



Institut für Bodenmechanik & Grundbau,
Rechbauerstraße 12, 8010 Graz



INSTITUT FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU TU GRAZ

Vergleichende Untersuchungen zur Bestimmung der Scherfestigkeit verschiedener Böden mit unterschiedlichen Versuchseinrichtungen und Aussagen über den Einfluss des von Überkornanteil

MASTERARBEIT von
Amer Hadzalic

Betreut von:
Oberrat Dipl.- Ing. Otto Leibniz

Begutachtet von:
Univ.-Prof. Dr. Dipl.-Ing. Roman Marte

Graz, im Januar 2016



OÖ Bodenprüfstelle,
Schirmerstraße 12, 4060 Leonding

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

04.01.2016

Datum / Date

Hadžević Amir

Unterschrift / Signature

Vorwort

Diese Arbeit ist nicht nur ein Teil eines Gesamtwerks aus langjährigem Streben nach Wissen, sondern auch eine Brücke. Eine Brücke, welche einen abgeschlossenen Lebensabschnitt mit einem Neuen verbindet. In einem Buch wäre diese Arbeit ein Punkt am Ende eines Satzes und zugleich ein neues Kapitel.

Diese Arbeit widme ich an meine Unterstützer und an die Leute die an mich glauben und mir vertrauten:

„Mama, Babo, Bubi, Hacko und meine restliche Familie. Hvala. Danke!“

Ein sehr großes Dankeschön richte ich an meine zwei Mentoren ohne welche es mir nicht möglich gewesen wäre die Masterarbeit auf dieses Niveau zu bringen:

„Oberrat DI Otto Leibniz & Hofrat DI Norbert Steinbacher“

Weiteres bedanke ich mich bei meinem Sponsor der „OÖ Bodenprüfstelle, Schirmerstraße 12, 4060 Leonding“ und dessen Mitarbeiter. Hierzu möchte ich mich besonders bei den Mitarbeitern des Erdbaulabors für die Hilfe bei den zahlreichen Versuchen und Problemstellungen bedanken:

„Ing. Rudolf Gattringer, Dipl. Ing. Dominik Schöfer, Ing. Harald Klinger, Jutta Gattringer, Manuel Kaiser, Günter Plöderl, Axel Demel, Gerhard Sageder, Daniel Schoberleitner, Manuel Wenzel, Stefan Würzel“.

Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist es vergleichende Scherversuche verschiedener Bodenproben (mit unterschiedlichem Größtkorn), in unterschiedlichen Versuchseinrichtungen durchzuführen, um den Einfluss des Überkornanteils auf das Scherverhalten der Bodenproben festzustellen.

In dieser Arbeit werden die Scherfestigkeit durch Scherversuche in einem Kleinrahmen- bzw. Großrahmenschergerät mit unterschiedlichen Scherboxabmessungen bestimmt.

Die Scherbox des Kleinrahmenschergerätes hat eine runde Querschnittsfläche mit dem Durchmesser 80 mm und der Probenhöhe 27 mm. Beim Großrahmenschergerät ist die Abmessung der Scherbox 300 x 300 x 190 mm.

Es werden die Scherparameter (φ , c) für zwei unterschiedliche Bodenproben in den beiden Versuchseinrichtungen bei unterschiedlichen Einbaudichten ermittelt. Die erste Bodenprobe (Material 1) ist ein sandiger Kies (si' sa Gr) und die zweite Bodenprobe (Material 2) ist ein schluffiger Kies (sa' si Gr).

Die Dichten bzw. der Wassergehalt mit denen die Böden eingebaut werden, werden aus dem Proctorversuch ermittelt und entsprechen 92 % ($D_{pr} = 92\%$) bzw. 97 % ($D_{pr} = 97\%$) der Proctordichte.

Die Scherversuche werden im Großrahmenschergerät mit einem Größtkorndurchmesser (GK) 31,5 mm durchgeführt. Für die Versuche im Kleinrahmenschergerät werden die Bodenproben auf ein GK 2 mm abgesiebt.

Die Auswertungen der Scherversuche werden miteinander verglichen mit Bezug auf:

- Einfluss des Überkornanteils bzw. Einfluss der unterschiedlichen Versuchseinrichtung auf die Scherparameter (φ , c) der Bodenproben
- Einfluss der unterschiedlichen Einbaudichten ($D_{pr} = 92\%$ bzw. $D_{pr} = 97\%$)
- relative Verschiebung zur Probenlänge bei der die maximale Scherfestigkeit erreicht wird
- maximale Setzung bzw. Hebung während der Verschiebung

Abstract

The goal of this Master's thesis is to make a comparative study, to find out how oversized particles affect the shear strength behaviour of soils and to determine the shear strength of different soils in different shear apparatus.

In this study, the shear strength will be investigated in the small shear box and in the large shear box. The diameter of the small shear box is 80 mm and the specimen height is 27 mm. The size of the large shear box is 300 x 300 mm with a specimen height of 190 mm.

The shear parameters (ϕ , c) for two different specimens will be determined in the large- and small shear box with different densities. The first specimen is a sandy gravel (si' sa Gr) and the second specimen is a silty gravel (sa' si Gr). The densities and the moisture content will be investigated from the standard proctor test. The densities for the shear box tests in the large- and small shear box conform 92 % and 97 % of the standard proctor density. The maximum particle diameter of the specimen in the small shear box test is 2 mm and in the large shear box 31,5 mm.

The results of the shear tests will be compared with respect to:

- the influence of various particle diameter in different shear apparatuses on the shear parameters (ϕ , c)
- the influence of various densities
- the relative displacement in relation to specimen length at failure
- the maximum settlement and heave during the shear displacement

Inhalt

1	Arbeitsablauf	1
2	Die Scherfestigkeit	3
2.1	Begriff der Scherfestigkeit τ_f	3
2.1.1	Restscherfestigkeit τ_r	3
2.1.2	Scherwegdiagramm	4
2.2	Scherbeanspruchung zwischen starren Körpern	5
2.2.1	Reibung auf einer schiefen Ebene	6
2.2.2	Haft- und Gleitreibung zwischen Körnern	7
2.3	Bruchbedingung	8
2.3.1	Effektive Spannungen	8
2.3.2	Bruchbedingung nach Mohr Coulomb	9
2.4	Effektive Scherparameter φ' , c'	10
2.4.1	Allgemeines	10
2.4.2	Der Reibungswinkel φ'	12
2.4.3	Die Kohäsion c'	12
2.5	Einflussgrößen bei nicht bindigen Böden	12
2.5.1	Gefügewiderstand	13

2.5.2 Brechen der Körner bei Verschiebung	13
2.5.3 Dilatanz & Kontraktanz	14
3 Materialwahl	15
3.1 Allgemeines	15
3.1.1 Bestimmung der Korngrößenverteilung	15
3.1.2 Korndichtenbestimmung (Kapillarpyknometer)	16
3.1.3 Bestimmung Anteil an gebrochenen Körnern	17
3.1.4 Proctordichte und optimaler Wassergehalt	17
3.2 Material 1 (si' sa Gr)	19
3.2.1 Korngrößenverteilung: M1 (si' sa Gr)	19
3.2.2 Korndichte ρ_s : M1 (si' sa Gr)	22
3.2.3 Gebrochene Körner: M1 (si' sa Gr)	23
3.2.4 Standard Proctorversuch: M1 (si' sa Gr)	23
3.3 Material 2 (sa' si Gr)	25
3.3.1 Korngrößenverteilung: M2 (sa' si Gr)	25
3.3.2 Korndichte ρ_s : M2 (sa' si Gr)	28
3.3.3 Gebrochene Körner: M2 (sa' si Gr)	29
3.3.4 Standard Proctorversuch: M2 (sa' si Gr)	29

3.4	Vergleich der verwendeten Böden	31
3.4.1	Vergleich der Korngrößenverteilung	31
3.4.2	Vergleich der Ergebnisse aus dem Proctorversuch	32
4	Rahmenscherversuch	33
4.1	Direkter Scherversuch	33
4.2	Gerätebeschreibung Allgemein	33
4.2.1	Aufbau und Bestandteile	33
4.2.2	Messaufnehmer	33
4.2.3	Anzahl der Probekörper	34
4.2.4	Kalibrierversuche	35
5	Kleinrahmenscherversuch	36
5.1	Bestandteile des Kleinrahmenschergerätes	36
5.1.1	Rahmenscherbox	36
5.1.2	Belastungsvorrichtungen	37
5.1.3	Messaufnehmer	37
5.2	Versuchsvorbereitung, Einbau	38
5.3	Durchführung Vergleichsversuche	40
5.4	Versuchsergebnisse Kleinrahmenschergerät (Kl.)	41

5.4.1	Kl. Kalibrierversuch: M1 (GK 2 mm) - $D_{pr}=97\%$	41
5.4.2	Kl. Vergleichsversuch: M1 (si' sa Gr)	42
5.4.3	Kl. Vergleichsversuch: M2 (sa' si Gr)	44
6	Großrahmenscher Versuch	46
6.1	Bestandteile des Großrahmenschergerätes	46
6.1.1	Rahmenscherbox	46
6.1.2	Belastungsvorrichtungen	47
6.1.3	Messaufnehmer	49
6.2	Versuchsvorbereitung, Einbau	50
6.3	Durchführung Vergleichsversuch	51
6.4	Versuchsergebnisse – Großrahmenschergerät (Gr.)	52
6.4.1	Gr. Kalibrierversuch: M1 (GK 2 mm) - $D_{pr}=97\%$	52
6.4.2	Gr. Vergleichsversuch: M1 (si' sa Gr)	53
6.4.3	Gr. Vergleichsversuch: M2 (si' sa Gr)	55
7	Evaluierung und Erkenntnisse der Scherversuche	57
7.1	Rückblick auf äquivalente Vergleichsversuche	57
7.1.1	Einfluss des Überkorns (Benson & Bareither & Edil, 2008)	57
7.1.2	Weitere Vergleichsversuche	58

7.2	Vergleich der Lagerungsdichte zur Proctordichte	59
7.2.1	Lagerungsdichte (DIN 18126: 1986)	59
7.2.2	Lagerungsdichte M1 (si‘ sa Gr)	60
7.2.3	Lagerungsdichte M2 (sa‘ si Gr)	61
7.3	Evaluierung der Kalibrierversuche – M1, $D_{pr}= 97 \%$	62
7.3.1	Vergleich von φ , c (M1, $D_{pr}= 97 \%$)	62
7.3.2	Relativer Scherweg (M1, $D_{pr}= 97 \%$)	64
7.3.3	Setzungen und Hebungen (M1, $D_{pr}= 97 \%$)	65
7.4	Evaluierung der Vergleichsversuche– M1, $D_{pr}=92 \%$	66
7.4.1	Vergleich von φ , c (M1, $D_{pr}= 92 \%$)	66
7.4.2	Relativer Scherweg (M1, $D_{pr}= 92 \%$)	68
7.4.3	Setzung und Hebung (M1, $D_{pr}= 92 \%$)	69
7.5	Evaluierung der Vergleichversuche – M1, $D_{pr}= 97 \%$	70
7.5.1	Vergleich von φ , c (M1, $D_{pr}= 97 \%$)	70
7.5.2	Relativer Scherweg (M1, $D_{pr}= 97 \%$)	72
7.5.3	Setzung und Hebung (M1, $D_{pr}= 97 \%$)	73
7.6	Evaluierung der Vergleichversuche – M2, $D_{pr}= 92 \%$	74
7.6.1	Vergleich von φ , c (M2, $D_{pr}= 92 \%$)	74
7.6.2	Relativer Scherweg (M2, $D_{pr}= 92 \%$)	76

7.6.3	Setzung und Hebung (Material 2, $D_{pr}=92\%$)	77
7.7	Evaluierung der Vergleichversuche – M2, $D_{pr}=97\%$	78
7.7.1	Vergleich von ϕ , c (M2, $D_{pr}=97\%$)	78
7.7.2	Relativer Scherweg (M2, $D_{pr}=97\%$)	80
7.7.3	Setzung und Hebung (M2, $D_{pr}=97\%$)	81
7.7.4	Anomalie der Ergebnisse für ϕ bei Kl. M2	82
7.8	Fazit – Erkenntnisse und Thesen	82
Anhang A		A1
A.1	Kleinrahmenschergerät (Kl.) Kalibrierversuche M1 (si' sa Gr)	A1
A.1.1	Kl. M1 / $D_{pr}=97\%$ / GK 2 mm	A1
A.2	Kleinrahmenschergerät Vergleichsversuch - M2	A10
A.2.1	Kl. M1 / $D_{pr}=97\%$ / GK 2 mm	A10
A.2.2	Kl. M1 / $D_{pr}=92\%$ / GK 2 mm	A19
A.3	Kleinrahmenschergerät Vergleichsversuche – M2	A28
A.3.1	Kl. M2 / $D_{pr}=97\%$ / GK 2 mm	A28
A.3.2	Kl. M2 / $D_{pr}=92\%$ / GK 2 mm	A37

Anhang B	B1
B.1 Großrahmenschergerät (Gr.) Kalibrierversuche	B1
B.1.1 Gr. M1 / $D_{pr}=97\%$ / GK 2 mm	B1
B.2 Großrahmenschergerät Vergleichsversuche M1	B10
B.2.1 Gr. M1 / $D_{pr}=92\%$ / GK 31,5 mm	B10
B.2.2 Gr. M1 / $D_{pr}=97\%$ / GK 31,5 mm	B19
B.3 Großrahmenschergerät Vergleichsversuche – M2	B28
B.3.1 Gr. M2 / $D_{pr}=92\%$ / GK 31,5 mm	B28
B.3.2 Gr. M2 / $D_{pr}=97\%$ / GK 31,5 mm	B37

Literaturverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen

Große Buchstaben

D	[-]	Lagerungsdichte
H	[mm]	Probenhöhe im Großrahmenschergerät
A	[mm]	Probenabmessung im Großrahmenschergerät (Länge x Breite)
R	[kN]	Reibungskraft
G	[kN]	Gewichtskraft
T	[kN]	Tangentialkraft
N	[kN]	Normalkraft
D_{pr}	[%]	Verdichtungsgrad in Abhängigkeit von der Proctordichte
Gr	[-]	Gravel (Kies)
GK	[-]	größter Korndurchmesser (Größtkorn)
$M1$	[-]	Material 1
$M2$	[-]	Material 2
$Kl.$	[-]	Kleinrahmenscherversuch
$Gr.$	[-]	Großrahmenscherversuch

Kleine Buchstaben

u	[kN/m ²]	Porenwasserdruck
c	[kN/m ²]	Kohäsion
c'	[kN/m ²]	effektive Kohäsion
x	[mm]	Scherweg
sa	[-]	Sand (Sand)
si	[-]	Silt (Schluff)

Griechische Buchstaben

d	[mm]	Probendurchmesser im Kleinrahmenschergerät
h	[mm]	Probenhöhe im Kleinrahmenschergerät
τ	[kN/m ²]	Schubspannung in der Gleitfläche
τ_f	[kN/m ²]	Scherfestigkeit (max. Schubspannung)
τ_r	[kN/m ²]	Restscherfestigkeit
φ	[°]	Reibungswinkel
φ'	[°]	effektiver Reibungswinkel
α	[°]	Neigung der Ebene
σ	[kN/m ²]	totale Spannung
σ'	[kN/m ²]	effektive Normalspannung
σ_1	[kN/m ²]	Normalspannung – 1. Belastungsstufe
σ_2	[kN/m ²]	Normalspannung – 2. Belastungsstufe

σ_3	[kN/m ²]	Normalspannung – 3. Belastungsstufe
ρ_{pr}	[Mg/m ³]	Proctordichte
ρ_s	[Mg/m ³]	Korndichte
ρ_d	[Mg/m ³]	Trockendichte
ρ_{max}	[Mg/m ³]	maximale Lagerungsdichte
ρ_{min}	[Mg/m ³]	minimale Lagerungsdichte

1 Arbeitsablauf

Diese Arbeit wurde nach folgenden Punkten erarbeitet (Abb. 1):

- Als erstes ist man in Kapitel 2 auf den Begriff der Scherfestigkeit in der Bodenmechanik mit den zugehörigen Scherparametern, der Bruchbedingung und der Einflussgrößen auf die Scherfestigkeit näher eingegangen.
- Im dritten Kapitel wurden die ausgewählten Materialien für die Scherversuche vorgestellt – Material 1 (si' sa Gr) bzw. Material 2 (sa' si Gr). Es erfolgte eine Charakterisierung der Materialien in Bezug auf die Korngrößenverteilung, Proctordichte, Korndichte und den Anteil an gebrochenen Körnern.
- Das vierte Kapitel beinhaltet eine allgemeine Erläuterung der Funktionsweise des Rahmenscherversuches.
- In den nächsten zwei Kapiteln dieser Arbeit wurde der Scherversuch im Kleinrahmenschergerät bzw. der im Großrahmenschergerät erläutert. Zuerst ist man auf die einzelnen Bestandteile und relevanten technischen Daten der beiden Schergeräte näher eingegangen. Danach wurden die Versuchsvorbereitung, Durchführung der Versuche und die einzelnen Versuchsergebnisse aus den Scherversuchen präsentiert.
- Im letzten Abschnitt erfolgte eine Evaluierung der Scherversuche und die daraus gewonnene Erkenntnis wurde erläutert. Es erfolgte auch ein Vergleich der Einbaudichten mit der Lagerungsdichte nach DIN 18126: 1986. Außerdem wurde in diesem Kapitel eine Literaturrecherche auf äquivalente Versuche bzw. Forschungen durchgeführt.
- In den Anhängen A bzw. B sind die (detaillierteren) Ergebnisse zu den einzelnen Scherversuchen samt deren grafische Auswertung dargestellt.

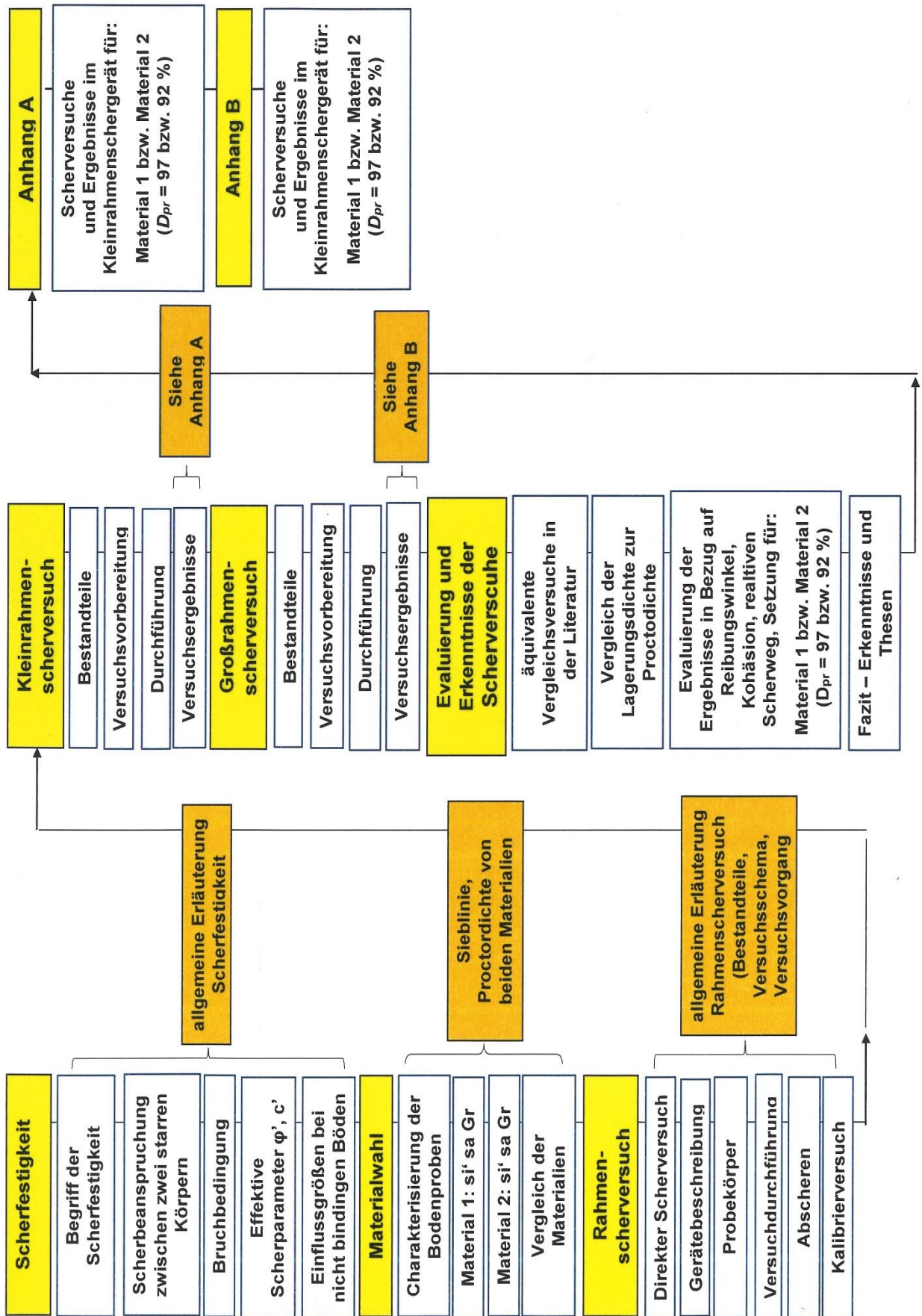


Abb. 1: Arbeitsablauf der Arbeit

2 Die Scherfestigkeit

2.1 Begriff der Scherfestigkeit τ_f

Die Scherfestigkeit τ_f ist in der Bodenmechanik eine bedeutende Kenngröße. Aus den ermittelten Parametern der Scherfestigkeit τ_f eines Bodens, lassen sich Bruchvorgänge bzw. Versagensformen des Bodens errechnen (Merklein-Lempp, 2015). In der Praxis lassen sich dadurch die Tragfähigkeit eines Baugrundes bei Belastung, einwirkende Erddrücke oder die Standsicherheit von Böschungen ermitteln.

Der allgemeine Begriff der Scherfestigkeit τ_f ist der Widerstand, welcher ein bestimmter Festkörper entgegen einer einwirkenden Schubspannung aktiviert. Nach dem Überschreiten der maximalen Scherfestigkeit τ_f folgt das Versagen des Festkörpers.

2.1.1 Restscherfestigkeit τ_r

Neben der Scherfestigkeit eines Bodens spielt die Restscherfestigkeit τ_r im Grundbau eine wichtige Rolle. Die Restscherfestigkeit τ_r ist jene minimale (konstante) Schubspannung, welche sich nach dem Erreichen der Scherfestigkeit (maximale Schubspannung) mit zunehmender Verschiebung (Scherweg) einstellt (Abb. 2). Die Restscherfestigkeit ist der Wert der sich (bei bindigen Böden) nach sehr großer Verschiebung und Einordnen der Tonminerale einstellt. Ergibt sich nach einem Anstieg der Schubspannung eine kontinuierliche maximale Schubspannung während des Abschervorganges ein bzw. fällt diese nicht ab, hat dieser Boden keine (charakteristische) Restscherfestigkeit (Abb. 2) (ÖNORM B4416:1978).

2.1.2 Scherwegdiagramm

Das Scherwegdiagramm zeigt den Verlauf der Schubspannung τ in Abhängigkeit vom Scherweg x (Abb. 2). Der Verlauf der Schubspannung τ , im Scherwegdiagramm, wird auch als „Arbeitslinie“ des Bodens bezeichnet.

Der Schubspannungsverlauf eines Bodens wird als Kurve dargestellt.

Der Punkt, an dem die maximale Schubspannung eines Bodens im Scherwegdiagramm erreicht wurde, wird als „Peak“ bezeichnet.

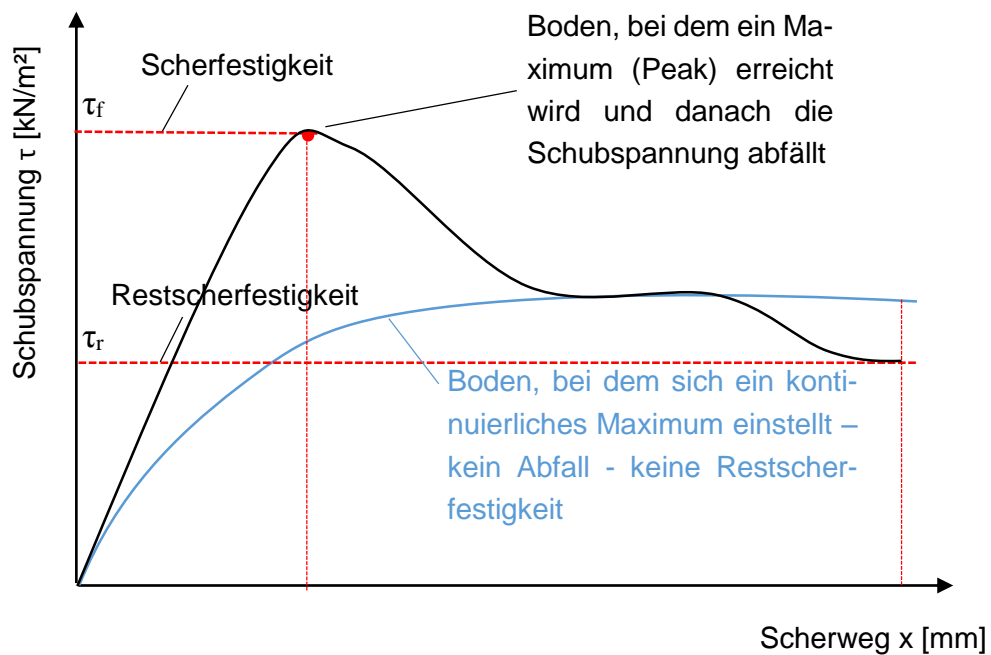


Abb. 2: Scherwegdiagramm, Darstellung der Scher- bzw. Restscherfestigkeit

2.2 Scherbeanspruchung zwischen starren Körpern

Maßgebend bei der Verschiebung zweier starren Körper und des dabei auftretenden Widerstandes ist die Reibung. Wird versucht, einen Körper entlang einer starren Unterlage zu verschieben, wirkt die Reibungskraft entgegen. Erst nachdem die Reibungskraft überwunden worden ist, lässt sich der Körper verschieben. Beim Überwinden der Reibungskraft wird die maximale Scherkraft bzw. Scherfestigkeit (max. Schubspannung) erreicht.

Beim Aufbringen einer Tangentialkraft T auf einen Körper wird eine entgegengesetzte Reibungskraft R mobilisiert. Diese errechnet sich aus dem Produkt der Gewichtskraft G und dem Tangens des Reibungswinkels φ , welcher abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktfläche ist (Abb. 3):

$$R = G \cdot \tan \varphi \quad (1)$$

R	[kN]	Reibungskraft
G	[kN]	Gewichtskraft
φ	[°]	Reibungswinkel

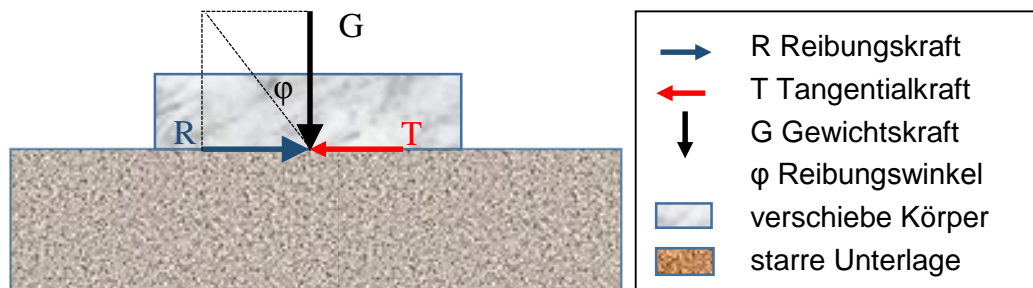


Abb. 3: Auftretende Kräfte beim Verschieben eines Körpers

Der Körper bleibt in Ruhe, solange die Tangentialkraft T kleiner als die Reibungskraft R ist. Wird die Tangentialkraft T jedoch größer als die Reibungskraft R , bewegt sich der Körper.

2.2.1 Reibung auf einer schiefen Ebene

Befindet sich ein Körper auf einer schiefen, starren Unterlage, wird die Gewichtskraft aufgrund der Schwerkraft in eine auf die schiefe Ebene wirkende Normalkraft N und eine Tangentialkraft T geteilt.

Die Normalkraft N wird wie in Gleichung (1) statt der Gewichtskraft G als Faktor zur Ermittlung der entgegen der Verschiebung wirkenden Reibungskraft R angesetzt (Gleichung (4)). Hingegen ist die Tangentialkraft T eine bei der Verschiebung treibende Kraft (Abb. 4).

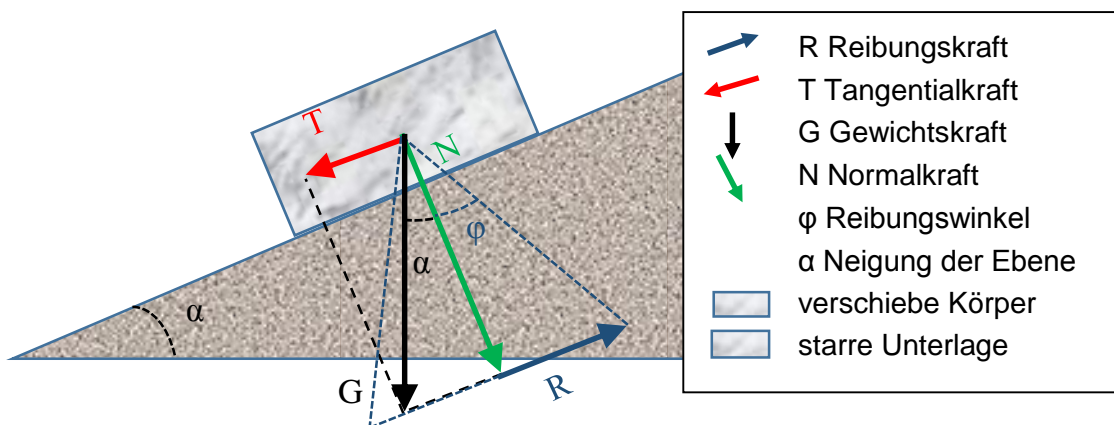


Abb. 4: Reibung auf einer schiefen Ebene

$$N = G \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

N	[kN]	Normalkraft
G	[kN]	Gewichtskraft
α	[°]	Neigung der Ebene

$$T = G \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

T	[kN]	Tangentialkraft
G	[kN]	Gewichtskraft
α	[°]	Neigung der Ebene

$$R = N \cdot \tan \varphi \quad (4)$$

R	[kN]	Reibungskraft
N	[kN]	Normalkraft
φ	[°]	Reibungswinkel

2.2.2 Haft- und Gleitreibung zwischen Körnern

Leonardo da Vinci hat schon in Bezug auf das Verschieben zweier Körper gegeneinander festgestellt, dass der Scherwiderstand proportional zur Normalkraft zunimmt. Der Scherwiderstand wird außerdem nicht von der Geometrie der Körper beeinflusst.

Der Grund dafür ist, dass die Körper sich nie flächig berühren sondern genauer betrachtet nur punktuell (Abb. 5) (Lambe & Whitman, 1969).

Denn wären die Kontaktflächen aus demselben Material, glatt und gereinigt, damit sie absolut eben und frei von Fremdstoffen (z.B. auf Kontaktflächen liegende Partikel) sind, dann würden die Kontaktflächen „Fläche auf Fläche“ liegen können und würden aufgrund von „Kaltverschweißung“ ineinander verschwinden. Dies beruht auf dem Prinzip der kleinsten inneren Oberflächen (Smolczyk, 1972).

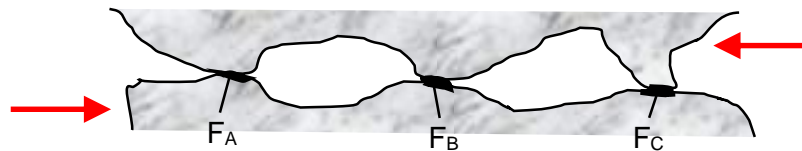


Abb. 5: Kontaktbereich zweier berührenden Körper (Lambe & Whitman, 1969)

Wie schon erwähnt, ist die Haftreibung der Schubwiderstand bis zum Aktivieren der Bewegung in den Kontaktpunkten zweier Körper. Die maximale Schubkraft entspricht also der maximalen Haftreibungskraft in den Kontaktpunkten der berührenden Körper.

Nachdem die Haftreibungskraft überwunden ist bzw. sobald die Kontaktpunkte „versagen“, erfolgt ein Reibungskraftabfall und eine Verschiebung (Gleiten) der Körper. Während der Verschiebung der Körper wirkt die Gleitreibungskraft, die geringer als die Haftreibungskraft ist (Lambe & Whitman, 1969).

2.3 Bruchbedingung

Die analytische Darstellung bzw. rechnerische Ermittlung von aufnehmbaren Spannungen eines Bodens erfolgt nach der Mohr- Coloumb'schen Bruchbedingung.

Das Scherverhalten bzw. die Scherparameter des Bodens werden durch die Bruchbedingung definiert.

2.3.1 Effektive Spannungen

In der Bodenmechanik gibt es totale und effektive Spannungen.

Bei den effektiven Spannungen wird der Porenwasserdruck nicht berücksichtigt, weil man davon ausgeht, dass das eingeschlossene Porenwasser durch Konsolidierung ausgepresst wurde. Bei den totalen Spannungsverhältnissen wird der durch Belastung erzeugte Porenwasserdruck hingegen berücksichtigt.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (5)$$

σ'	[kN/m ²]	effektive Spannung
σ	[kN/m ²]	totale Spannung
u	[kN/m ²]	Porenwasserdruck

2.3.2 Bruchbedingung nach Mohr Coulomb

In der Bodenmechanik wird das Verhalten beim Versagen eines Bodenkörpers über die Bruchbedingung nach Mohr Coulomb definiert. Dabei stellt die Bruchgerade (Schergerade) die maximale effektive Schubspannung τ_f' , in einer Gleitfläche, zufolge einer bestimmten effektiven Normalspannung σ' dar (Abb. 6). Die Neigung der Bruchgerade ist gleich dem effektiven Reibungswinkel φ' . Der Punkt an dem die Bruchgerade die Schubspannungsachse τ' scheidet wird als effektive Kohäsion c' bezeichnet (Abb. 6). Zur Darstellung der Bruchgerade ist es notwendig bei drei unterschiedlichen effektiven Normalspannungen σ' die maximalen effektiven Schubspannungen τ_f' zu ermitteln (Abb. 6) (Kolymbas, 1998).

Die Bruchbedingung nach Mohr Coulomb ist (nach folgender Funktion) definiert durch die effektive Normalspannung σ' und die auftretende Schubspannung τ' in der Gleitfläche (Scherfuge) (ÖNORM B4416:1978):

$$\tau' = c' + \sigma' \cdot \tan \varphi' \quad (6)$$

σ'	[kN/m ²]	effektive Normalspannung
τ'	[kN/m ²]	Schubspannung in der Gleitfläche
c'	[kN/m ²]	effektive Kohäsion
φ'	[°]	effektiver Reibungswinkel

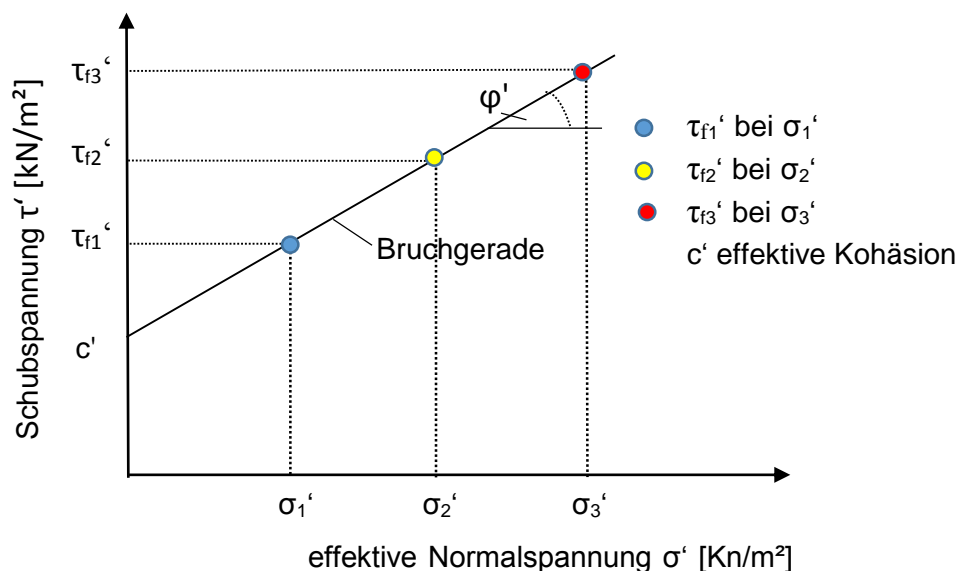


Abb. 6: Bruchbedingung nach Mohr Coulomb in einer Gleitfläche (Scherfuge)

2.4 Effektive Scherparameter φ' , c'

2.4.1 Allgemeines

Die zwei effektiven Scherparameter zur Ermittlung bzw. Darstellung der Scherfestigkeit eines Bodenkörpers sind der effektive Reibungswinkel φ' und die effektive Kohäsion c' . Um effektive Scherparameter ermitteln zu können, werden folgende Versuchssysteme verwendet (ÖNORM B4416:1978):

- Konsolidiert - dräniertes Versuch (CD-Versuch)
- Konsolidiert - undräniertes Versuch (CU-Versuch mit Porenwasserdruck Messung)

Bei den konsolidiert dränierten Versuchsbedingungen liegt ein offenes System vor. Das offene System ermöglicht dem Porenwasser in der Bodenprobe zu entweichen, sofern der Scherversuch entsprechend der Bodenprobe „langsam“ gefahren wird. Dies wird durch eine wasserdurchlässige Konstruktion des Scherapparates und eine entsprechend „langsame“ Schergeschwindigkeit sichergestellt. Dadurch treten nur effektive Spannungen auf, da keine Porenwasserdrücke aufgebaut werden.

Liegt ein geschlossenes (undräniertes) System vor, dann spricht man von konsolidiert undränierten Versuchsbedingungen. Hier wird die Konsolidierung nicht ermöglicht. Der Porenwasserdruck wird gemessen und von den auf die Bodenprobe einwirkenden totalen Spannungen abgezogen (siehe Gleichung (5)) (ÖNORM B4416:1978).

In dieser Arbeit werden die Scherversuche bei folgenden definierten Versuchsbedingungen durchgeführt:

Es werden teilgesättigte Bodenproben verwendet, d.h. die Bodenprobe ist nicht vollständig gesättigt. Die Versuchsbedingungen sind so gewählt worden, dass keine Konsolidierung bzw. Entwässerung stattfindet (unkonsolidiert undräniert).

2.4.1.1 Unkonsolidiert UndrÄnierte teilgesÄttigte Bedingungen

Die Bruchgerade der teilgesÄttigten Bodenprobe beim unkonsolidierten undrÄnieren Versuch liegt im $\sigma', \sigma - \tau, \tau'$ Diagramm zwischen den Bruchgeraden vom CD-Versuch und dem gesÄttigten UU-Versuch (Abb. 7). Bei totalen Spannungen σ ist beim gesÄttigten UU-Versuch der Reibungswinkel $\varphi_u \approx 0$. Die KohÄsion c_u ist von der totalen Spannung σ unabhÄngig (Abb. 7) (Boley, 2012).

Der Reibungswinkel der teilgesÄttigten Bodenprobe φ bzw. die KohÄsion c ist kleiner als der Reibungswinkel φ', c' (Abb. 7), aber grÄÄer als φ_u und c_u (Boley, 2012).

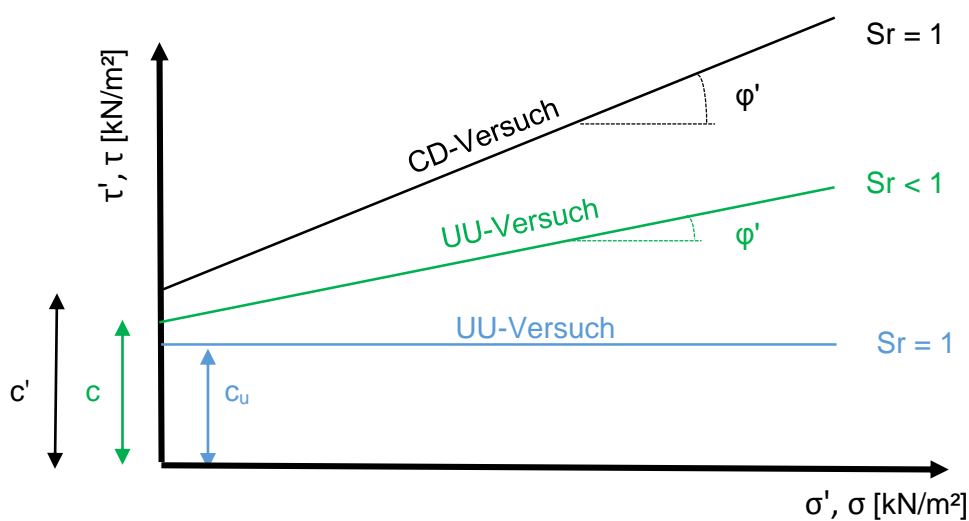


Abb. 7: Darstellung der Bruchgeraden einer Bodenprobe im $\sigma', \sigma/\tau', \tau$ -Diagramm in AbhÄngigkeit des SÄttigungsgrades (voll- bzw. teilgesÄttigt) und der EntwÄsserungsbedingung (CD, UU)

Kommentar: Diese Art der VersuchsdurchfÄhrung hat den Vorteil, dass sich die Scherparameter relativ schnell im Gegensatz zu den anderen erwÄhnten Versuchsmethoden ermitteln lassen. AuÄerdem ist sie sehr praxisbezogen, weil in der Natur oft BÄden im teilgesÄttigten Zustand auftreten.

Bei dieser Art der VersuchsdurchfÄhrung ist nicht sichergestellt, ob sich PorenwasserdrÄcke (Über- oder Unterdruck) entwickelt haben oder nicht und somit weiÄ man nicht „welche Scherfestigkeit“ eigentlich gemessen wurde. Dies wiederum macht die Vergleichbarkeit der durchgefÄhrten Scherversuche schwierig.

2.4.2 Der Reibungswinkel φ'

Bei Formänderungen eines Bodens treten die Widerstände der Kornreibung und des Gefügewiderstandes auf. Zusammengefasst werden die Widerstände von Kornreibung und Gefügewiderstand, in den Widerstand der inneren Reibung.

Der effektive Widerstand der inneren Reibung wird in der Bodenmechanik mit dem Winkel φ' angegeben. Er wird auch als effektiver Reibungswinkel bezeichnet (Kolymbas, 1998).

2.4.3 Die Kohäsion c'

Neben dem Reibungswinkel ist die Kohäsion ein Parameter zur Charakterisierung der Scherfestigkeit eines Bodens.

Die Kohäsion wird physikalisch definiert als Bindungskräfte zwischen Atomen bzw. Molekülen. Sie ist vorstellbar als „innerer Zusammenhalt“ einzelner Bodenpartikel und verursacht ohne zusätzliche Normalspannung eine Schubspannung (Scherfestigkeit) zwischen den Bodenpartikeln.

Die effektive innere Spannung zwischen den Bodenpartikeln wird als effektive Kohäsion c' bezeichnet. Die Ursache für die effektive Kohäsion c' sind elektrostatische Anziehungskräfte (Oberflächenkräfte) zwischen den Mineralkörnern. Beeinflusst wird die Kohäsion durch die Größe der Mineralkörner (Kornfeinheit) und durch den Gehalt an Tonmineralien (Adam, 2009).

2.5 Einflussgrößen bei nicht bindigen Böden

Zur Beurteilung eines nicht bindigen Bodens im Hinblick auf die Scherfestigkeit ist der Reibungswinkel φ' und die einwirkende Normalspannung σ' von Bedeutung (Gleichung (7)). Die effektive Kohäsion c' ist bei nicht bindigen Böden nicht i.A. relevant. Die Ursache dafür ist, dass beim nicht bindigen Böden keine elektrostatischen Anziehungskräfte zwischen den Körnern herrschen (Kapitel 2.4.3). Oftmals ergibt sich bei Scherversuchen aber eine Kohäsion durch das Verzahnen der Körner.

Der effektive Reibungswinkel φ' wird von folgenden Faktoren beeinflusst

- Kornform, Oberflächenrauigkeit - Gefügewiderstand
- Brechen der Körner bei Verschiebung
- Dilatanz & Kontraktanz

2.5.1 Gefügewiderstand

Neben dem Widerstand durch Gleitreibung (Kornreibung), welche beim Bewegen eines Kornhaufwerks auftritt, entsteht auch ein Widerstand durch Verhaken der Körner im Gefüge. Der Widerstand durch Verhaken der Körner im Gefüge wird auch als Gefügewiderstand bezeichnet.

Prinzipiell verhalten sich die Widerstände infolge Kornreibung und Verhaken der Körner im Gefüge ähnlich. Bei der Kornreibung tritt eine Verzahnung an den Kontaktstellen der sich berührenden Kornoberflächen, bei einem Kornhaufwerk tritt infolge des Verhakens der einzelnen Körner ein Widerstand im Verband (Gefüge) auf. Je größer der Widerstand durch Verhaken der einzelnen Körner, umso größer ist der Gefügewiderstand (Smoltczyk, 1972).

2.5.2 Brechen der Körner bei Verschiebung

Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass Kornbruch vorwiegend bei einem hohen Normalspannungsniveau, geringer Gesteinsfestigkeit und bestimmter Kornformen (z.B. Kantkorn) auftritt.

Bei der Scherverschiebung Verhaken die Körner und die Scherbelastung wird auf den Kontaktbereich der „verhakten“ Körner übertragen. Hier soll erwähnt werden, dass Kantkörner leichter verhaken als Rundkörner. Die höchstbelasteten Körner (in Bezug auf das Verhältnis Festigkeit zu Belastung) können nachgeben und brechen bzw. abgeschert werden. In weiterer Folge können bei kontinuierlicher Verschiebung ein Versagen weiterer Körner auftreten, bis der Verschiebevorgang beendet ist.

Die Größe der Belastung, welche die einzelnen Körner aufnehmen können ohne zu versagen, hängt von deren Gesteinsfestigkeit ab.

2.5.3 Dilatanz & Kontraktanz

Die Größe der Scherfestigkeit eines nicht bindigen Bodens wird von der Lagerungsdichte bzw. der Dichte, mit der die Bodenprobe in eine Versuchseinrichtung eingebaut wird beeinflusst.

Veranschaulicht wird dieser Einfluss mithilfe eines Walzenmodells, bei dem ein Boden durch runde Körner mit gleichem Durchmesser dargestellt wird:

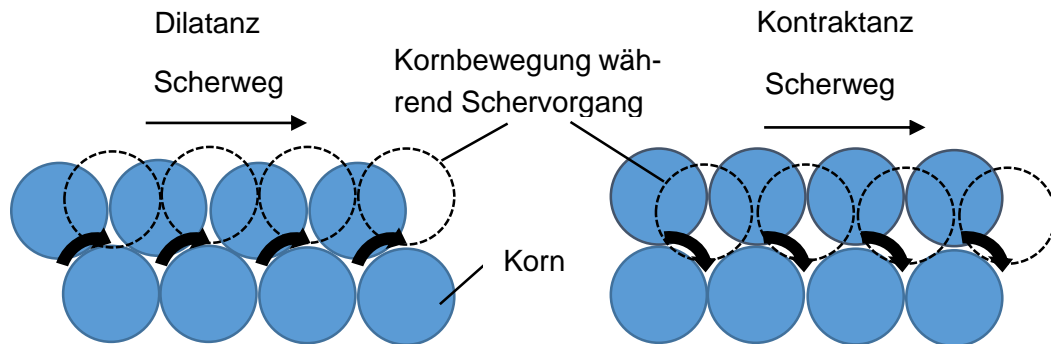


Abb. 8: Walzenmodell zur Darstellung von Volumenänderung durch Scherung eines nicht bindigen Bodens in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte: Dilatanz (linkes Bild) – Kontraktanz (rechtes Bild) (Kuntsche, 2000)

Bei dichter Lagerung müssen die Körner während der Scherbewegung aneinander aufgleiten (Abb. 8 linkes Bild). Dadurch erhöht sich das Porenvolumen, es kommt zu einer Volumenvergrößerung. Diesen Effekt bezeichnet man als Dilatanz.

Aus lockerer Lagerung resultiert eine Volumenverkleinerung während der Scherbewegung. Der Grund dafür ist, dass im Zuge des Schervorganges die bewegten Körner den Porenraum zwischen anderen Körnern füllen (Abb. 8 rechtes Bild). Die Volumenverkleinerung wird als Kontraktanz bezeichnet (Kuntsche, 2000).

Im Gegensatz zum Walzenmodell, bei dem Kontraktanz (Abb. 8 rechtes Bild) auftritt, ist beim Modell mit Dilatanz (Abb. 8 linkes Bild) der Widerstand gegen die Scherbewegung größer.

Durch das Aufgleiten der Körner bei dichter Lagerung (Abb. 8) „verhaken“ sich die Körner besser, es steigt der Widerstand der inneren Reibung und somit die Scherfestigkeit bzw. der Reibungswinkel φ' . Je dichter die Lagerung der Körner ist, desto steiler steigt am Anfang des Abschervorganges die Schubspannung τ proportional zum Scherweg x im Scherwegdiagramm an (Adam, 2009).

Aus diesem Grund ist es notwendig die Ergebnisse eines Scherversuches (Scherfestigkeit bzw. Scherparameter φ') auf die Lagerungsdichte bzw. Einbaudichte der Bodenprobe zu beziehen, weil bei gleichem Material unterschiedliche Werte für die Scherfestigkeit bzw. den Reibungswinkel φ' in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte auftreten können.

3 Materialwahl

3.1 Allgemeines

Die Scherfestigkeit und die jeweiligen Scherparameter werden an zwei ausgewählten Bodenproben getestet.

Beide Materialien werden auf einen größten Korndurchmesser (GK) von 31,5 mm und 2 mm abgesiebt. Das Scherverhalten der Bodenproben wird beim Kleinrahmenschersversuch mit einem Größtkorn (GK) von 2 mm und im Großrahmenschersversuch mit einem von GK 31,5 mm getestet.

Die Korngrößenverteilungen für jedes Material bzw. jedes Größtkorn werden gemäß ÖNORM B 4412:1974 ermittelt.

Neben den Korngrößenverteilungen sind auch die Proctordichten zu ermitteln, da die Bodenproben mit unterschiedlichen Dichten in Abhängigkeit von der Proctordichte eingebaut werden. Der Proctorversuch wird gemäß ÖNORM B 4418:1981 durchgeführt.

Zusätzlich wurde auch der Anteil an gebrochenen Körnern (Kantkorn) bzw. der Anteil an gerundeten Körnern (Rundkorn) (ÖNORM EN 933-5/ A1: 2004) und die Korndichte mit dem Kapillarpyknometer (ÖNORM B 4413: 2012) für die Probenmaterialien bestimmt.

Die Ergebnisse der Korngrößenverteilungen (Schlamm + Sieb), Proctordichten bzw. Proctorkurven, Rundungsgrade und Korndichten der Bodenproben werden in dem Kapitel 3.2 (Material 1 - si' sa Gr) bzw. 3.3 (Material 2 - sa' si Gr) dargestellt.

3.1.1 Bestimmung der Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung zeigt die Zusammensetzung eines Bodens aus verschiedenen Korngrößen.

Die Korngrößenverteilung wird aus der Siebanalyse ($GK \geq 0,063$ mm) bzw. Schlämmanalyse ($GK < 0,063$ mm) ermittelt (ÖNORM B 4412:1974).

2.1.1.1 Korngrößenverteilung aus der Siebanalyse

Die Ermittlung der Korngrößenverteilung durch die Siebung erfolgt mithilfe von genormten Sieben mit unterschiedlich großen Maschenweiten in Anlehnung an die ÖNORM B 4412: 1974. Die Größe der Maschenweite bezieht sich auf die nach Norm definierten Korngrößen.

Vor der Trennung der einzelnen Kornfraktionen wird die Bodenprobe gewaschen und im Ofen bei einer Temperatur von 110 °C getrocknet.

Zur Trennung der einzelnen Kornfraktionen wird ein Siebturm verwendet, bei dem durch automatisches Vibrieren der Bodenplatte die unterschiedlich großen Körner voneinander getrennt werden und auf der jeweiligen Siebmaschenweite liegen bleiben. Dabei sind die Siebe nach der Größe der Maschenweite aufgebaut.

Die Korngrößenverteilung eines Bodens wird in einer Kornverteilungsdiagramm (Sieblinie) dargestellt, bei der man den prozentuellen Anteil der jeweiligen Korngröße ablesen kann (ÖNORM B 4412:1974).

2.1.1.2 Korngrößenverteilung aus der Schlämmanalyse

Kornverteilungen feinkörniger Böden (Schluff bzw. Ton) sind nicht mehr mit der Siebanalyse sondern mit der Schlämmanalyse bestimmbar.

Durch Beimengen von destilliertem Wasser + Dispergierungsmittel (Natriumpyrophosphat) wird die Bodenprobe zu einer Suspension aufgerührt. Die Suspension wird in einen Messzylinder eingefüllt. Mithilfe eines Aräometers wird die Dichte und Temperatur der Suspension in definierten zeitlichen Abständen normgemäß gemessen. Dadurch lässt sich auf die Dichteänderung rückschließen. Aus der (zeitlichen) Dichteänderung der Suspension werden die Sinkgeschwindigkeiten bestimmt.

Nach der Grundlage des Stoke'schen Gesetzes wird der Anteil der einzelnen Kornfraktionen in der Bodenprobe bestimmt (ÖNORM B 4412:1974).

3.1.2 Korndichtenbestimmung (Kapillarpyknometer)

Als Korndichte ρ_s wird jene Dichte bezeichnet, welche aus dem Verhältnis von Masse des Feststoffes m_d zum Volumen des Feststoffes V_k hervorgeht (8) (ÖNORM B 4413: 2012):

$$\rho_s = \frac{m_d}{V_k} \quad (9)$$

ρ_s	[Mg/m ³]	Korndichte
m_d	[kN]	Feststoffmasse (trocken)
V_k	[m ³]	Volumen Feststoff (trocken)

Die Korndichte wird mit dem physikalischen Prinzip der durch den Feststoff verdrängten Wassermasse bestimmt (ÖNORM B 4413: 2012).

Bei der Bestimmung der Korndichte mithilfe des Kapillarpyknometers sind (abgesiebte) Proben mit einem GK < 4 mm zu verwenden.

Um das Volumen V_k des Feststoffes zu bestimmen wird zunächst das Volumen eines Kapillarpyknometers ermittelt. Danach ist bei einem eingebrachten Feststoffgehalt von ca. 20 g das eingefüllte Wasservolumen im Kapillarpyknometer zu ermitteln.

Es ist destilliertes bzw. entlüftetes Wasser zu verwenden (ÖNORM B 4413: 2012).

Die Korndichte wurde je Material dreimal bestimmt und der Durchschnitt aus den Ergebnissen gebildet.

3.1.3 Bestimmung Anteil an gebrochenen Körnern

Der Anteil an (vollständig-) gebrochenen bzw. (vollständig-) gerundeten Körnern wird in Anlehnung an das Prüfverfahren gemäß ÖNORM EN 933-5/ A1: 2004 ermittelt. Dieses Prüfverfahren dient zur Erfassung der geometrischen Eigenschaften von Gesteinskörnern und wird für Bodenproben mit einem GK größer 4 mm durchgeführt (ÖNORM EN 933-5/ A1: 2004).

Die Körner werden nach dem Bruch- bzw. Rundungsgrad der Oberfläche in Anlehnung an die ÖNORM EN 933-5/ A1: 2004 eingeteilt in:

- **gebrochene Körner:** mehr als 50 % gebrochene Oberfläche
- **gerundete Körner:** weniger als 50 % gebrochene Oberfläche

Unter einer gebrochenen Oberfläche versteht man eine Fläche des Kieskorns, welche aufgrund natürlicher Kräfte bricht und von scharfkantigen Kanten begrenzt wird. Abgenutzte bzw. verwitterte Kieskörner sind lt. dieser Norm als gerundet zu definieren (ÖNORM EN 933-5/ A1: 2004).

Beim Versuchsvorgang wird die Bodenprobe auf ein Kleinstkorn von 4 mm abgesiebt und danach manuell getrennt zwischen gebrochenen bzw. gerundeten Körnern. Danach wird der Masseanteil an gebrochenen bzw. gerundeten Körnern ermittelt. Je nach überwiegender Masseanteil wird zwischen Kantkorn (KK) und Rundkorn (RK) unterschieden.

3.1.4 Proctordichte und optimaler Wassergehalt

Der Proctorversuch dient zur Bestimmung der Trockendichte in Abhängigkeit eines bestimmten Wassergehaltes (EN 13286-2:2010).

Beim Versuchsvorgang werden die Bodenproben geteilt und mit jeweils unterschiedlichen Wassergehalten aufbereitet. Die aufbereiteten Teilproben werden in genormte Formbehälter lagenweise eingebaut und mit einer in der Norm festgelegten Anzahl an Schlägen wird jede Lage mit einem genormten Proctorhammer verdichtet. Es werden die einzelnen Feuchtdichten der Teilproben bestimmt. Die Trockendichte wird aus der Feuchtdichte und dem Wassergehalt der jeweiligen Teilprobe ermittelt (EN 13286-2:2010).

Die Ergebnisse aus dem Proctorversuch werden in einer Proctorkurve dargestellt, dabei werden der Wassergehalt auf der Abszissenachse (x-Achse) und die Trockendichte auf der Ordinatenachse (y-Achse) dargestellt. Die maximale Dichte, welche durch den Proctorversuch erreicht wird, ist die Proctordichte. Der Wassergehalt, bei dem die Proctordichte erreicht wird, wird als „optimal“ bezeichnet.

3.2 Material 1 (si' sa Gr)

Als erstes Material (M1) wird für die Scherversuche ein schwach schluffiger, sandiger Kies gewählt (si' sa Gr).

3.2.1 Korngrößenverteilung: M1 (si' sa Gr)

3.2.1.1 M1 (si' sa Gr) – GK 31,5 mm

Bezogen auf die Gesamtmasse des Materials 1 (GK 31,5 mm) beträgt der Kiesanteil 70 %, der Sandanteil 27 % und der Anteil an Feinkorn (Schluff + Ton) 3 % (Tab. 1, Abb. 9, Abb. 10):



Abb. 9: Material 1 (si' sa Gr) GK 31,5 mm

Tab. 1: Korngrößenverteilung für Material 1 - si' sa Gr bei einem GK 31,5 mm

Siebanalyse (ÖNORM B 4412:1974)		
Korngröße [mm]	Masseanteil [%]	
31,5	100	Kies 70 %
22,4	88	
16	78	
11,2	68	
8	60	
4	45	
2	30	
1	20	
0,5	14	
0,25	7	
0,125	4	
0,063	3	Schluff 2 % (Ton 1 %)

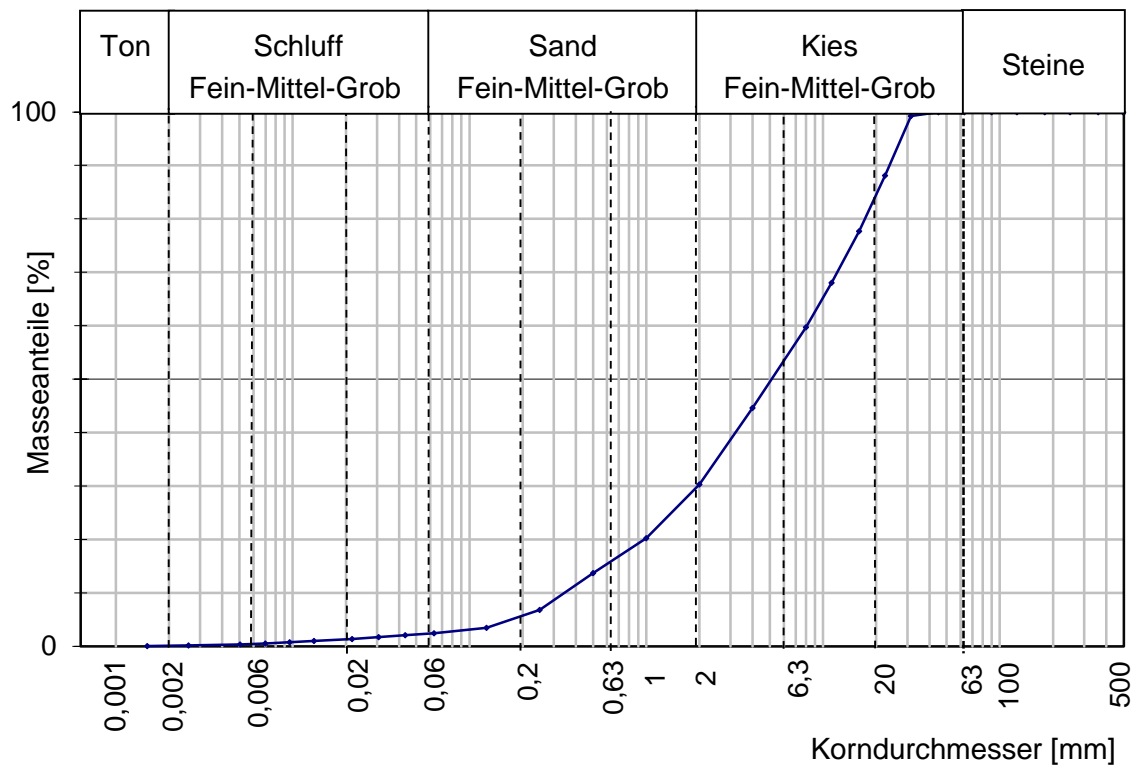


Abb. 10: Sieblinie Material 1 (si' sa Gr) (GK 31,5 mm)

3.2.1.2 M1 (si' sa Gr) – GK 2 mm

Beim abgeseihten Material 1 (si' sa Gr, GK 2 mm) dominiert der Anteil an Sand mit 88 % der Gesamtmasse. Der Anteil an Schluff beträgt 12 % und der an Ton ist 1 % der Gesamtmasse (Abb. 11, Tab. 2, Abb. 12):



Abb. 11: Material 1 (si' sa Gr) GK 2 mm

Tab. 2: Korngrößenverteilung für Material 1 (si' sa Gr) bei einem GK 2 mm

Siebanalyse (ÖNORM B 4412:1974)		
Korngröße [mm]	Masseanteil [%]	
2	100	Sand 88 %
1	72	
0,5	50	
0,25	26	
0,125	14	
0,063	12	Schluff 11 % (Ton 1 %)
0,0433	8	
0,0306	7	
0,0217	5	
0,0132	4	
0,0096	3	

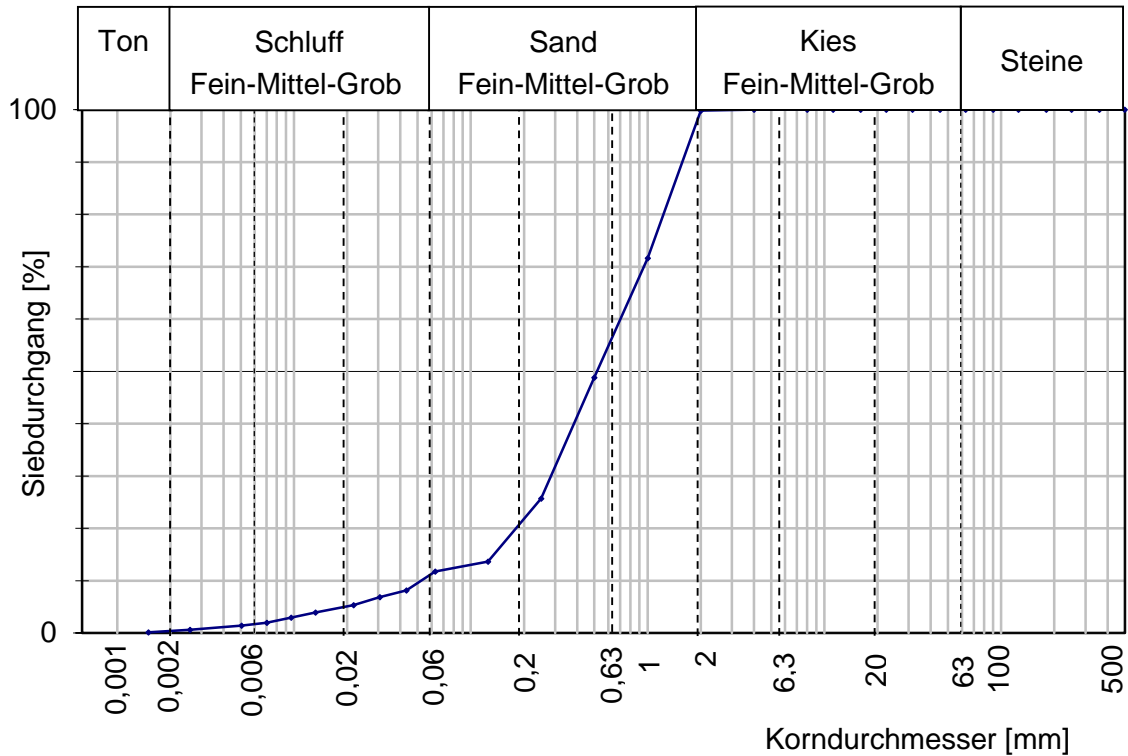


Abb. 12: Sieblinie Material 1 (si' sa Gr) (GK 2 mm)

3.2.2 Korndichte ρ_s : M1 (si' sa Gr)

Mit dem Kapillarpyknometer ist folgende Korndichte für das Material 1 (si' sa Gr) bestimmt worden:

Tab. 3: Korndichte ρ_s für das Material 1 (si' sa Gr)

Versuchsnummer	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
Korndichte ρ_s [Mg/cm ³]	2,76	2,75	2,75
Mittelwert [Mg/cm ³]	2,75		

3.2.3 Gebrochene Körner: M1 (si‘ sa Gr)

Für das Material 1 (si‘ sa Gr, Korngröße 4 mm – 31,5 mm) beträgt der Anteil an gebrochener Körner:

- bei einer Gesamtmasse der Probe = 6000g.
- weniger als 10 % der Gesamtmasse (mehr als 90 % gerundete Körner).
- Material 1 (si‘ sa Gr) ist als Rundkorn (RK) zu deklarieren.

3.2.4 Standard Proctorversuch: M1 (si‘ sa Gr)

Die Proctordichte ρ_{pr} von 2,11 Mg/m³ wird für das Material 1, mit einem GK von 31,5 mm bei einem Wassergehalt von 5,5 % erreicht (Abb. 13, Tab. 4). Dabei ist die Bodenprobe ca. zu 53 % wassergesättigt (Tab. 4, Abb. 13).

Tab. 4: Auswertung des Proctorversuches - Material 1 (si‘ sa Gr) GK 31,5 mm

Proctordichte ρ_d					
↓					
Versuchsnummer.	1	2	3	4	5
Trockendichte ρ_d [Mg/m ³]	2,08	2,09	2,11	2,09	2,05
Wassergehalt [%]	3,0	4,3	5,5	6,4	8,1

Im Vergleich dazu zeigen die Versuchsergebnisse des Proctorversuches für das Material 1 mit dem GK von 2 mm eine Proctordichte von 1,79 Mg/m³ und eine Zunahme des „optimalen“ Wassergehaltes auf 6,6 %. Der Sättigungsgrad der Bodenprobe beträgt ca. bei 35 % (Tab. 5, Abb. 14)

Tab. 5: Auswertung des Proctorversuches - Material 1 (si‘ sa Gr) GK 2 mm

Proctordichte ρ_d					
↓					
Versuchsnummer	1	2	3	4	5
Trockendichte ρ_d [Mg/m ³]	1,78	1,79	1,79	1,78	1,77
Wassergehalt [%]	3,4	5,6	7,3	9,3	11,2

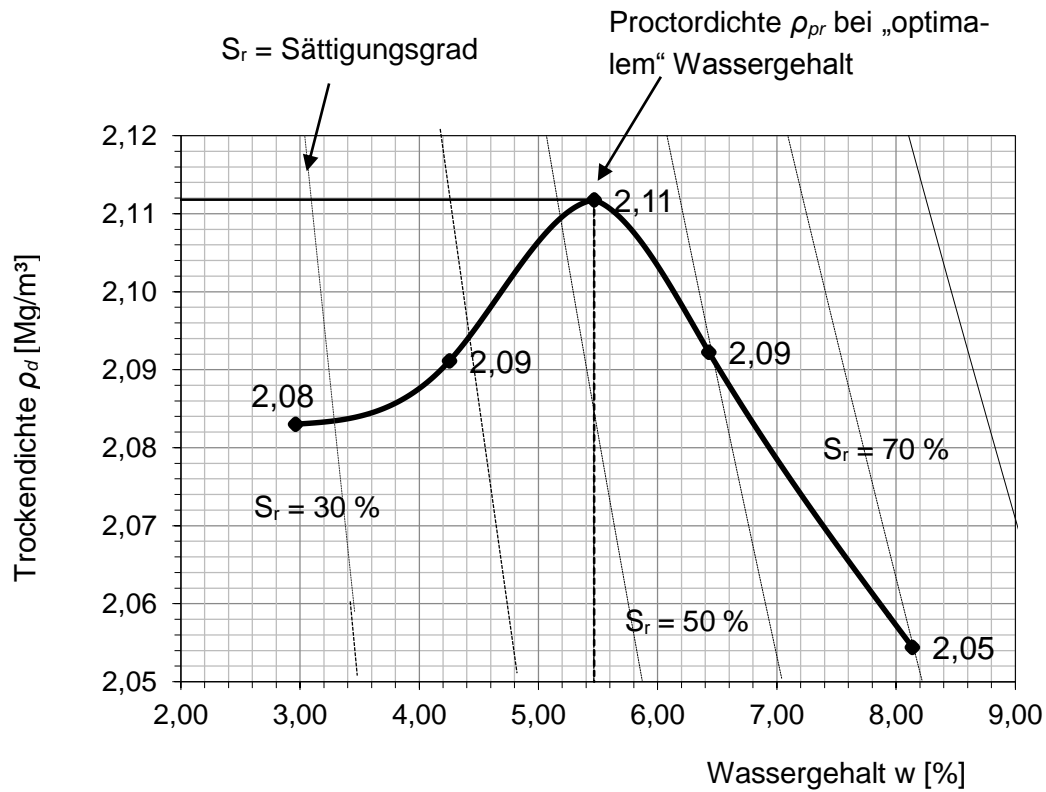


Abb. 13: Proctorkurve für das Material 1 (si' sa Gr, GK 31,5 mm)

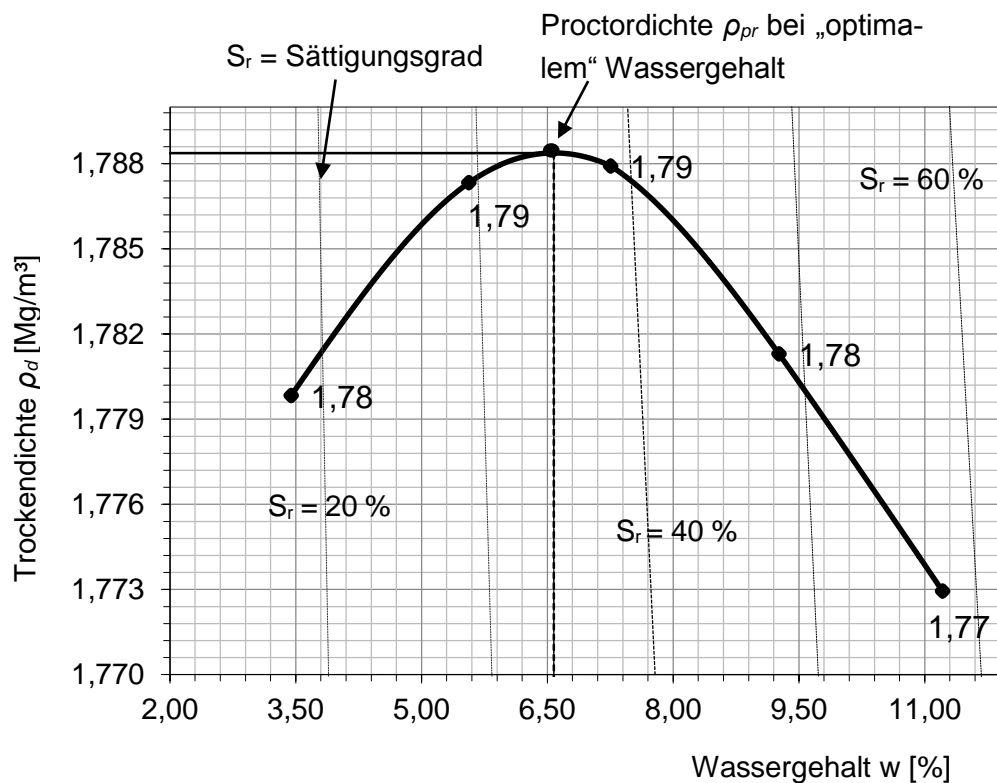


Abb. 14: Proctorkurve für das Material 1 (si' sa Gr, GK 2 mm)

3.3 Material 2 (sa' si Gr)

Das Material 2 (M2) ist ein schwach sandiger, schluffiger Kies (sa' si Gr).

3.3.1 Korngrößenverteilung: M2 (sa' si Gr)

3.3.1.1 M2 (sa' si Gr) – GK 31,5 mm

Das Material 2 (GK 31,5 mm) hat einen Kiesanteil von 47 % und einen Sandanteil von 12 %. Der Anteil an Schluff ist 36 % und der an Ton 5 % (Tab. 6, Abb. 15, Abb. 16):

Tab. 6: Korngrößenverteilung für Material 2 - sa' si Gr mit einem GK 31,5 mm

Siebanalyse (ÖNORM B 4412:1974)		
Korngröße [mm]	Masseanteil [%]	
31,5	100	Kies 47 %
22,4	93	
16	85	
11,2	78	
8	73	
4	62	
2	53	
1	50	
0,5	50	
0,25	48	
0,125	44	
0,063	41	Schluff 36 %
0,0433	38	
0,0306	34	
0,0217	26	
0,0132	19	
0,0096	15	
0,0070	12	
0,0050	9	
0,0026	6	
0,0015	4	



Abb. 15: Material 2 (sa' si Gr) GK 31,5 mm

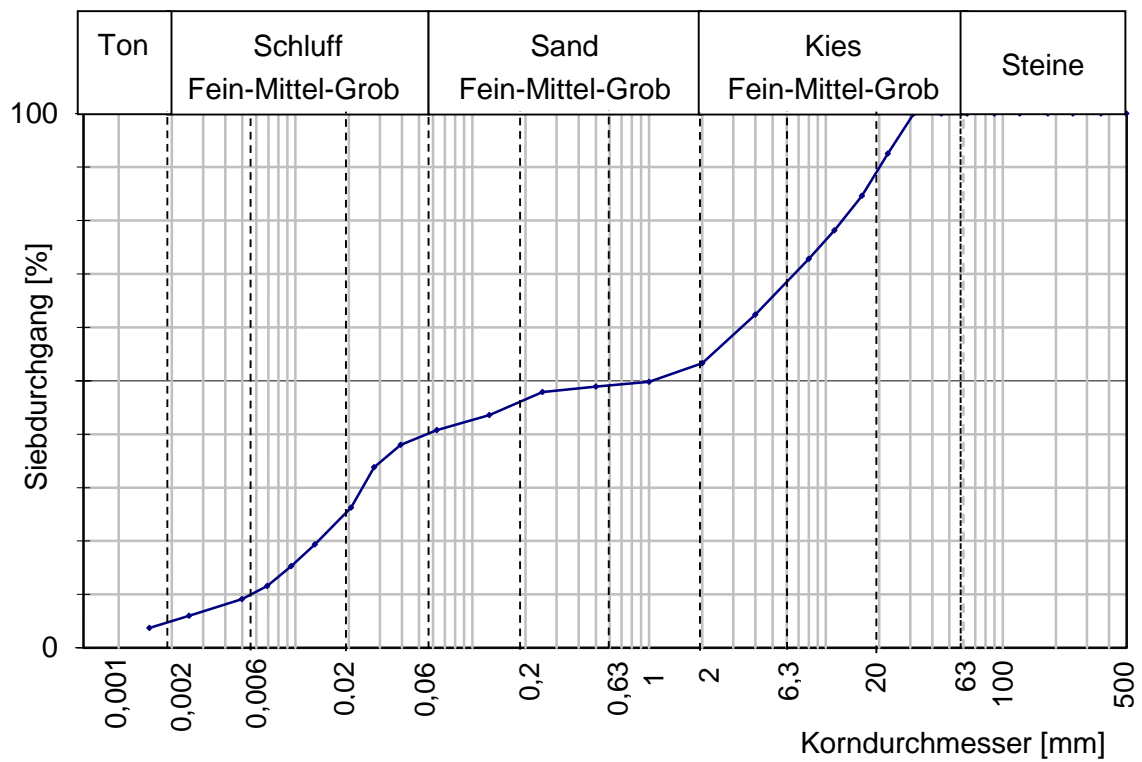


Abb. 16: Sieblinie Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm)

3.3.1.2 M2 (sa' si Gr) – GK 2 mm

Beim auf einen GK 2 mm abgeseihten Material 2 erhöht sich der Feinkornanteil auf 74 %. Davon beträgt der Anteil an Schluff 65 % und der an Ton 9 %. Der Anteil an Körner mit einem Korndurchmesser größer als 0,063 mm ist 26 % (=Sand) (Abb. 17, Tab. 7, Abb. 18):



Abb. 17: Material 2 (sa' si Gr) GK 2 mm

Tab. 7: Korngrößenverteilung für Material 2 - sa' si Gr bei einem GK 2 mm

Siebanalyse (ÖNORM B 4412:1974)		
Korngröße [mm]	Masseanteil [%]	
2	100	Sand 26 %
1	93	
0,5	90	
0,25	88	
0,125	78	
0,063	74	
0,0433	68	
0,0306	60	
0,0217	47	
0,0132	35	
0,0096	27	
0,0070	21	
0,0050	16	
0,0026	11	
0,0015	7	Ton 9 %

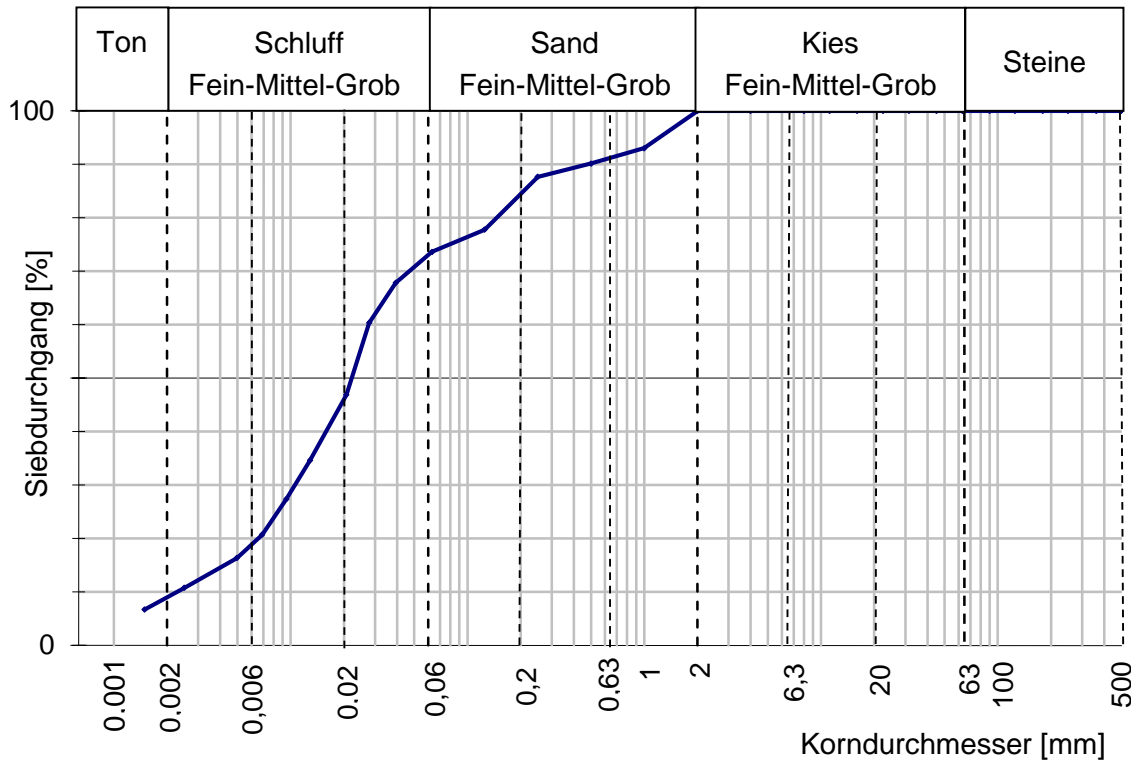


Abb. 18: Sieblinie Material 2 - sa^c si Gr GK 2 mm (ÖNORM B 4412:1974)

3.3.2 Korndichte ρ_s : M2 (sa^c si Gr)

Für das Material 2 (sa^c si Gr) ist folgende Korndichte ρ_s bestimmt worden:

Tab. 8: Korndichte ρ_s für das Material 2 (sa^c si Gr)

Versuchsnummer	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
Korndichte ρ_s [Mg/cm ³]	2,71	2,70	2,70
Mittelwert [Mg/cm ³]	2,70		

3.3.3 Gebrochene Körner: M2 (sa' si Gr)

Für das Material 2 (sa' si Gr, Korngröße 4 mm – 31,5 mm) beträgt der Anteil an gebrochener Körner:

- bei einer Gesamtmasse der Probe = 6000g.
- weniger als 10 % der Gesamtmasse (mehr als 90 % gerundete Körner).
- Material 2 (sa' si Gr) ist als Rundkorn (RK) zu deklarieren.

3.3.4 Standard Proctorversuch: M2 (sa' si Gr)

Die Proctordichte ρ_{pr} beträgt für das Material 2 (sa' si Gr) mit dem GK 31,5 mm 1,97 Mg/m³. Der „optimale“ Wassergehalt liegt bei 10,7 %. Bei diesem Wassergehalt ist der Sättigungsgrad S_r der Bodenprobe ca. 78 % (Abb. 19, Tab. 9).

Tab. 9: Auswertung des Proctorversuches - Material 2 (sa' si Gr) GK 31,5 mm

Proctordichte ρ_d						
↓						
Versuchsnummer	1	2	3	4	5	6
Trockendichte ρ_d [Mg/m ³]	1,86	1,90	1,96	1,97	1,93	1,83
Wassergehalt [%]	3,0	4,3	5,5	6,4	8,1	15,8

Das Material 2 (sa' si Gr) weist abgesehen auf GK 2 mm beim Proctorversuch eine Proctordichte ρ_{pr} von 1,81 Mg/m³ und einen Wassergehalt von 15,5 % auf. Die Bodenprobe ist dabei zu ca. 85 % wassergesättigt (Abb. 20, Tab. 10).

Tab. 10: Auswertung des Proctorversuches - Material 2 (sa' si Gr) GK 2 mm

Proctordichte ρ_d					
↓					
Versuchsnummer.	1	2	3	4	5
Trockendichte ρ_d [Mg/m ³]	1,71	1,75	1,80	1,81	1,75
Wassergehalt [%]	11,1	11,6	13,6	16,2	18,2

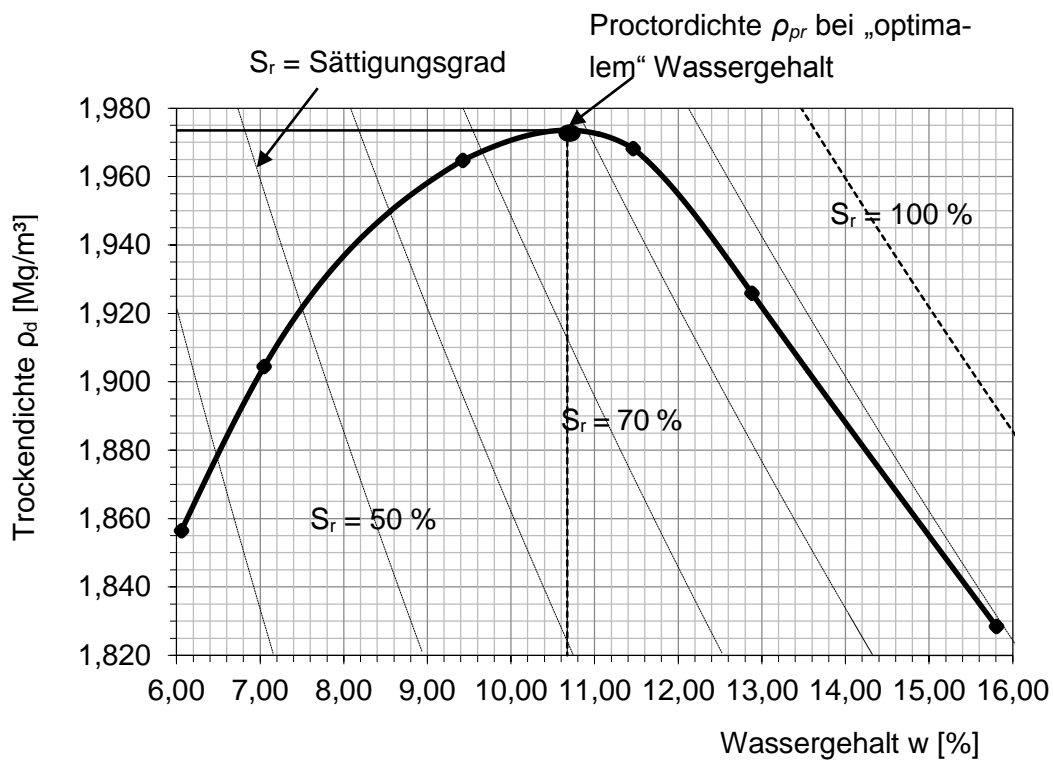


Abb. 19: Proctorkurve für das Material 2 (sa' si Gr, GK 31,5 mm)

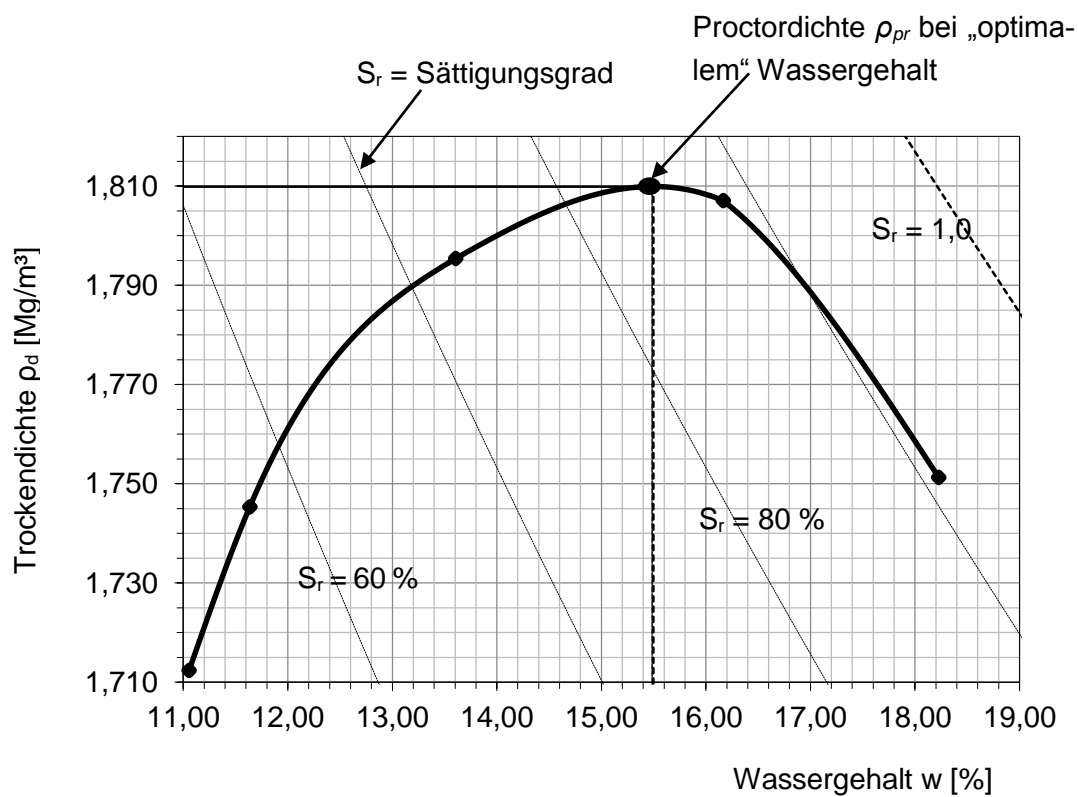


Abb. 20: Proctorkurve für das Material 2 (sa' si Gr GK 2 mm)

3.4 Vergleich der verwendeten Böden

3.4.1 Vergleich der Korngrößenverteilung

Das Material 2 (sa' si Gr) hat im Vergleich zum Material 1 (si' sa Gr) bei einem GK 31,5 mm (Kapitel 3.2.1 bzw. Kapitel 3.3.1, Abb. 21):

- einen um 23 % geringeren Kiesanteil
- einen um 15 % geringeren Sandanteil
- einen 34 % höheren Schluff- bzw. 4 % höheren Tonanteil

Das auf ein GK von 2 mm abgesiebte Material 2 (sa' si Gr) unterscheidet sich zum abgeseibten Material 1 (si' sa Gr, GK 2 mm) in der Kornverteilung folgendermaßen (Abb. 21):

- der Kiesanteil ist um 62 % geringer
- der Schluffanteil ist um 54 % höher
- der Tonanteil ist um 8 % höher

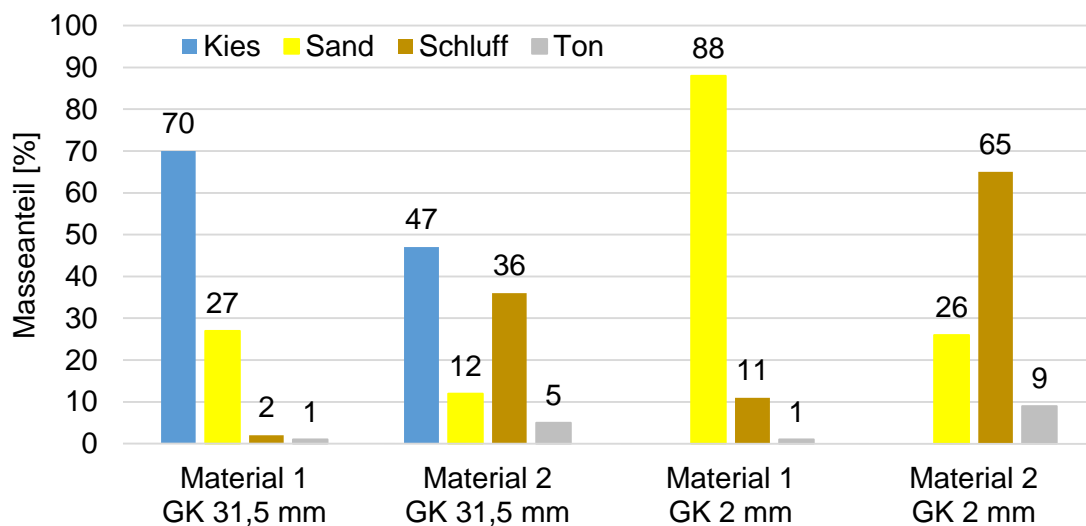


Abb. 21: Masseanteile der Korngrößengruppen für das Material 1 bzw. Material 2

3.4.2 Vergleich der Ergebnisse aus dem Proctorversuch

Aus dem Vergleich der Proctordichte, des „optimalen“ Wassergehaltes und des Sättigungsgrades zwischen Material 1 (si‘ sa Gr) bzw. dem Material 2 (sa‘ si Gr) mit dem GK 31,5 mm ist folgender Unterschied festzustellen (Kapitel 3.3.1, 3.4.1, Tab. 11):

- die Proctordichte ist um 0,14 Mg/m³ höher bei Material 1
- der „optimale“ Wassergehalt ist um 5,2 % geringer bei Material 1
- der Sättigungsgrad (beim „optimalen“ Wassergehalt) ist bei Material 1 um ca. 28 % geringer als bei Material 2

Beim dem auf ein GK 2 mm abgeseibten Material 1 (si‘ sa Gr) bzw. Material 2 (sa‘ si Gr) ist aus dem Vergleich folgendes ermittelt worden (Kapitel 3.3.1, 3.4.1, Tab. 11):

- eine um 0,02 Mg/m³ geringere Proctordichte bei Material 1
- ein um 8,9 % geringerer „optimaler“ Wassergehalt bei Material 1
- der Sättigungsgrad (beim „optimalen“ Wassergehalt) ist bei Material 1 um ca. 50 % geringer als bei Material 2

Tab. 11: Vergleich der Ergebnisse des Standard Proctorversuches

Größtkorn [mm]	GK 31,5 mm		GK 2 mm	
Materialbezeichnung	M1	M2	M1	M2
Proctordichte [Mg/m ³]	2,11	1,97	1,79	1,81
Wassergehalt [%]	5,5	10,7	6,6	15,5
Sättigungsgrad [%]	53	78	35	85

4 Rahmenscherversuch

Bei diesem Scherversuch wird die Bodenprobe in zwei voneinander getrennte, starre Rahmen, welche übereinander liegen, eingebracht.

Die Rahmen werden gegeneinander verschoben und dadurch der eingebrachte Probekörper abgeschert (ÖNORM B4416:1978).

4.1 Direkter Scherversuch

Der Rahmenscherversuch ist ein direkter Scherversuch. Zwischen den beiden Rahmen bildet sich im Probekörper eine Scherfläche aus. Während der konstanten Verschiebung wird eine zur Bewegungsrichtung senkrechte Belastung (Normalspannung) aufgebracht. Dadurch ist eine größere Scherkraft (Scherspannung) notwendig, um die Bodenprobe abzuscheren (ÖNORM B4416:1978).

4.2 Gerätebeschreibung Allgemein

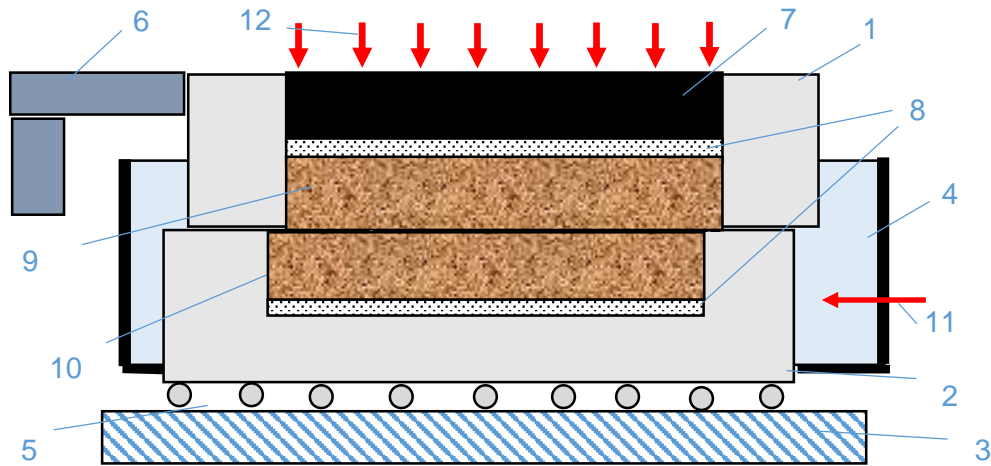
4.2.1 Aufbau und Bestandteile

Das Rahmenschervergerät besteht aus zwei starren Rahmenteilen. Diese werden übereinander gelegt und die Bodenprobe danach eingebracht. Der obere Rahmen ist mit der Bodenplatte der Versuchseinrichtung starr verbunden, der untere wird tangential verschoben. Es sind Filterplatten zum Verhindern des Ausspülens von Feinteilen (durch Auspressen von Porenwasser infolge Normalbelastung) unter und auf die Bodenprobe zu legen (ÖNORM B4416:1978).

Über einen Stempel wird die Normalspannung auf die Bodenprobe übertragen. (ÖNORM B4416:1978) (Abb. 22).

4.2.2 Messaufnehmer

Die Messaufnehmer zeichnen den Scherweg, die Scherbeanspruchung (Scherkraft), die Normalspannung und die Setzungen während des Schervorganges auf.



1	oberer Rahmen	7	Stempel
2	unterer Rahmen	8	Filterplatten
3	Rahmenunterlage	9	Probekörper
4	Wasserkasten	10	Scherfläche
5	Rollauflage zur Parallelverschieb.	11	Scherkraft
6	Fixierung des oberen Rahmens	12	Normalspannung σ_1'

Abb. 22: Schematische Darstellung eines Rahmenschergerätes

4.2.3 Anzahl der Probekörper

Um die effektiven Scherparameter zu ermitteln, sind jeweils drei einzelne Versuche durchzuführen. Dabei ist bei jedem Versuch eine andere Normalspannung zu wählen. Die Probekörper sollen möglichst gleich in Bezug auf Kornverteilung, Einbaudichte, Wassergehalt sein.

Die Versuchsergebnisse werden in das Normalspannung– Schubspannungsdiagramm ($\sigma' - \tau'$) (Kapitel 2.3.2) als Punkte eingetragen. Auf Basis der eingetragenen Punkte wird die Schergerade als eine lineare Regressionsgerade dargestellt.

4.2.4 Kalibrierversuche

Um zu kontrollieren, ob das Großrahmenschergerät und das Kleinrahmenschergerät dieselben Scherparameter liefern, wurden Kalibrierversuche bei beiden Versuchsgeräten mit dem Material 1 (M1 - si' sa Gr, GK 2 mm) (Kapitel 3.2) durchgeführt.

Dabei ist die Einbaudichte 97 % der Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$) und der Wassergehalt beträgt 6,6 % (Kapitel 3.2.2, Abb. 14, Tab. 12).

Tab. 12: Einbaudichte Kalibrierversuch - $D_{pr} = 97 \%$ für M1 (si' sa Gr, GK 2 mm)

Dichten	[Mg/m ³]	M1 GK 2 mm
Proctordichte	[Mg/m ³]	1,79
$D_{pr} = 97 \%$	[Mg/m ³]	1,74

Die Kalibrierversuche werden bei beiden Versuchsmethoden (Scherversuche im Großrahmenschergerät bzw. Kleinrahmenschergerät) mit drei Belastungsstufen (Normalspannungen) von $\sigma_1 = 100 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_2 = 200 \text{ kN/m}^2$ bzw. $\sigma_3 = 300 \text{ kN/m}^2$ durchgeführt.

5 Kleinrahmenscherversuch

Beim Scherversuch im Kleinrahmenschergerät wurde das Material 1 (si' sa Gr) bzw. Material 2 (sa' si Gr) (Kapitel 3.2 bzw. 3.3) mit einem GK von 2 mm eingebaut.

5.1 Bestandteile des Kleinrahmenschergerätes

5.1.1 Rahmenscherbox

Die Rahmenscherbox besteht aus einem oberen und unteren Rahmen (Abb. 22). Der obere Rahmen bleibt fest, der untere wird verschoben. Der Abstandhalter (Abb. 23) dient zum Sichern des unteren Rahmens gegen Verschiebung. Der Grundriss der Scherbox ist kreisförmig und hat einen Durchmesser von 80 mm. Die Probenhöhe der Rahmenscherbox des Kleinrahmenschergerätes beträgt 27 mm.

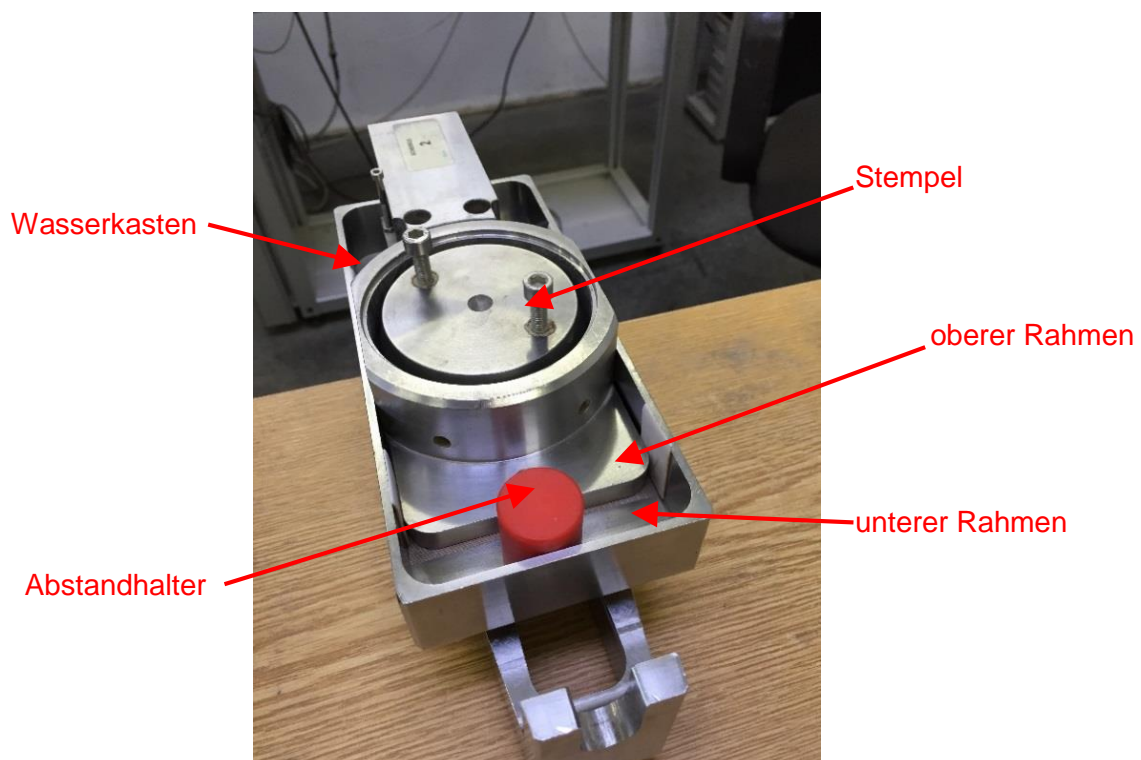


Abb. 23: Bestandteile der Rahmenscherbox im Kleinrahmenschergerät

5.1.2 Belastungsvorrichtungen

Die Belastung (Normalspannung) wird durch Druckluft erzeugt, welche in die Belastungsvorrichtung eingepresst wird (Abb. 24).

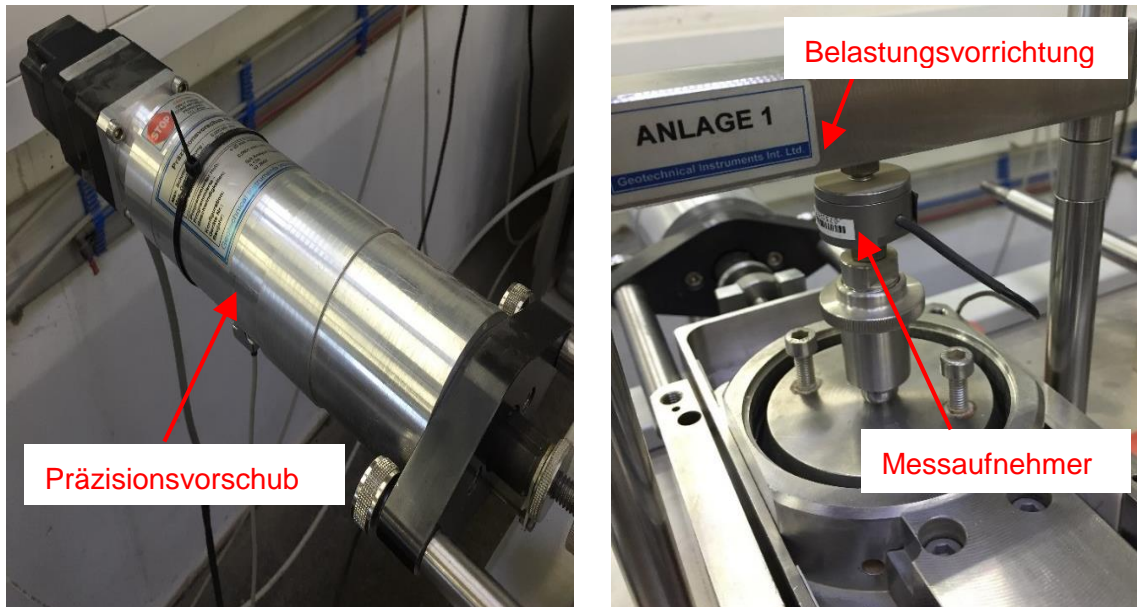


Abb. 24: Präzisionsvorschub im Kleinrahmenschergerät (linkes Bild), Belastungsvorrichtung (rechtes Bild)

Der Vorschub bzw. die Scherkraft wird über einen horizontal zur Rahmenscherbox montierten Präzisionsvorschub aufgebracht. Die maximale Vorschubkraft der verwendeten beträgt 20 kN. Die Vorschubgeschwindigkeit ist 0,1 mm/min.

5.1.3 Messaufnehmer

Der Messaufnehmer zur Aufzeichnung der Setzung und der Normalspannung befindet sich unterhalb der Belastungsvorrichtung (Abb. 24, Abb. 27).

Der Messaufnehmer zur Aufzeichnung der Scherkraft wird zwischen zwei Widerlagern im Bereich des oberen Rahmens fixiert (Abb. 22, Abb. 25, Abb. 27).

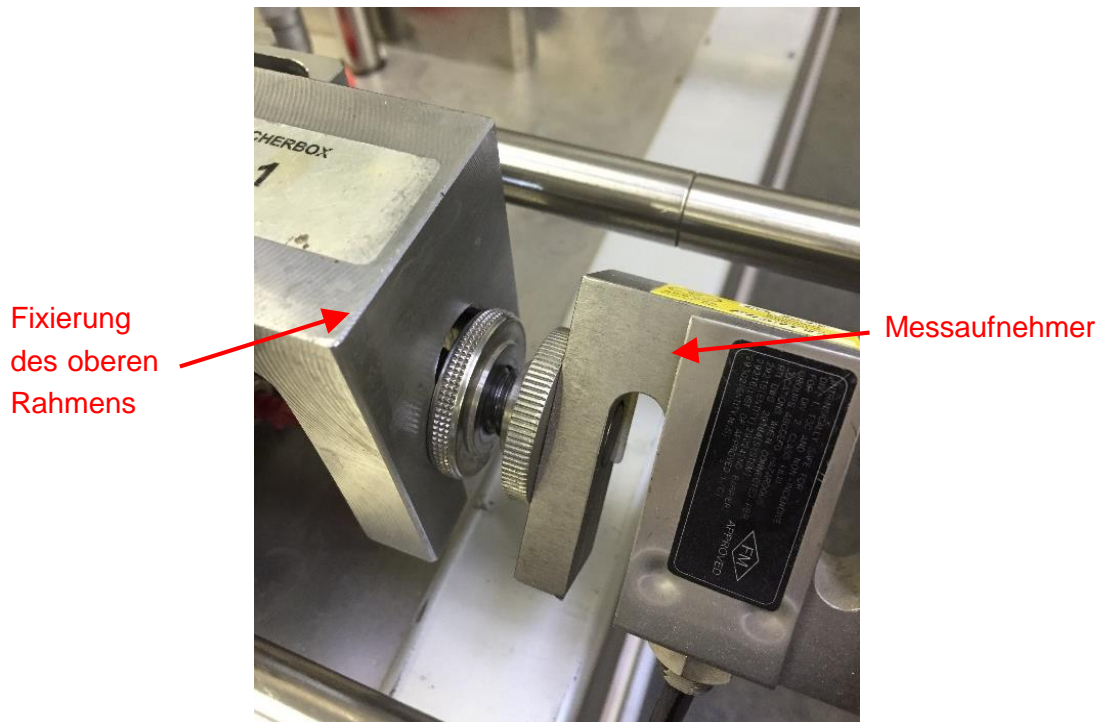


Abb. 25: Messaufnehmer zur Aufzeichnung des Scherweges und Scherkraft

5.2 Versuchsvorbereitung, Einbau

Das Material 1 (si' sa Gr) bzw. Material 2 (sa' si Gr) wird mit einem GK 2 mm und mit einer Einbaudichte von 92 % bzw. 97 % der Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$ bzw. 97%) (Tab. 13) in die Rahmenscherbox eingebaut (Abb. 26, Abb. 27).

Tab. 13: Einbaudichte 97 % bzw. 92 % der Proctordichte für das Material 1 bzw. Material 2 mit einem GK 2 mm (aus Kapitel 3.2.4, 3.3.4)

		M1 - GK 2 mm	M2 - GK 2 mm
Proctordichte	[Mg/m ³]	1,79	1,81
$D_{pr} = 92\%$	[Mg/m ³]	1,74	1,76
$D_{pr} = 97\%$	[Mg/m ³]	1,65	1,67



Abb. 26: Einbau der Bodenprobe in die Rahmenscherbox

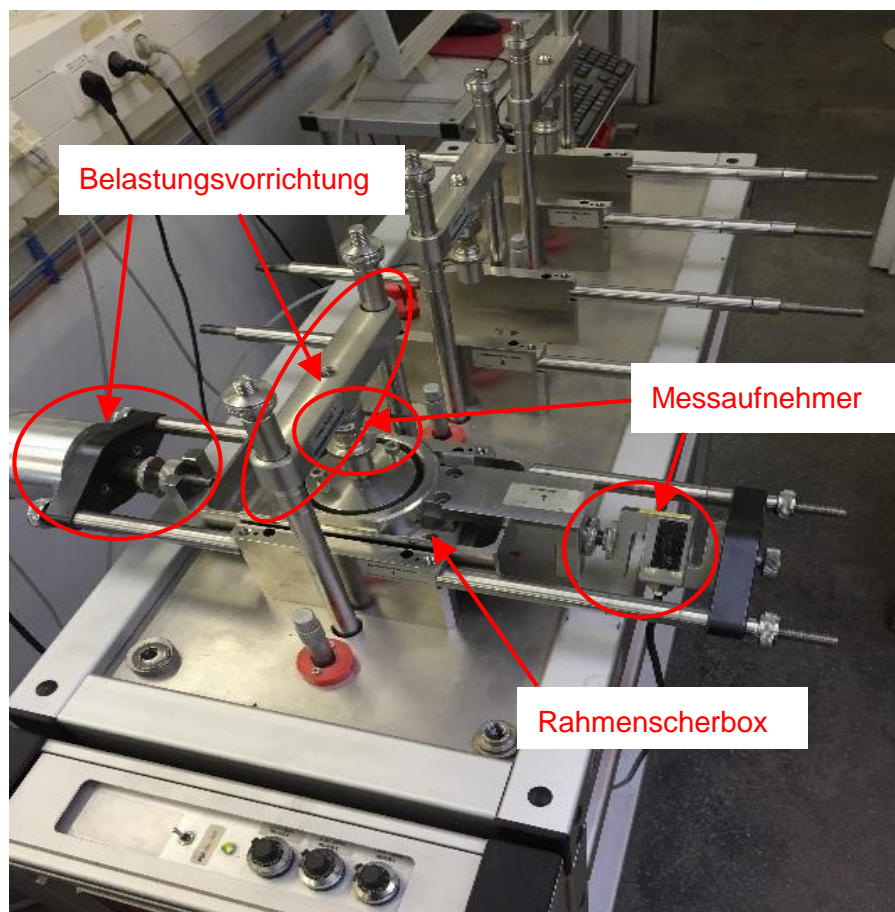


Abb. 27: Einbau der Scherbox in das Kleinrahmenschergerät

5.3 Durchführung Vergleichsversuche

Nach dem Einbau der drei Scherboxen in das Kleinrahmenschergerät werden diese jeweils mit einer Normalspannung von 50 kN/m², 75 kN/m² und 100 kN/m² belastet (außer bei den Kalibrierversuchen - Kapitel 4.2.4). Die einzelnen Normalspannungen (σ_1 , σ_2 , σ_3) werden auch als Belastungsstufen oder Laststufen in der Versuchsauswertung (Kapitel 5.4 und A.1 bzw. A.2) bezeichnet.

Nach dem Aufbringen der Normalspannung erfolgt der Abschervorgang durch konstanten Vorschub der Belastungsvorrichtung (Abb. 24, Abb. 27).

Da die Normalspannung durch Druckluft erzeugt wird, beeinflussen Schwankungen des aufgebrachten Druckes die Größe der Normalspannung. Aufgrund der geringen Größe der Probenfläche beim Kleinrahmenschergerät ist es sehr schwer eine exakte Normalspannung einzustellen.

5.4 Versuchsergebnisse Kleinrahmenschergerät (Kl.)

Die Einbaudichte und der Wassergehalt wurde aus dem Standard Proctorversuch ermittelt (Kapitel 3.2.2, 3.2.4 und 3.3.1 bzw. Kapitel 5.2 und Tab. 13).

Der Verlauf der Setzungen bzw. Hebungen im Laufe der Verschiebung wird im „Setzungs- Scherwegdiagramm“ dargestellt. Die prozentuellen, maximalen Setzungen bzw. Hebungen der Bodenproben während des Scherversuches beziehen sich auf die Probenhöhe am Versuchsanfang (relative Setzung bzw. Hebung).

5.4.1 Kl. Kalibrierversuch: M1 (GK 2 mm) - $D_{pr} = 97\%$

Die Bodenprobe setzt bzw. hebt sich bei allen drei Vergleichsversuchen und Laststufen ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) maximal um 1 bis 2 % der Probenhöhe (relative Setzung & Hebung). Dies entspricht einer Dichteänderung infolge Verdichtung bzw. Auflockerung des Bodens um ca. $\pm 0,01 \text{ Mg/m}^3$ ($\pm 10 \text{ kg/m}^3$) (Tab. 33, Tab. 35, Tab. 37, Abb. 47, Abb. 50, Abb. 53).

Die maximale Schubspannung stellt sich bei einer Verschiebung der Scherboxen zwischen 2,5 und 5 mm ein.

Danach fällt der Schubspannungsverlauf der Bodenprobe bei ca. 2/3 der durchgeführten Einzelversuche, bevor eine Verschiebung von 6 mm erreicht wird. Bei 1/3 der getesteten Bodenproben verläuft die Schubspannung konstant bis zu einem Scherweg von 6 mm (Abb. 46, Abb. 49, Abb. 52).

Folgende Scherparameter werden bei den drei Kalibrierversuchen erreicht:

- Kalibrierversuch 1

Normalspannung: $\sigma_1 = 128 \text{ kN/m}^2, \sigma_2 = 210 \text{ kN/m}^2, \sigma_3 = 298 \text{ kN/m}^2$

Reibungswinkel $\varphi = 38,0^\circ$, Kohäsion $c = 21,0 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 34, Abb. 48)

- Kalibrierversuch 2

Normalspannung: $\sigma_1 = 106 \text{ kN/m}^2, \sigma_2 = 212 \text{ kN/m}^2, \sigma_3 = 308 \text{ kN/m}^2$

Reibungswinkel $\varphi = 37,0^\circ$, Kohäsion $c = 11,0 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 36, Abb. 51)

- Kalibrierversuch 3

Normalspannung: $\sigma_1 = 118 \text{ kN/m}^2, \sigma_2 = 202 \text{ kN/m}^2, \sigma_3 = 298 \text{ kN/m}^2$

Reibungswinkel $\varphi = 34,0^\circ$, Kohäsion $c = 17 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 38, Abb. 54)

5.4.2 Kl. Vergleichsversuch: M1 (si' sa Gr)

5.4.2.1 Kl. M1 (GK 2 mm) - $D_{pr} = 97 \%$

Die maximale relative Hebung bzw. Setzung der Bodenprobe beträgt bei den Vergleichsversuchen im Durchschnitt zwischen 1 und 2 %. Die Änderung der Dichte beträgt dadurch zwischen $\pm 0,01$ und $0,04 \text{ Mg/m}^3$ (entspricht ± 10 bis 40 kg/m^3) (Tab. 39, Abb. 56, Tab. 41, Abb. 59, Tab. 43, Abb. 62).

Die Scherfestigkeit der Bodenprobe wird zwischen 3 und 6 mm Scherweg erreicht. Der Verlauf der Schubspannung fällt bei ca. 80 % der durchgeführten Einzelversuche nach dem Erreichen der maximalen Schubspannung ab (Abb. 55, Abb. 58, Abb. 61).

Die Auswertung der Schergerade für das Material 1 (si' sa Gr, GK 2 mm) ergibt folgende Scherparameter bei einer Einbaudichte von 97 % der Proctordichte:

- Vergleichsversuch 1

Normalspannung: $\sigma_1 = 54 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_2 = 76 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_3 = 113 \text{ kN/m}^2$

Reibungswinkel $\varphi = 39^\circ$, Kohäsion $c = 15 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 40, Abb. 57)

- Vergleichsversuch 2

Normalspannung: $\sigma_1 = 56 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_2 = 82 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_3 = 119 \text{ kN/m}^2$

Reibungswinkel $\varphi = 40^\circ$, Kohäsion $c = 9 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 42, Abb. 60)

- Vergleichsversuch 3

Normalspannung: $\sigma_1 = 52 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_2 = 76 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_3 = 111 \text{ kN/m}^2$

Reibungswinkel $\varphi = 39^\circ$, Kohäsion $c = 11 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 44, Abb. 63)

5.4.2.2 Kl. M1 (GK 2 mm) - $D_{pr} = 92 \%$

Während des Scherversuches erreicht die Bodenprobe eine maximale Setzung bzw. Hebung zwischen 1 und 3 % der Probenhöhe. Dadurch variiert die Dichte der Probe während des Scherversuches zwischen $\pm 0,01$ und $0,04 \text{ Mg/m}^3$ (das entspricht ± 10 bis 40 kg/m^3) (Tab. 45, Abb. 65, Tab. 47, Abb. 68, Tab. 49, Abb. 71). Die maximale Schubspannung wird ab einem Scherweg von 2 bis 5 mm erreicht. Die maximale Schubspannung verläuft bei 90 % der Versuche danach konstant weiter oder fällt mit zunehmender Verschiebung Scherweg ab (Abb. 64, Abb. 67, Abb. 70).

Folgende Scherparameter φ , c sind dabei für das Material 1 (si^c sa Gr, GK 2 mm) bei einem Verdichtungsgrad der Bodenprobe von $D_{pr} = 92 \%$ (Proctordichte) ermittelt worden:

- Vergleichsversuch 1

Normalspannung: $\sigma_1 = 50 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_2 = 84 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_3 = 110 \text{ kN/m}^2$
Reibungswinkel $\varphi = 35^\circ$, Kohäsion $c = 12 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 46, Abb. 66).

- Vergleichsversuch 2

Normalspannung: $\sigma_1 = 56 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_2 = 72 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_3 = 100 \text{ kN/m}^2$
Reibungswinkel $\varphi = 35^\circ$, Kohäsion $c = 13 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 48, Abb. 69).

- Vergleichsversuch 3

Normalspannung: $\sigma_1 = 58 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_2 = 82 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_3 = 106 \text{ kN/m}^2$
Reibungswinkel $\varphi = 37^\circ$, Kohäsion $c = 8 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 50, Abb. 72).

5.4.3 Kl. Vergleichsversuch: M2 (sa' si Gr)

5.4.3.1 Kl. M2 (GK 2 mm) - $D_{pr} = 97 \%$

Die maximale (relative) Setzung bzw. Hebung beträgt 1 bis 2 % der Probenhöhe. Die Einbaudichteänderung beträgt zwischen $\pm 0,01$ und $0,03 \text{ Mg/m}^3$ (das entspricht ± 10 bis 30 kg/m^3) (Tab. 51, Abb. 74, Tab. 53, Abb. 77, Tab. 55, Abb. 80). Der Schubspannungsverlauf steigt auf ein Maximum zwischen 3 und 9 mm Scherweg und verläuft danach konstant weiter (Abb. 73, Abb. 76, Abb. 79).

Für das Material 2 (sa' si Gr, GK 2 mm) bei einem Verdichtungsgrad $D_{pr} = 97 \%$ (Proctordichte) sind für den Reibungswinkel φ und die Kohäsion c folgende Werte abzulesen:

- Vergleichsversuch 1

Normalspannung: $\sigma_1 = 50 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_2 = 76 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_3 = 100 \text{ kN/m}^2$

Reibungswinkel $\varphi = 30^\circ$, Kohäsion $c = 38 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 52, Abb. 75).

- Vergleichsversuch 2

Normalspannung: $\sigma_1 = 66 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_2 = 95 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_3 = 96 \text{ kN/m}^2$

Reibungswinkel $\varphi = 31^\circ$, Kohäsion $c = 39 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 54, Abb. 78).

- Vergleichsversuch 3

Normalspannung: $\sigma_1 = 34 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_2 = 74 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_3 = 100 \text{ kN/m}^2$

Reibungswinkel $\varphi = 33^\circ$, Kohäsion $c = 33 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 55, Abb. 80)

5.4.3.2 Kl. M2 (GK 2 mm) - $D_{pr} = 92 \%$

Die Bodenprobe setzt bzw. hebt sich um 1 bis 3 % der Probenhöhe. Dabei verändert sich die Dichte während des Scherversuches zwischen $\pm 0,01$ und $0,03 \text{ Mg/m}^3$ (das entspricht ± 10 bis 30 kg/m^3) (Tab. 57, Abb. 83, Tab. 59, Abb. 86, Tab. 61, Abb. 89).

Die Scherfestigkeit wird bei ca. 90 % der Einzelversuche nach einem Scherweg von 8 bis 12 mm erreicht und fällt danach mit zunehmendem Scherweg nicht ab, sondern bleibt konstant (Abb. 82, Abb. 85, Abb. 88).

Aus den Vergleichsversuchen mit dem Material 2 (sa' si Gr, GK 2mm) bei einer Einbaudichte von 92 % der Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$) gehen folgende Scherparameter φ , c hervor:

- Vergleichsversuch 1

Normalspannung: $\sigma_1 = 50 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_2 = 68 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_3 = 116 \text{ kN/m}^2$
Reibungswinkel $\varphi = 35^\circ$, Kohäsion $c = 35 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 58, Abb. 84).

- Vergleichsversuch 2

Normalspannung: $\sigma_1 = 52 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_2 = 86 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_3 = 106 \text{ kN/m}^2$
Reibungswinkel $\varphi = 34^\circ$, Kohäsion $c = 26 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 60, Abb. 87).

- Vergleichsversuch 3

Normalspannung: $\sigma_1 = 54 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_2 = 94 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_3 = 106 \text{ kN/m}^2$
Reibungswinkel $\varphi = 35^\circ$, Kohäsion $c = 27 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 62, Abb. 90).

6 Großrahmenscherversuch

Der Großrahmenscherversuch unterscheidet sich vom Kleinrahmenscherversuch in der Größe der Scherbox.

Dadurch kann man größere Korndurchmesser testen. Es eignet sich für Bodenproben mit einem Größtkorn bis zu 40 mm Korndurchmesser.

Beim Scherversuch im Großrahmenschergerät wurde das Material 1 ($s_i' - s_a \text{ Gr}$) bzw. das Material 2 ($s_a' - s_i \text{ Gr}$) mit einem GK 31,5 mm getestet.

6.1 Bestandteile des Großrahmenschergerätes

6.1.1 Rahmenscherbox

Die Rahmenscherbox des Großrahmenschergerätes hat einen quadratischen Querschnitt mit einer Querschnittsabmessung von 300 x 300 mm. Die Probenhöhe der Rahmenscherbox beträgt 200 mm (Abb. 28).

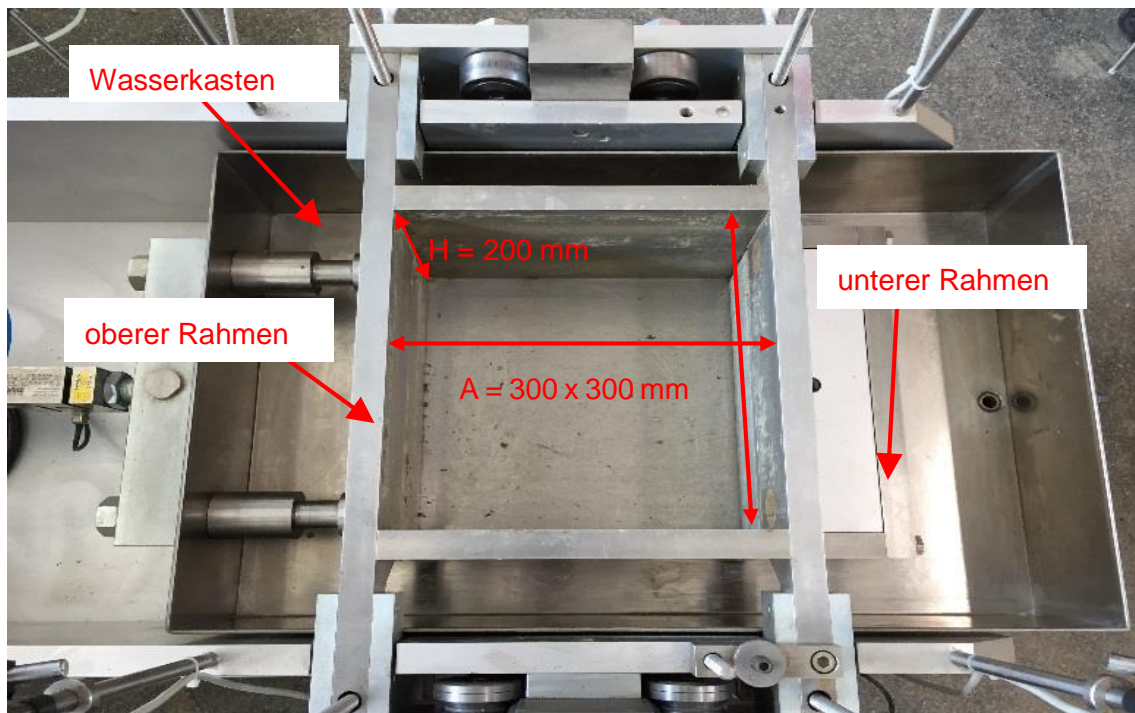


Abb. 28: Rahmenscherbox des Großrahmenschergerätes

6.1.2 Belastungsvorrichtungen

Die Normalspannung wird über Belastungsplatten auf die eingebaute Bodenprobe übertragen. Die Belastungsplatten sind aus Kunststoff, um den Einfluss des Eigengewichtes der Belastungsplatten auf die Bodenprobe so gering wie möglich zu halten (Abb. 29).

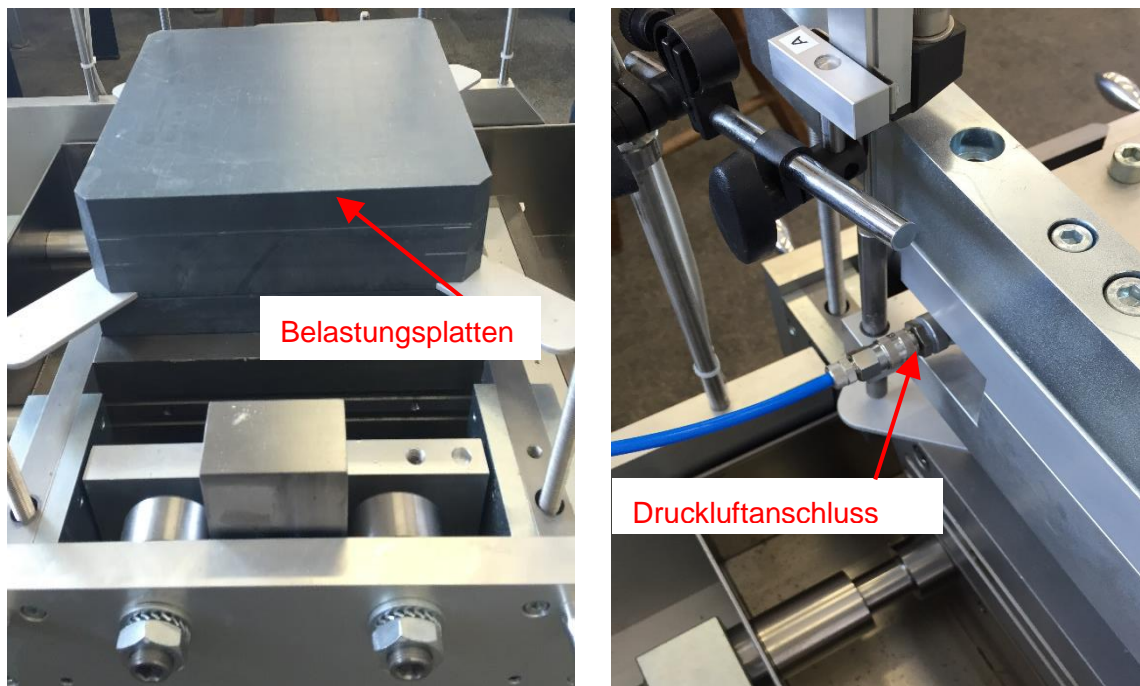


Abb. 29: Belastungsplatten (links) und Druckluftanschluss (rechts)

Die Normalspannung wird über Belastungsplatten (Abb. 29) auf die Bodenprobe aufgebracht. Dabei wird die Normalspannung mithilfe von Druckluft erzeugt. Bei Versuchsstart wird durch die angeschlossene Druckluft ein „Belastungspolster“ in der Belastungsvorrichtung erzeugt, welcher über die Belastungsplatten die Probe mit der gewünschten Normalspannung gleichmäßig belastet.

Der Vorschub zum Aufbringen der Scherkraft durch konstanten Vorschub befindet sich zwischen Wasserkasten und dem verbauten Antriebskern des Großrahmenschergerätes. Die Vorschubkraft wird über zwei Zylinder auf den unteren Rahmen der Scherbox übertragen. Die maximale Vorschubkraft beträgt 60 kN (Abb. 30).

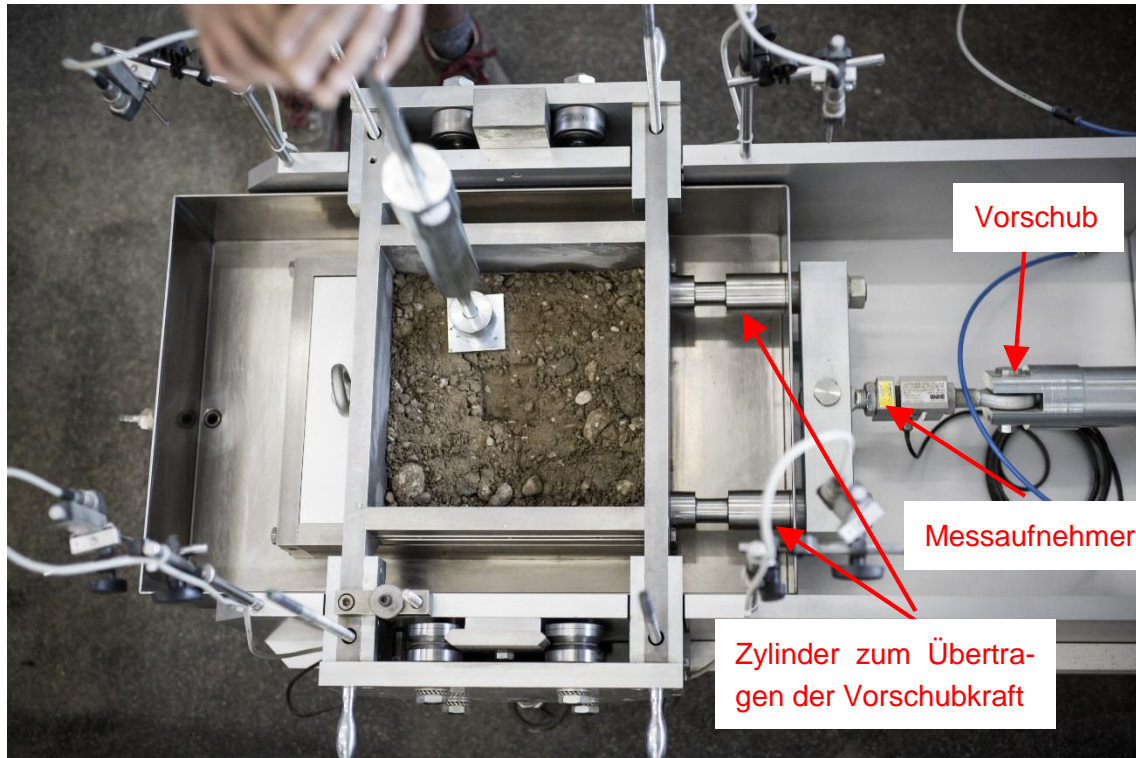


Abb. 30: Vorschub + Zylinder, horizontaler Messaufnehmer

6.1.3 Messaufnehmer

Das Großrahmenschergerät besitzt fünf verschiedene Messaufnehmer.

Vier vertikale Messaufnehmer werden an den Eckpunkten der Rahmenscherbox angebracht. Als Unterlage für die einzelnen Messaufnehmer dienen Unterlagszylinder (Abb. 31).

Die vertikalen Messaufnehmer dienen zur Aufzeichnung der Setzungen und der Normalspannung während des Scherversuches. Der horizontale Messaufnehmer zur Aufzeichnung der Scherkraft (Schubbeanspruchung) befindet sich zwischen dem Vorschub und Wasserkasten (Abb. 30).

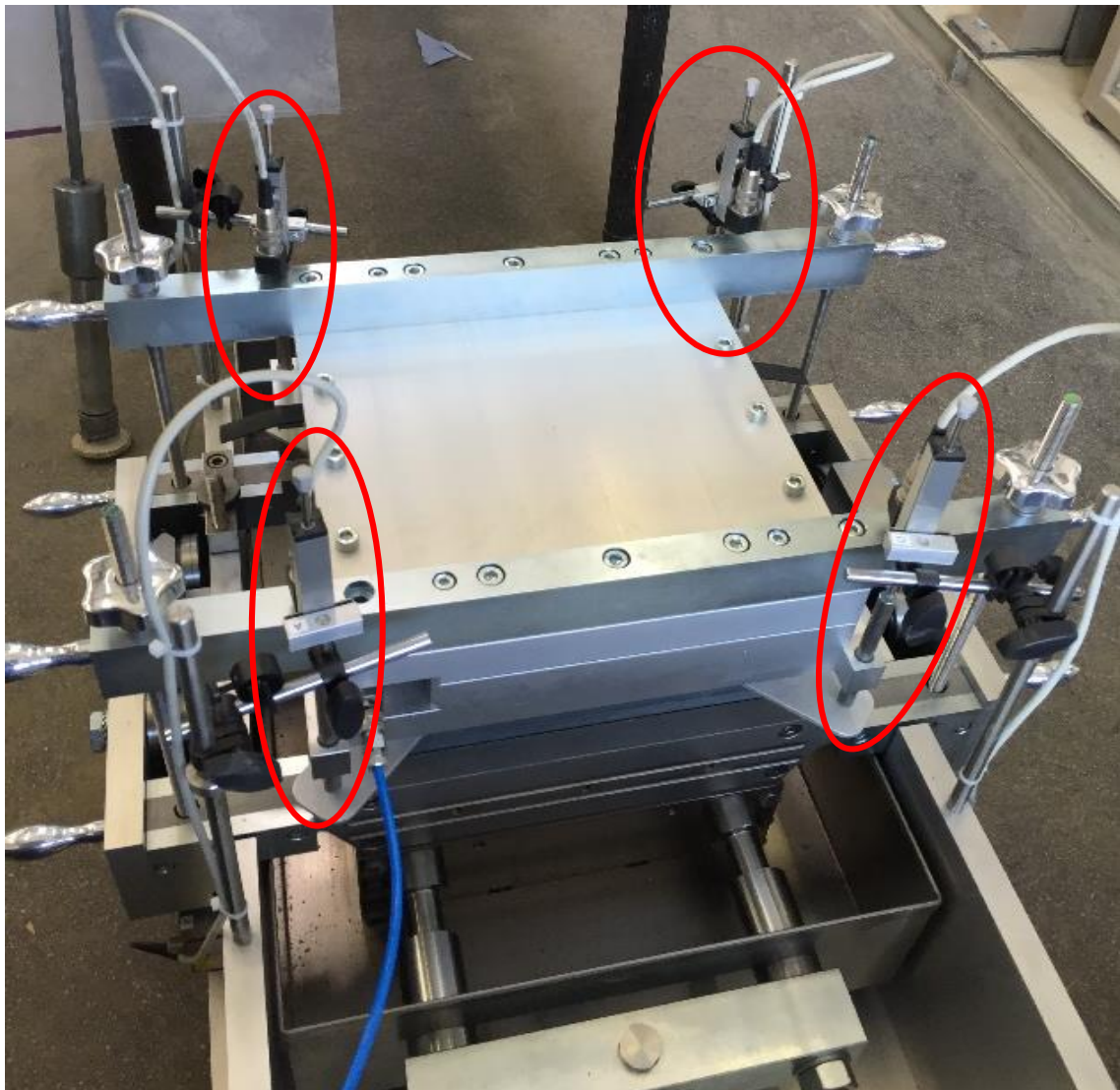


Abb. 31: Vertikaler Messaufnehmer des Großrahmenschergerätes

6.2 Versuchsvorbereitung, Einbau

Das Material 1 (si' sa Gr) bzw. Material 2 (sa' si Gr) wird mit einem GK 31,5 mm in die Scherbox eingebaut. Die Einbaudichte beträgt dabei 92 % bzw. 97 % der Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$ bzw. 97%) (Tab. 14).

Tab. 14: Einbaudichte 97 % bzw. 92 % der Proctordichte für Material 1 bzw. Material 2 mit einem GK 31,5 mm (aus Kapitel 3.2.4, 3.3.4)

		M1 - GK 31,5 mm	M2 - GK 31,5 mm
Proctordichte	[Mg/m ³]	2,11	1,97
97% Proctordichte	[Mg/m ³]	2,05	1,91
92% Proctordichte	[Mg/m ³]	1,94	1,81

Die Bodenprobe wird lagenweise eingebaut, um eine möglichst gleiche Dichte der Probe zu erhalten. Zur Verdichtung werden ein Stampfer und eine Lastverteilungsplatte verwendet.

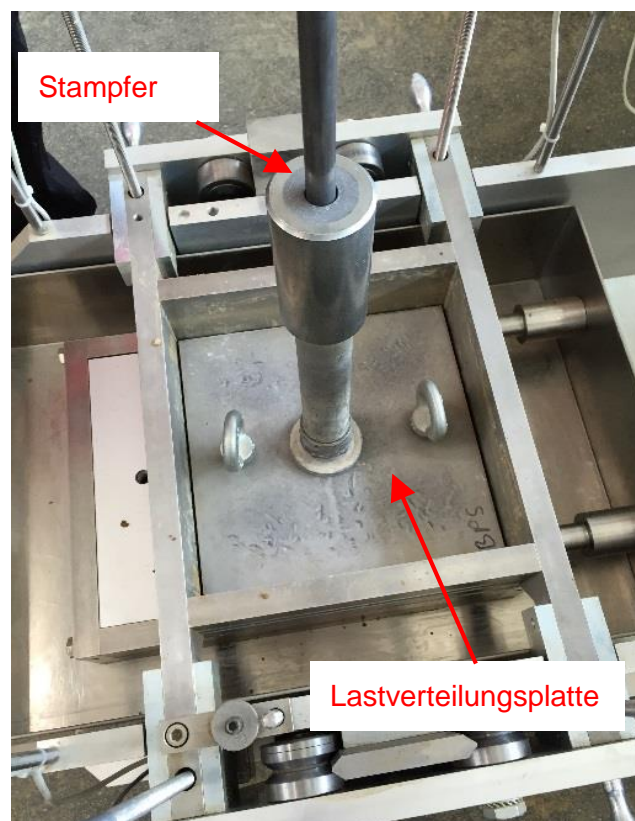


Abb. 32: Stampfer und Lastverteilungsplatte zum Einbau der Bodenprobe

6.3 Durchführung Vergleichsversuch

Nach dem Einbau der Bodenprobe in die Rahmenscherbox des Großrahmenschergerätes wird diese mit einer Normalspannung von 50, 75, 100 kN/m² (Belastungsstufen je Vergleichsversuch) belastet. Danach erfolgt der Abschervvorgang durch konstanten Vorschub mit einer Abschergeschwindigkeit von 1 mm/min.

Bei jedem neuen Scherversuch ist die Bodenprobe aus dem Schergerät auszubauen und eine neue Bodenprobe (mit derselben Korngrößenverteilung, demselben Wassergehalt und derselben Dichte) einzubauen.

Es werden je Material und Einbaudichte drei Vergleichsversuche durchgeführt, um die Ergebnisse wissenschaftlich interpretieren zu können.

6.4 Versuchsergebnisse – Großrahmenschergerät (Gr.)

Es gelten die gleichen Bestimmungen bzgl. Einbaudichte, Wassergehalt und der Definition der maximalen Setzung bzw. Hebung wie beim Kapitel 5.4 (Versuchsergebnisse Kleinrahmenschergerät).

6.4.1 Gr. Kalibrierversuch: M1 (GK 2 mm) - $D_{pr} = 97\%$

Die maximale Setzung bzw. Hebung ist bei den Kalibrierversuchen zwischen 1 bis 2 % der Probenhöhe (Tab. 63, Abb. 92, Tab. 63, Abb. 95, Abb. 98). Die Scherfestigkeit wird bei einem Scherweg zwischen 5 bis 12 mm erreicht und fällt mit zunehmendem Scherweg ab (Abb. 91, Abb. 94, Abb. 97).

Das Normalspannungsniveau ist: $\sigma_1 = 100 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_2 = 200 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_3 = 300 \text{ kN/m}^2$ bei allen durchgeführten Versuchen.

Die Auswertung der Kalibrierversuche ergibt folgende Scherparameter:

- Kalibrierversuch 1

Reibungswinkel $\varphi = 38^\circ$, Kohäsion $c = 26 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 64, Abb. 87).

- Kalibrierversuch 2

Reibungswinkel $\varphi = 38^\circ$, Kohäsion $c = 15 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 66, Abb. 96).

- Kalibrierversuch 3

Reibungswinkel $\varphi = 39^\circ$, Kohäsion $c = 12 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 68, Abb. 99).

6.4.2 Gr. Vergleichsversuch: M1 (si' sa Gr)

6.4.2.1 Gr. M1 (GK 31,5 mm) - $D_{pr} = 92 \%$

Bei den Vergleichsversuchen mit einer Einbaudichte von 92 % der Proctordichte, ist die maximale (relative) Setzung bzw. Hebung unter 1 % der Probenhöhe (Tab. 69, Abb. 101, Tab. 71, Abb. 104, Tab. 73 Abb. 106).

Die Scherfestigkeit wird bei 90 % der Bodenproben nach einem Scherweg der größer als 12 mm ist erreicht. Bei zwei Versuchen (zweiter Vergleichsversuch: σ_1, σ_2) stellt sich die maximale Scherfestigkeit nach einem Scherweg von 24 mm ein. Die Schubspannung verläuft danach bei 90 % der durchgeführten Scherversuche konstant weiter (Abb. 100, Abb. 103, Abb. 106).

Das Normalspannungsniveau ist: $\sigma_1 = 50 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_2 = 75 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_3 = 100 \text{ kN/m}^2$ bei allen durchgeführten Versuchen.

Aus den Auswertungen der Schergerade lassen sich folgende für die Scherparameter Ergebnisse ablesen:

- Vergleichsversuch 1

Reibungswinkel $\varphi = 43^\circ$, Kohäsion $c = 10 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 70, Abb. 102).

- Vergleichsversuch 2

Reibungswinkel $\varphi = 39^\circ$, Kohäsion $c = 6 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 72, Abb. 105).

- Vergleichversuch 3

Reibungswinkel $\varphi = 37^\circ$, Kohäsion $c = 8 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 74, Abb. 108).

6.4.2.2 Gr. M1 (GK 31,5 mm) - $D_{pr} = 97 \%$

Bei allen Scherversuchen ist die maximale Setzung kleiner als 1 % der Probenhöhe. Die maximale Hebung ist ebenfalls unter 1 % der Probenhöhe (Tab. 75, Abb. 110, Tab. 77, Abb. 113, Tab. 79, Abb. 116).

Der Schubspannungsverlauf fällt bei allen durchgeführten Vergleichsversuchen (bei jeder Belastungsstufe $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) mit fortschreitendem Scherweg nach dem Erreichen der Scherfestigkeit ab (Abb. 109, Abb. 112, Abb. 115).

Das Normalspannungsniveau ist: $\sigma_1 = 50 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_2 = 75 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_3 = 100 \text{ kN/m}^2$ bei allen durchgeführten Versuchen.

Aus den Vergleichsversuchen wurden folgende Scherparameter ermittelt:

- Vergleichsversuch 1

Reibungswinkel $\varphi = 50^\circ$, Kohäsion $c = 14 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 76, Abb. 111).

- Vergleichsversuch 2

Reibungswinkel $\varphi = 48^\circ$, Kohäsion $c = 22 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 78, Abb. 114)

- Vergleichsversuch 3

Reibungswinkel $\varphi = 50^\circ$, Kohäsion $c = 8 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 80, Abb. 117).

6.4.3 Gr. Vergleichsversuch: M2 (si' sa Gr)

6.4.3.1 Gr. M2 (GK 31,5 mm) - $D_{pr} = 92 \%$

Die maximale Hebung bzw. Setzung der eingebauten Bodenprobe ist bei einer Einbaudichte von 92 % der Proctordichte zwischen 1 und 2 % der Probenhöhe (Tab. 81, Abb. 119, Tab. 83, Abb. 122, Tab. 85, Abb. 125).

Aus dem Schubspannungsverlauf kann man ablesen, dass die Scherfestigkeit sich nach einem Scherweg zwischen 25 und 60 mm einstellt. Die Schubspannung fällt bei 90 % der Bodenproben nach dem Erreichen der Scherfestigkeit nicht ab, sondern verläuft mit zunehmendem Scherweg konstant weiter (Abb. 118, Abb. 121, Abb. 124).

Das Normalspannungsniveau ist: $\sigma_1 = 50 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_2 = 75 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_3 = 100 \text{ kN/m}^2$ bei allen durchgeführten Versuchen.

Für die Vergleichsversuche ergeben sich für den Reibungswinkel φ und die Kohäsion c folgende Werte:

- Vergleichsversuch 1

Reibungswinkel $\varphi = 38^\circ$, Kohäsion $c = 15 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 82, Abb. 120)

- Vergleichsversuch 2

Reibungswinkel $\varphi = 38^\circ$, Kohäsion $c = 18 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 84, Abb. 123)

- Vergleichsversuch 3

Reibungswinkel $\varphi = 35^\circ$, Kohäsion $c = 22 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 86, Abb. 126).

6.4.3.2 Gr. M2 (GK 31,5 mm) - $D_{pr} = 97 \%$

Die Versuchsprobe des Materials 2 (sa^c si Gr, GK 31,5 mm) setzt bzw. hebt sich maximal um 1 bis 4 % der Probenhöhe (Tab. 85, Abb. 128, Tab. 89, Abb. 131, Tab. 91, Abb. 134).

Der Scherweg beim Erreichen der maximalen Schubspannung beträgt zwischen 40 bis 70 mm. Nach dem Erreichen der maximalen Schubspannung verläuft die Schubspannung mit zunehmender Verschiebung konstant weiter und fällt nicht ab (Abb. 127, Abb. 130, Abb. 133).

Das Normalspannungsniveau ist: $\sigma_1 = 50 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_2 = 75 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_3 = 100 \text{ kN/m}^2$ bei allen durchgeführten Versuchen.

Aus der Auswertung der Schergeraden ergeben sich folgende Scherparameter für die Vergleichsversuche:

- Vergleichsversuch 1

Reibungswinkel $\varphi = 41^\circ$, Kohäsion $c = 12 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 88, Abb. 127)

- Vergleichsversuch 2

Reibungswinkel $\varphi = 39^\circ$, Kohäsion $c = 13 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 90, Abb. 132)

- Vergleichsversuch 3

Reibungswinkel $\varphi = 39^\circ$, Kohäsion $c = 17 \text{ kN/m}^2$ (Tab. 92, Abb. 135)

7 Evaluierung und Erkenntnisse der Scherversuche

7.1 Rückblick auf äquivalente Vergleichsversuche

Literatur, welche sich mit dem Einfluss des Überkorns auf das Scherverhalten von Böden beim direkten Scherversuch beschäftigt:

7.1.1 Einfluss des Überkorns (Benson & Bareither & Edil, 2008)

Bareither, Benson und Edil (2008) verglichen den Einfluss des Überkorns bei Sanden mit verschiedener Kornzusammensetzung und mit einem Kiesanteil (Überkornanteil) zwischen 0 – 30 %. Die Kleinrahmenscherbox hatte eine quadratische Querschnittsfläche mit einer Abmessung von 64 x 64 mm. Die Probenhöhe betrug 31 mm. Die Probe wurde mit einem GK 4,75 mm (ASTM D 422: 2004b) in die Scherbox des Kleinrahmenschergerätes eingebaut.

Die Scherbox beim Großrahmenschergerät hatte eine Querschnittsabmessung von 305 x 305 mm und eine Probenhöhe von 152 mm. Das GK der verwendeten Bodenproben hatte einen Korndurchmesser von 25,4 mm.

Die Bodenprobe wurde mit 95 % iger Proctordichte ($D_{pr} = 95\%$) in die Rahmenscherbox eingebaut.

Die Scherversuche wurden mit jeweils fünf Belastungsstufen durchgeführt mit Normalspannungen zwischen 26 und 184 kN/m².

Die Ergebnisse der Vergleichsversuche zeigten bei einem Überkornanteil zwischen 0 bis 30 % eine Streuung des effektiven Reibungswinkel zwischen 2 bis 4 °. Dabei wurde die maximale Streuung vom effektiven Reibungswinkel ($\Delta \varphi' = 4^\circ$) bei der Bodenprobe mit dem größten Überkornanteil (30 % iger - Kiesanteil) verzeichnet.

Vergleichsversuche zur Bestimmung des Einflusses auf die Scherparameter von dem auf Sieb Nr. 4 mit der Maschenweite 4,75 mm (ASTM D 422: 2004b) gebliebenen Materialrückstand bei Scherversuchen in einem Kleinrahmen- bzw. Großrahmenschergerät wurden auch durchgeführt. Dabei ist der Materialdurchgang in die Rahmenscherbox des Kleinrahmenschergerätes und der am Sieb gebliebene

Materialrückstand mit dem Materialdurchgang in die Scherbox des Großrahmenschergerät eingebaut worden. Das Ergebnis zeigte keinen Unterschied des effektiven Reibungswinkels φ' .

Die effektive Kohäsion c' betrug bei den Scherversuchen im Kleinrahmenschergerät zwischen 3 und 4 kN/m² und bei den Scherversuchen im Großrahmenschergerät zwischen 6 und 7 kN/m².

7.1.2 Weitere Vergleichsversuche

- Taylor and Leps (1938) analysierten das Scherverhalten des Ottawa Sandes in einem Kleinrahmenschergerät mit der Abmessung 76 x 76 mm und in einem Großrahmenschergerät mit den Abmessungen 305 x 305 mm. Bei diesem Vergleich wurde lediglich auf das Scherverhalten bei unterschiedlicher Probengeometrie einer Bodenprobe mit gleicher Korngrößenverteilung eingegangen. Das Ergebnis war eine durchschnittliche Abweichung des effektiven Reibungswinkels φ' von $\pm 0,5^\circ$ (Taylor & Leps, 1938) (Taylor, 1939) (Benson & Bareither & Edil, 2008).
- Cerato und Luttenegger (2006) führten an drei Rahmenschergeräten mit unterschiedlichen Abmessungen Scherversuche durch. Als Probematerial verwendeten sie fünf Sande mit jeweils unterschiedlichen Korngrößenverteilungen. Ihr Ziel war es, einen Einfluss der Probenabmessung und der Einbaudichte auf die Scherfestigkeit bzw. Scherparameter der Probematerialien zu finden. Die Abmessungen bei der ersten Scherbox betrug 60 x 60 mm mit einer Probenhöhe von 26,4 mm, bei der zweiten Scherbox 102 x 102 mm mit einer Probenhöhe von 40,6 mm und bei der dritten Scherbox 305 x 305 mm mit einer Probenhöhe von 177,8 mm. Cerato und Luttenegger konnten für die verwendeten Sande keinen Einfluss der unterschiedlichen Probenabmessungen und Einbaudichten auf den effektiven Reibungswinkel φ' feststellen (Benson & Bareither & Edil, 2008) (Cerato & Luttenegger, 2006).
- Simoni and Houlsby (2006) führten Scherversuche in einem Großrahmenschergerät mit den Abmessungen 254 x 152 mm und einer Probenhöhe von 150 mm. Als Probematerial wurden für die Scherversuche reiner Quarzsand verwendet und Quarzsand mit einem Kiesanteil zwischen 10 und 60 %. Der Korndurchmesser des Kieses betrug zwischen 2 und 20 mm. Der effektive Reibungswinkel φ' bei Scherversuchen mit reinem Quarzsand und Quarzsand mit bis zu 20 % Kiesgehalt (Überkornanteil) ergab bei gleicher

Einbaudichte keinen Unterschied. Ab einem Kiesanteil $\geq 30\%$ ist ein Unterschied im effektiven Reibungswinkel zu verzeichnen (Benson & Bareither & Edil, 2008) (Houlsby & Simoni, 2006).

7.2 Vergleich der Lagerungsdichte zur Proctordichte

Für die jeweilige Einbaudichte der Bodenprobe ist die Lagerungsdichte D ermittelt worden, um den Verdichtungsgrad der Einbaudichte angeben zu können.

7.2.1 Lagerungsdichte (DIN 18126: 1986)

Die Lagerungsdichte D beschreibt den Verdichtungsgrad eines Bodens in Abhängigkeit von der lockersten (minimalen) bzw. dichtesten (maximalen) Lagerungsdichte und der Trockendichte (Einbaudichte) des Bodens (DIN 18126: 1986).

Die Lagerungsdichte ist nach (DIN 18126: 1986) definiert als:

$$D = \frac{\rho_d - \rho_{\min}}{\rho_{\max} - \rho_{\min}} \quad (10)$$

D	[%]	Lagerungsdichte
ρ_d	[Mg/m ³]	Trockendichte
ρ_{\max}	[Mg/m ³]	dichteste Lagerungsdichte
ρ_{\min}	[Mg/m ³]	lockerster Lagerungsdichte

Nach der Lagerungsdichte D wird zwischen folgenden Verdichtungsgraden unterschieden (Tab. 15) (DIN 18126: 1986):

Tab. 15: Verdichtungsgrad in Abhängigkeit der Lagerungsdichte D

Verdichtungsgrad der Probe	Lagerungsdichte D
sehr lockere Lagerung	$D < 0,15$
lockere Lagerung	$0,15 \leq D < 0,30$
mitteldichte Lagerung	$0,30 \leq D < 0,50$
dichte Lagerung	$D \geq 0,50$

Kommentar: Die Einteilung nach der DIN 18126: 1986 ist ungünstig, wegen der zu engen Übergänge zwischen den Verdichtungsgraden (z.B. zwischen locker und sehr lockerer Lagerung, etc.)

7.2.1.1 Lockerste Lagerungsdichte ρ_{min}

Bei der Bestimmung der lockersten Lagerungsdichte ρ_{min} befüllt man einen Versuchszylinder (bei sandigen Böden) über einen zentrisch angebrachten Trichter mit trockenem Probematerial. Bei kiesigem Material kann das Material mithilfe einer Schaufel in den Versuchszylinder eingebracht werden.

Aus dem Gewicht vom eingebrachten Probematerial und dem Volumen des Versuchszylinders wird die lockerste Lagerungsdichte bestimmt.

Der Versuch wird fünfmal wiederholt, um die lockerste Lagerungsdichte zu bestimmen (in Anlehnung an DIN 18126: 1986).

7.2.1.2 Dichteste Lagerungsdichte ρ_{max}

Um eine vergleichbare dichteste Lagerungsdichte zu ermitteln ist es wichtig dasselbe Probematerial mit gleicher Masse wie bei der Bestimmung der lockersten Lagerungsdichte zu verwenden.

Der Verdichtungsvorgang erfolgte bei den Versuchen in dieser Arbeit mit einer Rüttelplatte. Es wurde je Lage 8 bis 10 s verdichtet.

Danach wird das überschüssige Wasser abgeleitet und eine gemittelte Höhe zum oberen Versuchszylinderrand aus drei Messungen (von verschiedenen Punkten der Probeoberfläche) bestimmt (in Anlehnung an DIN 18126: 1986).

7.2.2 Lagerungsdichte M1 (si' sa Gr)

Verdichtungsgrad (Tab. 15) - Material 1 (si' sa Gr) GK 2 mm (Tab. 16):

- mitteldichte Lagerung bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$)
- dichte Lagerung bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$)

Verdichtungsgrad (Tab. 15) - Material 1 (si' sa Gr) GK 31,5 mm (Tab. 16):

- dichte Lagerung bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$)
- dichte Lagerung bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$)

Tab. 16: Lagerungsdichte vom Material 1 (M1, si' sa Gr)

Material 1 (si' sa Gr)					
Korngröße		GK 2 mm		GK 31,5 mm	
Proctordichte ρ_{pr}	[Mg/m ³]	$D_{pr} = 92 \%$	$D_{pr} = 97 \%$	$D_{pr} = 92 \%$	$D_{pr} = 97 \%$
		1,65	1,74	1,94	2,05
lockerste Lagerungsdichte ρ_{min}		1,49		1,77	
dichteste Lagerungsdichte ρ_{max}		1,90		2,04	
Lagerungsdichte D	[-]	0,39	0,61	0,64	1,05

7.2.3 Lagerungsdichte M2 (sa' si Gr)

Aufgrund des hohen Feinkornanteils (74 %) beim Material 2 mit dem GK 2 mm ist es nicht möglich gewesen das gesättigte Probematerial zu verdichten und somit die Lagerungsdichte D zu bestimmen.

Verdichtungsgrad (Tab. 15) - Material 2 (sa' si Gr) GK 31,5 mm (Tab. 17):

- dichte Lagerung bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$)
- dichte Lagerung bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$)

Tab. 17: Lagerungsdichte vom Material 2 (M2, sa' si Gr)

Material 2 (si' sa Gr)					
Korngröße		GK 2 mm		GK 31,5 mm	
Proctordichte ρ_{pr}	[Mg/m ³]	$D_{pr} = 92 \%$	$D_{pr} = 97 \%$	$D_{pr} = 92 \%$	$D_{pr} = 97 \%$
		1,67	1,76	1,81	1,91
lockerste Lagerungsdichte ρ_{min}		1,21		1,29	
dichteste Lagerungsdichte ρ_{max}		k.L.		1,72	
Lagerungsdichte D	[-]	k.L.	k.L.	1,21	1,45

7.3 Evaluierung der Kalibrierversuche – M1, $D_{pr}=97\%$

7.3.1 Vergleich von φ , c (M1, $D_{pr}=97\%$)

Der Reibungswinkel φ ist beim Scherversuch im Kleinrahmenschergerät um 2° und die Kohäsion um $1,4 \text{ kN/m}^2$ größer als im Großrahmenschergerät (Tab. 18).

Aus den Kalibrierversuchen mit dem Material 1 (M1 - si⁴ sa Gr, GK 2 mm) bei einer Einbaudichte 97% der Proctordichte ($D_{pr}=97\%$) sind folgende Ergebnisse für φ und c bei den zwei Versuchsgeräten ermittelt worden (Tab. 18):

- Kleinrahmenschergerät: $\varphi = 34,0$ bis $38,0^\circ$, Mittelwert $36,3^\circ$
 $c = 11,0$ bis $21,0 \text{ kN/m}^2$, Mittelwert $16,3 \text{ kN/m}^2$
- Großrahmenschergerät: $\varphi = 38,0$ bis $39,0^\circ$, Mittelwert $38,3^\circ$
 $c = 12,0$ bis $26,0 \text{ kN/m}^2$, Mittelwert $17,7 \text{ kN/m}^2$

Tab. 18: Evaluierung der Kalibrierversuche für das Material 1 (GK 2 mm) im Kleinrahmen- bzw. Großrahmenschergerät und Dichte bei $D_{pr}=97\%$ (Anhang A.1, B.1)

Material 1 (si ⁴ sa Gr) - Einbaudichte 97 % der Proctordichte ($D_{pr}=97\%$)				
Größtkorn [mm]	2,0			
Dichte [Mg/m^3]	1,74			
Wassergehalt [%]	6,6			
Korngrößenanteil	Sand: 88 %, Schluff: 11 %, Ton: 1 %			
Versuchsgerät + Abmessung [mm]	Kleinrahmenschergerät ($d = 80, h = 27$)		Großrahmenschergerät ($A = 300 \times 300, H = 200$)	
Scherparameter	φ [°]	c [kN/m^2]	φ [°]	c [kN/m^2]
Versuch 1	38,0	21,0	38,0	26,0
Versuch 2	37,0	11,0	38,0	15,0
Versuch 3	34,0	17,0	39,0	12,0
Mittelwert	36,3	16,3	38,3	17,7

Die Auswertung der Schergeraden der einzelnen Kalibrierversuche im Kleinrahmen- bzw. Großrahmenschergerät werden in Abb. 33 dargestellt.

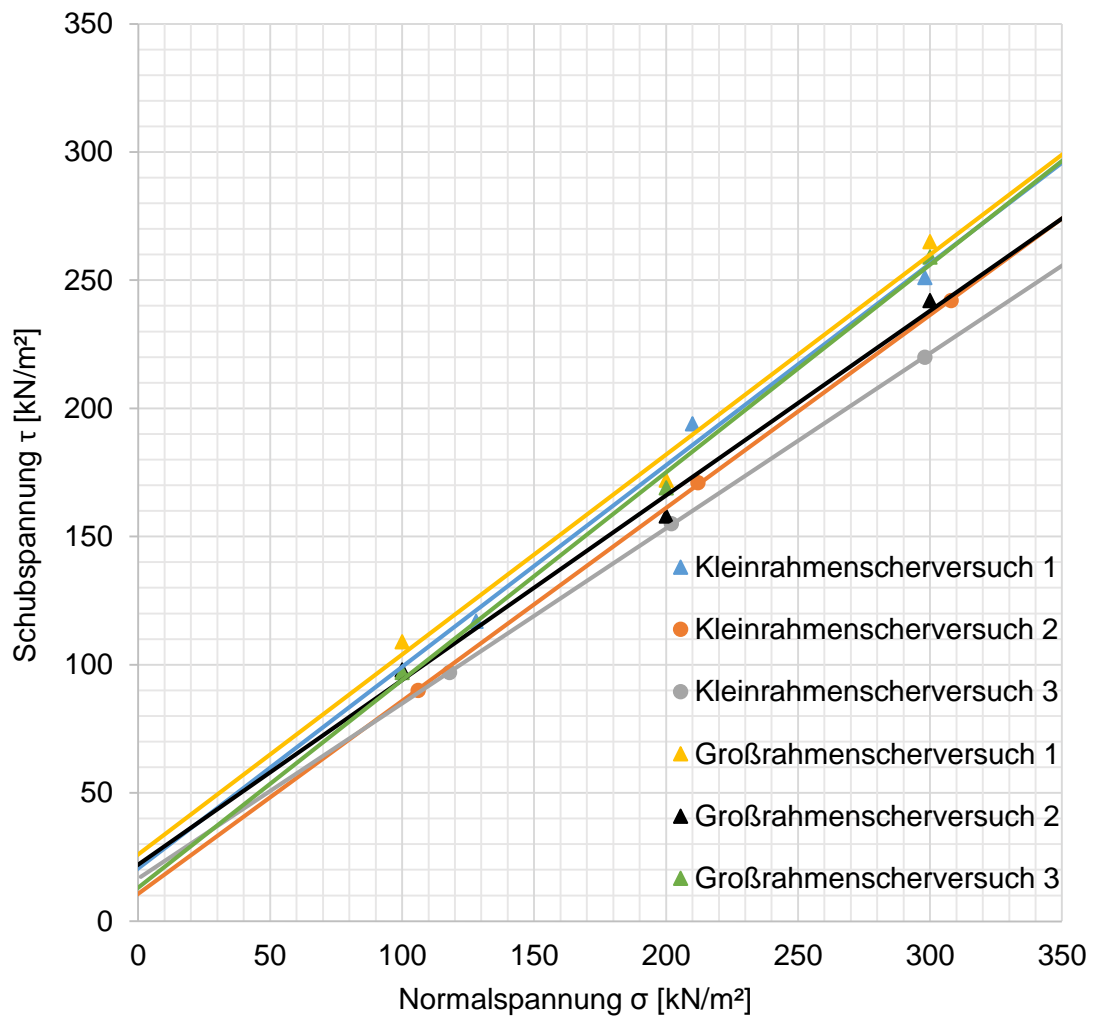


Abb. 33: Vergleich der Schergeraden vom Kalibrierversuch Material 1 – si' sa Gr, GK 2 mm, $D_{pr} = 97\%$ im Klein- bzw. Großrahmenschergerät

7.3.2 Relativer Scherweg (M1, $D_{pr}=97\%$)

Als relativer Scherweg wird jene Verschiebung definiert, bei der die Scherfestigkeit der Bodenprobe erreicht wird (in %).

Der relative Scherweg bei den Kalibrierversuchen zeigt eine Spannweite zwischen (Tab. 19, Tab. 20, Abb. 34):

- 2,9 und 6,3 % (Mittelwert 3,8 %) im Kleinrahmenschergerät
- 1,8 und 4,0 % (Mittelwert 3,1 %) im Großrahmenschergerät

Tab. 19: Relativer Scherweg bei der die Scherfestigkeit beim Kalibrierversuch Kleinrahmenschergerät (Material 1, GK 2 mm) (Anhang A.1, B.1) erreicht wird.

Kalibrierversuch Kleinrahmenschergerät			
Material		Material 1 (si' sa Gr, GK 2 mm)	
Wassergehalt [%]		6,6	
Dichte ($D_{pr}=97\%$) [kN/m ²]		1,74	
Abmessungen Scherbox [mm]		$d: 80$	$h: 27$
σ	relativer Scherweg Versuch 1 [%]	relativer Scherweg Versuch 2 [%]	Relativer Scherweg Versuch 3 [%]
σ_1	3,5	3,5	6,3
σ_2	2,9	3,5	4,0
σ_3	3,1	3,1	4,0
Mittelwert [%]		3,8	

Tab. 20: Der relative Scherweg bei der die Scherfestigkeit beim Kalibrierversuch Großrahmenschergerät (Material 1, GK 2 mm) (Anhang A.1, B.1) erreicht wird.

Kalibrierversuch Großrahmenschergerät			
Material		Material 1 (si' sa Gr, GK 2 mm)	
Wassergehalt [%]		6,6	
Dichte ($D_{pr}=97\%$) [kN/m ²]		1,74	
Abmessungen Scherbox [mm]		$A: 300 \times 300$	$H: 190$
σ	relativer Scherweg Versuch 1 [%]	relativer Scherweg Versuch 2 [%]	relativer Scherweg Versuch 3 [%]
σ_1	3,0	3,7	3,8
σ_2	4,0	3,3	3,5
σ_3	1,8	2,3	2,1
Mittelwert [%]		3,1	

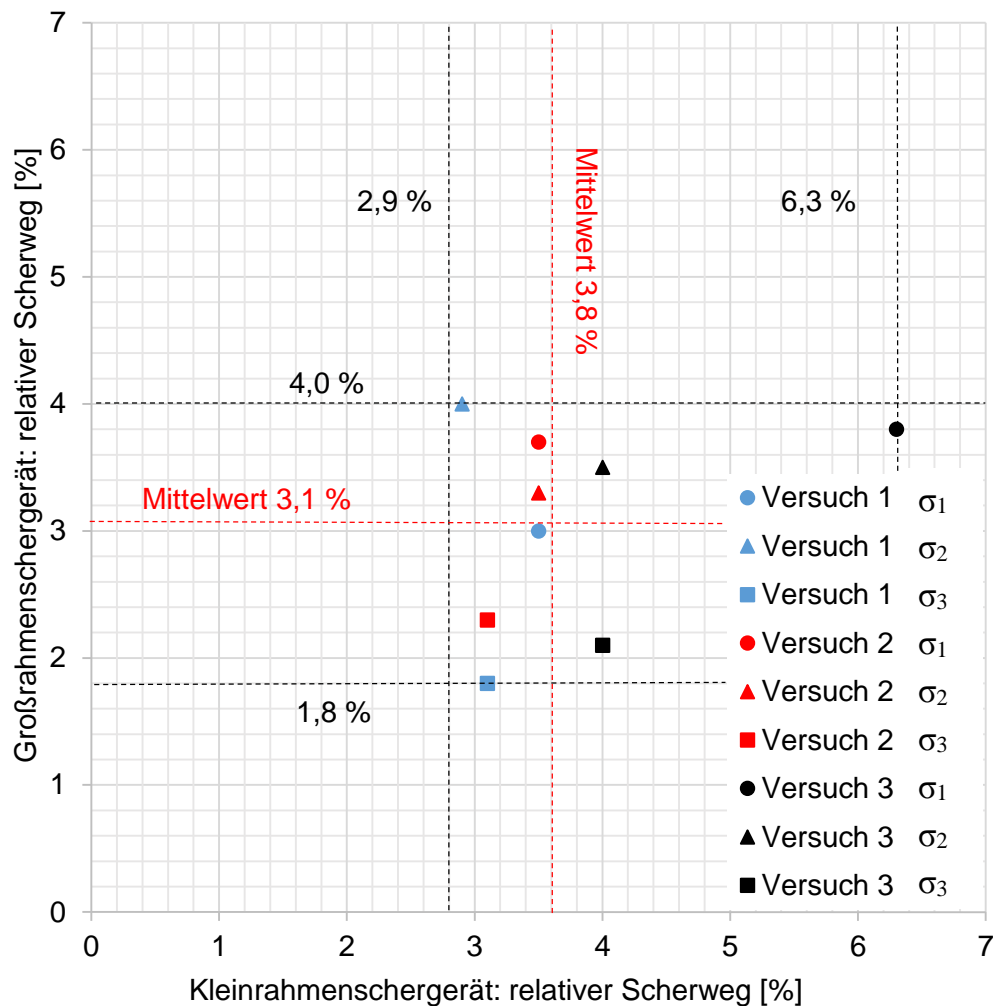


Abb. 34: Der relative Scherweg bei den Kalibrierversuchen im Kleinrahmen- bzw. Großrahmenschergerät für das Material 1 (si' sa Gr, GK 2 mm) bei einer Einbaudichte von ($D_{pr}=97\%$)

7.3.3 Setzungen und Hebungen (M1, $D_{pr}=97\%$)

Die maximalen Setzungen bzw. Hebungen betragen bei den Kalibrierversuchen (Material 1 – si' sa Gr, GK 2 mm) bei einer Einbaudichte von $D_{pr}=97\%$ in beiden Versuchsapparaten durchschnittlich zwischen 1 und 2 % der Probenhöhe. (Anhang A.1, B.1)

7.4 Evaluierung der Vergleichsversuche– M1, $D_{pr}=92\%$

7.4.1 Vergleich von φ , c (M1, $D_{pr}=92\%$)

Der Reibungswinkel φ mit Überkornanteil (70 % - Kies) ist um 4° größer als jener im Kleinrahmenschergerät ohne Überkornanteil. Die Kohäsion c ist hingegen durchschnittlich um 3 kN/m^2 kleiner bei den Scherversuchen mit Überkornanteil.

Die durchschnittlichen Scherparameter φ bzw. c (mit bzw. ohne Überkornanteil) betragen bei der Einbaudichte von $D_{pr}=92\%$ für das Material 1 (Tab. 21):

- Kleinrahmenschergerät: $\varphi = 35,0$ bis $37,0^\circ$, Mittelwert $35,7^\circ$
 $c = 8,0$ bis $13,0\text{ kN/m}^2$, Mittelwert $11,0\text{ kN/m}^2$
- Großrahmenschergerät: $\varphi = 37,0$ bis $43,0^\circ$, Mittelwert $39,7^\circ$
 $c = 6,0$ bis $10,0\text{ kN/m}^2$, Mittelwert $8,0\text{ kN/m}^2$

Tab. 21: Evaluierung der Vergleichsversuche Material 1 (si' sa Gr, GK 2 mm bzw. GK 31,5 mm) im Klein- bzw. Großrahmenschergerät für das bei der Einbaudichte von $D_{pr}=92\%$ (Anhang A.2, B.2)

Material 1 (si' sa Gr)- Einbaudichte 92 % der Proctordichte ($D_{pr}=92\%$)				
Größtkorn [mm]	2,0		31,5	
Dichte [Mg/m^3]	1,65		1,94	
Wassergehalt [%]	6,6		5,5	
Korngrößenanteil (Kapitel 3.2.1)	Kies: 0 %, Sand: 88 %, Schluff: 11 %, Ton: 1 %		Kies: 70 %, Sand: 27 %, Schluff: 2 %, Ton: 1 %	
Versuchsgerät + Abmessung [mm]	Kleinrahmenschergerät ($d = 80, h = 27$)		Großrahmenschergerät ($A = 300 \times 300, H = 200$)	
Scherparameter	φ [°]	c [kN/m^2]	φ [°]	c [kN/m^2]
Versuch 1	35,0	12,0	43,0	10,0
Versuch 2	35,0	13,0	39,0	6,0
Versuch 3	37,0	8,0	37,0	8,0
Mittelwert	35,7	11,0	39,7	8,0

Der Vergleich der Schergeraden der Scherversuche bestätigt den aus Tab. 21 um durchschnittlich 4° größeren Reibungswinkels φ für das Material 1 (si' sa Gr) mit einem Kiesanteil von 70 % (Überkornanteil) gegenüber dem ohne Kies (Überkorn) (Abb. 35).

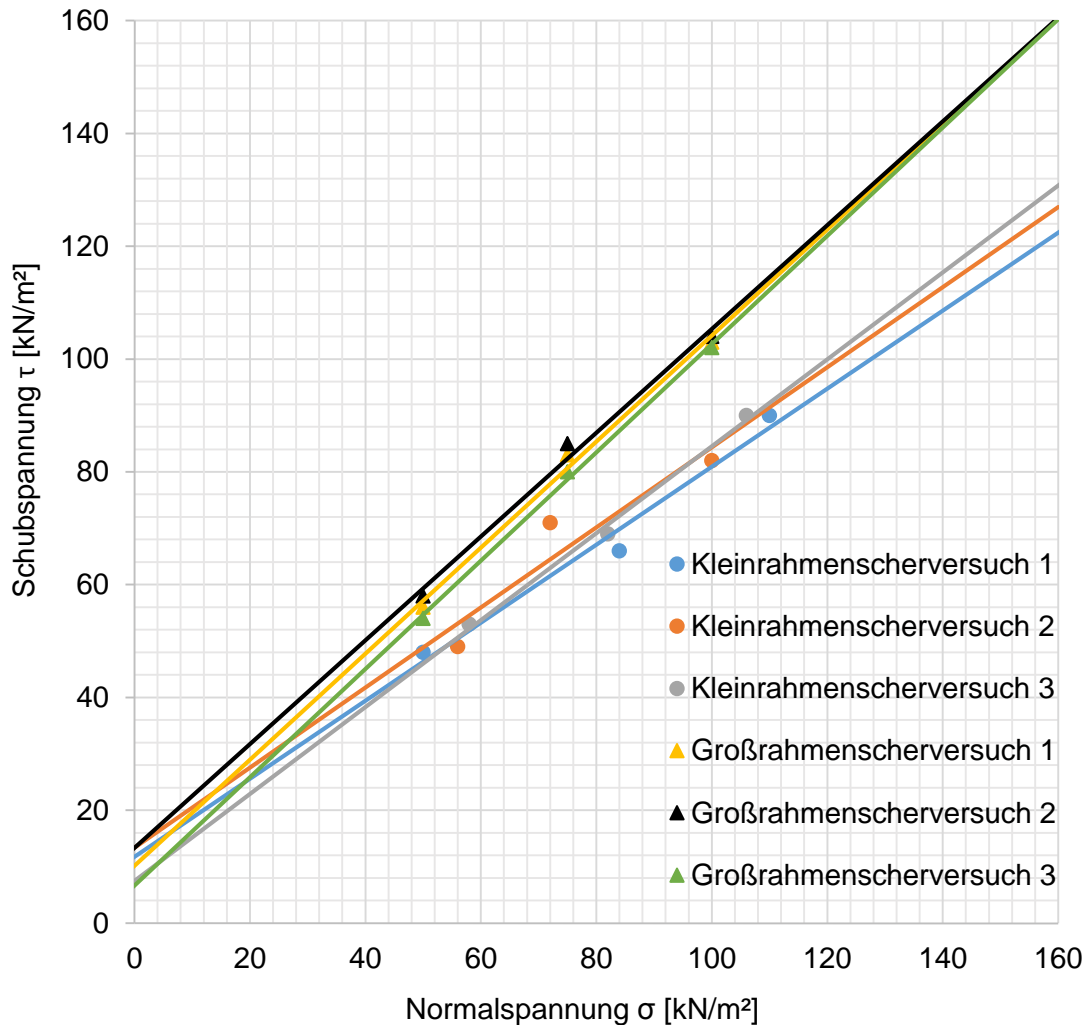


Abb. 35: Schergeraden der Scherversuche mit dem Material 1 (si' sa Gr) im Kleinrahmen- bzw. Großrahmenschergerät mit Überkornanteil (70 %) bei einer Einbaudichte $D_{pr} = 92\%$.

7.4.2 Relativer Scherweg (M1, $D_{pr} = 92 \%$)

Bei dem Material 1 (si' sa Gr) bei der Einbaudichte von $D_{pr} = 92 \%$ ist der relative Scherweg für die Vergleichsversuche in den Versuchsgeräten (Tab. 22, Tab. 23, Abb. 36):

- 1,9 bis 5,8 % (Mittelwert 3,8 %) im Kleinrahmenschergerät
- 2,3 bis 6,0 % (Mittelwert 3,7 %) im Großrahmenschergerät

Tab. 22: Relativer Scherweg beim Vergleichsversuch Kleinrahmenschergerät Material 1 (si' sa Gr, GK 2 mm) bei der Einbaudichte $D_{pr} = 92 \%$ (Anhang A.2, B.2)

Vergleichsversuch Kleinrahmenschergerät			
Material		Material 1 (si' sa Gr, GK 2 mm)	
Wassergehalt [%]		6,6	
Dichte ($D_{pr} = 92 \%$) [kN/m ²]		1,65	
Abmessungen Scherbox [mm]		$d: 80$	$h: 27$
σ	relativer Scherweg Versuch 1 [%]	relativer Scherweg Versuch 2 [%]	relativer Scherweg Versuch 3 [%]
σ_1	5,8	3,5	1,9
σ_2	5,0	2,3	3,0
σ_3	5,0	3,8	3,8
Mittelwert [%]		3,8	

Tab. 23: Relativer Scherweg beim Vergleichsversuch Großrahmenschergerät Material 1 (si' sa Gr, GK 31,5 mm) bei der Einbaudichte $D_{pr} = 92 \%$ (Anhang A.2, B.2)

Vergleichsversuch Großrahmenschergerät			
Material		Material 1 (si' sa Gr, GK 31,5 mm)	
Wassergehalt [%]		5,5	
Dichte $D_{pr} = 92 \%$ [kN/m ²]		1,94	
Abmessungen Scherbox [mm]		$A: 300 \times 300$	$H: 190$
σ	relativer Scherweg Versuch 1 [%]	relativer Scherweg Versuch 2 [%]	relativer Scherweg Versuch 3 [%]
σ_1	2,3	2,7	3,0
σ_2	3,3	4,3	2,3
σ_3	5,3	6,0	4,3
Mittelwert [%]		3,7	

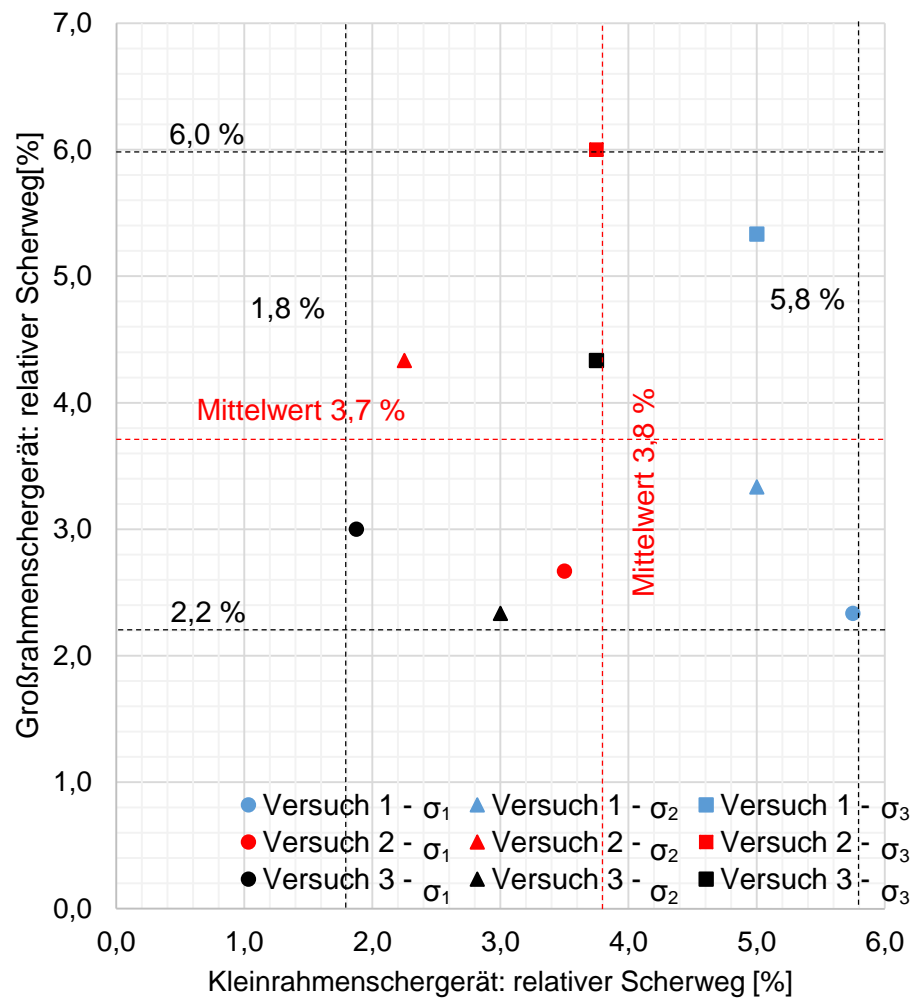


Abb. 36: Relativer Scherweg der Vergleichsversuche im Kleinrahmen- bzw. Großrahmenschergerät (mit 70 % Kiesanteil = Überkorn) für das Material 1 (σ_1 sa Gr) bei der Einbaudichte von $D_{pr} = 97\%$

7.4.3 Setzung und Hebung (M1, $D_{pr} = 92\%$)

Die maximalen Setzungen bzw. Hebungen betragen bei allen durchgeführten Vergleichsversuchen (Material 1, GK 2 mm bzw. GK 31,5 mm) mit der Einbaudichte $D_{pr} = 92\%$ im Durchschnitt zwischen 1 bis 3% der Probenhöhe (Anhang A.2, B.2).

7.5 Evaluierung der Vergleichversuche – M1, $D_{pr}=97\%$

7.5.1 Vergleich von φ , c (M1, $D_{pr}=97\%$)

Der Unterschied des Reibungswinkels φ beträgt bei einer Dichte von $D_{pr}=97\%$ im Durchschnitt 10° zwischen den Versuchen im Großrahmenschergerät (70 % Kiesanteil) und den Scherversuchen im Kleinrahmenschergerät (ohne Kiesanteil) (Tab. 24). Die Kohäsion ist im Durchschnitt bei den Versuchen mit Überkornanteil um 3 kN/m^2 größer, als bei jenen ohne Überkorn (Tab. 24).

Aus den Scherversuchen (im Kleinrahmen- bzw. Großrahmenschergerät) mit dem Material 1 (sa' si Gr) resultieren bei einer Einbaudichte $D_{pr}=97\%$ folgende Werte für die Scherparameter φ und c (Tab. 24):

- Kleinrahmenschergerät: $\varphi = 39,0$ bis $40,0^\circ$, Mittelwert $39,3^\circ$
 $c = 9,0$ bis $15,0\text{ kN/m}^2$, Mittelwert $11,7\text{ kN/m}^2$
- Großrahmenschergerät: $\varphi = 48,0$ bis $50,0^\circ$, Mittelwert $49,3^\circ$
 $c = 8,0$ bis $22,0\text{ kN/m}^2$, Mittelwert $14,7\text{ kN/m}^2$

Tab. 24: Evaluierung der Vergleichversuche für das Material 1 (GK 2 mm bzw. GK 31,5 mm) im Kleinrahmen- bzw. Großrahmenschergerät und der Einbaudichte $D_{pr}=97\%$ (Anhang A.2, B.2)

Material 1 (si' sa Gr)- Einbaudichte 97 % der Proctordichte ($D_{pr}=97\%$)				
Größtkorn [mm]	2,0		31,5	
Dichte [Mg/m^3]	1,74		2,05	
Wassergehalt [%]	6,6		5,5	
Korngrößenanteil (Kapitel 3.2.1)	Kies: 0 %, Sand: 88 %, Schluff: 11 %, Ton: 1 %		Kies: 70 %, Sand: 27 %, Schluff: 2 %, Ton: 1 %	
Versuchsgerät + Abmessung [mm]	Kleinrahmenschergerät ($d = 80, h = 27\text{ mm}$)		Großrahmenschergerät ($A = 300 \times 300, H = 200$)	
Scherparameter	φ [°]	c [kN/m^2]	φ [°]	c [kN/m^2]
Versuch 1	39,0	15,0	50,0	14,0
Versuch 2	40,0	9,0	48,0	22,0
Versuch 3	39,0	11,0	50,0	8,0
Mittelwert	39,3	11,7	49,3	14,7

Die Schergeraden der Vergleichsversuche im Klein- bzw. Großrahmenschergerät sind in Abb. 37 dargestellt.

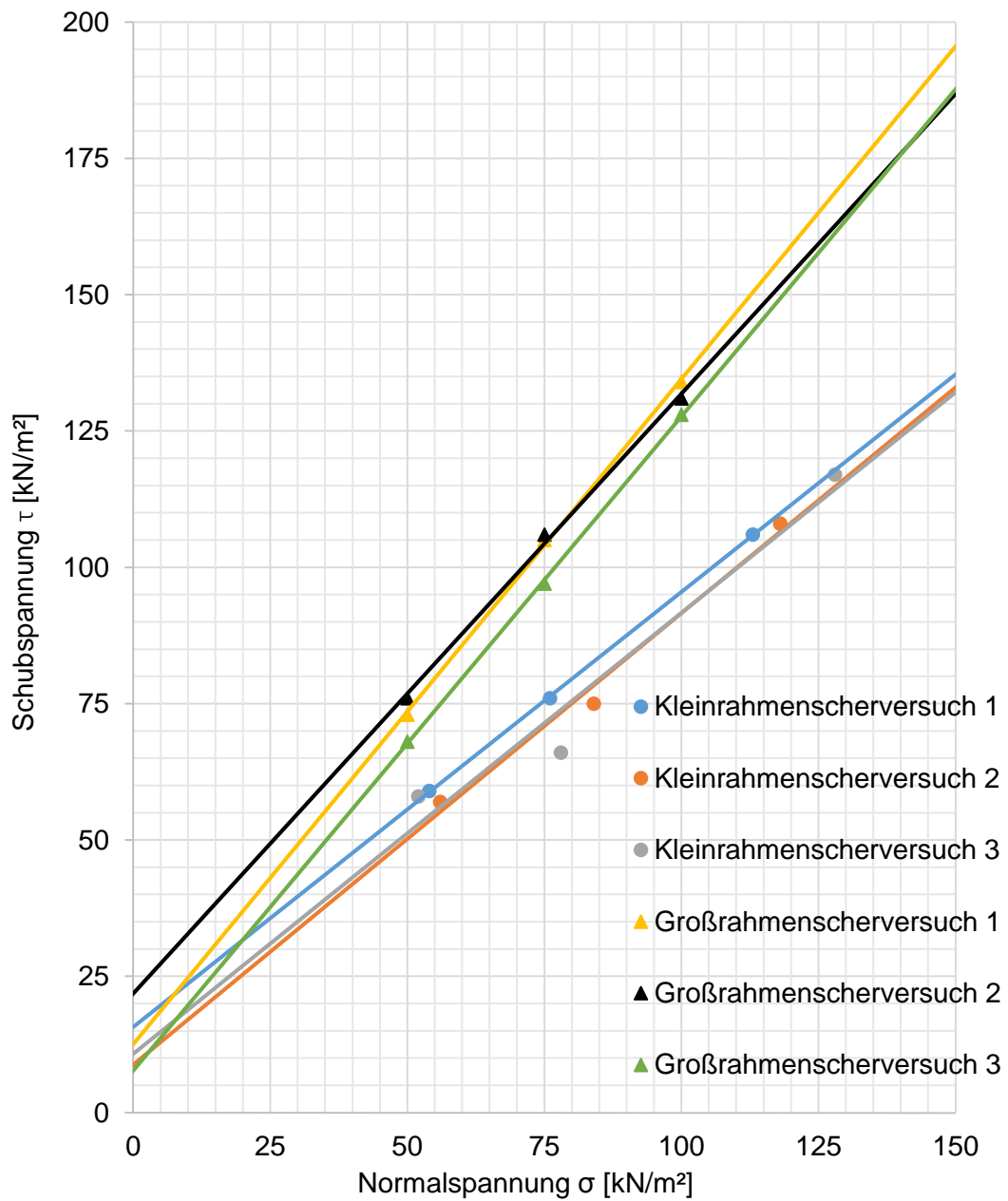


Abb. 37: Schergeraden der Scherversuche mit dem Material 1 (si' sa Gr) mit Kiesanteil (70 %) bei der Einbaudichte von $D_{pr} = 97$ %

7.5.2 Relativer Scherweg (M1, $D_{pr} = 97 \%$)

Beim Material 1 (si' sa Gr) sind bei der Einbaudichte von $D_{pr} = 97 \%$ folgende Spannweite für die relative Verschiebung (mit und ohne Überkornanteil) ermittelt worden (Tab. 25, Tab. 26):

- 2,0 bis 5,0 % (Mittelwert 3,0 %) im Kleinrahmenschergerät
- 1,7 bis 2,7 % (Durchschnitt 2,2 %) im Großrahmenschergerät

Tab. 25: Relativer Scherweg beim Vergleichsversuch Kleinrahmenschergerät Material 1 (si' sa Gr, GK 2 mm) bei der Einbaudichte $D_{pr} = 97 \%$ (Anhang A.1, B.1)

Vergleichsversuch Kleinrahmenschergerät			
Material		Material 1 (si' sa Gr, GK 2 mm)	
Wassergehalt [%]		6,6	
Dichte ($D_{pr} = 97 \%$) [kN/m ²]		1,74	
Abmessungen Scherbox [mm]		$d: 80$	$h: 27$
σ	relativer Scherweg Versuch 1 [%]	relativer Scherweg Versuch 2 [%]	relativer Scherweg Versuch 3 [%]
σ_1	2,1	2,0	3,8
σ_2	2,3	3,8	5,0
σ_3	2,6	2,5	3,1
Mittelwert [%]		3,0	

Tab. 26: Relativer Scherweg beim Vergleichsversuch Großrahmenschergerät Material 1 (si' sa Gr, GK 31,5 mm) bei der Einbaudichte $D_{pr} = 97 \%$ (Anhang A.1, B.1)

Vergleichsversuch Großrahmenschergerät			
Material		Material 1 (si' sa Gr, GK 31,5 mm)	
Wassergehalt [%]		5,5	
Dichte ($D_{pr} = 97 \%$) [kN/m ²]		2,05	
Abmessungen Scherbox [mm]		$A: 300 \times 300$	$H: 190$
σ	relativer Scherweg Versuch 1 [%]	relativer Scherweg Versuch 2 [%]	relativer Scherweg Versuch 3 [%]
σ_1	1,7	2,0	2,0
σ_2	2,0	2,1	2,2
σ_3	2,7	2,7	2,7
Mittelwert [%]		2,2	

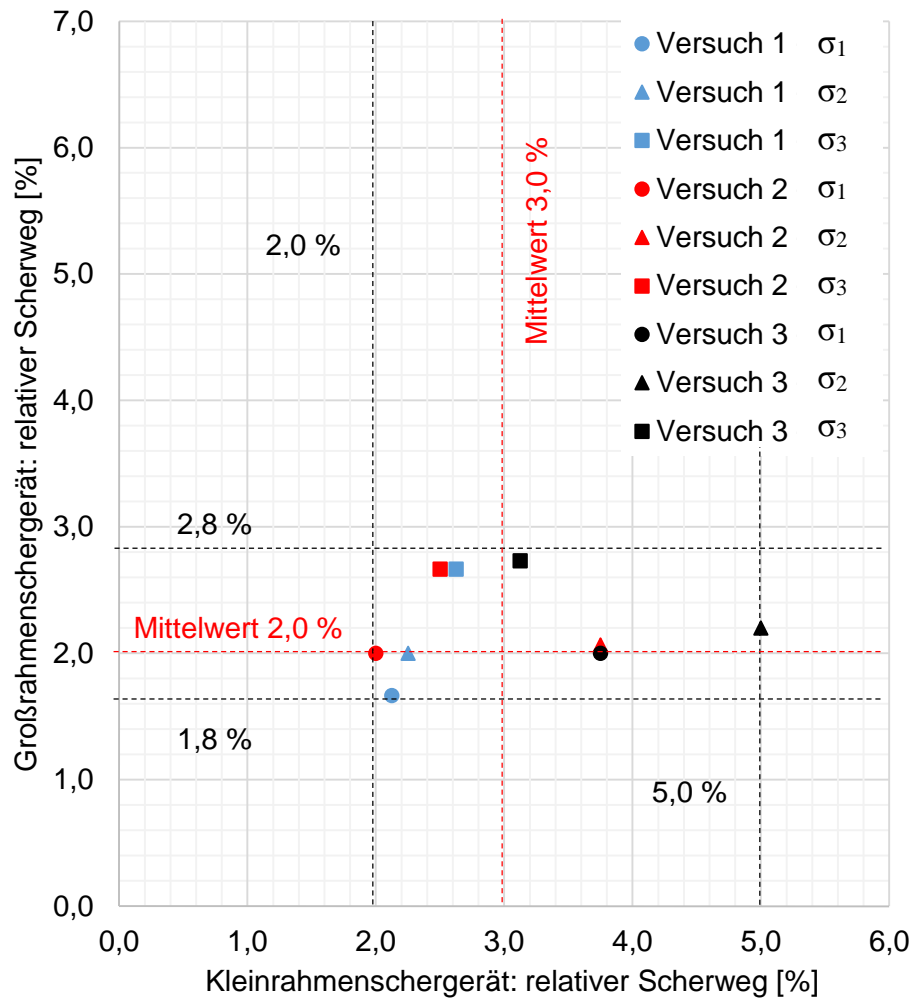


Abb. 38: Relativer Scherweg der Vergleichsversuche im Kleinrahmen- bzw. Großrahmenschergerät (mit 70 % Kiesanteil) - Material 1 (si' sa Gr) bei der Einbaudichte $D_{pr} = 97 \%$

7.5.3 Setzung und Hebung (M1, $D_{pr} = 97 \%$)

Die maximale Setzung bzw. Hebung beträgt im Mittel zwischen 1 und 2 % der Probenhöhe bei beiden Versuchsapparaten (mit und ohne Kiesanteil) (Anhang A.2, B.2).

7.6 Evaluierung der Vergleichversuche – M2, $D_{pr}=92\%$

7.6.1 Vergleich von φ , c (M2, $D_{pr}=92\%$)

Der Reibungswinkel beim Scherversuch ohne Kiesanteil (Überkorn) im Kleinrahmenschergerät ist für das Material 2 (sa^c si Gr) bei der Einbaudichte $D_{pr}=92\%$ um durchschnittlich $2,3^\circ$ kleiner als jener im Großrahmenschergerät mit Überkornanteil (Tab. 27).

Die Kohäsion ist beim Versuch im Kleinrahmenschergerät um 10 kN/m^2 größer als beim Scherversuch im Großrahmenschergerät (Tab. 27).

Folgende durchschnittliche Scherparameter φ , c wurden bei den Scherversuchen mit bzw. ohne Kiesanteil (Überkornanteil) ermittelt (Tab. 27):

- Kleinrahmenschergerät: $\varphi = 34,0$ bis $35,0^\circ$, Mittelwert $34,7^\circ$
 $c = 26,0$ bis $35,0\text{ kN/m}^2$, Mittelwert $29,3\text{ kN/m}^2$
- Großrahmenschergerät: $\varphi = 35,0$ bis $38,0^\circ$, Mittelwert $37,0^\circ$
 $c = 18,0$ bis $22,0\text{ kN/m}^2$, Mittelwert $19,3\text{ kN/m}^2$

Tab. 27: Evaluierung der Vergleichversuche für das Material 2 (GK 2 mm bzw. GK 31,5 mm) im Klein- bzw. Großrahmenschergerät und der Einbaudichte $D_{pr}=92\%$ (Anhang A.3, B.3)

Material 2 (sa ^c si Gr) – Einbaudichte 92 % der Proctordichte ($D_{pr}=92\%$)				
Größtkorn [mm]	2,0		31,5	
Dichte [Mg/m^3]	1,67		1,81	
Wassergehalt [%]	15,5		10,7	
Korngrößenanteil (Kapitel 3.2.1)	Kies: 0 %, Sand: 26 %, Schluff: 65 %, Ton: 9 %		Kies: 47 %, Sand: 12 %, Schluff: 36 %, Ton: 5 %	
Versuchsgerät + Abmessung [mm]	Kleinrahmenschergerät ($d = 80, h = 27$)		Großrahmenschergerät ($A = 300 \times 300, H = 200$)	
Scherparameter	φ [°]	c [kN/m^2]	φ [°]	c [kN/m^2]
Versuch 1	35,0	35,0	38,0	18,0
Versuch 2	34,0	26,0	38,0	18,0
Versuch 3	35,0	27,0	35,0	22,0
Mittelwert	34,7	29,3	37,0	19,3

Die Schergeraden für das Material 2 (sa^c si Gr) aus den Vergleichsversuchen (mit und ohne Überkornanteil) bei der Einbaudichte $D_{pr} = 92\%$ wird in Abb. 39 dargestellt.

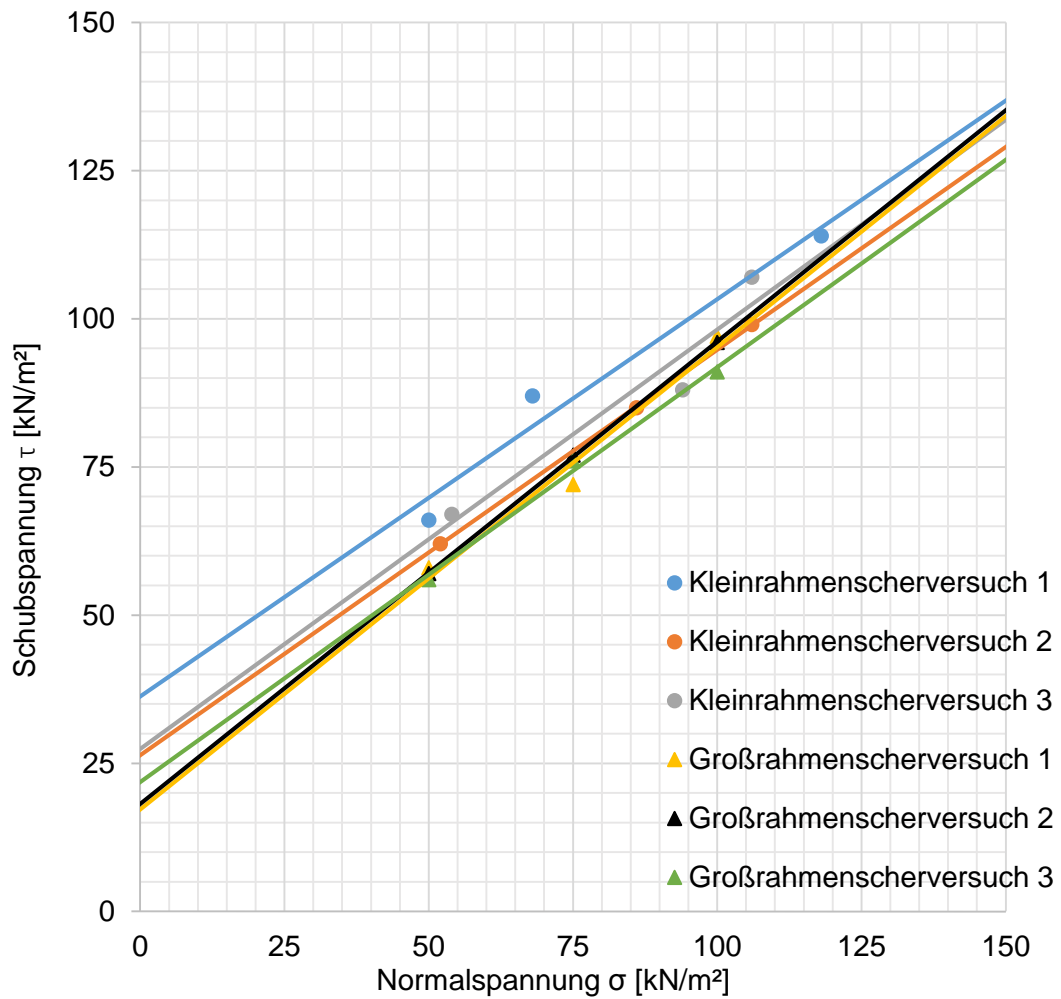


Abb. 39: Schergeraden der Scherversuche mit dem Material 2 (sa^c si Gr) mit Kiesanteil (47 %) bei der Einbaudichte von $D_{pr} = 92\%$

7.6.2 Relativer Scherweg (M2, $D_{pr}=92\%$)

Die Spannweite der relativen Verschiebung für das Material 2 (sa' si Gr) bei der Einbaudichte $D_{pr}=92\%$ beträgt für die Scherversuche (Tab. 28, Tab. 29, Abb. 40):

- 2,8 bis 13,8 % (Durchschnitt 10,2 %) im Kleinrahmenschergerät
- 11,7 bis 21,7 % (Durchschnitt 19,0 %) im Großrahmenschergerät

Tab. 28: Relativer Scherweg beim Vergleichsversuch Kleinrahmenschergerät Material 2 (sa' si Gr, GK 2 mm) bei der Einbaudichte von $D_{pr}=92\%$ (Anhang A.3, B.3)

Vergleichsversuch Kleinrahmenschergerät			
Material		Material 2 (sa' si Gr, GK 2 mm)	
Wassergehalt [%]		15,5	
Dichte ($D_{pr}=92\%$) [kN/m ²]		1,67	
Abmessungen Scherbox [mm]		$d: 80$	$h: 27$
σ	relativer Scherweg Versuch 1 [%]	relativer Scherweg Versuch 2 [%]	relativer Scherweg Versuch 3 [%]
σ_1	10,0	8,8	8,8
σ_2	2,8	13,0	12,5
σ_3	10,0	13,8	12,5
Mittelwert [%]		10,2	

Tab. 29: Relativer Scherweg beim Vergleichsversuch Großrahmenschergerät Material 2 (sa' si Gr, GK 31,5 mm) bei der Einbaudichte $D_{pr}=92\%$ (Anhang A.3, B.3)

Vergleichsversuch Großrahmenschergerät			
Material		Material 1 (si' sa Gr, GK 31,5 mm)	
Wassergehalt [%]		10,7	
Dichte ($D_{pr}=92\%$) [kN/m ²]		1,81	
Abmessungen Scherbox [mm]		$A: 300 \times 300$	$H: 190$
σ	relativer Scherweg Versuch 1 [%]	relativer Scherweg Versuch 2 [%]	relativer Scherweg Versuch 3 [%]
σ_1	20,0	11,7	16,7
σ_2	21,7	16,7	19,3
σ_3	21,7	21,7	21,7
Mittelwert [%]		19,0	

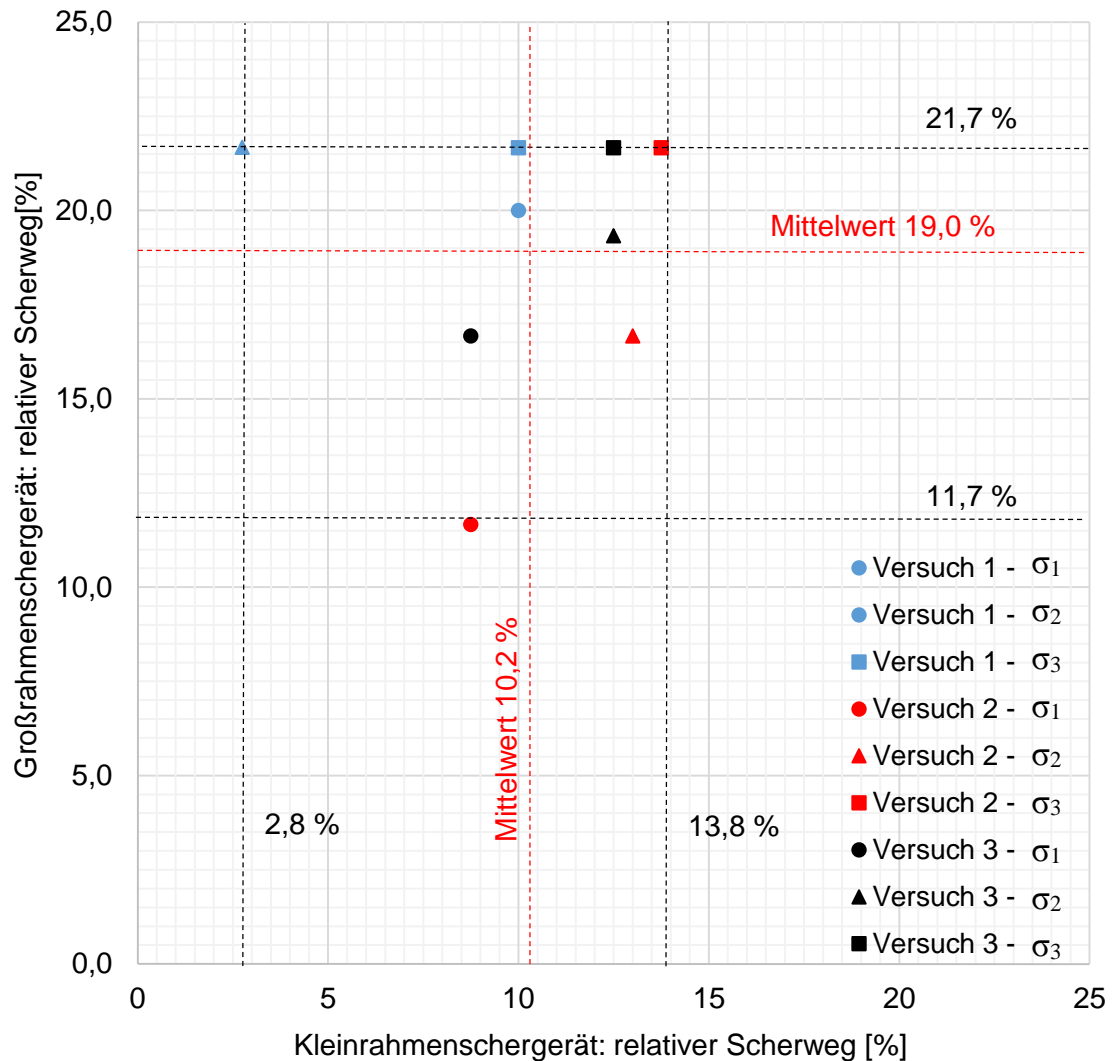


Abb. 40: Relativer Scherweg der Vergleichsversuche im Kleinrahmenscher- bzw. Großrahmenschergerät (mit 47 % Kiesanteil) - Material 2 (sa' si Gr) bei der Einbaudichte $D_{pr}=92\%$

7.6.3 Setzung und Hebung (Material 2, $D_{pr}=92\%$)

Die maximale Setzung bzw. Hebung beträgt bei den Vergleichsversuchen mit und ohne Kiesanteil (Überkornanteil) beim Material 2 (sa' si Gr) bei der Einbaudichte von $D_{pr}=92\%$ sind im Mittel zwischen 1 bis 4 % der Probenhöhe bei beiden Versuchsgeräten (Anhang A.3, B.3)

7.7 Evaluierung der Vergleichversuche – M2, $D_{pr}=97\%$

7.7.1 Vergleich von φ , c (M2, $D_{pr}=97\%$)

Bei der Einbaudichte $D_{pr}=92\%$ weist das Material 2 (sa' si Gr) mit 47 % Kiesanteil im Durchschnitt, einen um $8,4^\circ$ größeren Reibungswinkel φ und eine $22,7 \text{ kN/m}^2$ kleinere Kohäsion c auf (Tab. 30).

Aus den Scherversuchen resultieren folgende durchschnittliche Scherparameter φ und c für die Bodenprobe (sa' si Gr) mit bzw. ohne Kies (Überkorn) (Tab. 30):

- Kleinrahmenschergerät: $\varphi = 30,0$ bis $33,0^\circ$, Mittelwert $31,3^\circ$
 $c = 33,0$ bis $39,0 \text{ kN/m}^2$, Mittelwert $36,7 \text{ kN/m}^2$
- Großrahmenschergerät: $\varphi = 39,0$ bis $41,0^\circ$, Mittelwert $39,7^\circ$
 $c = 12,0$ bis $17,0 \text{ kN/m}^2$, Mittelwert $14,0 \text{ kN/m}^2$

Tab. 30: Evaluierung der Vergleichversuche für das Material 2 (GK 2 mm bzw. GK 31,5 mm) im Kleinrahmen- bzw. Großrahmenschergerät und der Einbaudichte $D_{pr}=97\%$ (Anhang A.3, B.3)

Material 2 (sa' si Gr)- Einbaudichte 97 % der Proctordichte ($D_{pr}=97\%$)				
Größtkorn [mm]	2,0		31,5	
Dichte [Mg/m^3]	1,76		1,91	
Wassergehalt [%]	15,5		10,7	
Korngrößenanteil (Kapitel 3.2.1)	Kies: 0 %, Sand: 26 %, Schluff: 65 %, Ton: 9 %		Kies: 47 %, Sand: 12 %, Schluff: 36 %, Ton: 5 %	
Versuchsgerät + Abmessung [mm]	Kleinrahmenschergerät ($d = 80, h = 27$)		Großrahmenschergerät ($A = 300 \times 300, H = 200$)	
Scherparameter	φ [°]	c [kN/m^2]	φ [°]	c [kN/m^2]
Versuch 1	30,0	38,0	41,0	12,0
Versuch 2	31,0	39,0	39,0	13,0
Versuch 3	33,0	33,0	39,0	17,0
Mittelwert	31,3	36,7	39,7	14

Aus der Darstellung der Schergeraden (Abb. 41) erkennt man den im Mittel größeren Reibungswinkel ($8,4^\circ$) des Probematerials mit Kiesanteil (47 %) gegenüber dem ohne Kiesanteil (Überkorn) (Abb. 41).

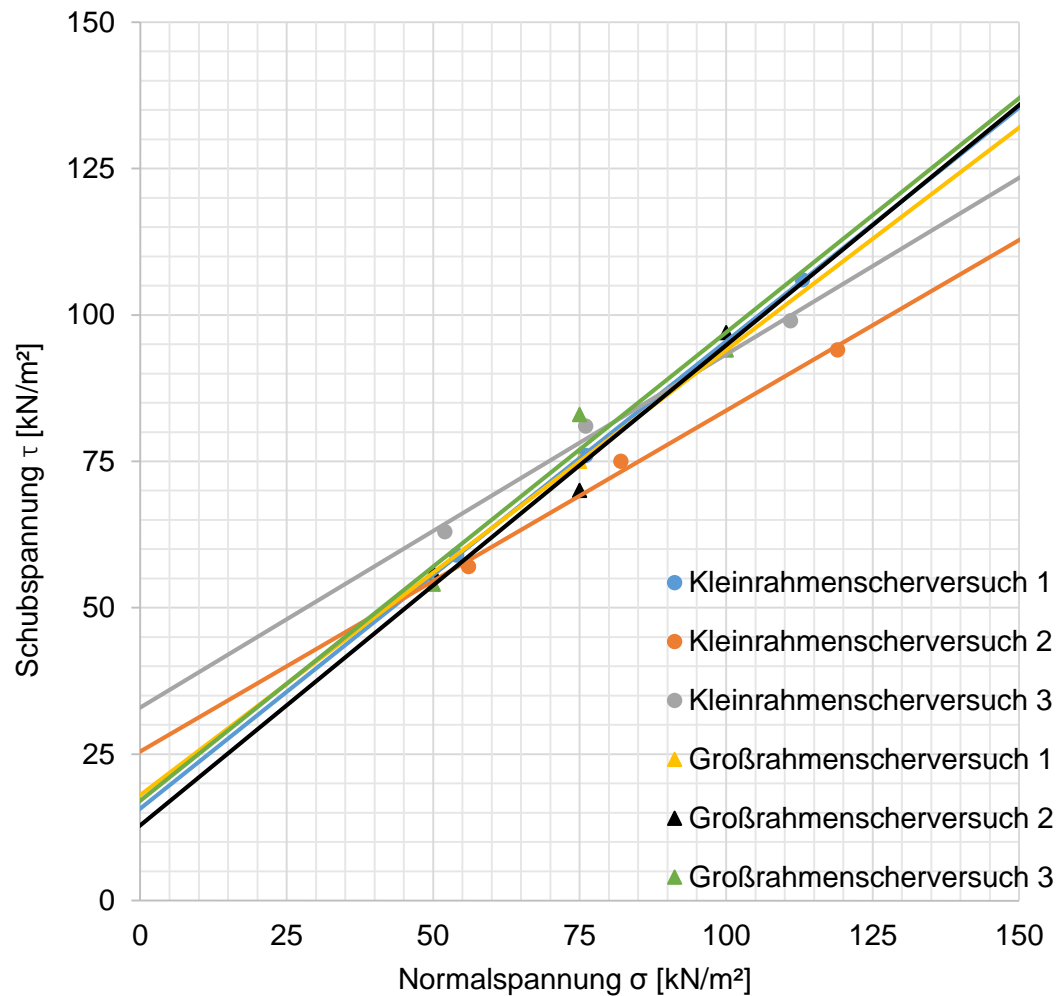


Abb. 41: Schergeraden der Scherversuche mit dem Material 2 (sa' si Gr) mit Kiesanteil (47 %) bei der Einbaudichte von $D_{pr} = 97\%$

7.7.2 Relativer Scherweg (M2, $D_{pr} = 97 \%$)

Beim Material 2 (sa' si Gr) beträgt der relative Scherweges (Abb. 42, Tab. 31):

- 3,1 bis 11,5 % (Durchschnitt 7,7 %) im Kleinrahmenschergerät
- 8,3 bis 16,7 % (Durchschnitt 13,1 %) im Großrahmenschergerät

Tab. 31: Relativer Scherweg beim Vergleichsversuch - Kleinrahmenschergerät – Material 2 (sa' si Gr, GK 2 mm) bei der Einbaudichte von $D_{pr} = 97 \%$ (Anhang A.3, B.3)

Vergleichsversuch Kleinrahmenschergerät			
Material		Material 2 (sa' si Gr, GK 2 mm)	
Wassergehalt [%]		15,5	
Dichte ($D_{pr} = 97 \%$) [kN/m ²]		1,76	
Abmessungen Scherbox [mm]		$d: 80$	$h: 27$
σ	relativer Scherweg Versuch 1 [%]	relativer Scherweg Versuch 2 [%]	relativer Scherweg Versuch 3 [%]
σ_1	7,0	3,1	11,0
σ_2	3,8	5,0	11,3
σ_3	7,5	8,8	11,5
Mittelwert [%]		7,7	

Tab. 32: Relativer Scherweg beim Vergleichsversuch - Großrahmenschergerät – Material 2 (sa' si Gr, GK 31,5 mm) bei der Einbaudichte $D_{pr} = 92 \%$ (Anhang A.3, B.3)

Vergleichsversuch Großrahmenschergerät			
Material		Material 2 (sa' si Gr, GK 31,5 mm)	
Wassergehalt [%]		10,7	
Dichte ($D_{pr} = 97 \%$) [kN/m ²]		1,91	
Abmessungen Scherbox [mm]		$A: 300$	$H: 190$
σ	relativer Scherweg Versuch 1 [%]	relativer Scherweg Versuch 2 [%]	relativer Scherweg Versuch 3 [%]
σ_1	8,3	12,7	15,0
σ_2	8,7	12,7	13,3
σ_3	15,3	16,7	15,0
Mittelwert [%]		13,1	

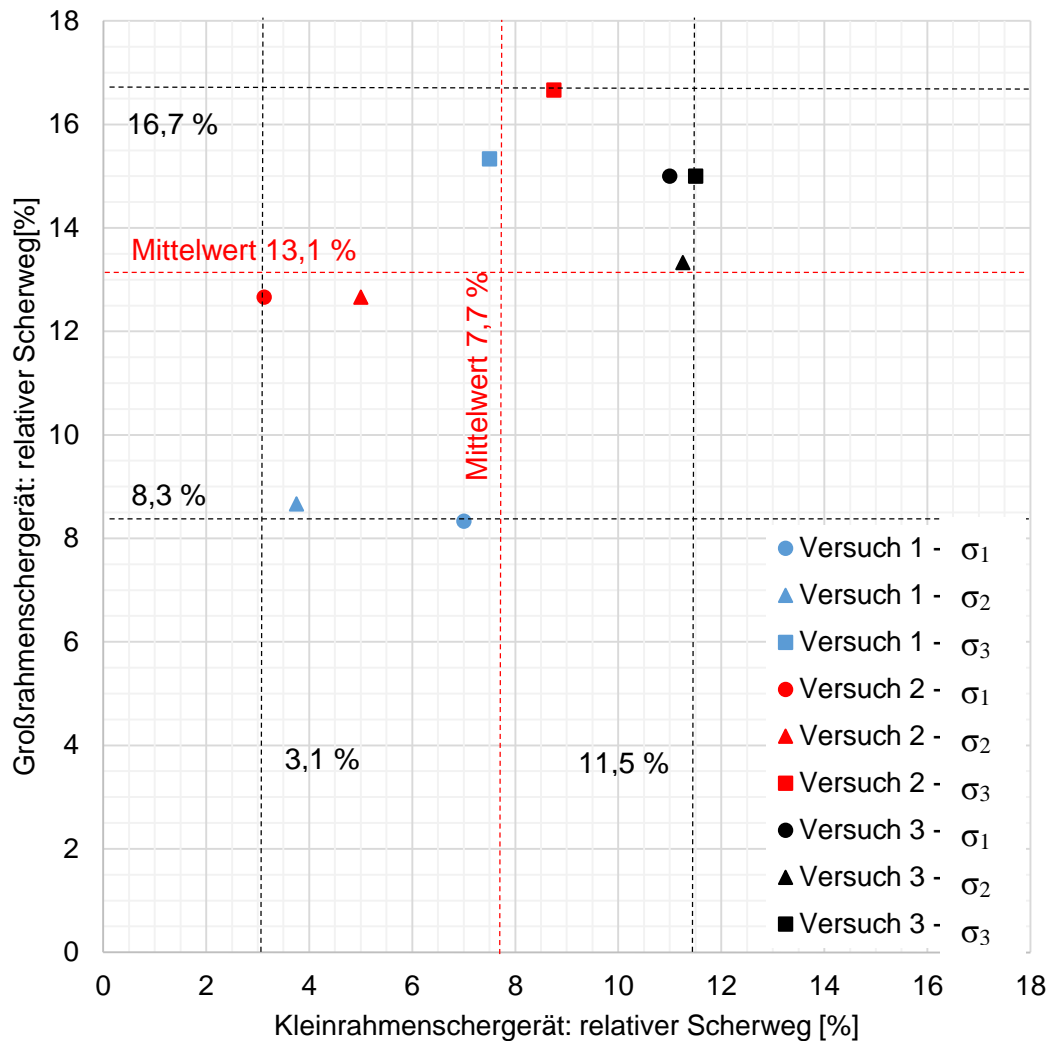


Abb. 42: Relativer Scherweg der Vergleichsversuche im Kleinrahmen- bzw. Großrahmenschergerät (mit 47 % Kiesanteil) - Material 2 (sa' si Gr) bei der Einbaudichte ($D_{pr} = 97\%$)

7.7.3 Setzung und Hebung (M2, $D_{pr} = 97\%$)

Für das Material 2 (sa' si Gr) beträgt die maximale Setzung bzw. Hebung der Bodenprobe mit und ohne Kiesanteil (Überkornanteil) im Durchschnitt 1 bis 2 % bei einer Einbaudichte von $D_{pr} = 97\%$ (Anhang A.3, B.3).

7.7.4 Anomalie der Ergebnisse für φ bei Kl. M2

Die Ergebnisse des Reibungswinkels φ beim Kleinrahmenscherversuch sind beim Verdichtungsgrad $D_{pr} = 97\%$ um durchschnittlich $3,4^\circ$ kleiner gegenüber dem Reibungswinkel beim Verdichtungsgrad $D_{pr} = 92\%$ (Tab. 27, Tab. 30).

- $D_{pr} = 92\%$: $\varphi = 34,0$ bis $35,0^\circ$, Mittelwert $34,7^\circ$
- $D_{pr} = 97\%$: $\varphi = 30,0$ bis $33,0^\circ$, Mittelwert $31,3^\circ$

7.8 Fazit – Erkenntnisse und Thesen

Durch das Vergleichen der Versuche wurden folgende Erkenntnisse gewonnen und Thesen aufgestellt:

- Die Kalibrierversuche bestätigen den Einfluss der Versuchseinrichtung auf den Reibungswinkel φ . Der Reibungswinkel φ weist beim Scherversuch im Kleinrahmenschergerät eine Spannweite von 4° auf, hingegen ist die Spannweite beim Versuch im Großrahmenschergerät 1° . Die Kohäsion c wird von der Größe der Versuchseinrichtung nicht beeinflusst (Kapitel 0).
Zusammengefasst kann gesagt werden, dass mit zunehmender Größe der Versuchseinrichtung die Ergebnisse der Scherversuche präziser werden.
- Mit zunehmendem Überkornanteil (Kiesanteil) steigt der Reibungswinkel φ beim Scherversuch im Großrahmenschergerät (Abb. 43). Außerdem wird die Zunahme vom Verdichtungsgrad (D_{pr}) der Bodenprobe beeinflusst (Abb. 43).

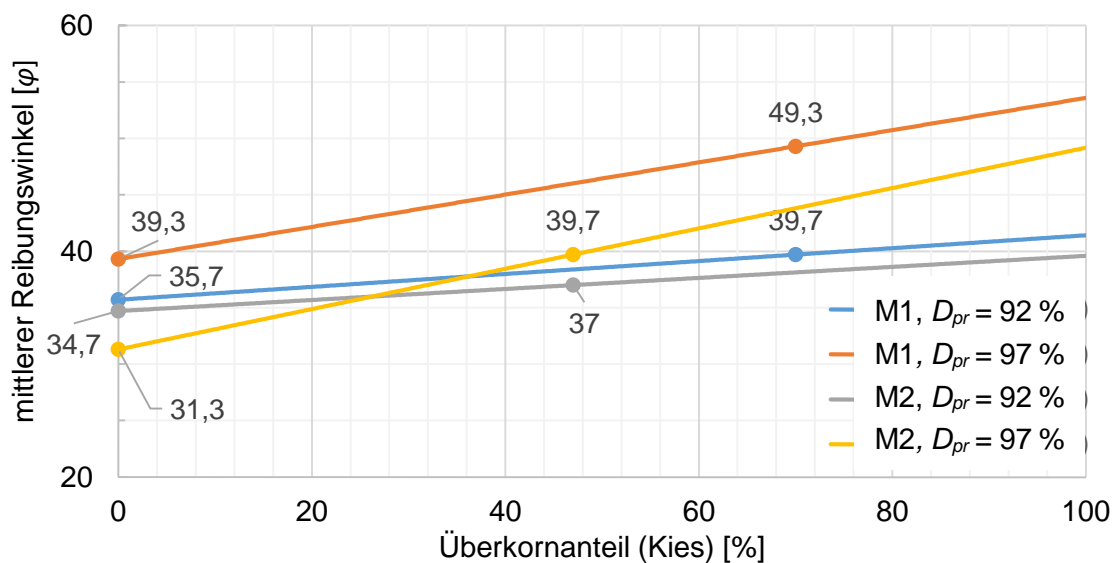


Abb. 43: Einfluss des Überkorns (Kies) auf den mittleren Reibungswinkel φ

- Die Anomalie des Reibungswinkels φ (kleineres φ bei größerem Verdichtungsgrad D_{pr} aus Kapitel 7.7.4) lässt sich aus folgenden zwei Thesen erklären:
 - Der Reibungswinkel (Kapitel 7.7.4) wird durch auftretenden Porenwasserüberdruck/ - Unterdruck beeinflusst, welcher z.B. infolge einer zu hohen Abscher- geschwindigkeit für dieses Material (Material 2 – sa‘ si Gr) auftreten kann.
 - Der Reibungswinkel φ wird aufgrund der Schwankungen des Normalspan- nungsniveaus beeinflusst (siehe Kapitel 5.3).
- Der Reibungswinkel φ ist durchschnittlich höher beim Material 1 als beim Ma- terial 2 (Abb. 44) aufgrund des höheren Anteils an nicht bindigen Körner (Ka- pitel 3.4).

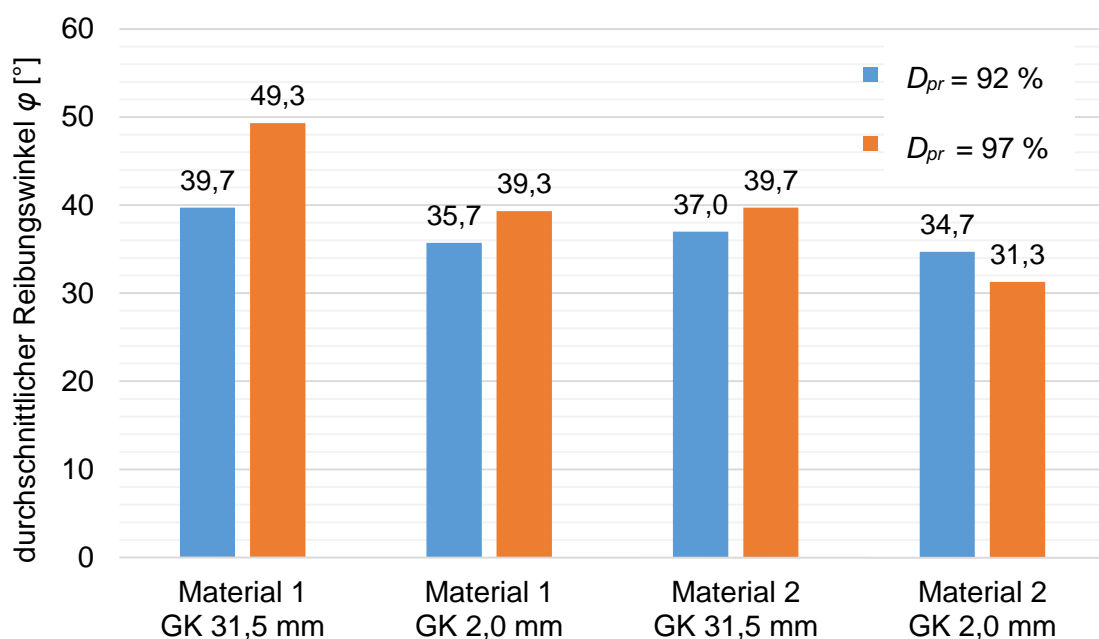


Abb. 44: Durchschnittliche Reibungswinkel φ aus den Vergleichsversuchen

- Im Gegensatz zum Reibungswinkel φ wird die Kohäsion c mit Erhöhen des Überkornanteils (Kiesanteil) verringert. Je höher der Anteil an bindiger Kör- nern, umso mehr wird die Kohäsion der Bodenprobe vermindert durch den Überkornanteil (Kies) (Abb. 45).
Der Verdichtungsgrad (D_{pr}) wirkt sich erhöhend auf die Kohäsion c aus. Mit steigendem Verdichtungsgrad (D_{pr}) steigt auch in 90 % der durchgeführten Scherversuche die Kohäsion c (Abb. 45).

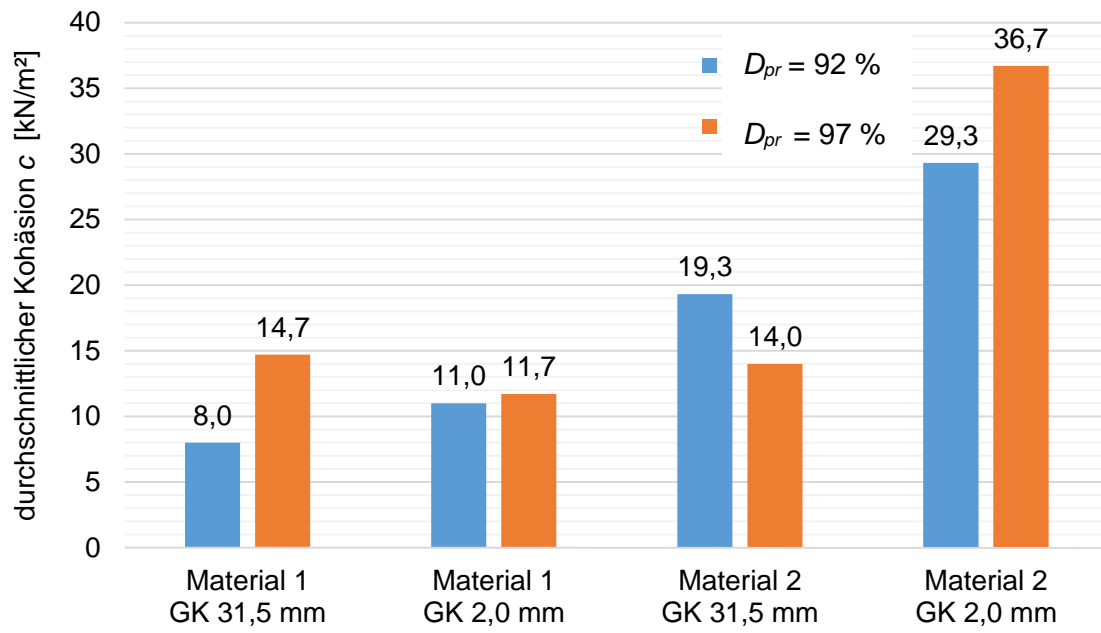


Abb. 45: durchschnittliche Kohäsion c aus den Vergleichsversuchen

Anhang A

A.1 Kleinrahmenschergerät (Kl.) Kalibrierversuche M1 (si' sa Gr)

A.1.1 Kl. M1 / $D_{pr} = 97\%$ / GK 2 mm

A.1.1.1 Kl. M1/ $D_{pr} = 97\%$ - V1 (Kalibrier)

Tab. 33: Ergebnisse der Scherversuche für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 1 Kleinrahmenscher- Kalibrierversuch

Bodenart	Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm)		
Versuchsbeschreibung	Kleinrahmenschergerät, 1. Kalibrierversuch – $D_{pr} = 97\%$		
Scherboxabmessung [mm]	$h: 27$	$d: 80$	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	128	210	298
Max. Schubspannung [kN/m ²]	117	194	251
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	1,79		
97 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,74		
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,75	1,74	1,75
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,73	1,71	1,73
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,47	0,26	0,41
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-0,29	-1,78	-0,67
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	6,6		

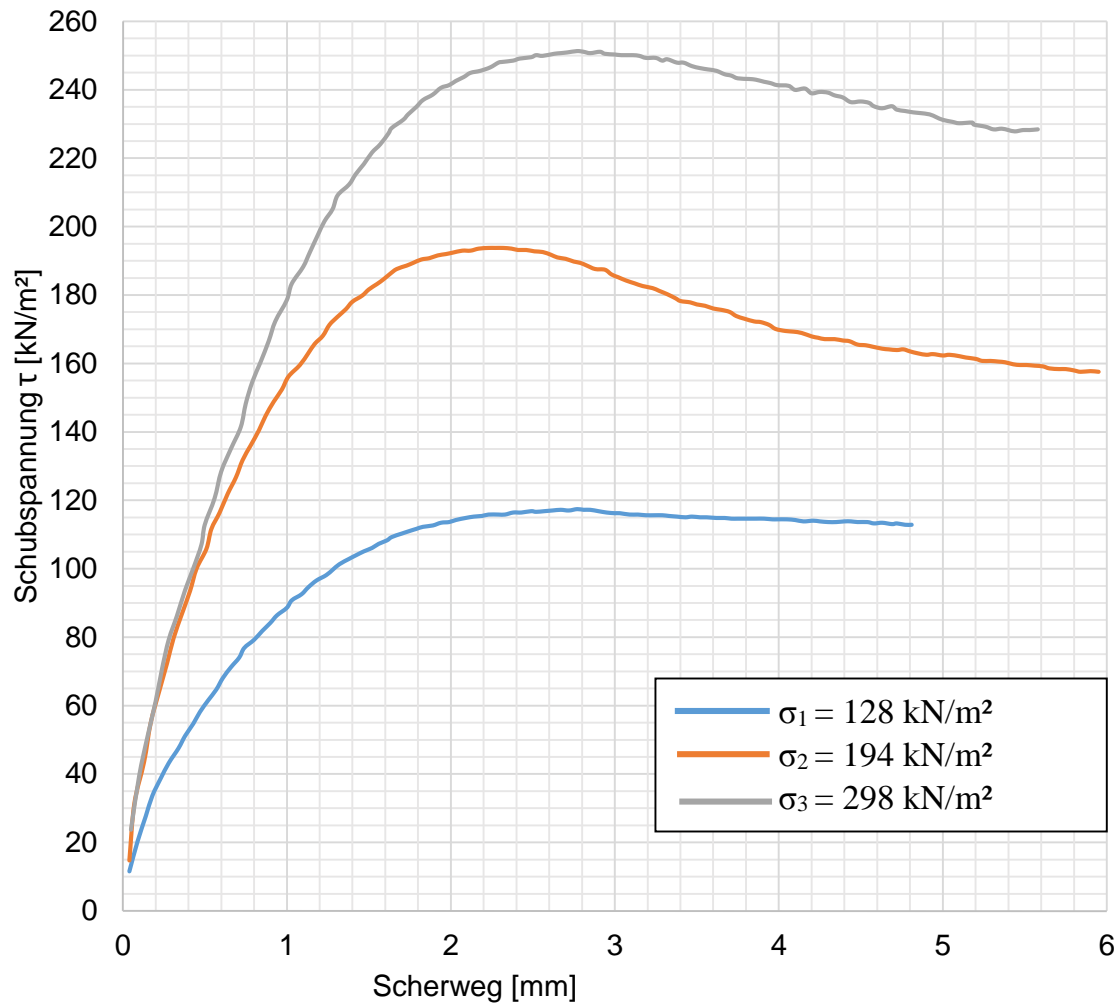


Abb. 46: Schubwegdiagramm für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), 97 % Proctordichte $D_{pr} = 97$ %, 1. Kleinrahmenscher- Kalibrierversuch

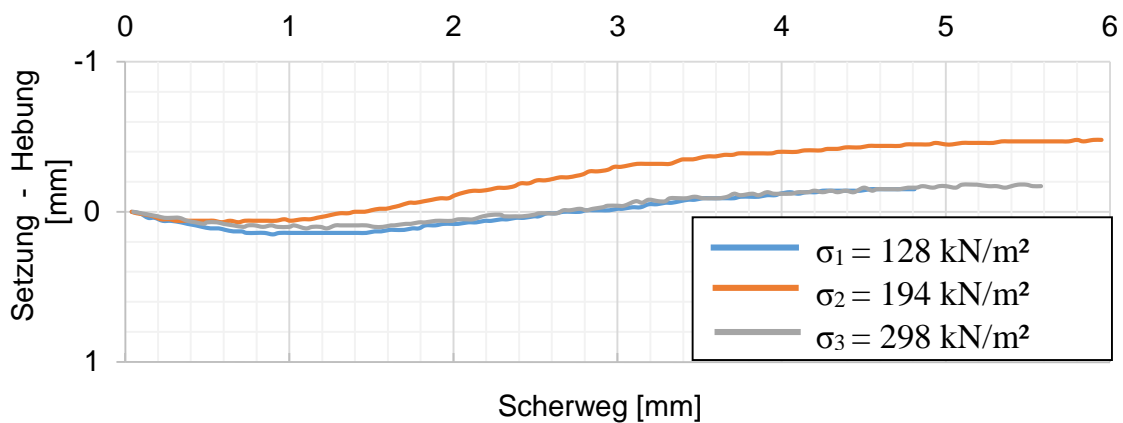


Abb. 47: Schubweg - Setzungsdiagramm für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97$ %), 1. Kleinrahmenscher- Kalibrierversuch

Tab. 34: Scherparameter für Material 1 - si^c sa Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr}=97\%$), 1. Kleinrahmenscher- Kalibrierversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	38,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	21,0

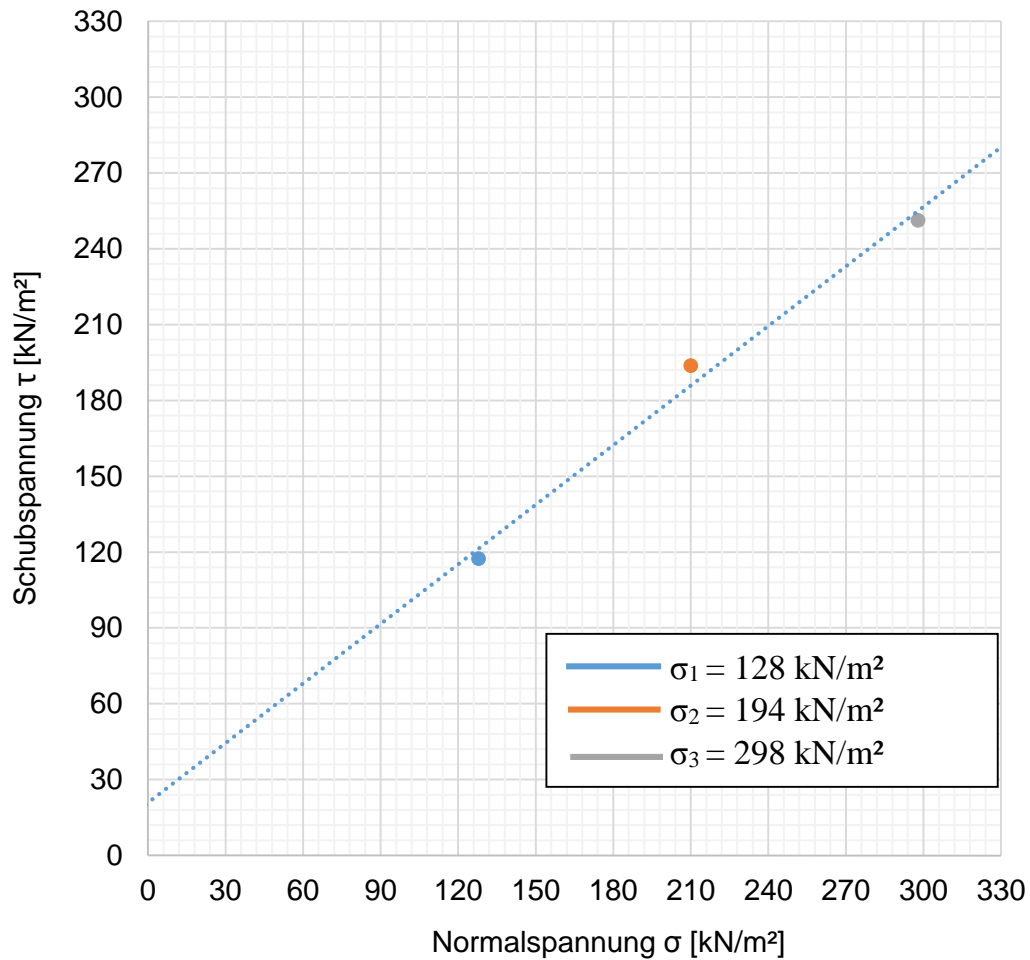


Abb. 48: Schergerade für Material 1 - si^c sa Gr (GK 2 mm) bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 1. Kleinrahmenscher- Kalibrierversuch

A.1.1.2 Kl. M1/ $D_{pr} = 97\%$ - V2 (Kalibrier)

Tab. 35: Ergebnisse der Scherversuche für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 2. Kleinrahmenscher- Kalibrierversuch

Bodenart	Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm)		
Versuchsbeschreibung	Kleinrahmenschergerät, 2. Kalibrierversuch - ($D_{pr} = 97\%$)		
Scherboxabmessung [mm]	<i>h</i> : 27	<i>d</i> : 80	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	106	212	308
Max. Schubspannung [kN/m ²]	90	171	242
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	1,79		
97 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,74		
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,76	1,74	1,75
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,74	1,71	1,73
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	1,07	0,19	0,44
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-0,26	-1,85	-0,78
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	6,6		

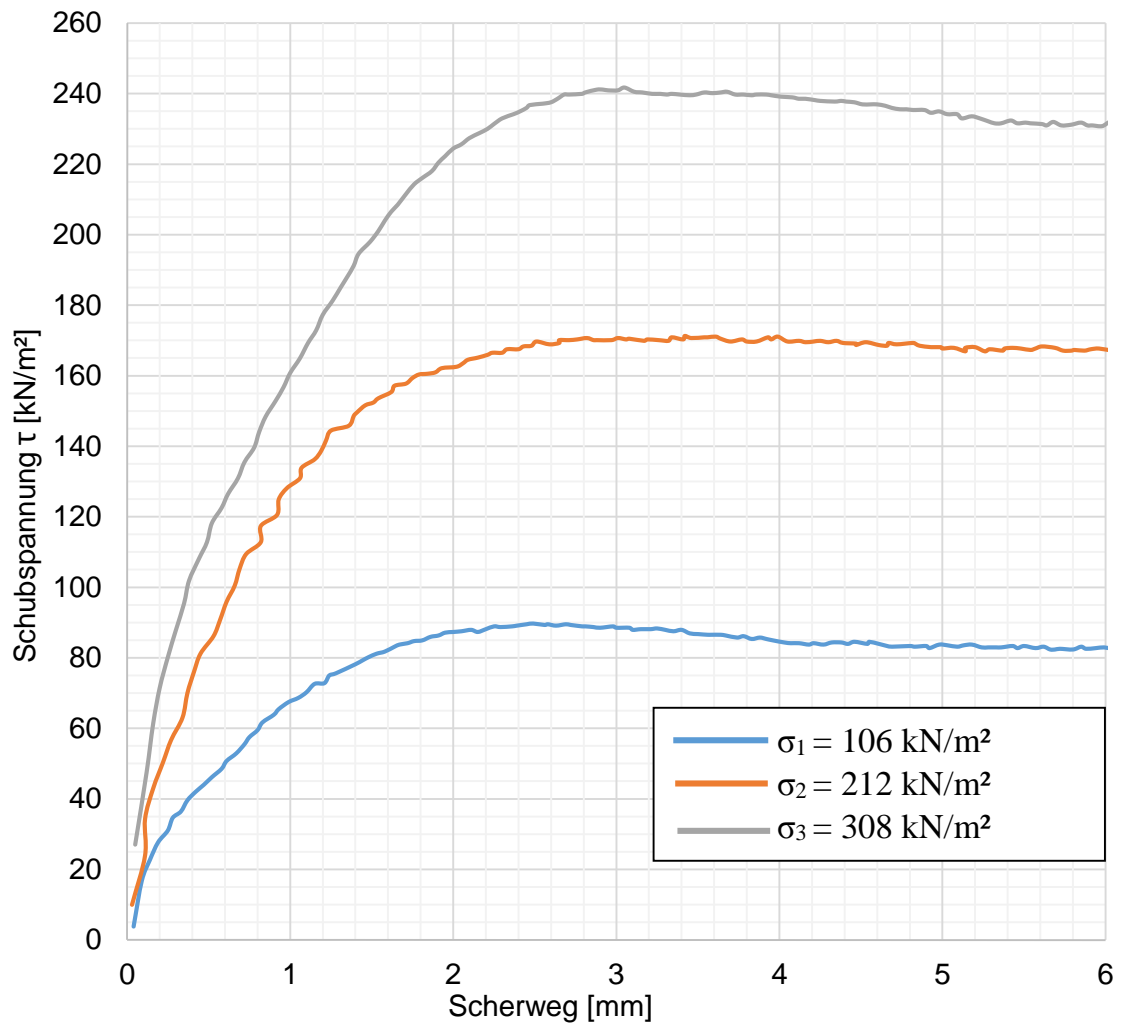


Abb. 49: Scherwegdiagramm für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$) 2. Kleinrahmenscher- Kalibrierversuch

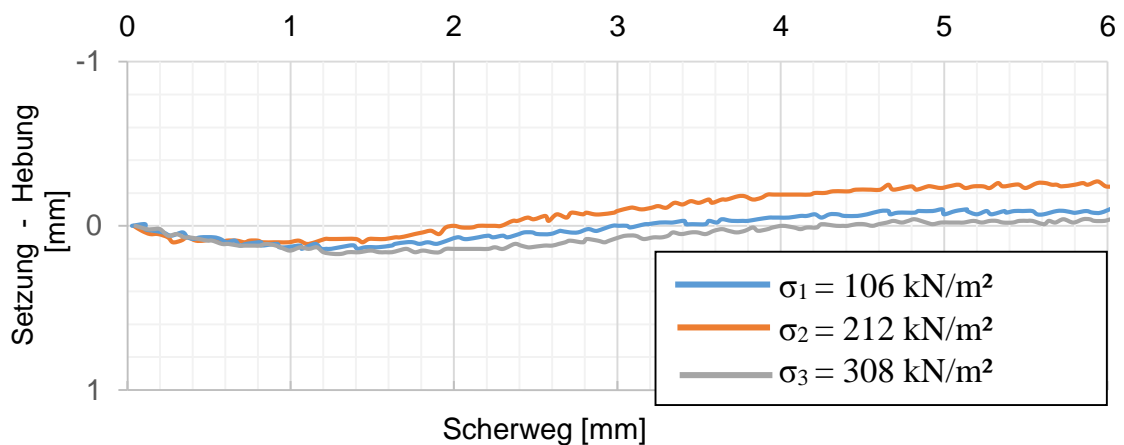


Abb. 50: Scherweg- Setzungsdiagramm für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 2. Kleinrahmenscher- Kalibrierversuch

Tab. 36: Scherparameter für Material 1 – si‘ sa Gr (GK 2 mm) bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 2. Kleinrahmenscher - Kalibrierversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	37
Kohäsion c	[kN/m ²]	11

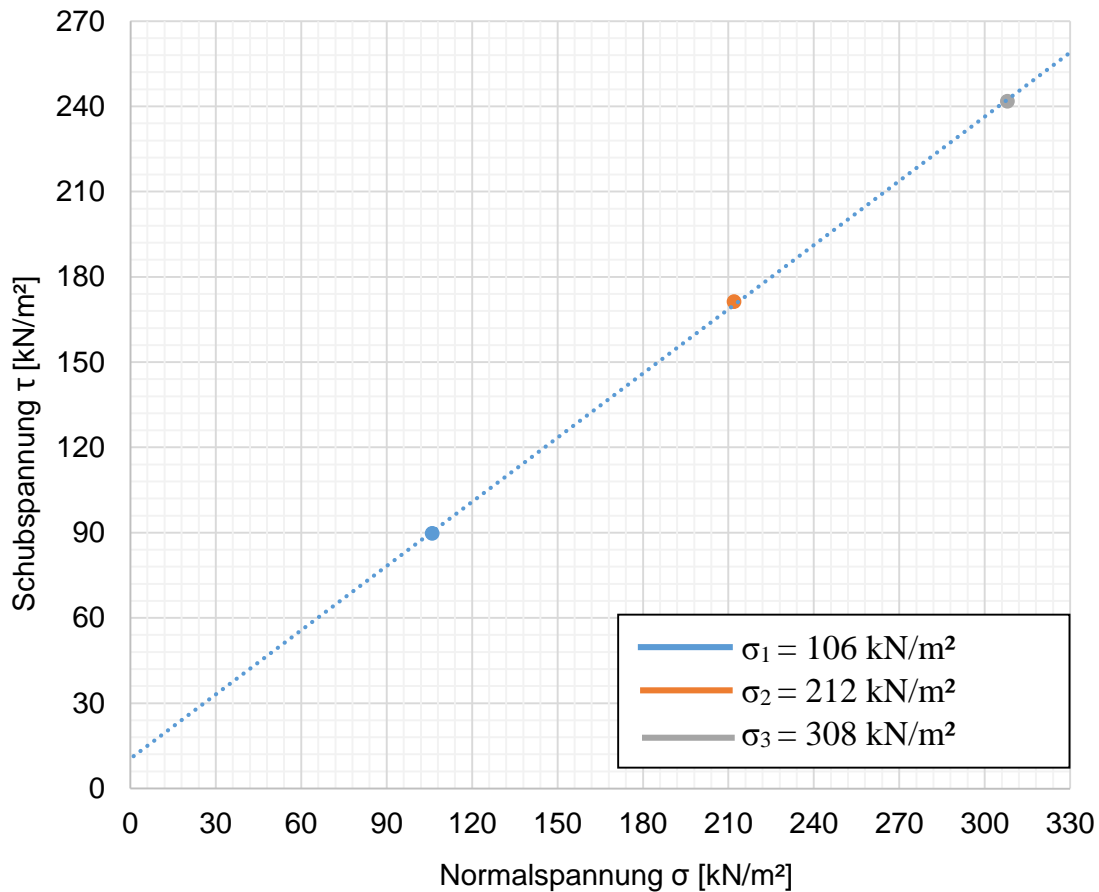


Abb. 51: Schergerade für Material 1 - si‘ sa Gr (GK 2 mm) bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 2. Kleinrahmenscher Kalibrierversuch

A.1.1.3 Kl. M1/ $D_{pr} = 97\%$ - V3 (Kalibrier)

Tab. 37: Ergebnisse für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 3. Kleinrahmenscher- Kalibrierversuch

Bodenart	Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm)		
Versuchsbeschreibung	Kleinrahmenscherversuch, 2. Kalibrierversuch - $D_{pr} = 97\%$		
Scherboxabmessung [mm]	<i>h</i> : 27	<i>d</i> : 80	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	118	202	298
Max. Schubspannung [kN/m ²]	97	155	220
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	1,79		
97 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,74		
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,75	1,75	1,75
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,74	1,73	1,74
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,41	0,41	0,78
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-0,11	-0,30	0,00
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	6,6		

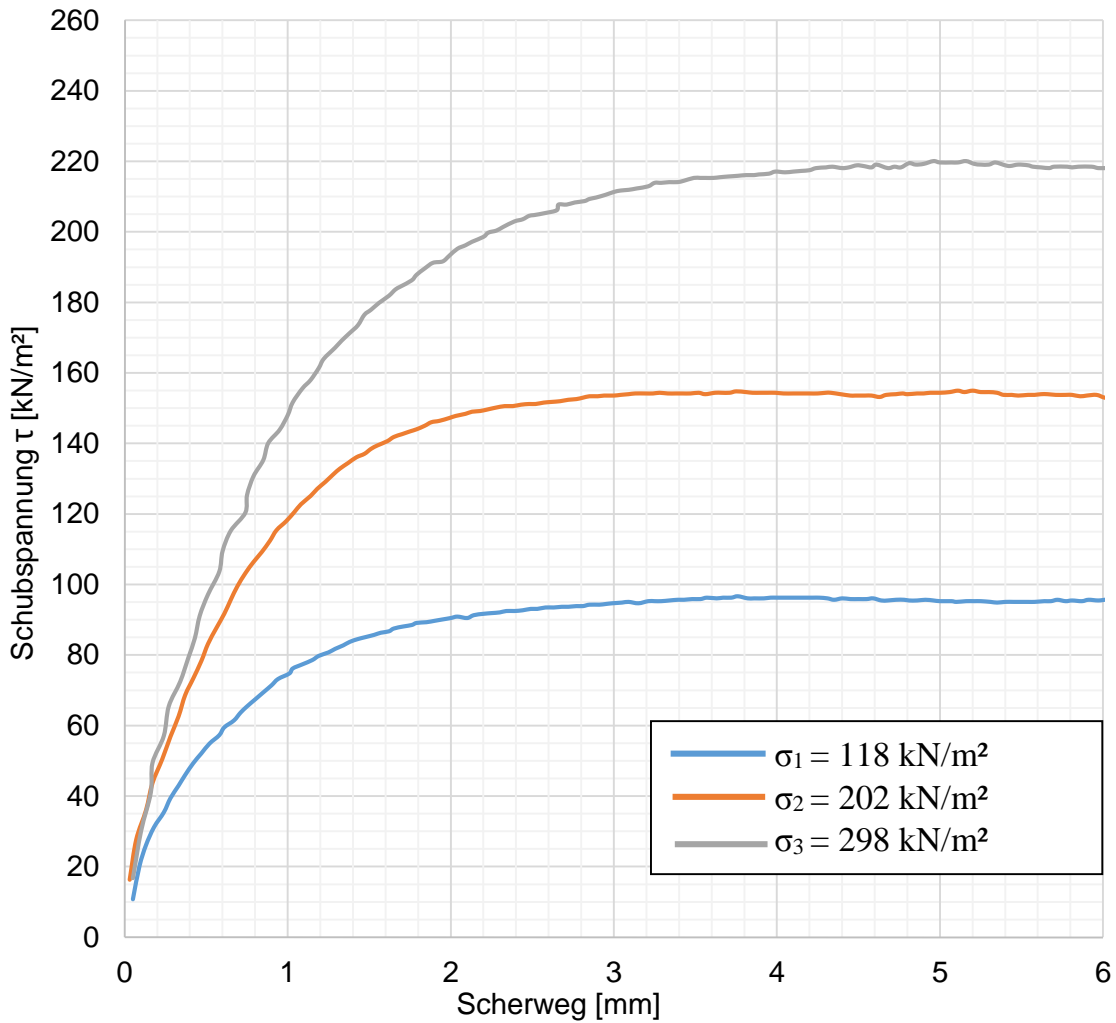


Abb. 52: Schubwegdiagramm für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 3. Kleinrahmenscher- Kalibrierversuch

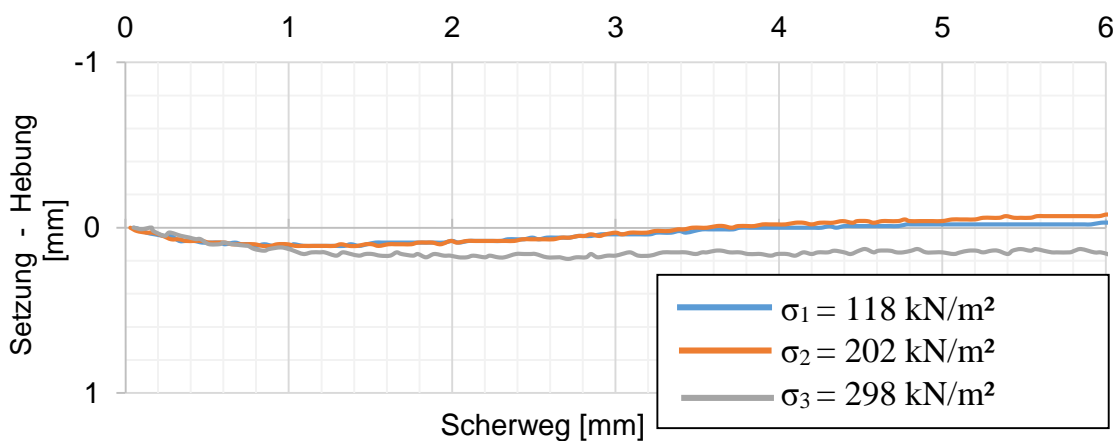


Abb. 53: Schubweg- Setzungsdiagramm für Material 1 (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 3. Kleinrahmenscher- Kalibrierversuch

Tab. 38: Scherparameter für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm) bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 3. Kleinrahmenscher- Kalibrierversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	34,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	17,0

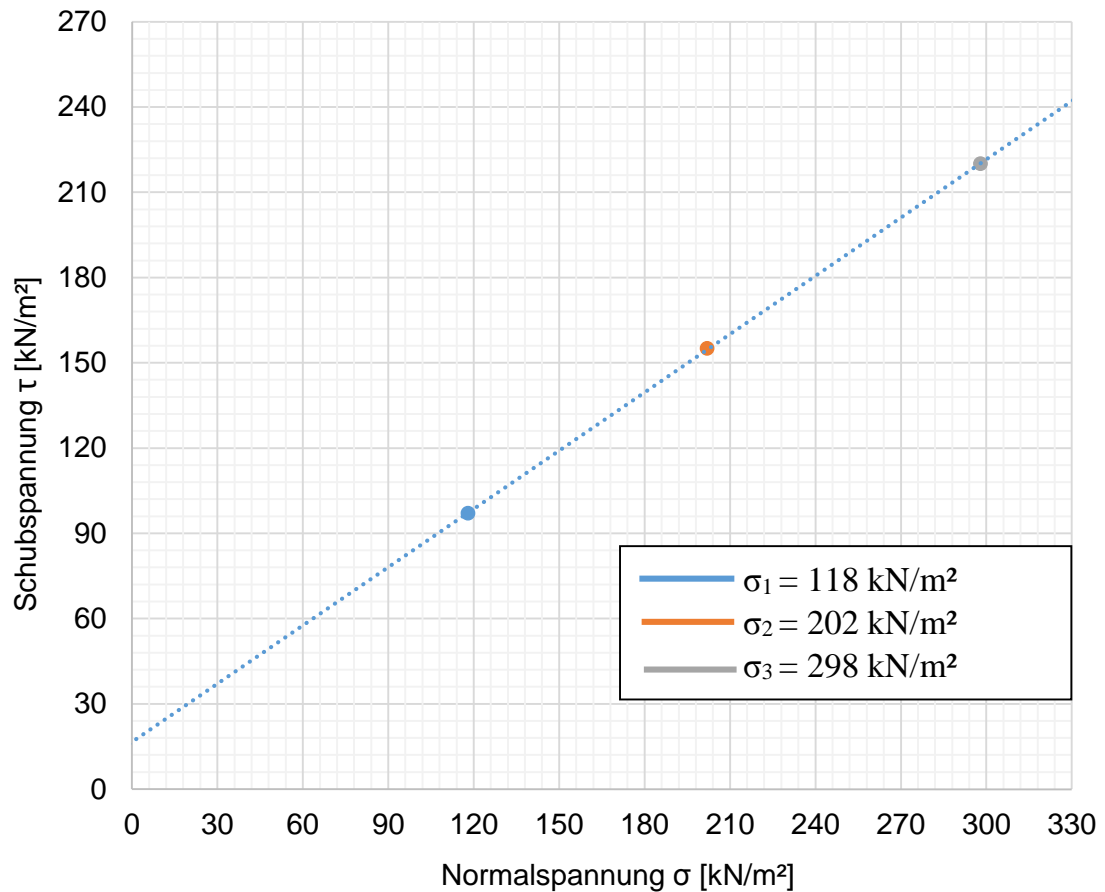


Abb. 54: Schergerade für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm) bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 3. Kleinrahmenscher- Kalibrierversuch

A.2 Kleinrahmenschergerät Vergleichsversuch - M2

A.2.1 Kl. M1 / $D_{pr} = 97\%$ / GK 2 mm

A.2.1.1 Kl. M1/ $D_{pr} = 97\%$ - V1

Tab. 39: Ergebnisse für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 1. Kleinrahmenscher- Vergleichsversuch

Bodenart	Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm)		
Versuchsbeschreibung	Kleinrahmenscherversuch 1. Vergleichsversuch - $D_{pr} = 97\%$		
Scherboxabmessung [mm]	<i>h</i> : 27	<i>d</i> : 80	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	54	76	113
Max. Schubspannung [kN/m ²]	59	76	106
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	1,79		
97 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,74		
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,74	1,75	1,74
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,70	1,73	1,71
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,22	0,33	0,15
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-2,07	-0,85	-1,48
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	6,6		

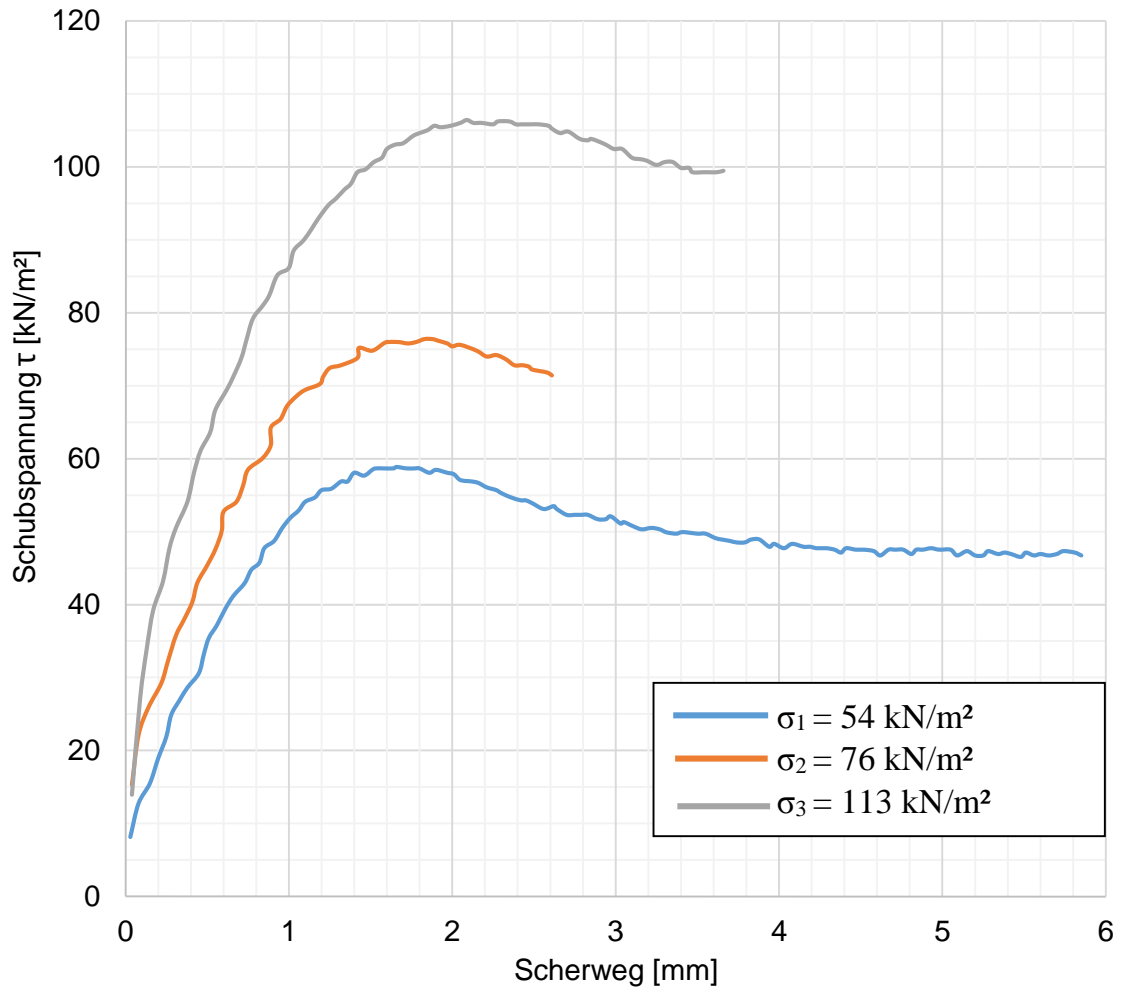


Abb. 55: Scherwegdiagramm für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), 97 % Proctordichte ($D_{Pr} = 97\%$), 1. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

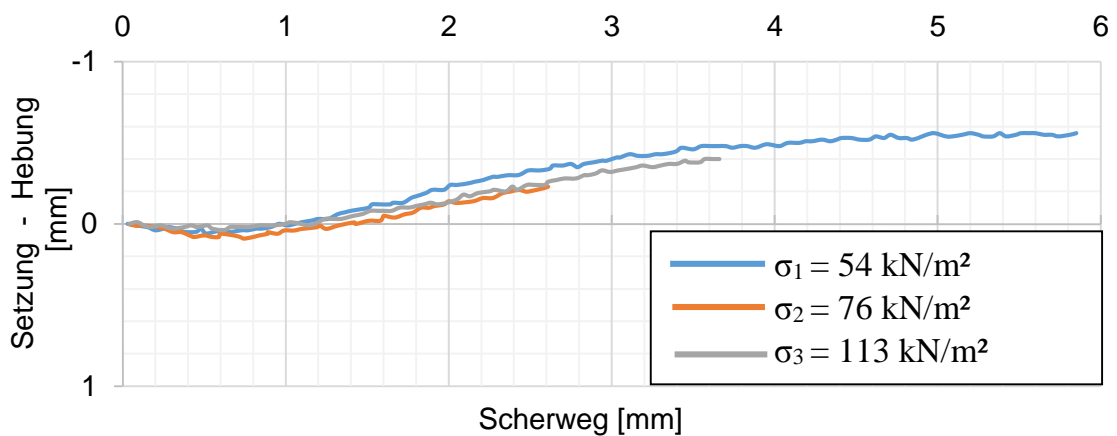


Abb. 56: Scherweg- Setzungsdiagramm für Material 1 (GK 2 mm), 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 1. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Tab. 40: Scherparameter für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 1. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	39
Kohäsion c	[kN/m ²]	15

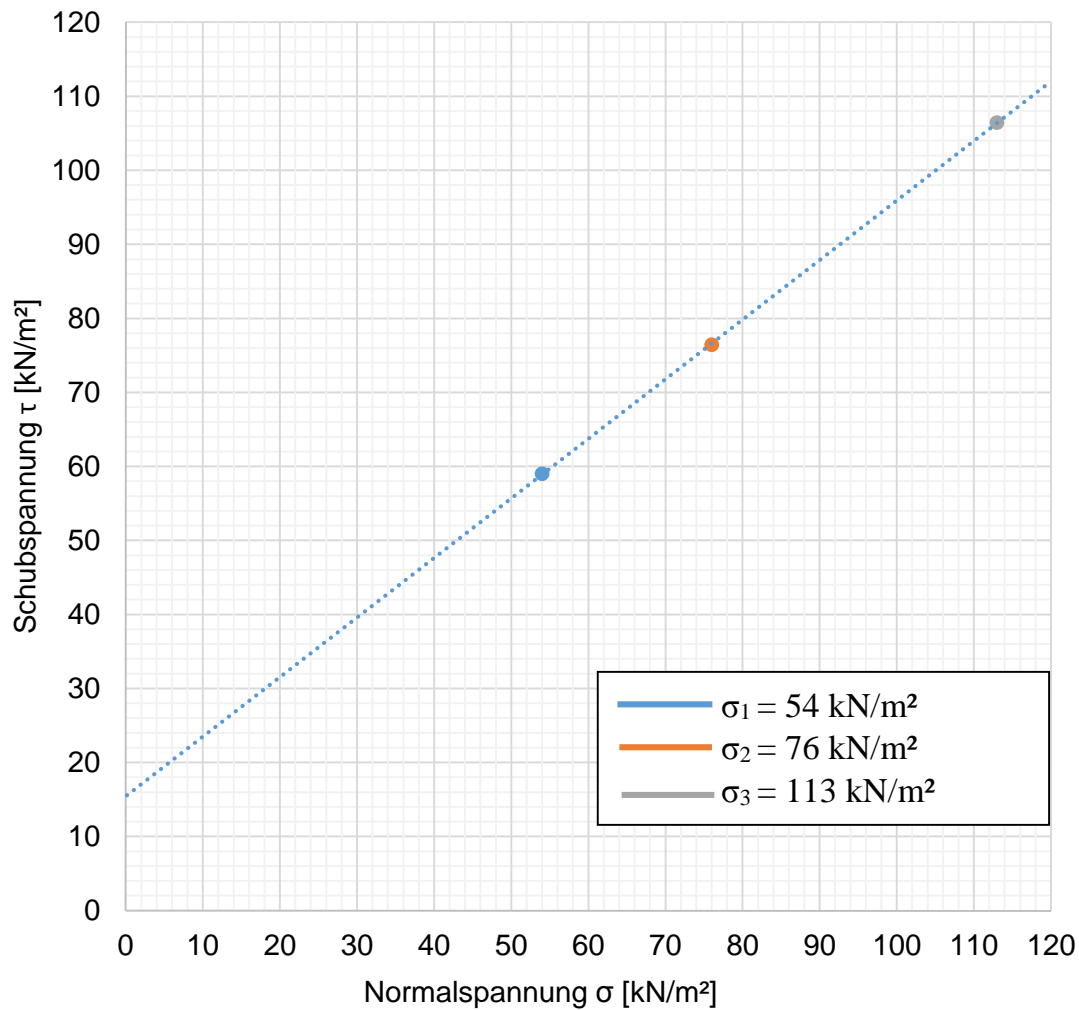


Abb. 57: Schergerade für das Material 1 si' sa Gr (GK 2 mm) bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 1. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

A.2.1.2 Kl. M1/ $D_{pr} = 97\%$ - V2

Tab. 41: Ergebnisse für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 2. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Bodenart	Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm)		
Versuchsbeschreibung	Kleinrahmenschergerät 2.Vergleichsversuch - $D_{pr} = 97\%$		
Scherboxabmessung [mm]	<i>h</i> : 27	<i>d</i> : 80	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	56	82	119
Max. Schubspannung [kN/m ²]	57	75	94
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	1,79		
97 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,74		
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,75	1,75	1,74
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,72	1,73	1,72
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,33	0,63	0,05
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-1,15	-0,48	-1,33
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	6,6		

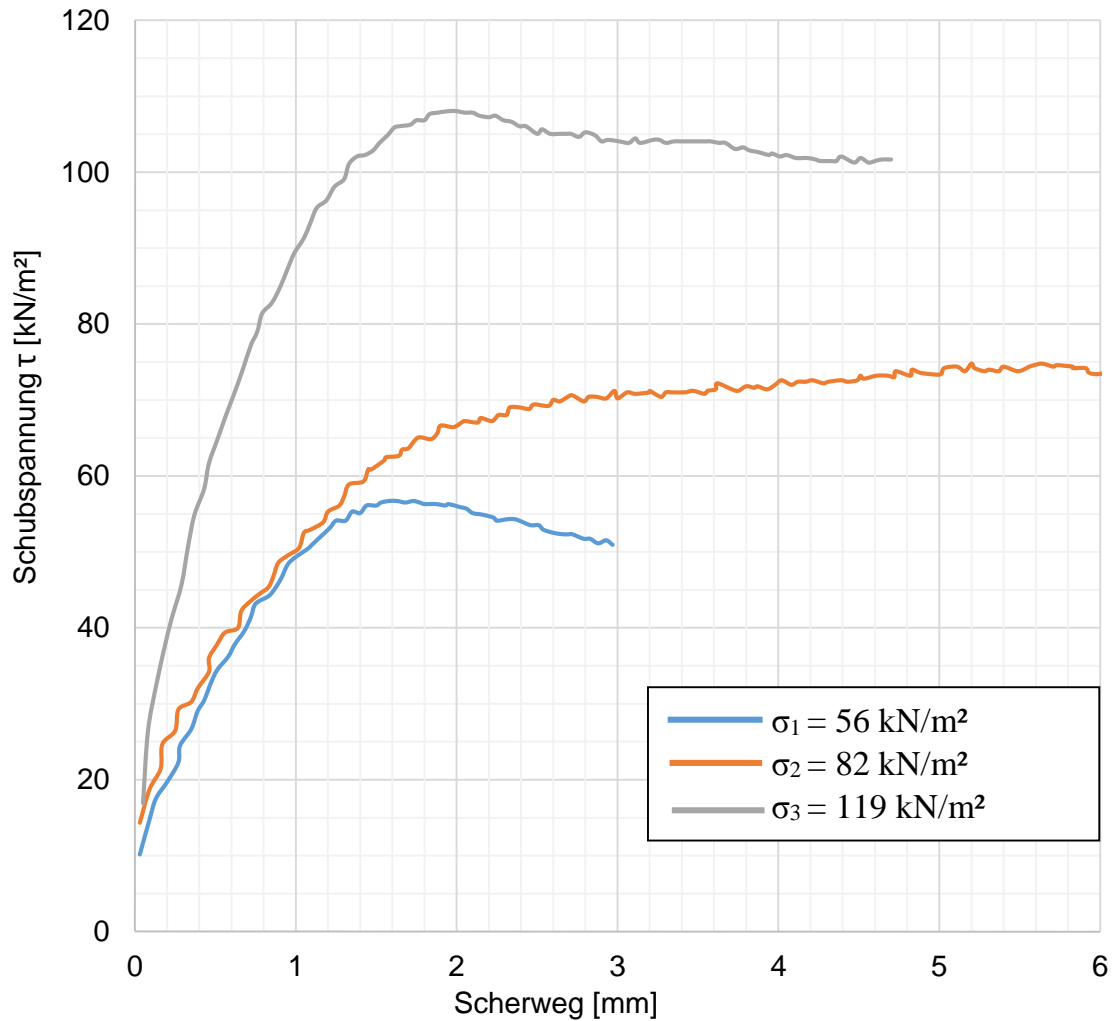


Abb. 58: Scherwegdiagramm für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 2. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

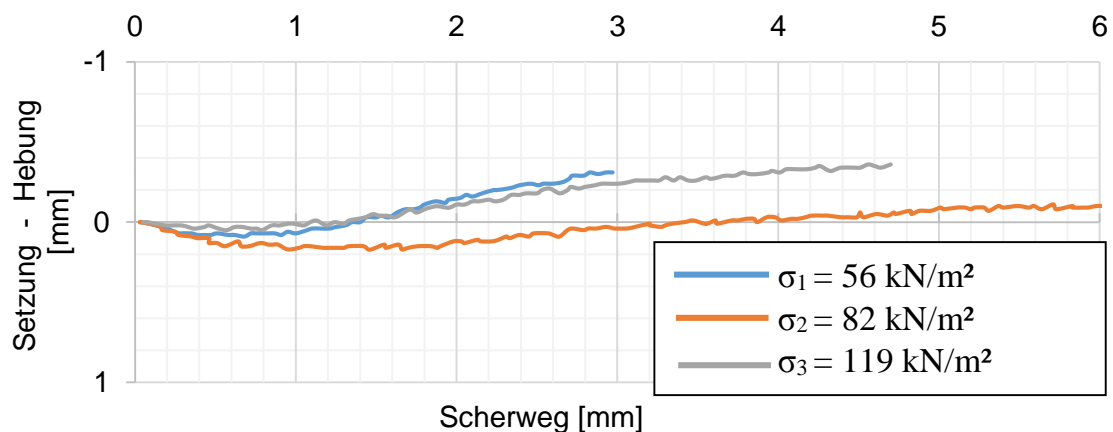


Abb. 59: Scherweg-Setzungsdiagramm für Material 1 (GK 2 mm), 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 2. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Tab. 42: Scherparameter für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 2. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	40,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	9,0

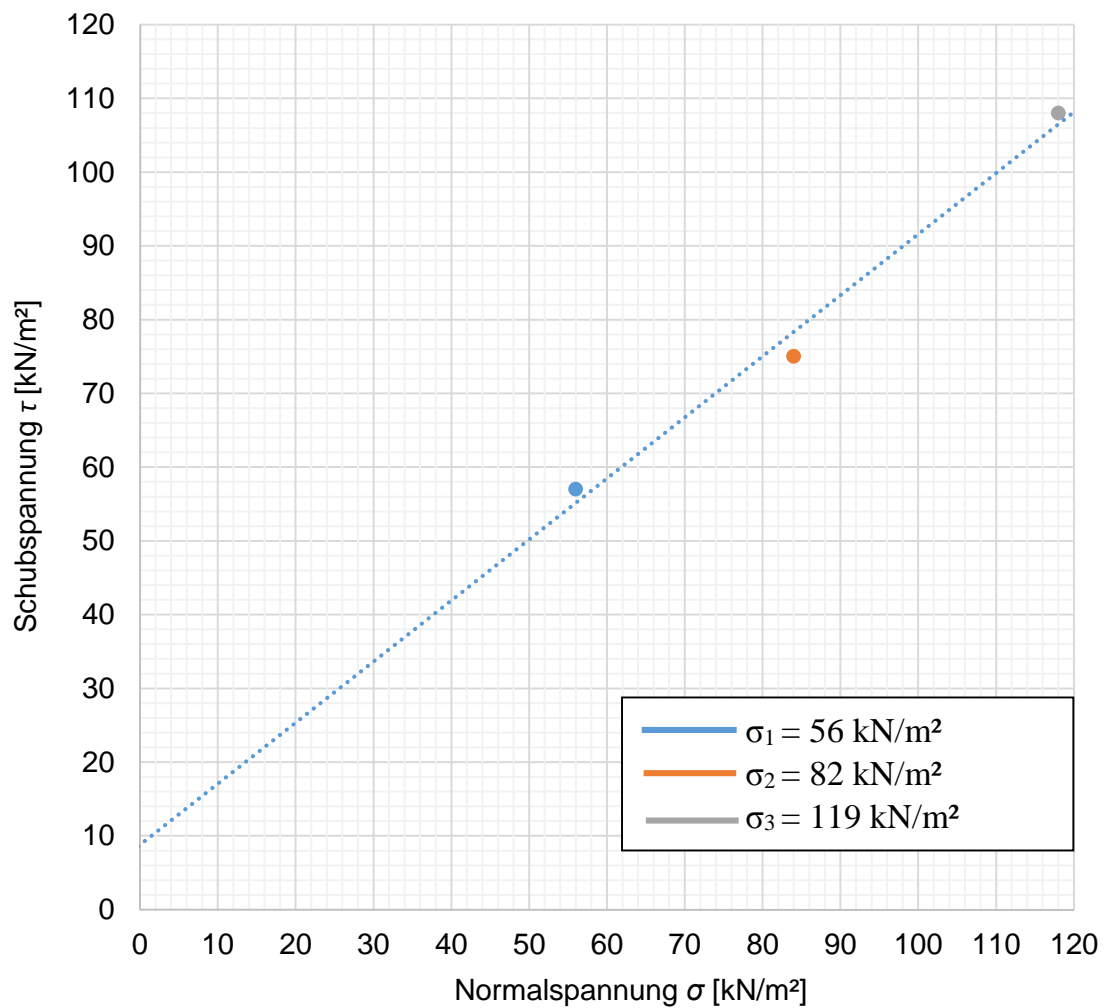


Abb. 60: Schergerade für das Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm) bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$) 2. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

A.2.1.3 Kl. M1/ $D_{pr} = 97\%$ - V3

Tab. 43: Ergebnisse für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 3. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Bodenart	Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm)		
Versuchsbeschreibung	Kleinrahmenschergerät 3. Vergleichsversuch - ($D_{pr} = 97\%$)		
Scherboxabmessung [mm]	<i>h</i> : 27	<i>d</i> : 80	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	52	76	111
Max. Schubspannung [kN/m ²]	63	81	99
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	1,79		
97 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,74		
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,75	1,74	1,75
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,74	1,71	1,73
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,56	0,19	0,56
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-0,06	-1,85	-0,06
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	6,6		

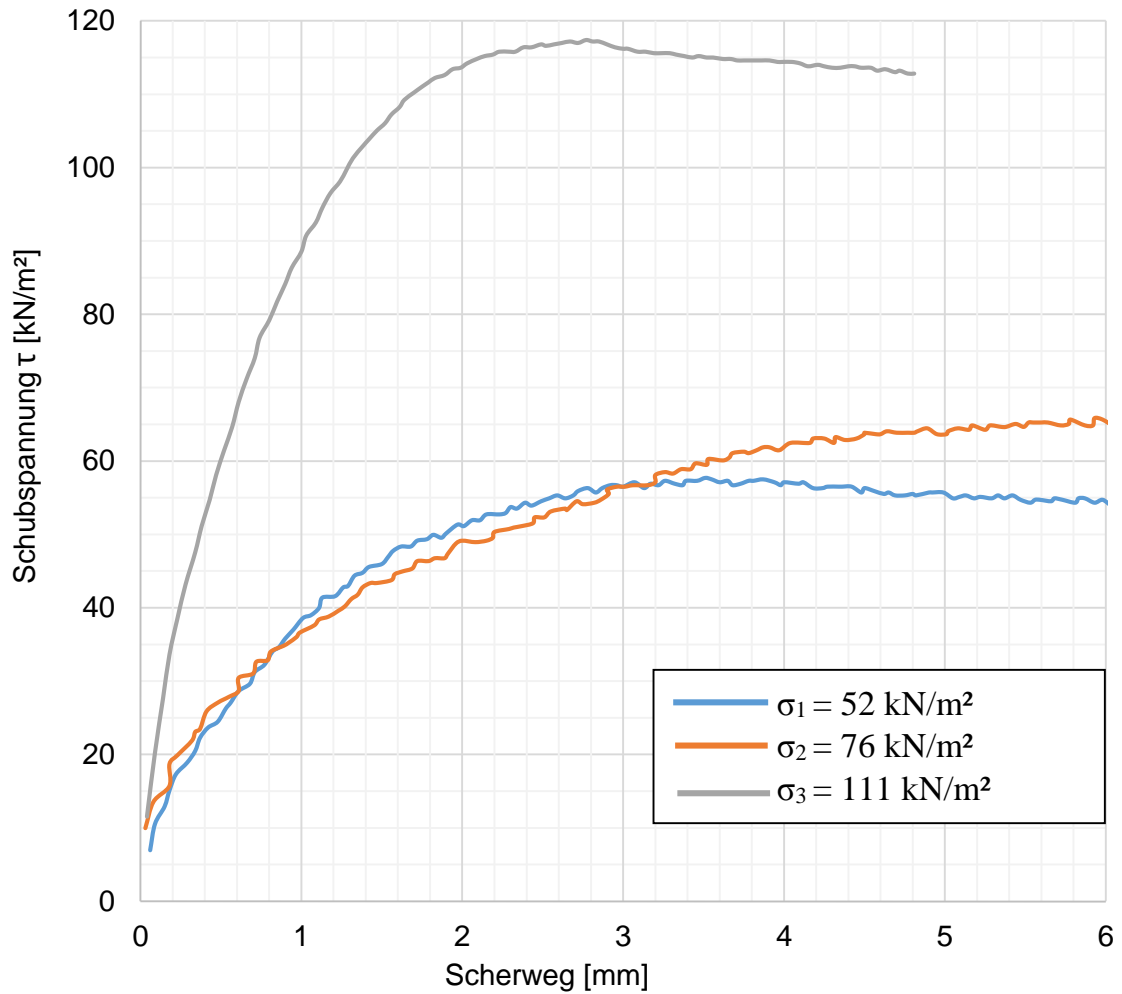


Abb. 61: Schwegediagramm für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), 97 % Proctordichte ($D_{Pr} = 97\%$), 3. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

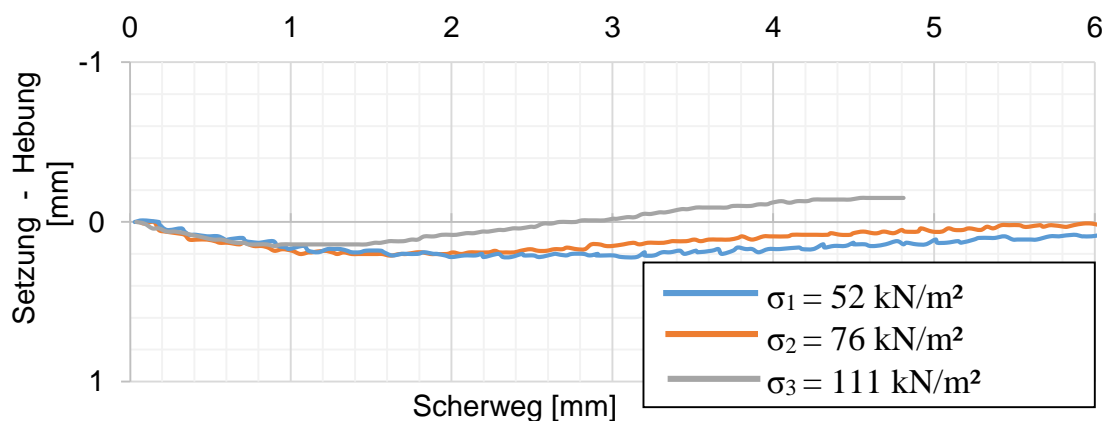


Abb. 62: Schweg-Setzungsdiagramm für Material 1 (GK 2 mm), 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 3. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Tab. 44: Scherversuche für Material 1 - si^c sa Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 3. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	39,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	11,0

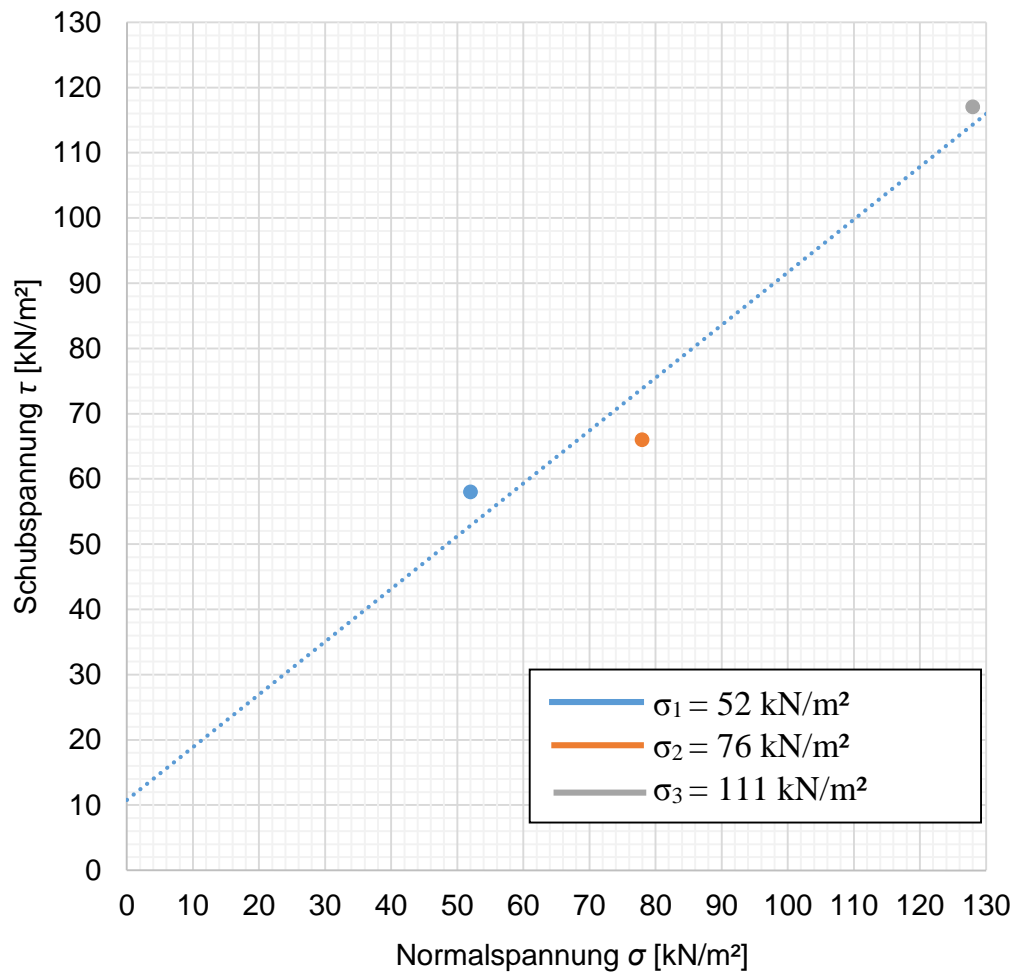


Abb. 63: Schergerade für das Material 1 - si^c sa Gr (GK 2 mm) bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 3. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

A.2.2 Kl. M1 / $D_{pr} = 92 \%$ / GK 2 mm

A.2.2.1 Kl. M1/ $D_{pr} = 92 \%$ - V1

Tab. 45: Ergebnisse für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 1. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Bodenart	si' sa Gr (GK 2 mm)		
Versuchsbeschreibung	Kleinrahmenschergerät 1. Vergleichsversuch - $D_{pr} = 92 \%$		
Scherboxabmessung [mm]	<i>h</i> : 27	<i>d</i> : 80	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	50	84	110
Max. Schubspannung [kN/m ²]	48	66	90
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	1,79		
92 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,65		
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,66	1,66	1,69
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,65	1,65	1,65
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,89	0,48	2,37
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	0,00	-0,30	0,00
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	6,6		

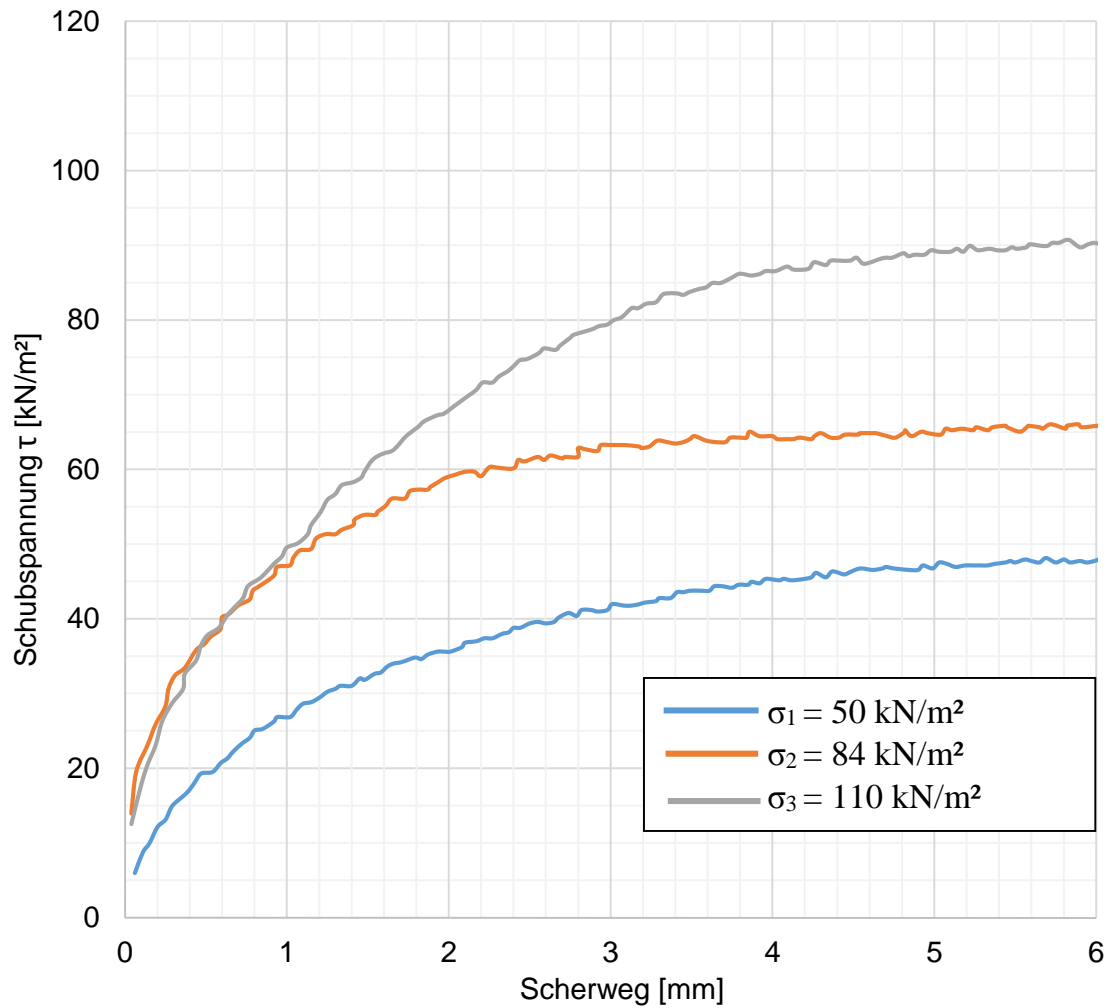


Abb. 64: Scherwegdiagramm für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 1. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

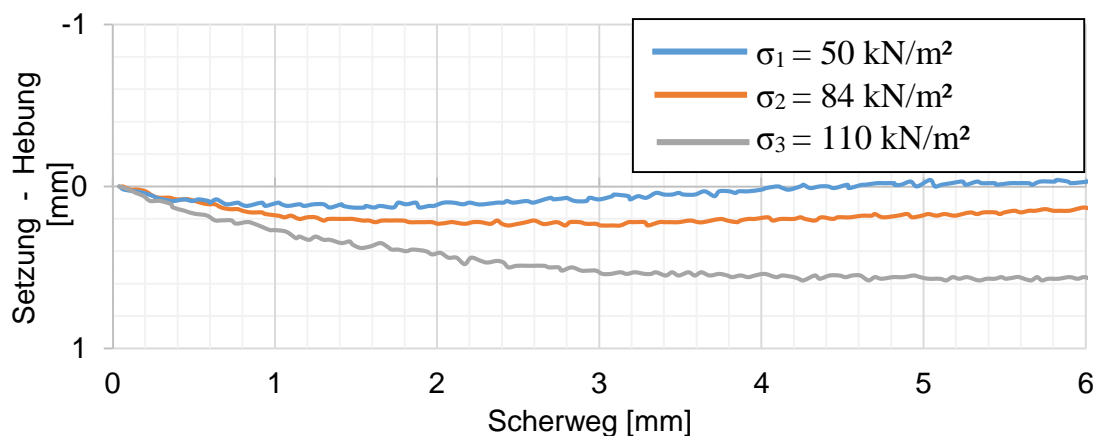


Abb. 65: Scherweg-Setzungsdiagramm für Material 1 (GK 2 mm), 92% Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 1. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Tab. 46: Scherparameter für Material 1 - si^c sa Gr (GK 2 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{Pr} = 92 \%$), 1. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	35,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	12,0

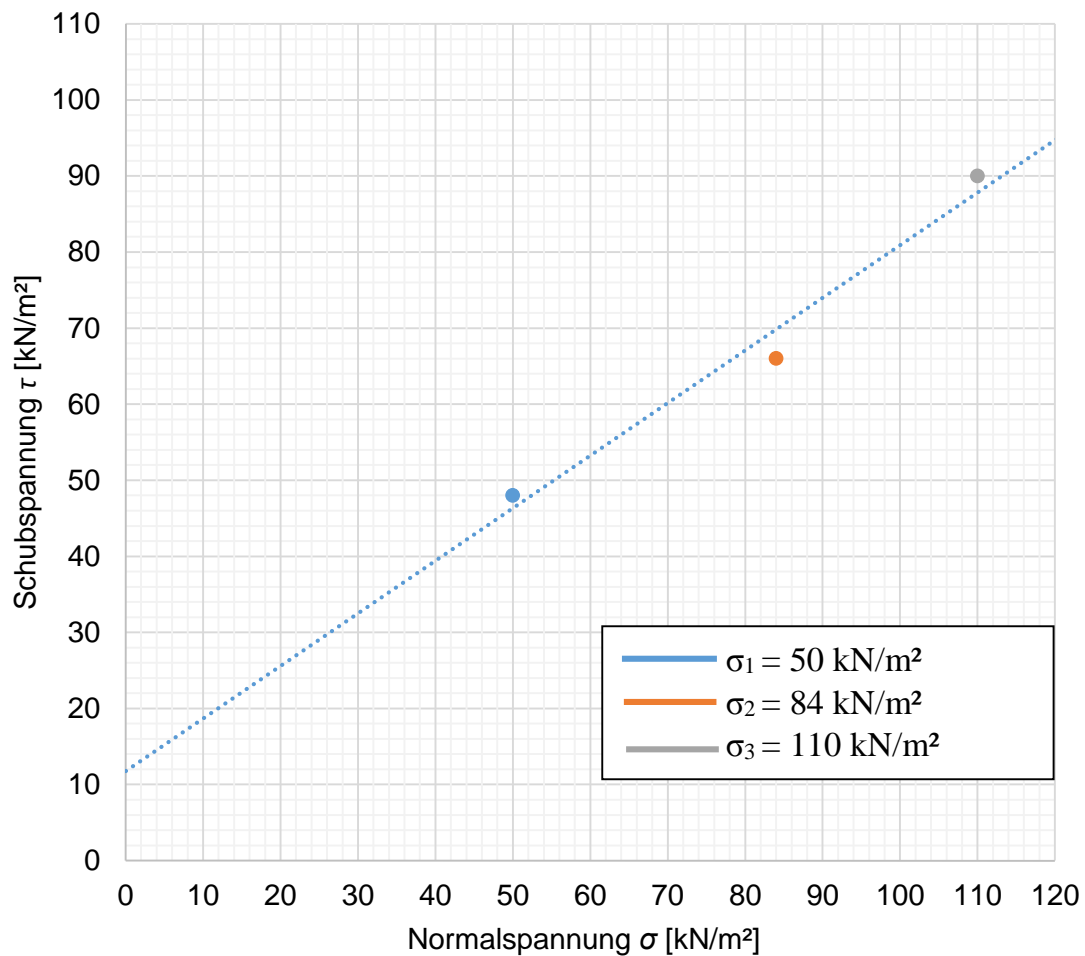


Abb. 66: Schergerade für Material 1 - si^c sa Gr (GK 2 mm) bei 92% Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 1. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

A.2.2.2 Kl. M1/ $D_{pr} = 92\%$ - V2

Tab. 47: Ergebnisse für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 2. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Bodenart	si' sa Gr (GK 2 mm)		
Versuchsbeschreibung	Kleinrahmenschergerät 2. Vergleichsversuch - $D_{pr} = 92\%$		
Scherboxabmessung [mm]	Höhe: 27	Durchmesser: 80	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	56	72	100
Max. Schubspannung [kN/m ²]	49	71	82
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	1,79		
92 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,65		
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,65	1,65	1,66
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,64	1,63	1,65
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,22	0,15	0,74
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-0,67	-1,04	0,00
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	6,6		

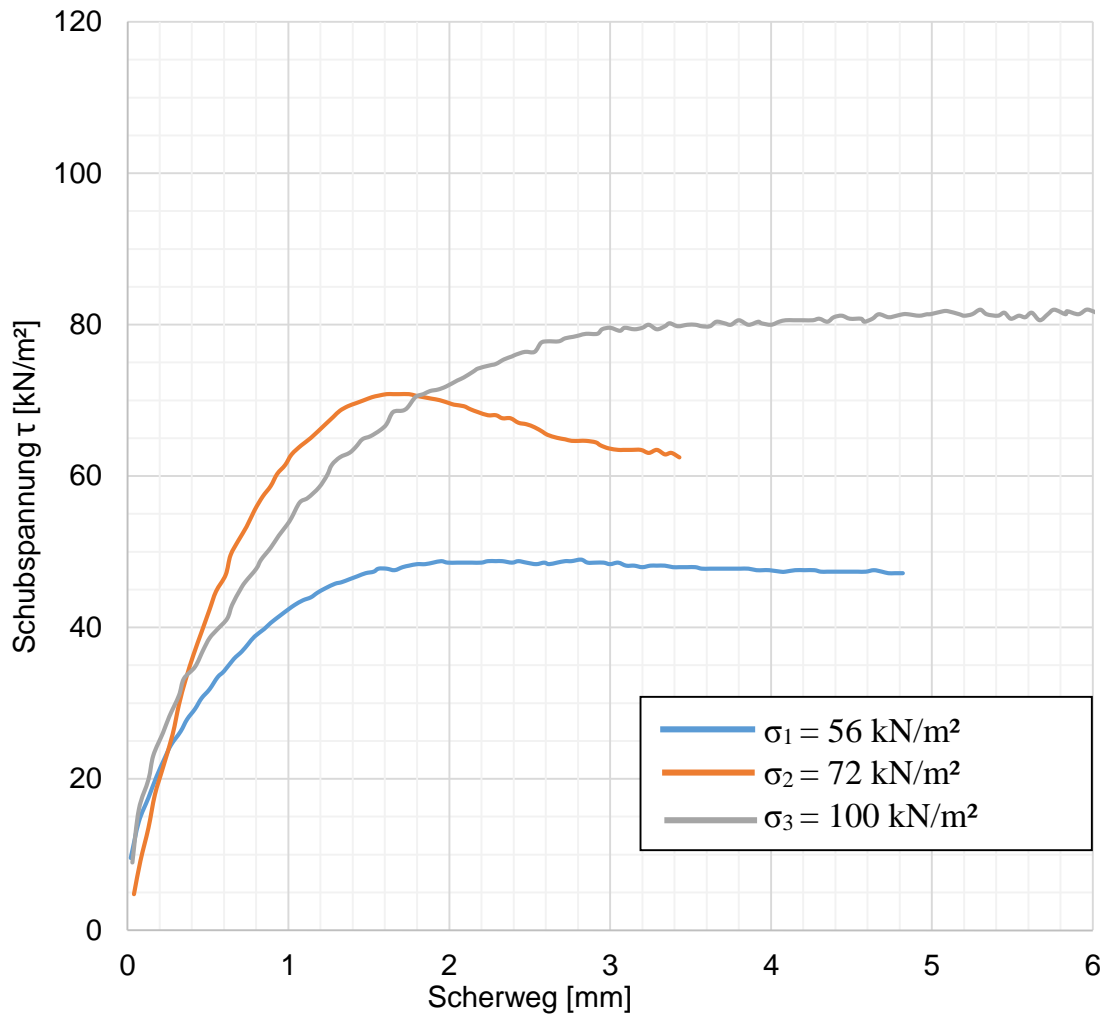


Abb. 67: Scherwegdiagramm für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 2. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

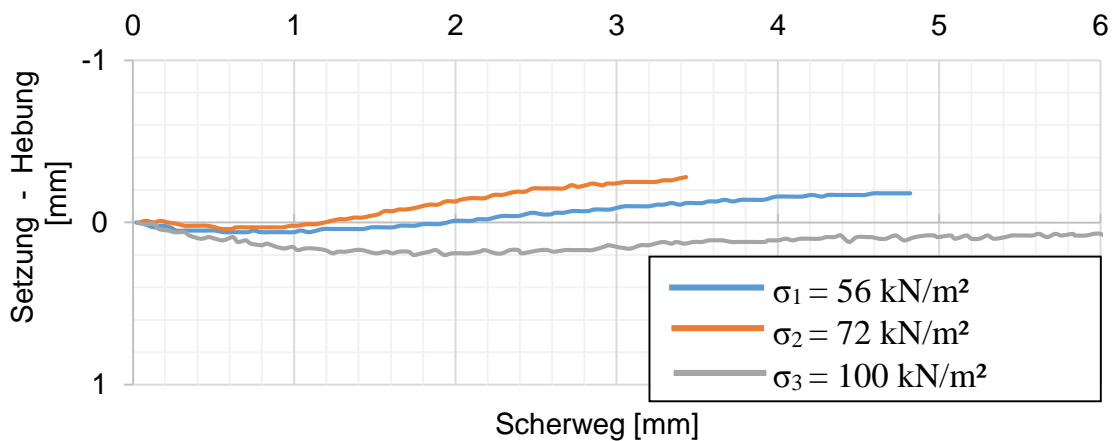


Abb. 68: Scherweg-Setzungsdiagramm für Material 1 (GK 2 mm), 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 2. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Tab. 48: Scherparameter für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 2. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	35,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	13,0

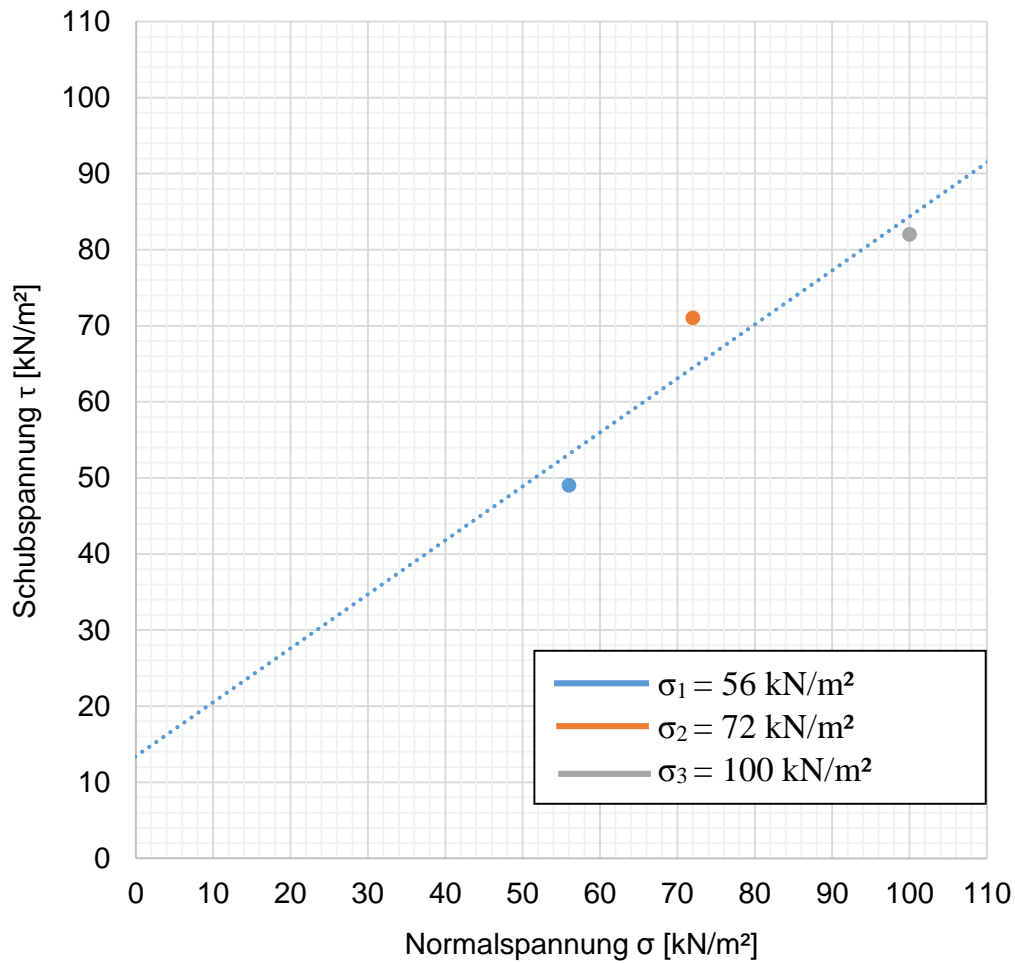


Abb. 69: Schergerade für das Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm) bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 2. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

A.2.2.3 Kl. M1/ $D_{pr} = 92\%$ - V3

Tab. 49: Ergebnisse für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), bei 92% Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 3. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Bodenart	si' sa Gr (GK 2 mm)		
Versuchsbeschreibung	Kleinrahmenschergerät 3. Vergleichsversuch - $D_{pr} = 92\%$		
Scherboxabmessung [mm]	<i>h</i> : 27	<i>d</i> : 80	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	58	82	106
Max. Schubspannung [kN/m ²]	53	69	90
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	1,79		
92 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,65		
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,74	1,75	1,75
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,71	1,73	1,73
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,11	0,33	0,41
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-1,56	-0,59	-0,63
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	6,6		

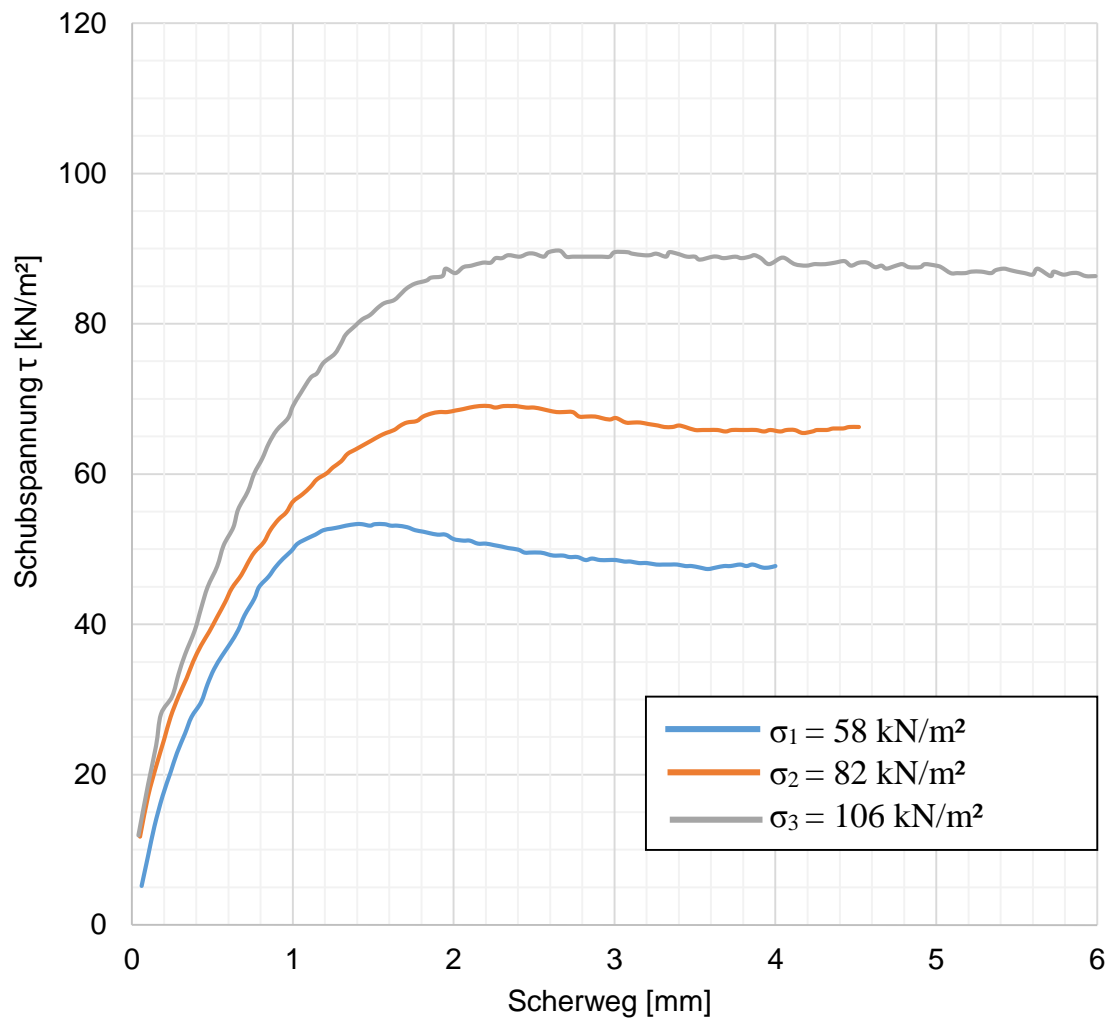


Abb. 70: Scherwegdiagramm für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 3. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

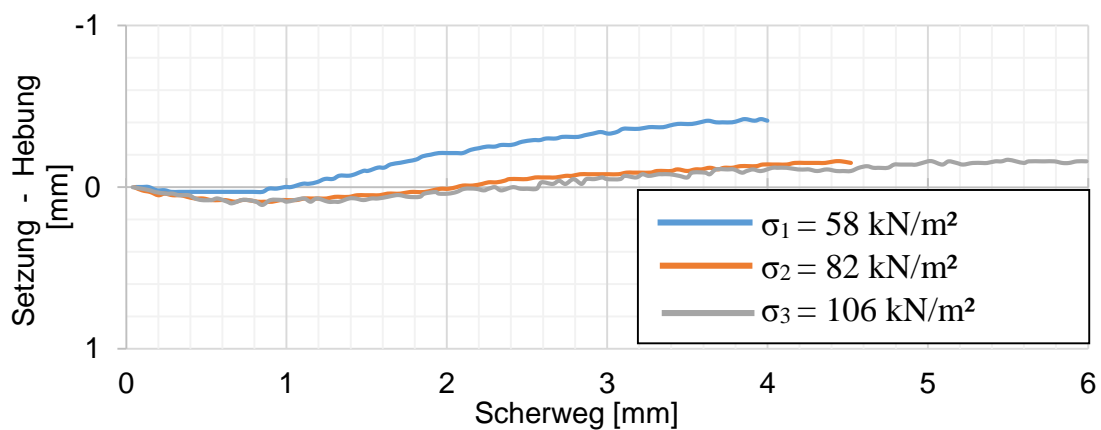


Abb. 71: Scherweg-Setzungsdiagramm für Material 1 (GK 2 mm), 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 3. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Tab. 50: Scherparameter für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 3. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	37,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	8,0

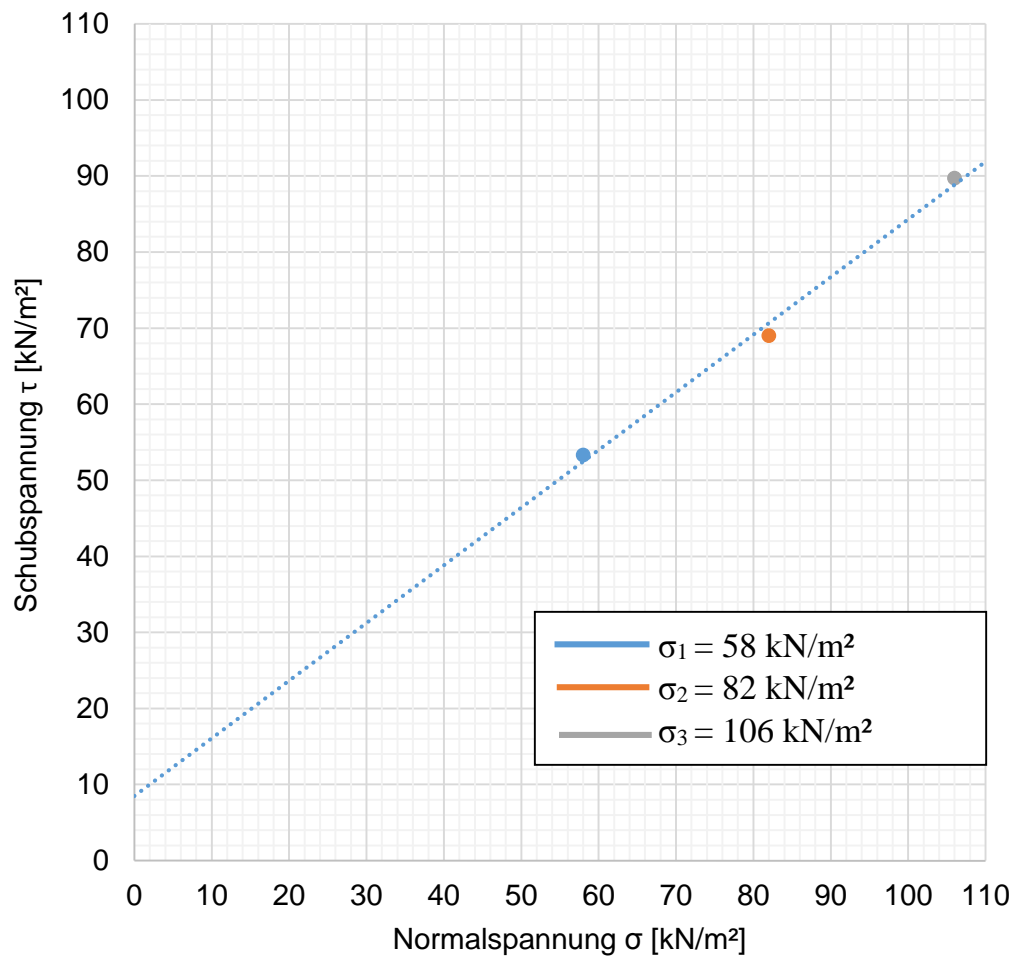


Abb. 72: Schergerade für das Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm) bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 3. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

A.3 Kleinrahmenschergerät Vergleichsversuche – M2

A.3.1 Kl. M2 / $D_{pr} = 97 \%$ / GK 2 mm

A.3.1.1 Kl. M2/ $D_{pr} = 97 \%$ - V1

Tab. 51: Ergebnisse für Material 2 - sa' si Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 1. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Bodenart	sa' si Gr (GK 2 mm)		
Versuchsbeschreibung	Kleinrahmenschergerät 1. Vergleichsversuch – $D_{pr} = 97 \%$		
Scherboxabmessung [mm]	<i>h</i> : 27	<i>d</i> : 80	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	50	76	100
Max. Schubspannung [kN/m ²]	65	86	94
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	1,81		
97 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,76		
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,76	1,76	1,76
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,74	1,74	1,74
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,15	0,00	0,11
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-1,22	-1,37	-1,22
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	15,5		

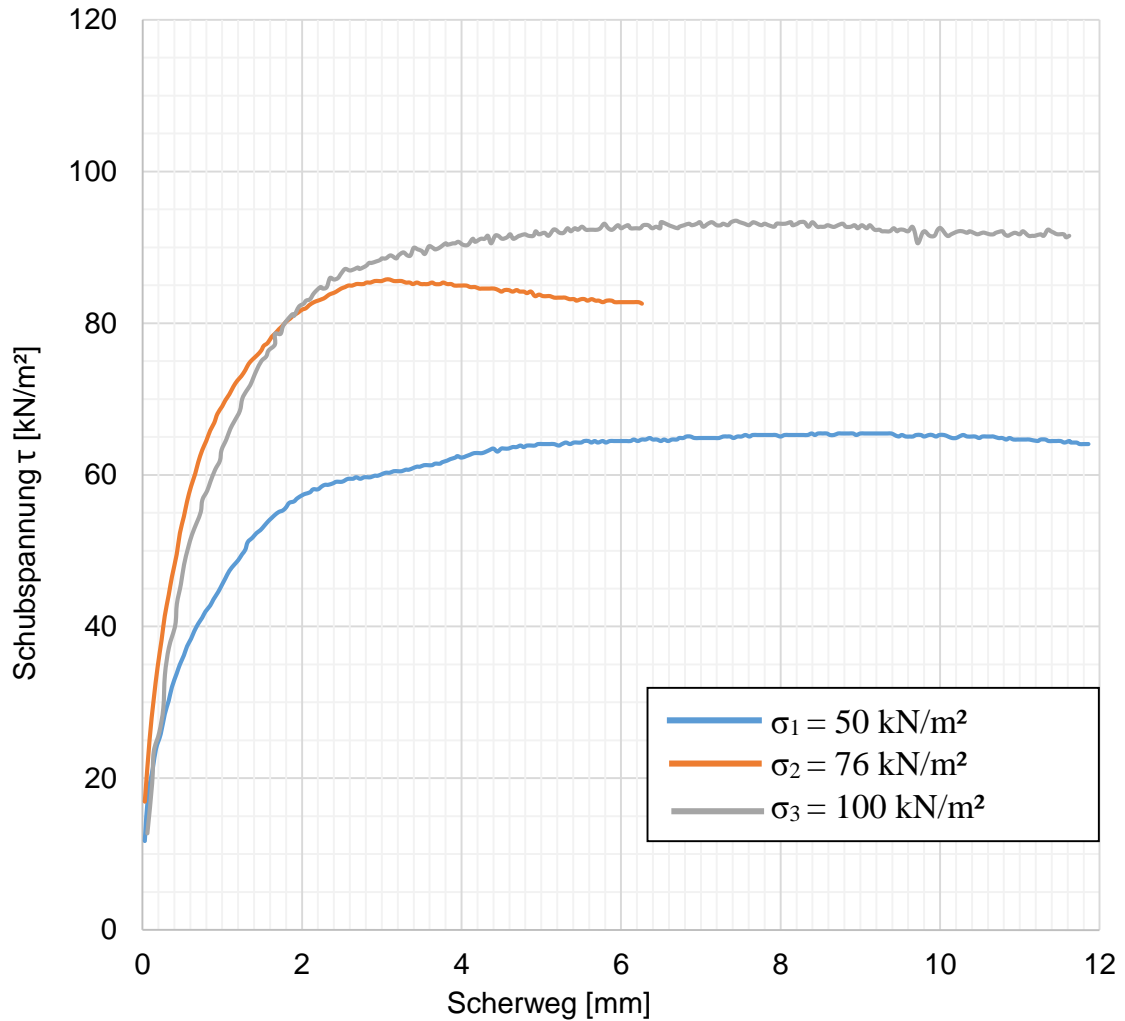


Abb. 73: Schwegediagramm für Material 2 - sa' si Gr (GK 2 mm), 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 1. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

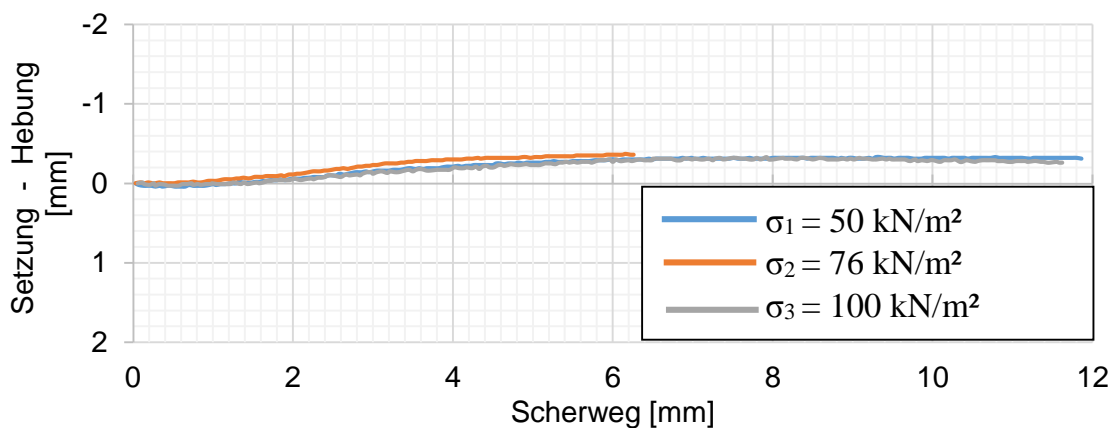


Abb. 74: Schweg-Setzungsdiagramm für Material 2 (GK 2 mm), 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 1. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Tab. 52: Scherparameter für Material 2 - sa^c si Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 1. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	30,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	38,0

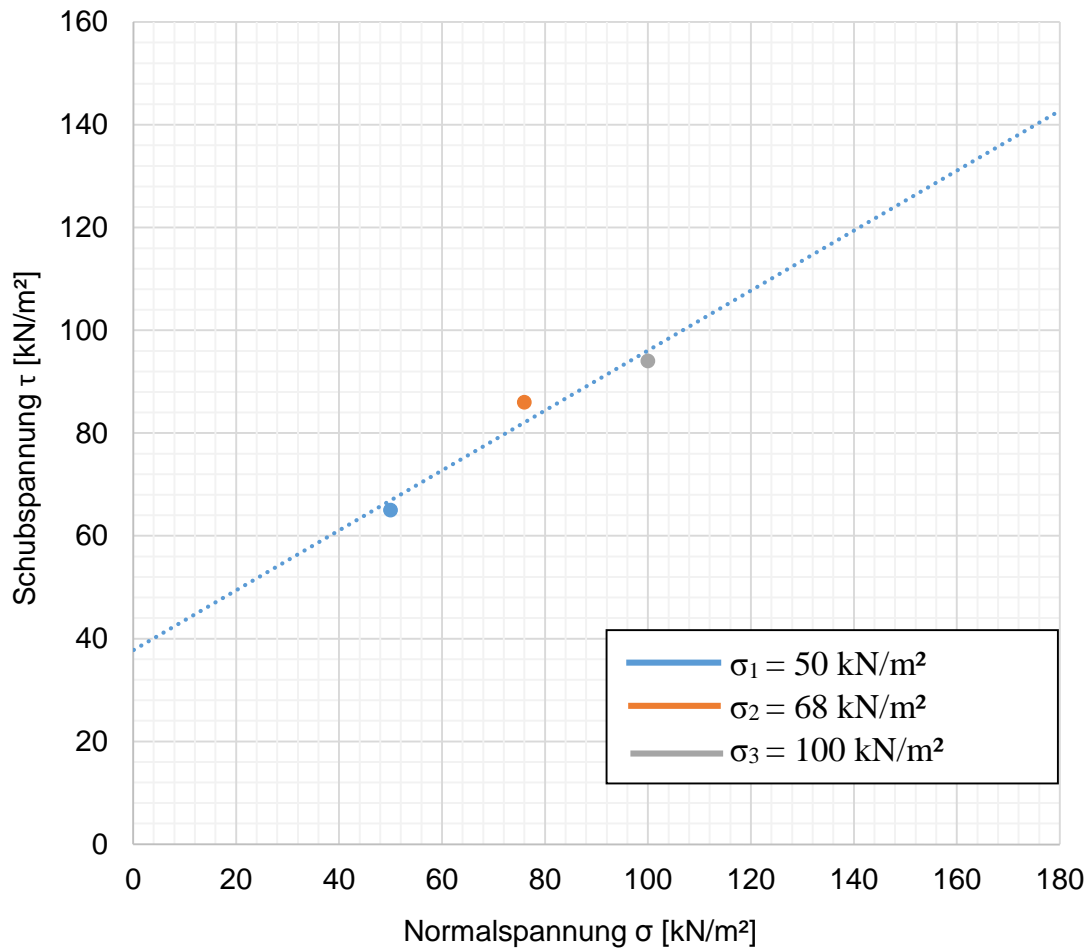


Abb. 75: Schergerade für das Material 2 – sa^c si Gr(GK 2 mm) bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 1. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

A.3.1.2 Kl. M2/ $D_{pr} = 97\%$ - V2

Tab. 53: Ergebnisse für Material 2 - sa' si Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 2. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Bodenart	sa' si Gr (GK 2 mm)		
Versuchsbeschreibung	Kleinrahmenschergerät 2. Vergleichsversuch - $D_{pr} = 97\%$		
Scherboxabmessung [mm]	$h: 27$	$d: 80$	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	66	95	96
Max. Schubspannung [kN/m ²]	78	93	97
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	1,81		
97 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,76		
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,76	1,76	1,76
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,73	1,75	1,75
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,11	0,22	0,19
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-1,47	-0,52	-0,37
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	15,5		

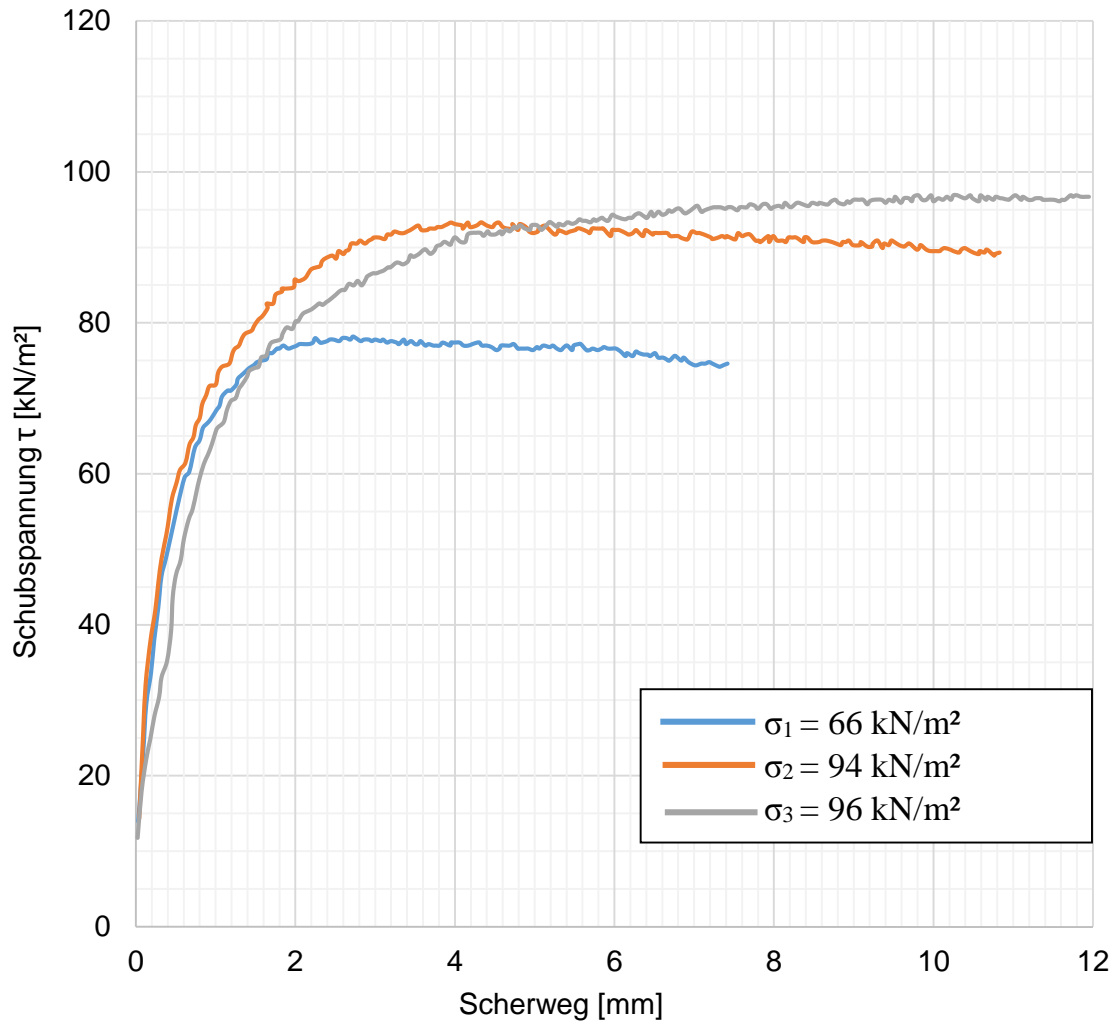


Abb. 76: Schubwegdiagramm für Material 2 - sa' si Gr (GK 2 mm), 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 2. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

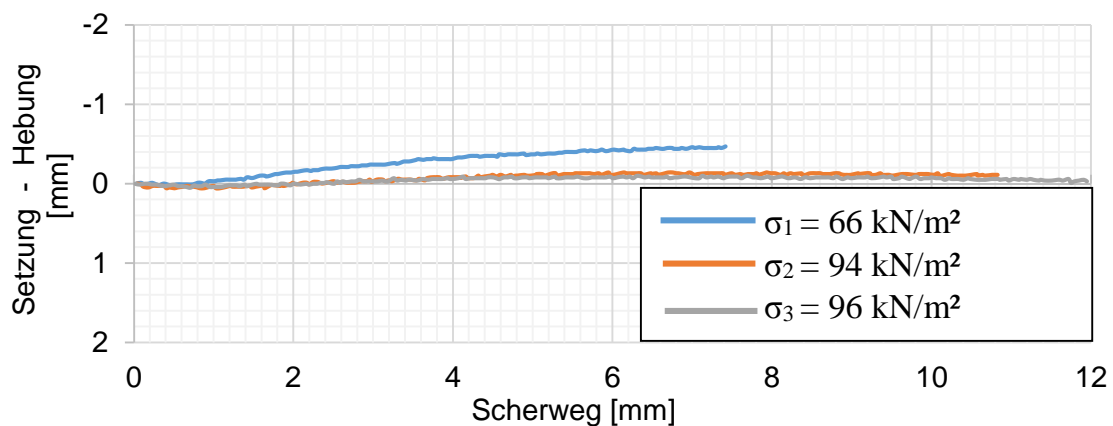


Abb. 77: Schubweg-Setzungsdiagramm für Material 2 (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 2. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Tab. 54: Scherparameter für Material 2 - sa' si Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 2. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	31,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	39,0

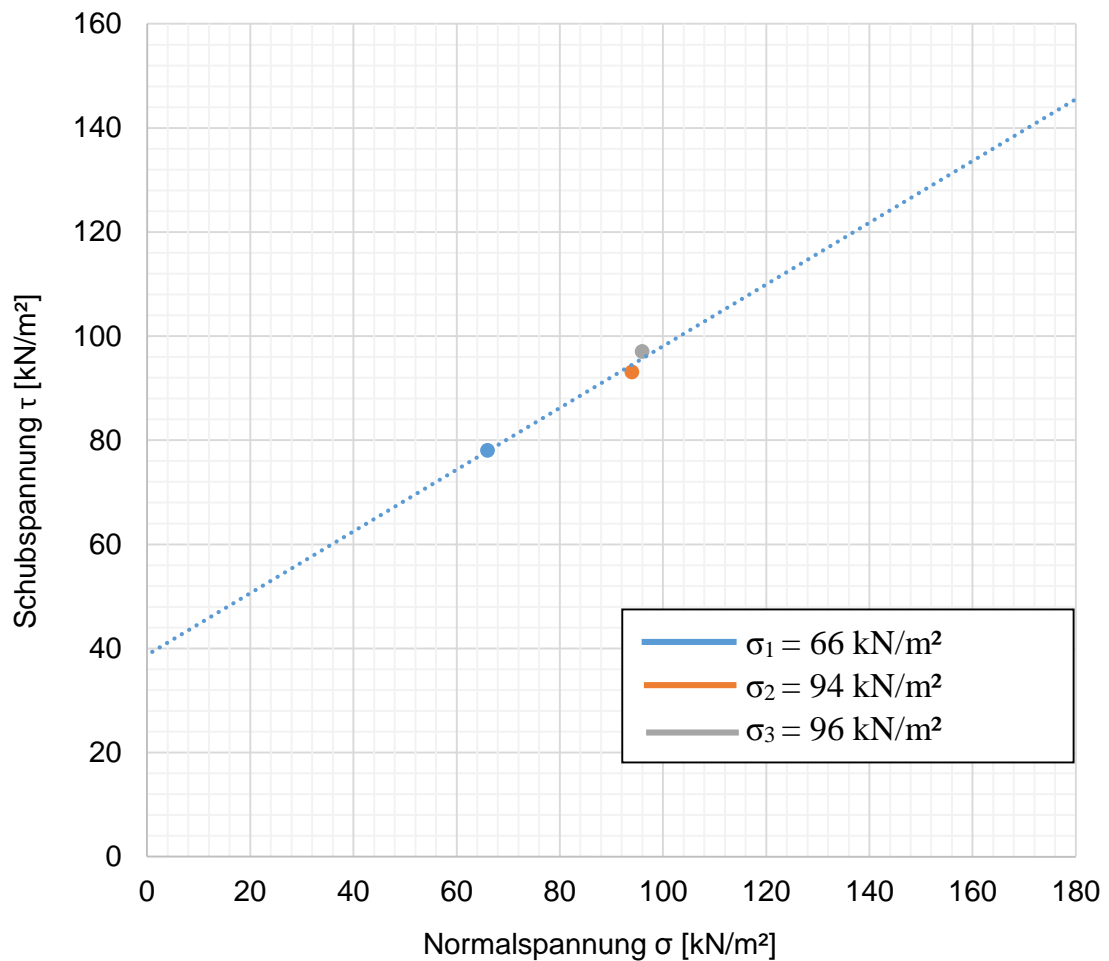


Abb. 78: Schergerade für das Material 2 - sa' si Gr (GK 2 mm) bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 2. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

A.3.1.3 Kl. M2/ $D_{pr} = 97\%$ - V3

Tab. 55: Ergebnisse für Material 2 - sa' si Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 3. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Bodenart	sa' si Gr (GK 2 mm)		
Versuchsbeschreibung	Kleinrahmenschergerät 2. Vergleichsversuch - $D_{pr} = 97\%$		
Scherboxabmessung [mm]	h: 27		d: 80
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	34	74	100
Max. Schubspannung [kN/m ²]	55	80	98
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	1,81		
97 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,76		
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,77	1,76	1,77
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,76	1,76	1,76
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,38	0,20	0,34
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	0,00	0,00	0,00
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	15,5		

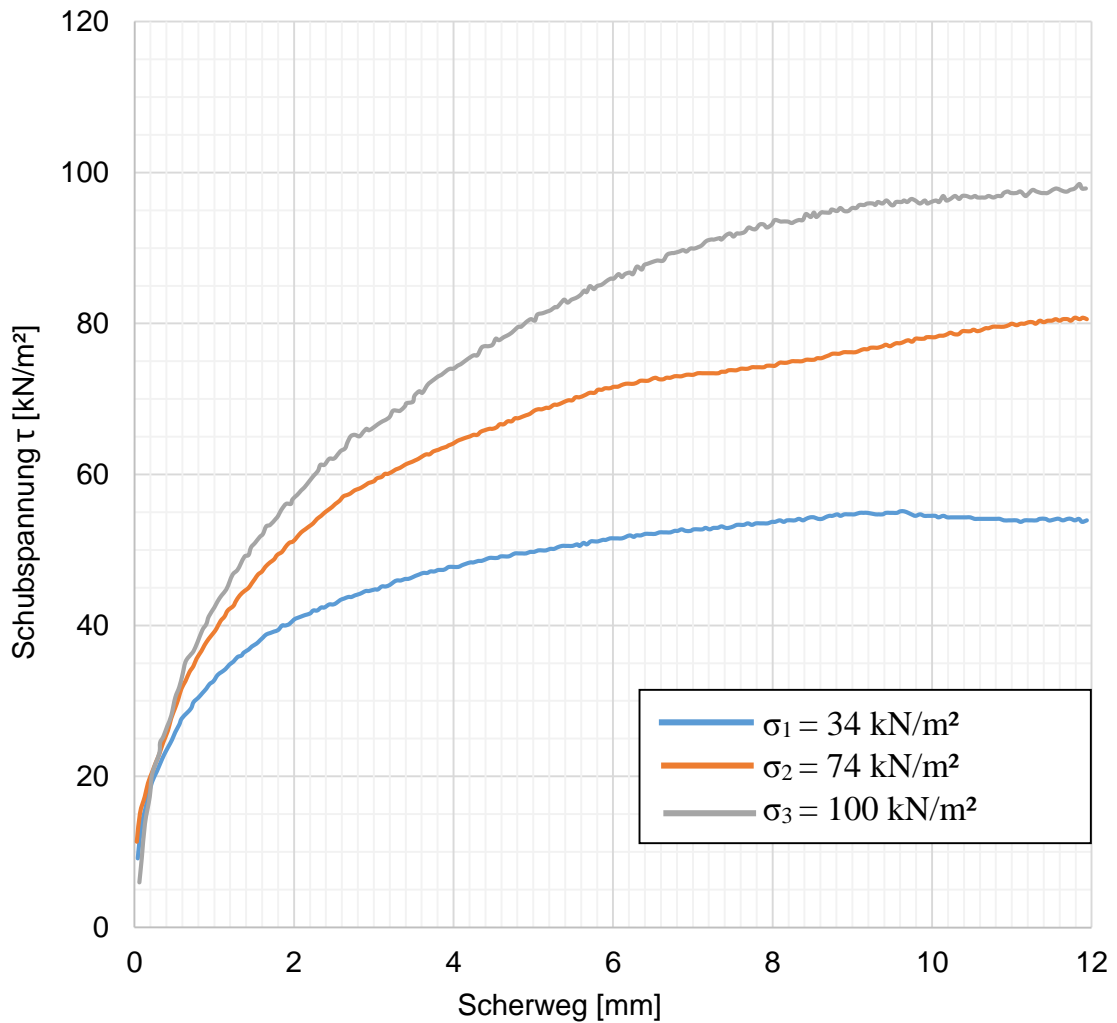


Abb. 79: Scherwegdiagramm für Material 2 - sa' si Gr (GK 2 mm), 97 % Proctordichte ($D_{Pr} = 97\%$), 3. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

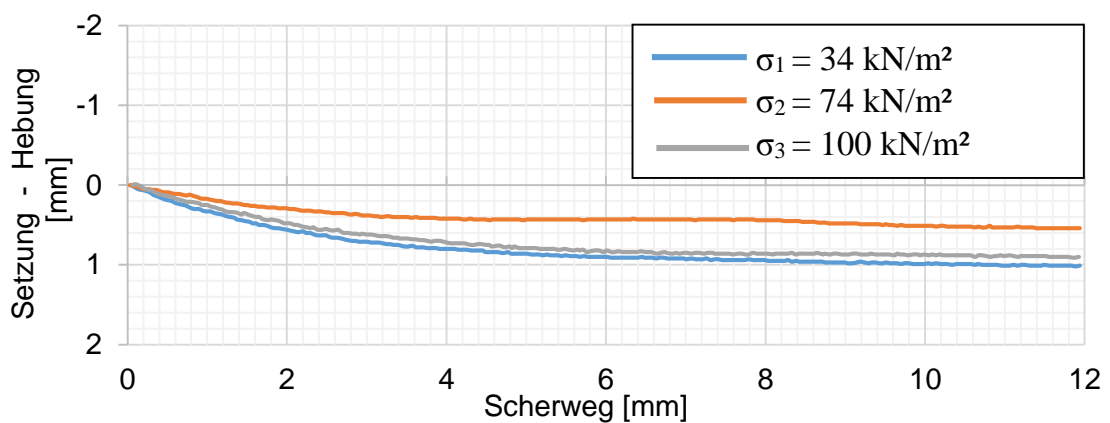


Abb. 80: Scherweg-Setzungsdiagramm für Material 2 (GK 2 mm), 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 3. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Tab. 56: Schergerade für Material 2 - sa' si Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 3. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	33,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	33,0

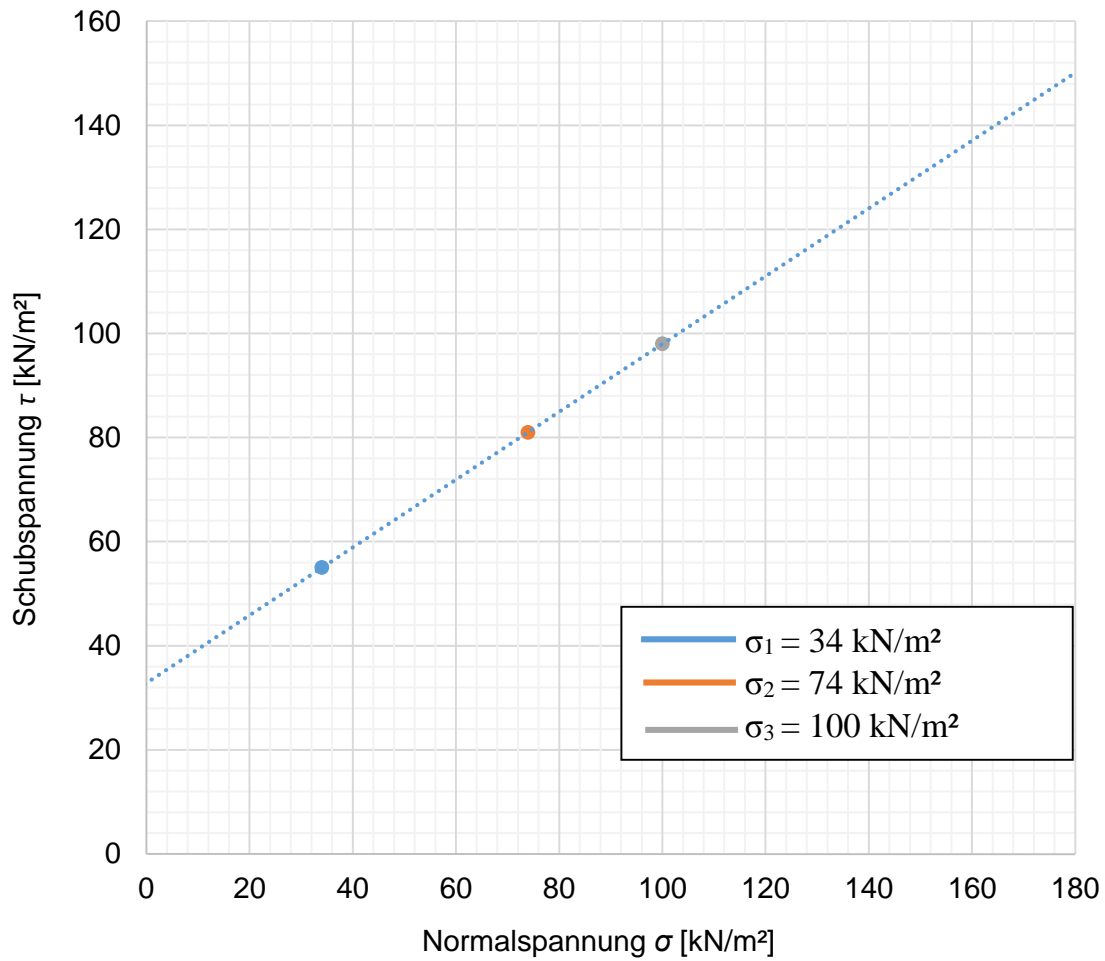


Abb. 81: Schergerade für das Material 2 - sa' si Gr (GK 2 mm) bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 3. Kleinrahmenscher-Vergleichsversuch

A.3.2 Kl. M2 / $D_{pr} = 92 \%$ / GK 2 mm

A.3.2.1 Kl. M2/ $D_{pr} = 92 \%$ - V1

Tab. 57: Ergebnisse für Material 2 - sa' si Gr (GK 2 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$) 1. Kleinrahmenscher- Vergleichsversuch

Bodenart	sa' si Gr (GK 2 mm)		
Versuchsbeschreibung	Kleinrahmenschergerät 1. Vergleichsversuch – $D_{pr} = 92 \%$		
Scherboxabmessung [mm]	Höhe: 27	Durchmesser: 80	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	50	68	116
Max. Schubspannung [kN/m ²]	66	87	114
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	1,81		
92 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,67		
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,67	1,67	1,67
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,67	1,65	1,67
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,30	0,11	0,26
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-0,30	-1,41	-0,30
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	15,5		

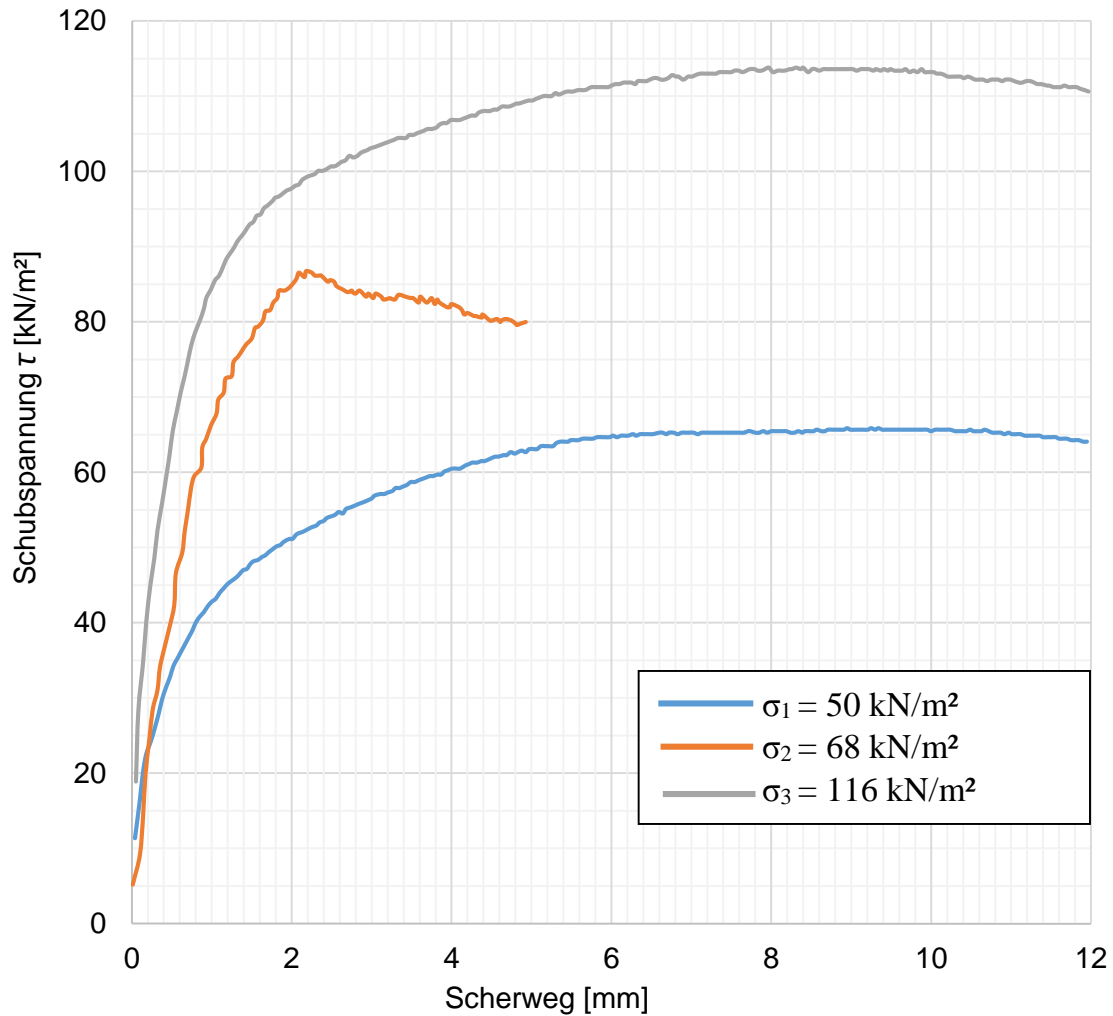


Abb. 82: Scherwegdiagramm für Material 2 - sa' si Gr (GK 2 mm), 92 % Proctor-dichte ($D_{pr} = 92\%$), 1. Kleinrahmenscher- Vergleichsversuch

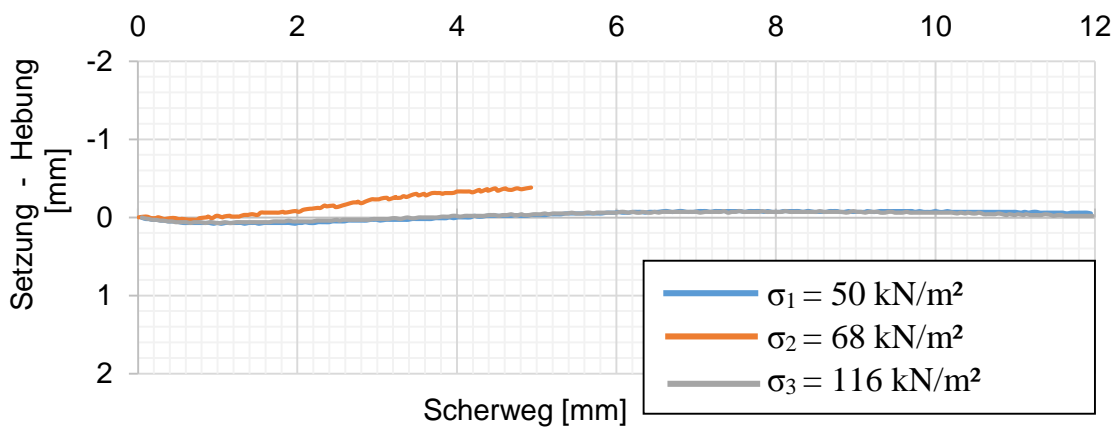


Abb. 83: Scherweg- Setzungsdiagramm für Material 2 (GK 2 mm), 92 % Proctor-dichte ($D_{pr} = 92\%$), 1. Kleinrahmenscher- Vergleichsversuch

Tab. 58: Scherparameter für Material 2 - sa' si Gr (GK 2 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 1. Kleinrahmenscher- Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	35,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	35,0

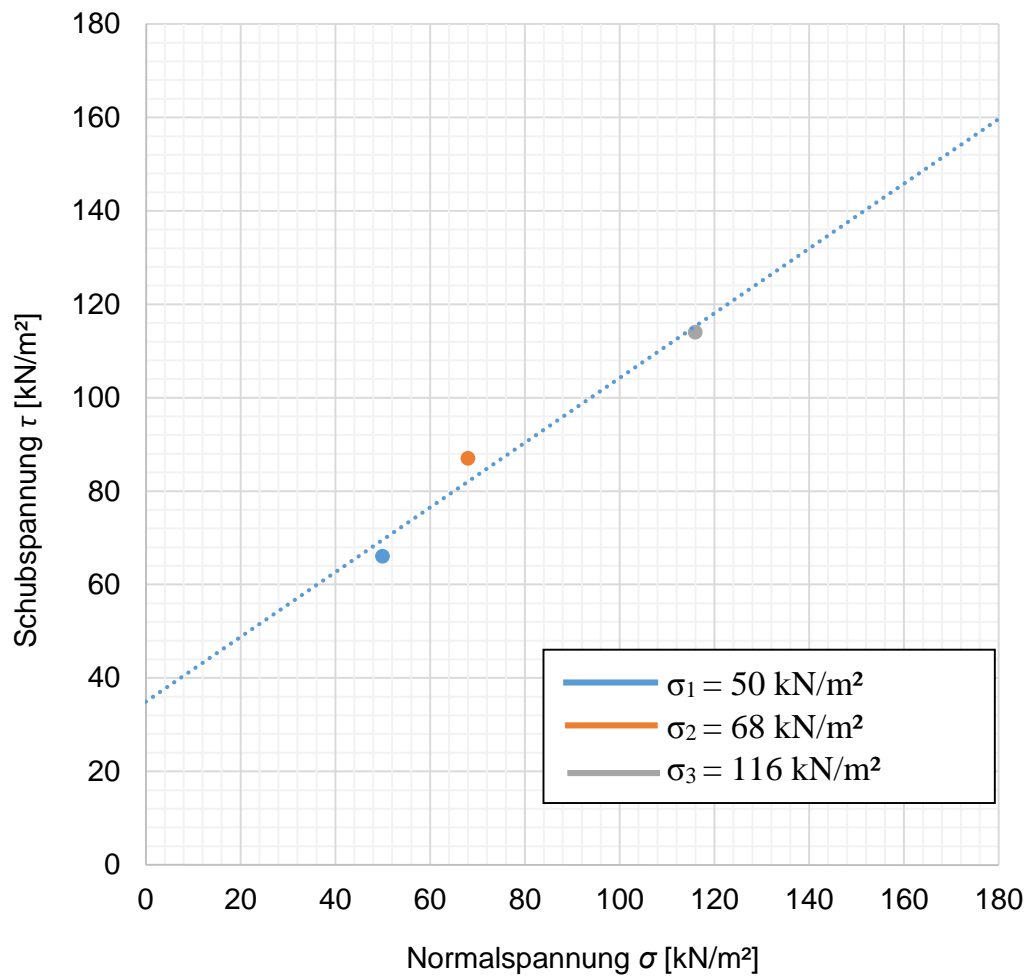


Abb. 84: Schergerade für das Material 2 - sa' si Gr (GK 2 mm) 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 1. Kleinrahmenscher- Vergleichsversuch

A.3.2.2 Kl. M2/ $D_{pr} = 92\%$ - V2

Tab. 59: Ergebnisse für Material 2 - sa' si Gr (GK 2 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 2. Kleinrahmenscher- Vergleichsversuch

Bodenart	sa' si Gr (GK 2 mm)		
Versuchsbeschreibung	Kleinrahmenscherversuch 2. Vergleichsversuch - $D_{pr} = 92\%$		
Scherboxabmessung [mm]	h: 27		d: 80
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	52	86	106
Max. Schubspannung [kN/m ²]	62	85	99
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	1,81		
92 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,67		
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,67	1,67	1,71
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,65	1,66	1,67
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,11	0,30	2,44
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-1,22	-0,74	0,00
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	15,5		

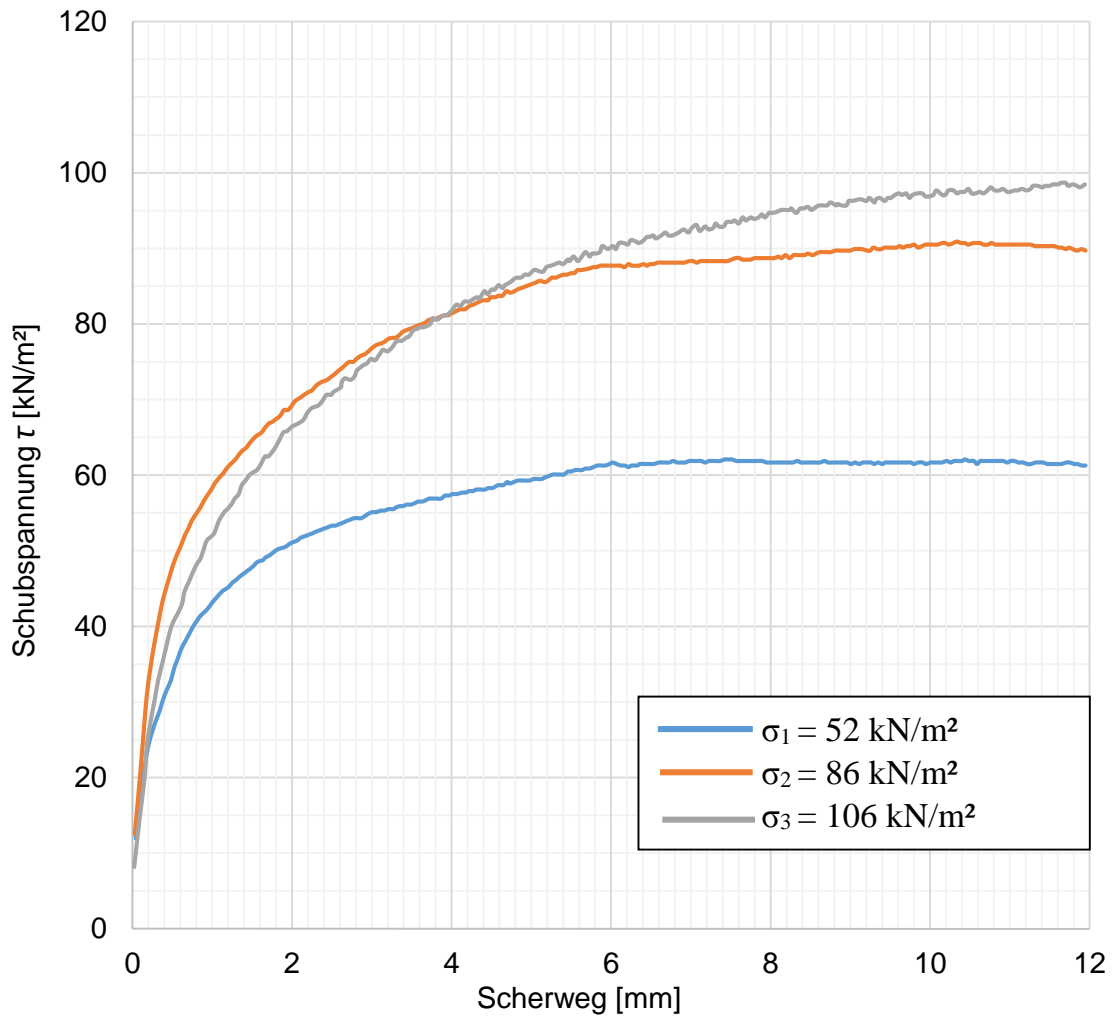


Abb. 85: Scherwegdiagramm für Material 2 - sa' si Gr (GK 2 mm), 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 2. Kleinrahmenscher- Vergleichsversuch

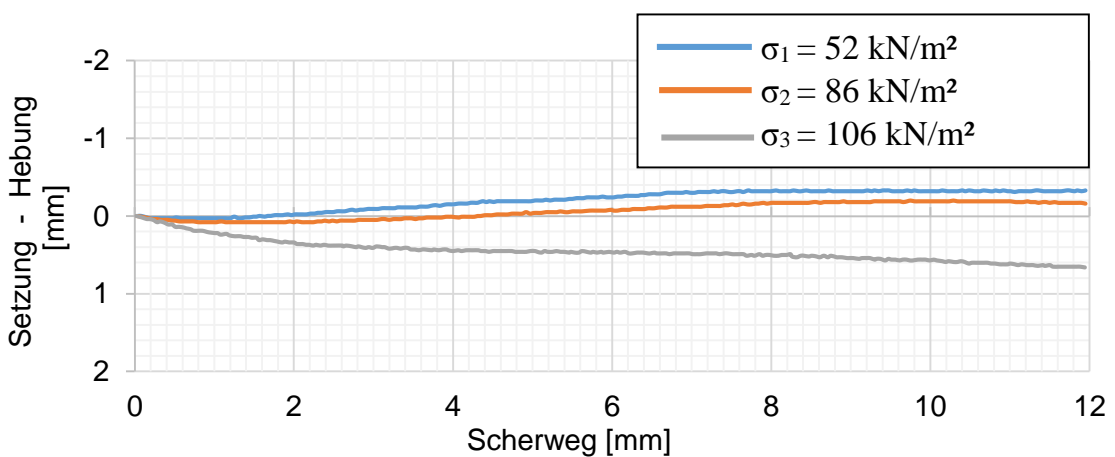


Abb. 86: Scherweg-Setzungsdiagramm für Material 2 (GK 2 mm), 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 2. Kleinrahmenscher- Vergleichsversuch

Tab. 60: Scherparameter für Material 2 - sa' si Gr (GK 2 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 2. Kleinrahmenscher- Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	34,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	26,0

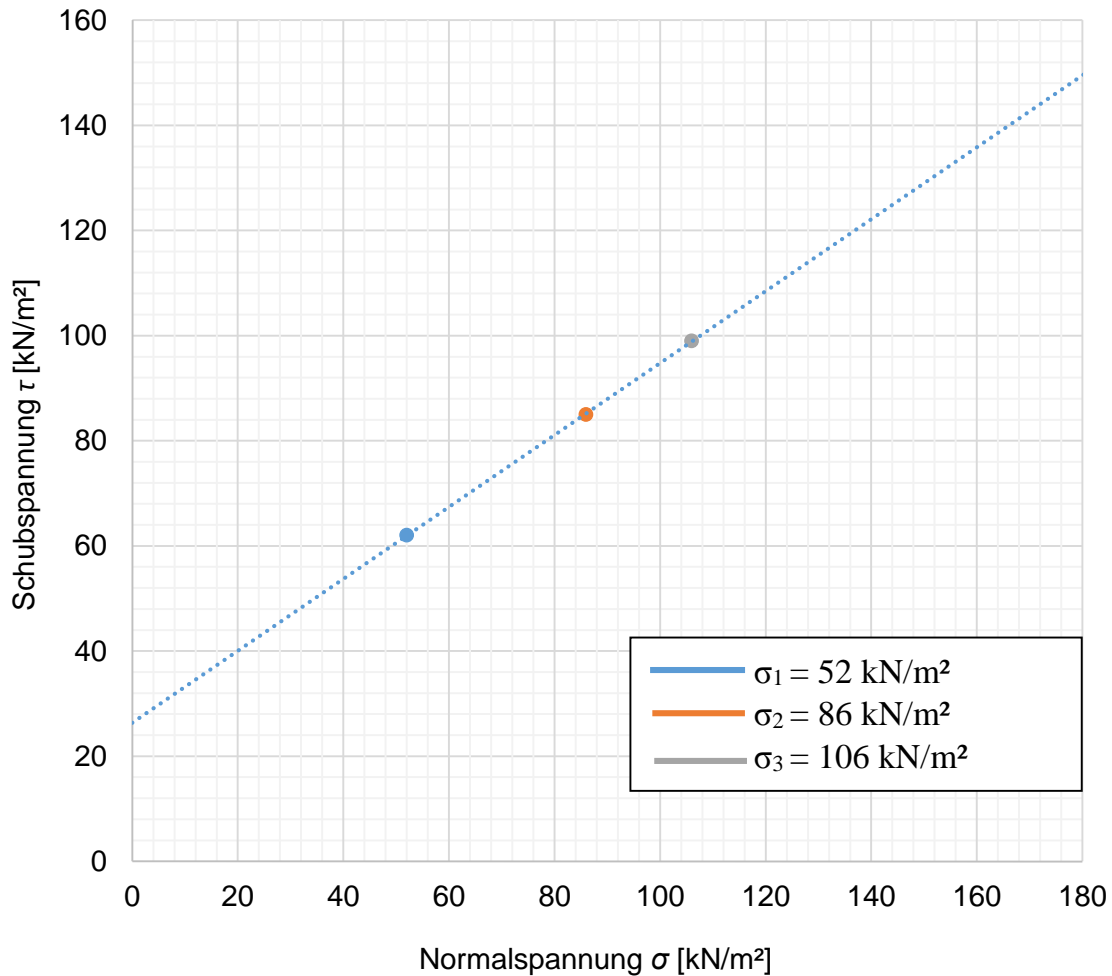


Abb. 87: Schergerade für das Material 2 - sa' si Gr (GK 2 mm) bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 2. Kleinrahmenscher- Vergleichsversuch

A.3.2.3 Kl. M2/ $D_{pr} = 92\%$ - V3

Tab. 61: Ergebnisse für Material 2 - sa' si Gr (GK 2 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 3. Kleinrahmenscher- Vergleichsversuch

Bodenart	sa' si Gr (GK 2 mm)		
Versuchsbeschreibung	Kleinrahmenschergerät 3. Vergleichsversuch – $D_{pr} = 92\%$		
Scherboxabmessung [mm]	$h: 27$	$d: 80$	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	54	94	106
Max. Schubspannung [kN/m ²]	67	88	107
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	1,81	1,81	1,81
92 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,67	1,67	1,67
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,67	1,67	1,67
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,66	1,67	1,65
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,15	0,26	0,22
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-0,74	-0,04	-0,96
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	15,5		

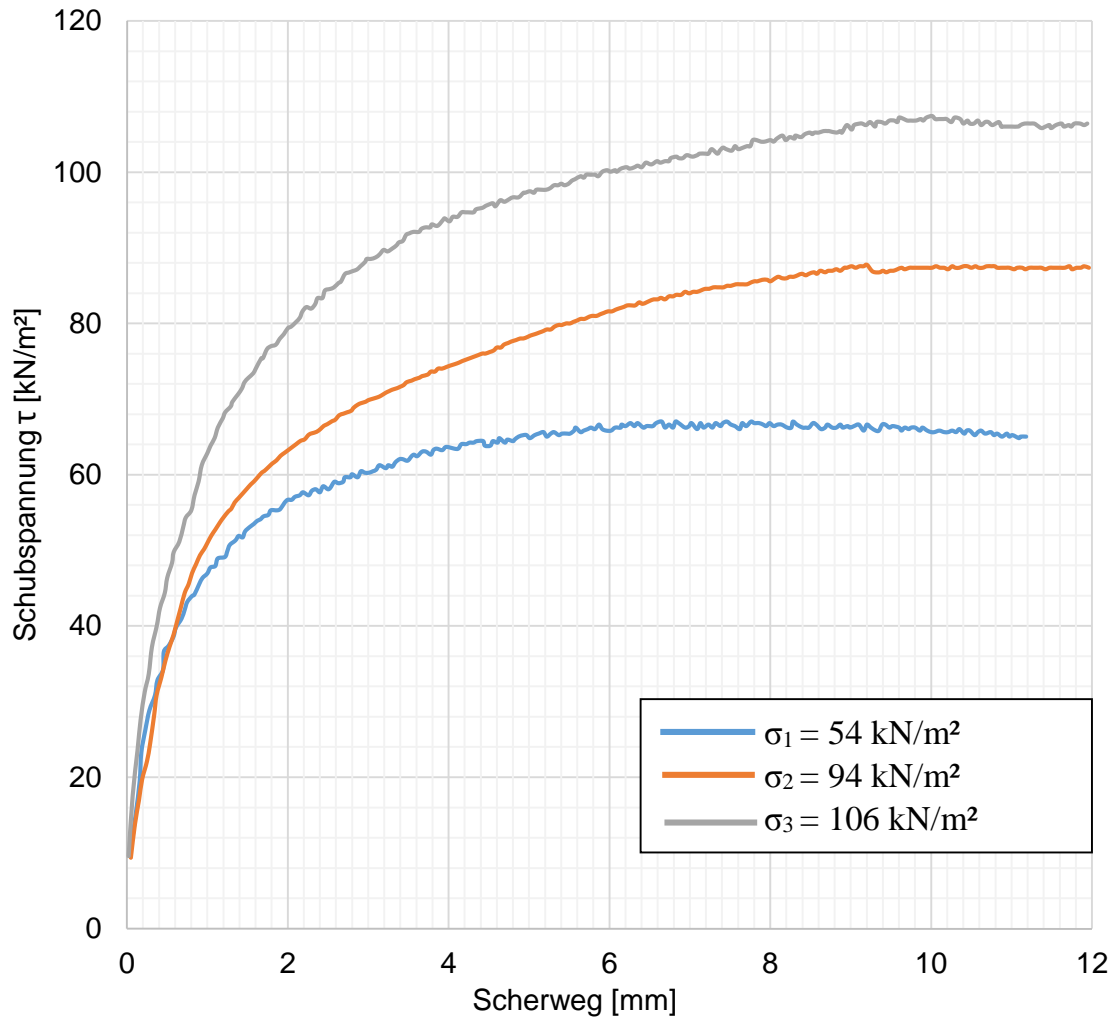


Abb. 88: Scherwegdiagramm für Material 2 - sa' si Gr (GK 2 mm), 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 3. Kleinrahmenscher- Vergleichsversuch

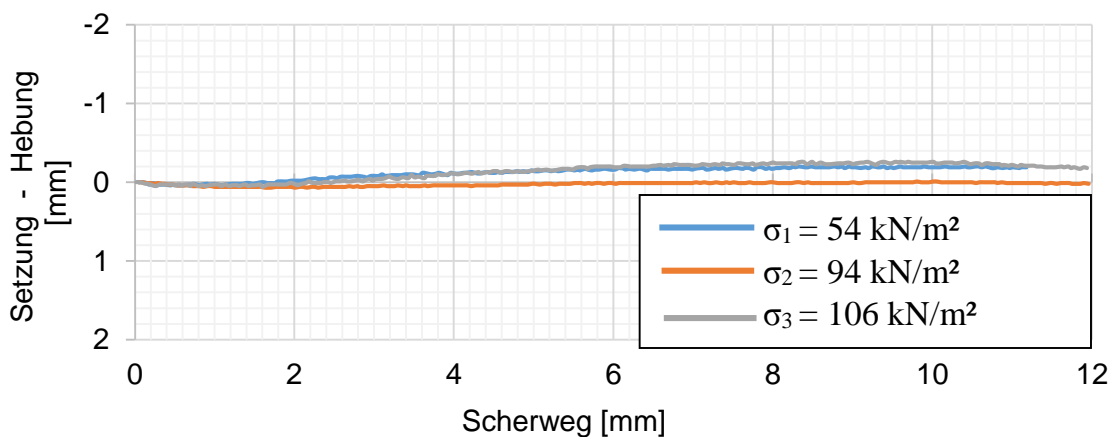


Abb. 89: Scherweg-Setzungsdiagramm für Material 2 (GK 2 mm), 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 3. Kleinrahmenscher- Vergleichsversuch

Tab. 62: Scherparameter für Material 2 - sa' si Gr (GK 2 mm), bei 92 % Proctor-dichte ($D_{Pr} = 92\%$), 3. Kleinrahmenscher- Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	35,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	27,0

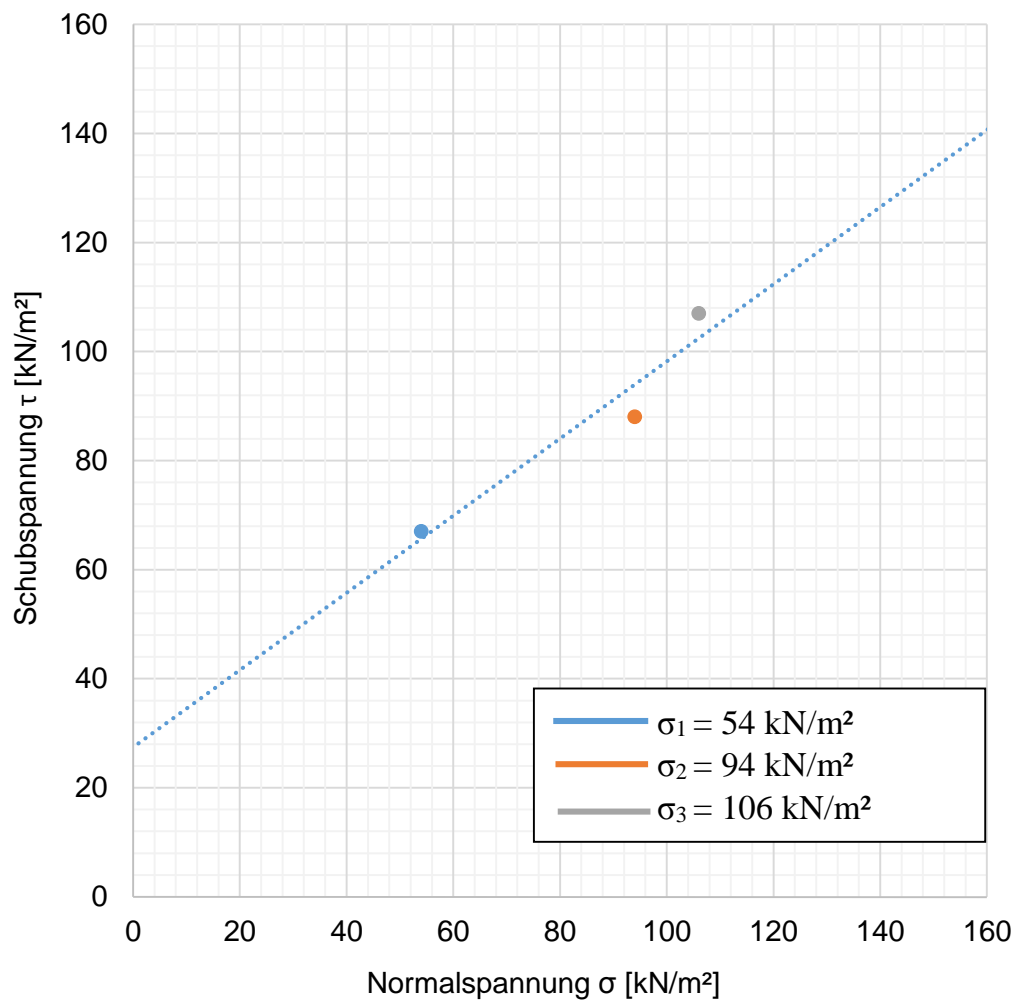


Abb. 90: Schergerade für Material 2 sa' si Gr (GK 2 mm) bei 92 % Proc-tordichte ($D_{Pr} = 92\%$), 3. Kleinrahmenscher- Vergleichsversuch

Anhang B

B.1 Großrahmenschergerät (Gr.) Kalibrierversuche

B.1.1 Gr. M1 / $D_{pr} = 97\%$ / GK 2 mm

B.1.1.1 Gr. M1 / $D_{pr} = 97\%$ - V1 (Kalibrier)

Tab. 63: Ergebnisse für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 1. Großrahmenscher- Kalibrierversuch

Bodenart	si' sa Gr (GK 2 mm)		
Versuchsbeschreibung	Großrahmenschergerät, 1. Kalibrierversuch – $D_{pr} = 97\%$		
Scherboxabmessung [mm]	H: 200	A: 300 x 300	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	100	200	300
Max. Schubspannung [kN/m ²]	109	172	265
Proctordichte (ρ_{Pr}) [Mg/m ³]	1,79	1,79	1,79
97 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,74	1,74	1,74
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,75	1,76	1,76
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,73	1,74	1,75
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,47	0,97	0,88
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	0,29	0,29	0,43
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	6,6		

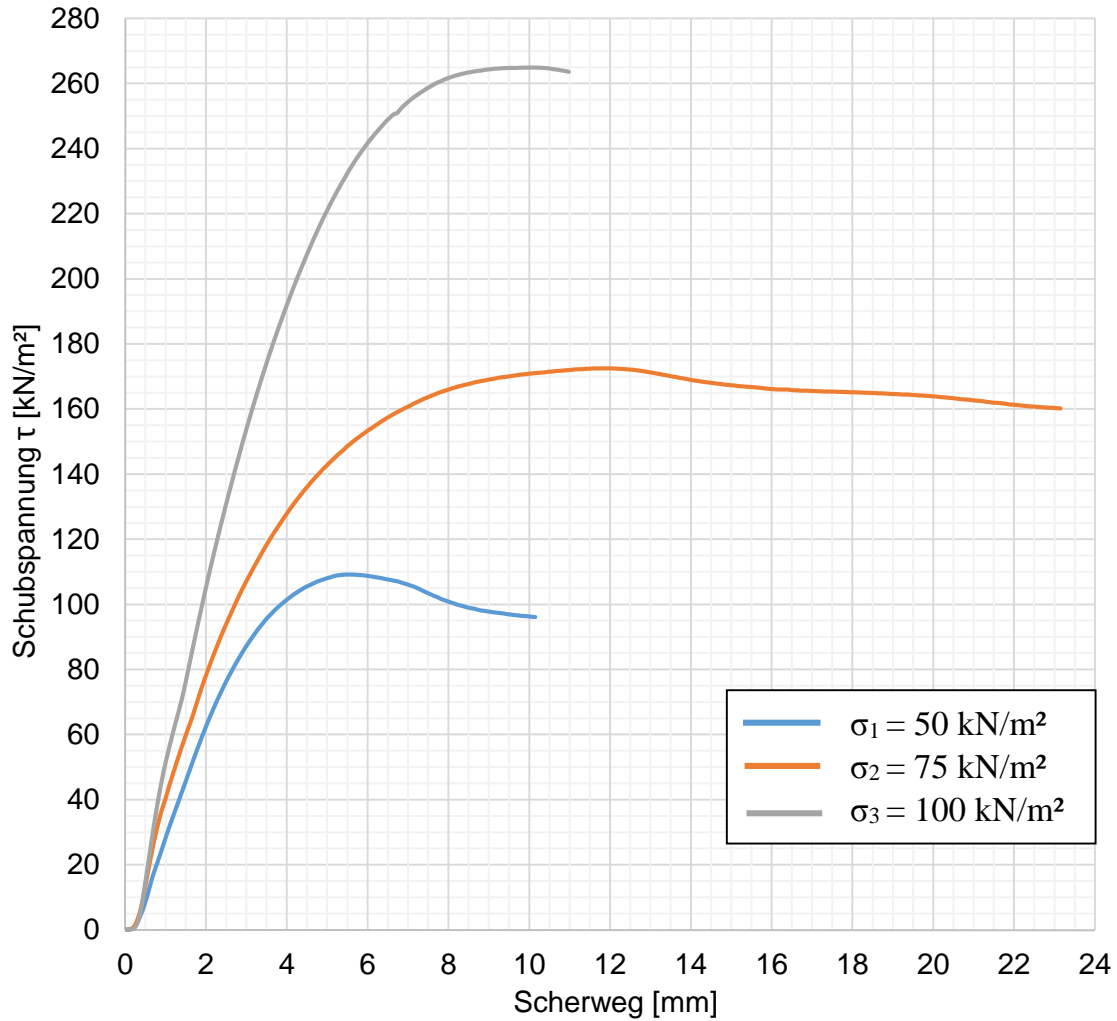


Abb. 91: Scherwegdiagramm für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 1. Großrahmenscher- Kalibrierversuch

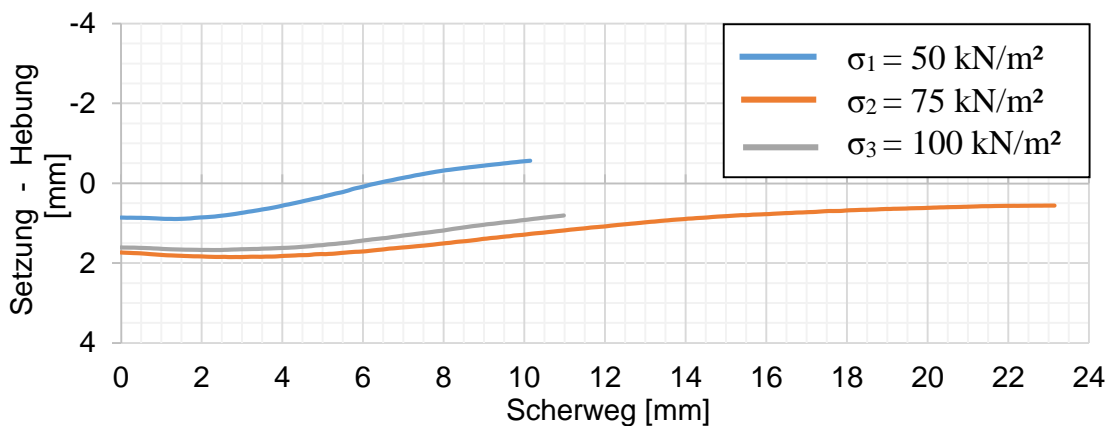


Abb. 92: Scherweg- Setzungsdiagramm für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 1. Großrahmenscher- Kalibrierversuch

Tab. 64: Scherparameter für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 1. Großrahmenscher- Kalibrierversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	38,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	26,0

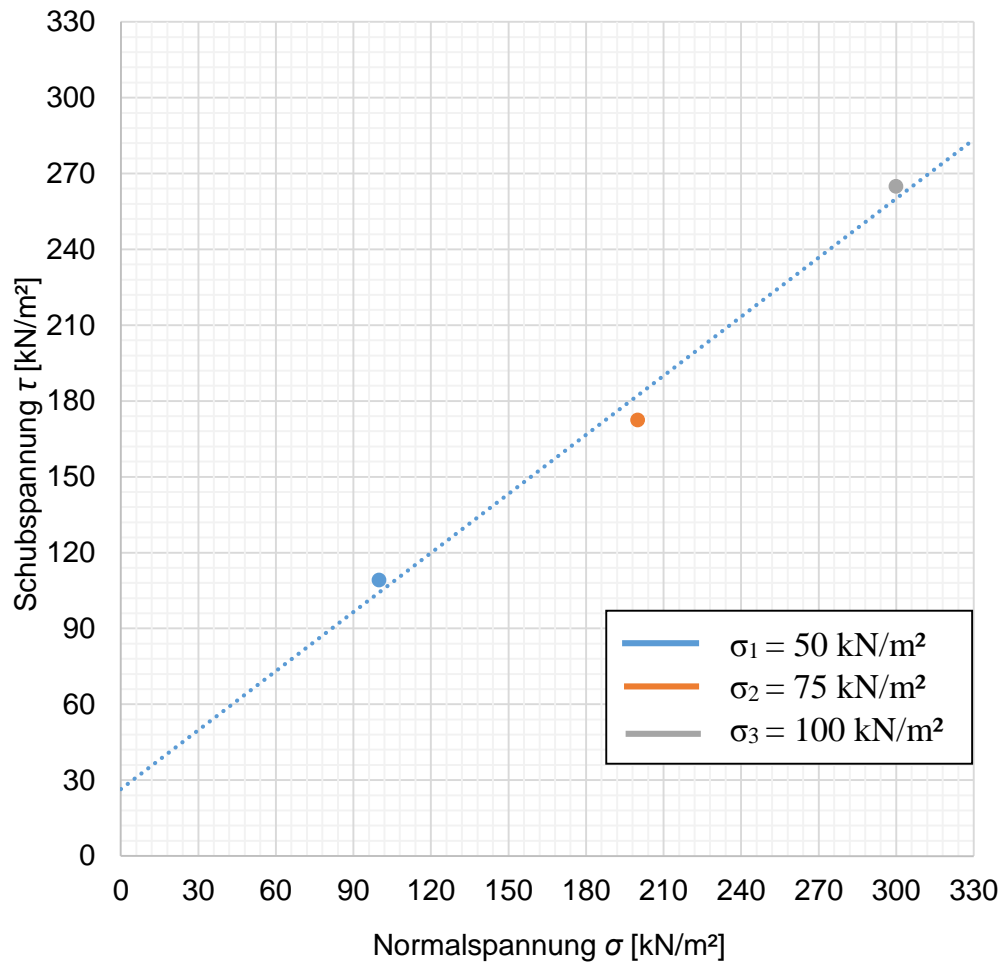


Abb. 93: Auswertung der Scherversuche für Material 1 (GK 2 mm) bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 1. Großrahmenscher- Kalibrierversuch

B.1.1.2 Gr. M1 / $D_{pr} = 97\%$ - V2 (Kalibrier)

Tab. 65: Ergebnisse für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 2. Großrahmenscher- Kalibrierversuch

Bodenart	si' sa Gr GK 2 mm		
Versuchsbeschreibung	Großrahmenscherversuch, 2. Kalibrierversuch - $D_{pr} = 97\%$		
Scherboxabmessung [mm]	H: 200	A: 300 x 300	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	100	200	300
Max. Schubspannung [kN/m ²]	98	158	242
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	1,79	1,79	1,79
97 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,74	1,74	1,74
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,75	1,76	1,76
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,74	1,75	1,75
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,56	0,92	0,92
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	0,06	0,58	0,44
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	6,6		

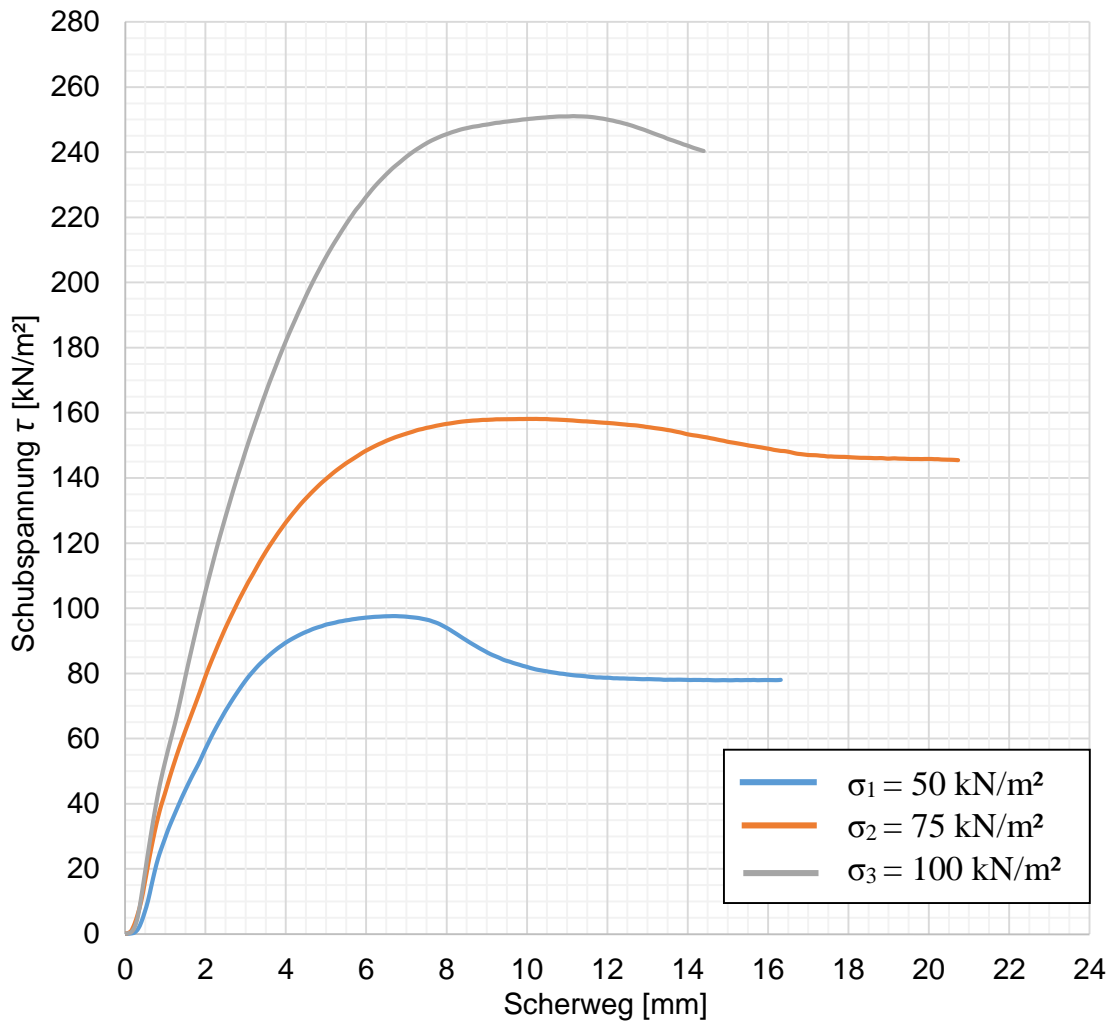


Abb. 94: Scherwegdiagramm für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 2. Großrahmenscher- Kalibrierversuch

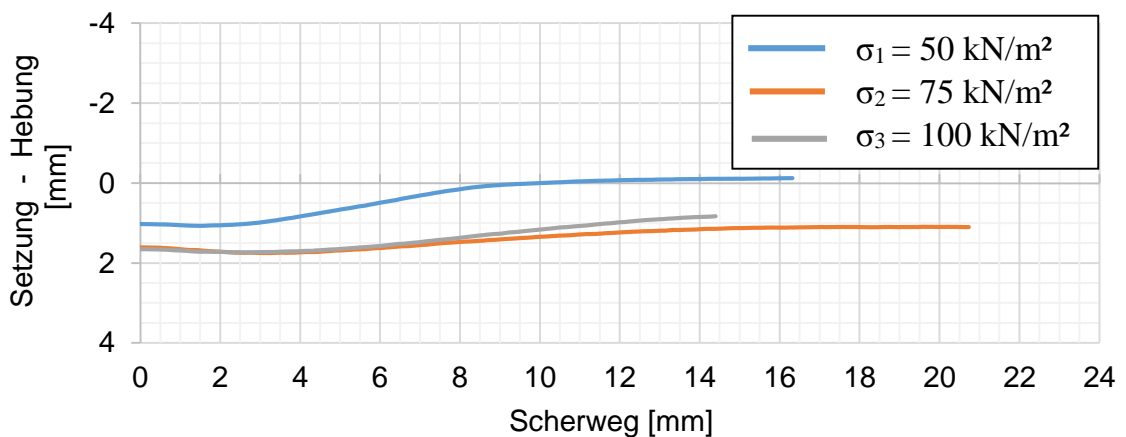


Abb. 95: Scherweg-Setzungsdiagramm für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 2. Großrahmenscher- Kalibrierversuch

Tab. 66: Scherparameter für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 2. Großrahmenscher- Kalibrierversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	38,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	15,0

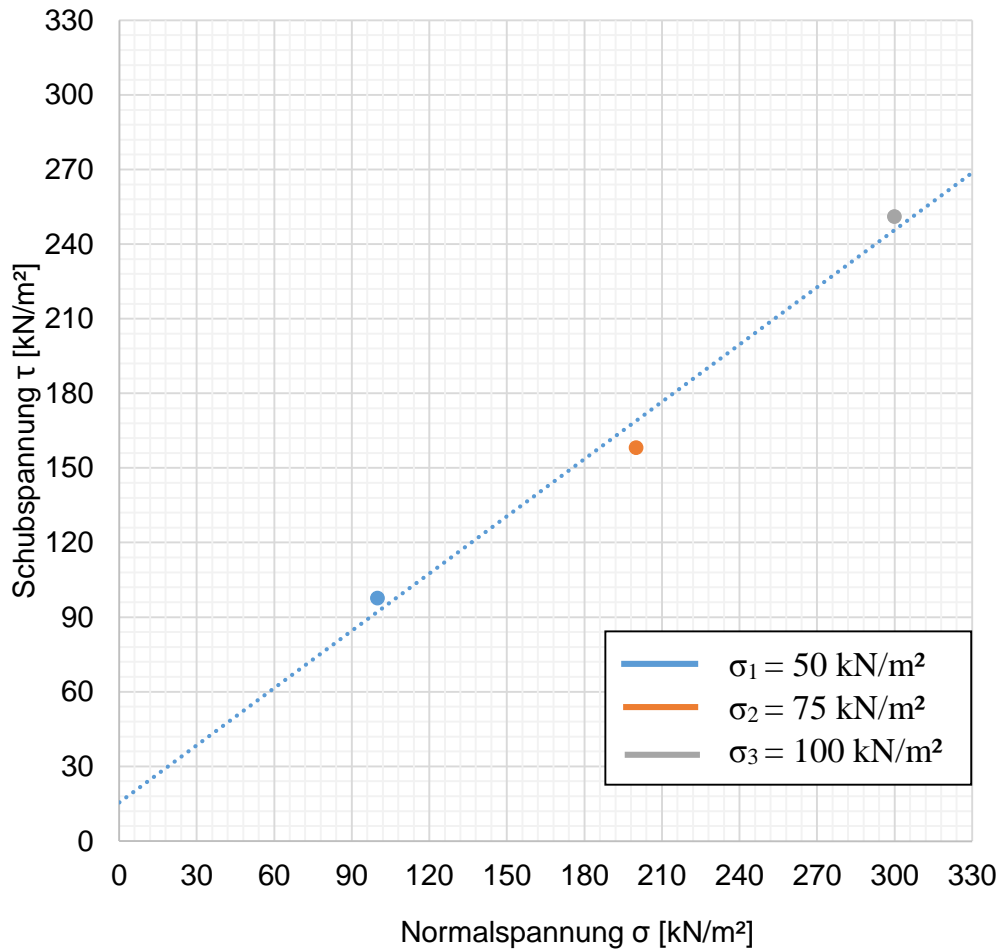


Abb. 96: Schergerade für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm) bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 2. Großrahmenscher- Kalibrierversuch

B.1.1.3 Gr. M1 / $D_{pr} = 97\%$ - V3 (Kalibrier)

Tab. 67: Ergebnisse für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 3. Großrahmenscher- Kalibrierversuch

Bodenart	si' sa Gr GK 2 mm		
Versuchsbeschreibung	Großrahmenschergerät, 3. Kalibrierversuch - $D_{pr} = 97\%$		
Scherboxabmessung [mm]	H: 200	A: 300	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	100	200	300
Max. Schubspannung [kN/m ²]	97	169	259
Proctordichte (ρ_{Pr}) [Mg/m ³]	1,79	1,79	1,79
97 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,74	1,74	1,74
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,75	1,77	1,77
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,74	1,76	1,75
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,54	1,49	1,57
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	0,01	0,96	0,78
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	6,6		

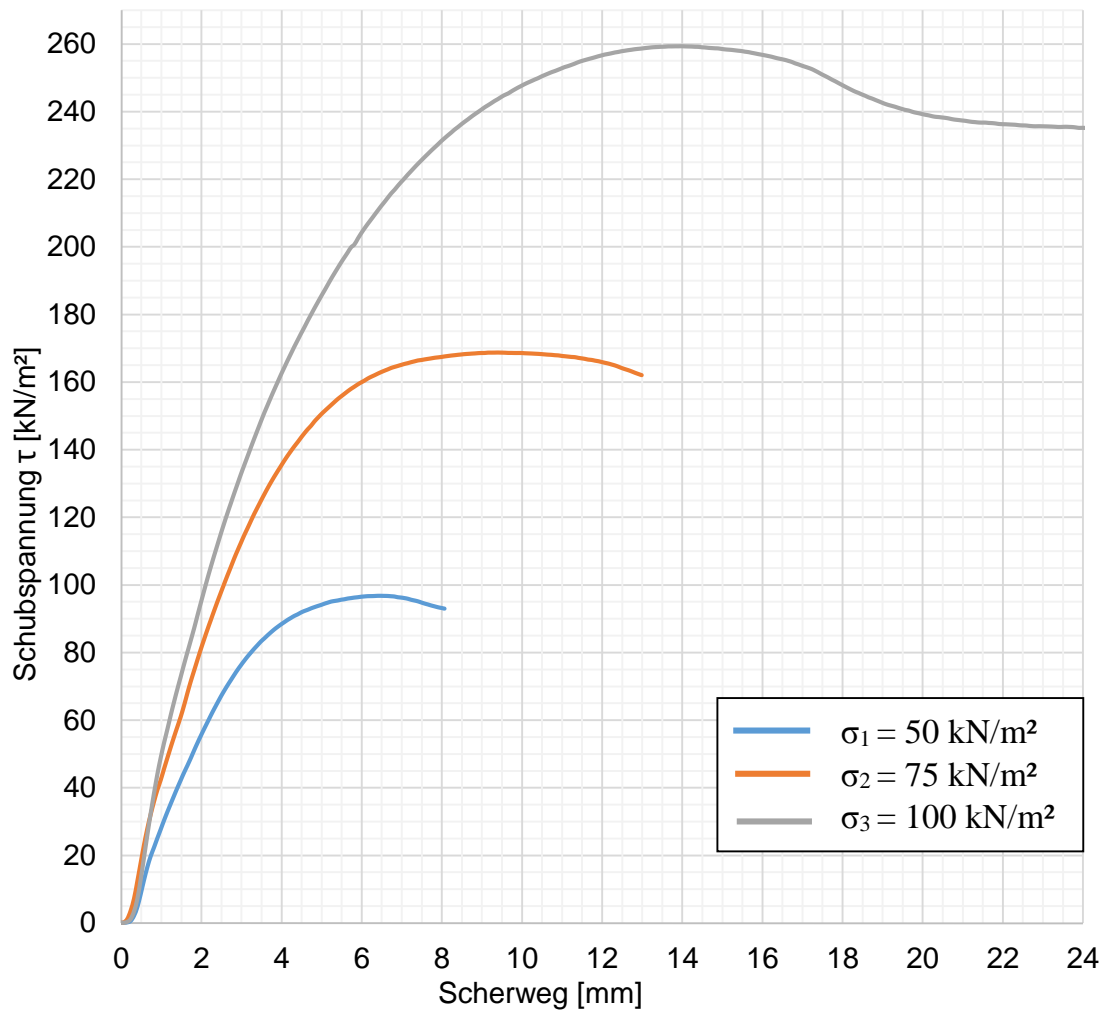


Abb. 97: Scherwegdiagramm für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 3. Großrahmenscher- Kalibrierversuch

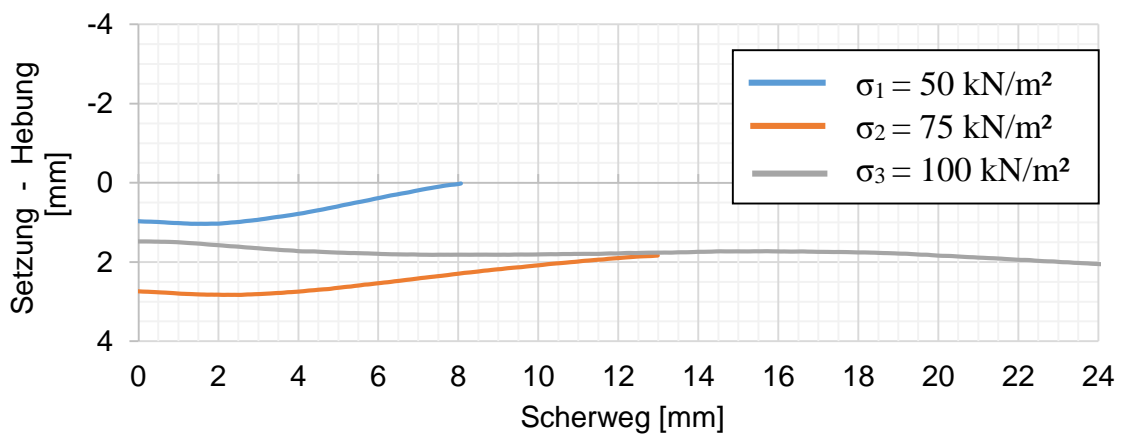


Abb. 98: Scherweg-Setzungsdiagramm für Material 1 (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 3. Großrahmenscher- Kalibrierversuch

Tab. 68: Scherparameter für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 3. Großrahmenscher- Kalibrierversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	39,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	12,0

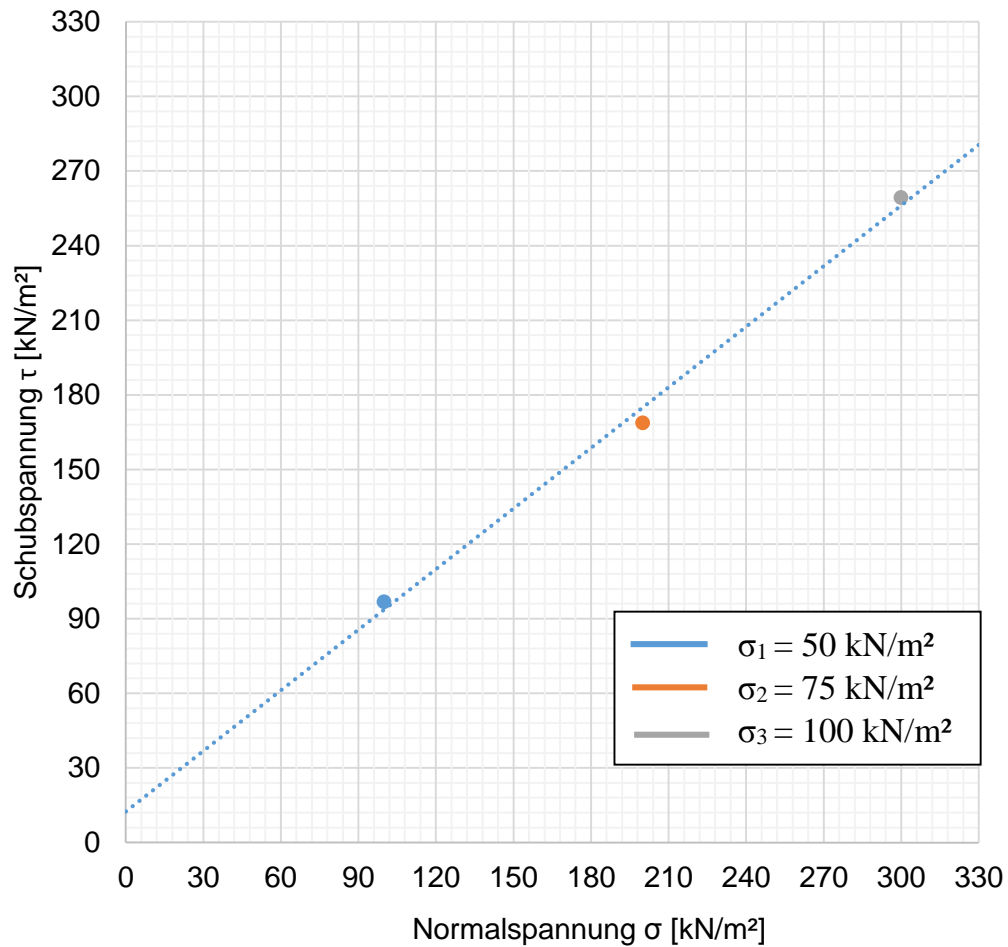


Abb. 99: Schergerade für Material 1 - si' sa Gr (GK 2 mm) bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 3. Großrahmenscher- Kalibrierversuch

B.2 Großrahmenschergerät Vergleichsversuche M1

B.2.1 Gr. M1 / $D_{pr} = 92 \%$ / GK 31,5 mm

B.2.1.1 Gr. M1 / $D_{pr} = 92 \%$ - V1

Tab. 69: Ergebnisse für Material 1 - si' sa Gr (GK 31,5 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 1. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Bodenart	Material 1 - si' sa Gr (GK 31,5 mm)		
Versuchsbeschreibung	Großrahmenschergerät 1. Vergleichsversuch - $D_{pr} = 92 \%$		
Scherboxabmessung [mm]	H: 190	A: 300 x 300	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	50	75	100
Max. Schubspannung [kN/m ²]	56	83	103
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	2,11		
92 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,94		
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,95	1,95	1,96
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,94	1,92	1,94
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,73	0,63	0,97
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-0,08	-0,82	-0,16
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	5,5		

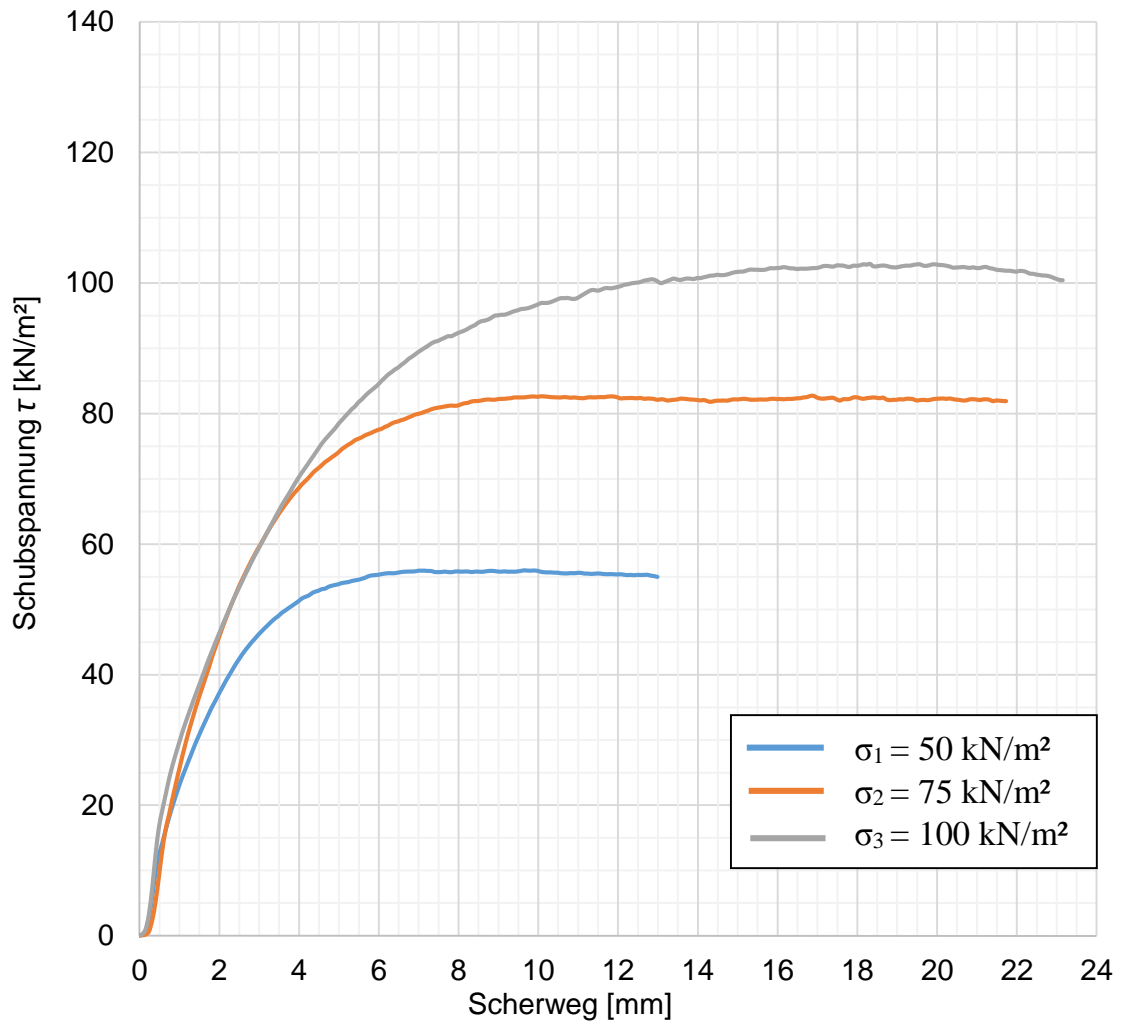


Abb. 100: Scherwegdiagramm für Material 1 (GK 31,5 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 1. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

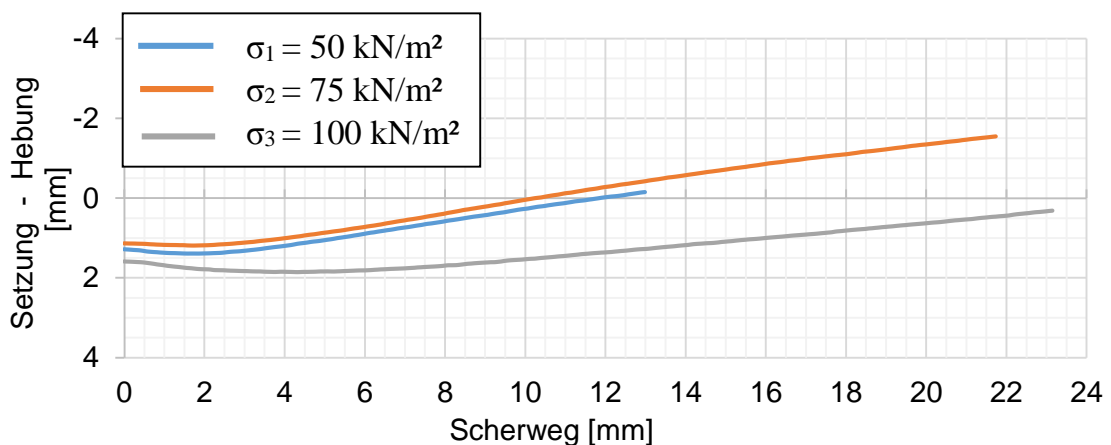


Abb. 101: Scherweg-Setzungsdiagramm für Material 1 (GK 31,5 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 1. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Tab. 70: Scherparameter für Material 1 (GK 31,5 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 1. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	43,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	10,0

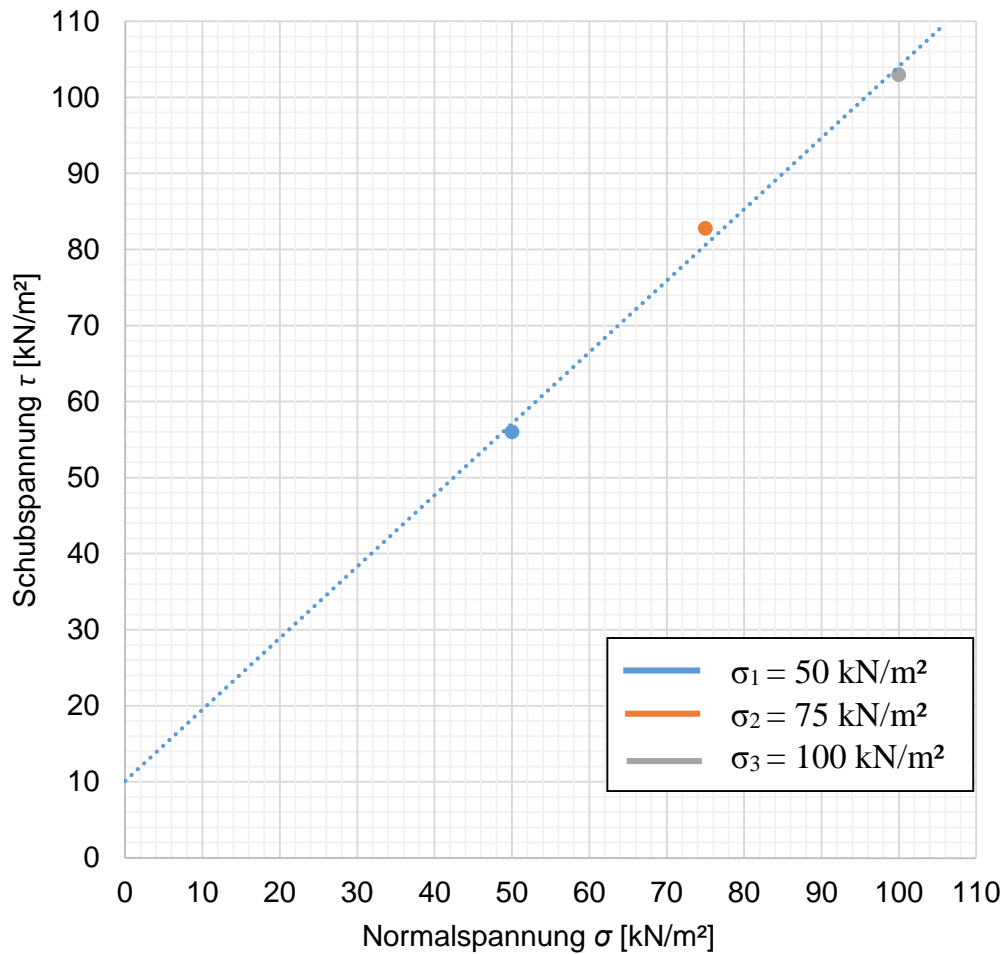


Abb. 102: Schergerade für Material 1 - si' sa Gr (GK 31,5 mm) bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 1. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

B.2.1.2 Gr. M1 / $D_{pr} = 92\%$ - V2

Tab. 71: Ergebnisse für Material 1 - si' sa Gr (GK 31,5 mm), 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 2. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Bodenart	Material 1 - si' sa Gr (GK 31,5 mm)		
Versuchsbeschreibung	Großrahmenschergerät 2. Vergleichsversuch - $D_{pr} = 92\%$		
Scherboxabmessung [mm]	H: 190	A: 300 x 300	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	50	75	100
Max. Schubspannung [kN/m ²]	58	85	104
Proctordichte (ρ_{Pr}) [Mg/m ³]	2,11		
92 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,94		
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,95	1,96	1,95
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,92	1,93	1,93
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,44	0,79	0,66
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-0,86	-0,54	-0,54
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	5,5		

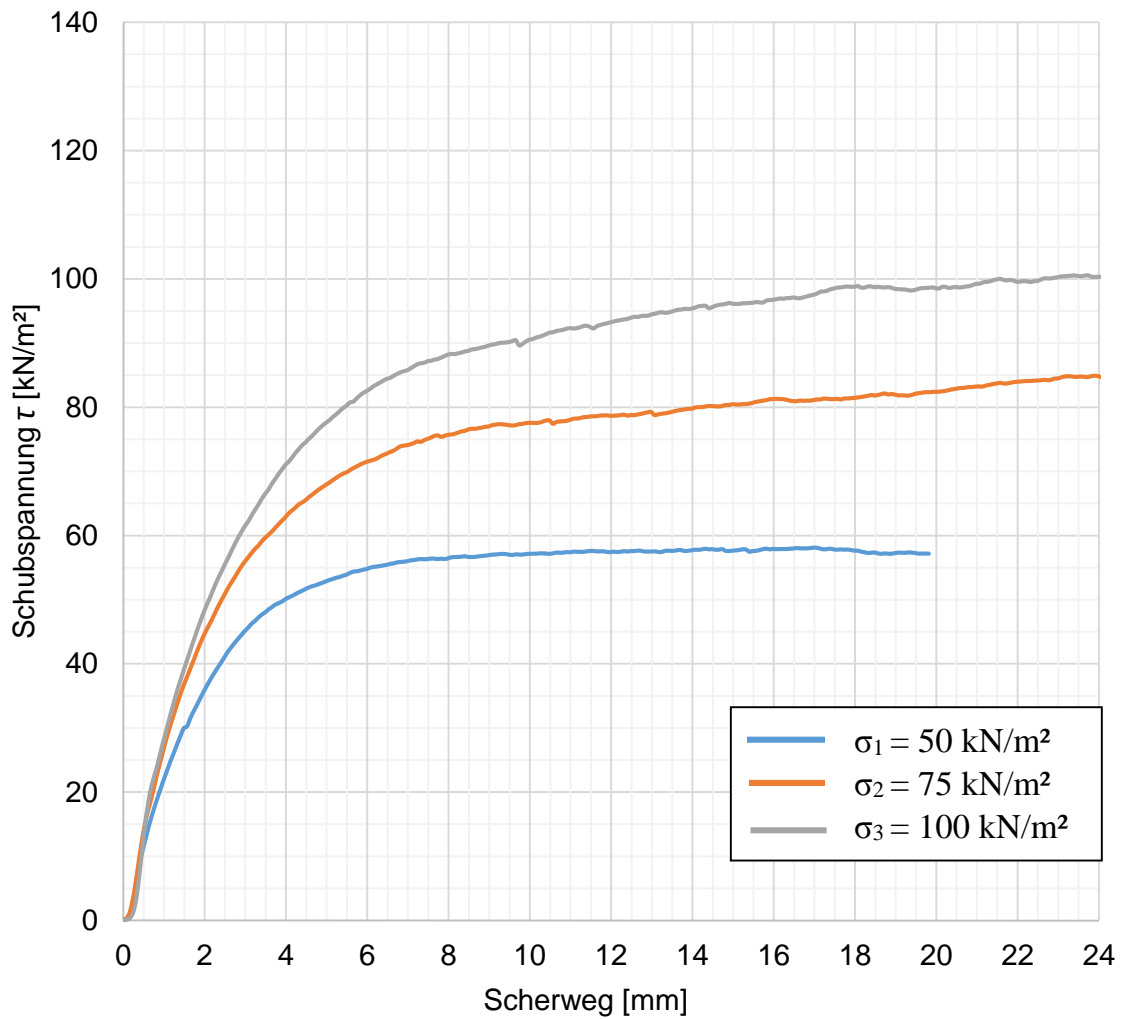


Abb. 103: Scherwegdiagramm für Material 1 (GK 31,5 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 2. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

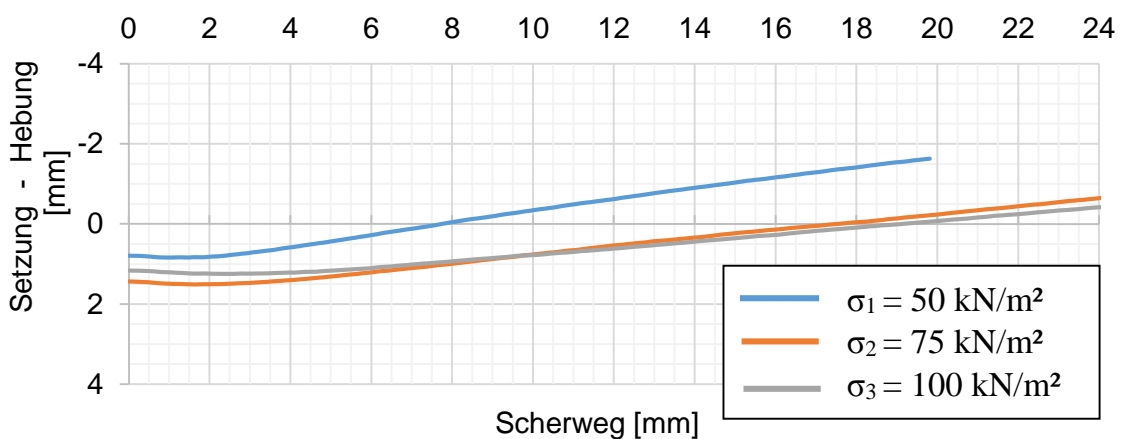


Abb. 104: Scherweg-Setzungsdiagramm für Material 1 – si' sa Gr (GK 31,5 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 2. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Tab. 72: Scherparameter für Material 1 (GK 31,5 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 2. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	43,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	13,0

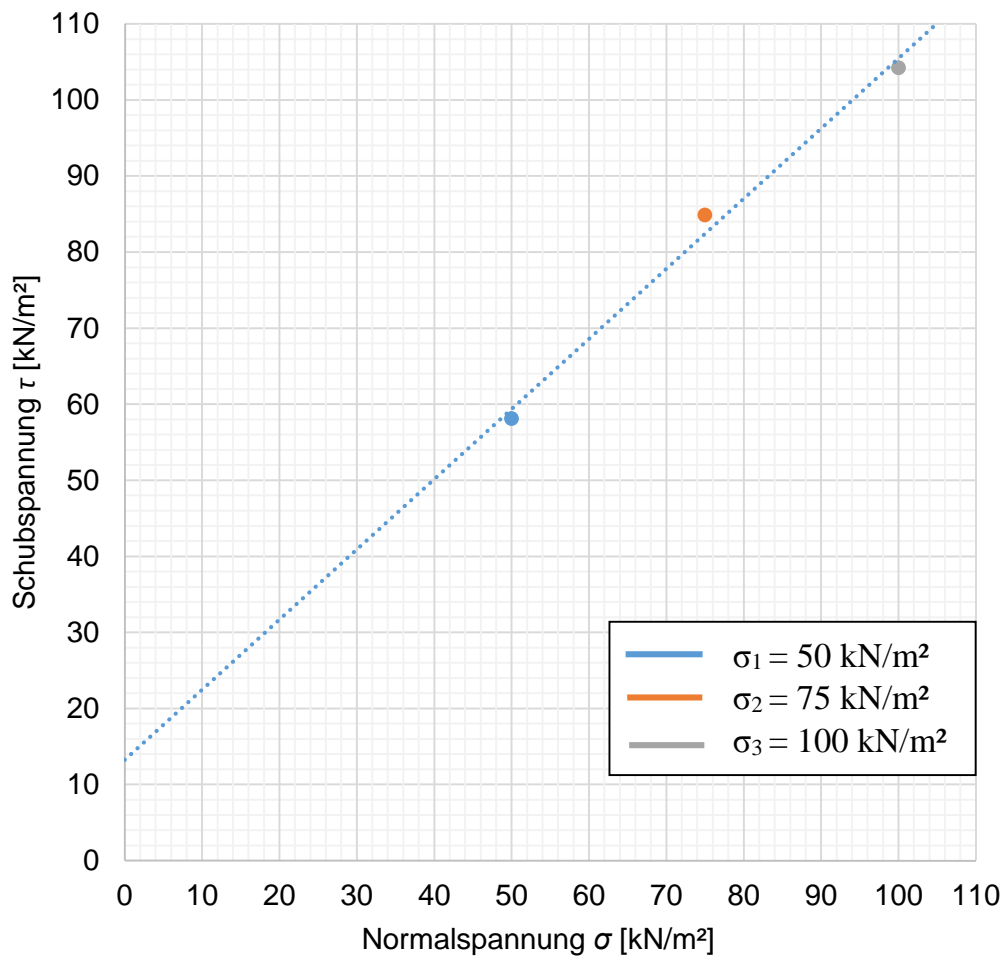


Abb. 105: Schergerade für Material 1 – si' sa Gr (GK 31,5 mm), 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 2. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

B.2.1.3 Gr. M1 / $D_{pr} = 92\%$ - V3

Tab. 73: Ergebnisse für das Material 1 – si' sa Gr (GK 31,5 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 3. Großrahmenscher– Vergleichsversuch

Bodenart	Material 1 - si' sa Gr (GK 31,5 mm)		
Versuchsbeschreibung	Großrahmenschergerät 3. Vergleichsversuch - $D_{pr} = 92\%$		
Scherboxabmessung [mm]	H: 190	A: 300 x 300	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	50	75	100
Max. Schubspannung [kN/m ²]	54	80	102
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	2,11		
92 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,94		
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,95	1,95	1,95
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,93	1,94	1,93
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,64	0,53	0,54
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-0,29	-0,03	-0,49
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	5,5		

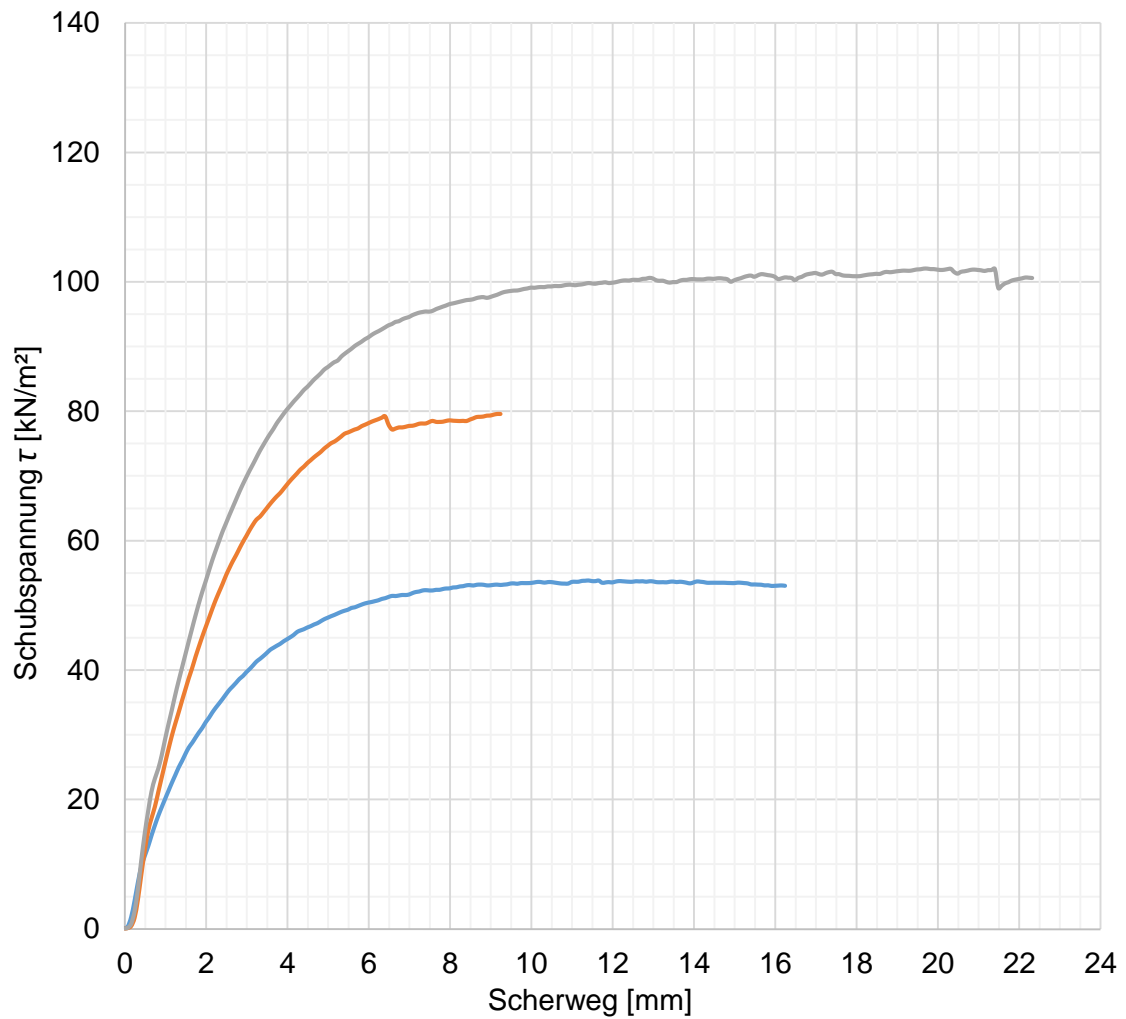


Abb. 106: Schubwegdiagramm für Material 1 (GK 31,5 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 3. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

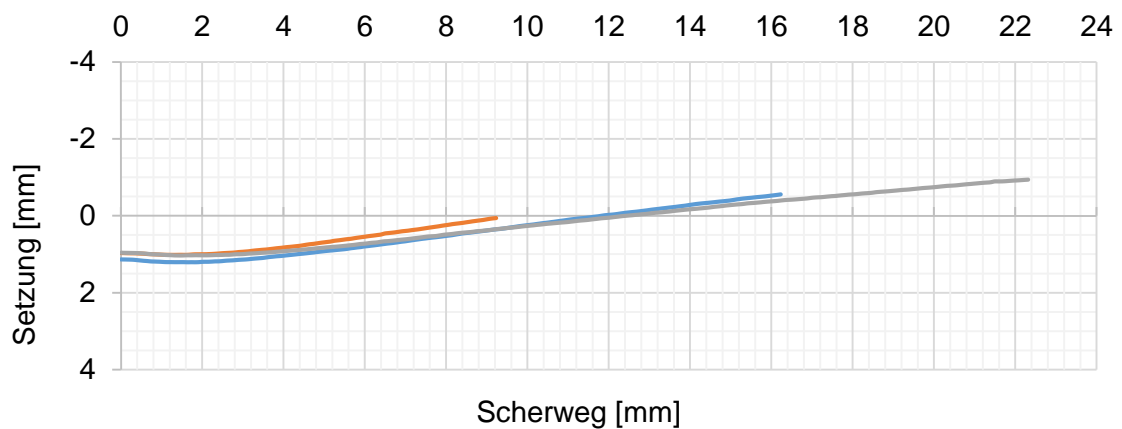


Abb. 107: Schubweg- Setzungsdiagramm für Material 1 – si' sa Gr (GK 31,5 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 3. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Tab. 74: Ergebnisse für Material 1 - si' sa Gr (GK 31,5 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 3. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	44,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	6,0

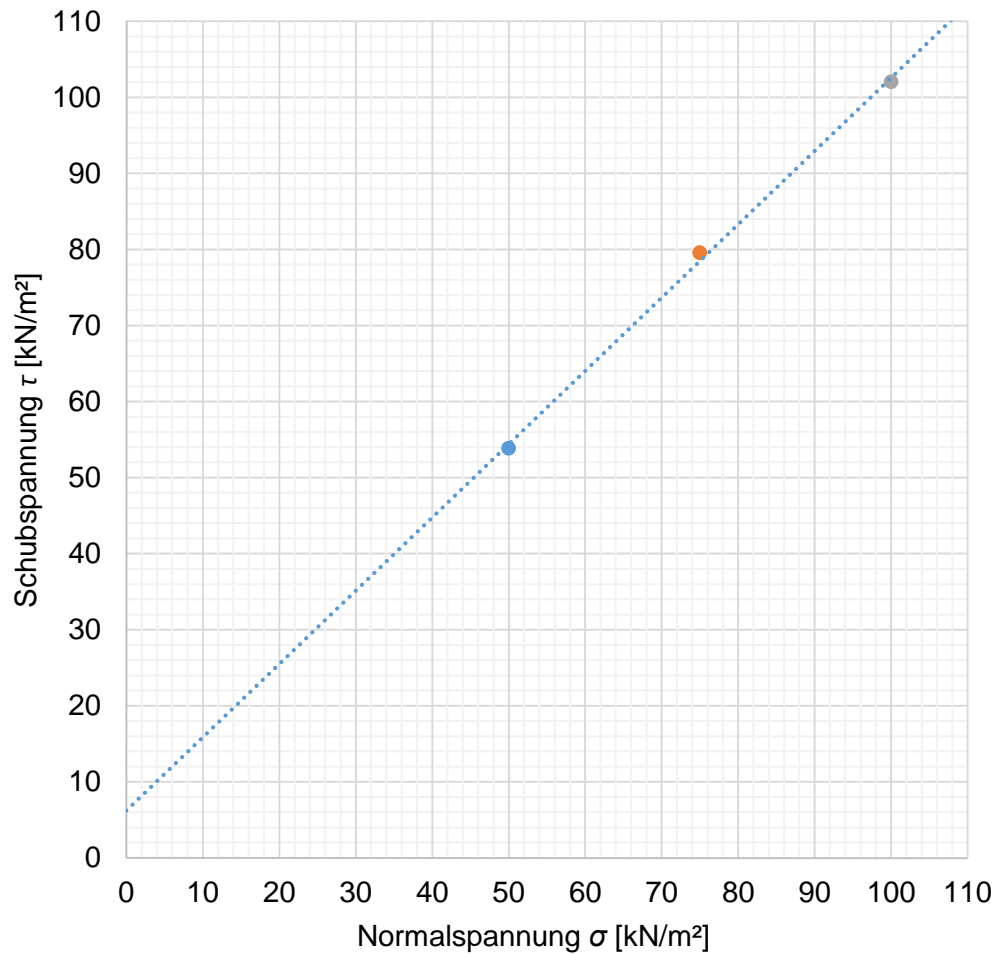


Abb. 108: Schergerade für Material 1 - si' sa Gr (GK 31,5 mm) bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 3. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

B.2.2 Gr. M1 / $D_{pr} = 97 \%$ / GK 31,5 mm

B.2.2.1 Gr. M1 / $D_{pr} = 97 \%$ - V1

Tab. 75: Ergebnisse für Material 1 - si' sa Gr (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 1. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Bodenart	Material 1 - si' sa Gr (GK 31,5 mm)		
Versuchsbeschreibung	Großrahmenschergerät 1. Vergleichsversuch - $D_{pr} = 97 \%$		
Scherboxabmessung [mm]	H: 190	A: 300 x 300	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	50	75	100
Max. Schubspannung [kN/m ²]	73	105	134
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	2,11		
97 % Proctordichte [Mg/m ³]	2,05		
Max. Dichte [Mg/m ³]	2,06	2,06	2,06
Min. Dichte [Mg/m ³]	2,04	2,04	2,03
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,46	0,65	0,67
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-0,62	-0,39	-0,63
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	5,5		

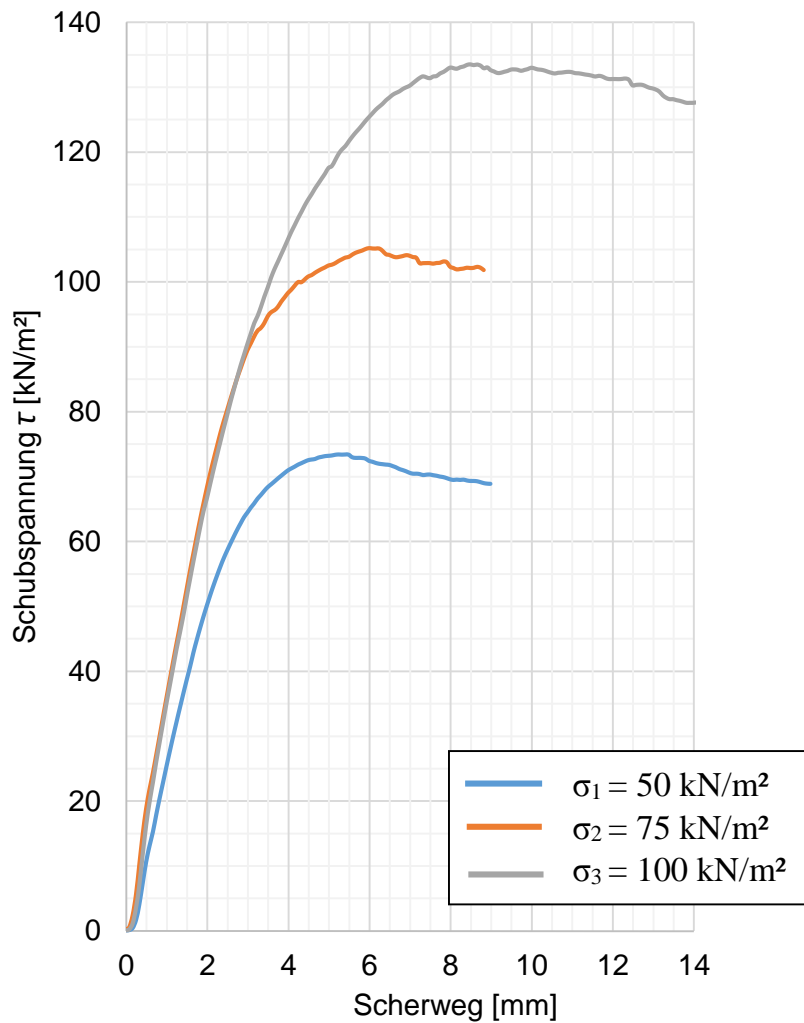


Abb. 109: Scherwegdiagramm für Material 1 (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 1. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

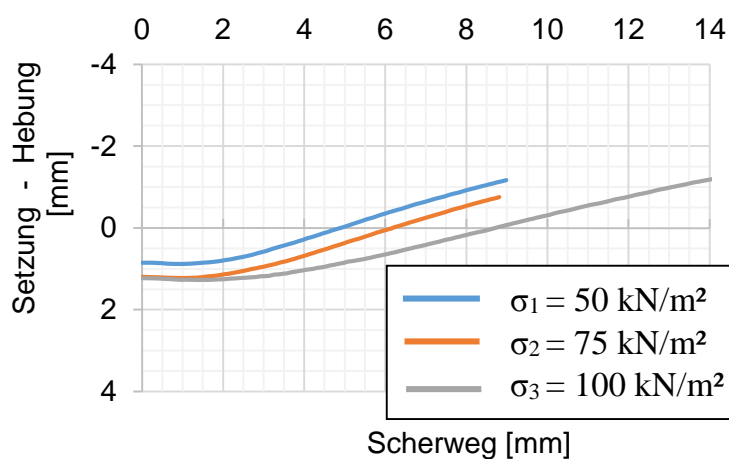


Abb. 110: Scherweg- Setzungsdiagramm für Material 1 (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 1. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Tab. 76: Ergebnisse für Material 1 - si' sa Gr (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 1. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	50,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	14,0

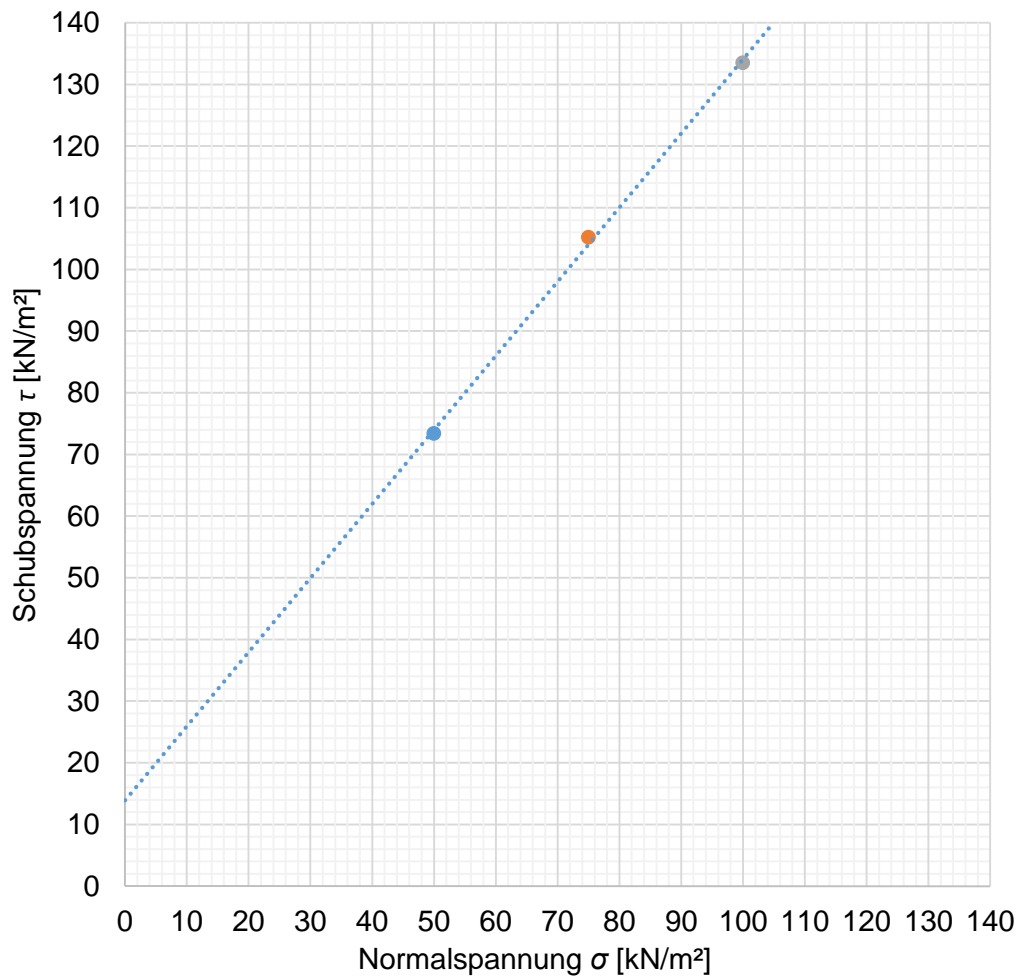


Abb. 111: Schergerade für Material 1 - si' sa Gr (GK 31,5 mm), 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 1. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

B.2.2.2 Gr. M1 / $D_{pr} = 97\%$ - V2

Tab. 77: Ergebnisse für Material 1 - si' sa Gr (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 2. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Bodenart	Material 1 - si' sa Gr (GK 31,5 mm)		
Versuchsbeschreibung	Großrahmenschergerät 2. Vergleichsversuch - $D_{pr} = 97\%$		
Scherboxabmessung [mm]	Höhe: 190	Durchmesser: 300	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	50	75	100
Max. Schubspannung [kN/m ²]	76	106	131
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	2,11		
97 % Proctordichte [Mg/m ³]	2,05		
Max. Dichte [Mg/m ³]	2,07	2,06	2,07
Min. Dichte [Mg/m ³]	2,05	2,03	2,02
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,93	0,55	0,74
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-0,05	-0,84	-0,63
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	5,5		

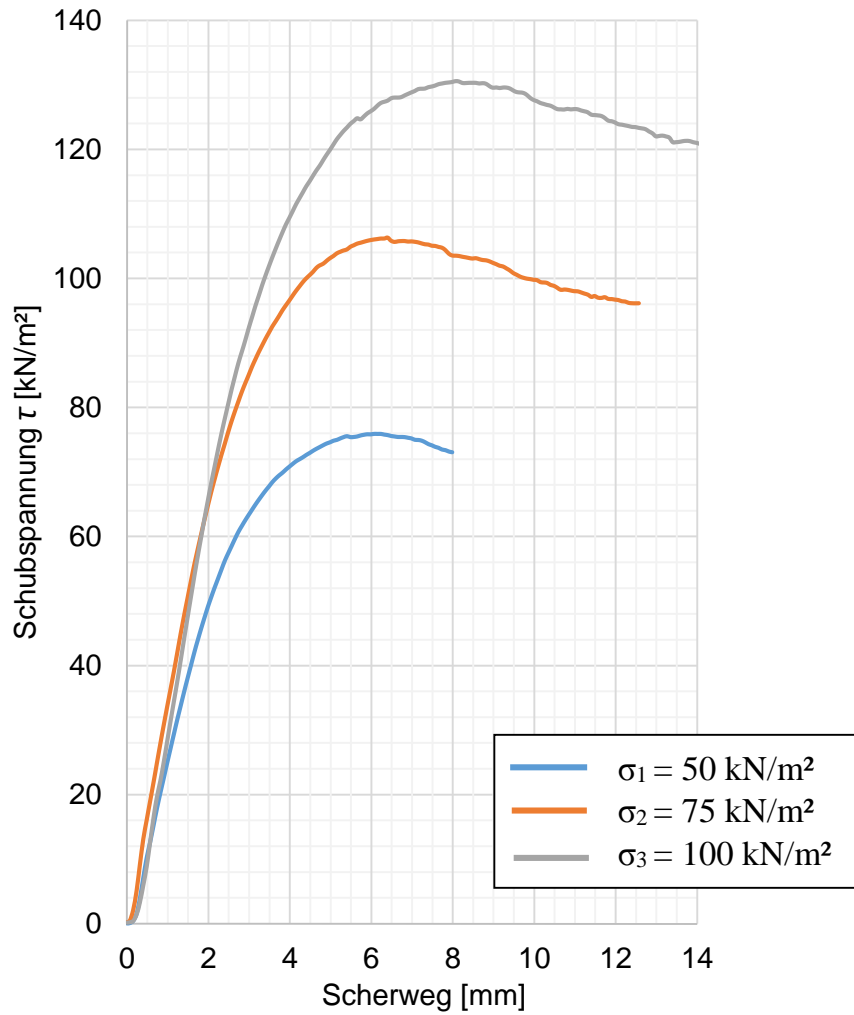


Abb. 112: Scherwegdiagramm für Material 1 - si' sa Gr (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 2. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

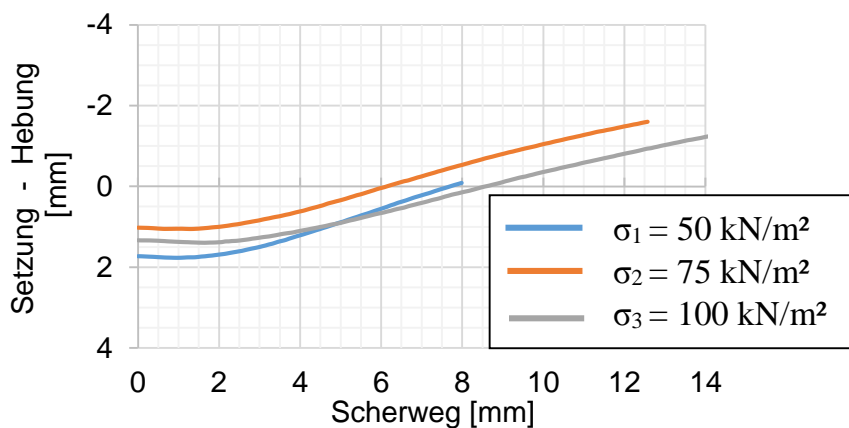


Abb. 113: Scherweg-Setzungsdiagramm für Material 1 - si' sa Gr (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 2. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Tab. 78: Scherparameter für Material 1 - si^c sa Gr (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 2. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	48,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	22,0

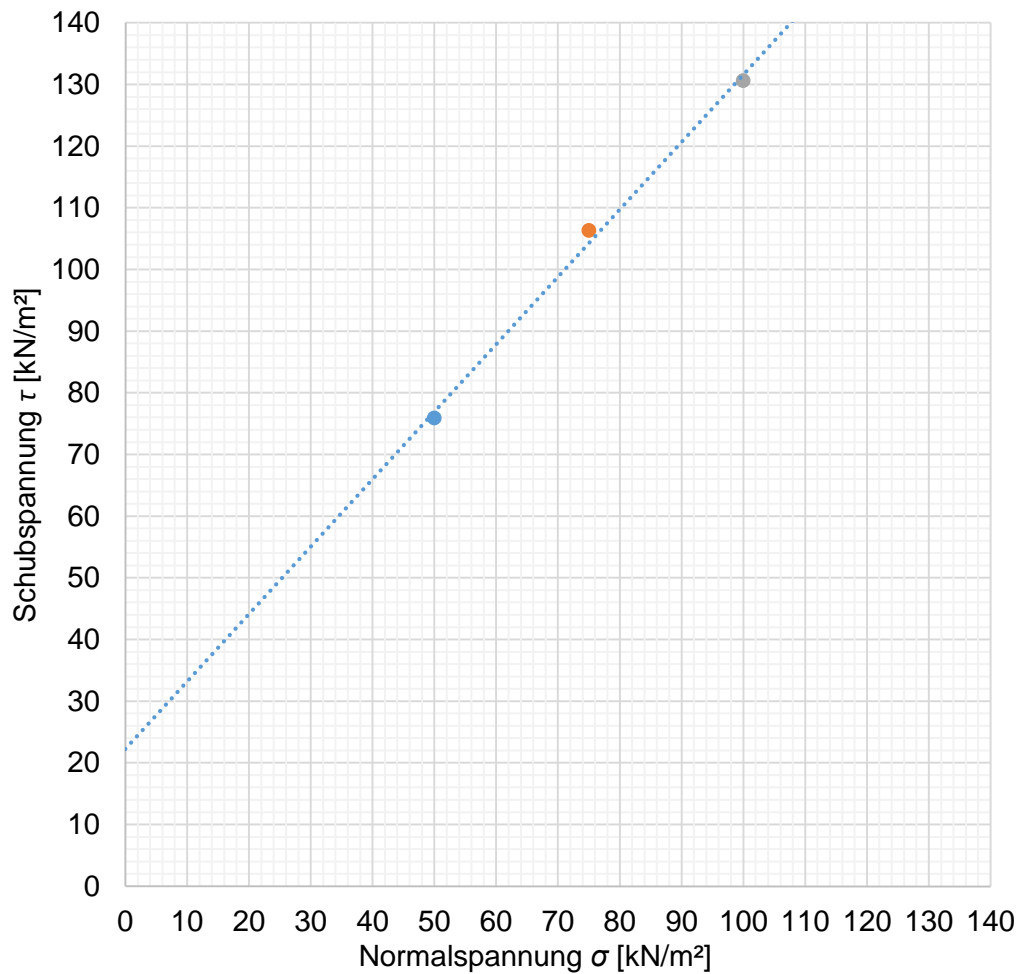


Abb. 114: Schergerade für Material 1 - si^c sa Gr (GK 31,5 mm) bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 2. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

B.2.2.3 Gr. M1 / $D_{pr} = 97\%$ - V3

Tab. 79: Ergebnisse für Material 1 - si' sa Gr (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 3. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Bodenart	Material 1 - si' sa Gr (GK 31,5 mm)		
Versuchsbeschreibung	Großrahmenschergerät 2. Vergleichsversuch - $D_{pr} = 97\%$		
Scherboxabmessung [mm]	H: 190	A: 300 x 300	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	50	75	100
Max. Schubspannung [kN/m ²]	68	97	128
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	2,11		
97 % Proctordichte [Mg/m ³]	2,05		
Max. Dichte [Mg/m ³]	2,06	2,06	2,06
Min. Dichte [Mg/m ³]	2,05	2,03	2,04
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,38	0,63	0,63
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-0,51	-0,75	-0,64
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	5,5		

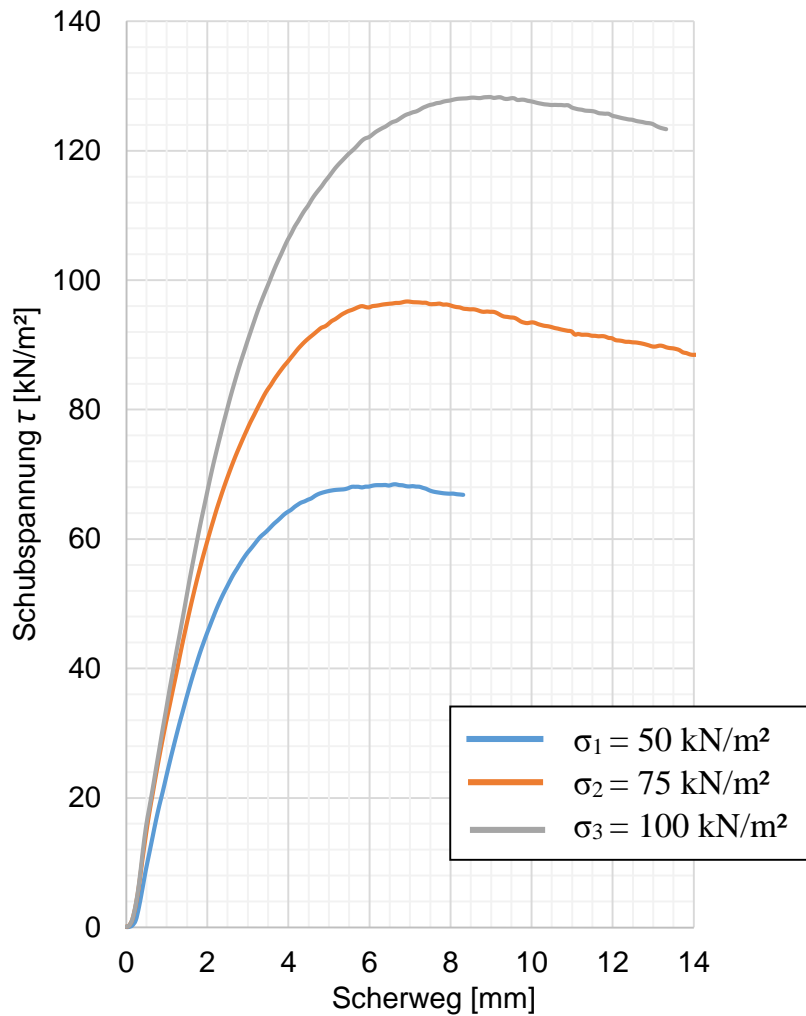


Abb. 115: Schwegdiagramm für Material 1 (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 2. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

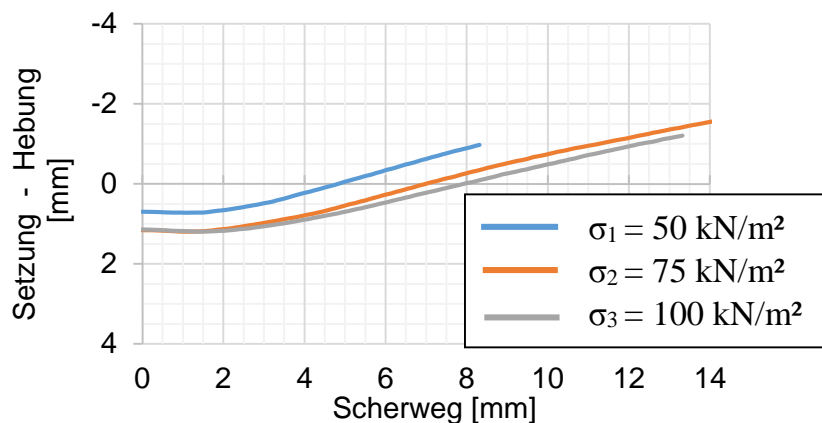


Abb. 116: Schweg-Setzungsdiagramm für Material 1 (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 3. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Tab. 80: Scherparameter für Material 1 (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 3. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	50,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	8,0

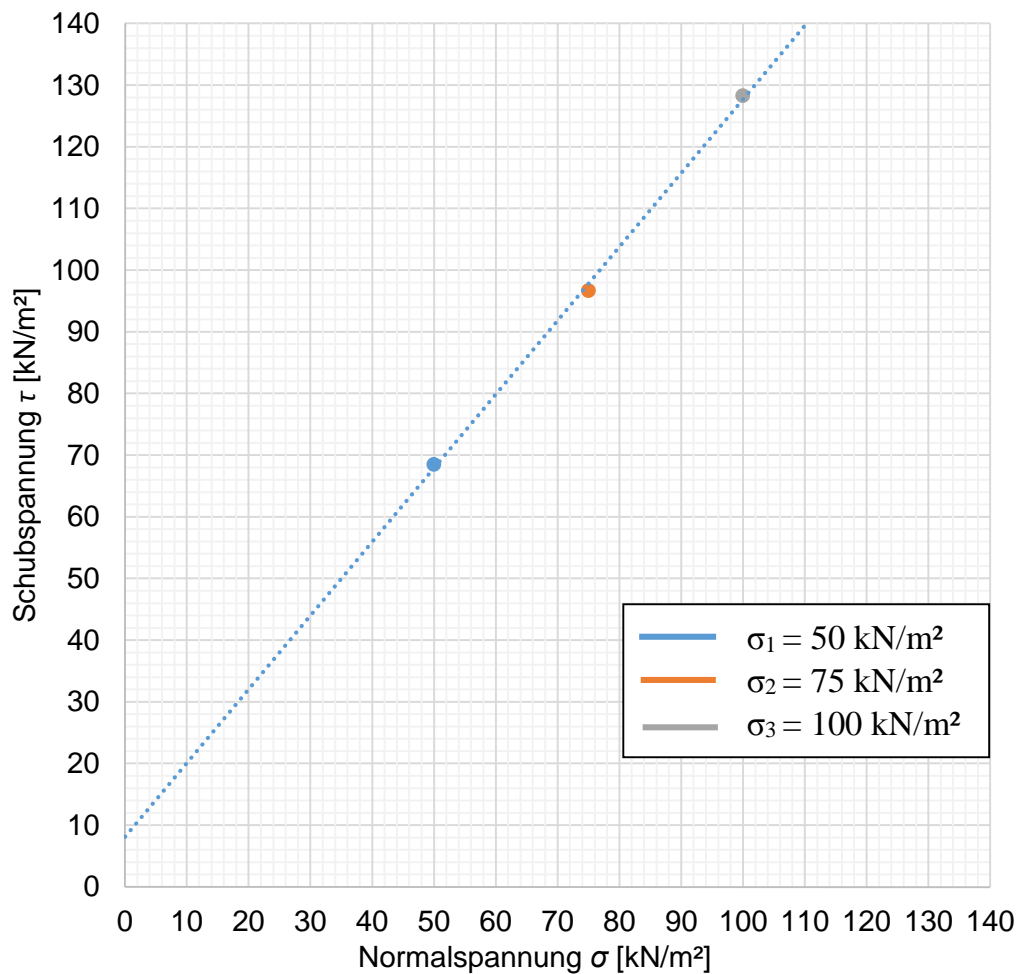


Abb. 117: Schergerade für Material 1 - si' sa Gr (GK 31,5 mm) bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 3. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

B.3 Großrahmenschergerät Vergleichsversuche – M2

B.3.1 Gr. M2 / $D_{pr} = 92 \%$ / GK 31,5 mm

B.3.1.1 Gr. M2 / $D_{pr} = 92 \%$ - V1

Tab. 81: Ergebnisse für Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 1. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Bodenart	Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm)		
Versuchsbeschreibung	Großrahmenschergerät 1. Vergleichsversuch - $D_{pr} = 92 \%$		
Scherboxabmessung [mm]	H: 190	A: 300 x 300	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	50	75	100
Max. Schubspannung [kN/m ²]	58	72	97
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	1,97		
92 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,81		
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,83	1,86	1,87
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,8	1,83	1,83
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	1,07	2,62	3,04
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-0,41	-1,06	-1,12
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	10,7		

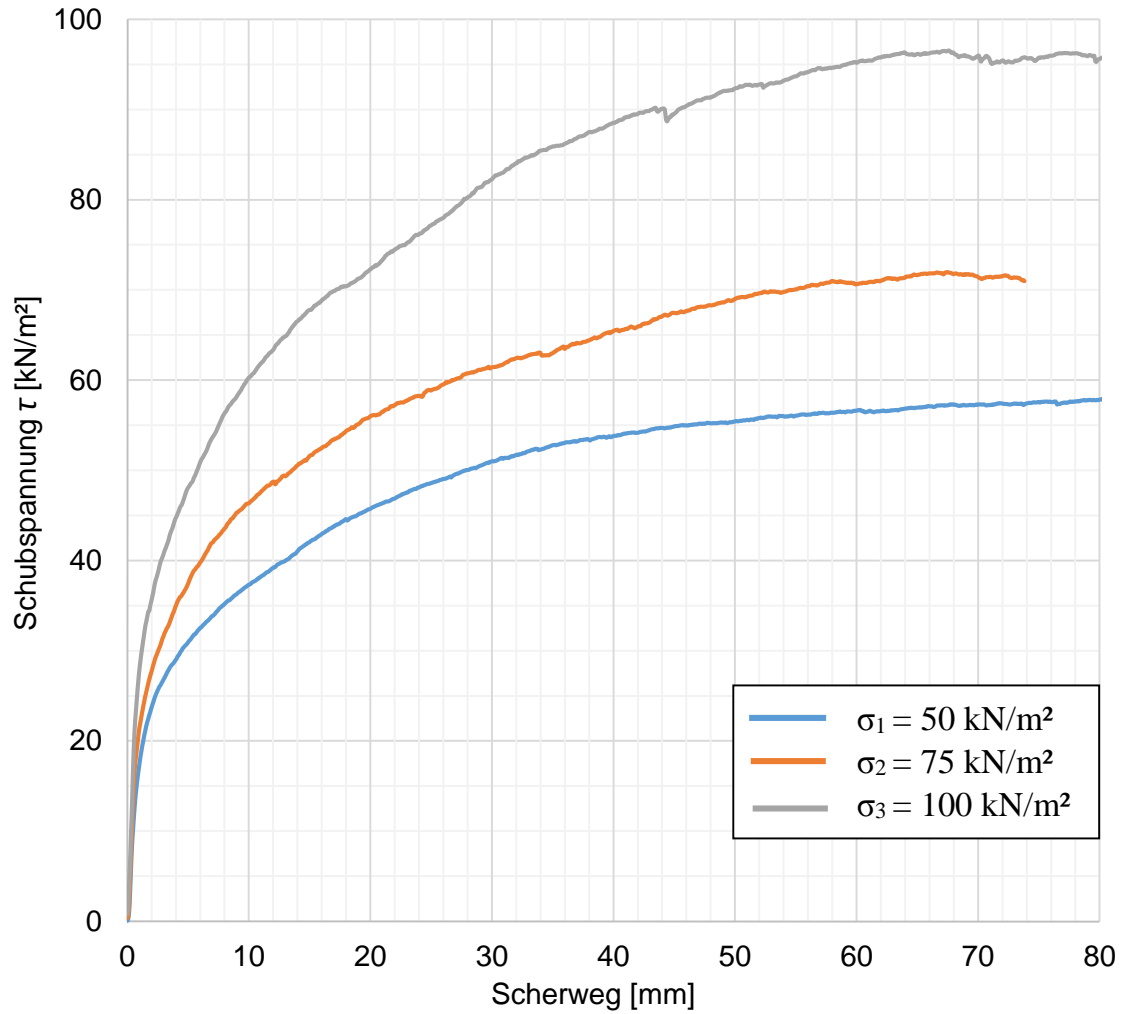


Abb. 118: Scherwegdiagramm für Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm), 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 1. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

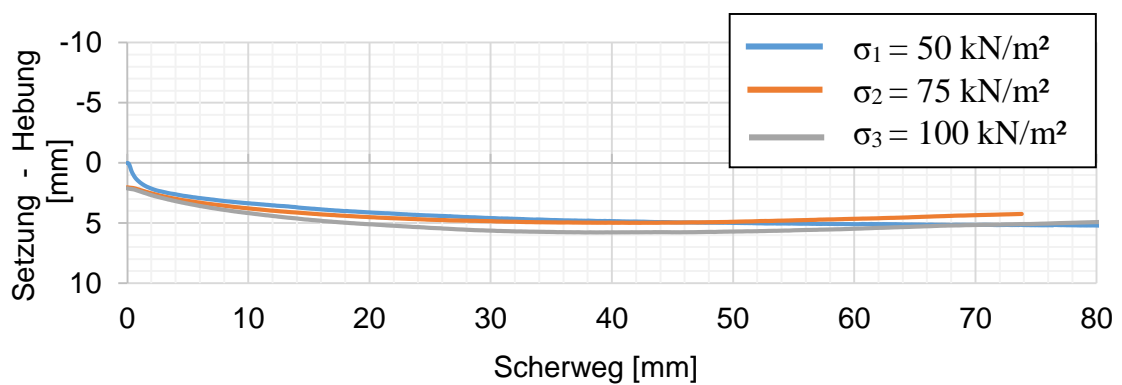


Abb. 119: Scherweg- Setzungsdiagramm für Material 2 (GK 31,5 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 1. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Tab. 82: Scherparameter für Material 2 (GK 31,5 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 1. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	38,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	18,0

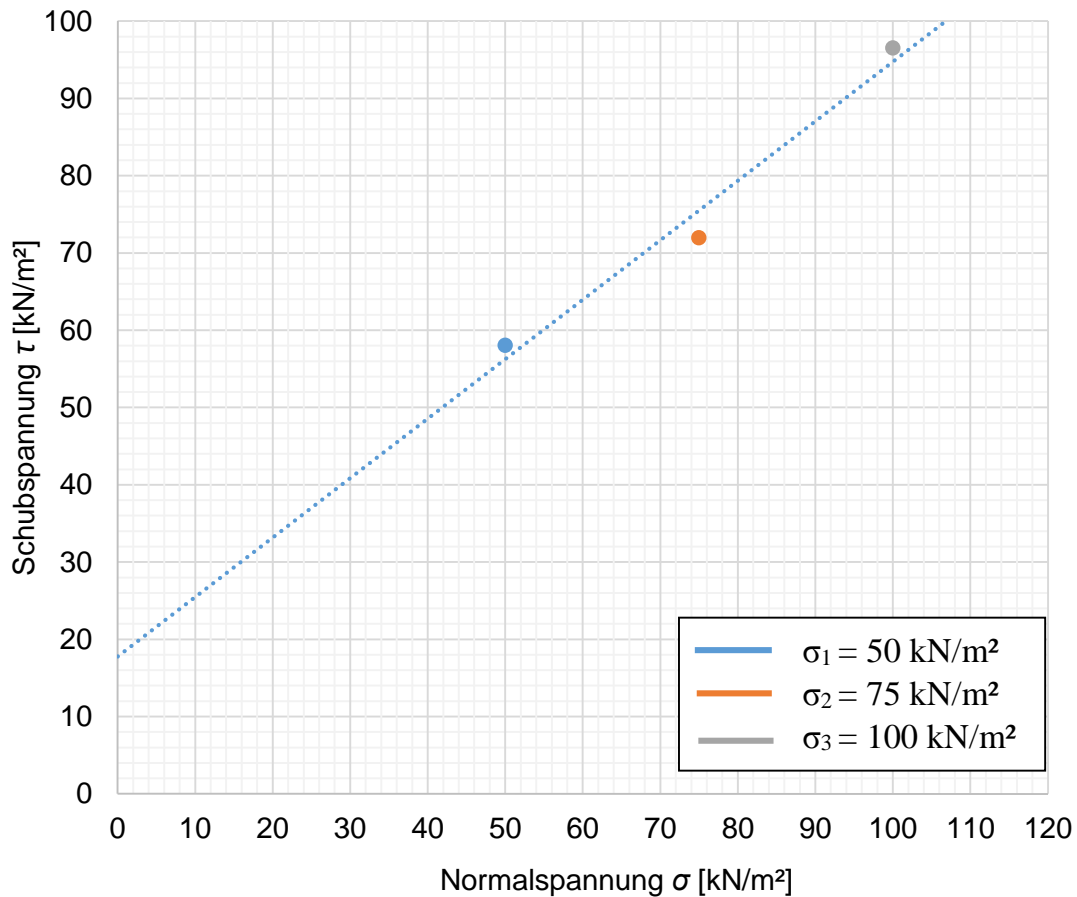


Abb. 120: Schergerade für Material 2 - sa^c si Gr (GK 31,5 mm) bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92 \%$), 1. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

B.3.1.2 Gr. M2 / $D_{pr} = 92\%$ - V2

Tab. 83: Ergebnisse für Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 1. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Bodenart	Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm)		
Versuchsbeschreibung	Großrahmenschergerät 2. Vergleichsversuch - $D_{pr} = 92\%$		
Scherboxabmessung [mm]	H: 190	A: 300 x 300	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	50	75	100
Max. Schubspannung [kN/m ²]	57	77	96
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	1,97		
92 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,81		
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,82	1,85	1,88
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,79	1,83	1,85
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,72	2,13	3,61
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-1,16	-1,04	-2,03
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	10,7		

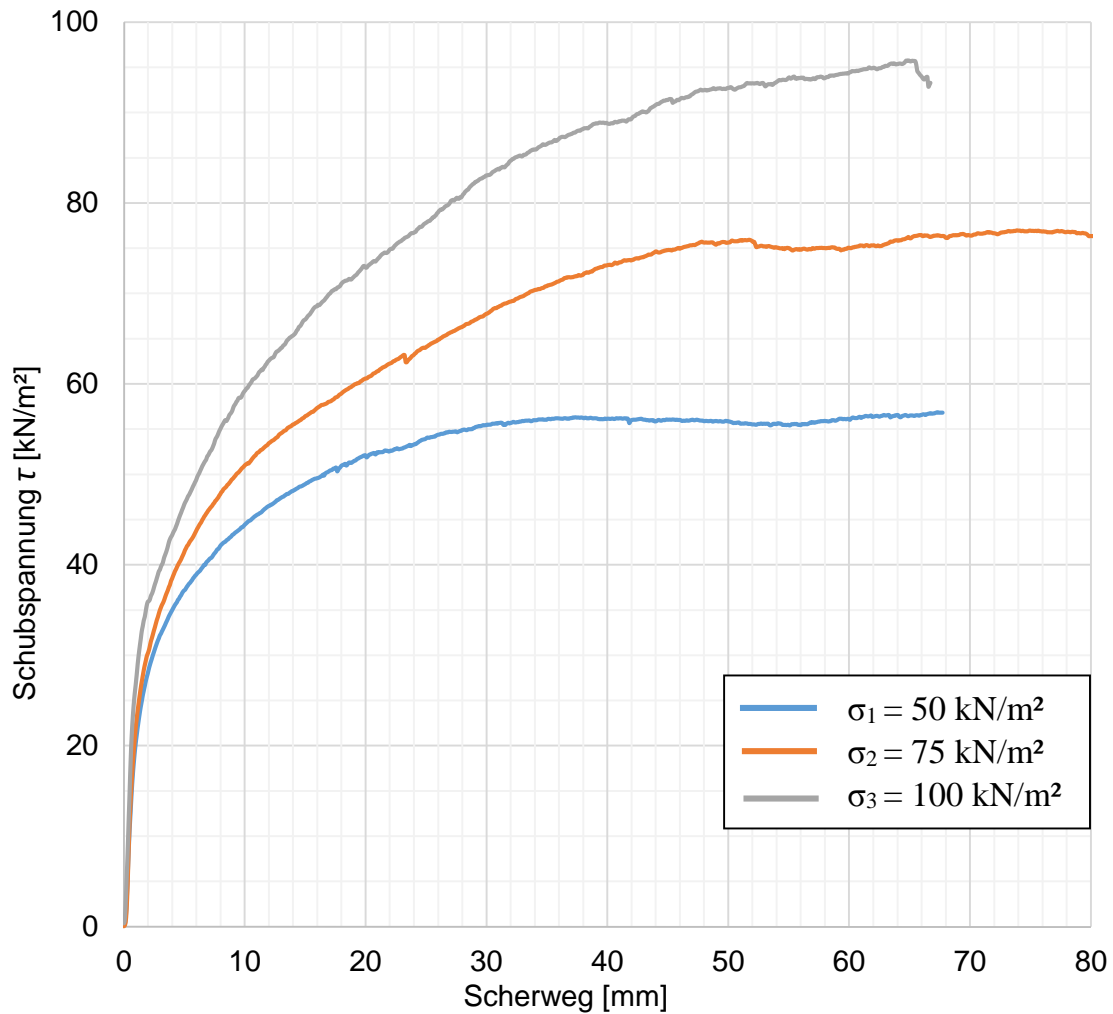


Abb. 121: Schubwegdiagramm für Material 2 (GK 31,5 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 2. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

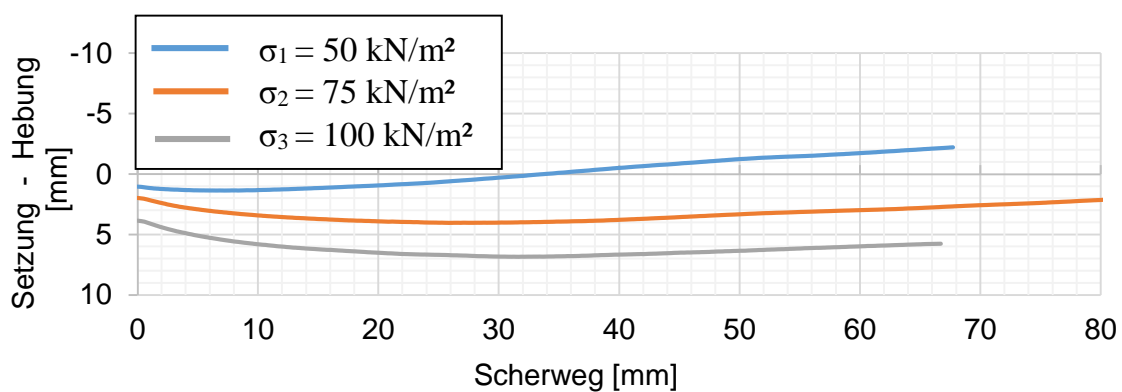


Abb. 122: Schubweg- Setzungsdiagramm für Material 2 (GK 31,5 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 2. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Tab. 84: Scherparameter für Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 2. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	38,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	18,0

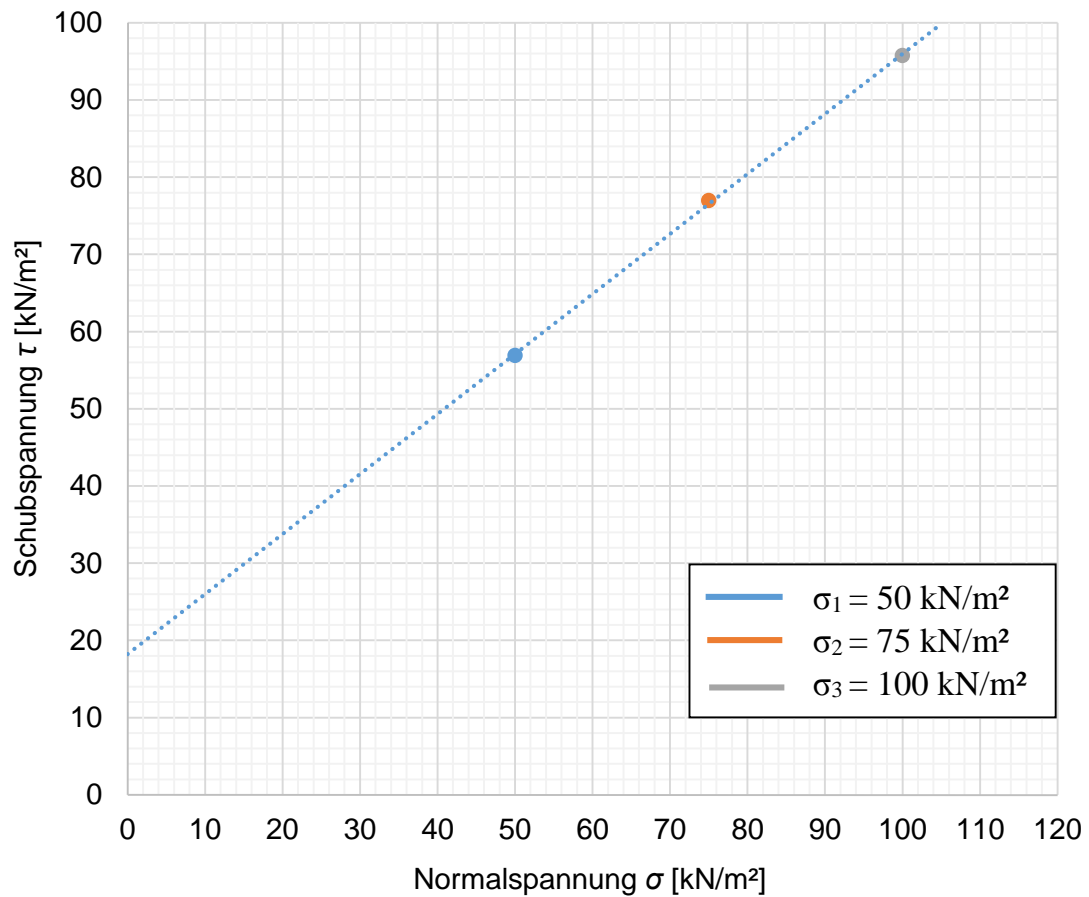


Abb. 123: Schergerade für Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm) bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 2. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

B.3.1.3 Gr. M2 / $D_{pr} = 92\%$ - V3

Tab. 85: Ergebnisse für Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 3. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Bodenart	Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm)		
Versuchsbeschreibung	Großrahmenschergerät 3. Vergleichsversuch - $D_{pr} = 92\%$		
Scherboxabmessung [mm]	Höhe: 190	Durchmesser: 300	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	50	75	100
Max. Schubspannung [kN/m ²]	56	76	91
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	1,97		
92 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,81		
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,82	1,84	1,88
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,79	1,82	1,78
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,69	1,48	3,76
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-1,24	-0,63	-1,41
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	10,7		

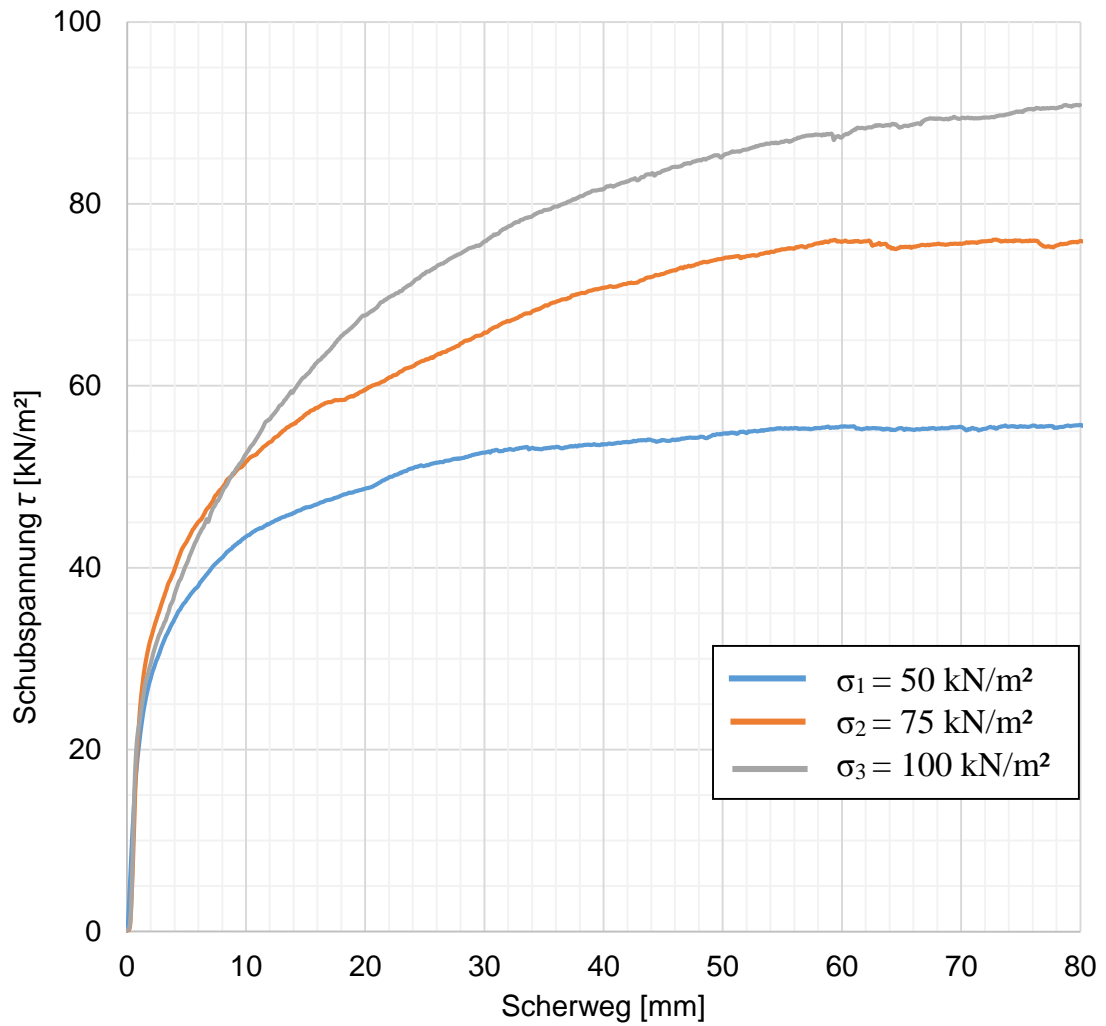


Abb. 124: Scherwegdiagramm für Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 3. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

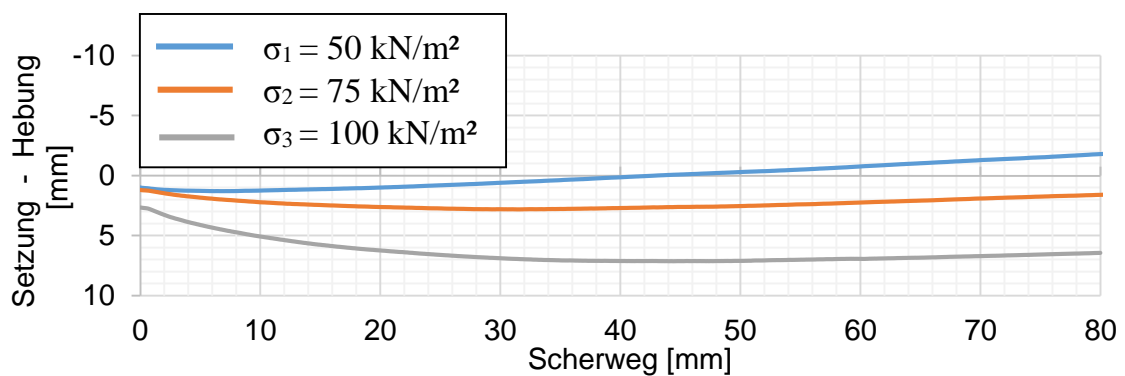


Abb. 125: Scherweg-Setzungsdiagramm für Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 3. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Tab. 86: Scherparameter für Material 2 (GK 31,5 mm), bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 3. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	35,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	22,0

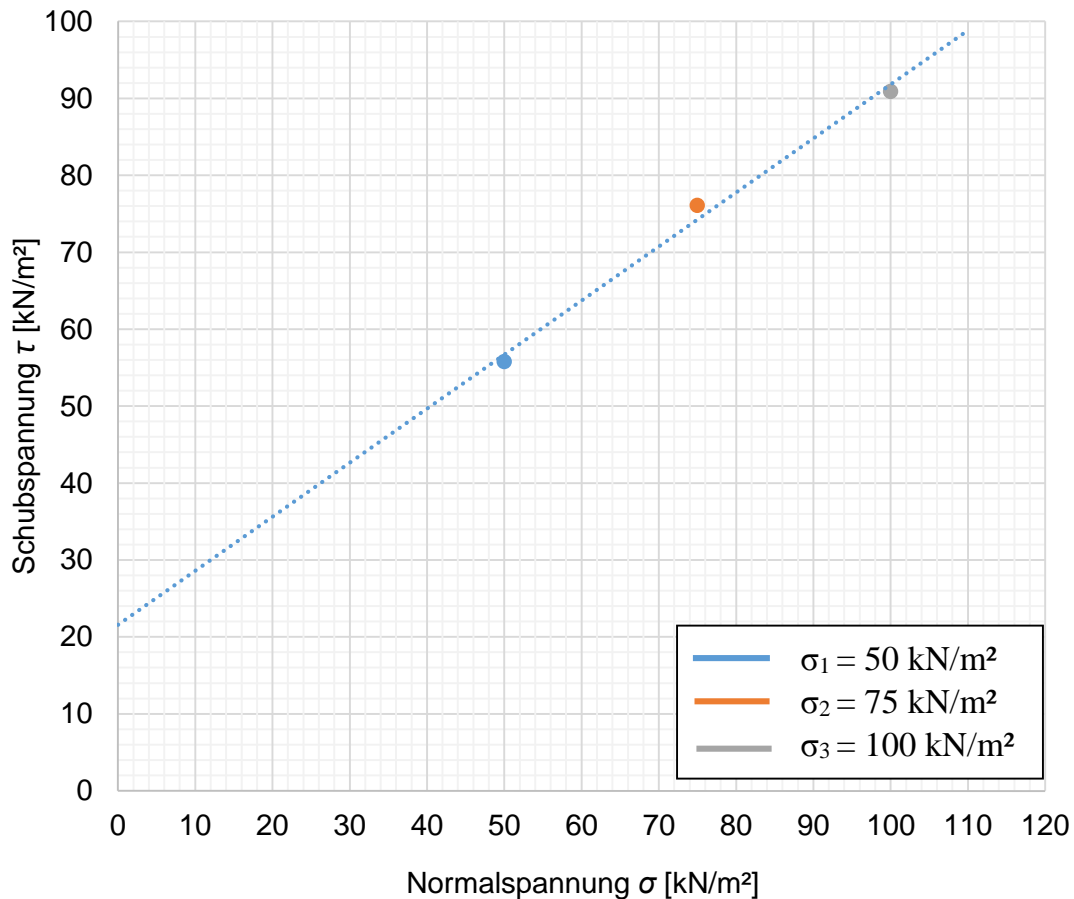


Abb. 126: Schergerade für Material 2 - sa^c si Gr (GK 31,5 mm) bei 92 % Proctordichte ($D_{pr} = 92\%$), 3. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

B.3.2 Gr. M2 / $D_{pr} = 97 \%$ / GK 31,5 mm

B.3.2.1 Gr. M2 / $D_{pr} = 97 \%$ - V1

Tab. 87: Ergebnisse für Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 1. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Bodenart	Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm)		
Versuchsbeschreibung	Großrahmenschergerät 1. Vergleichsversuch - $D_{pr} = 97 \%$		
Scherboxabmessung [mm]	H: 190	A: 300 x 300	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	50	75	100
Max. Schubspannung [kN/m ²]	56	75	99
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	1,97		
97 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,91		
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,92	1,92	1,97
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,91	1,90	1,94
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,55	0,77	2,94
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-0,05	-0,54	-1,64
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	10,7		

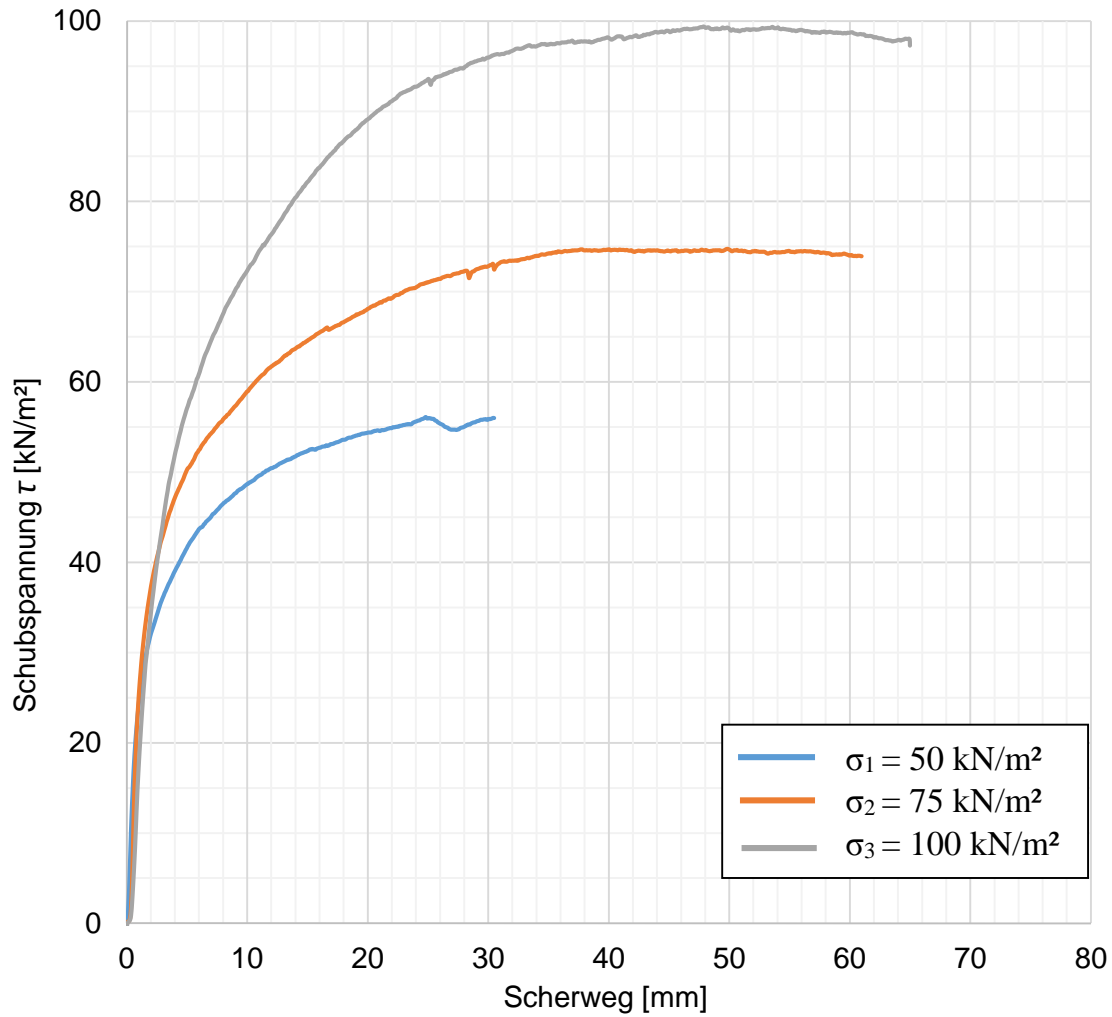


Abb. 127: Scherwegdiagramm für Material 2 (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 1. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

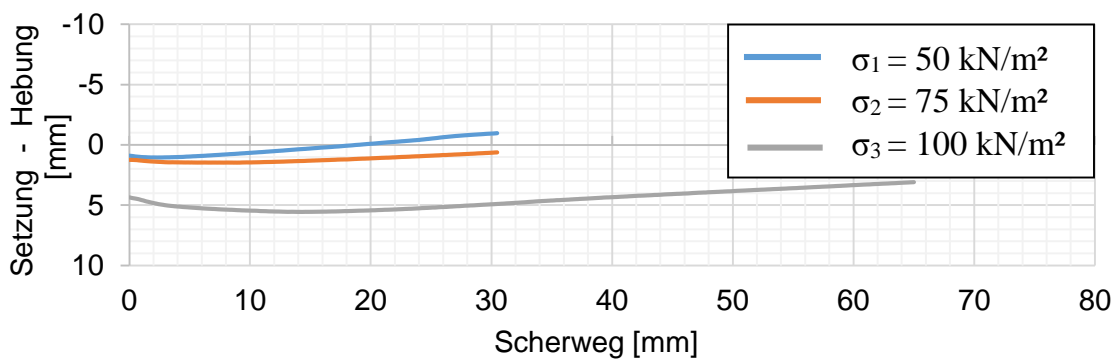


Abb. 128: Scherweg- Setzungsdiagramm für Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 1. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Tab. 88: Scherparameter für Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 1. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	41,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	12,0

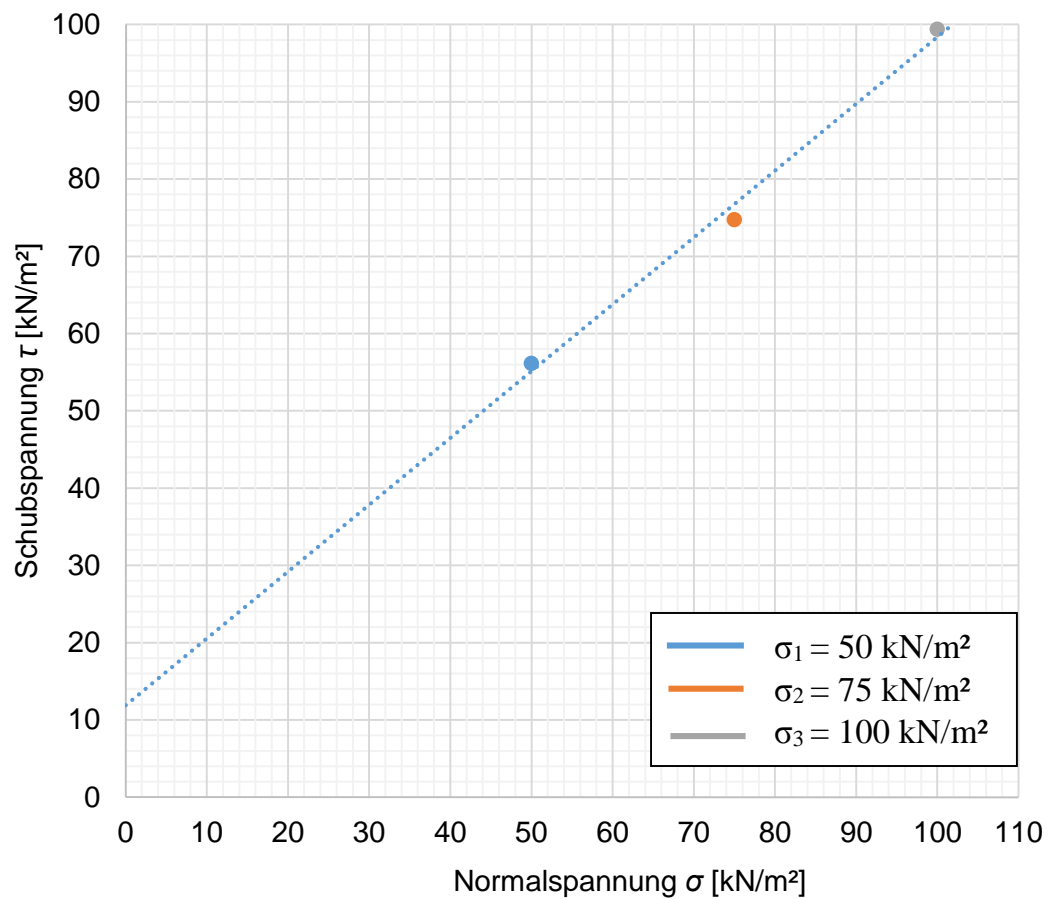


Abb. 129: Schergerade für Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm) bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 1. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

B.3.2.2 Gr. M2 / $D_{pr} = 97\%$ - V2

Tab. 89: Ergebnisse für Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 2. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Bodenart	Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm)		
Versuchsbeschreibung	Großrahmenschergerät 2. Vergleichsversuch - $D_{pr} = 97\%$		
Scherboxabmessung [mm]	H: 190	A: 300 x 300	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	50	75	100
Max. Schubspannung [kN/m ²]	56	70	97
Proctordichte (ρ_{pr}) [Mg/m ³]	1,97		
97 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,91		
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,93	1,93	1,94
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,90	1,92	1,92
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,79	1,14	1,54
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-0,66	-0,29	-0,73
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	10,7		

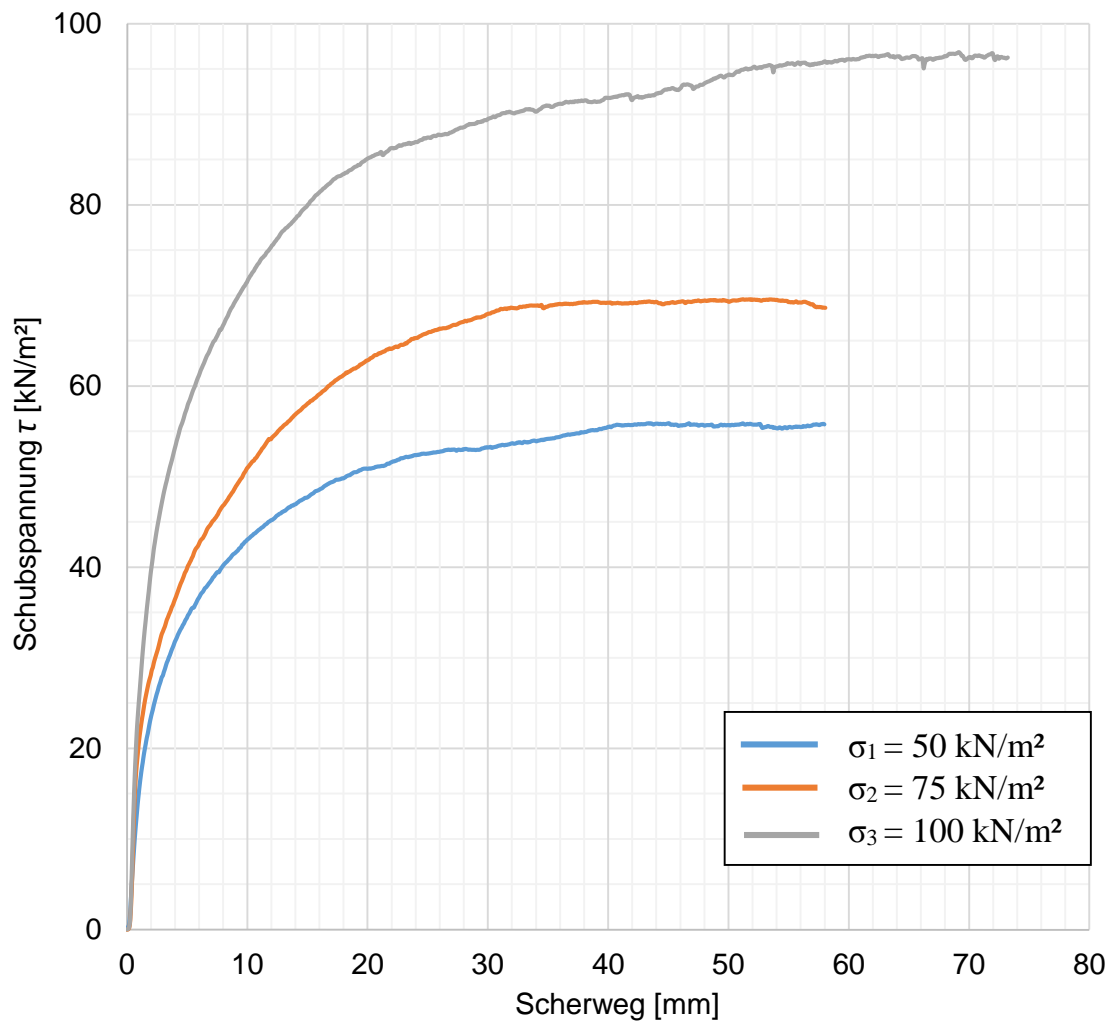


Abb. 130: Scherwegdiagramm für Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 2. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

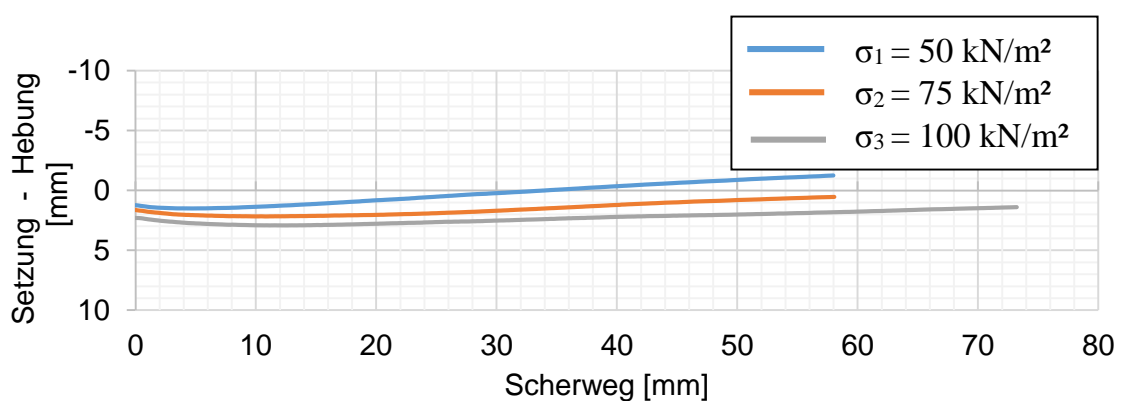


Abb. 131: Scherweg- Setzungsdiagramm für Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($\rho_{Pr,97\%}$), 2. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Tab. 90: Scherparameter für Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 2. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	39,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	13,0

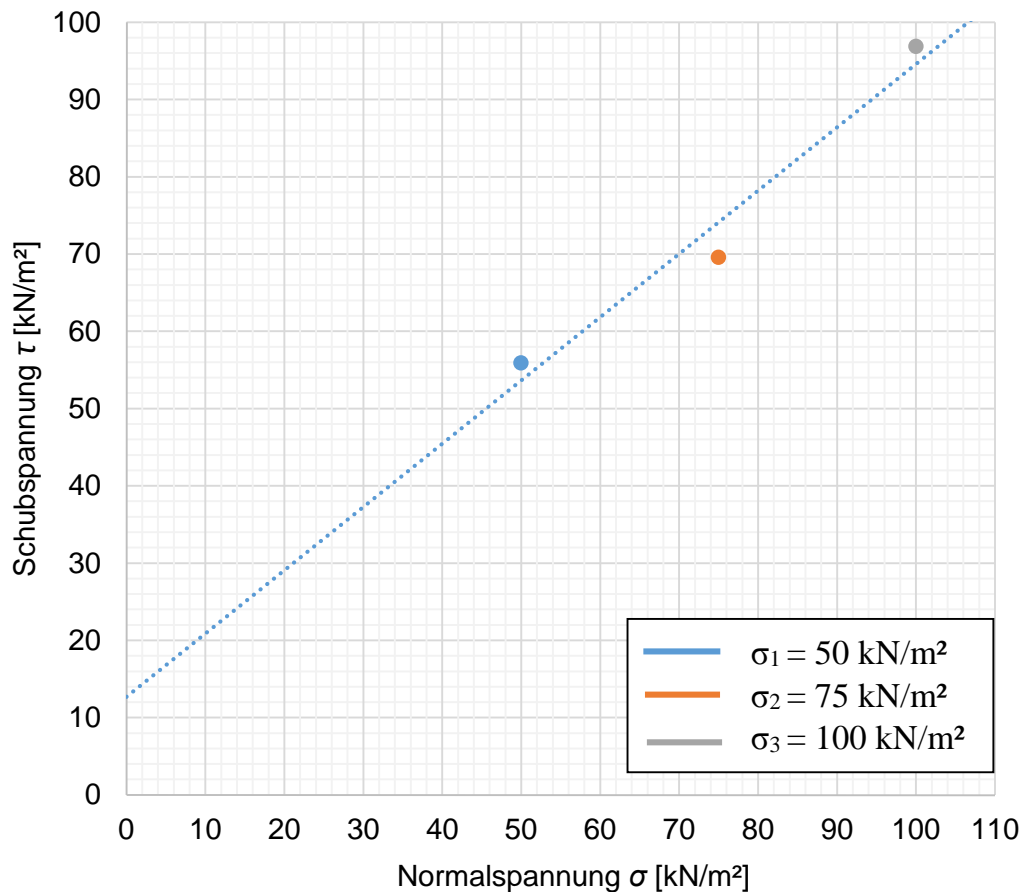


Abb. 132: Schergerade für Material 2 – sa' si Gr (GK 31,5 mm) bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 2. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

B.3.2.3 Gr. M2 / $D_{pr} = 97\%$ - V3

Tab. 91: Ergebnisse für Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 3. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Bodenart	Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm)		
Versuchsbeschreibung	Großrahmenschergerät 3. Vergleichsversuch - $D_{pr} = 97\%$		
Scherboxabmessung [mm]	H: 190	A: 300 x 300	
Belastungsstufe	1	2	3
Normalspannung [kN/m ²]	50	75	100
Max. Schubspannung [kN/m ²]	54	83	94
Proctordichte (ρ_{Pr}) [Mg/m ³]	1,97		
97 % Proctordichte [Mg/m ³]	1,91		
Max. Dichte [Mg/m ³]	1,93	1,93	1,94
Min. Dichte [Mg/m ³]	1,89	1,90	1,92
Max. Setzung/Probenhöhe [%]	0,82	0,93	1,45
Max. Hebung/Probenhöhe [%]	-0,80	-0,30	-0,61
Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	10,7		

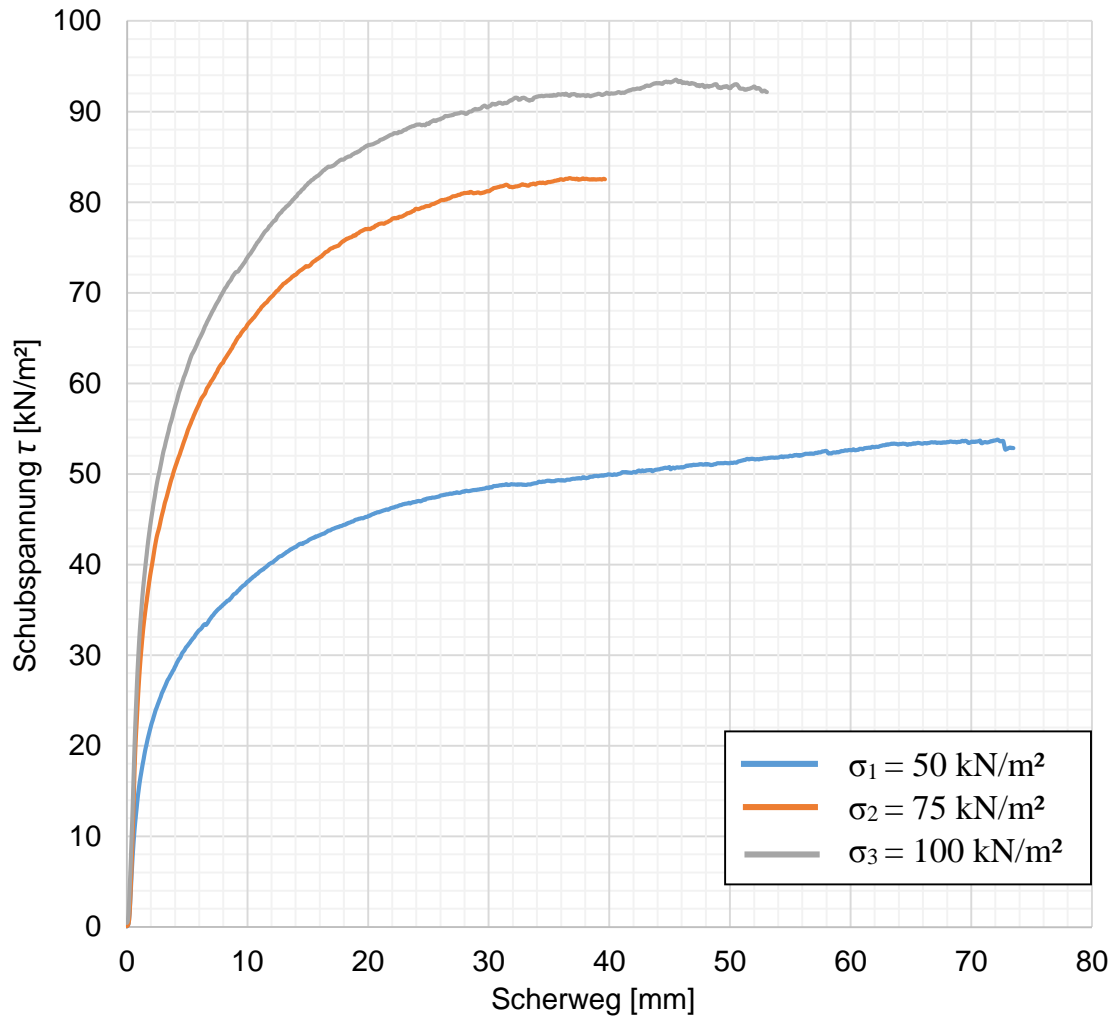


Abb. 133: Scherwegdiagramm für Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 3. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

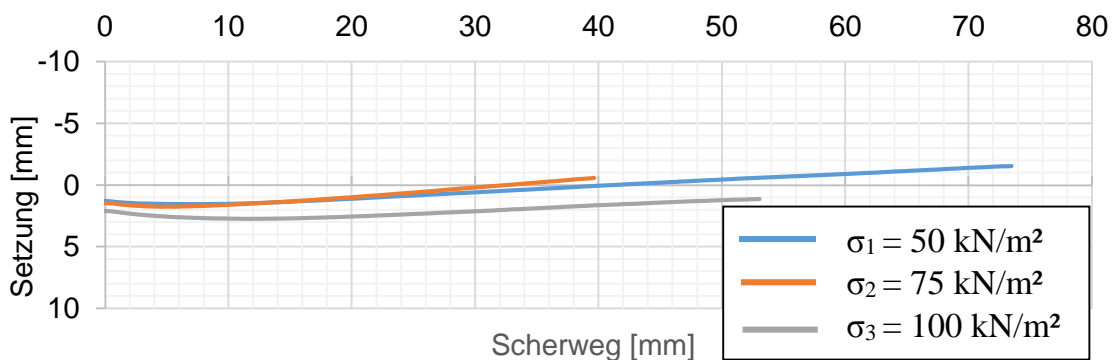


Abb. 134: Scherweg - Setzungsdiagramm für Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97\%$), 3. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Tab. 92: Scherparameter für Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm), bei 97 % Proctordichte ($D_{pr} = 97 \%$), 3. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

Scherparameter		
Reibungswinkel φ	[°]	39,0
Kohäsion c	[kN/m ²]	17,0

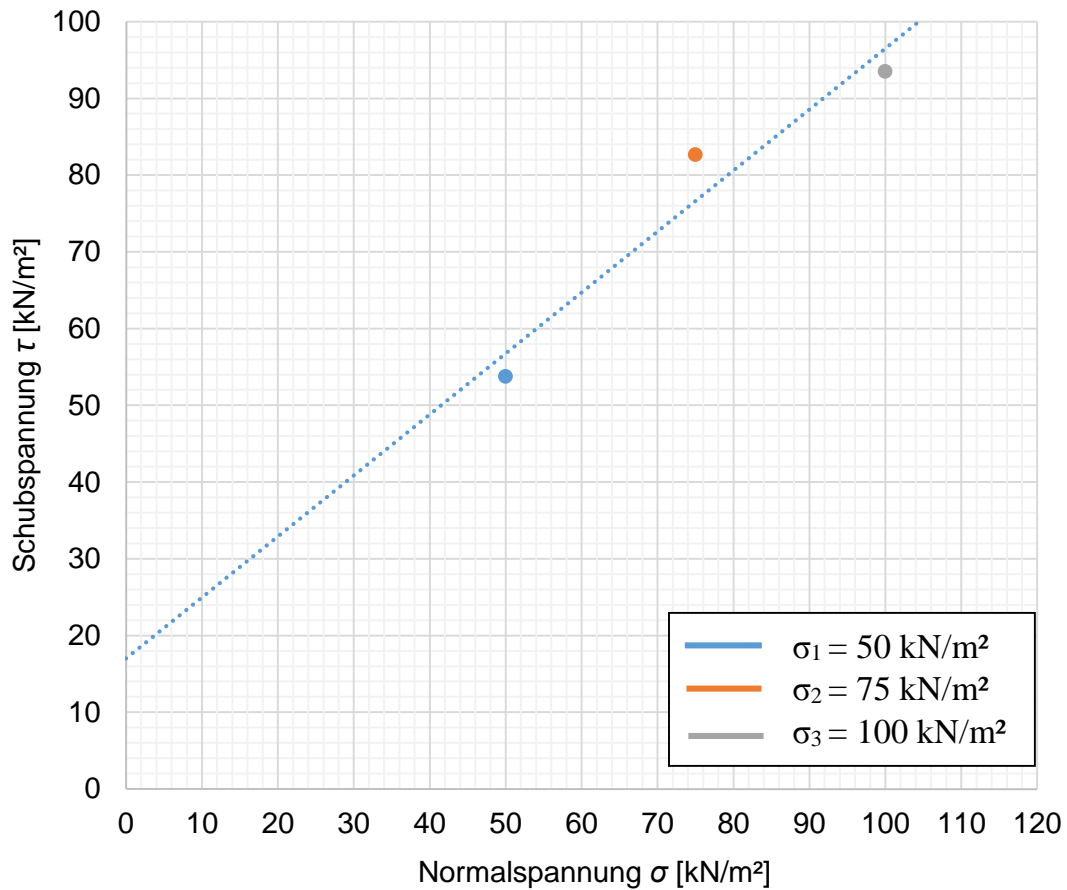


Abb. 135: Schergerade für Material 2 - sa' si Gr (GK 31,5 mm) bei 97 % Proctordichte ($\rho_{Pr,97\%}$), 3. Großrahmenscher- Vergleichsversuch

8 Literaturverzeichnis

Adam, D. (2009)

Grundbau und Bodenmechanik, Kapitel 8. Festigkeitseigenschaften von Böden. Wien: TU Wien.

ASTM D 422 (2004)

Standard test method for particle-size analysis of soils. American Society for Testing and Materials, Philadelphia:

Benson, C.H. & Bareither, C. A. & Edil, T. B. (2008)

Comparison of shear strength of sand backfills measured in small-scale and large-scale direct shear tests. Canadian Geotechnical Journal, S. Vol.:45, Nr.:9, 1224-1236.

Boley, C. (2012)

Handbuch: Geotechnik, Grundlagen – Anwendungen - Praxiserfahrungen. Vieweg + Teubner Verlag/Springer Fachmedien GmbH, Wiesbaden

Cerato, A. & Lutenecker, A. J. (2006)

Specimen size and scale effects of direct shear box tests on sands. Geotechnical Testing Journal, S. Vol.: 29, 507-516.

DIN 18126 (1986)

Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung. Beuth Verlag, Berlin.

EN 13286, Teil 2. (2010)

Ungebundene und hydraulische gebundene Gemische-Teil 2: Laborprüfverfahren zur Bestimmung der Referenz-Trockendichte und des Wassergehaltes-Proctorversuch. Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.

Horn, A. (1964)

Die Scherfestigkeit von Schluff, Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen Nr.1960. Westdeutscher Verlag, Köln.

Houlsby, G. T. & Simoni, A. (2006)

The direct shear strength and dilatancy of sand-gravel mixtures. Geotechnical and Geological Engineering, S. Vol.: 24, 523-549.

Kolymbas, D. (1998)

Geotechnik- Bodenmechanik und Grundbau. Springer, Berlin Heidelberg.

Kuntsche, K. (2000)

Geotechnik-Erkunden, Untersuchen, Berechnen, Messen. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden

Lambe, W. T. & Whitman, R. V. (1969)

Soil Mechanics. Ed. J. Wiley & Sons Inc, New York.

Merklein-Lempp, I. (2015)

Einführung in die Ingenieurgeologie. Jena: Friedrich-Schiller-Universität, Institut für Geowissenschaften. Von: http://www.eo.uni-jena.de/fileadmin/Fachschaft/dokumente/Lehrmaterialien/Ingenieurgeologie_Skript (Stand: 28. Juli 2015, 11.07 Uhr).

ÖNORM B 4412 (1974)

Erd- und Grundbau, Untersuchung von Bodenproben, Korngrößenverteilung. Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM B 4413 (2012)

Geotechnik - Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korndichte mit dem Kapillarpknometerverfahren unter Einbeziehung der VORNORM ÖNORM CEN ISO/TS 17892-3. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

ÖNORM B 4416 (1978)

Erd- und Grundbau, Untersuchung von Bodenproben, Grundsätze für die Durchführung und Auswertung von Scherversuchen. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

ÖNORM EN 933-4 (2008)

Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 4: Bestimmung der Kornform - Kornformkennzahl. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

Simmer, K. (2013)

Grundbau 1, Bodenmechanik und erdstatische Berechnungen. B.G. Teubner, Stuttgart.

Smolczyk, U. (1972)

Studienunterlagen (Vertiefung). Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Stuttgart: Universität Stuttgart

Taylor, D. W. & Leps, T. M.. (1938)

Shearing properties of Ottawa standard sand as determined by the M. I. T. strain-controlled direct shearing machine. In Record of Proceedings of Conference on Soils and Foundations, U. S. Corps of Engineers, Boston.

Taylor, D. W.. (1939)

A comparison of results of direct shear and cylindrical compression test. In Proceedings of the 42nd Annual Meeting (S. Vol. 39, Seite: 1058-1070). American Society for Testing and Materials (Philadelphia), Atlantic City - New Jersey.