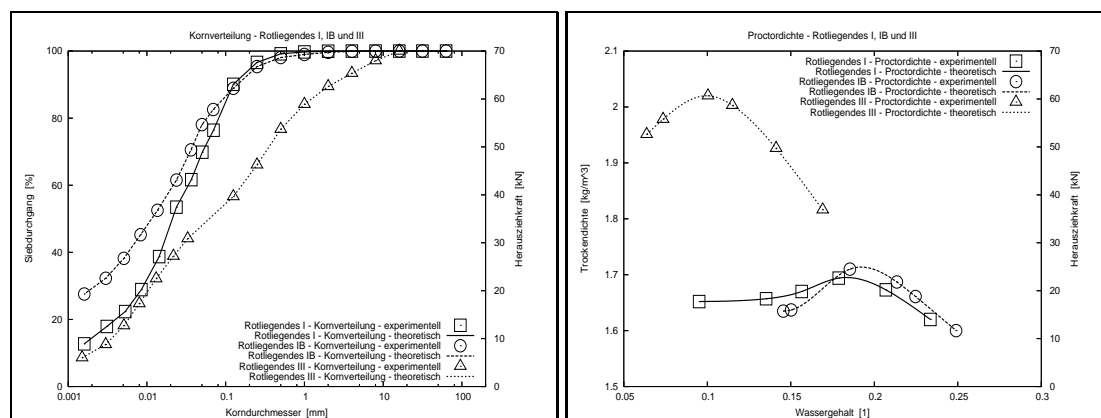


Abbildung 1: Bodenphysikalische Untersuchungen am Rotliegenden III, I und IB

Die Dichte der Proben wurde während der Versuchsserie kontrolliert eingestellt. Zur günstigen Verdichtbarkeit wurde bei den Lockergesteinen Rotliegendes I und IB ein Wassergehalt von $w = 0,1830$ [1] (optimaler Wassergehalt des Lockergesteins Rotliegendes I) eingestellt. Beim Material Rotliegendes III wurde der Wassergehalt auf den Wert $w = 0,1162$ [1] leicht erhöht,

um die Bildsamkeit des Lockergesteins beim Materialeinbau in das Versuchsgerät zu vergünstigen. Der Wassergehalt von $w = 0,1162$ [1] beim Material Rotliegendes III entspricht einem Sättigungsgrad von $S_r = 0,7$ [1] bei einer Trockendichte von $\rho_d = 1900$ [kg/m³].

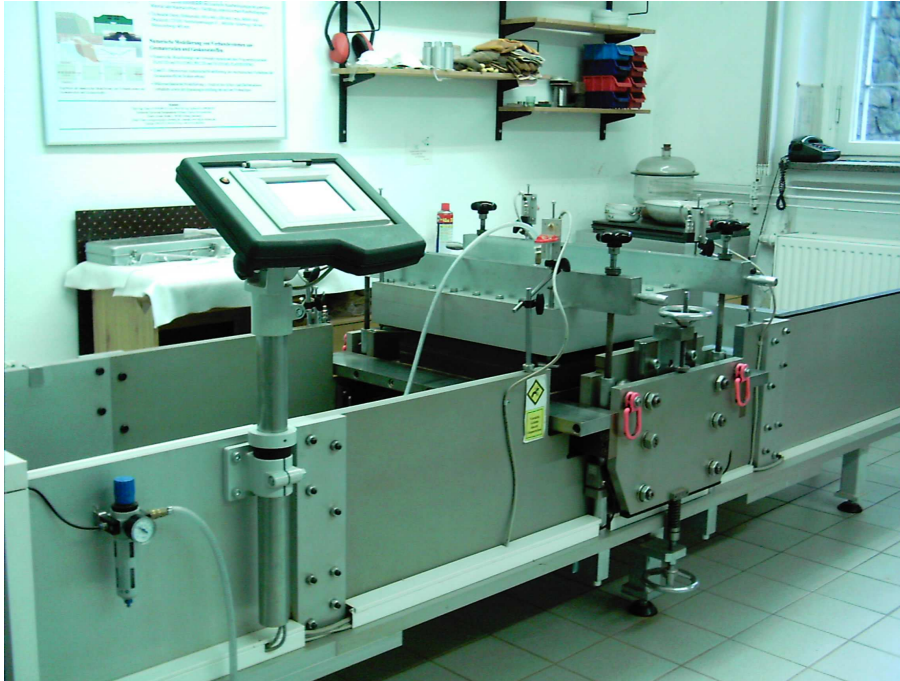


Abbildung 2: Übersicht des Geosynthetik-Boden-Interaktionsprüfgerätes (IPG)

3 Das Interaktionsprüfgerät (IPG)

Das Großrahmenschergerät des Institutes für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg ist ein universelles Interaktionsprüfgerät (IPG) zur Untersuchung des Verbundverhaltens zwischen Geokunststoffen und Lockergesteinen. Die Übersicht des Gerätes ist auf dem Bild 2 ersichtlich. Das Großrahmenschergerät verfügt über die folgenden technischen Parametern:

- Scherkastengröße: $L = 500$, $B = 500$, $H = 200$ [mm]
- Normalspannungsbereich: $\sigma'_v = 0 \dots 600$ [kPa]
- Schubspannungsbereich: $\tau = 0 \dots 500$ [kPa]
- Maximale Scherkraft und Herausziehkraft: $F_{max} = 125$ [kN]
- Schergeschwindigkeit: $v = \pm 0 \dots 12,5$ [mm/sec]
- Maximale Scherverschiebung: $u_{max} = 400$ [mm]

Die konstruktive Gestaltung des Interaktionsprüfgerätes ermöglicht eine Aufweitung des Scherspalt zwischen dem unteren und oberen Scherrahmen während des Versuches, indem die vertikale Bewegung des oberen Scherrahmens bei allen Versuchsarten freigegeben werden

kann. Der obere Scherrahmen wird während der Bewegung durch eine vertikale Führung geführt. Beim schwebenden oberen Scherrahmen wird zunächst ein Mindestwert der Scherspaltweite eingefordert, die sich durch Hebung des oberen Scherrahmens im Versuchsverlauf erhöhen kann. Durch Freigabe der Bewegung des oberen Scherrahmens werden mechanische Effekte aus der Reibung des untersuchten Materials an der Wandung des oberen Scherrahmens im Versuchsverlauf vermindert. Der obere Scherrahmen verfügt weiterhin über eine Gewichtskompensation, damit keine Effekte durch sein Eigengewicht in den Versuch eingetragen werden.

4 Versuchsarten im Interaktionsprüfgerät

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

- **Großrahmenscherversuche ISV:** das Versuchsmaterial wird zum Einbau in den beiden Scherrahmen des Großrahmenschergerätes in sechs Schichten unterteilt, um die vorgeschriebene Einbaudichte lagenweise einzufordern. Die beiden Schichten in der Umgebung der Scherebene werden jedoch zugleich eingebaut, wodurch in der Scherebene eine kompakte Lockergesteinszone entsteht. Unter den Einbaubedingungen dieser Versuche werden Scherfestigkeitswerte ermittelt, die dem natürlichen Zustand des ausgewählten bindigen Lockergesteins entspricht. Die dadurch ermittelten Scherfestigkeiten bilden die Grundlage eines Standsicherheitsnachweises für ein Lockergesteinsbauwerk ohne Bewehrung sowie der Ermittlung von Verbundbeiwerten.
- **Großrahmenreibungversuche IRV:** das Versuchsmaterial wird zum Einbau in den beiden Scherrahmen des Großrahmenschergerätes in sechs Schichten unterteilt, um die vorgeschriebene Einbaudichte lagenweise einzufordern. Nach Einbau der ersten drei Schichten in den unteren Scherrahmen wird das zu untersuchende Geokunststoff in der 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 beiden Scherrahmen des Großrahmenschergerätes in sechs Schichten unterteilt, um die vorgeschriebene Einbaudichte lagenweise einzufordern. Nach Einbau der ersten drei Schichten in den unteren Scherrahmen wird das 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. Unter den Bedingungen dieser Versuche 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.

Neben den beschriebenen Versuchsarten ermöglicht das Interaktionsprüfgerät eine Reihe weiterer spezieller Versuchsformen zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften des Verbundes zwischen Geokunststoff und Lockergestein.

| Versuch: | Versuchsbedingungen: | | Versuchsergebnisse: | | | |
|---|----------------------------------|--------------|---------------------|-----------------|--------------------|--------------|
| | ρ_d [kg/m ³] | w_E [1] | φ'_f [°] | c'_f [kPa] | R_φ [1] | R_c [1] |
| ISV - Großrahmenscherversuche zur Verifizierung: | | | | | | |
| ISV-00-RLIII-070-200-00-V1 | 1900 | 0,1162 | 30,2 | 28,5 | REF | REF |
| ISV-00-RLIII-070-200-00-V2 | 1900 | 0,1162 | 28,1 | 36,2 | REF | REF |
| ISV-00-RLIII-070-200-00-VE1 | 1900 | 0,1162 | 26,6 | 42,4 | 0,91 | 1,31 |
| ISV-00-RLI-OPT-200-00-V1 ¹⁾ | 1600 | 0,1830 | 25,6 | 32,7 | REF | REF |
| ISV-00-RLIB-OPT-200-00-V2 | 1600 | 0,1830 | 31,1 | 44,8 | REF | REF |
| ISV-00-RLIB-OPT-200-00-V3 ¹⁾ | 1600 | 0,1830 | 32,4 | 40,8 | REF | REF |
| ISV-00-RLIB-OPT-200-00-VE1 | 1600 | 0,1830 | 33,8 | 41,9 | 1,07 | 0,98 |
| IRV - Großrahmenreibungsversuche zur Verifizierung: | | | | | | |
| IRV-FT-RLIB-OPT-200-00-V2 | 1600 | 0,1830 | 30,7 | 26,2 | 0,97 | 0,61 |
| IRV-FT-RLIB-OPT-200-00-VE1 | 1600 | 0,1830 | 30,1 | 33,5 | 0,95 | 0,78 |
| IPV - Großrahmenherausziehversuche zur Verifizierung: | | | | | | |
| IPV-FT-RLI-OPT-200-00-V1 | 1600 | 0,1830 | 21,0 | 34,2 | 0,82 | 1,05 |
| IPV-FT-RLI-OPT-200-00-VE1 | 1600 | 0,1830 | 20,7 | 40,6 | 0,81 | 1,24 |
| REF: Referenzwert zur Berechnung von Verbundbeiwerten | | | | | | |
| ¹⁾ : Nur als Referenzwert zur Berechnung von Verbundbeiwerten aufgeführt | | | | | | |

Tabelle 2: **Übersicht der Versuchsergebnisse zur Verifizierung der angewendeten Versuchsmethodik mit der Mehrstufentechnik**

5 Versuchsprogramm

Die Übersicht des Versuchsprogramms der Vergleichsversuche ist in der Tabelle 2 ersichtlich. In der Versuchsreihe wurde eine einheitliche Bezeichnung der Versuche vorgenommen, um eine einfachere Identifikation und schnelle Zuordnung der Versuchsergebnisse zu ermöglichen:

TYP-GK-MAT-WGH-NSB-VG-VN

Die einzelnen Felder im Versuchsnamen bedeuten die folgenden Inhalte:

- **TYP** - Bezeichnung der Versuchsart im Großrahmenschergerät:
 - ISV: Großrahmenscherversuch
 - IRV: Großrahmenreibungsversuch eines Geokunststoffes im Bodenverbund
 - IPV: Großrahmenherausziehversuch eines Geokunststoffs aus dem Bodenverbund
- **GK** - Verwendete Geokunststoffart:
 - FT: Geogitter mit einer spezifischen Nennfestigkeit von $F_{L,max} = 750 [kN/m]$ in Längsrichtung und von $F_{Q,max} = 50 [kN/m]$ in Querrichtung
- **MAT** - Versuchsmaterial:
 - RLI: Rotliegendes I aus dem Großraum der Stadt Chemnitz
 - RLIB: Rotliegendes IB aus dem Großraum der Stadt Chemnitz
 - RLIII: Rotliegendes III aus dem Großraum der Stadt Chemnitz
- **WGH** - Einbauwassergehalt des Versuchsmaterials beim Versuch:
 - OPT: optimaler Wassergehalt $w = 0,1830 [1]$ des Rotliegendes I, Anwendung auch beim Rotliegendes IB

- 070: geringfügig erhöhter optimaler Wassergehalt des Lockergesteins Rotliegendes III, entspricht einem Sättigungsgrad von $S_r = 0,7 [1]$ bei einer Trockendichte von $\rho_d = 1900 [kg/m^3]$
- **NSB** - Normalspannungsbereich der Untersuchungen:
 - 200: Spannungsstufen mit $\sigma' = 25, 50, 100, 150, 200 [kN/m^2]$ bei Mehrstufenversuchen, Spannungsstufen mit $\sigma' = 50, 100, 200 [kN/m^2]$ bei Einstufenversuchen
- **VG** - Vergütung des Lockergesteins:
 - 00: Kein Zuschlagstoff
- **VN** - Versuchsart und Nummer der Wiederholung:
 - V1: Mehrstufenversuche, Bestimmung der Bruchspannung jeder Spannungsstufe aus Untersuchungen an einer einzigen Probe (V2, V3 bei Wiederholung)
 - VE1: Einstufenversuche, Bestimmung der Bruchspannung jeder Spannungsstufe aus Untersuchungen durch erneute Einbau von Proben

In den folgenden Abschnitten werden die in den Großrahmenscherversuchen erzielten Ergebnisse detailliert vorgestellt und diskutiert.

6 Versuchsdurchführung

Die Vergleichsversuche im Großrahmenschergerät wurden sowohl bei den Einstufenversuchen und Mehrstufenversuchen unter identischen bodenmechanischen Bedingungen durchgeführt. Die Untersuchungen erstreckten sich über die vorgestellten Versuchsarten des Interaktionsprüfgerätes, wie Großrahmenscherversuche, Großrahmenreibungversuche und Großrahmenherausziehversuche. Bei den unterschiedlichen Versuchsarten wurden zum Teil verschiedene Lockergesteine eingesetzt.

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 niedrigeren verfügbaren spezifischen Verdichtungsenergie beim Einbau unterhalb der Proctordichte. Die bodenphysikalischen Bedingungen in den Versuchen sind in der Tabelle 2 links aufgeführt.

Die Großrahmenscherversuche 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 Scherspaltess betrug in der gesamten Versuchsserie $x \geq 1 [mm]$ und konnte sich während des Versuchsverlaufes durch Freigabe der Bewegung des gewichtskompensierten oberen Scherrahmens entsprechend den mechanischen Bedingungen einstellen. Bei Reibungsversuchen und Herausziehversuchen wurde das genannte Mindestmaß des Scherspaltess zur Dicke des untersuchten Geogitters addiert.

In den Einstufenversuchen wurden die eingebauten Proben nur jeweils unter den Normalspannungen von $\sigma' = 50 [kN/m^2]$, $\sigma' = 100 [kN/m^2]$ und $\sigma' = 200 [kN/m^2]$ konsolidiert und anschließend belastet. Obwohl bei der Versuchsvorbereitung der Einstufenversuche die Sicherung identischer bodenmechanischer Bedingungen angestrebt wurde, unterliegen die Ergebnisse einer geringfügigen versuchsbedingten Streuung.

Gegenüber den Einstufenversuchen bieten Mehrstufenversuche nach der in den vorliegenden Untersuchungen erarbeiteten Methodik mehrere Vorteile. Die Bestimmung der Scherfestigkeit kann mit einem erheblich reduzierten experimentellen und zeitlichen Aufwand durchgeführt werden. Die Ermittlung der Scherfestigkeit erfolgt an einer Probe schrittweise und die Fehler durch den Einbau der Proben für die einzelnen Spannungspunkte werden damit zusätzlich eliminiert. Grundgedanke zur Gestaltung der Versuchsführung in den Mehrstufenversuchen war, die Störung der Probe beim Übergang von einer Versuchsphase in eine Folgende so weit wie möglich zu reduzieren. Die detaillierte Vorgehensweise bei der Durchführung von Mehrstufenversuchen in den vorliegenden Untersuchungen war die folgende:

1. Einbau der Probe mit der vorgeschriebenen Einbauwassergehalt und Einbautrockendichte
2. Konsolidation der Probe in der ersten Laststufe der Normalspannung
3. Scherbelastung der Probe bis zum Erreichen der Bruchlast, ohne die Probe durch eine weitere Scherverschiebung zu schädigen
4. Rekonsolidation der Probe auf der nächsten Laststufe der Normalspannung
5. Erneute Scherbelastung der Probe bis zum Erreichen der Bruchlast, ohne die Probe durch eine weitere Scherverschiebung zu schädigen
6. Wiederholung der Rekonsolidations- und Scherbelastungsschritte im Vorbruchbereich bis zum Erreichen der maximalen Normalspannungslaststufe
7. Scherbelastung der Probe bis zum Erreichen eines konstanten Restwertes der Scherfestigkeit im Nachbruchbereich oder eines bestimmten maximalen Weges der Scherverschiebung
8. Entlastung der Probe auf die nächst niedrigere Laststufe der Normalspannung
9. Erneute Scherbelastung der Probe bis zum Erreichen eines konstanten Restwertes der Scherfestigkeit oder eines bestimmten Weges der Scherverschiebung
10. Wiederholung der Rekonsolidations- und Scherbelastungsschritte im Nachbruchbereich bis zum Erreichen der kleinsten Normalspannungslaststufe

Die Untersuchung der Restfestigkeit bei Scherversuchen und bei Reibungsversuchen im Großrahmenschergerät wird erschwert, weil die Regelung der Normalspannung wegen der Spannungsverteilung in der Probe bei einer großen Scherverschiebung nicht mehr exakt möglich ist. Restfestigkeiten, die aus Einstufenversuchen oder Mehrstufenversuchen im Großrahmenschergerät ermittelt wurden, gelten deshalb als Richtwerte. Die Auswertung und Diskussion der Versuchsergebnisse im Folgenden erfolgt deshalb nur durch den Vergleich von Spitzenscherfestigkeiten.

Die Schergeschwindigkeit wurde bei der Versuchsserie wie folgt eingestellt:

- Großrahmenscherversuche (ISV): $v = 0,5 [mm/min]$
- Großrahmenreibungversuche (IRV): $v = 1,0 [mm/min]$
- Großrahmenherausziehversuche (IPV): $v = 2,0 [mm/min]$

7 Versuchsauswertung

Die Auswertung von Scherversuchen, Reibungsversuchen und Herausziehversuchen im Interaktionsprüfgerät als Grundlage der Bestimmung von Verbundbeiwerten erfolgt zunächst durch Berechnung der Scherparameter des MOHR-COULOMB'schen Versagenskriteriums

$$(1) \quad \tau_f = \sigma' \tan \varphi'_f + c'_f ,$$

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

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

$$(2) \quad R_{\varphi} = \frac{\tan \varphi'_f}{\tan \varphi'_{f,REF}} , \quad R_c = \frac{c'_f}{c'_{f,REF}} ,$$

wo die Größen φ'_f den Reibungswinkel sowie c'_f die Kohäsion in den zu bewertenden Versuchen und die Größen $\varphi'_{f,REF}$ den Reibungswinkel sowie $c'_{f,REF}$ 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

$$(3) \quad R_k(\sigma') = \frac{\tau_f(\sigma')}{\tau_{f,REF}(\sigma')} = \frac{\sigma' \tan \varphi'_f + c'_f}{\sigma' \tan \varphi'_{f,REF} + c'_{f,REF}}$$

der im Bruchzustand gemessenen Schubspannungen in den zu bewertenden Versuchen $\tau_f(\sigma')$ bezogen auf einen Wert in einem Referenzversuch $\tau_{f,REF}(\sigma')$. Die Berechnung der spannungsabhängigen Verbundbeiwerte $R_k(\sigma')$ erfolgt aus den theoretischen Werten der Schubspannung im Bruchzustand $\tau_f(\sigma')$ und $\tau_{f,REF}(\sigma')$, 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.

In den vorliegenden Vergleichsuntersuchungen wurden Verbundbeiwerte nach der Gleichung (2) berechnet und in die Tabelle 2 aufgenommen. Ein Vorteil der partiellen Verbundbeiwerte nach der Gleichung (2) ist die Bewertung des Verhaltens der Festigkeitsanteile aus der Reibung sowie aus der Kohäsion des Lockergesteins und des Geokunststoff-Lockergesteinsverbundes.

Die alternativen, spannungsabhängigen Verbundbeiwerte nach der Gleichung (3) 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.

Die aus den Versuchen ermittelten partiellen Verbundbeiwerte sind in der Tabelle 2 auf der rechten Seite ersichtlich. Die Referenzversuche, die zur Berechnung der Verbundbeiwerte genutzt wurden, sind in der Tabelle 2 jeweils mit einem Kürzel "REF" gekennzeichnet:

- Zur Bewertung des Scherfestigkeitsverhaltens von Lockergesteinen bei Einstufenversuchen und Mehrstufenversuchen wurde der Mittelwert der Scherfestigkeit aus den Versuchen ISV-00-RLIII-OPT-200-00-V1 und ISV-00-RLIII-OPT-200-00-V2 sowie aus den Versuchen ISV-00-RLIB-OPT-200-00-V2 und ISV-00-RLIB-OPT-200-00-V3 als Referenzversuch verwendet (siehe Tabelle 2).
- Zur Bewertung des Verbundverhaltens beim untersuchten Geokunststoff im Großrahmenreibungsversuch bei Einstufenversuchen und Mehrstufenversuchen wurde der Mittelwert der Scherfestigkeit aus den Versuchen ISV-00-RLIB-OPT-200-00-V2 und ISV-00-RLIB-OPT-200-00-V3 als Referenzversuch verwendet (siehe Tabelle 2).
- Zur Bewertung des Verbundverhaltens beim untersuchten Geokunststoff im Großrahmenherausziehversuch bei Einstufenversuchen und Mehrstufenversuchen wurde die Scherfestigkeit aus dem Versuch ISV-00-RLI-OPT-200-00-V1 als Referenzversuch verwendet (siehe Tabelle 2).

Die partiellen Verbundbeiwerte R_φ und R_c in der Tabelle 2 verdeutlichen, dass das Ergebnis der Einstufenversuche und der Mehrstufenversuche nahezu identische Ergebnisse sowohl für das Verhalten des Reibungswinkels als auch der Kohäsion im Geokunststoff-Lockergesteinsverbund ergeben.

8 Versuchsergebnisse

Das Ergebnis der Vergleichsversuche von Einstufenversuchen und Mehrstufenversuchen wurde in der Tabelle 2 auf der rechten Seite zusammengestellt. Die Versuchsergebnisse wurden weiterhin in den Diagrammen im Bild 3 grafisch dargestellt. Auf der linken Seite im Bild 3 ist jeweils die Auftragung der Schubspannung über den Scherweg ersichtlich. Die Diagramme zeigen deutlich die gute Wiederholbarkeit von vergleichbaren Mehrstufenversuchen unter identischen bodenmechanischen Bedingungen. Auf der rechten Seite im Bild 3 sind die Bruchgeraden der MOHR-COULOMB'schen Bruchbedingung für die vergleichbaren Einstufenversuche und Mehrstufenversuche aufgetragen. Wie die Diagramme im Bild 3 und die Werte in der Tabelle 2 deutlich zeigen, bestätigt das Ergebnis der Verifizierungsversuche die Aussagekraft von Mehrstufenversuchen in allen untersuchten Versuchsarten:

- ISV - Großrahmenscherversuche an den Lockergesteinen Rotliegendes III und Rotliegendes IB: in dem Einstufenversuch ISV-00-RLIII-070-200-00-VE1 wurde ein geringfügig kleinerer Reibungswinkel als in den vergleichbaren Mehrstufenversuchen ermittelt. Das Ergebnis des Einstufenversuches ISV-00-RLIB-OPT-200-00-VE1 zeigt einen größeren Reibungswinkel und eine kleinere Kohäsion als die vergleichbaren Mehrstufenversuche.
- IRV - Großrahmenreibungsversuche mit dem Geogitter FT und dem Lockergestein Rotliegendes IB: in dem Einstufenversuch IRV-00-RLIB-OPT-200-00-VE1 wurde ein kleinerer Reibungswinkel und eine größere Kohäsion als im vergleichbaren Mehrstufenversuch IRV-00-RLIB-OPT-200-00-V2 ermittelt.

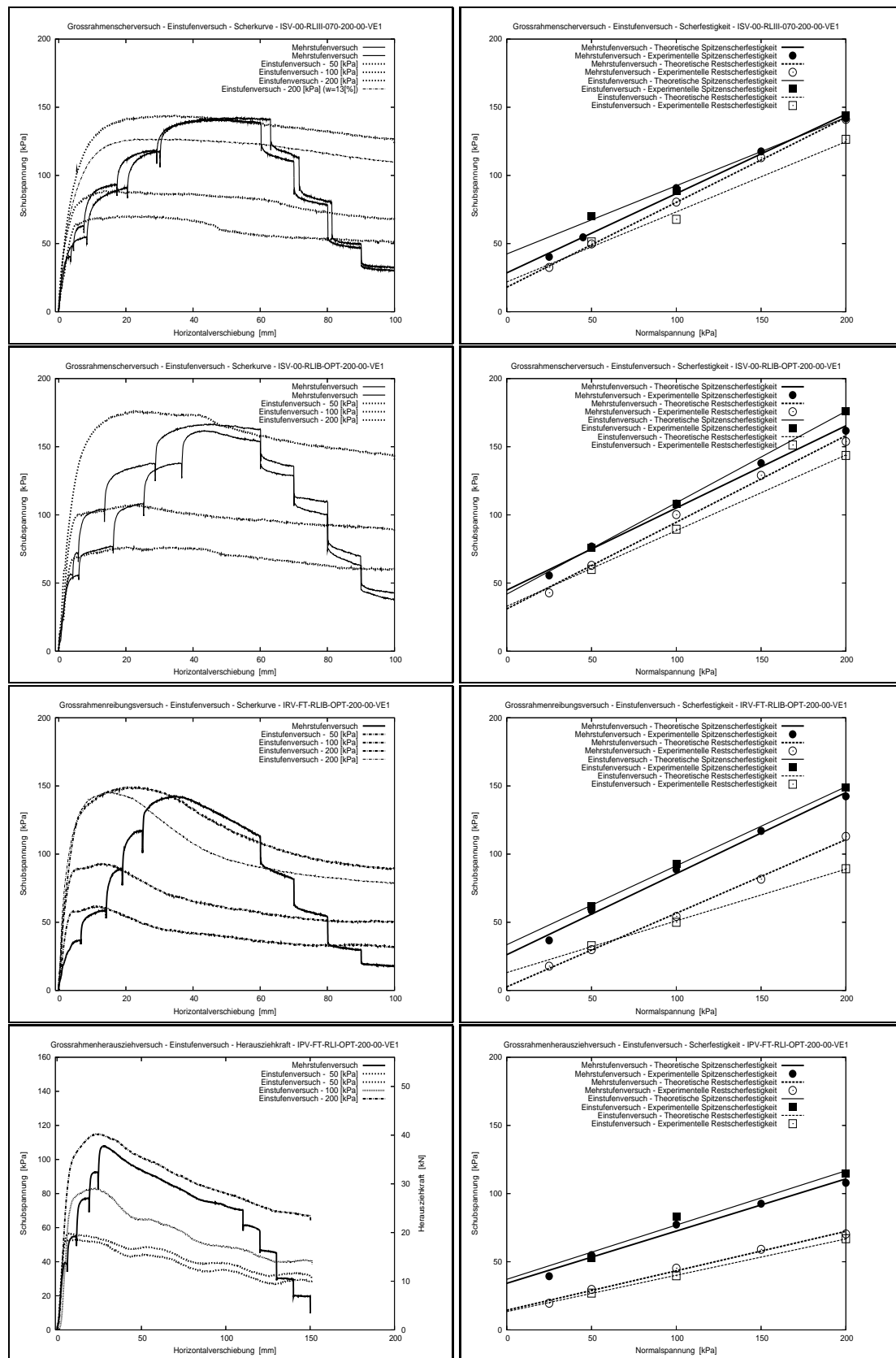


Abbildung 3: Übersicht der Versuche zur Verifizierung der angewendeten Versuchsmethodik mit der Mehrstufentechnik

- IPV - Großrahmenherausziehversuche mit dem Geogitter FT und dem Lockergestein Rotliegendes I: in dem Einstufenversuch IPV-00-RLI-OPT-200-00-VE1 wurde ein kleinerer Reibungswinkel und eine größere Kohäsion als im vergleichbaren Mehrstufenversuch IPV-00-RLI-OPT-200-00-V2 ermittelt.

Der Vergleich der Ergebnisse zwischen Einstufenversuchen und Mehrstufenversuchen zeigt geringfügige Abweichungen, die in dem zulässigen Toleranzbereich ingenieurtechnischer Berechnungen liegen. In der gezielten Vergleichsversuchsreihe konnte der experimentelle Nachweis erbracht werden, dass die Abweichung zwischen den Ergebnissen von Versuchen mit der Mehrstufentechnik in der angewendeten Form und vergleichbaren Einstufenversuchen nur marginal ist und auf der sicheren Seite liegt. Die Mehrstufenversuche erwiesen sich als eine gut vertretbare experimentelle Alternative zu den Einstufenversuchen. Die festgestellten Abweichungen stellen die Rechtfertigung von Einstufenversuchen im Großrahmenschergerät unter den Bedingungen der ausgeführten Versuche sogar in Frage. Neben ihrer sehr ungünstigen Wirtschaftlichkeit unterliegen die Ergebnisse von Einstufenversuchen zufälligen Streuungen, weil zu jedem Untersuchungspunkt die Installation einer neuen Probe erforderlich ist.

Der Wirtschaftlichkeitsvorteil aus der erhöhten Effizienz der Mehrstufenversuche erleichtert die systematische experimentelle Untersuchung des bisher nur ungenügend geklärten Verbundverhaltens diverser Geokunststoffe insbesondere in bindigen Lockergesteinen. Die projektbezogene, kostengünstige, schnelle und exakte Ermittlung von Verbundbeiwerten führt zu einer sichereren Bemessung von Bauwerken mit Geokunststoffeinsatz in der Praxis.

9 Grenzen der Anwendbarkeit in der Deponietechnik

Die geotechnischen Besonderheiten im Deponiebau könnten die Nutzung der Mehrstufentechnik in Großrahmenscherversuchen zur Gewinnung von experimentellen Aussagen zum Verbundverhalten von Lockergesteinen und diversen Geokunststoffen begrenzen. Unter den Bedingungen einer niedrigen Einbaudichte und von niedrigen Normalspannungen könnte die Duktilität von untersuchten Proben soweit ansteigen, dass der maximal verfügbare Scherweg im Versuchsgerät zur Durchführung des Mehrstufenversuches mit einer höheren Anzahl von Belastungsschritten nicht ausreichen würde. Die Duktilität von Lockergesteinsproben könnte sich zusätzlich erhöhen, wenn eine Wasserflutung der Scherebene bei der Untersuchung des Interaktionsverhaltens zwischen dem Geokunststoff und dem Lockergestein erforderlich wird. Die erfolgreiche Anwendung der Mehrstufentechnik in Großrahmenscherversuchen setzt bei allgemeinen Aufgabenstellungen für den Deponiebau eine entsprechende Anpassung der versuchstechnischen Vorgehensweise voraus.

10 Zusammenfassung

Zur Untersuchung des Interaktionsverhaltens von Geokunststoffen mit groben Strukturelementen und Lockergesteinen sind Versuche in einem speziellen Großrahmenschergerät (Interaktionsprüfgerät) erforderlich. Der große Scherrahmen des Gerätes bedingt einen sehr hohen experimentellen und zeitlichen Aufwand bei der Durchführung einer Versuchsserie und macht damit Großrahmenscherversuche wirtschaftlich nachteilhaft. In einer gezielten Vergleichsversuchsserie wurde untersucht, inwiefern die Optimierung des versuchstechnischen Aufwandes beim Einsatz eines Großrahmenschergerätes durch die Anwendung einer speziellen Mehrstufentechnik möglich ist. Die Vergleichsversuche mit unterschiedlichen Versuchsarten an diversen bindigen Lockergesteinen und an einem hochfesten Geogitter zeigen, dass das Ergebnis von Mehrstufenversuchen mit dem Ergebnis von Einstufenversuchen nahezu identisch ist und

leicht auf der sicheren Seite liegt. Die zwischen Einstufenversuchen und Mehrstufenversuchen ermittelten Abweichungen liegen in dem zulässigen Toleranzbereich ingenieurtechnischer Berechnungen. Großrahmenscherversuche als Mehrstufenversuche sind sehr wirtschaftlich, zeiteffektiv und stellen die Berechtigung von Einstufenversuchen unter den untersuchten Bedingungen sogar in Frage.

Danksagung

Für die finanzielle Unterstützung der DFG für die vorliegenden Arbeiten im Rahmen des Forschungsvorhabens "Verbundverhalten von Geokunststoffen in bindigen Böden" mit der Nummer KL506/5-1 sei an dieser Stelle gedankt.

Literatur

- [1] TAMÁSKOVICS, N. JUN.; TAMÁSKOVICS, N. SEN.: **Eljárás többlepcsős nyírókísérletre; (Methode für Scherversuche mit mehreren Stufen); Patentanmeldung Nr.PO800568, Ungarisches Patentamt Budapest, pp.8, Budapest, 2008, (in Ungarisch).**