

**Vergleichende Versuche mit einem
konventionellen und einem parallel
geführten Rahmenschergerät als
Grundlage für DIN 18137-3**

T 3001

T 3001

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2003, ISBN 3-8167-6504-1

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

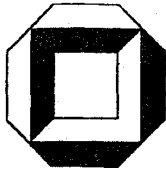
Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

e-mail info@irb.fhg.de

URL <http://www.IRBbuch.de>



LEHRSTUHL FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU

am

Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik
Universität Karlsruhe (TH)
o.Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. G. Gudehus

Universität Karlsruhe (TH) · (IBF) · Postfach 6980 · 76128 Karlsruhe

An das
Deutsche Institut für Bautechnik

Postfach 620229

10792 BERLIN

Hausanschrift:
Engler-Bunte-Ring 14
76131 Karlsruhe

Tel. +49 (0721) 608-2220 und -2221
Fax +49 (0721) 69 60 96

E-Mail: [gudehus@ibf-tiger.bau-
verm.uni-karlsruhe.de](mailto:gudehus@ibf-tiger.bau-
verm.uni-karlsruhe.de)

Internet: www.uni-karlsruhe.de

Unser Zeichen: Gol / fs

12. Dezember 2002

Forschungsvorhaben „Vergleichende Versuche mit einem konventionellen und einem parallel geführten Rahmenschergerät als Grundlage für DIN 18137-3“, Az. P 32-5-11.54-938/00

Schlussbericht

1. Ziel der Forschungsarbeit und Vorbemerkungen

Für Rahmenscherversuche an Böden stehen zwei unterschiedliche Gerätetypen zur Verfügung und werden in DIN 18137-3 fast gleichrangig beschrieben:

- Konventionelle Geräte in der Bauweise nach CASAGRANDE, bei denen der obere Rahmen und die Belastungsplatte keine Parallelführungen besitzen; der obere Rahmen liegt lose über die Rahmenfuge auf dem unteren auf, der horizontal parallel verschoben wird, und die Belastungsplatte ist um den Kopfpunkt drehbar und stützt sich horizontal gegen die Innenwand des oberen Rahmens.
- Neuartige Geräte mit senkrechten, voneinander unabhängigen und reibungsarmen Parallelführungen des oberen Rahmens und des Stempels, an dem die Belastungsplatte starr befestigt ist.

Es gibt auch ältere Geräte mit unverdrehbarem oberem Rahmen und senkrecht geführtem Belastungsstempel. Diese Führungskonstruktionen sind aber nicht mit der gleichen hohen Qualität reibungsarm wie die neuartigen Bauweisen. Außerdem wurden in den vergangenen Jahren Geräte mit horizontaler statt senkrechter Parallelführung des oberen Rahmens hergestellt und verwendet. Diese haben sich aber als ungeeignet erwiesen, weil ein Teil der vom Stempel in die Probe eingeleiteten senkrechten Kraft durch Mantelreibung über den oberen Rahmen und seine Parallelführung abfließen kann, wodurch die senkrechte Spannung in der Scherfuge verfälscht wird. In DIN 18137-3 wird diese Bauweise daher ausgeschlossen.

Bei den konventionellen Geräten nach CASAGRANDE gibt es statische Imperfektionen durch die Drehbarkeit des oberen Rahmens und der Belastungsplatte und durch die unklare seitliche Stützung der Belastungsplatte, wodurch die Versuchsergebnisse nach oben oder unten verfälscht werden können. Aus diesem Grund wurden die Geräte mit Parallelführungen entwickelt. Aber

diese können wiederum andere Imperfektionen aufweisen, wie die Erfahrung mit den horizontalen Parallelführungen zeigt.

Die Aufgabe und das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, mit den Rahmenschergeräten der beiden in der Norm beschriebenen Bauweisen Versuche an verschiedenen typischen Bodenarten durchzuführen, die sich durch den Reibungswinkel und das Dilatanzverhalten unterscheiden. Die Ergebnisse sollen untereinander verglichen und die Unterschiede erklärt werden, um die Genauigkeit und Eignung der Geräte zu bewerten. Weil die Ergebnisse beider Gerätetypen durch Imperfektionen verfälscht sein können, werden sie zusätzlich mit den Ergebnissen von Triaxialversuchen als Referenzversuchen verglichen. Allerdings bestehen zwischen Triaxial- und Rahmenscherversuchen systematische Unterschiede, die mit den verschiedenen Richtungen der Hauptachsen zusammenhängen und nicht auf Imperfektionen beruhen; diese Unterschiede erschweren den Vergleich. Aufgrund der Ergebnisse sollen Empfehlungen für die Überarbeitung der Norm DIN 18137-3 abgeleitet werden.

Weil die Versuche aus verschiedenen Gründen, die mitgeteilt wurden, nicht gemäß dem ursprünglichen Zeitplan fertig gestellt werden konnten, wurde mit dem Datum 31. August 2001 ein Zwischenbericht vorgelegt, in dem die Konstruktion des verwendeten geführten Rahmenschergeräts beschrieben und über erste Versuchsergebnisse berichtet wurde. Im Interesse der Vollständigkeit dieses Schlussberichts wird der Zwischenbericht mit geringfügigen Änderungen in den Schlussbericht übernommen.

2. Konstruktion des parallel geführten Scherrahmensystems

Für die parallel geführten Rahmenscherversuche wurde gemäß Forschungsantrag die Belastungsvorrichtung der Fa. Wille Geotechnik einschließlich Steuer- und Auswertprogramm beschafft. Die Scherrahmen wurden dagegen passend zur Belastungsvorrichtung im IBF konstruiert, wobei die Rahmenkonstruktion der Fa. Wille, die nach unserer Kenntnis auf einem Vorschlag des Bayerischen Geologischen Landesamts München beruht, als Anhalt diente. Die Belastungsvorrichtung der Fa. Wille besteht in mechanischer Hinsicht aus drei Elementen:

- Dem senkrechten Säulenpaar, welches vom senkrechten Vorschub axial bewegt wird: es trägt und bewegt senkrecht und rein translatorisch das obere Querjoch, die obere Traverse, an welcher die Kopfplatte für die senkrechte Belastung des Probekörpers horizontal unverschieblich und unverdrehbar befestigt ist, sowie dem Kraftmess-Stempel für die senkrechte Belastung.
- Der waagerechten Parallelführung (Schlitten), die vom waagerechten Vorschub bewegt wird; sie trägt und bewegt horizontal und rein translatorisch den Grundkasten, in dem der untere Scherrahmen festgelegt ist. Im waagerechten Stempel, mit dem der Schlitten verschoben wird, befindet sich die Kraftmessvorrichtung für die Scherkraft.
- Der unteren Traverse, die senkrecht und rein translatorisch am senkrechten Säulenpaar gleitet; an ihr ist der obere Scherrahmen befestigt, der somit senkrecht parallel geführt wird.

Die beiden Parallelführungen – der Schlitten und die untere Traverse – müssen in kinematischer Hinsicht möglichst starr translatorisch und in statischer Hinsicht möglichst reibungsarm wirken. Laufwiderstände in den beiden Führungen würden die Kraftmessungen beim Scherversuch verfälschen. Der Schlitten als fertiges Industrieprodukt erfüllte beide Anforderungen sofort zufriedenstellend. Die untere Traverse aber lief anfangs zu schwer und ruckartig; ihr Lauf wurde durch

Entfernen eines Klemmrings um die Kugelführung und eine Korrektur an der Kugelführung selbst verbessert. Die Laufwiderstände lagen danach im Bereich der Auflösung der Kraftmessungen.

Die Gerätekonstruktion der Fa. Wille sieht vor, dass der obere Scherrahmen zusammen mit der unteren Traverse, an der er befestigt ist, vor dem Abscheren mittels einer Stellschraube von der oberen Traverse aus so angehoben wird, dass in der Gleitfläche zwischen dem oberen und unteren Scherrahmen ein Spalt von etwa 0,2 mm Weite entsteht. Bevor mit dem Abscheren begonnen wird, wird die Stellschraube gelöst und so der obere Scherrahmen bezüglich seiner Höhenlage sich selbst überlassen. Die Stellschraube muss beim Abscheren gelöst sein, weil sie sonst eine nicht kontrollierbare senkrechte Kraft vom Probekörper über den oberen Scherrahmen in das Säulensystem übertragen könnte, die den Reibungswiderstand in der Scherfuge verfälschen würde. Wenn der Spalt zwischen dem oberen und dem unteren Scherrahmen beim Abscheren geöffnet bleibt, belasten der obere Scherrahmen, der in diesem Fall wie ein schwebender Ring wirkt, zusammen mit der unteren Traverse mit ihrem Eigengewicht über die Mantelreibung den Probekörper und erhöhen so dessen Scherwiderstand. Dieser Scherwiderstand könnte bei der Versuchsauswertung berücksichtigt und rechnerisch eliminiert werden. Durch Höhenmessung am oberen Scherrahmen wurde aber nachgewiesen, dass dieser sofort nach Beginn des Abscherens nach unten sinkt und dann auf dem unteren Scherrahmen aufliegt. Außerdem wurde am leeren Gerät festgestellt, dass der Scherwiderstand zwischen den beiden Rahmen, wenn diese mit dem Eigengewicht aufeinanderliegen, trotz der fein bearbeiteten Flächen so groß und unregelmäßig sein kann, dass er weder vernachlässigbar, noch kalibrierbar ist. Daher wurde nachträglich am Gerät eine Vorrichtung angebracht, mit der das Eigengewicht des oberen Scherrahmens zusammen mit der unteren Traverse bis auf eine kleine Kraft nach unten kompensiert wird. Dazu wurde an den beiden Enden der unteren Traverse neben den Führungswellen jeweils ein dünnes Drahtseil angebracht und dieses senkrecht um eine leichtgängige Umlenkrolle gelegt, die am oberen, festen Querjoch befestigt wurde. Auf einen Teller am freien Ende jedes Drahtseils wurden Gewichte fast bis zur vollständigen Gewichtskompensation aufgelegt. Bei den Scherversuchen mit diesen Gegengewichten blieb der Spalt zwischen oberem und unterem Rahmen geöffnet. Damit ist sichergestellt, dass der beim Versuch gemessene Scherwiderstand ausschließlich der Scherwiderstand des Probekörpers ohne Verfälschung durch das Eigengewicht von Geräteteilen ist.

Das System der Scherrahmen wurde wie folgt konstruiert:

Der Grundkasten besteht aus einer rechteckigen Grundplatte aus Edelstahl und einer aufgesetzten umlaufenden Wand aus Plexiglas, die mit einer Gummidichtung und Spannschrauben auf dem oberen Plattenrand befestigt wird. Die Wand umschließt die Scherrahmen seitlich und ermöglicht die Flutung des Probekörpers beim Abscheren. Die Grundplatte wird mittels Passstiften auf dem Schlitten abnehmbar, aber unverschieblich und kraftschlüssig festgelegt. Auf die Grundplatte wird der untere Scherrahmen gelegt; er wird dort gegen beidseitiges Verschieben in der Scher-Richtung durch Schwellen auf der Grundplatte und eingesetzte Keile gesichert und seitlich ebenfalls durch Widerlager festgehalten. Mit dieser Konstruktion kann das Rahmensystem mit dem Probekörper stoßfrei in den Grundkasten eingesetzt und dort mit einfachen Handgriffen unverschieblich und kraftschlüssig festgelegt werden. Bei Umkehr der Scherrichtung tritt kein Schlupf zwischen Rahmen und Grundplatte ein.

Es wurden Rahmen für Probekörper mit quadratischer Grundfläche mit 100 x 100 mm und 60 x 60 mm Seitenlänge und mit kreisförmiger Grundfläche mit 70 mm Durchmesser angefertigt. Die

quadratischen Rahmen werden für Probekörper bevorzugt, die aus aufbereitetem Boden eingebaut werden, der kreisförmige Rahmen für ungestörte Probekörper. Die Innenecken der quadratischen Rahmen wurden mit einem Radius von 4 mm ausgerundet, was zwei Vorteile hat:

- es erleichtert die Herstellung und spart so Kosten (man kann die Ecken allein durch Fräsen statt durch Drahterodieren fertigen);
- der Einbau des Probenmaterials an den Ecken wird erleichtert und die Homogenität verbessert.

Auf die Veränderung der Größe der Scherfläche mit dem Scherweg und auf die Spannungsrechnung bei der Versuchsauswertung hat die Ausrundung der Rahmenecken keinen Einfluss (der Grenzfall der Ausrundung ist der kreisrunde Rahmen).

Die Rahmenflächen in der Scherebene wurden eben, das heißt ohne Absatz ausgeführt, um Abscheren unter Umkehr der Scherrichtung zu ermöglichen. Die äußeren Abmessungen der drei Rahmensätze wurden zur Vereinfachung der übrigen Geräteteile gleich gewählt. Unterschiedliche Probekörperhöhen werden durch verschiedene Höhen der Drainageplatte erreicht, auf welche die untere Filterplatte gelegt wird.

Die Kopfplatte wurde mit einem umlaufenden Spalt von 0,2 mm in den oberen Rahmen eingepasst. Durch die starre Befestigung der Kopfplatte an der oberen Traverse wird erreicht, dass die Kopfplatte beim Abscheren nicht mit ihrem Rand am Rahmen anstößt und dort Kräfte überträgt. Im Idealfall wird die Scherkraft aus dem Probekörper vollständig von der Kopfplatte aufgenommen und von dieser in das Säulenpaar der Belastungsvorrichtung geleitet, während die Horizontalkräfte auf die Rahmeninnenflächen sich gegenseitig aufheben (siehe Erläuterung zum Forschungsantrag). Die vollständige Trennung zwischen Belastungsplatte und oberem Rahmen ist einer der wesentlichen Unterschiede zwischen dem herkömmlichen und dem parallel geführten Rahmenschergerät.

Die Rahmen und alle übrigen Teile, die mit dem Boden oder dem Wasser zum Fluten in Berührung kommen, wurden aus Edelstahl (V4a) gefertigt.

Als Schlussfolgerung aus den beschriebenen Erfahrungen mit der Rahmenkonstruktion sollten in der Norm 18137-3 folgende Punkte genauer berücksichtigt werden:

- Die Anforderungen bezüglich des reibungsarmen Laufs der senkrechten und waagerechten Parallelführungen sollten genauer festgelegt werden.
- Eine Gewichtskompensation des oberen Rahmens einschließlich aller damit fest verbundenen Teile beim parallel geführten Gerät sollte verlangt werden (beim konventionellen Gerät nach CASAGRANDE ist die Gewichtskompensation nicht erforderlich, weil die Rahmen wegen ihres geringeren Gewichts und wohl auch wegen der freieren Beweglichkeit weniger Verschiebungswiderstand entwickeln).
- Bei quadratischen Rahmen sollte eine Ausrundung der inneren Ecken erlaubt werden.

3. Grundsätzliches zur Darstellung und zum Vergleich der Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse werden im Hinblick auf die Scherfestigkeit und das Dilatanzverhalten verglichen. Die Dilatanz, das ist das Verhältnis von Volumenänderung zu Gestaltänderung beim

Abscheren, wird zwar bei erdstatischen Berechnungen in der Regel nicht explizit berücksichtigt; aber zum einen hängen die möglichen Versuchsfehler infolge von Geräteimperfektionen teilweise mit der Dilatanz zusammen, zum anderen ist die Dilatanz ein wichtiger Teil des Materialverhaltens, sie entspricht der Fließregel (engl. flow rule) des plastischen Grenzzustands im Sinne der Plastizitätstheorie. Zwei Versuche sind nur dann als gleich zu bewerten, wenn sich außer dem Scherwiderstand auch die Dilatanz gleich entwickelt. Weil die Bestimmung und Darstellung der Dilatanz in den Versuchsnormen nicht behandelt wird, sind dazu hier einige Erläuterungen angebracht.

Bei Scherfugen und im Rahmenscherversuch wird die Dilatanz durch den Dilatanzwinkel ν beschrieben, der wie folgt definiert wird:

$$\tan \nu = \frac{v_z}{v_x} = \frac{\delta H}{\delta s} \quad (1)$$

darin bedeutet

v_x, v_z	Geschwindigkeiten beim Abscheren parallel bzw. senkrecht zur Scherfugenebene, v_z Hebungsgeschwindigkeit infolge der Dilatanz
δH	Höhenänderungsincrement des Probekörpers beim Abscheren
δs	Increment des Scherwegs

Nach Gl.(1) lässt sich $\tan \nu$ als Steigung der Scherweg- Höhenänderungskurve eines Rahmenscherversuchs bestimmen. Diese Berechnung ist deswegen gerechtfertigt, weil angenommen werden kann, dass sich der Probekörper beim Abscheren außerhalb der Scherfuge nicht verformt. Die Dicke der Scherfuge, die man nicht kennt und nicht messen kann, hat auf das Ergebnis keinen Einfluss.

Für den dränierten Triaxialversuch ist die Definition der Dilatanz nach Gl.(1) ungeeignet. Anstelle von δH und δs werden die Volumenänderung $\Delta V = V - V_0$ in Abhängigkeit von der axialen Stauchung ε_1 gemessen. Um diese verschiedenen Maße für die Dilatanz, $\tan \nu$ aus dem Rahmenscherversuch und $\delta \Delta V / \delta \varepsilon_1$ aus dem Triaxialversuch vergleichen zu können, wird ein invarianter, das heißt vom Koordinatensystem und der Art der Verformung unabhängiger Ausdruck für die Dilatanz benötigt. Dafür wird der folgende invariante Verhältniswert benutzt, der als Dilatanzzahl $\tan \beta_\varepsilon$ bezeichnet wird [1]

$$\tan \beta_\varepsilon = \frac{\dot{\varepsilon}_v / \sqrt{3}}{\sqrt{J_{2\dot{\varepsilon}}}} = \frac{\delta \varepsilon_v / \sqrt{3}}{\sqrt{\delta J_{2\varepsilon}}} \quad (2)$$

darin ist

$\dot{\varepsilon}_v, \delta \varepsilon_v$ Volumenänderungsrate, - inkrement

$$\dot{\varepsilon}_v = \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2 + \dot{\varepsilon}_3 = \dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y + \dot{\varepsilon}_z \quad (3)$$

$$\delta \varepsilon_v = \delta \varepsilon_1 + \delta \varepsilon_2 + \delta \varepsilon_3$$

$J_{2\dot{\varepsilon}}, \delta J_{2\varepsilon}$ Gestaltänderungsrate, -inkrement (zweite Invariante des Deviators von $\dot{\varepsilon}$); bei allgemeiner räumlicher Verformung ist

$$\begin{aligned}\sqrt{J_{2\dot{\epsilon}}} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2)^2 + (\dot{\epsilon}_2 - \dot{\epsilon}_3)^2 + (\dot{\epsilon}_3 - \dot{\epsilon}_1)^2} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(\dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_y)^2 + (\dot{\epsilon}_y - \dot{\epsilon}_z)^2 + (\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_x)^2 + 6(\dot{\epsilon}_{xy}^2 + \dot{\epsilon}_{yz}^2 + \dot{\epsilon}_{zx}^2)}\end{aligned}\quad (4)$$

$\beta_{\dot{\epsilon}}$ nach Gl.(2) ist der unverzerrte Winkel zwischen dem Vektor der Dehnungsrate $\dot{\epsilon} = (\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2, \dot{\epsilon}_3)$ und der Deviatorebene (Ebene senkrecht zur Raumdiagonalen $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$, das heißt Ebene $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = \epsilon_v = 0$) im Raum der Hauptkomponenten. Die Größen $\dot{\epsilon}_v$ nach Gl.(3) und $\sqrt{J_{2\dot{\epsilon}}}$ nach Gl.(4) und somit auch $\tan \beta_{\dot{\epsilon}}$ sind Invarianten des Tensors $\dot{\epsilon}$.

Im Sonderfall des Triaxialversuchs ist wegen $\dot{\epsilon}_2 = \dot{\epsilon}_3$

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}_v &= \dot{\epsilon}_1 + 2\dot{\epsilon}_3 \\ \sqrt{J_{2\dot{\epsilon}}} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot |\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_3|\end{aligned}$$

und somit

$$\tan \beta_{\dot{\epsilon}} = \frac{\dot{\epsilon}_v}{\sqrt{2} \cdot |\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_3|} = \frac{\sqrt{2} \cdot \dot{\epsilon}_v}{3\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_v}\quad (5)$$

Die Zeitableitungen $\dot{\epsilon}_v$ und $\dot{\epsilon}_1$ lassen sich nach der Kettenregel wie folgt ersetzen

$$\dot{\epsilon}_v = \frac{d\epsilon_v}{dt} = \frac{\partial \epsilon_v}{\partial \epsilon_1} \cdot \frac{\partial \epsilon_1}{\partial t} = \frac{\partial \epsilon_v}{\partial \epsilon_1} \cdot \dot{\epsilon}_1\quad (6)$$

Einsetzen von Gl.(6) in (5) und Kürzen durch $\dot{\epsilon}_1$ ergibt für triaxiale Kompression (und Extension)

$$\tan \beta_{\dot{\epsilon}} = \frac{\epsilon'_v \sqrt{2}}{3 - \epsilon'_v}\quad (7)$$

darin ist

$\epsilon'_v = \frac{\partial \epsilon_v}{\partial \epsilon_1} \approx \frac{\delta \epsilon_v}{\delta \epsilon_1}$ und wird als Steigung der Volumenänderungs-Stauchungskurve des Triaxialversuchs abgelesen.

Um $\tan v$ nach Gl.(1) mit $\tan \beta_{\dot{\epsilon}}$ nach Gl.(7) vergleichen zu können, muss $\tan v$ in $\tan \beta_{\dot{\epsilon}}$ umgerechnet werden. Dazu muss angenommen werden, dass die Verformung der Scherfuge im Rahmenscherversuch durchschnittlich und wenigstens näherungsweise einer ebenen homogenen dilatanten Scherung entspricht. Mit der x -Richtung senkrecht zur Scherebene gilt dann

$$v_x = \dot{\lambda} \cdot z \cdot \cos v; \quad v_z = \dot{\lambda} \cdot z \cdot \sin v$$

und daher wegen

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}_{ij} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \\ \dot{\epsilon}_x &= 0; \quad \dot{\epsilon}_z = \dot{\epsilon}_{zz} = \dot{\lambda} \sin v \\ \dot{\epsilon}_{zx} &= \frac{\dot{\lambda}}{2} \cos v\end{aligned}\quad (8)$$

$\dot{\epsilon}_{yy} = \dot{\epsilon}_{xy} = \dot{\epsilon}_{zy} = 0$ wegen der Ebenheit der Verformung;

λ ist ein unbestimmter Faktor, der die Abschergeschwindigkeit angibt. Aus (8) folgt

$$\dot{\varepsilon}_v = \dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_z = \lambda \sin v \quad (9)$$

und nach Gl.(4)

$$\begin{aligned} \sqrt{J_{2\dot{\varepsilon}}} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2\lambda^2 \sin^2 v + 6 \frac{\lambda^2}{4} \cos^2 v} \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \lambda \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{4} \cos^2 v} \end{aligned} \quad (10)$$

Einsetzen von Gl.(9) und (10) in Gl.(2) und Kürzen ergibt

$$\tan \beta_{\dot{\varepsilon}} = \frac{\sin v}{\sqrt{2} \sqrt{1 - \frac{1}{4} \cos^2 v}} \quad (11)$$

Es ist bekannt, dass die Scherverformung in der Scherfuge im Rahmenscherversuch nicht homogen ist. Gl.(11) gibt dann einen Durchschnittswert für die Dilatanzzahl für die Scherfuge im Rahmenscherversuch an, der mit der Dilatanzzahl nach Gl.(5) für den Triaxialversuch verglichen werden kann, weil die zugrundeliegende Definition (Gl.(2)) die gleiche ist.

Mit den Verformungen in der Scherfuge hängt auch der Umstand zusammen, dass der Reibungswinkel eines Bodens im Triaxialversuch und im Rahmenscherversuch im Allgemeinen verschieden herauskommt.

Im Triaxialversuch werden die drei Hauptspannungen σ_1 , σ_2 und σ_3 (wobei $\sigma_2 = \sigma_3$) im Grenzzustand gemessen, so dass der zugehörige MOHR'sche Spannungskreis vollständig festliegt. Die Grenzbedingung (nach MOHR) entspricht der gemeinsamen Umhüllenden aller Spannungskreise für gleichartige Grenzzustände. Im Falle von kohäsionslosem Sand ist die Umhüllende die gerade Tangente vom Nullpunkt des σ, τ -Diagramms an jeden dieser Spannungskreise. Der Neigungswinkel dieser Geraden wird als Reibungswinkel φ definiert:

Grenzbedingung nach MOHR

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} = \sin \varphi \quad (12)$$

oder alternativ Grenzbedingung nach COULOMB

$$\tau = \sigma \cdot \tan \varphi \quad (13)$$

darin sind σ und τ die Spannungskomponenten, die dem Berührungspunkt entsprechen. Die Hauptdehnungsrichtungen stimmen beim Triaxialversuch immer mit den Hauptspannungsrichtungen überein – so genannte Koaxialitäten –, weil die Hauptspannungsrichtungen durch die Randbedingungen unveränderlich gegenüber dem Material festliegen.

Beim Rahmenscherversuch werden die Normalspannung $\sigma = \sigma_z$ und die Schubspannung $\tau = \tau_{zx}$ mit dem Maximalwert τ_f gemessen. Der Reibungswinkel wird definiert durch die Grenzbedingung nach COULOMB

$$\tau_f = \sigma \cdot \tan \varphi_s \quad (14)$$

Mit den gemessenen Spannungskomponenten σ und τ bzw. τ_f liegt der Spannungszustand aber nicht vollständig fest, das heißt der MOHR'sche Spannungskreis kann nicht ohne zusätzliche Annahmen gezeichnet werden. Dazu ist eine Annahme über die Richtung der Hauptspannungsachsen relativ zu den Hauptdehnungsrichtungen geeignet. Letztere sind mit den Gln.(8) gegeben: sie sind unter den Winkeln $45^\circ + \nu/2$ und $-(45^\circ - \nu/2)$ gegen die Scherfugenebene geneigt, das heißt im Sonderfall eines kritischen Grenzzustands ($\nu = 0$) unter $\pm 45^\circ$ gegen die Scherfugenebene. Bei unveränderlichem Dilatanzwinkel ν (z.B. $\nu \equiv 0$) sind die Hauptdehnungsachsen fest relativ zur Scherfugenrichtung, aber das Material dreht sich bei der Scherverformung relativ zu diesen Achsen. Wegen dieser relativen Drehung der Hauptdehnungsachsen brauchen die Hauptspannungsrichtungen – anders als bei der triaxialen Kompression – nicht mit den Hauptdehnungsrichtungen überein zu stimmen. Zwei extreme Sonderfälle sind hervorzuheben:

- Die Hauptspannungs- und Hauptdehnungsachsen stimmen überein (Koaxialität). Dann ist die Grenzgerade nach Gl.(14) nicht eine Tangente an den Spannungskreis, sondern eine Sekante. Ist gemäß Gl.(12) φ der Neigungswinkel der Tangente vom Nullpunkt an diesen Spannungskreis, so gilt zwischen φ und φ_s nach Gl.(14) der Zusammenhang

$$\tan \varphi_s = \frac{\cos \nu \cdot \sin \varphi}{1 - \sin \nu \cdot \sin \varphi} \quad (15)$$

im Sonderfall $\nu = 0$ ist

$$\tan \varphi_s = \sin \varphi \quad (16)$$

oder

$$\varphi_s = \arctan(\sin \varphi)$$

und die Sekante nach Gl.(14) geht durch den Scheitelpunkt des Spannungskreises. Da stets $\nu < \varphi$, ist $\varphi_s < \varphi$ für alle möglichen Werte von ν .

- Die Hauptspannungsachsen weichen so von den Hauptdehnungsachsen ab, dass $\varphi_s = \varphi$ erfüllt ist. Dazu müssen die Hauptachsen um den Winkel

$$\alpha = \frac{1}{2}(\varphi - \nu) \quad (17)$$

und im kritischen Grenzzustand um

$$\alpha_{kr} = \varphi/2$$

gegeneinander gedreht sein.

Zwischen diesen beiden Extremfällen sind beliebige Zwischenfälle möglich; stets ist aber

$$\varphi_s \leq \varphi \quad (18)$$

Durch eigene Versuche an Sand mit einem besonderen Gerät, welches die freie Bildung von Scherfugen erlaubte [2], wurde festgestellt, dass die Achsenabweichung α wenig von Gl.(17) verschieden ist und φ_s und φ ungefähr übereinstimmen. Diese Erkenntnis ist in die Norm DIN 18137-1 eingegangen. Aber es muss dennoch von der Ungleichung (18) ausgegangen werden.

Es gibt außer der Achsenabweichung noch mindestens einen weiteren Effekt, der zur Folge hat, dass φ_s aus Rahmenscherversuchen und φ aus Triaxialversuchen im Allgemeinen nicht gleich sind: Die Scherung in einer Scherfuge ist eine ebene, die triaxiale Kompression ein Sonderfall

einer dreidimensionalen Verformung. Aus Versuchen mit allgemeineren dreidimensionalen Verformungen weiß man, dass der durch Gl.(12) definierte Reibungswinkel φ bei ebener Verformung geringfügig größer ist als bei triaxialer Kompression. Außerdem ist es möglich, dass sich die Bodenkörner in einer Scherfuge anders orientieren als in einer räumlichen Scherzone.

Zusammenfassend folgt aus den obigen Überlegungen, dass selbst unter idealen Versuchsbedingungen und ideal gleichen und homogenen Probekörpern die Reibungswinkel aus Rahmenscher- und aus Triaxialversuchen im Allgemeinen verschieden sind.

4. Beschreibung der Versuche und Ergebnisse

4.1 Versuchsprogramm

Wie im Forschungsantrag geplant, wurde für die Versuche stellvertretend für die Hauptbodenarten Mittelsand, ein reiner Schluff (Löss) und ein leicht plastischer Ton (Seeton) ausgewählt. Mit diesen verschiedenen Bodenarten sollte der Einfluss verschiedener Dilatanz- und Reibungswinkel und von Kohäsion auf die Eignung der beiden Rahmensysteme untersucht werden. Zur Beschreibung der Versuchsböden wurden die üblichen Klassifizierungsversuche angewendet. An jedem Boden wurden sodann umfangreiche Serien von Rahmenscherversuchen mit den bei der jeweiligen Bodenart geeigneten Versuchsbedingungen und zum Vergleich am Sand und am Ton *D*- bzw. *CU*-Triaxialversuche durchgeführt. Bei der Versuchsdurchführung wurde DIN 18137-3 bzw. -2 beachtet. Bei einigen zusätzlichen Rahmenscherversuchen an Sand wurden die störenden seitlichen Randschubspannungen mittels einer Beschichtung der seitlichen Rahmeninnenflächen vermindert. So ergab sich das in Tabelle 1 zusammengestellte Versuchsprogramm.

Für alle Rahmenscherversuche wurden quadratische Rahmen $60 \times 60 \text{ mm}$ verwendet, weil das Probenmaterial aufbereitet eingebaut wurde. Die Triaxialversuche wurden mit gedrunenen Probekörpern, bei denen die Anfangshöhe h_0 ungefähr gleich dem Anfangsdurchmesser d_0 ist, mit geschmierten und dadurch reibungsarmen Endflächen nach Bild 3b von DIN 18137-2 Dez. 1990 durchgeführt. Bei den Versuchen an Sand war $h_0 \approx d_0 = 100 \text{ mm}$, bei den Versuchen an Schluff und an Ton 50 mm .

Serie Nr.	Bodenart	Versuchsart und Gerät	Zahl der Versuche
	Sand	Rahmenscherversuche, trocken, gleiche Anfangsporenzahl, verschiedene σ	
1.1		konventionelles Gerät	7
1.2		parallel geführtes Gerät	10
1.3		parallel geführt mit reibungsarmer Beschichtung der seitlichen Rahmeninnenflächen	9
		Verschiedene Anfangsporenzahlen, gleiches σ	
1.4		konventionelles Gerät	10
1.5		parallel geführtes Gerät	10
1.6		<i>D</i> -Triaxialversuche, wassergesättigt, verschiedene Anfangsporenzahlen	6
		Schluff	Rahmenscherversuche, aufbereitet
	normalkonsolidiert		
2.1	konventionelles Gerät		8
2.2	parallel geführtes Gerät		8
	überkonsolidiert		
2.3	konventionelles Gerät		6
2.4	parallel geführtes Gerät		6
	Seeton	Rahmenscherversuche, aufbereitet	
		normalkonsolidiert	
3.1		konventionelles Gerät	8
3.2		parallel geführtes Gerät	8
		überkonsolidiert	
3.3		konventionelles Gerät	6
3.4		parallel geführtes Gerät	8
		<i>CU</i> -Triaxialversuche	
3.5		normalkonsolidiert	3
3.6		überkonsolidiert	3

Tabelle 1: Versuchsprogramm

4.2 Ergebnisse der Klassifizierungsversuche

Der untersuchte Sand ist ein fein- und grobsandiger Mittelsand (Körnungslinie siehe Anlage 1, a). Seine Korndichte beträgt $\rho_s = 2,647 \text{ g/cm}^3$, seine Dichte bei der lockersten Lagerung $\rho_{\min} = 1,412 \text{ g/cm}^3$, seine Dichte bei der dichtesten Lagerung, bestimmt mit dem Schlaggabelversuch nach DIN 18126, $\rho_{\max} = 1,732 \text{ g/cm}^3$. Die zugehörigen Grenzwerte der Porenzahl sind $e_{\max} = 0,875$ und $e_{\min} = 0,528$.

Als Schluff wurde Löss aus der näheren Umgebung ausgewählt. Es handelt sich um einen schwach tonigen Schluff (Körnungslinie siehe Anlage 1, b); die Korndichte beträgt $\rho_s = 2,71 \text{ g/cm}^3$, der Kalkgehalt etwa 30 %.

Als toniges Versuchsmaterial wurde ein Seeton aus einer Baugrube in Konstanz verwendet. Nach der Korngrößenverteilung (Anlage 1, c) handelt es sich um einen Schluff mit 20 % Tonanteil. Nach den Konsistenzgrenzen $w_L = 26 \%$ (Wassergehalt an der Fließgrenze) und $w_P = 16,2 \%$ (Wassergehalt an der Ausrollgrenze) ist der Boden nach DIN 4022-1 als leicht plastischer Ton zu bezeichnen. Konstanzer Seeton kommt als leicht und als mittelplastischer Ton, seltener als ausgeprägt plastischer Ton vor. Das typische Verhalten zeigt der Seeton in leicht plastischer und mittelplastischer Ausbildung qualitativ gleich.

4.3 Scherversuche an Sand (Versuchsserien 1.1 bis 1.6)

4.3.1 Probeneinbau und Versuchsdurchführung

Der Sand wurde trocken und möglichst locker in die Rahmen eingefüllt. Um die Proben dann auf eine bestimmte größere Dichte zu bringen, wurden sie im Rahmen unter einer Auflast von 5 kg auf der Belastungsplatte, was einer Normalspannung von etwa $\sigma = 14 \text{ kN/m}^2$ entspricht, eine bestimmte Zeit lang der Vibration einer Schüttelmaschine ausgesetzt. Verschiedene Dichten wurden durch verschiedene Zeiten auf der Schüttelmaschine erzielt. Nach dieser Verdichtung wurden die Scherrahmen mit den Proben behutsam in die Belastungsvorrichtung (Wykeham Farrance) eingesetzt. Aus der Messung der Höhenlage der Kopfplatte und der Einbaumasse wurde die tatsächliche Anfangsporenzahl jeder einzelnen Probe auf drei Ziffern bestimmt. Für die Genauigkeit der Bestimmung des Anfangswerts und aller weiteren Werte der Porenzahl ist die Genauigkeit der Messung der Anfangshöhe des Probekörpers entscheidend. Die Normalbelastung wurde in üblicher Weise stoßfrei aufgebracht. Danach wurden die Proben mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit $v = 0,24 \text{ mm/min}$ abgescher. Beim Abscheren wurden der Scherweg s , die Höhenänderung ΔH der Mitte der Kopfplatte und die Scherkraft T gemessen.

Zur Berechnung der Normalspannung σ und Schubspannung τ bei der Auswertung wurden die Normalbelastung V und die Scherkraft T in jedem Zustand durch die Anfangsfläche A_0 dividiert, wie es in DIN 18137-3 nun geregelt ist, das heißt, die Flächenänderung infolge des Scherwegs wurde nicht berücksichtigt. Die Schubspannung in der Scherebene wurde aber um den Scherwiderstand des Rahmensystems korrigiert, der am leeren Rahmensystem zu $\tau_0 = 3 \text{ kN/m}^2$ bezogen auf die Fläche A_0 gemessen wurde.

Für den Probeneinbau in das geführte Rahmenschergerät wurde das Rahmensystem aus dem Grundkasten herausgenommen, der trockene Sand außerhalb der Belastungsvorrichtung locker in das Rahmensystem eingefüllt und dann wie bei den Versuchen mit dem CASAGRANDE-Grät unter einer kleinen Auflast ($\sigma \approx 14 \text{ kN/m}^2$) durch Vibration auf einer Schüttelmaschine verdichtet. Mit

der so verdichteten Probe wurde das Rahmensystem in den Grundkasten in der Belastungsmaschine stoßfrei wieder eingesetzt. Mit dem senkrechten Vorschub wurde die Belastungsplatte bis zum kraftschlüssigen Kontakt auf die Probenoberfläche aufgesetzt. Aus der beim Probeneinbau bestimmten Trockenmasse und der Probenhöhe nach dem Aufsitzen der Belastungsplatte (gemessen aus der Höhenlage der Belastungsplatte) ergab sich die Anfangsdichte der Probe zu Versuchsbeginn. Die Normalbelastung beim Abscheren wird bei diesen Geräten durch kontinuierliches Herunterfahren der Belastungsplatte mit dem senkrechten Vorschub unter Kontrolle der Stempelkraft aufgebracht. Das Steuerprogramm enthält hierfür eine Routine, mit der die senkrechte Kraft linear mit der Zeit bis zum eingestellten Höchstwert gesteigert wird. Auch während des Abscherens wird die senkrechte Kraft mittels des senkrechten Vorschubs geregelt. Wie bei den Versuchen mit den konventionellen Geräten wurde unter konstanter Kraft abgeschert. Als Abschergeschwindigkeit wurde ebenfalls $v=0,24$ mm/min gewählt. Die Messungen während des Abscherens und die Auswertung entsprechen dem oben für die Versuche mit konventionellen Geräten Gesagten.

Die Probekörper aus Sand für die Triaxialversuchen (Anfangsabmessungen $h_0 \approx d_0=100$ mm, Endflächen mit Schmierung) wurden hergestellt, indem der Sand trocken in einen mit der Gummihülle ausgekleideten, auseinandernehmbaren Stützzylinder eingefüllt und durch Vibration auf einem Rütteltisch auf unterschiedliche, vorgegebene Dichten verdichtet wurde. Diese Probekörper wurden im Stützzylinder in den Triaxialversuchsstand eingesetzt. Dort wurde über die Drainageleitungen ein leichter Unterdruck zur Stützung angelegt, der es dann erlaubte, den Stützzylinder zu entfernen. Nach vollständigem Zusammenbau der Zelle und Aufsetzen des Belastungsstempels wurden die Probekörper mittels Unterdruck mit Wasser gesättigt. Diese Wassersättigung wurde ausgeführt, um beim Abscheren die Volumenänderung wie beim üblichen D -Versuch über die am Messrohr in der Drainageleitung abzulesende aufgenommene bzw. abgegebene Wassermenge bestimmen zu können. Bei gedrunenen Probekörpern mit geschmierten Endflächen verläuft die Verformung im Triaxialversuch auch noch nach dem Peak besser homogen als bei den herkömmlichen schlanken Probekörpern mit rauen Endflächen.

4.3.2 Ergebnisse der Rahmenscherversuche

Die Ergebnisse der Rahmenscherversuche, dargestellt in den Anlagen 2.1 bis 2.5 zeigen qualitativ das Materialverhalten, welches für Sand aus genaueren Untersuchungen bekannt ist:

- Im Diagramm für die Schubspannung τ in Abhängigkeit vom Scherweg s (Diagramm a) wächst τ zu Beginn des Abscherens rasch mit s an, erreicht ein Maximum (Peak) und nimmt bei dichter Lagerung anschließend wieder ab, um in einen konstanten Wert überzugehen bzw. verharrt bei lockerer Lagerung auf einem konstanten Wert. Die relative Abnahme von s hängt von der Porenzahl e und von der Spannung σ ab.
- Die Probenhöhe H nimmt zu Beginn des Abscherens bei jeder Dichte zunächst ab, was anfängliche Kontraktanz anzeigt. Die Steigung der Kurven ΔH in Abhängigkeit von s (Diagramm b) nimmt mit zunehmendem s monoton zu bis zu einem Wendepunkt, der ungefähr mit dem Zustand des Peaks zusammenfällt. Dieser Punkt stellt den Zustand maximaler Dilatanz dar. Danach nimmt die Steigung bei dichter Lagerung monoton wieder ab bzw. verharrt bei lockerer Lagerung auf dem Wert Null. Die Steigung Null im Peak-Zustand zeigt einen kritischen Grenzzustand an.

Diese beiden Eigenschaften zeigen sich sowohl bei den Versuchen mit dem konventionellen CASAGRANDE-Gerät als auch bei demjenigen mit dem parallel geführten Gerät und bei den Versuchen mit reibungsarmer Beschichtung der Rahmeninnenflächen. Für den quantitativen Vergleich dienen die folgenden weitergehenden Auswertungen:

Von den Versuchen mit gleicher Anfangsporenzahl ($e_0 \approx 0,708$) unter verschiedenen Normalspannungen (Serien 1.1 bis 1.3) wurden die Schubspannungen am Peak τ_f in das τ, σ -Diagramm eingezeichnet (Anlagen 2.1 bis 2.3, Diagramm c). Durch diese Punkte wurde die Gl.(14) entsprechende Ausgleichsgerade durch den Nullpunkt gezeichnet; ihr Neigungswinkel ist definitionsgemäß der Reibungswinkel φ_s . Es ergaben sich folgende Werte:

- Serie 1.1: $\varphi_s = 34,4^\circ$ bis $36,9^\circ$ (die Versuchspunkte weichen relativ stark von einer gemeinsamen Ausgleichsgerade ab; deswegen werden ein oberer und ein unterer Wert für φ_s angegeben)
- Serie 1.2: $\varphi_s = 36,2^\circ$ (geringe Abweichungen von der Ausgleichsgeraden)
- Serie 1.3: $\varphi_s = 35,6^\circ$ (geringe Abweichungen)

Bei der Serie 1.1 gehört zu den Versuchen mit den größten Normalspannungen, $\sigma = 600$ und 700 kN/m² der kleinere Reibungswinkel. Ein Grund für diesen Unterschied in φ_s bei kleinen und großen Spannungen ist anhand der übrigen Ergebnisse dieser Serie nicht zu erkennen, es gibt keine grundsätzlichen Unterschiede im Dilatanzverhalten (s.u.).

Der Umstand, dass der Reibungswinkel φ_s bei der Serie 1.3 kleiner herauskommt als bei 1.2, kann durch die Reibungsverminderung an den seitlichen Rahmeninnenflächen begründet sein. Die ideale Randbedingung an diesen beiden Rändern ist Freiheit von Schubspannungen, $\tau_{yx} = \tau_{yz} = 0$. Von Null verschiedene Schubspannungen an diesen Rändern wirken als zusätzliche Stützung des Probekörpers, die den Scherwiderstand erhöht. Daher ist anzunehmen, dass das Ergebnis der Serie 1.3 das genauere ist.

Abgesehen von den nicht erkläraren Abweichungen innerhalb der Serie 1.1 sind die Unterschiede in den Ergebnissen aller drei Serien im Hinblick auf die Scherfestigkeit so gering, dass nicht geschlossen werden kann, dass eines der Geräte für praktische Zwecke nicht zu empfehlen sei. Die reibungsarme Beschichtung der seitlichen Rahmenflächen ist zu empfehlen, braucht aber nicht unbedingt gefordert zu werden.

Bei allen Versuchen der Serien 1.1 bis 1.3 zeigen die Proben im Grenzzustand (Peak) dilatantes Verhalten. Die Belastungsplatte wird dabei in Grenzzustand von der Probe angehoben. Weil sie sich beim konventionellen Gerät etwa mit der vollen Scherkraft T mit ihrer rückseitigen Kante gegen den oberen Rahmen abstützt, der nach oben nicht durch ein Auflager gehalten ist, nimmt sie den oberen Rahmen bei ihrer Aufwärtsbewegung mit, ohne dass dieser über sein Eigengewicht hinaus einen Widerstand dagegen setzt. Daher wird die resultierende senkrechte Kraft auf die Probe durch die Auflagerkraft der Belastungsplatte am Rahmen in diesem Fall nicht verfälscht. Dies ist die Erklärung für die gute Übereinstimmung der mit den verschiedenen Geräten gemessenen Reibungswinkel. Die Inhomogenität der Verformungen, die sich durch die Schrägstellung der Belastungsplatte des CASAGRANDE-Geräts während des Abscherens zeigt, hat offenbar nur wenig Einfluss auf die Größe des resultierenden Scherwiderstands und somit des Reibungswinkels.

Aus den Kurven ΔH über s der Versuchsreihen 1.1 bis 1.3 (Anlagen 2.1 bis 2.3 Diagramme b) wurde gemäß Gl.(1) $\tan v$ im Peak-Zustand graphisch bestimmt und daraus zum Vergleich mit den Ergebnissen der Triaxialversuche nach Gl.(11) die Dilatanzzahl $\tan \beta_\epsilon$ berechnet. Die Tabellen 2 bis 4 zeigen die Zahlenwerte. In Bild 1 sind die $\tan \beta_\epsilon$ -Werte in Abhängigkeit von σ' aufgetragen; die Versuchspunkte der gleichen Serie wurden durch eine Gerade bzw. gekrümmte Kurve ausgeglichen (es ist nicht bekannt, welche Gestalt diese ausgleichende Kurve haben müsste). Bei allen drei Serien nimmt $\tan \beta_\epsilon$ mit zunehmender Spannung σ' monoton ab, wie es sein muss. Es fällt aber auf, dass die $\tan \beta_\epsilon$ -Werte aus dem CASAGRANDE-Gerät (Serie 1.1) bei gleichem σ jeweils größer sind als diejenigen aus dem Gerät mit Parallelführung (Serien 1.2 und 1.3). Außerdem ist $\tan \beta_\epsilon$ aus dem geführten Gerät mit reibungsarm beschichteten (Serie 1.3) geringfügig kleiner als mit unbeschichteten Rahmeninnenflächen (Serie 1.2). Anhand dieser Versuchswerte allein lässt sich nicht zuverlässig beurteilen, welches Versuchsgerät und welche Versuchsbedingungen die zutreffendsten Werte für die Dilatanz ergeben. Die Ergebnisse scheinen zu zeigen, dass $\tan \beta_\epsilon$ unter sonst gleichen Bedingungen umso kleiner herauskommt, je genauer die Randbedingungen für eine homogene Scherfuge erfüllt sind (bei Serie 1.3 genauer als bei 1.2, bei 1.2 genauer als bei 1.1).

Versuch Nr.	σ' [kN/m ²]	$\tan v$	v (°)	$\tan \beta_\epsilon$
1	100	0,25	14,0	0,195
2	200	0,21	11,9	0,167
3	300	0,195	11,0	0,155
4	400	0,200	11,3	0,159
5	500	0,157	8,95	0,126
6	600	0,116	6,65	0,094
7	700	0,0825	4,7	0,067

Tabelle 2: Versuchs-Serie 1.1, $e_0=0,708$. Dilatanzwinkel und Dilatanzzahl im Grenzzustand

Versuch Nr.	σ' [kN/m ²]	$\tan v$	v (°)	$\tan \beta_\epsilon$
1	100	0,21	11,86	0,167
2	100	0,20	11,31	0,159
3	200	0,135	7,69	0,109
4	200	0,13	7,41	0,105
5	400	0,115	6,56	0,093
6	400	0,17	9,65	0,136
7	600	0,085	4,86	0,069
8	600	0,080	4,57	0,065
9	800	0,075	4,29	0,061
10	800	0,070	4,00	0,057

Tabelle 3: Versuchs-Serie 1.2, $e_0=0,708$. Dilatanzwinkel und Dilatanzzahl im Grenzzustand

Versuch Nr.	σ' [kN/m ²]	tan v	v (°)	tan β_ϵ	Beschichtung
1	100	0,180	10,20	0,144	Teflon
2	100	0,180	10,20	0,144	Teflon
3	100	0,180	10,20	0,144	Silikonfett und Gummi
4	400	0,08	4,57	0,065	Teflon
5	400	0,08	4,57	0,065	Teflon
6	400	0,11	6,28	0,089	Silikonfett und Gummi
7	800	0,06	3,43	0,049	Teflon
8	800	0,065	3,72	0,053	Teflon
9	800	0,070	4,00	0,057	Silikonfett und Gummi

Tabelle 4: Versuchs-Serie 1.3, $e_0=0,708$. Dilatanzwinkel und Dilatanzzahl im Grenzzustand

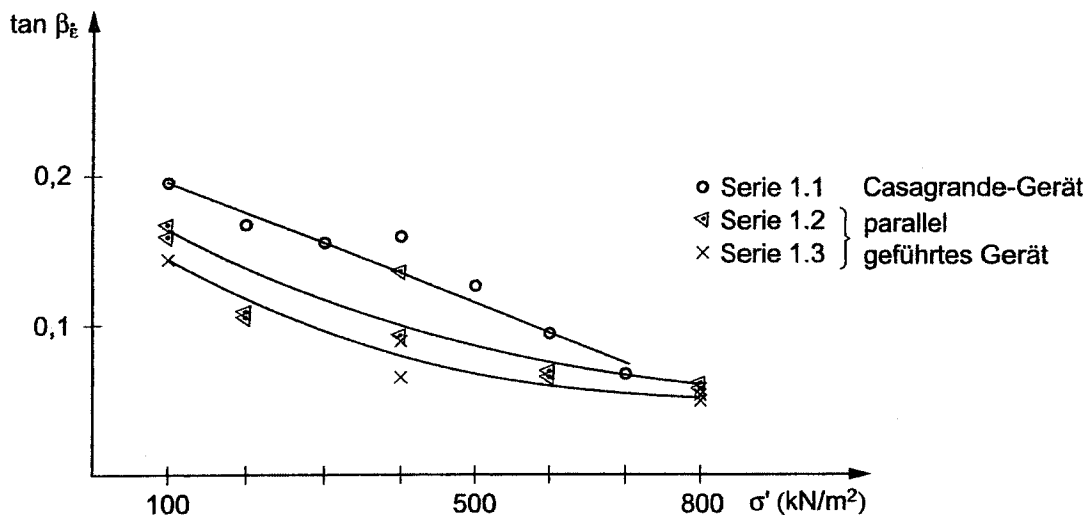


Bild 1: Rahmenscherversuche an Mittelsand mit gleicher Anfangsporenzahl ($e_0=0,708$). Dilatanzwinkel im Grenzzustand in Abhängigkeit von der Spannung.

Die Unterschiede in den Dilatanzzahlen aus den verschiedenen Versuchsserien sind aber nicht so bedeutend, dass deswegen eines der Geräte als weniger geeignet beurteilt werden müsste. Denn das Vorzeichen kommt übereinstimmend heraus, und die Dilatanzzahl geht im Regelfall nicht explizit in Standsicherheitsberechnungen ein, für welche Rahmenscherversuche benutzt werden.

Von den Rahmenscherversuchen an Sandproben mit verschiedener Anfangsporenzahl e unter der gleichen Normalspannung $\sigma'=400$ kN/m² (Serie 1.4 und 1.5) wurde zunächst wie in DIN 18137-3 die Schubspannung am Peak τ_f über e aufgetragen und durch die Versuchspunkte eine ausgleichende Kurve gezeichnet (Anlagen 2.4 und 2.5 Diagramme d). Aus den Verhältniswerten τ_f/σ wurde gemäß Gl.(14) $\tan\phi_s$ bestimmt. Zum Vergleich der Ergebnisse untereinander und mit denjenigen aus den Triaxialversuchen wurde $\sin\phi_s = \sin(\arctan(\tau_f/\sigma))$ in Abhängigkeit von e aufgetragen (Tabelle 5 und 6, Bilder 2 und 3). Durch die Versuchspunkte ließ sich bei Serie 1.4 eine ausgleichende Gerade, bei Serie 1.5 eine S-förmige Kurve zeichnen. Ob eine Gerade zutrifft

bzw. welche Form diese Kurve haben müsste, ist nicht bekannt. In Bild 4 sind beide Kurven in dasselbe Diagramm gezeichnet. Aus den Auftragungen geht hervor, dass sich die $\sin \varphi_s$ -Werte aus den verschiedenen Geräten nur im Bereich großer Porenzahlen deutlich unterscheiden, und zwar sind die Werte aus dem geführten Gerät die größeren. Zum Beispiel ergab sich für $e=0,815$ mit dem geführten Gerät $\varphi_s \approx 33,6^\circ$ und mit dem CASAGRANDE-Gerät $\varphi_s \approx 31,3^\circ$. Dieser Unterschied kann außer auf Streuungen auch darauf zurückzuführen sein, dass Inhomogenität der Verformung grundsätzlich eine Verminderung des resultierenden größten Scherwiderstands zur Folge hat. Im CASAGRANDE Gerät ist wahrscheinlich bei lockerer Probe die Verformung weniger gleichmäßig als im geführten Gerät und daher die resultierende maximale Scherkraft T_f und damit die durchschnittliche größte Scherspannung τ_f kleiner. Die Unterschiede in τ_f und φ_s sind aber im Bereich mittlerer und kleiner Porenzahlen so klein, dass beide Geräte für die Bestimmung von φ_s in Abhängigkeit von e bei Sand als etwa gleichwertig angesehen werden können.

Versuch Nr.	e_0	$\tan v$	$v(^{\circ})$	$\tan \beta_{\epsilon}$	$\sin \varphi'$	$\varphi'(^{\circ})$
1	0,8155	0	0	0	0,5198	31,3
2	0,8608	0	0	0	0,5315	32,1
3	0,8044	0	0	0	0,5232	31,5
4	0,7897	0,022	1,26	0,018	0,5374	32,5
5	0,7897	0,036	2,06	0,029	0,5524	33,5
6	0,7635	0,084	4,80	0,068	0,5672	34,5
7	0,6978	0,18	10,20	0,144	0,6055	37,3
8	0,6743	0,23	12,95	0,181	0,6294	39,0
9	0,6735	0,25	14,04	0,224	0,6374	39,6
10	0,6382	0,32	17,74	0,245	0,6645	41,6

Tabelle 5: Versuchsserie 1.4: Rahmenscherversuche an Mittelsand, parallel geführtes Gerät, verschiedene Anfangsporenzahlen, gleiche Normalspannung $\sigma' = 400 \text{ kN/m}^2$

Versuch Nr.	e_0	$\tan v$	$v(^{\circ})$	$\tan \beta_{\epsilon}$	$\sin \varphi'$	$\varphi'(^{\circ})$
1	0,8619	0	0	0	0,540	32,69
2	0,8178	0,013	0,745	0,011	0,554	33,62
3	0,7769	0,032	1,833	0,026	0,565	34,41
4	0,7341	0,092	5,256	0,075	0,585	35,84
5	0,7077	0,114	6,503	0,092	0,600	36,89
6	0,6765	0,200	11,31	0,159	0,622	38,45
7	0,6324	0,280	15,64	0,217	0,659	41,27
8	0,5926	0,260	14,57	0,203	0,682	42,98
9	0,5811	0,250	14,04	0,196	0,688	43,49
10	0,5584	0,300	16,70	0,231	0,691	43,73

Tabelle 6: Versuchsserie 1.5: Rahmenscherversuche an Mittelsand, parallel geführtes Gerät, verschiedene Anfangsporenzahlen, gleiche Normalspannung $\sigma' = 400 \text{ kN/m}^2$

In den Bildern 5 und 6 sind die Dilatanzahlen $\tan \beta_{\epsilon}$ nach Gl.(11) in Abhängigkeit von e nach den Ergebnissen der Serien 1.4 und 1.5 aufgetragen. Durch die Versuchspunkte ist jeweils eine ausgleichende Gerade gezeichnet. In Bild 7 sind die Versuchspunkte und Ausgleichgeraden ge-

meinsam in ein Diagramm eingezeichnet. Aus den Auftragungen geht wieder wie aus Bild 1 hervor, dass außer im Bereich großer Porenzahlen, wo $\tan \beta_e$ nahe am Wert Null liegt, $\tan \beta_e$ bei gleicher Porenzahl im geführten Gerät kleiner herauskommt als im CASAGRANDE-Gerät. Der Schnittpunkt der Ausgleichsgeraden liegt ungefähr im Punkt $e=0,80$, $\tan \beta_e=0$, was besagt, dass die kritische Porenzahl in beiden Geräten etwa gleich herauskommt, nämlich zu $e_k \approx 0,80$. Die Unterschiede in $\tan \beta_e$ für $e > 0,80$ zwischen den beiden Geräten sind für die meisten erdstatischen Berechnungen bedeutungslos.

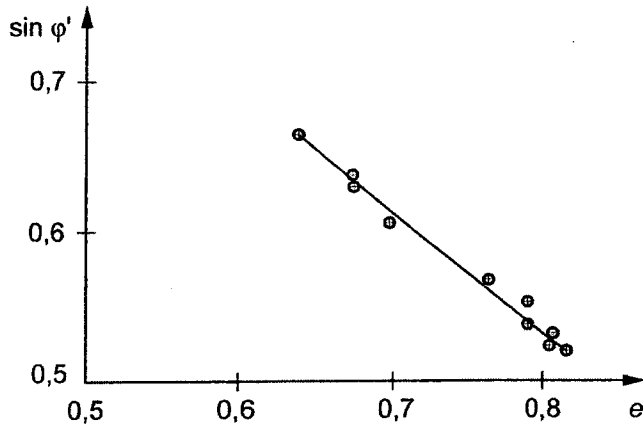


Bild 2: Rahmenscherversuche an Sand mit verschiedenen Anfangsporenzahlen unter gleicher Normalspannung, Casagrande-Gerät (Serie 1.4).

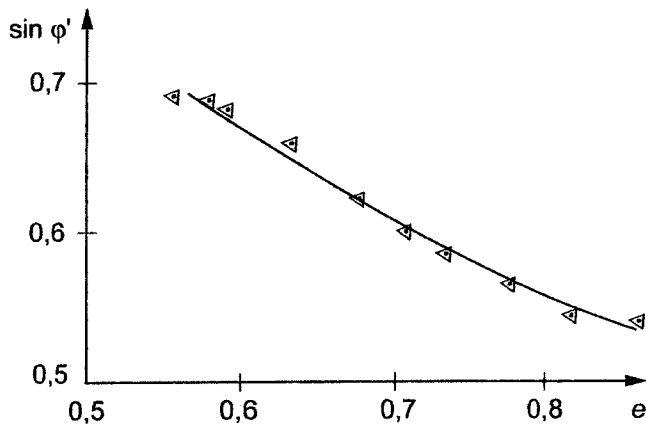


Bild 3: Rahmenscherversuche an Sand mit verschiedenen Anfangsporenzahlen unter gleicher Normalspannung, parallel geführtes Gerät (Serie 1.5).

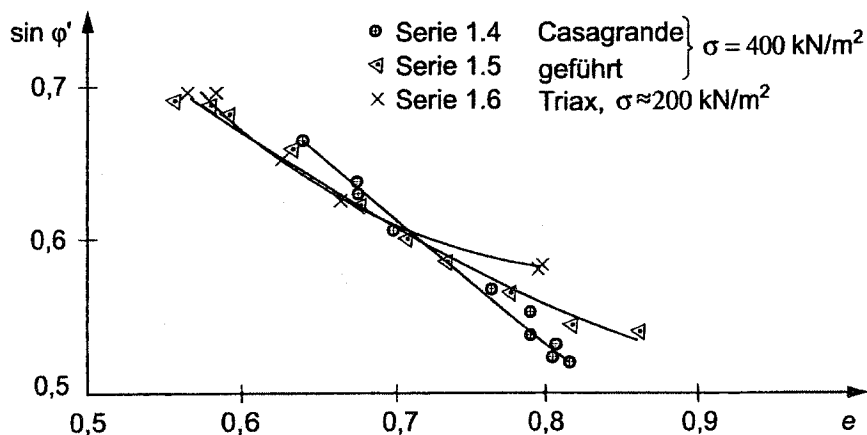


Bild 4: Scherversuche an Sand mit verschiedenen Anfangsporenzahlen

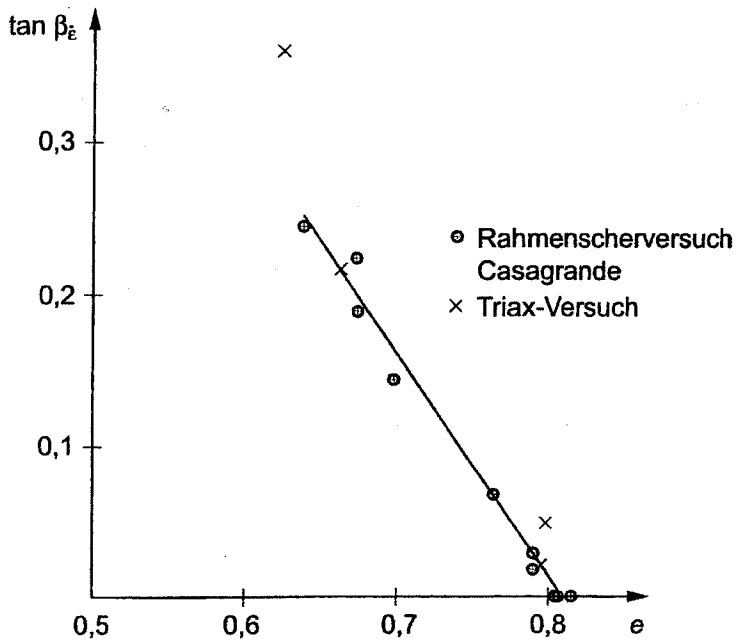


Bild 5: Rahmenscherversuche an Sand mit verschiedenen Anfangsporenzahlen unter gleicher Normalspannung, Casagrande-Gerät.

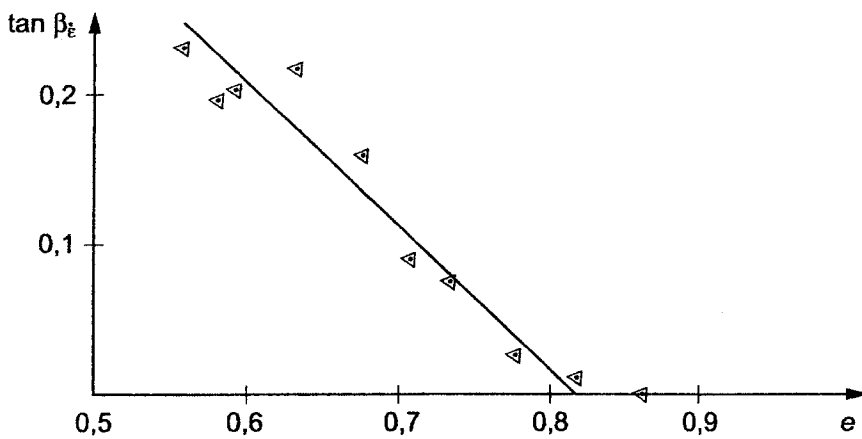


Bild 6: Rahmenscherversuche an Sand mit verschiedenen Anfangsporenzahlen unter gleicher Normalspannung, parallel geführtes Gerät (Serie 1.5).

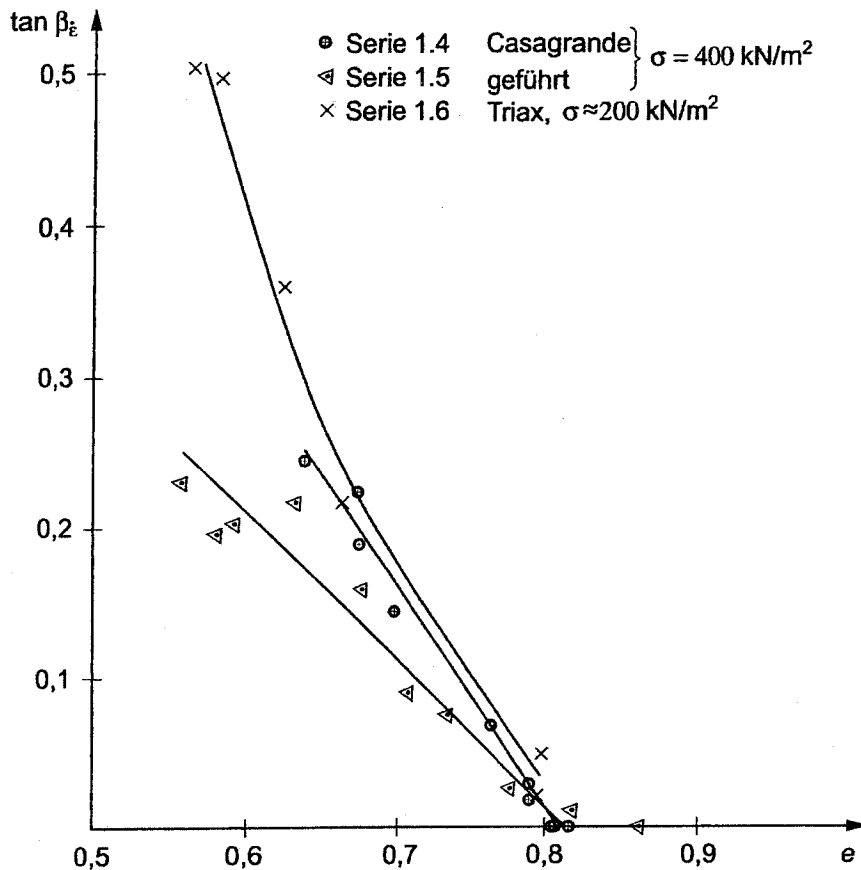


Bild 7: Rahmenscherversuche an Sand mit verschiedenen Anfangsporenzahlen e unter gleicher Spannung, Dilatanzzahlen im Grenzzustand in Abhängigkeit von e .

4.3.3 Ergebnisse der Triaxialversuche

Die Triaxialversuche wurde als D -Versuche an wassergesättigten Probekörpern mit verschiedenen Porenzahlen unter folgenden Versuchsbedingungen durchgeführt:

- Konsolidation isotrop unter dem Zellendruck $\sigma_3 = 420 \text{ kN/m}^2$ und dem Sättigungsdruck $u_0 = 300 \text{ kN/m}^2$, das heißt unter dem effektiven isotropen Druck $\sigma'_3 = \sigma'_1 = 120 \text{ kN/m}^2$.
- Abscheren dräniert unter $\sigma_3 = \text{const.} \approx 420 \text{ kN/m}^2$, $u_0 = \text{const} \approx 300 \text{ kN/m}^2$, das heißt $\sigma'_3 = \text{const} \approx 120 \text{ kN/m}^2$ durch axiale Stauchung mit der Vorschubgeschwindigkeit $v = 10 \text{ mm/Stunde}$.

Die Ergebnisse sind in der üblichen Weise in Anlage 2.6 dargestellt. Sie zeigen ebenfalls qualitativ das oben beschriebene und bekannte Verhalten, in diesem Fall bezüglich der Entwicklung von $\sigma_1 - \sigma_3$ und der relativen Volumenänderung $\Delta V/V_0$ mit der axialen Stauchung ϵ_1 (Diagramme a und b). Dies ist nicht anders zu erwarten, da die Versuchsanlage einwandfrei ist und reibungsarme Endflächen bei gedrungener Form des Probekörpers ziemlich homogene zylindrische Verformung auch noch nach dem Peak zur Folge haben. Die Versuche sind daher bis auf die systematischen mechanischen Unterschiede zwischen zylindrischer Verformung und ebener Scherung (siehe Abschnitt 3) für den Vergleich mit den Rahmenscherversuchen geeignet. Für den quantitativen Vergleich wurden folgende weitergehende Auswertungen vorgenommen:

Die Spannungen im Zustand mit dem Maximum von $\sigma_1 - \sigma_3$ (Peak-Zustände, siehe markierte Punkte auf den Kurven in Diagramm a von Anlage 2.6) entsprechen im $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2, (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ -Diagramm (Diagramm c von Anlage 2.6) den äußersten Punkten der effektiven Spannungspfade, die wegen $\sigma'_3 = const$ die Steigung=1 besitzen und vom gleichen Punkt auf der Abszisse ausgehen. Diese markierten Punkte stellen zugleich die Zustände mit maximalem Spannungsverhältnis dar, durch welches der Reibungswinkel φ' nach Gl.(12) definiert wird. Aus den Versuchswerten wurde berechnet:

$$\sin \varphi' = \tan \alpha' = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \Big|_f \quad (19)$$

wobei f Peak-Zustand bedeutet.

Die so erhaltenen $\sin \varphi'$ -Werte (siehe Tabelle 7) sind in Abhängigkeit von der Anfangsporenzahl e in Bild 8 und zum Vergleich mit den Rahmenscherversuchen auch in Bild 4 aufgezeichnet und durch eine ausgleichende Kurve verbunden. Die Auftragung in Bild 4 zeigt, dass die $\sin \varphi'$ -Werte aus den Triaxialversuchen im Bereich von Porenzahlen $e < 0,7$ ziemlich genau mit den Werten aus den Rahmenscherversuchen mit dem geführten Gerät übereinstimmen. Für $e > 0,7$ sind die $\sin \varphi'$ -Werte nach Gl.(19) aus den Triaxialversuchen größer als die $\sin \varphi'_s$ -Werte nach Gl.(14) aus den Rahmenscherversuchen. Zum Beispiel liest man aus der Kurve in Bild 8 zu $e=0,708$ den Wert $\sin \varphi'=0,608$ ab, also $\varphi'=37,4^\circ$. Bei der Versuchsserie 1.3 dagegen wurde bei der gleichen Porenzahl mit dem geführten Rahmenscherggerät $\varphi'_s=35,6^\circ$ erhalten. Sowohl die Übereinstimmung von φ'_s und φ' im Bereich $e < 0,7$, als auch der Unterschied zwischen den beiden Größen im Bereich $e > 0,7$ sind im Einklang mit den Gleichungen (15), (16) und (18). Die Ergebnisse zeigen also, dass Rahmenscherversuche zur Bestimmung der Scherfestigkeit von Sand im Prinzip ebenso gut geeignet sind wie Triaxialversuche. Die Unterschiede in den erhaltenen Reibungswinkeln φ'_s bzw. φ' sind durch die verschiedenen Verformungsmoden – Scherfuge bzw. Bruchzone – zu erklären und lassen nicht auf den Einfluss von Imperfektionen des Versuchsgeräts schließen.

e	$\sin \varphi'$	$\varphi'(^{\circ})$	ε_{vf} [%]	$d\varepsilon_v / d\varepsilon_1 \Big _f$	$\tan \beta_{ef}$	$\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$	$\sigma' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \cos^2 \varphi'$ [kN/m ²]
0,566	0,696	44,1	3,0	0,83	0,540	416,6	214,8
0,584	0,696	44,1	3,5	0,78	0,497	417,4	215,2
0,625	0,652	40,7	2,3	0,61	0,360	359,1	206,4
0,663	0,625	38,7	2,0	0,40	0,217	336,2	204,8
0,795	0,580	35,4	0,3	0,06	0,029	302,7	201,1
0,798	0,583	35,7	0,3	0,10	0,049	296,4	195,5

Tabelle 7: Versuchsserie 1.6: D-Triaxialversuche an Mittelsand mit verschiedenen Einbaudichten

Aus den Kurven $\Delta V/V_0$ in Abhängigkeit von ε_1 (Diagramme b von Anlage 2.6) wurde nach Gl.(7) $\tan \beta_e$ im Peak-Zustand berechnet (siehe Tabelle 7) und in Bild 9 und 7 über e aufgetragen; durch die Versuchspunkte wurde eine Ausgleichskurve gezeichnet. An der Auftragung in Bild 7, wo auch die entsprechenden Kurven aus den Rahmenscherversuchen dargestellt sind,

erkennt man, dass im Bereich grosser Porenzahlen ($e > 0,75$) die Kurve aus den Triaxialversuchen ungefähr mit denjenigen aus den Rahmenscherversuchen zusammenfällt und alle Kurven hier den Wert Null erreichen. Alle Versuchsgeräte ergeben also den gleichen Wert für die kritische Porenzahl, $e_x \approx 0,80$ bis $0,85$. Je kleiner die Porenzahl ist, umso mehr unterscheiden sich aber $\tan \beta_e$ aus Triaxial- und Rahmenscherversuchen, und zwar ist $\tan \beta_e$ aus Triaxialversuchen größer als aus Rahmenscherversuchen. Auch dieser Unterschied ist nicht auf Imperfektionen der Rahmenschervergeräte zurückzuführen, sondern ist ein Teil des Materialverhaltens und durch die verschiedenen Verformungsmethoden bedingt. Außerdem ist zu beachten, dass das Druckniveau bei den Rahmenscherversuchen der Serien 1.4 und 1.5 mit $\sigma = 400 \text{ kN/m}^2$ in der Scherfuge größer war als bei den Triaxialversuchen der Serie 1.6 unter $\sigma'_3 \approx 120 \text{ kN/m}^2$. Mit der Normalspannung σ im Rahmenscherversuch ist die Normalspannung σ' in der Richtung mit maximalem Spannungsverhältnis $\max(\tau / \sigma) = \tan \varphi'$ im Peak-Zustand beim Triaxialversuch zu vergleichen; diese berechnet sich nach der Formel

$$\sigma' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \cos^2 \varphi' \quad (20)$$

und beträgt bei den Versuchen der Serie 1.6 etwa 195 bis 215 kN/m^2 (siehe Tabelle 7) und damit nur rund 50% der eingprägten Normalspannung bei den Rahmenscherversuchen. Die Folge des geringeren Drucks ist eine größere Dilatanzzahl, wie man an Bild 4 erkennt.

Auch im Hinblick auf die Untersuchung des Dilatanzverhaltens von Sand erweisen sich also Rahmenscherversuche nicht als ungeeignet.

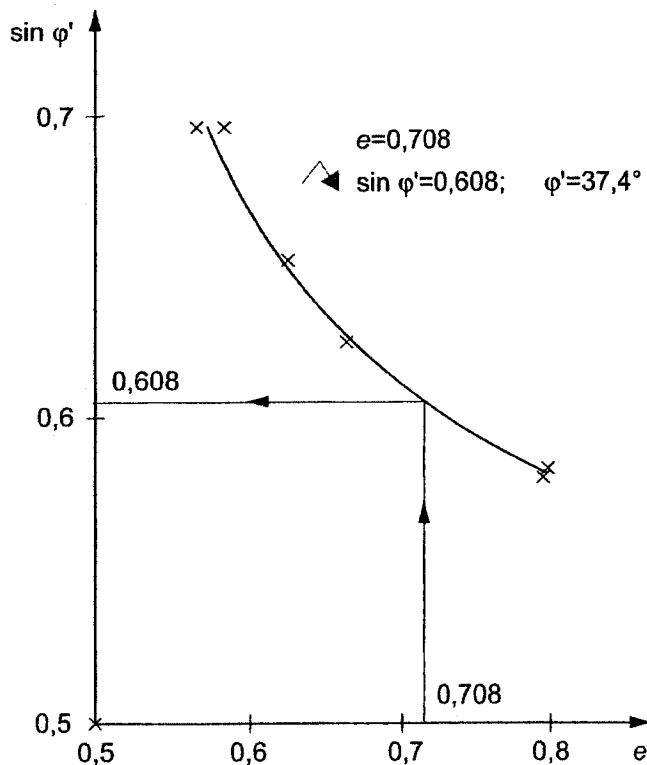


Bild 8: Ergebnisse der D -Triaxialversuche an Sand mit verschiedenen Anfangsporenzahlen e (Serie 1.6).

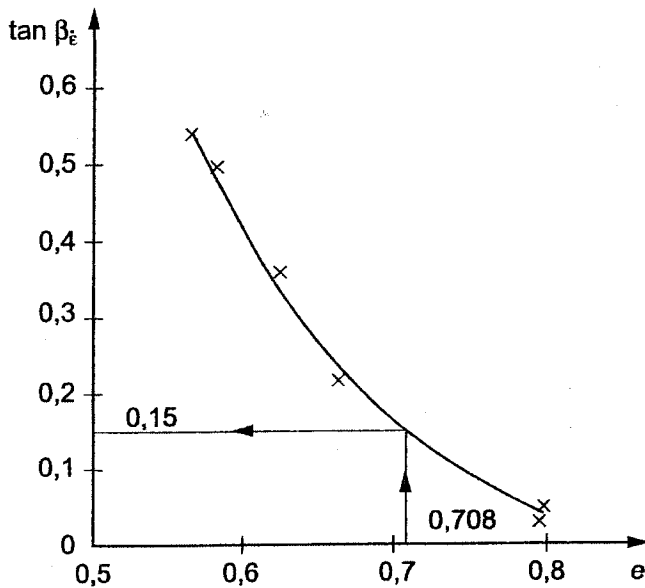


Bild 9: Dilatanzzahl $\tan \beta_\epsilon$ in Abhängigkeit von der Porenzahl nach den Triaxialversuchen an Sand (Serie 1.6).

4.4 Scherversuche an Schluff (Versuchsserien 2.1 bis 2.4)

4.4.1 Probeneinbau und Konsolidierung

Der zu flüssiger Konsistenz aufbereitete Boden wurde ohne Verdichtung in gleichmäßiger Höhe in den Scherrahmen (60x60 mm) eingestrichen.

Bei den konventionellen Rahmen wurde der Boden sodann zuerst unter einer sehr kleinen Normalspannung konsolidiert, die so klein gewählt wurde, dass der flüssige Boden nicht durch den Spalt zwischen Kopfplatte und Rahmen ausgequetscht wurde. Dann wurde die Spannung wie bei einem Kompressionsversuch in Stufen jeweils verdoppelt bis zu der Spannung σ'_m bzw. σ'_c , unter der der Boden schließlich konsolidiert werden sollte. Um die Mindestdauer vor allem der letzten Laststufe und die zulässige Abschergeschwindigkeit zu bestimmen, wurde bei einer Laststufe der zeitliche Setzungsverlauf gemessen und in einem Diagramm mit der Zeitskala im Wurzelmaßstab aufgetragen (Anlage 3). Daraus wurde mit der in DIN 18137-3 Bild 3 und 8 angegebenen Konstruktion nach Taylor die Zeit t_{90} für den Konsolidierungsgrad $U = 90\%$ und daraus wiederum t_{100} grafisch ermittelt. Es ergibt sich $t_{90} \approx 15$ s und $t_{100} \approx 36$ s. Danach hätte man die Belastung etwa alle Minute verdoppeln können. Tatsächlich wurde die Belastung etwa alle zwei bis drei Stunden verdoppelt, was allein durch die Laborgewohnheiten begründet ist. Die letzte Laststufe σ'_m bzw. σ'_c , unter der die Probe zu konsolidieren war, wurde bei den konventionellen Geräten nach der Empfehlung in DIN 18137-3 24 Stunden aufrecht gehalten, bevor die Proben abgeschert bzw. vor dem Abscheren von σ'_m auf σ' entspannt wurden.

Bei den Versuchen mit dem parallel geführten Gerät wurde die Konsolidationsspannung wegen der Steuertechnik der Belastungsvorrichtung nicht in Stufen, sondern mit geregelter Vorschubgeschwindigkeit der Belastungsplatte aufgebracht. Diese Vorschubgeschwindigkeit wurde vom Gerät so geregelt, dass die Spannung mit konstanter Rate innerhalb einer gewählten Zeit bis zum vorgegebenen Höchstwert, nämlich σ'_m bzw. σ'_c gesteigert wurde. Als Zeit der Laststeigerung wurde 14 Stunden eingestellt. Danach wurde die Spannung zur Konsolidierung zwei Stunden

lang konstant gehalten. Die Proben waren also bei diesem Versuch nur noch zwei statt 24 Stunden konsolidiert. Weil aber zwei Stunden Konsolidierungszeit bei diesem Boden mit einer Primärkonsolidationszeit von 36 s schon dem 200-fachen der Zeit der Primärkonsolidierung oder 2,3 Zeitdekaden entspricht, ist die Abnahme der Porenzahl durch Sekundärkonsolidierung von zwei Stunden bis 24 Stunden so klein, dass hieraus kein messbarer Unterschied in der Scherfestigkeit zu erwarten ist. Trotz der unterschiedlichen Durchführung der Konsolidierung sind die Proben in den konventionellen Geräten und im geführten Gerät zu Beginn des Abscherens also als gleichartig anzusehen. Der sparsame Umgang mit der Konsolidierungszeit war wegen der Belegungszeit des Geräts notwendig und ist auch in der Norm aus Gründen der Wirtschaftlichkeit der Versuche anzustreben.

Die Proben, die überkonsolidiert abgeschert werden sollten, wurden unter der Spannung $\sigma'_m = 800 \text{ kN/m}^2$ in der beschriebenen Weise konsolidiert und dann auf verschiedene Spannung σ' von 50 bis 600 kN/m^2 entspannt. Nach der Entspannung wurde zum Abbau des Porenwasserunterdrucks 30 Minuten bis zum Starten des Abscherens gewartet (auch diese Zeit hätte bei diesem Boden kürzer gewählt werden dürfen). Die normalkonsolidiert abzuscherenden Proben wurden unter verschiedener Spannung σ'_c von 100 kN/m^2 bis 800 kN/m^2 konsolidiert und unter der gleichen Spannung abgeschert. Mit Ausnahme eines Einzelversuchs wurde mit jeder Kombination von Spannungen σ'_m und σ' bzw. jeder Konsolidationsspannung σ'_c zwei Versuche mit jedem Gerätetyp durchgeführt.

4.4.2 Versuche mit dem konventionellen Gerät

Als Abschergeschwindigkeit wurde bei beiden Gerätetypen und allen Schluffproben einheitlich $v = 0,033 \text{ mm/min}$ gewählt. Damit wurde die Empfehlung nach DIN 18137-3 Tabelle 1 erfüllt.

Normalkonsolidierte Proben (Serie 2.1)

Anlage 4.1 und 4.2 zeigen die Ergebnisse der Rahmenscherversuche mit dem konventionellen Gerät an den normalkonsolidierten Schluffproben. Die τ, s -Kurven (Diagramm a) haben einheitlich die Form, die für normalkonsolidierte bindigen Böden bekannt ist: τ nimmt mit s monoton zu bis zu einem Höchstwert τ_f und bleibt dann annähernd konstant. Die Kurvenform gleicht derjenigen bei lockerem Sand. Die Form der $\Delta H, s$ -Kurven (Diagramm b) hängt dagegen deutlich von der Größe der Normalspannung σ' ab. Bei kleinerer Normalspannung zeigen die Kurven im Grenzzustand Dilatanz ($\delta H / \delta s$ positiv, Versuche 1 bis 3), bei großer Normalspannung Volumenkonstanz bis Kontraktanz (Versuche 5 bis 8). Es fällt aber auf, dass sowohl die τ, s -Kurven, als auch die $\Delta H, s$ -Kurven bei Versuchspaaren mit gleicher Normalspannung σ' in den meisten Fällen deutlich verschieden sind. Dagegen sind die Peak-Werte für die Scherspannung τ_f bei gleicher Spannung σ' bei drei der vier Versuchspaare fast identisch (Diagramme a und c). Im Hinblick auf Verformungen streuen die Ergebnisse offenbar mehr als im Hinblick auf Spannungen.

Im σ', τ -Diagramm (Diagramm c, Anlage 4.1) sind wieder die Peak-Werte τ_f eingezeichnet. Die ausgleichende Gerade (Schergerade) ist durch den Nullpunkt zu legen, weil der Boden normalkonsolidiert ist. Der Neigungswinkel dieser Geraden ist der Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s nach DIN 18137-1 Ziff. 3.35.2.4 und ergibt sich zu

$$\varphi'_s = 34,5^\circ$$

Die größte relative Abweichung eines Versuchspunkts von dieser Schergeraden ist $|\Delta\tau/\tau| = 4,4\%$. Diese Abweichung erscheint nicht ungewöhnlich; es ist aber zu beachten, dass sich der Boden bei den Versuchen 5 bis 8 bis zum Grenzzustand kontraktant verhält. Dabei bewegt sich die obere Belastungsplatte relativ zum oberen Rahmen nach unten und überträgt daher wegen ihrer horizontalen Abstützung gegen diesen Rahmen einen Teil ihrer senkrechten Kraft durch Reibung auf den oberen Rahmen statt auf den Probenkörper. Der obere Rahmen seinerseits überträgt diese Kraft in der Rahmenfuge auf den unteren Rahmen, wodurch dort statt im Boden ein Reibungswiderstand erzeugt wird. Durch dieses Normalkraftdefizit und den Reibungswiderstand zwischen den Rahmen können die Scherwiderstände des Bodens bei den Versuchen 5 bis 8 verfälscht sein. Die Abweichung der Peak-Werte der Versuche 7 und 8 könnte durch diesen Effekt bedingt sein, und der Neigungswinkel φ'_s der Ausgleichsgeraden kann nach oben oder unten verfälscht sein.

Bei den Scherversuchen mit normalkonsolidiertem Schluff wurde auch die Kippbewegung der Kopfplatte während des Abscherens gemessen (Anlage 4.2). Dazu wurde ein Weggeber auf einen kleinen Hebelarm gesetzt, der an der Kopfplatte befestigt wurde. Die Messungen ergaben, dass die Drehung sofort mit dem Beginn des Abscherens einsetzt. Die Kipprate (Steigung der Kurven in Anlage 4.2) ist zu Beginn am größten und nimmt mit dem Scherweg monoton ab, ohne auf dem gesamten ausgeführten Scherweg von 10 mm den Wert Null zu erreichen.

Diese Kippung ist durch die Lagerung der Kopfplatte beim CASAGRANDE-Gerät zu erklären, die nicht den statischen Randbedingungen einer homogenen Scherung entspricht. Sie war der Anlass für die Entwicklung geführter Rahmenschergeräte; denn man befürchtete, dass durch die Kippung auch die Scherparameter verfälscht werden könnten.

Überkonsolidierte Proben (Serie 2.3)

Die Entwicklung der Scherspannung τ mit dem Scherweg s verläuft bei den beim Abscheren überkonsolidierten Schluffproben (Anlage 4.3, Diagramm a) ähnlich wie bei den normalkonsolidierten (vgl. Anlage 4.1, Diagramm a): τ wächst monoton, aber mit abnehmender Rate bis zu einem Peak; die Entfestigung nach dem Peak ist gering. Das durch die $\Delta H, s$ -Kurven in Diagramm b von Anlage 4.3 dargestellte Dilatanzverhalten bei den überkonsolidierten Proben hängt deutlich vom Konsolidierungsverhältnis σ'_m / σ' ab: In allen Versuchen strebt der Zustand gegen einen kritischen Grenzzustand, erkennbar an der waagerechten Tangente. Die Proben mit $\sigma' / \sigma'_m \leq 100/800$ verhalten sich bis zum kritischen Grenzzustand dilatant (H nimmt monoton zu), die Proben mit $\sigma' / \sigma'_m = 300/800$ von Anfang an volumenkonstant ($\Delta H \equiv 0$) und die Proben mit $\sigma' / \sigma'_m \geq 600/800$ wie die normalkonsolidierten Proben bei entsprechender Spannung σ' kontraktant (H nimmt monoton ab).

Aus diesen Versuchsergebnissen wurden die Scherparameter φ' und c' der Grenzbedingung für die größte Scherfestigkeit des überkonsolidierten Bodens nach DIN 18137-1 Ziff. 3.35.2.1 bestimmt, indem die Peak-Werte τ_f über σ' aufgetragen wurden (Diagramm c, Anlage 4.3). Durch diese σ', τ_f -Punkte war eine ausgleichende Gerade zu legen, die auf der τ -Achse eine positive Kohäsion c' abschneiden sollte; der Neigungswinkel ist φ' . Es ergab sich

$$\begin{aligned}\varphi' &= 33,8^\circ \\ c' &= 10,2 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

c' ist proportional zur Konsolidationsspannung σ'_m ; der Proportionalitätsfaktor ist die Kohäsionskonstante λ'_{cs} nach DIN 18137-1 Gl. (9):

$$\lambda'_{cs} = c' / \sigma'_m = 10,2/800 = 0,0128$$

Die relativen Abweichungen der gemessenen τ_f -Werte von der Ausgleichsgeraden sind $|\Delta\tau/\tau| \leq 6\%$.

Es kommt bei den Versuchen mit dem konventionellen Gerät richtig heraus, dass der Reibungswinkel φ' der überkonsolidierten Proben kleiner ist als der Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s der normalkonsolidierten Proben (Anlage 4.3c).

Wie bei den Versuchen an Sand ist das Scherverhalten des Schluffs, wie es durch die Versuche mit dem konventionellen Gerät festgestellt wurde, im Einklang mit dem, was über derartige Böden aufgrund wissenschaftlicher Untersuchungen mit Triaxialversuchen bekannt ist. Auch die offensichtlichen Streuungen der Versuchsergebnisse sind nicht ungewöhnlich groß.

4.4.3 Versuche mit dem parallel geführten Gerät

Normalkonsolidierte Proben (Serie 2.2)

Die Kurven für die Entwicklung der Scherspannung τ (Anlage 5.1 Diagramme a) und der Höhenänderung (Setzung) ΔH mit dem Scherweg s (Anlage 5.1 Diagramm b) der normalkonsolidierten Schluffproben stimmen in der Form und in der Größe von τ ziemlich genau mit den entsprechenden Versuchskurven aus den konventionellen Geräten überein (vgl. Anlage 4.1). Aber die s, τ -Kurven von Versuchspaaren mit gleicher Normalspannung σ' sind bei den Versuchen mit dem geführten Gerät besser deckungsgleich (vgl. Anlage 5.1 und Anlage 4.1, Diagramme a). Dagegen gibt es bei den Kurven für die Höhenänderung in Abhängigkeit vom Scherweg ebenso wie bei den Versuchen mit dem konventionellen Gerät deutliche Unterschiede zwischen Versuchen mit gleicher Spannung. Eine Erklärung für die Unterschiede ist nicht bekannt; das Fehlen der Gewichtskompensation für den oberen Rahmen bei einem der Versuche erklärt die Abweichung vom Parallelversuch nicht. Offenbar streuen auch bei Versuchen mit dem geführten Gerät abhängige Verformungsgrößen mehr als abhängige Spannungen. Außerdem ist festzustellen, dass die Höhenänderungen bei den Versuchen mit dem geführten Gerät bei gleicher Spannung dem Betrage nach deutlich kleiner sind als bei denjenigen mit dem konventionellen Gerät und dass der kritische Grenzzustand nach geringerem Scherweg erreicht wird. Durch die bessere Homogenität der Scherverformung infolge der Parallelführung wird das Verhalten bei gleichem Scherwiderstand steifer.

Aus den Versuchsergebnissen wurde, wie in Abschnitt 4.4.2 für normalkonsolidierte Proben beschrieben, der Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s bestimmt (Anlage 5.1,c). Es wurde erhalten

$$\varphi'_s = 34,7^\circ .$$

Der Wert stimmt fast perfekt mit dem entsprechenden Wert aus den Versuchen mit den konventionellen Geräten, $\varphi'_s = 34,5^\circ$ überein. Die relativen Abweichungen der Versuchswerte von der Ausgleichsgeraden sind $|\Delta\tau/\tau| \leq 7,7\%$; die Streuungen von τ_f sind also geringfügig größer als bei den Versuchen mit den konventionellen Geräten ($|\Delta\tau/\tau| \leq 4,4\%$).

Überkonsolidierte Proben (Serie 2.4)

Die Entwicklung der Scherspannung τ mit dem Scherweg (Anlage 5.2,a) verläuft bei den Versuchen mit dem geführten Gerät an den überkonsolidierten Proben zunächst ziemlich genau wie bei denjenigen mit den konventionellen Geräten (vgl. Anlage 4.3, Diagramm a). Bei der Entwicklung der Höhenänderung gibt es aber wieder Unterschiede: Die Höhenänderungen bis zum kritischen Grenzzustand sind bei den Versuchen mit dem geführten Gerät bei gleicher Spannung nur etwa halb so groß wie bei denjenigen mit den konventionellen Geräten (vgl. Anlage 5.2,b mit

Anlage 4.3,b). Der Probekörper verhält sich offenbar, wie schon bei den normalkonsolidierten Proben angemerkt, im geführten Gerät bei gleicher Spannung steifer als im Gerät mit drehbarer Kopfplatte. Die höhere gemessene Steifigkeit ist eine Folge der besseren Homogenität der Verformung und ein Vorteil des geführten gegenüber dem konventionellen Gerät.

Wie in Abschnitt 4.4.2 für überkonsolidierte Proben beschrieben, wurden im σ, τ -Diagramm die Peak-Werte τ_f eingezeichnet und eine Ausgleichsgerade ermittelt (Anlage 5.2,c). Es wurde erhalten

$$\begin{array}{ll} \text{Reibungswinkel} & \varphi' = 34,9^\circ \\ \text{Kohäsion} & c' = 7,5 \text{ kN/m}^2 \end{array}$$

Dazu gehört die Kohäsionskonstante

$$\lambda'_{cs} = 7,5/800 = 0,0094$$

Die relativen Abweichungen der gemessenen τ_f -Werte von der Ausgleichsgeraden sind $|\Delta\tau/\tau| \leq 4,9\%$ und damit scheinbar kleiner als bei den entsprechenden Versuchen mit den konventionellen Geräten. Aber die Scherparameter sind grundsätzlich falsch im Vergleich zum Winkel der Gesamtscherfestigkeit $\varphi_s' = 34,7^\circ$. φ' kann nicht größer sein als φ_s' , sondern $\tan\varphi'$ müsste um λ'_{cs} kleiner sein als $\tan\varphi_s'$, das heißt, es müsste gelten

$$\tan\varphi' = \tan\varphi_s' - \lambda'_{cs} \quad (21)$$

Die Ergebnisse der Versuche mit den konventionellen Geräten erfüllen Gl.(21) besser als diejenigen mit dem geführten Gerät. Der Grund für diesen Fehler sind Versuchsstreuungen, die sich im Einzelnen nicht klären lassen. Weil der Wert λ'_{cs} bei dem untersuchten Schluff sehr klein ist, wird er von den Versuchsstreuungen überdeckt, was zu dem Widerspruch gegen Gl.(21) führen könnte. Andererseits können die Ergebnisse für φ_s' und φ' aus den Versuchen mit dem konventionellen Gerät durch die beschriebene Gerätereibung infolge der Kontraktanz bei höherem Druckniveau nach unten verfälscht sein, und zwar so, dass sie zwar Gl.(21) recht gut erfüllen, aber eben beide geringfügig zu klein sind.

Zusammenfassend ist aus den Versuchen an Schluff folgendes zu schließen: Obwohl die Versuchsbedingungen derart waren (Kontraktanz), dass durch die Geräteimperfektion beim konventionellen Gerät die Normalspannung im Probekörper nach unten verfälscht wurde, sind die Unterschiede in den Scherparametern aus den beiden Gerätetypen hinnehmbar klein. Dieses Ergebnis ist dadurch zu erklären, dass sich der Reibungswinkel dieses Bodens offenbar nur wenig vom Reibungswinkel in der Fuge zwischen den beiden Rahmen des konventionellen Geräts unterschied. Der Scherwiderstand, der in der Rahmenfuge durch die Kraftumlagerung durch Kontraktanz entstand und hinzukam, war etwa ebenso groß, wie der Scherwiderstand, der in der Scherfuge im Probekörper aus dem gleichen Grund wegfiel. Unter dieser Bedingung, die beim Versuch allerdings nicht kontrolliert werden kann, ist das konventionelle Rahmenschergerät nach CASAGRANDE auch zur Bestimmung der Scherfestigkeit von kontraktanten Proben ausreichend genau. Dass das Schergesetz Gl.(21) von den Ergebnissen aus dem konventionellen Gerät besser erfüllt wird als von denjenigen aus dem parallel geführten, ist auf zufällige Versuchsstreuungen und die (geringe) Reibung in den Parallelführungen zurückzuführen. Die Unterschiede zwischen den beiden Schergeräten wirken sich bei dem untersuchten Schluff weniger auf die Scherparameter als auf die Verformungssteifigkeit aus: Im parallel geführten Gerät verhält sich der Boden beim Abscheren steifer als im konventionellen. Die Schubsteifigkeit wird aber bei Standsicherheitsberechnungen meist nicht berücksichtigt.

4.5 Scherversuche an Ton (Versuchsserien 3.1 bis 3.6)

4.5.1 Probeneinbau und Konsolidierung

Das Seetonmaterial wurde - wie in Abschnitt 4.4.1 beschrieben - aufbereitet zu flüssiger Konsistenz in die Scherrahmen eingefüllt und in Stufen bzw. mit kontinuierlichem Vorschub unter konstanter Laststeigerungsrate konsolidiert. Die Konsolidierungszeit unter der letzten Laststufe wurde bei den konventionellen Geräten zu 16 Stunden gewählt. Bei den geführten Geräten wurde die Höchstlast nach der kontinuierlichen Laststeigerung zur Konsolidierung vor dem Abscheren 8 Stunden konstant gehalten. Die Zeiten der Primärkonsolidierung betragen aber nur $t_{90} \approx 15 \text{ min}$ und $t_{100} \approx 32 \text{ min}$, wie aus Anlage 6.1 hervorgeht.

Für die Triaxialversuche wurde der zu flüssiger Konsistenz aufbereitete Boden in einem zylindrischen Behälter zwischen zwei Filterplatten eindimensional unter einer Spannung von 100 kN/m^2 vorkonsolidiert. Aus dem so erzeugten zylindrischen Probenblock wurden standfeste Probekörper von 50 mm Durchmesser und Höhe herausgearbeitet und im Triaxialgerät unter der endgültigen Konsolidationsspannung $\sigma'_1 = \sigma'_3 = \sigma'_c$ und einem Sättigungsdruck von $u_0 = 750 \text{ kN/m}^2$ isotrop konsolidiert. Die Dauer der Primärkonsolidation dieses Probekörpers, ermittelt mit einem Diagramm gemäß Anlage 3, betrug etwa 100 Minuten; man ließ die Probekörper aber aus organisatorischen Gründen vor dem Abscheren etwa vier Tage lang unter konstantem isotropen Druck konsolidieren, wodurch eine Sekundärkonsolidation von etwa 1,7 Zeitdekaden bezogen auf die Dauer der Primärkonsolidierung stattfand. Probekörper, die beim Abscheren überkonsolidiert sein sollten, ließ man vor dem Abscheren etwa 2 Stunden lang unter der verminderten Spannung schwellen, unter der sie anschließend abgeschert wurden.

4.5.2 Versuche mit dem konventionellen Gerät

Als Abschergeschwindigkeit wurde einheitlich $v = 0,023 \text{ mm/Minute}$ gewählt, womit die Empfehlungen nach den Gleichungen (1) und (2) und Tabelle 1 von DIN 18137-3 eingehalten wurden.

Normalkonsolidierte Proben (Serie 3.1)

Für die Versuche wurden vier verschiedene Normalspannungen von $\sigma = 100 \text{ kN/m}^2$ bis 800 kN/m^2 gewählt, wobei mit jeder Spannung zwei Parallelversuche durchgeführt wurden.

Die τ, s - Kurven (Diagramm a von Anlage 6.2) zeigen den für normalkonsolidierte bindige Böden typischen Verlauf: τ wächst monoton mit s bis zu einem Maximalwert τ_f und bleibt danach bei Fortsetzung der Scherung annähernd konstant. Alle $\Delta H / s$ - Kurven (Diagramm b) zeigen bis zum Erreichen des Maximalwerts τ_f Kontraktanz; danach nimmt das Volumen nur noch leicht ab, der Zustand geht jeweils in einen kritischen Grenzzustand über. Die Versuchskurven von Versuchspaaren mit gleicher Normalspannung stimmen zum großen Teil sehr gut, bis zur Deckungsgleichheit überein. Es ist aber dennoch zu beachten, dass wegen der Kontraktanz bis zum Grenzzustand alle σ - und somit τ_f - Werte durch die Geräteimperfektion, die bei kontraktantem Verhalten zum Tragen kommt, verfälscht sein können. Durch die σ, τ_f - Punkte im σ, τ - Diagramm (Diagramm c von Anlage 6.2) lässt sich mit geringen Abweichungen eine Ausgleichsge-

rade legen, die, die wie es bei normalkonsolidierten Proben sein muss, durch den Nullpunkt geht. Ihr Neigungswinkel ist der Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s ; es wurde erhalten

$$\varphi'_s = 32,5^\circ$$

Überkonsolidierte Proben (Serie 3.3)

Bei dieser Versuchsserie wurden alle Proben unter der gleichen Spannung $\sigma'_m = 800 \text{ kN/m}^2$ konsolidiert und nach anschließender Schwellung paarweise unter vier verschiedenen Spannungen σ' von 100 kN/m^2 bis 800 kN/m^2 abgeschert.

Auch bei diesen Versuchen zeigen die s, τ - Kurven (Diagramm a von Anlage 6.3) monotonen Verlauf ohne Entfestigung nach dem Erreichen des Maximalwerts τ_f im Peak-Zustand. Aber nach Diagramm b verhalten sich die Proben je nach Konsolidierungsverhältnis σ'_m / σ' von Beginn des Abscherens bis zum Grenzzustand kontraktant (Versuche Nr. 5 bis 8) oder anfänglich dilatant und dann bis zum Peak-Zustand kontraktant (Versuche Nr. 3 und 4) oder von Anfang bis zum Peak-Zustand dilatant. Nach dem Peak-Zustand strebt der Zustand jeweils gegen einen kritischen Grenzzustand. Versuchskurven, die zur gleichen Spannung σ' gehören, sind nahezu deckungsgleich, was für gute Reproduzierbarkeit spricht.

Durch die σ', τ_f - Punkte im σ, τ - Diagramm wurde mittels linearer Regression eine ausgleichende Gerade gelegt, für welche wegen der Überkonsolidation ein Achsenabschnitt $c' > 0$ als Kohäsion zugelassen wurde (Diagramm c von Anlage 6.3). Die Versuchspunkte weichen nur wenig von dieser Gerade ab. Es wurde so erhalten

$$c' = 2,7 \text{ kN/m}^2$$

$$\varphi' = 32,4^\circ$$

Aus c' ergibt sich die Kohäsionskonstante λ'_{cs} zu

$$\lambda'_{cs} = 2,7/800 = 0,0034$$

Diesen Werten von φ' und λ'_{cs} entspricht nach Gl.(21) der rechnerische Wert für φ'_s

$$\begin{aligned} \varphi'_s &= \arctan(\tan \varphi' + \lambda'_{cs}) \\ &= \arctan(\tan 32,4^\circ + 0,0034) = 32,54^\circ \end{aligned}$$

erhalten wurde nach Diagramm c von Anlage 6.2 der Wert $\varphi'_s = 32,5^\circ$. Die Ergebnisse der Versuchsserien 3.1 und 3.3 weisen also nicht nur sehr geringe Streuungen innerhalb einer Serie auf, sondern sie erfüllen auch fast perfekt die Stoffbeziehung Gl.(21). Es liegt daher die Vermutung nahe, dass es sich um sehr genaue Versuche handele und das konventionelle Rahmenschergerät für diesen Boden sehr gut geeignet sei. Aber es ist zu beachten, dass die meisten σ' - und τ_f -Werte der beiden Versuchsserien infolge Kontraktanz durch die beschriebene Geräteimperfektion verfälscht sein können. Es fällt auf, dass der λ'_{cs} -Wert mit 0,0034 für diesen Boden ungewöhnlich klein herauskommt: Für Ton ist λ'_{cs} meist etwa um den Faktor 10 größer als der obige Versuchswert.

4.5.3 Versuche mit dem parallel geführten Rahmenschergerät

Normalkonsolidierte Proben (Serie 3.2)

Die Versuchsbedingungen waren die gleichen wie bei den entsprechenden Versuchen mit dem konventionellen Gerät: Vier verschiedene Konsolidierungsspannungen von 100 bis 800 kN/m², je zwei Versuche unter der gleichen Spannung, Abschergeschwindigkeit 0,023 mm/min.

Die s, τ - Kurven (Diagramm a von Anlage 6.4) und die $\Delta H / s$ - Kurven (Diagramm b) zeigen einen ähnlichen Verlauf wie mit dem konventionellen Gerät: Nach Erreichen des Maximalwerts τ_f findet keine Entfestigung statt; alle Proben verhalten sich bis zum Peak-Zustand kontraktant und streben danach in einen kritischen Grenzzustand.

Drei der vier s, τ - Kurvenpaare, die zur gleichen Spannung σ' gehören, sind nahezu deckungsgleich; bei dem Kurvenpaar für $\sigma' = 800$ kN/m² gibt es Abweichungen, für die eine Erklärung nicht angegeben werden kann. Die $\Delta H / s$ - Kurven für gleiche Spannung unterscheiden sich dagegen verglichen mit den Ergebnissen anderer Versuchsserien mit dem gleichen Gerät und sogar am gleichen Boden (siehe Anlage 6.5) außergewöhnlich stark. Es wird vermutet, dass diese Abweichungen in den Höhenänderungen weder bodenmechanisch noch durch die Mechanik des Versuchsgeräts, sondern durch einen Fehler oder falsche Anwendung der Software des Versuchsgeräts bedingt ist, die bei dieser frühen Versuchsserie noch im Einsatz war. Sie wurde wegen anderer Fehler später ausgewechselt. Die $\Delta H / s$ - Kurven in Anlage 6.4 werden daher bis auf den qualitativen Verlauf nicht weiter benutzt.

Die Ausgleichsgerade der σ', τ_f - Punkte im σ, τ - Diagramm, die außerdem durch den Nullpunkt geht, weicht von sechs der acht Versuchspunkte nur unwesentlich ab (Diagramm c von Anlage 6.4). Die beiden sich stärker unterscheidenden Versuchspunkte liegen bei der höchsten Spannung, $\sigma' = 800$ kN/m² (Versuche (7 und 8) und differieren um etwa $\pm 5\%$ von der Ausgleichsgeraden. Mit der Ausgleichsgeraden ergibt sich als Winkel der Gesamtscherfestigkeit

$$\varphi'_s = 28,3^\circ$$

Überkonsolidierte Proben (Serie 3.4)

Die Versuchsbedingungen entsprechen denjenigen der Serie 3.3. Sowohl die s, τ - Kurven, als auch die $s / \Delta H$ - Kurven (Diagramme a und b von Anlage 6.5) zeigen einen ähnlichen Verlauf wie die Versuchskurven der Serie 3.3. Kurvenpaare, die zur gleichen Spannung gehören, stimmen gut überein (die Übereinstimmung gilt vor allem für die abhängigen Ordinatenwerte τ bzw. ΔH ; die unabhängigen Abszissenwerte s sind teilweise verschoben, was mit Problemen bei der Messung und Erfassung des Scherwegs zusammenhängt). Wie die Versuchsserie 3.3 wurde den s, τ - Kurven im Diagramm a die Peak-Werte τ_f entnommen und zum zugehörigen σ' - Wert in das σ, τ - Diagramm eingezeichnet (Diagramm c von Anlage 6.5). Zu diesen Versuchspunkten wurde durch lineare Regression eine Ausgleichsgerade bestimmt, für die ein variabler, von Null verschiedener Achsenabschnitt als Kohäsion c' zugelassen wurde. Es ergab sich

$$c' = 16,3 \text{ kN/m}^2$$

$$\varphi' = 27,4^\circ$$

Diesem c' -Wert entspricht die Kohäsionskonstante

$$\lambda'_{cs} = 16,3/800 = 0,0204$$

Aus φ' und λ'_{cs} erhält man nach Gl.(21) den rechnerischen Wert für φ'_s

$$\begin{aligned}\varphi'_s &= \arctan(\tan\varphi' + \lambda'_{cs}) \\ &= \arctan(\tan 27,4^\circ + 0,0204) = 28,3^\circ,\end{aligned}$$

der exakt mit dem Wert nach Versuchsreihe 3.2 (Diagramm c von Anlage 6.4) übereinstimmt.

Es ist festzustellen, dass zwischen den Scherparametern des Seetons aus den Versuchen mit dem konventionellen und dem parallel geführten Rahmenschergerät beachtliche Differenzen bestehen. φ'_s aus den Versuchen mit dem geführten Gerät ist um $4,2^\circ$, φ' um $5,0^\circ$ kleiner als aus den Versuchen mit dem konventionellen Gerät; λ'_{cs} ist um den Faktor 6 größer. Dabei scheint jede Versuchsserie in sich widerspruchsfrei zu sein, indem die Streuungen gegenüber den bekannten Materialgesetzen der Scherfestigkeit gering sind und insbesondere jeweils Gl.(21) erfüllt wird. Auffallend ist lediglich der recht kleine λ'_{cs} -Wert aus der Versuchsserie mit dem konventionellen Gerät.

Angesichts dieser Unterschiede wurde eingehend überprüft, ob Probenstreuungen, Versuchsfehler oder Messfehler vorliegen. Solche wurden nicht gefunden; einzelne Werte wurden sogar durch Wiederholungsversuche bestätigt. Probenstreuungen sind ausgeschlossen, weil das Probenmaterial für die einzelnen Probekörper einem Vorrat von aufbereitetem homogenisiertem Boden entnommen wurde, der für eine Serie von acht Einzelversuchen fast vollständig aufgebraucht wurde, und das Material nach dem Versuch ohne Trocknung in den Vorrat zurückgegeben und für die Vergleichsserie mit dem anderen Gerät wiederverwendet wurde. Die Kalibrierung der Messgeber wurde überprüft.

Da alle anderen Fehlerursachen auszuschließen sind, kommt als Ursache für die Unterschiede allein die beschriebene Imperfektion des konventionellen Geräts in Form der seitlichen Auflagerung der oberen Belastungsplatte an der Rahmeninnenfläche in Frage. Diese Imperfektion kam bei allen Versuchen mit normalkonsolidierten Proben zum Tragen, weil sich diese beim Abscheren kontraktant verhielten. Der obere Rahmen wurde daher von der Belastungsplatte über seitliche Reibung nach unten gegen den unteren Rahmen gedrückt und gleichzeitig der Probekörper entsprechend entlastet. Weil offenbar der Reibungskoeffizient der Rahmen gegeneinander verschieden ist von $\tan\varphi'_s$ des Tons, wurde durch die Kraftumlagerung der resultierende Scherwiderstand verändert. Wegen der äußerst sorgfältigen und daher bei allen Einzelversuchen gleichen Versuchsdurchführung war die Verfälschung von τ_f durch diesen Effekt linear in σ' und ist daher an den Ergebnissen einer Versuchsserie allein ohne Vergleich mit Versuchen mit einem anderen Gerät nicht erkennbar.

Es ist naheliegend und war mit dem Versuchsprogramm beabsichtigt, die Ergebnisse der Rahmenscherversuche durch Triaxialversuche zu prüfen. Dieser Vergleich erweist sich aber beim Seeton als nicht aussagekräftig, wie nachfolgend gezeigt wird.

4.5.4 CU-Triaxialversuche

Normalkonsolidierte Proben (Serie 3.5)

Die Proben wurden, wie in Abschnitt 4.5.1 beschrieben unter effektiven Seitendrücken von $\sigma'_3=100, 300$ und 500 kN/m^2 bei einem Sättigungsdruck von $u_0=500 \text{ kN/m}^2$ isotrop konsolidiert und dann unter totalen Seitendrücken $\sigma_3=\text{const} = 600, 800$ und 1000 kN/m^2 bei geschlossener Dränageleitung durch axiale Stauchung abgesichert.

Anlage 7.1 zeigt die Ergebnisse: $\sigma_1 - \sigma_3$ nimmt zu Beginn des Abscherens rasch mit ε_1 zu (Diagramm a). Ab einer Stauchung ε_1 von etwa 0,5 bis 1% je nach Druckniveau nimmt die Steigung der $\varepsilon_1, (\sigma_1 - \sigma_3)$ -Kurven deutlich ab, $\sigma_1 - \sigma_3$ wächst aber weiter monoton mit ε_1 und erreicht bei zwei der drei Versuche bis $\varepsilon_1 \approx 22\%$, wo der Versuch beendet wurde, kein relatives Maximum. Der Porenwasserdruck wächst zu Beginn des Abscherens bis zu einer Stauchung ε_1 von etwa 2 bis 5% rasch (Diagramm b), jedoch mit abnehmender Steigung, erreicht bei $\varepsilon_1=5$ bis 10% ein Maximum und nimmt danach bei zwei Versuchen bis zum Versuchsende leicht wieder ab bzw. bleibt bei einem Versuch (Nr. 5) konstant. Die effektiven Spannungspfade (Diagramm c) haben daher einen S-förmigen Verlauf. Während $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ ständig monoton zunimmt, wie man auch an Diagramm a sieht, nimmt $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ zuerst zu bis zu einem relativen Maximum, dann rasch ab bis zu einem relativen Minimum und danach wieder zu bis zum Versuchsende. In der letzten Phase des Versuchs streben die effektiven Spannungspfade von unten asymptotisch gegen eine gemeinsame umhüllende Gerade g durch den Nullpunkt mit dem Neigungswinkel α' . Die Kurvenpunkte mit dem Minimum von $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ liegen ebenfalls – wenigstens näherungsweise – auf einer Geraden durch den Nullpunkt, g_1 mit dem Neigungswinkel α'_1 .

Die Gerade g stellt definitionsgemäß die Grenzbedingungen für die effektiven Spannungen des normalkonsolidierten undrännierten Bodens dar; aus α' erhält man den Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_{sz} für triaxiale Kompression (Index z für Zylinderverformung zur Unterscheidung von φ'_s für Scherfugen im Rahmenscherversuch). Weil die Zustände auf g annähernd kritische Grenzzustände sind, hat sich die Neigung von g nicht geändert, falls die Versuchsbedingungen (wegen Luft) im Porenwassersystem nicht vollständig undränniert waren, was nicht auszuschließen ist.

Aus dem Diagramm c liest man ab:

$$\tan \alpha' = 0,5757$$

und somit

$$\varphi'_{sz} = \arcsin(\tan \alpha') = 35,1^\circ$$

Dieser φ'_{sz} -Wert ist deutlich größer als die φ'_s -Werte aus den Rahmenscherversuchen ($32,5^\circ$ bzw. $28,3^\circ$). Gibt es einen Zusammenhang und wie ist er herzustellen?

Unter der Annahme, dass

- die Zustände, die bei den Triaxialversuchen auf der Geraden g und bei den Rahmenscherversuchen mit den Peak-Zuständen erreicht wurden, gleichartige Grenzzustände sind,
- in den Scherfugen bei den Rahmenscherversuchen Koaxialität von Spannungen und Dehnungen und Dehnungsgeschwindigkeiten herrscht,
- die Grenzzustände jeweils kritische sind ($v = 0$),

erhält man nach Gl.(15) aus φ'_{sz} als untere Schranke für φ'_s in Scherfugen

$$\begin{aligned} \min \varphi'_s &= \arctan(\sin \varphi'_{sz}) = \\ &= \arctan(\sin 35,1^\circ) = 29,9^\circ \end{aligned}$$

Da die angenommene Koaxialität ein Grenzfall ist, gilt unter den übrigen genannten Annahmen

$$29,9^\circ \leq \varphi'_s \leq 35,1^\circ$$

wobei der Größtwert für größte Achsenabweichung $\alpha = 35,1^\circ/2 = 17,55^\circ$ gilt, siehe Gl.(17). Nach dieser Abschätzung könnte der φ'_s -Wert aus den Versuchen mit dem konventionellen Rahmenschengerät zutreffen, während das Ergebnis aus dem geführten Gerät außerhalb des möglichen Bereichs liegen würde.

Der Widerspruch zwischen den Ergebnissen der Triaxial- und der Rahmenscherversuche entsteht durch die Annahme gleichartiger Grenzzustände:

Bei den Rahmenscherversuchen an normalkonsolidierten Seetonproben war das Verhalten bis zum Peak-Grenzzustand kontraktant; die Grenzzustände selbst waren annähernd kritisch (siehe Anlage 6.4, Diagramm b).

Bei *CU*-Triaxialversuchen werden Dilatanz und Kontraktanz durch das Porenwasser verhindert, aber das Dilatanzverhalten wird durch die Änderung des Porenwasserdrucks mit der Stauchung ε_1 und die Form des effektiven undrännierten Spannungspfad widergespiegelt. Zunahme des Porenwasserdrucks bei undrännierter (volumenkonstanter) Verformung zeigt kontraktantes Verhalten an. Zunahme des effektiven Drucks bei konstantem Porenwasserdruck in der Nähe der Grenzbedingung zeigt dilatantes Verhalten an. Danach verhielt sich der Boden bei den Triaxialversuchen von Beginn des Abscherens etwa bis zu den Zuständen auf der Geraden g_1 kontraktant, auf g_1 kritisch und danach bis zum Erreichen der Geraden g wieder dilatant, um auf g schließlich einen kritischen Grenzzustand zu erreichen oder sich einem solchen zu nähern.

Die Grenzzustände bei den Rahmenscherversuchen und bei den Triaxialversuchen auf der Geraden g_1 sind danach nicht gleich; sie unterscheiden sich durch das vorangegangene Dilatanzverhalten. Die Reibungswinkel φ'_s und φ'_{sz} sind daher nicht vergleichbar, auch nicht nach Gl.(15). Die Unterschiede in den Grenzzuständen sind zwar durch die Unterschiede zwischen

Scherung in einer Scherfuge und zylindrischer Verformung bedingt, sind aber rein makroskopisch nicht erklärbar; sie beruhen wahrscheinlich auf unterschiedlichen mikroskopischen und physikalischen Veränderungen des Korngerüsts und Porenwassers (bei Untersuchungen an ungestörten Seetonproben wurde unter anderem festgestellt, dass die Spannungsgeschichte einen wesentlichen Einfluss auf die Art des Grenzzustands hat. Die Grenzzustände nach eindimensionaler Konsolidierung waren grundsätzlich verschieden von denjenigen nach isotroper Konsolidierung [3]). Mit den Grenzzuständen bei den Rahmenscherversuchen sind höchstens die Zustände auf der Geraden g_1 bei den Triaxialversuchen vergleichbar. Zu g_1 gehört

$$\tan\alpha'_1 = 0,528$$

und somit

$$\varphi'_1 = \arcsin 0,528 = 31,9^\circ$$

zu φ'_1 ergibt sich nach Gl.(15)

$$\min\varphi'_s = \arctan(\sin 31,9^\circ) = 27,8^\circ$$

Damit ergibt sich aus den Triaxialversuchen für φ'_s der Bereich

$$27,8^\circ \leq \varphi'_s \leq 31,9^\circ$$

In diesem Bereich sind die Versuchsergebnisse mit dem parallel geführten Rahmenschergerät enthalten, während die Ergebnisse mit den konventionellen Geräten außerhalb liegen. Allerdings lässt sich der Ort der vergleichbaren Zustände, hier mit der Geraden g_1 unter $\tan\alpha'_1=0,528$ angenommen, nicht eindeutig bestimmen; es gibt einen fächerförmigen Bereich, in dem diese Gerade liegen könnte.

Überkonsolidierte Proben

Für diese Versuche wurden die nach Abschnitt 4.5.1 hergestellten Probekörper unter dem effektiven Seitendruck $\sigma'_3 = \sigma'_m = 500 \text{ kN/m}^2$ und Sättigungsdruck konsolidiert, danach bei noch offener Drainage auf verschiedene effektive Seitendrücke σ'_3 von 100 bis 300 kN/m^2 entspannt und dann undränniert unter $\sigma_3 = \sigma'_3 + u_0$ ($u_0 = 750 \text{ kN/m}^2$) abgeschert. Anlage 7.2 zeigt die Ergebnisse. Wegen der verschiedenen Konsolidierungsverhältnisse sind die Porenwasserdruckentwicklungen bei den verschiedenen Probekörper verschieden (Diagramm b), so dass auch die effektiven Spannungspfade verschiedene Gestalt haben (Diagramm c); aber alle Zustandspfade streben gegen den gleichen kritischen Grenzzustand. Daher lässt sich eine gemeinsame gerade Umhüllende dieser Pfade im Grenzzustand, so dass sowohl deren Steigung $\tan\alpha'$, als auch ihr Achsenabschnitt b' zuverlässig festliegen, nicht zeichnen (die in Diagramm c eingezeichnete Gerade mit $\tan\alpha' = 0,526$ und $b' = 19 \text{ kN/m}^2$, woraus $\varphi' = 31,9^\circ$ und $c' = 22,4 \text{ kN/m}^2$ folgt, ist eine Variante innerhalb eines möglichen Bereichs). Somit erweist sich diese Versuchsserie als ungeeignet zur Bewertung der Genauigkeit der Rahmenscherversuche.

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das Rahmenschergerät mit voneinander unabhängigen, senkrechten und reibungsarmen Parallelführungen des oberen Rahmens und der Belastungsplatte erweist sich grundsätzlich für alle untersuchten Bodenarten als gut geeignet. Anzeichen für Verfälschungen der Scherfestigkeit durch Kraftumlagerungen oder Eigenspannungen im Gerät infolge des Dilatanzverhaltens des Bodens wurden nicht gefunden. Voraussetzung für hohe Genauigkeit aller Kraftmessungen ist allerdings, dass die Parallelführungen mit hoher Präzision widerstandsarm laufen und das Gewicht des oberen Rahmens mitsamt seiner Führungskonstruktion durch ein Gegengewicht kompensiert wird. Durch reibungsarme Beschichtung der seitlichen Rahmeninnenflächen können die Versuchsfehler weiter vermindert werden; der zusätzliche Scherwiderstand infolge dieser seitlichen Reibung ist allerdings gering. Beim konventionellen Rahmenschergerät nach Casagrande dagegen gibt es zwei Ursachen für mögliche Fehler:

- die Verkippung des oberen Rahmens und der Belastungsplatte beim Abscheren
- die Reibung zwischen dem Rand der Belastungsplatte und dem oberen Rahmen infolge der horizontalen Abstützung der Belastungsplatte gegen die Rahmeninnenflächen zur Abtragung der Scherkraft.

Die erstgenannte Fehlerursache wirkt sich nicht merklich auf den Durchschnittswert der Scherfestigkeit des Bodens in der Scherfuge aus, sondern nur auf die Verformungen, das heißt auf die Schubsteifigkeit und die Größe der gemessenen Hebung oder Setzung infolge Dilatanz bzw. Kontraktanz. Durch die Drehbarkeit der Belastungsplatte wird das Verhalten des Probekörpers weicher. Wenn es nur um die Bestimmung der Scherfestigkeit geht, sind die Verkippungen des Rahmens und der Belastungsplatte unbedenklich.

Die zweite Fehlerursache kann dann zu einer deutlichen Verfälschung der Scherfestigkeit führen, wenn sich der Boden bis zum Grenzzustand kontraktant verhält, das heißt die Belastungsplatte sich nach unten bewegt. In diesem Fall lagert sich ein Teil der senkrechten Kraft der Platte über seitliche Reibung auf den oberen Rahmen um und wird von diesem über die Rahmenfuge auf den unteren Rahmen statt auf den Boden übertragen. Ist der Reibungskoeffizient in der Rahmenfuge größer oder kleiner als derjenige des Bodens ($\tan\varphi'$), wird der Versuchswert der Scherfestigkeit des Bodens durch diesen Effekt nach oben bzw. unten verfälscht. Verhält sich der Boden bis zum Grenzzustand dilatant bis höchstens volumenkonstant (kritisch), so wird durch die seitliche Abstützung der Belastungsplatte gegen den oberen Rahmen die Scherfestigkeit des Bodens nicht verfälscht. Je nach Bodeneigenschaften und Versuchsprogramm ist es möglich, dass innerhalb einer Versuchsserie bei einem Teil des Versuche die Scherfestigkeit verfälscht, beim anderen Teil nicht verfälscht wird. Gerade bei sorgfältiger Vorbereitung und Durchführung der Versuche sind die Verfälschungen der Versuchsergebnisse infolge dieses Effekts ohne Vergleich mit Ergebnissen von einem anderen Gerät unter Umständen nicht zu erkennen; denn die Abweichungen ändern sich wie der Scherwiderstand des Bodens linear mit der Normalbelastung.

Bei der hier vorgelegten Versuchsreihe stimmen die Ergebnisse der Rahmenscherversuche an Sand mit beiden Gerätetypen bis auf zufällige Streuungen überein; der Sand verhielt sich bei allen diesen Versuchen dilatant. Bei der Versuchsserie mit dem parallel geführten Gerät mit rei-


bungsarm beschichteten Rahmenseitenflächen kam der Reibungswinkel um etwa $0,6^\circ$ kleiner als mit unbeschichteten Flächen heraus. Durch die Triaxialversuche ließen sich die Ergebnisse bezüglich der Scherfestigkeit bestätigen; in der Größe der Dilatanz bestanden Unterschiede, die jedoch nicht durch Geräte- oder Versuchsfehler, sondern durch die Unterschiede zwischen dem Materialverhalten bei homogener zylindrischer Verformung und Scherverformung in einer Scherfuge bedingt sind.

Bei den Versuchen mit Schluff unterscheiden sich die Ergebnisse mit den beiden Typen von Rahmenschergeräten nur wenig; die Ergebnisse mit dem konventionellen Gerät scheinen sogar besser die bekannten Materialgesetze zu erfüllen als diejenigen mit dem parallel geführten Gerät. Aber dieser Eindruck täuscht: durch Kontraktanz bei einem Teil der Versuche müssen die Normalspannungen bei diesen Versuchen verfälscht worden sein; die resultierenden Scherwiderstände wurden hierdurch nur deswegen wenig verändert, weil die hinzugekommene Gerätereibung und der weggefallene Reibungswiderstand des Bodens etwa gleich waren. Bei diesem Boden war daher die Wirkung der Geräteimperfektion praktisch nicht zu entdecken.

Für den Seeton ergaben die Versuche mit dem parallel geführten Rahmenschergerät um $4,2^\circ$ bzw. $5,0^\circ$ kleinere Werte für die Reibungswinkel ϕ'_s und ϕ' als diejenigen mit dem konventionellen Gerät. Die meisten Probekörper verhielten sich bis zum Grenzzustand kontraktant. Der große Unterschied in der gemessenen Scherfestigkeit ist allein durch den beschriebenen Reibungseffekt zwischen Belastungsplatte und oberem Rahmen zu erklären, der sich bei diesem Boden mit geringer Scherfestigkeit und mit kontraktantem Verhalten stark auswirkt. Wieder ist der Fehler nicht an inneren Unstimmigkeiten der Ergebnisse einer Versuchsserie zu erkennen. Die ebenfalls durchgeführten Triaxialversuche erwiesen sich bei diesem Boden aus Gründen, die über das Thema dieser Forschungsarbeit hinausgehen, als ungeeignet zur Überprüfung der Rahmenscherversuche.

Für die Normung des Rahmenscherversuchs sind aus diesen Erkenntnissen folgende Schlüsse zu ziehen:

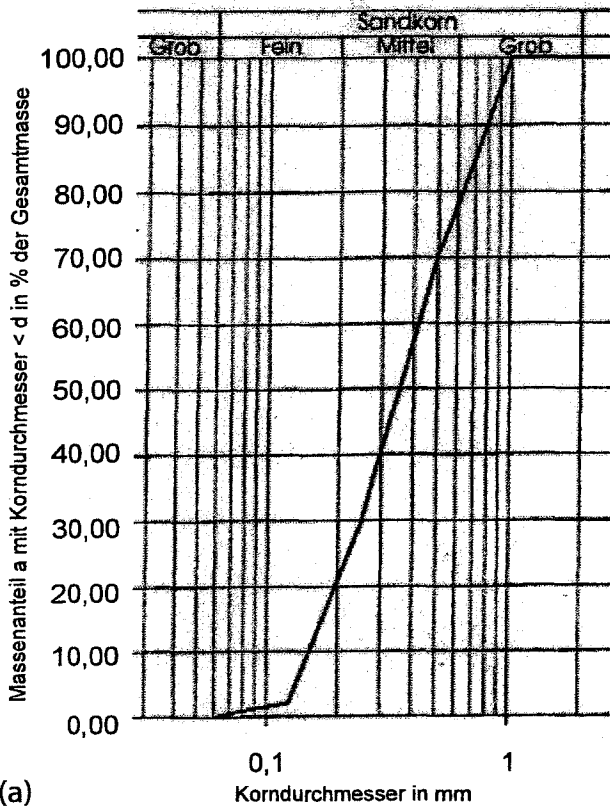
- Für das Gerät mit voneinander unabhängigen senkrechten Parallelführungen des oberen Rahmens und der Belastungsplatte (waagerechte Parallelführung des oberen Rahmens ist auszuschließen) sind Führungen mit sehr geringem Laufwiderstand und Gewichtskompensation für den oberen Rahmen zu fordern.
- Für Rahmenscherversuche an Böden, deren Volumen sich beim Abscheren bis zum Grenzzustand vermindert – erkennbar an monotoner Abnahme der Höhe des Probekörpers –, sollte ausschließlich das Gerät mit unabhängigen Parallelführungen des oberen Rahmens und der Belastungsplatte zugelassen werden. Es ist darauf hinzuweisen, dass mit dem konventionellen Gerät bei solchen Böden die Reibungswinkel erheblich zu groß erhalten werden können. Das konventionelle Gerät ohne Parallelführungen ist nur für Sand und allenfalls Schluff, also Böden, die sich meistens dilatant verhalten, als ausreichend genau und sicher zu bewerten, für tonige Böden dagegen ist es im Allgemeinen auszuschließen.


(Dr.-Ing. M. Goldscheider)

Literatur

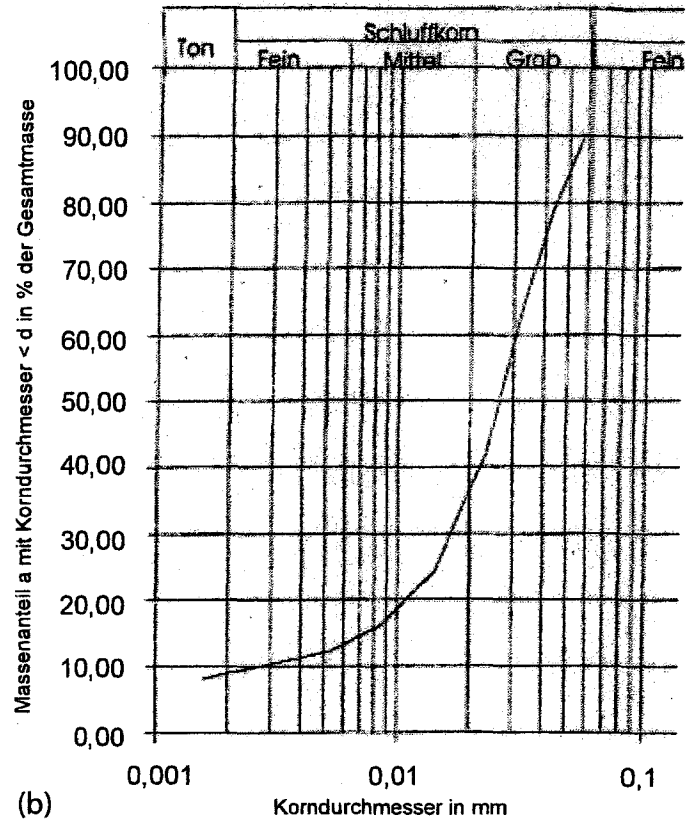
- [1] Goldscheider, M.: Dilatanzverhalten von Sand bei geknickten Verformungswegen. *Mech. Res. Comm Vol. 2. 1975, 143-148*
- [2] Vardoulakis, I. und Goldscheider, M.: Biaxialgerät zur Untersuchung der Festigkeit und Dilatanz von Scherfugen in Böden. *Geotechnik 1980, S. 19-31*
- [3] Scherzinger, T.: Materialuntersuchungen von Seeton – Ergebnisse von Laboruntersuchungen und ihre Bedeutung für das Bauen in weichem Baugrund. *Veröff. Inst. Bodenmechanik und Felsmechanik Univ. Karlsruhe, H. 122, 1991*

Untersuchter Sand



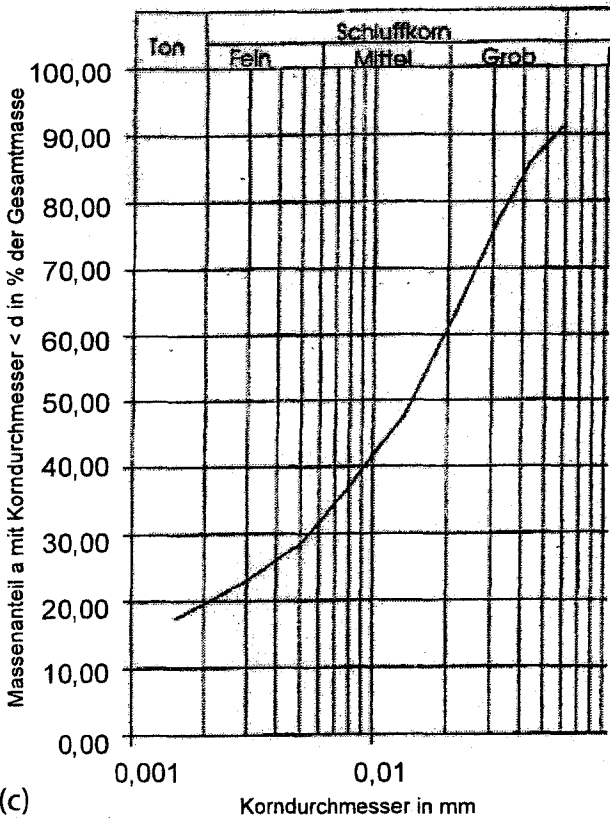
(a)

Untersuchter Ton (Seeton)



(b)

Untersuchter Schluff (Löss)



(c)

Serie von Rahmenscherversuchen bei gleicher Anfangsporenzahl $e = 0,708$ und verschiedenen Normalspannungen

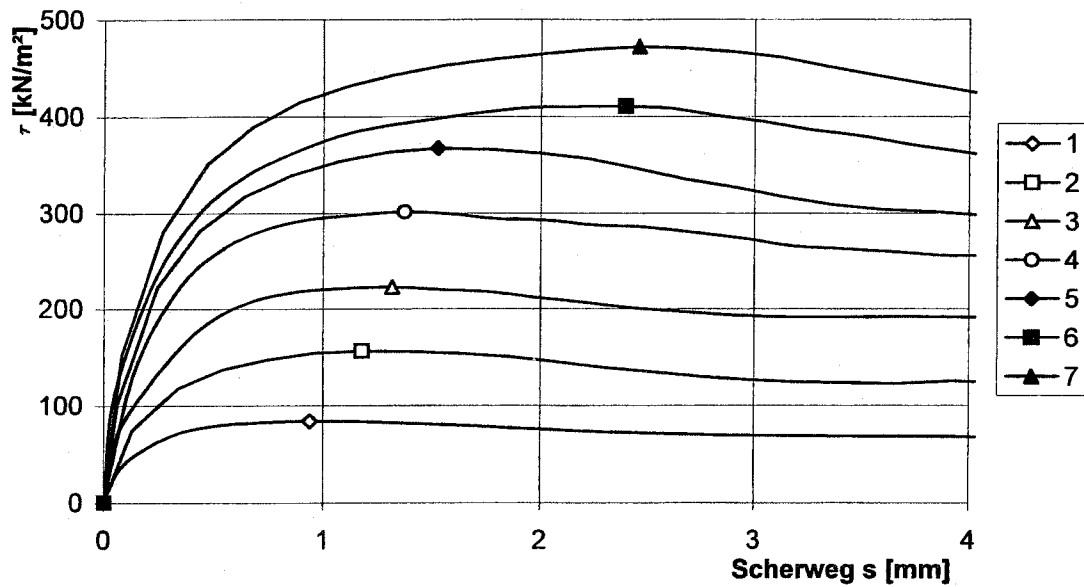
Bodenart: Mittelsand

Casagrande Gerät

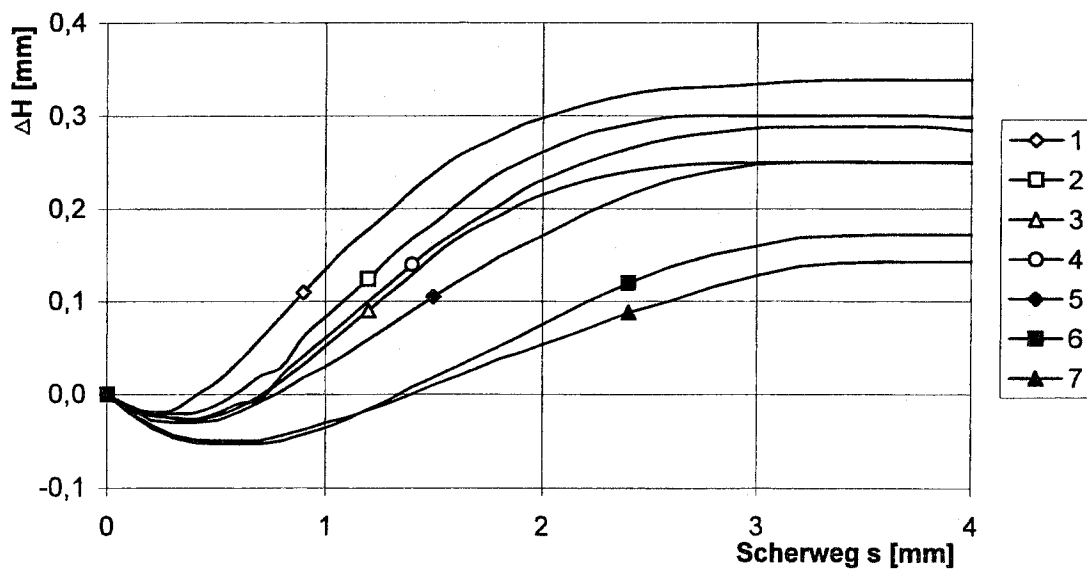
Schergeschwindigkeit: 0,24 mm/min

Probenfläche: 36 cm²

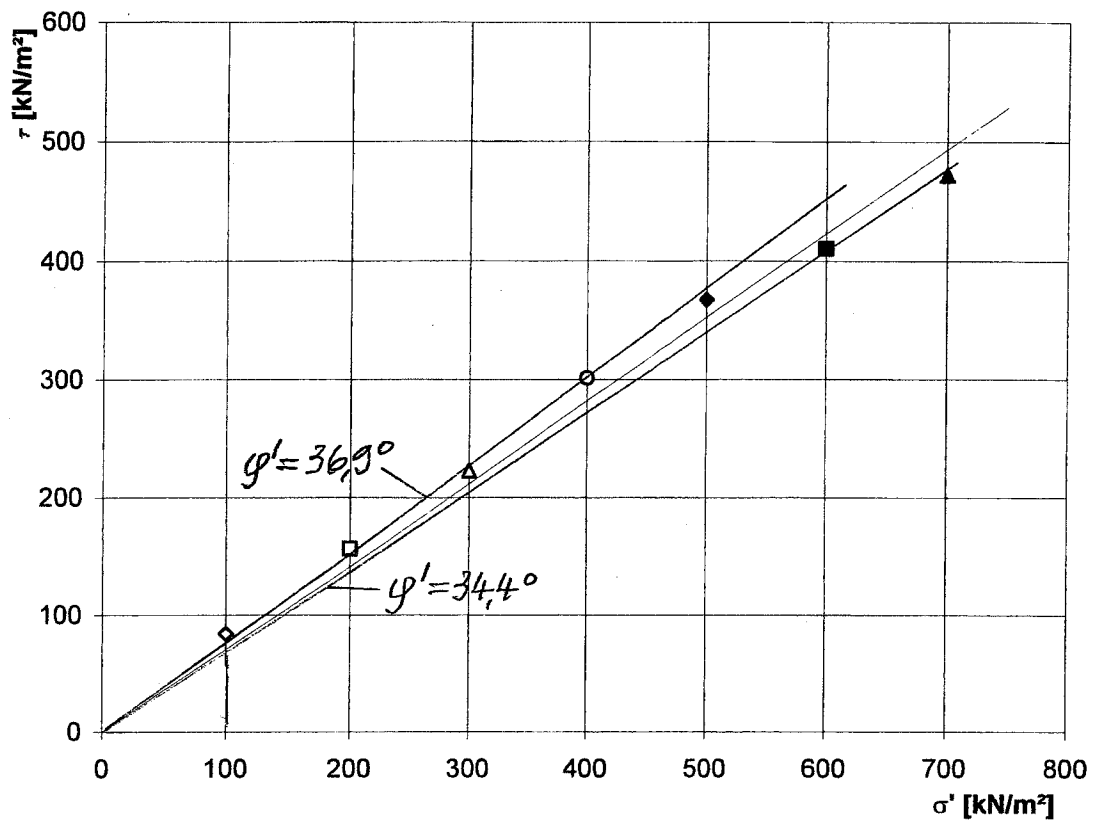
Versuch Nr.:	Wassergehalt		Anfangsporenzahl e_0	σ'_c kN/m ²	σ' kN/m ²	τ_f kN/m ²
	vor %	nach %				
1	0	0	0,719	100	100	84,0
2	0	0	0,707	200	200	156,4
3	0	0	0,711	300	300	222,9
4	0	0	0,691	400	400	301,4
5	0	0	0,702	500	500	367,3
6	0	0	0,712	600	600	410,5
7	0	0	0,713	700	700	472,0



a)



b)

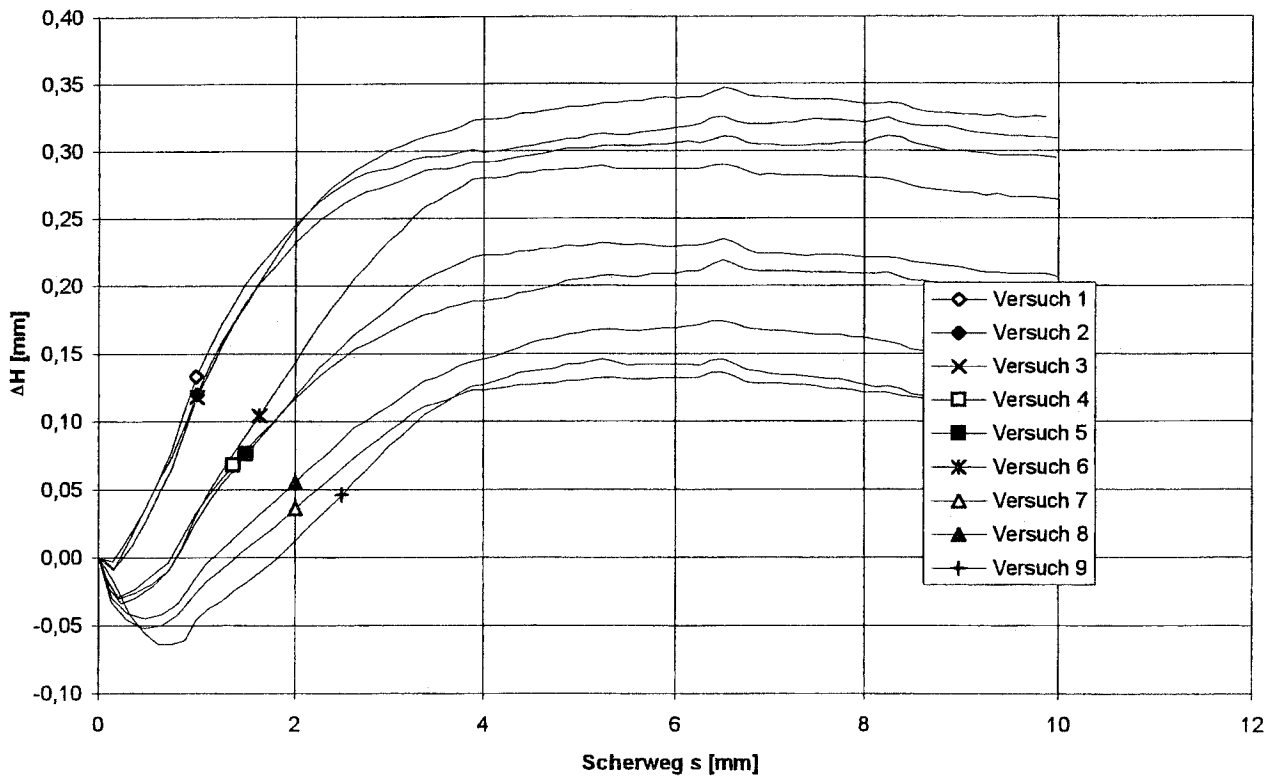
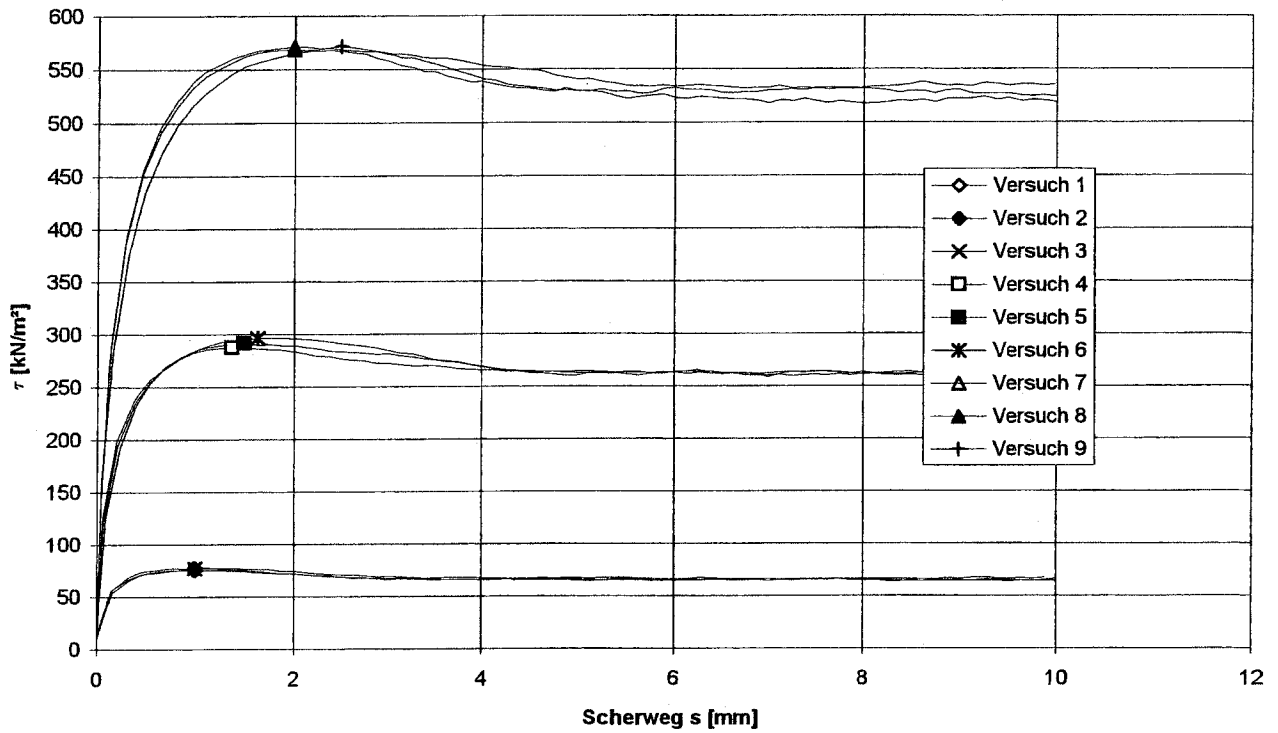


c)

Serie von Rahmenscherversuchen bei gleicher Anfangsporenzahl $e = 0.708$ und verschiedenen Normalspannungen σ' mit einem parallelgeführten Rahmenschergerät Teflonfolie auf seitlichen Rahmeninnenflächen, bei den Versuchen Nr. 3, 6 und 9 Gummi und Silikonfett

Bodenart: Mittelsand
 Schergeschwindigkeit: 0,24 mm/min
 Probenfläche: 6x6 cm², Ecken abgerundet (Radius=4mm)
 Konsolidierungszeit: 30 min
 parallelgeführtes Rahmenschergerät RS5 der Fa. Wille Geotechnik

a)

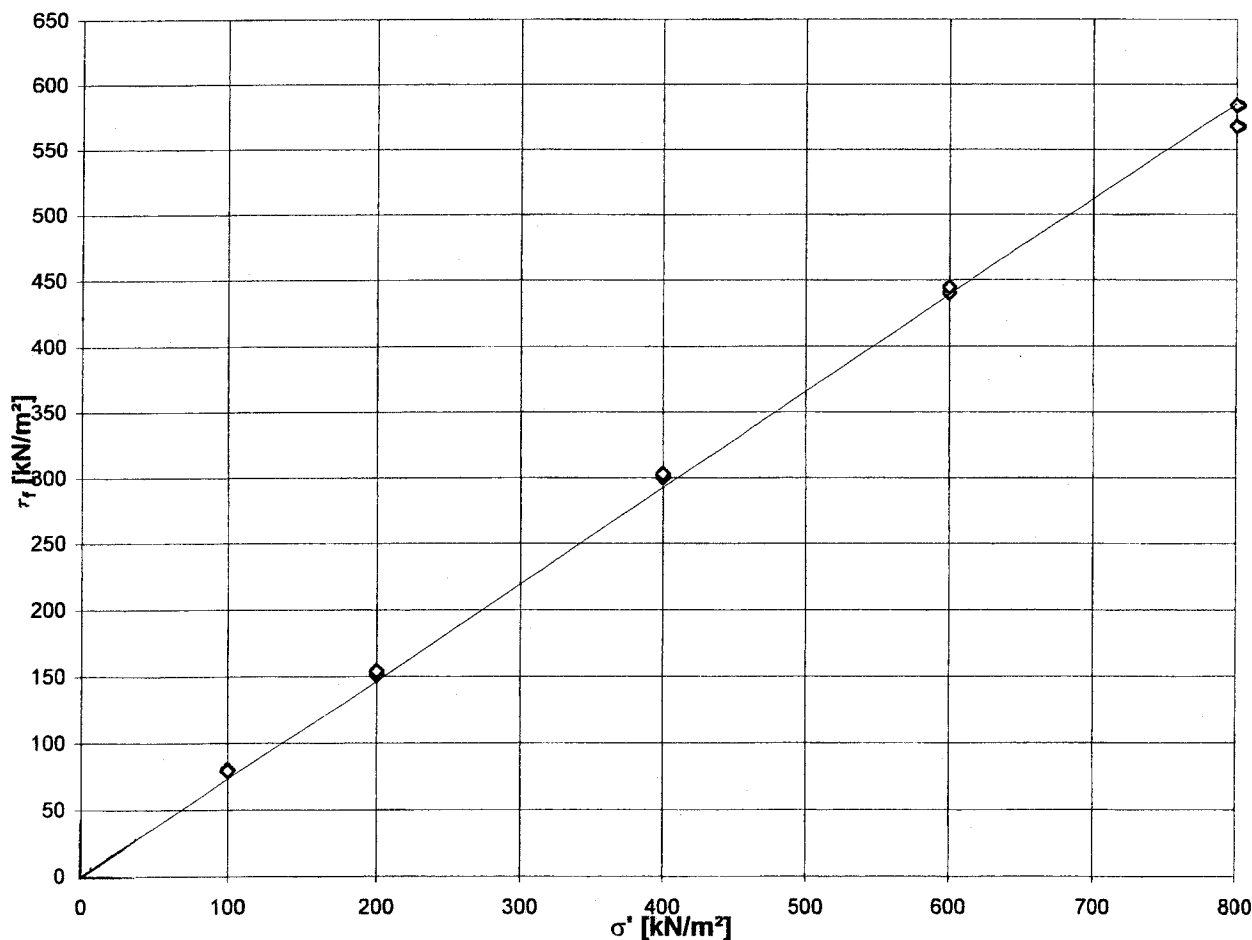


b)

Serie von Rahmenscherversuchen bei gleicher Anfangsporenzahl $e = 0.708$ und verschiedenen Normalspannungen σ' mit einem parallelgeführten Rahmenschergerät

Bodenart: Mittelsand
 Schergeschwindigkeit: 0,24 mm/min
 Probenfläche: 6x6 cm², Ecken abgerundet (Radius=4mm)
 Konsolidierungszeit: 30 min
 parallelgeführtes Rahmenschergerät RS5 der Fa. Wille Geotechnik

Versuchs-Nr.	Wassergehalt		Normalspannung		Scherfestigkeit	
	Einbau %	Ausbau %	σ'_c kN/m ²	σ' kN/m ²	τ_f kN/m ²	s mm
				0	0,0	
1	0	0	100	100	80,03	1,00
2	0	0	100	100	79,34	1,12
3	0	0	200	200	151,14	1,25
4	0	0	200	200	154,07	1,38
5	0	0	400	400	300,20	1,37
6	0	0	400	400	302,98	1,14
7	0	0	600	600	440,32	1,74
8	0	0	600	600	444,37	2,00
9	0	0	800	800	584,08	2,00
10	0	0	800	800	567,76	2,12



c)

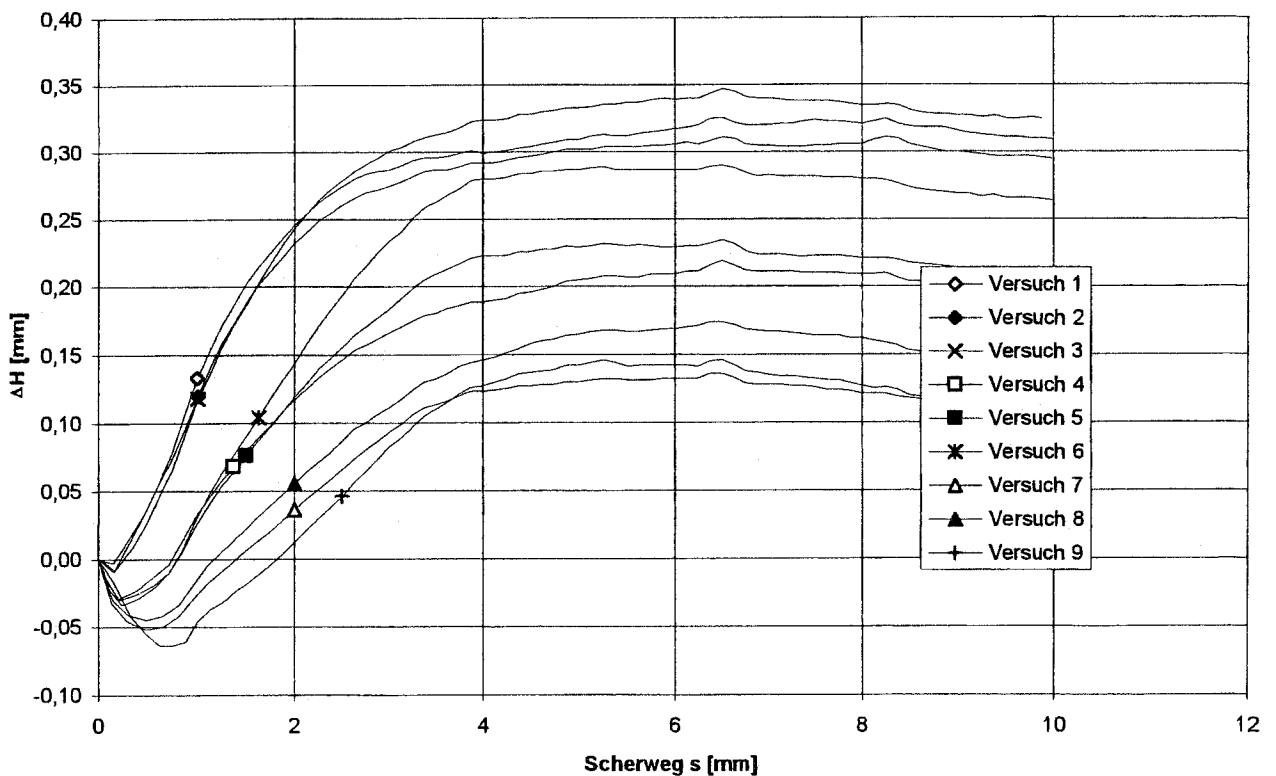
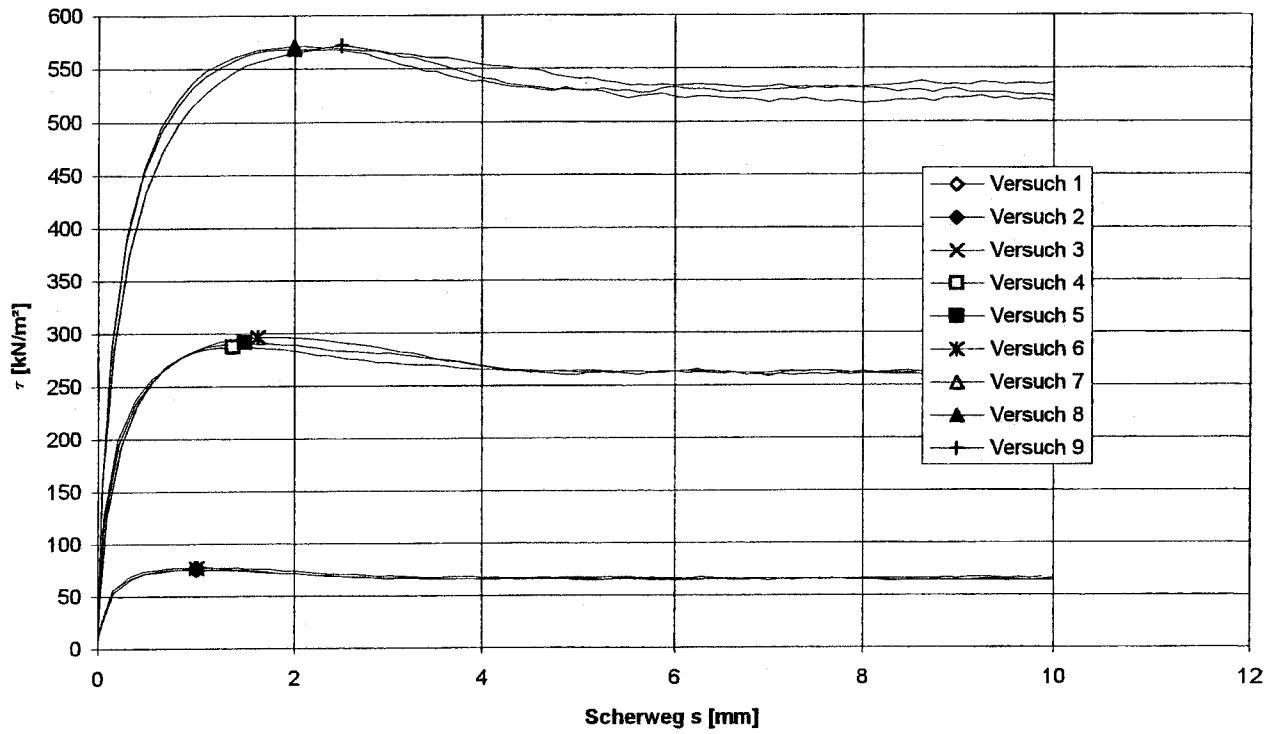
Schergerade bestimmt durch lineare Regression:

Steigung $\tan \varphi'$ 0,7316
 Reibungswinkel φ' [°] 36,2
 Kohäsion c' [kN/m²] 0,0
 Bestimmtheitsmaß R^2 der linearen Regression 0,9984

Serie von Rahmenscherversuchen bei gleicher Anfangsporenzahl $e = 0.708$ und verschiedenen Normalspannungen σ' mit einem parallelgeführten Rahmenschergerät Teflonfolie auf seitlichen Rahmeninnenflächen, bei den Versuchen Nr. 3, 6 und 9 Gummi und Silikonfett

Bodenart: Mittelsand
 Schergeschwindigkeit: 0,24 mm/min
 Probenfläche: 6x6 cm², Ecken abgerundet (Radius=4mm)
 Konsolidierungszeit: 30 min
 parallelgeführtes Rahmenschergerät RS5 der Fa. Wille Geotechnik

a)



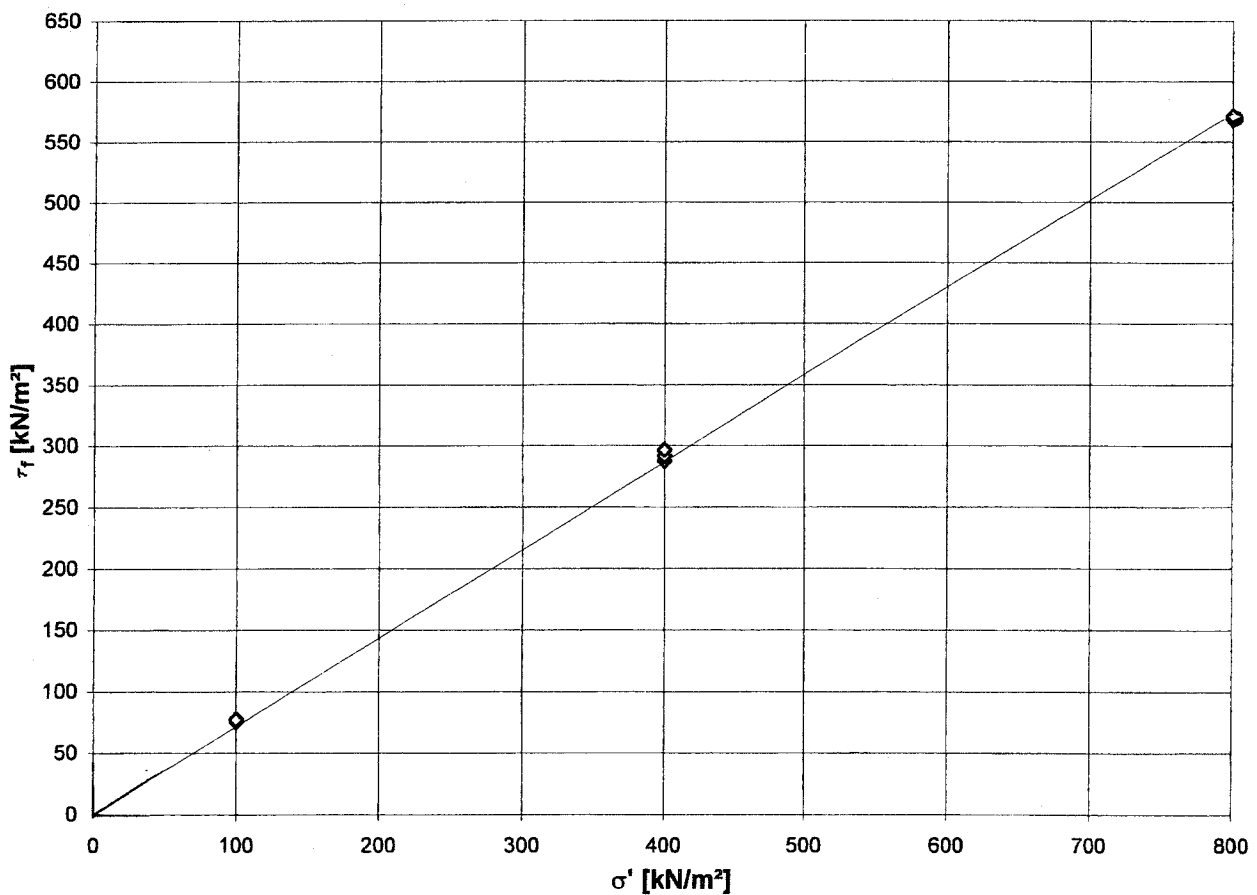
b)

Serie von Rahmenscherversuchen bei gleicher Anfangsporenzahl $e = 0.708$ und verschiedenen Normalspannungen σ' mit einem parallelgeführten Rahmenschergerät Teflonfolie auf seitlichen Rahmeninnenflächen, bei den Versuchen Nr. 3, 6 und 9

Gummi und Silikonfett

Bodenart: Mittelsand
 Schergeschwindigkeit: 0,24 mm/min
 Probenfläche: 6x6 cm², Ecken abgerundet (Radius=4mm)
 Konsolidierungszeit: 30 min
 parallelgeführtes Rahmenschergerät RS5 der Fa. Wille Geotechnik

Versuchs-Nr.	Wassergehalt		Normalspannung		Scherfestigkeit	
	Einbau %	Ausbau %	σ'_c kN/m ²	σ' kN/m ²	τ_f kN/m ²	s mm
				0	0,0	
1	0	0	100	100	77,82	1,00
2	0	0	100	100	75,57	1,00
3	0	0	100	100	77,11	1,00
4	0	0	400	400	287,64	1,37
5	0	0	400	400	291,58	1,50
6	0	0	400	400	296,31	1,63
7	0	0	800	800	568,39	2,00
8	0	0	800	800	571,07	2,00
9	0	0	800	800	571,47	2,50



c)

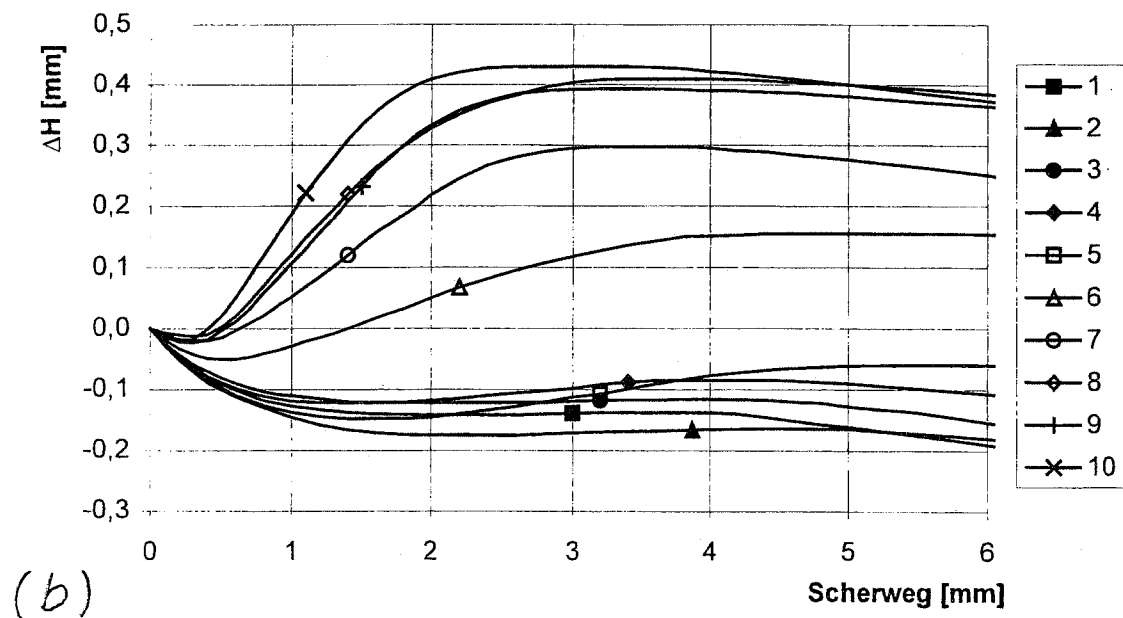
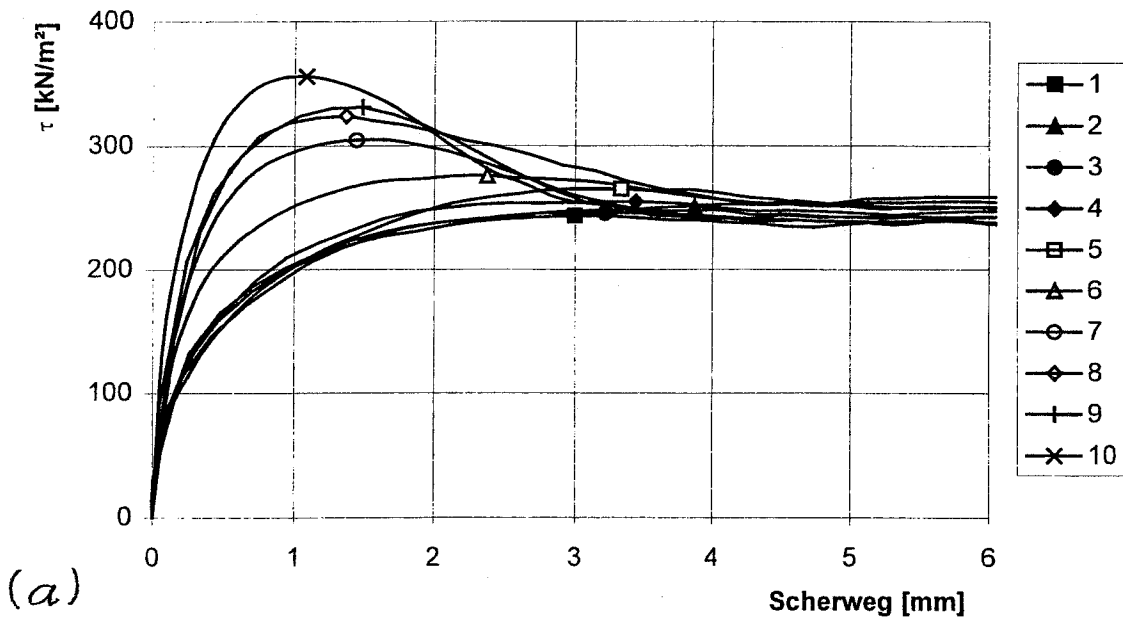
Schergerade bestimmt durch lineare Regression:

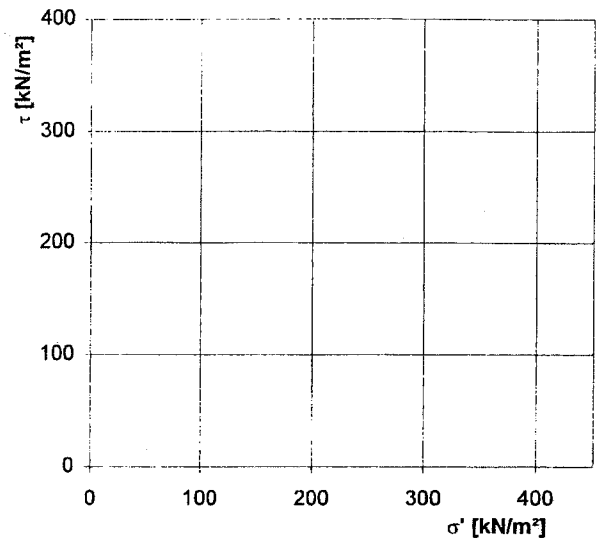
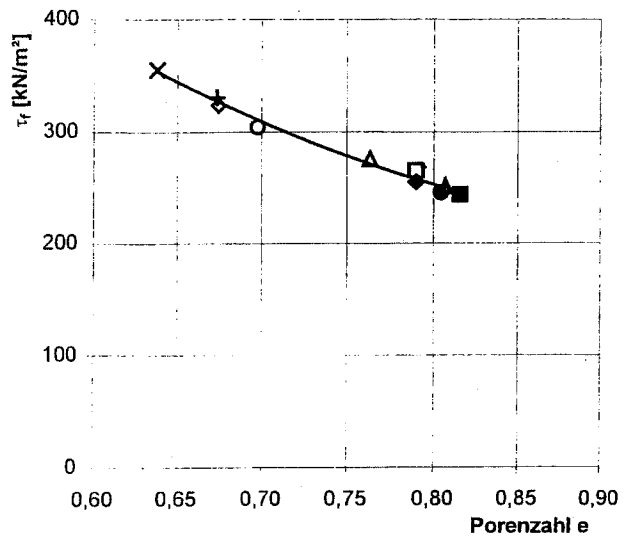
Steigung $\tan \varphi'$ 0,7169
 Reibungswinkel φ' [°] 35,6
 Kohäsion c' [kN/m²] 0,0
 Bestimmtheitsmaß R^2 der linearen Regression 0,9995

Serie von Rahmenscherversuchen bei unterschiedlicher Anfangsporenzahl und gleicher Normalspannung $\sigma' = 400 \text{ kN/m}^2$ mit konventionellen Rahmenschergeräten

Bodenart: Mittelsand
 Schergeschwindigkeit: 0,24 mm/min
 Probenfläche: 36 cm²
 Konsolidierungszeit: 30 min

Versuch Nr.:	Wassergehalt		Anfangsporenzahl e_0	σ'_c kN/m ²	τ_f kN/m ²
	vor %	nach %			
1	0	0	0,8155	400	243,4
2	0	0	0,8068	400	251,0
3	0	0	0,8044	400	245,6
4	0	0	0,7897	400	254,9
5	0	0	0,7897	400	265,1
6	0	0	0,7635	400	275,5
7	0	0	0,6978	400	304,4
8	0	0	0,6743	400	324,0
9	0	0	0,6735	400	330,9
10	0	0	0,6382	400	355,7

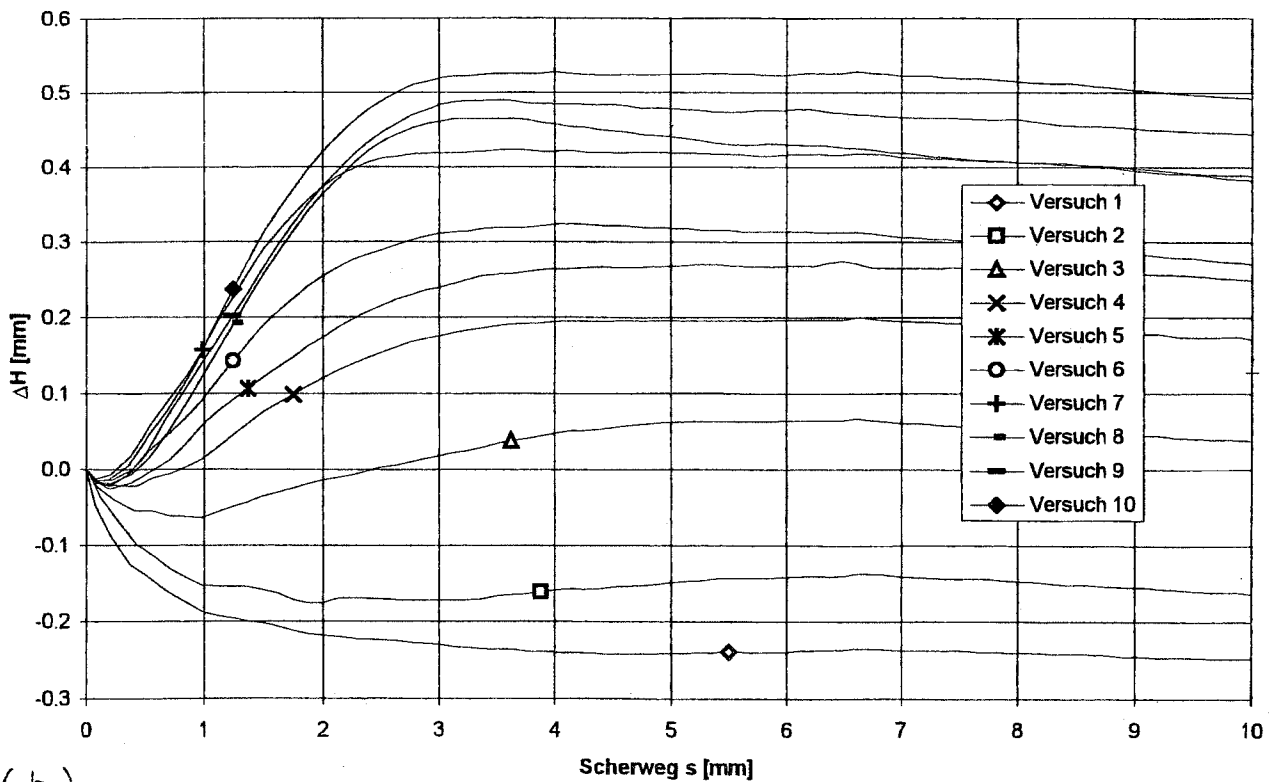
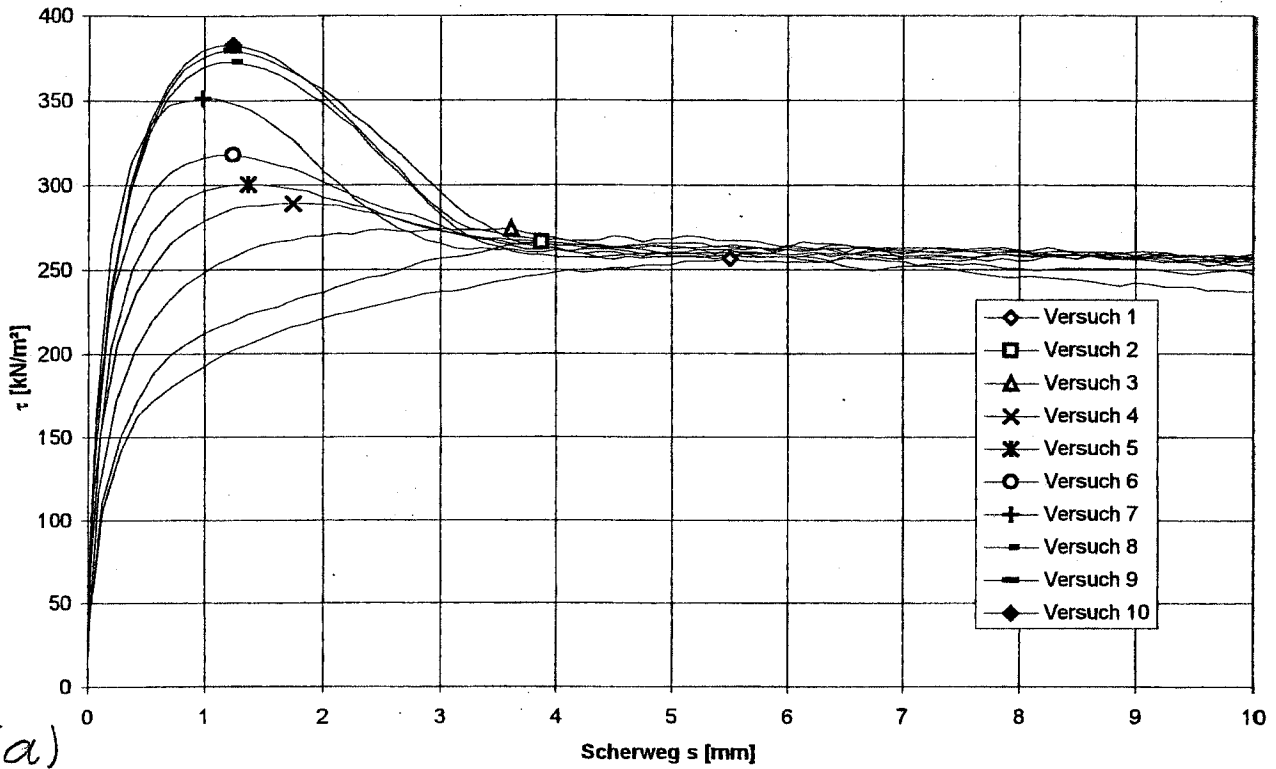




(d)

Serie von Rahmenscherversuchen bei unterschiedlicher Anfangsporenzahl e_0 und gleicher Normalspannung $\sigma' = 400 \text{ kN/m}^2$ mit einem parallelgeführten Rahmenschergerät

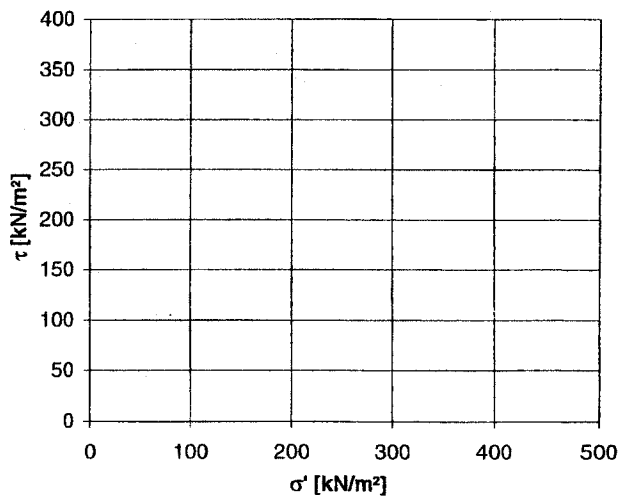
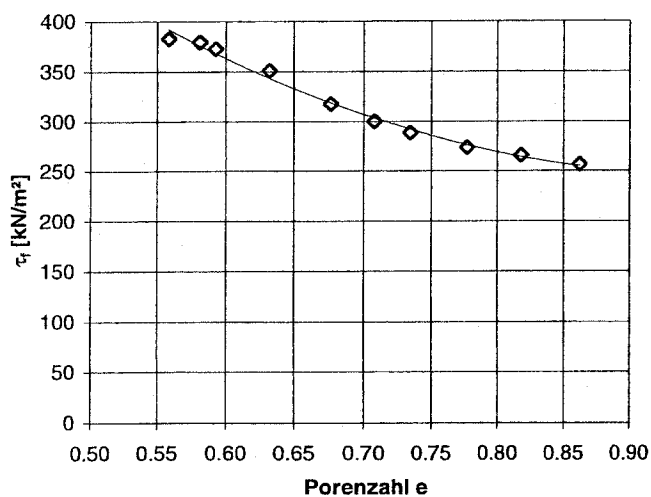
Bodenart: Mittelsand
 Schergeschwindigkeit: 0,24 mm/min
 Probenfläche: 6x6 cm², Ecken abgerundet (Radius=4mm)
 Konsolidierungszeit: 30 min
 parallelgeführtes Rahmenschergerät RS5 der Fa. Wille Geotechnik



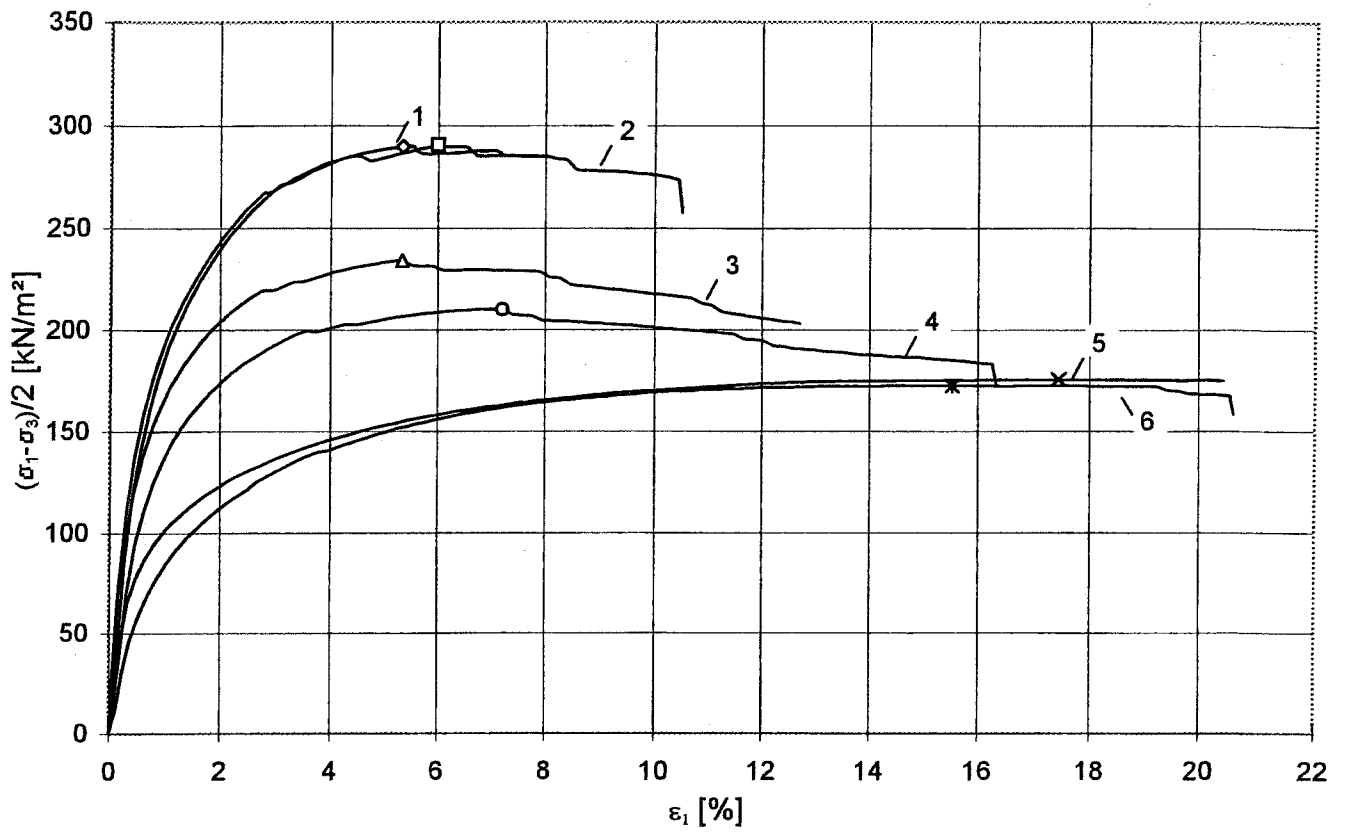
Serie von Rahmenscherversuchen bei unterschiedlicher Anfangsporenzahl und gleicher Normalspannung $\sigma' = 400 \text{ kN/m}^2$ mit einem parallelgeführten Rahmenschergerät

Bodenart: Mittelsand
 Schergeschwindigkeit: 0,24 mm/min
 Probenfläche: 6x6 cm², Ecken abgerundet (Radius=4mm)
 Konsolidierungszeit: 30 min
 parallelgeführtes Rahmenschergerät RS5 der Fa. Wille Geotechnik

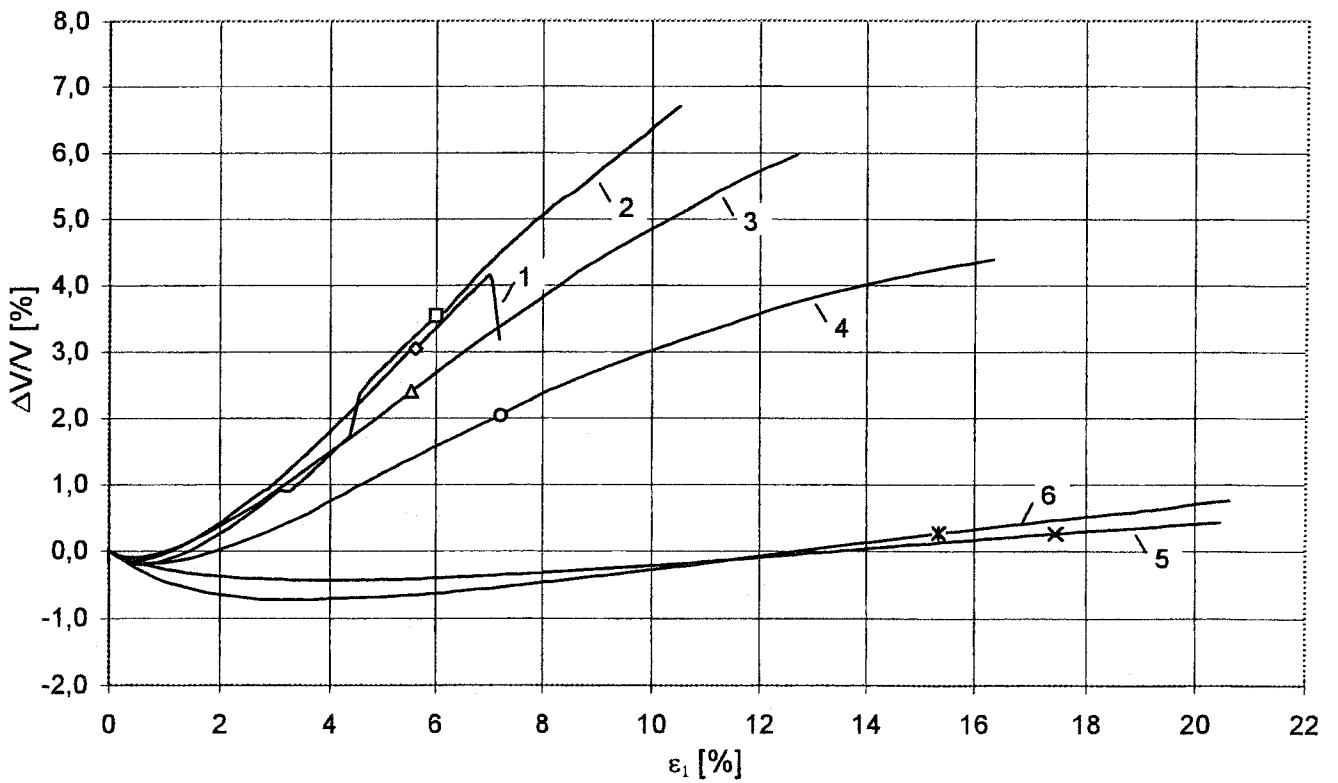
Versuch Nr.:	Wassergehalt		Anfangsporenzahl e_0	σ'_c kN/m ²	σ' kN/m ²	τ_f kN/m ²
	Einbau %	Ausbau %				
1	0	0	0.8619	400	400	256.7
2	0	0	0.8178	400	400	266.0
3	0	0	0.7769	400	400	274.0
4	0	0	0.7341	400	400	288.9
5	0	0	0.7077	400	400	300.2
6	0	0	0.6765	400	400	317.6
7	0	0	0.6324	400	400	351.0
8	0	0	0.5926	400	400	372.7
9	0	0	0.5811	400	400	379.5
10	0	0	0.5584	400	400	382.7



(d)



a)



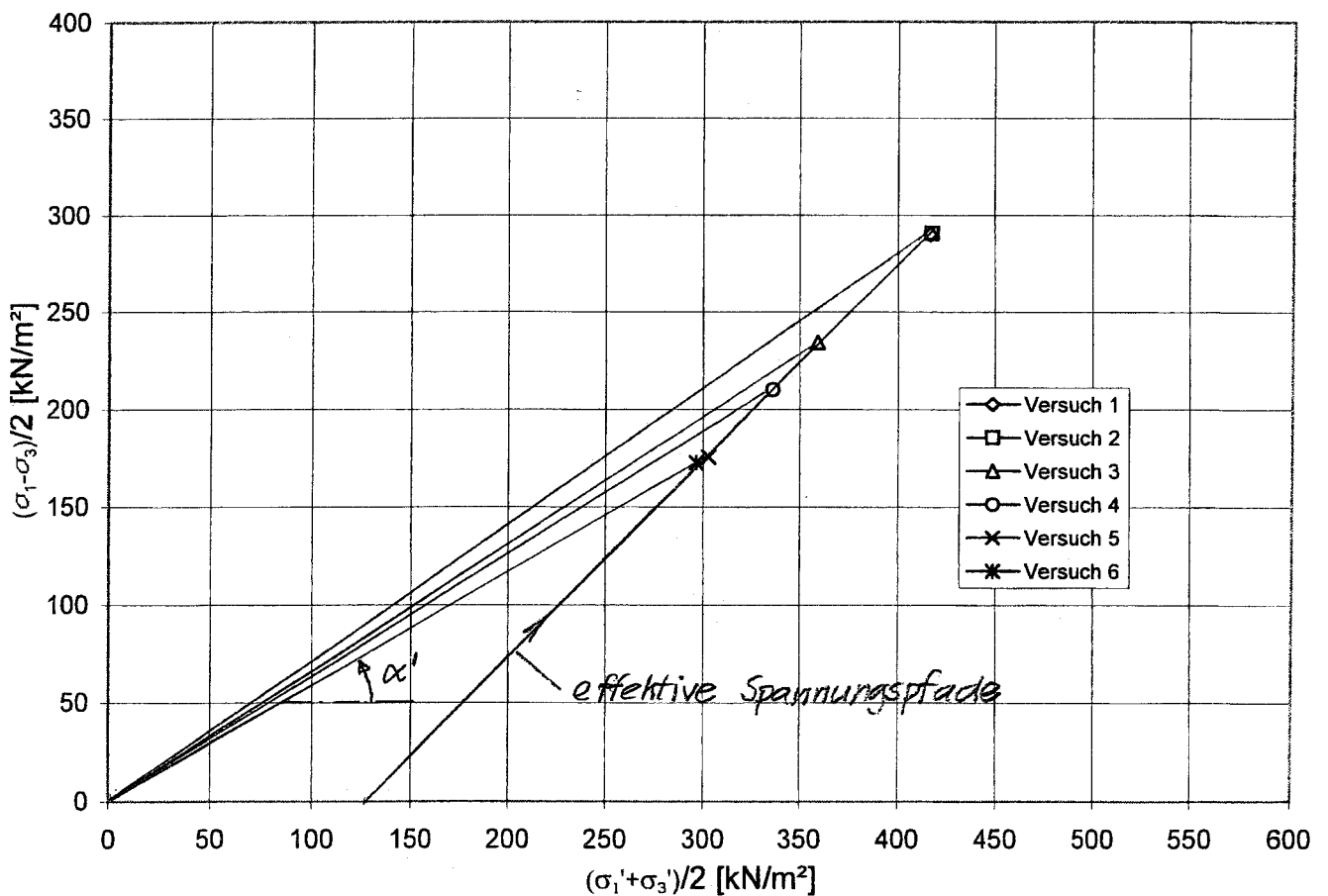
b)

Triaxial CD-Versuche an Mittelsand mit verschiedenen Einbaudichten unter gleichem Zellendruck Anlage 2.6

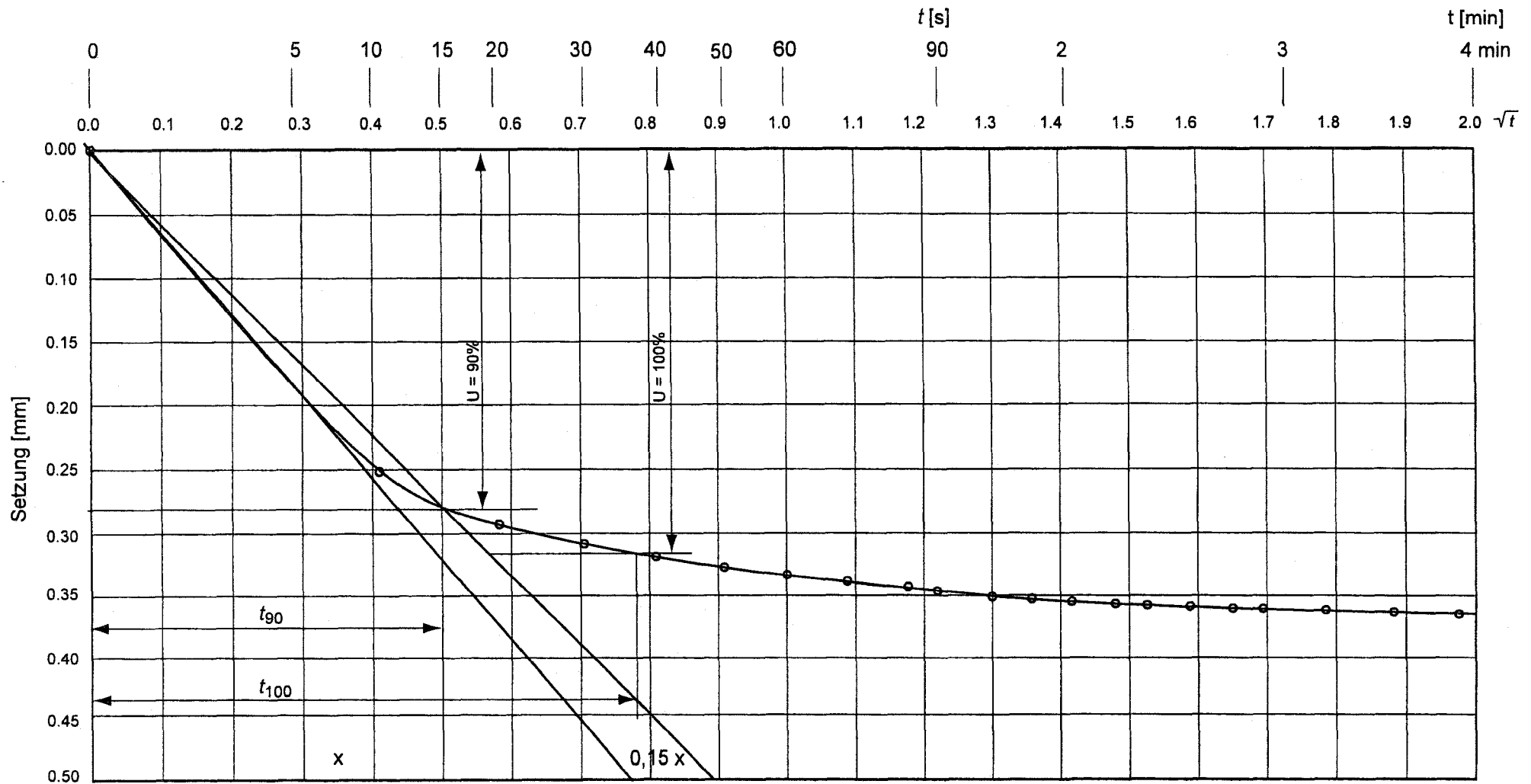
Einbau trocken mit verschiedenen Dichten,
durch Unterdruck entlüftet und wassergesättigt, danach konsolidiert.

Probendurchmesser d_0 : 100 mm
 Probenhöhe h_0 : 100 mm
 Zellendruck bei Sättigung und Konsolidation σ_3 : 420 kN/m²
 Zellendruck beim Abscheren σ_3 : 420 kN/m²
 Sättigungsdruck u_0 : 300 kN/m²
 Effektiver Seitendruck σ_3' : 120 kN/m²
 Stauchungsgeschwindigkeit v : 0,166 mm/min
 Versuchsstand Nr. 6

Versuch Nr.	Anfangsporenzahl e_0	Max. $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ [kN/m ²]	Max. $(\sigma_1' + \sigma_3')/2$ [kN/m ²]	ϵ_f [%]	$\Delta V_f/V_0$ [%]	α' [°]	ϕ' [°]
1	0,566	289,9	416,6	5,5	3,0	34,8	44,1
2	0,584	290,5	417,4	6,0	3,5	34,8	44,1
3	0,625	234,3	359,1	5,3	2,3	33,1	40,7
4	0,663	210,1	336,2	7,2	2,0	32,0	38,7
5	0,795	175,5	302,7	17,5	0,3	30,1	35,4
6	0,798	172,7	296,4	15,4	0,3	30,2	35,6



c)



$t_{90} = 15 \text{ s}$
 $t_{100} = 36 \text{ s}$

$U = 90\% = 0,28 \text{ mm}$
 $U = 100\% = 0,32 \text{ mm}$

Zeitlicher Konsolidierungsverlauf
 Schluff, aufbereitet
 Laststufe: 75 auf 150 kN/m²
 Bestimmung von t_{90} und t_{100} nach Taylor

Rahmenscherversuche mit konventionellem Gerät

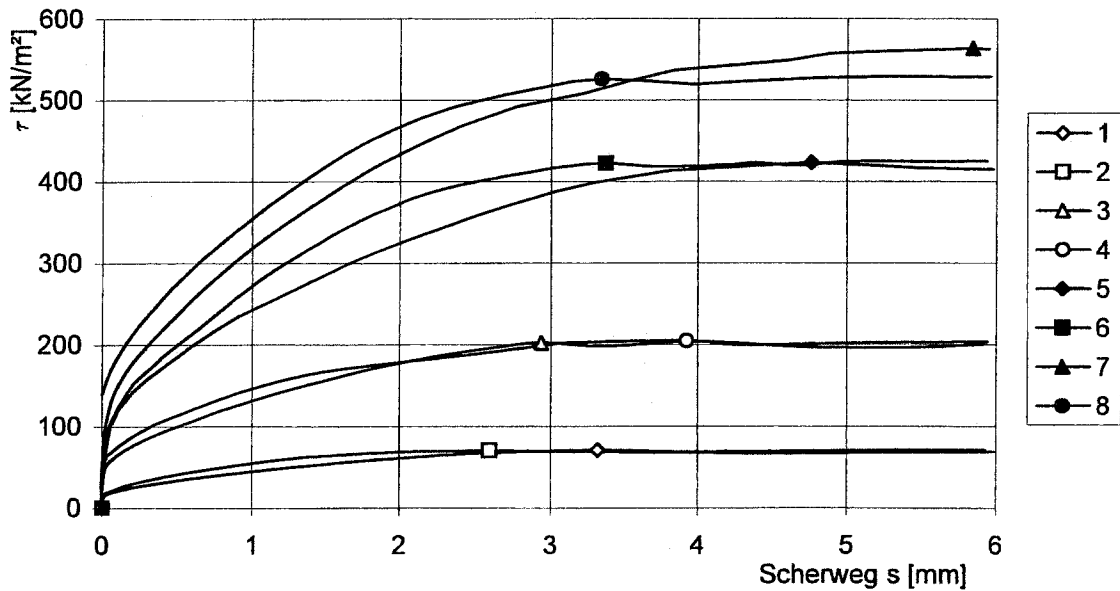
Bodenart: Schluff, aufbereitet

Rahmen: 6x6 cm²

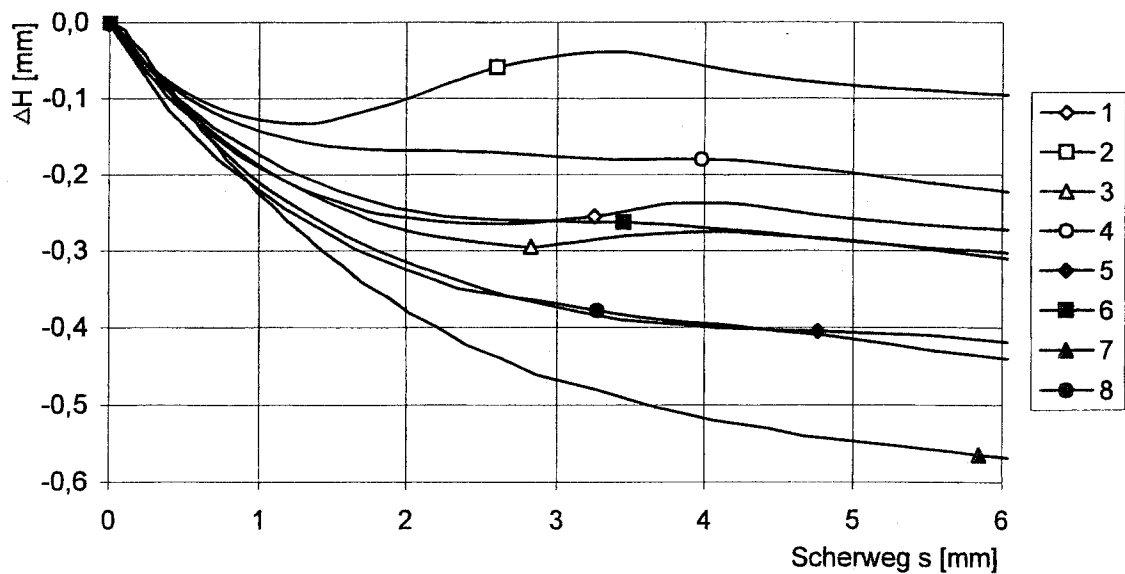
Schergeschwindigkeit: 0,033 mm/min

Versuch Nr.:	Normalspannung		max. Scherspannung		Scherweg s bei τ_f mm	Wassergehalt	
	σ'_c kN/m ²	σ'_i kN/m ²	τ_{ges} kN/m ²	τ_f kN/m ²		Einbau %	Ausbau %
1	100	100	73,7	70,7	3,32		21,0
2	100	100	73,2	70,2	2,59		20,2
3	300	300	205,4	202,4	2,93		19,6
4	300	300	207,5	204,5	3,92		20,8
5	600	600	425,8	422,8	4,77		18,7
6	600	600	425,2	422,2	3,37		19,2
7	800	800	566,6	563,6	5,84		18,5
8	800	800	528,8	525,8	3,34		19,6
Versuch ohne Probe			3,0	0,0			

a)



b)



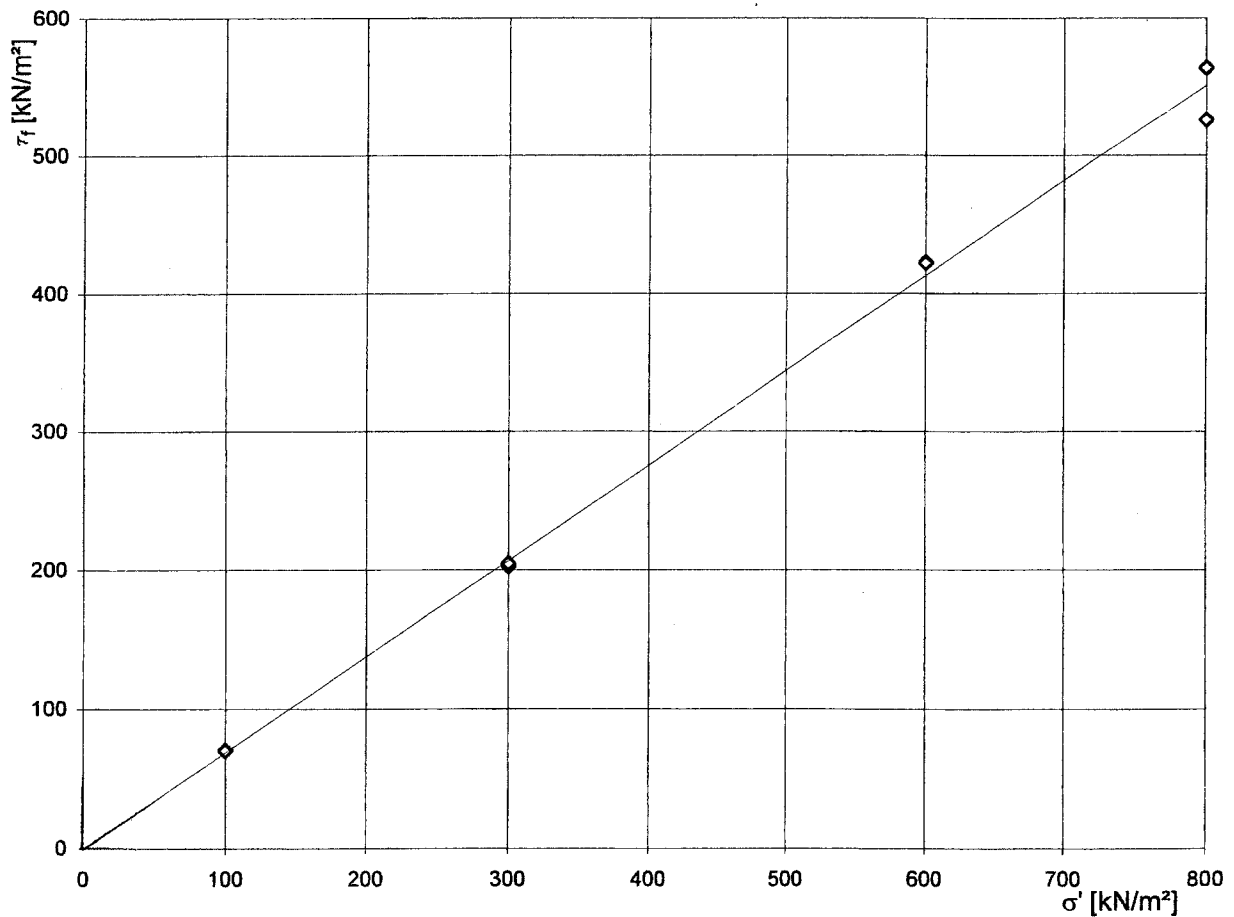
Rahmenscherversuche mit konventionellem Gerät

Bodenart: Schluff, aufbereitet

Rahmen: 6x6 cm²

Abschergeschwindigkeit: 0,033 mm/min

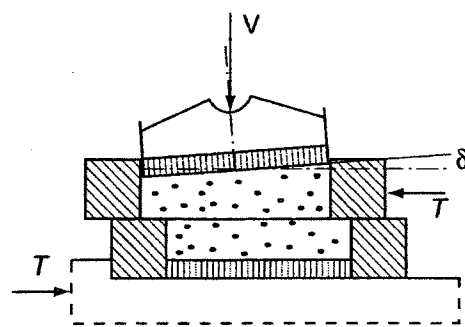
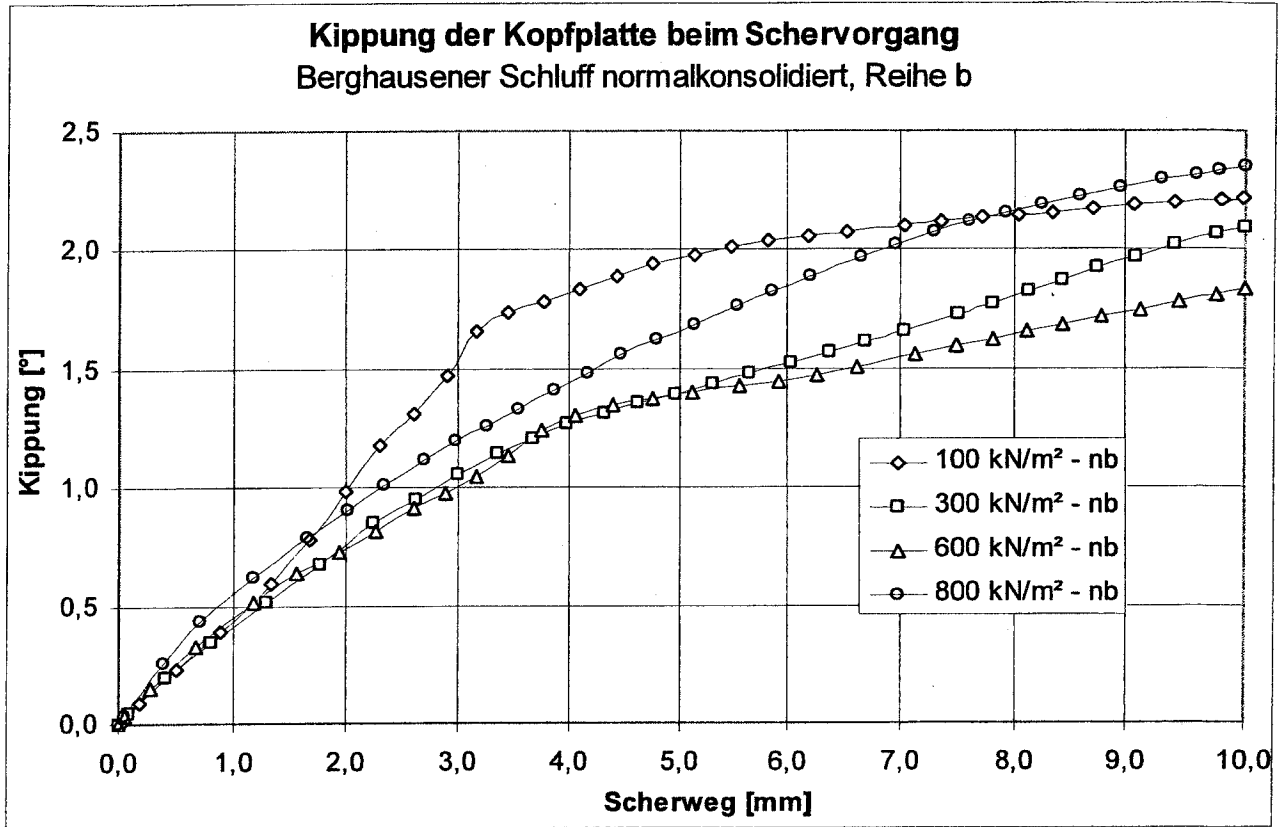
Versuchs- bezeichnung	Normalspannung		max. Scherspannung		Scherweg s bei τ_f mm	Wassergehalt	
	σ'_c kN/m ²	σ' kN/m ²	τ_{ges} kN/m ²	τ_f kN/m ²		Einbau %	Ausbau %
		0	0,0	0,0			
U-ugRSV-n100a	100	100	73,7	70,7	3,32		21,0
U-ugRSV-n100b	100	100	73,2	70,2	2,59		20,2
U-ugRSV-n300a	300	300	205,4	202,4	2,93		19,6
U-ugRSV-n300b	300	300	207,5	204,5	3,92		20,8
U-ugRSV-n600a	600	600	425,8	422,8	4,77		18,7
U-ugRSV-n600b	600	600	425,2	422,2	3,37		19,2
U-ugRSV-n800a	800	800	566,6	563,6	5,84		18,5
U-ugRSV-n800b	800	800	528,8	525,8	3,34		19,6
Versuch ohne Probe			3,0	0,0			



c)

Schergerade bestimmt durch lineare Regression:

Steigung $\tan \varphi'$	0,6885
Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ_s' [°]	34,5
Kohäsion c' [kN/m ²]	0,0
Bestimmtheitsmaß R^2 der linearen Regression	0,9972



(d)

Rahmenscherversuche mit konventionellem Gerät

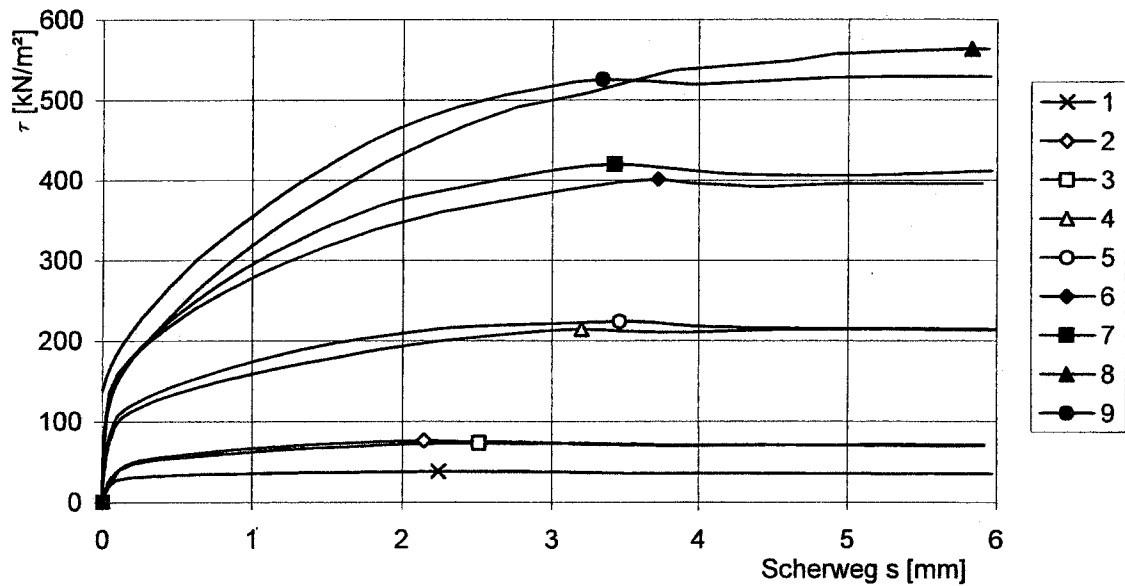
Bodenart: Schluff, aufbereitet

Rahmen: 6x6 cm²

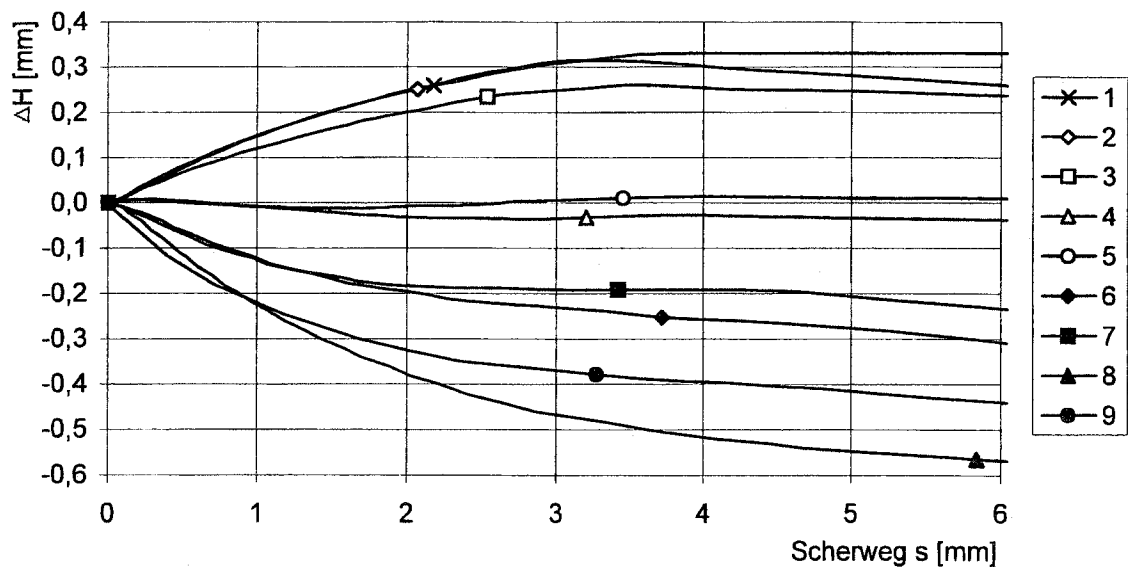
Schergeschwindigkeit: 0,033 mm/min

Versuch Nr.:	Normalspannung		max. Scherspannung		Scherweg s bei τ_f mm	Wassergehalt	
	σ'_c kN/m ²	σ' kN/m ²	τ_{ges} kN/m ²	τ_f kN/m ²		Einbau %	Ausbau %
1	800	50	41,1	38,1	2,24		20,2
2	800	100	79,5	76,5	2,14		20,5
3	800	100	76,3	73,3	2,51		19,9
4	800	300	217,5	214,5	3,20		20,6
5	800	300	227,0	224,0	3,45		19,6
6	800	600	404,4	401,4	3,72		20,2
7	800	600	423,2	420,2	3,42		19,0
8	800	800	566,6	563,6	5,84		18,5
9	800	800	528,8	525,8	3,34		19,6
Versuch ohne Probe			3,0	0,0			

a)



b)



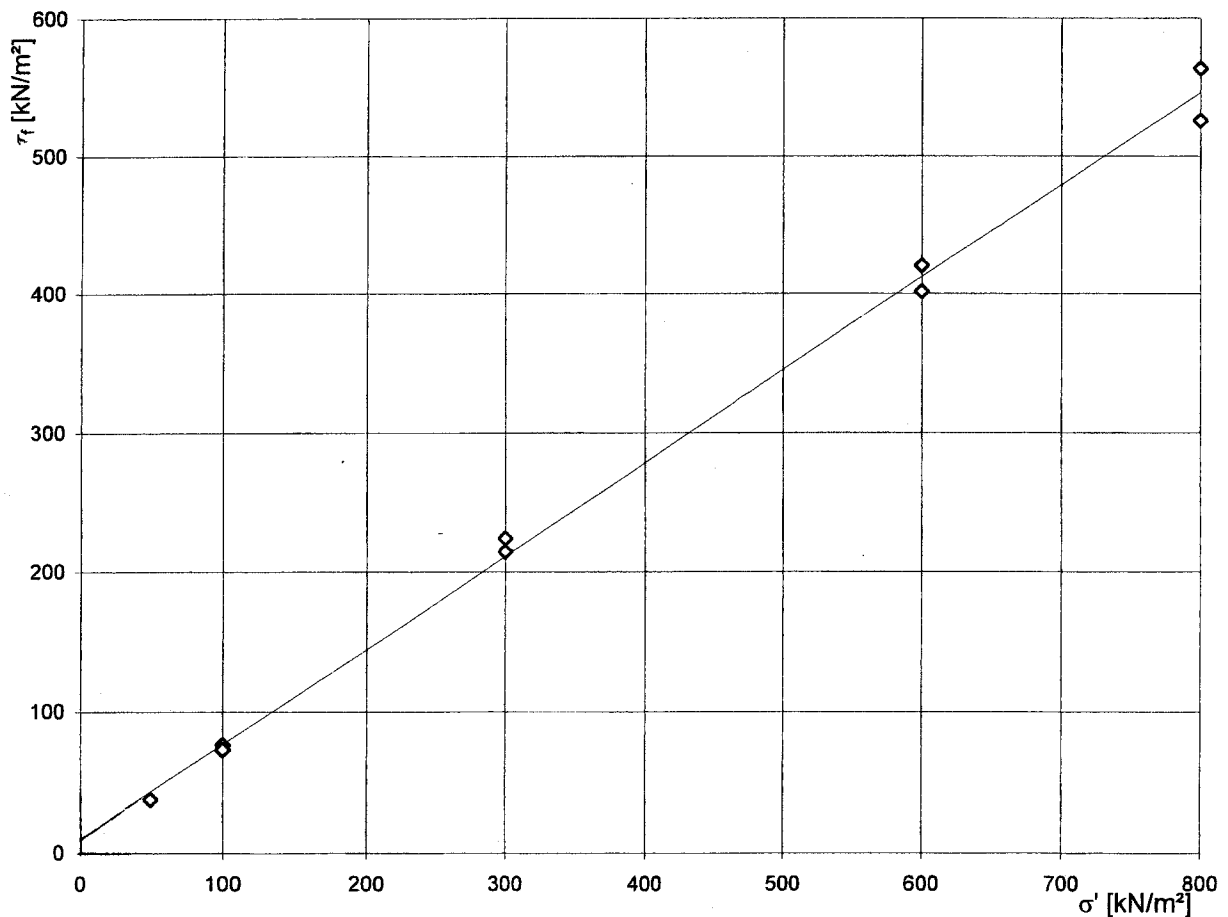
Rahmenscherversuche mit konventionellem Gerät

Bodenart: Schluff, aufbereitet

Rahmen: 6x6 cm²

Abschergeschwindigkeit: 0,033 mm/min

Versuchs- bezeichnung	Normalspannung		max.Scherspannung		Scherweg s bei τ_f mm	Wassergehalt	
	σ'_c kN/m ²	σ' kN/m ²	τ_{ges} kN/m ²	τ_f kN/m ²		Einbau %	Ausbau %
Kohäsion		0		10,2			
U-ugRSV-ue50	800	50	41,1	38,1	2,235		20,2
U-ugRSV-ue100a	800	100	79,5	76,5	2,139		20,5
U-ugRSV-ue100b	800	100	76,3	73,3	2,506		19,9
U-ugRSV-ue300a	800	300	217,5	214,5	3,200		20,6
U-ugRSV-ue300b	800	300	227,0	224,0	3,454		19,6
U-ugRSV-ue600a	800	600	404,4	401,4	3,722		20,2
U-ugRSV-ue600b	800	600	423,2	420,2	3,420		19,0
U-ugRSV-n800a	800	800	566,6	563,6	5,84		18,5
U-ugRSV-n800b	800	800	528,8	525,8	3,34		19,6
Versuch ohne Probe			3,0	0,0			



c)

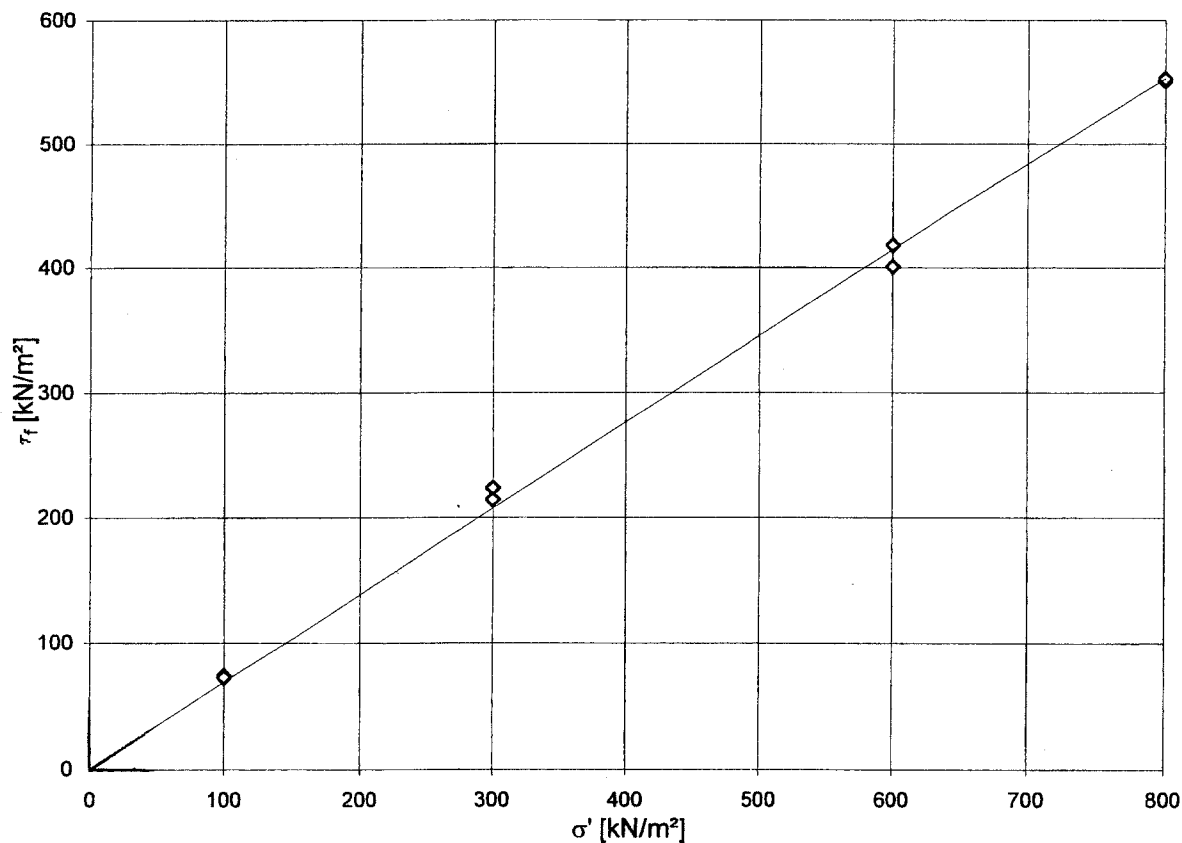
Schergerade bestimmt durch lineare Regression:

Steigung $\tan \phi'$	0,6700
effektiver Reibungswinkel ϕ' [°]	33,8
Kohäsion c' [kN/m ²]	10,2
Bestimmtheitsmaß R^2 der linearen Regression	0,9971

Parallelgeführte Rahmenscherversuche an Schluff, normalkonsolidiert

Bodenart: Berghausener Schluff, aufbereitet
 Schergeschwindigkeit: 0,033 mm/min
 Probenfläche: 6x6 cm², Ecken abgerundet (Radius=4mm)
 Mindestkonsolidierungszeit: 2 h
 Versuchsgerät: parallelgeführtes Rahmenschergerät RS5 der Fa. Wille Geotechnik

Versuchs-Nr.	Normalspannung		max. Scherfestigkeit		Wassergehalt	
	σ'_c kN/m ²	σ' kN/m ²	τ_f kN/m ²	s mm	Einbau %	Ausbau %
		0	0,0			
1	100	100	74,1	3,5	27,3	
2	100	100	72,8	3,7	28,8	
3	300	300	214,2	4,2	29,7	
4	300	300	223,7	2,9	26,4	
5	600	600	400,8	4,9	31,8	
6	600	600	418,3	5,1	29,6	
7	800	800	551,4	4,4	28,9	
8	800	800	552,9	5,5	27,0	



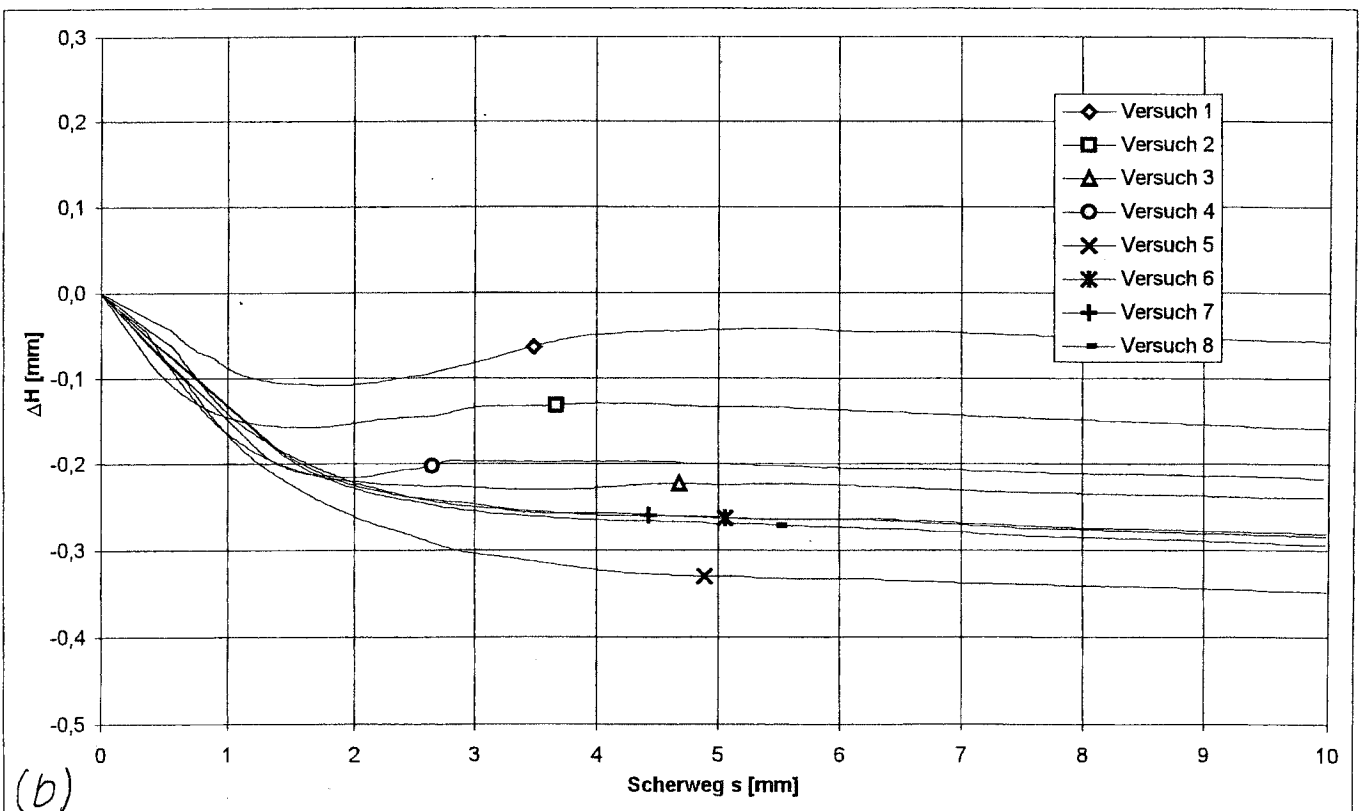
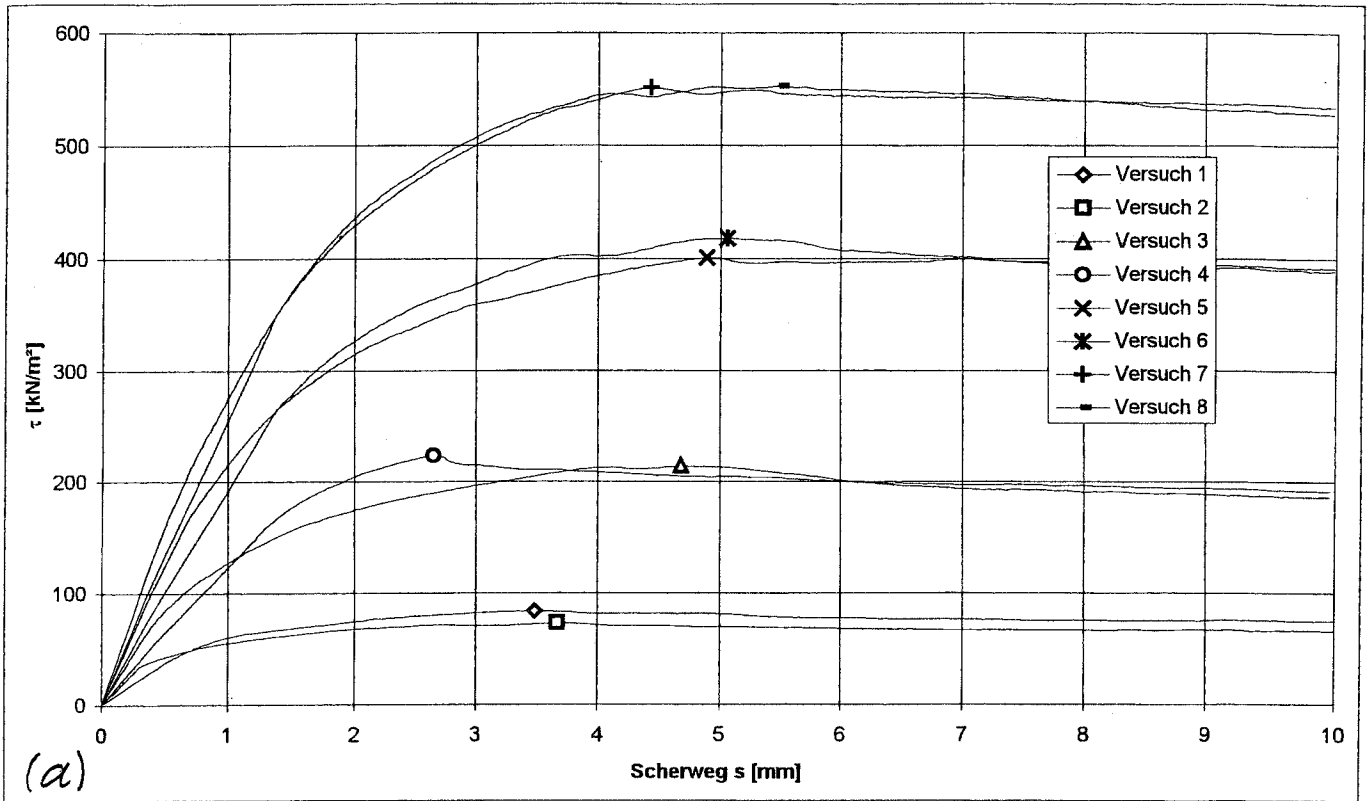
c)

Schergerade bestimmt durch lineare Regression:

Steigung $\tan \varphi'$ 0,6913
 Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ_s' [°] 34,7
 Kohäsion c' [kN/m²] 0,0
 Bestimmtheitsmaß R^2 der linearen Regression 0,9984

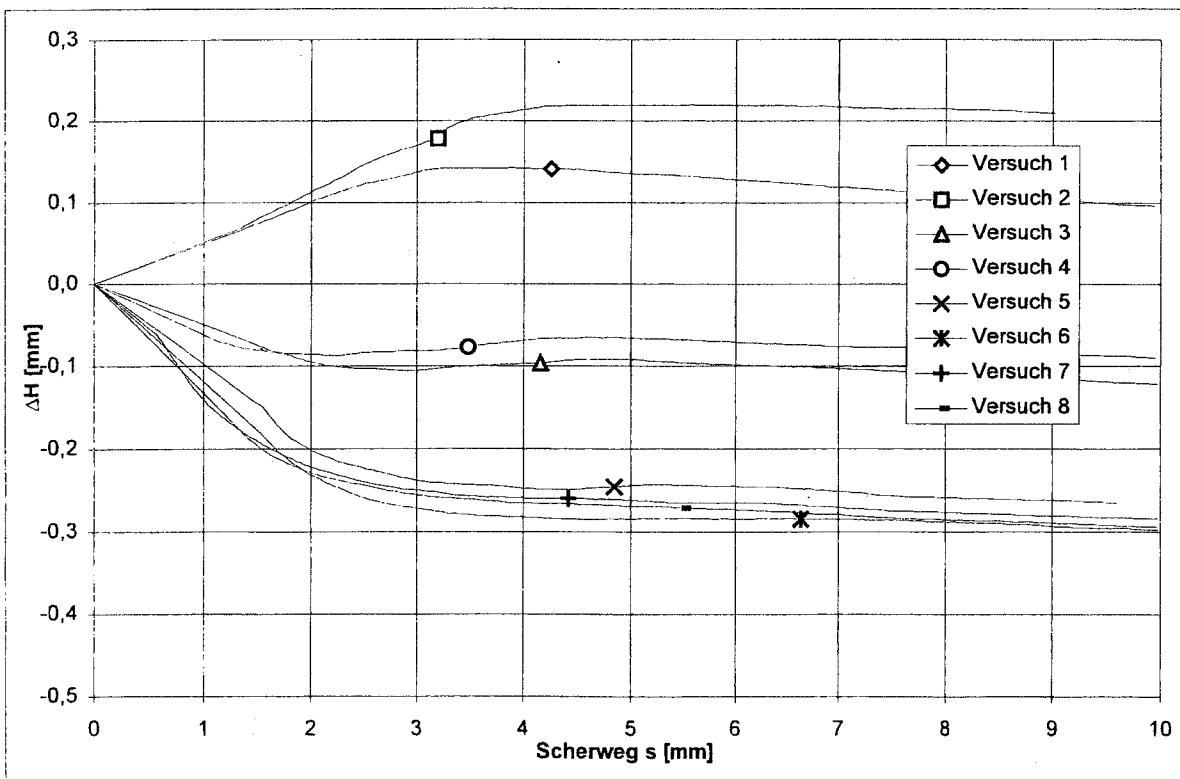
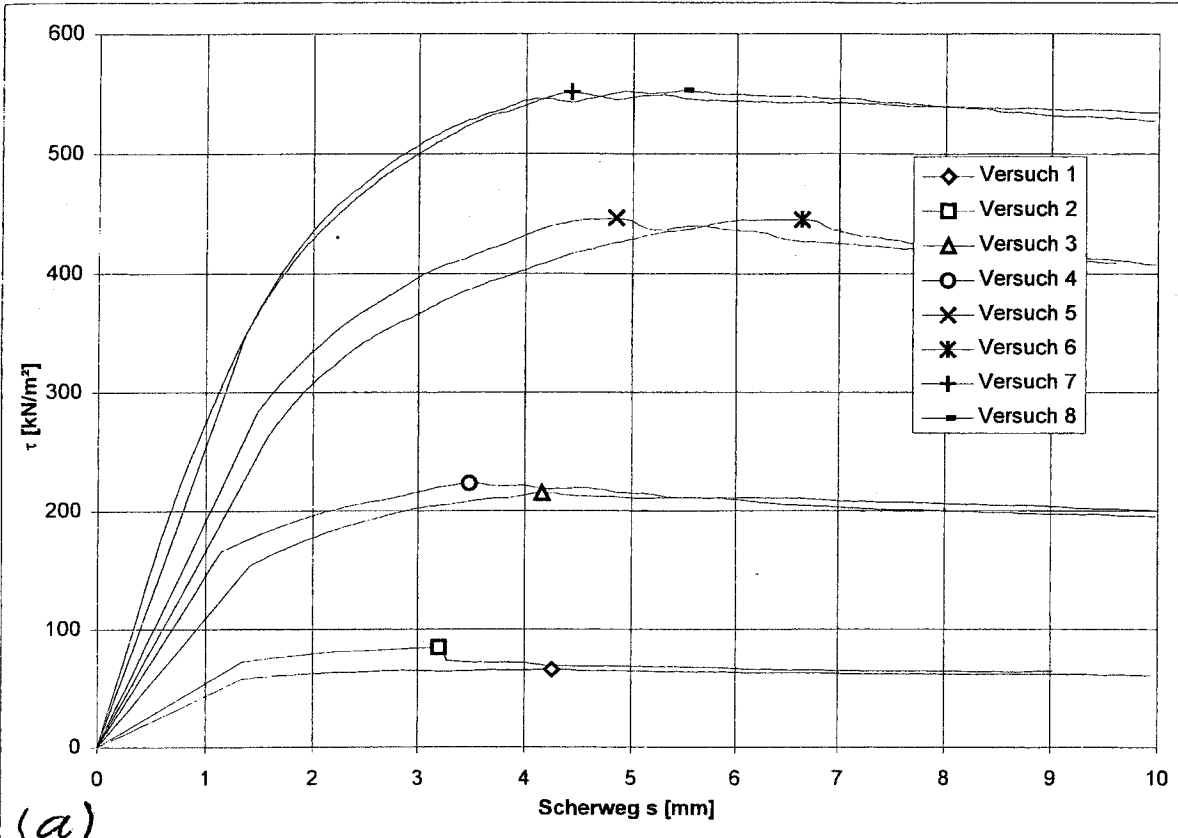
Parallelgeführte Rahmenscherversuche an Schluff, normalkonsolidiert

Bodenart: Berghausener Schluff, aufbereitet
 Schergeschwindigkeit: 0,033 mm/min
 Probenfläche: 6x6 cm², Ecken abgerundet (Radius=4mm)
 Mindestkonsolidierungszeit: 2 h
 Versuchsgerät: parallelgeführtes Rahmenschergerät RS5 der Fa. Wille Geotechnik



Parallelgeführte Rahmenscherversuche an Schluff, überkonsolidiert

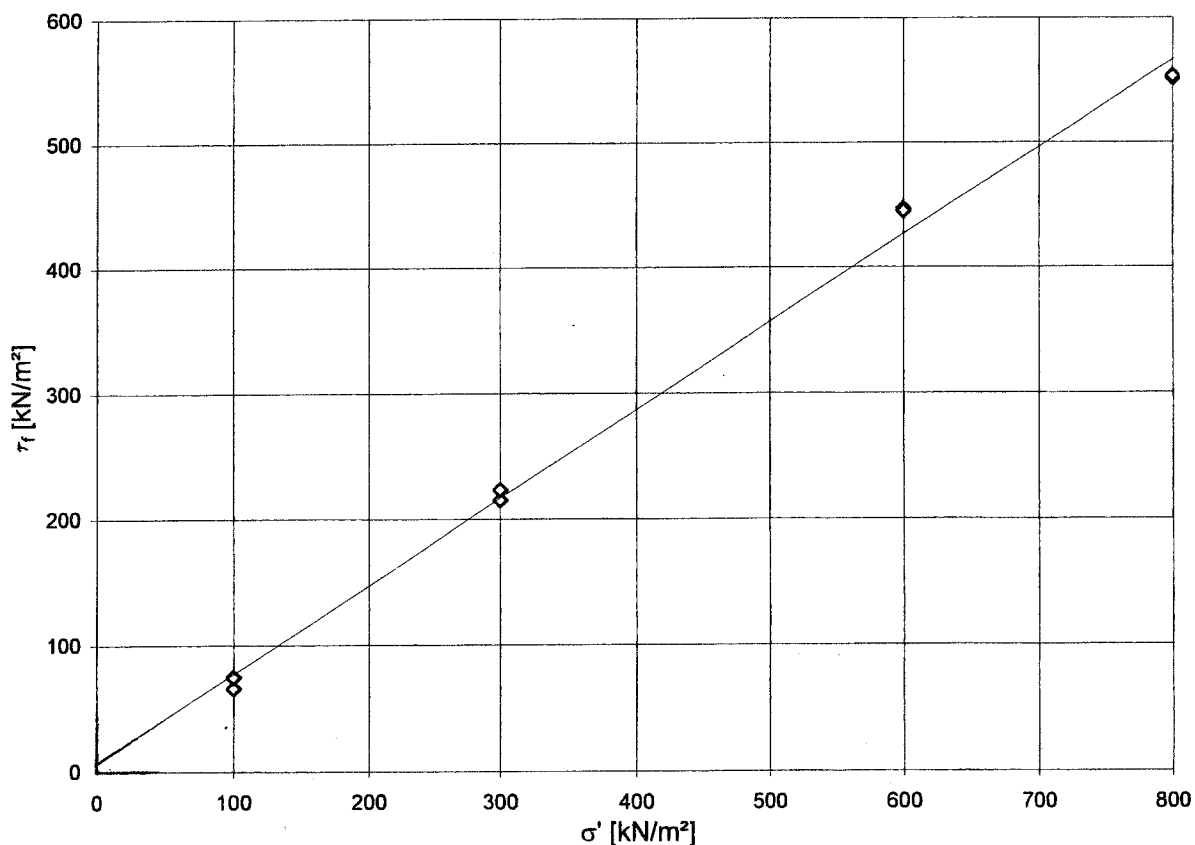
Bodenart: Berghausener Schluff, aufbereitet
 Schergeschwindigkeit: 0,033 mm/min
 Probenfläche: 6x6 cm², Ecken abgerundet (Radius=4mm)
 Mindestkonsolidierungszeit: 2 h
 Entlastungszeit: 1 h
 Versuchsgerät: parallelgeführtes Rahmenschergerät RS5 der Fa. Wille Geotechnik



Parallelgeführte Rahmenscherversuche an Schluff, überkonsolidiert

Bodenart: Berghausener Schluff, aufbereitet
 Schergeschwindigkeit: 0,033 mm/min
 Probenfläche: 6x6 cm², Ecken abgerundet (Radius=4mm)
 Mindestkonsolidierungszeit: 2 h
 Entlastungszeit: 1 h
 Versuchsgerät: parallelgeführtes Rahmenschergerät RS5 der Fa. Wille Geotechnik

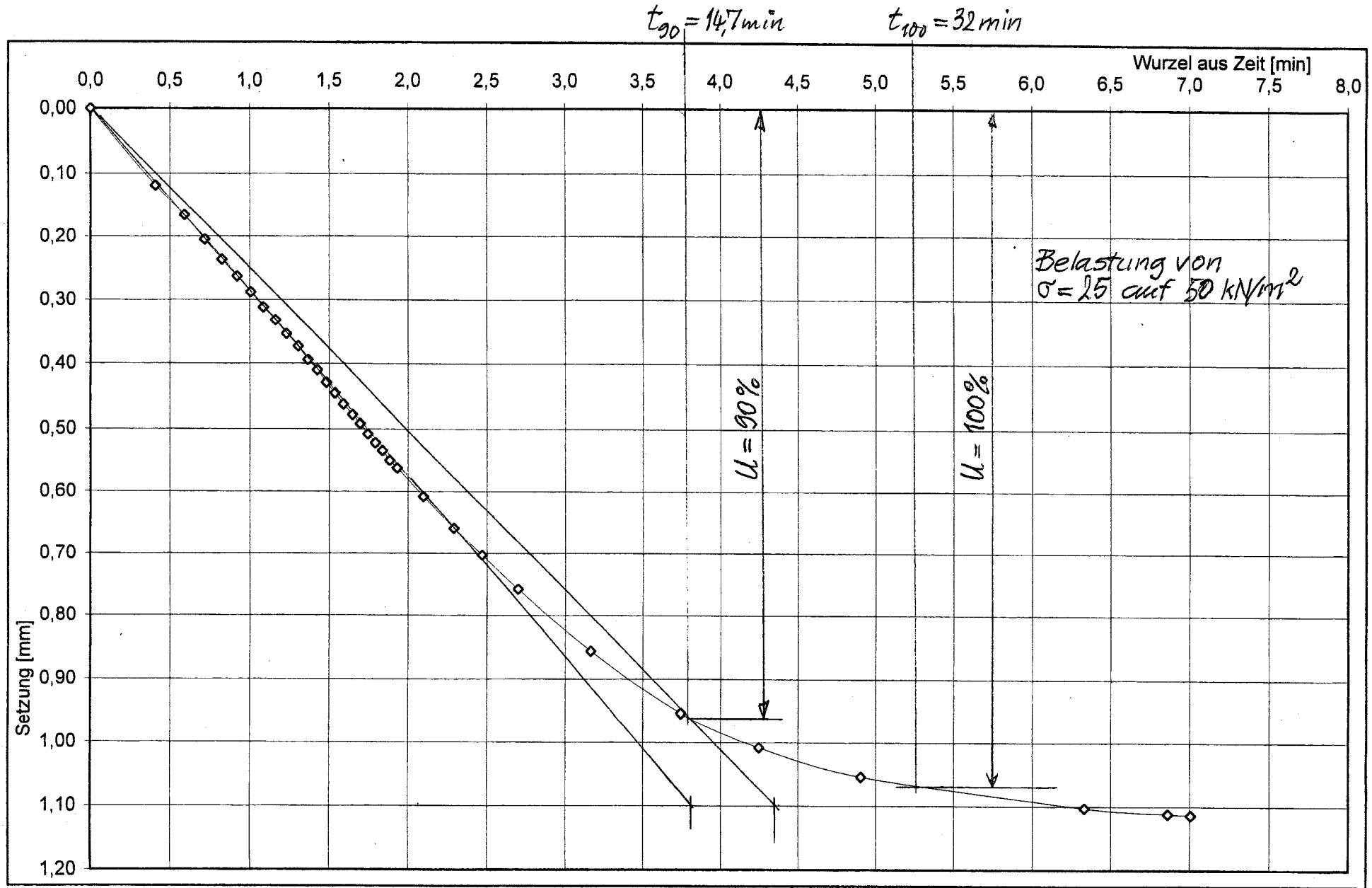
Versuchs-Nr.	σ'_c kN/m ²	σ' kN/m ²	τ_f kN/m ²	Scherweg s bei τ_f mm	Wassergehalt	
					Einbau %	Ausbau %
		0	7,5			
1	800	100	65,88	4,16	29,4	
2	800	100	74,68	3,20	29,4	
3	800	300	215,18	4,16	29,5	
4	800	300	223,40	3,48	28,4	
5	800	600	446,66	4,85	29,0	
6	800	600	445,13	6,64	29,7	
7	800	800	551,39	4,42	28,9	
8	800	800	552,92	5,50	27,0	



(c)

Schergerade bestimmt durch lineare Regression:

Steigung $\tan \varphi'$ 0,6988
 effektiver Reibungswinkel φ' [°] 34,9
 Kohäsion c' [kN/m²] 7,5
 Bestimmtheitsmaß R^2 der linearen Regression 0,9953



Anlage 6.1

Rahmenscherversuche mit konventionellem Gerät

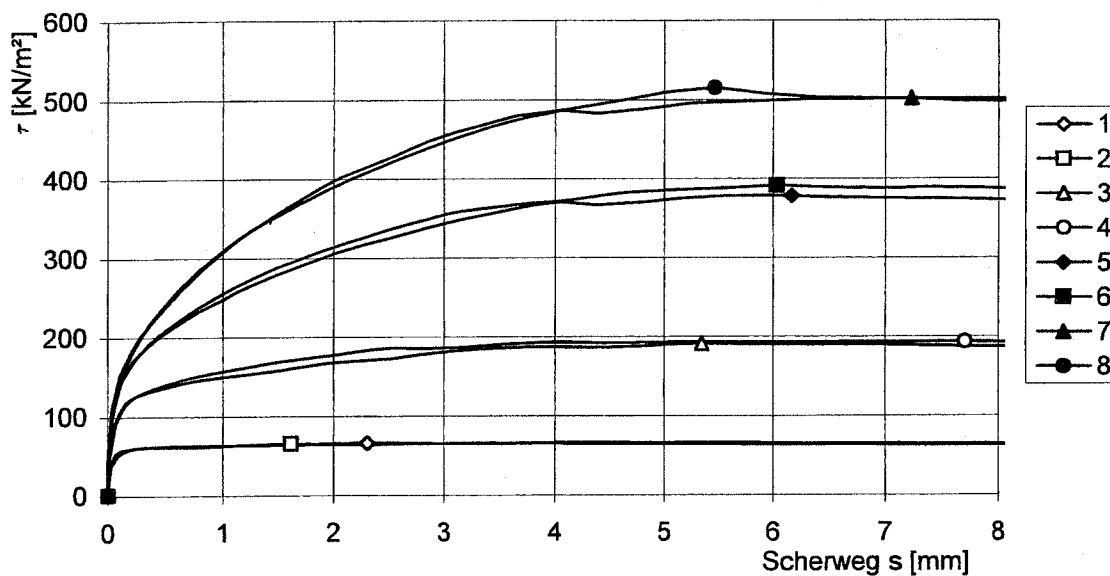
Bodenart: Seeton, aufbereitet

Rahmen: 6x6 cm²

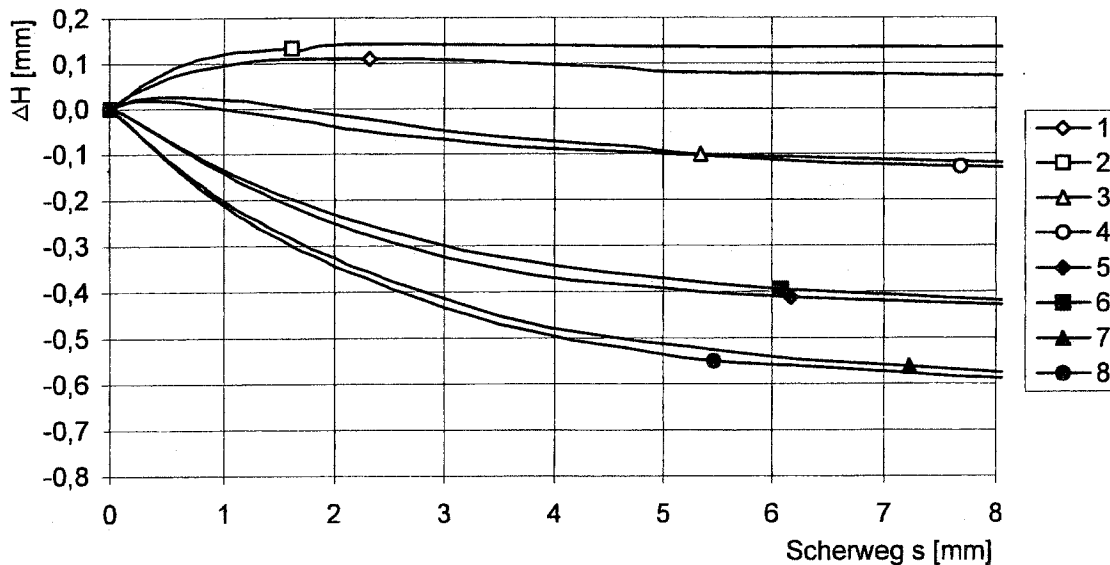
Schergeschwindigkeit: 0,023 mm/min

Versuch Nr.:	Normalspannung		max. Scherspannung		Scherweg s bei τ_f mm	Wassergehalt	
	σ'_c kN/m ²	σ' kN/m ²	τ_{ges} kN/m ²	τ_f kN/m ²		Einbau %	Ausbau %
		0	0	0			
1	800	100	69,2	66,2	2,306	35,3	17,7
2	800	100	68,6	65,6	1,613	34,4	17,8
3	800	300	194,3	191,3	5,348	34,6	17,2
4	800	300	196,4	193,4	7,700	32,4	16,5
5	800	600	381,5	378,5	6,162	34,7	15,9
6	800	600	394,2	391,2	6,034	34,0	15,6
7	800	800	504,9	501,9	7,225	34,7	15,5
8	800	800	518,3	515,3	5,469	33,2	15,1
Versuch ohne Probe			3,0	0,0			

a)



b)



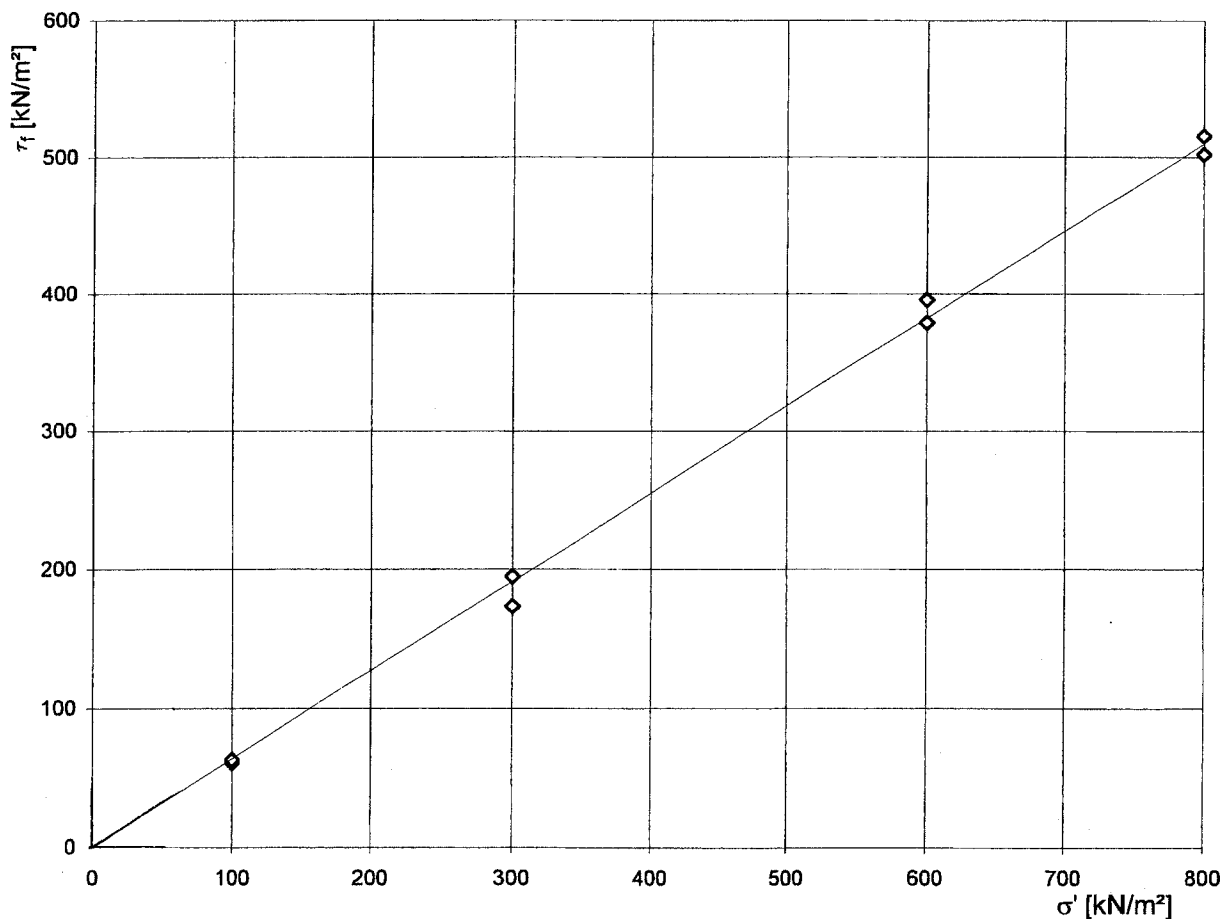
Rahmenscherversuche mit konventionellem Gerät

Bodenart: Seeton, aufbereitet

Rahmen: 6x6 cm²

Abschergeschwindigkeit: 0,023 mm/min

Versuchs- bezeichnung	Normalspannung		max.Scherspannung		Scherweg s bei τ_f mm	Wassergehalt	
	σ'_c kN/m ²	σ' kN/m ²	τ_{ges} kN/m ²	τ_f kN/m ²		Einbau %	Ausbau %
		0	0,0	0,0			
TugRSn100a	100	100	63,6	60,6	6,91	32,2	18,6
TugRSn100c	100	100	65,9	62,9	9,61	32,4	18,8
TugRSn300d	300	300	197,6	194,6	7,23	33,0	16,8
TugRSn300e	300	300	176,2	173,2	5,65	33,0	17,2
TugRSn600a	600	600	381,9	378,9	5,63	35,3	15,7
TugRSn600c	600	600	398,6	395,6	6,59	32,4	15,6
TugRSn800c	800	800	504,9	501,9	7,23	34,7	15,5
TugRSn800d	800	800	518,3	515,3	5,47	33,2	15,1
Versuch ohne Probe			3,0	0,0			



c)

Schergerade bestimmt durch lineare Regression:

Steigung $\tan \varphi'$	0,6369
Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ_s' [°]	32,5
Kohäsion c' [kN/m ²]	0,0
Bestimmtheitsmaß R^2 der linearen Regression	0,9980

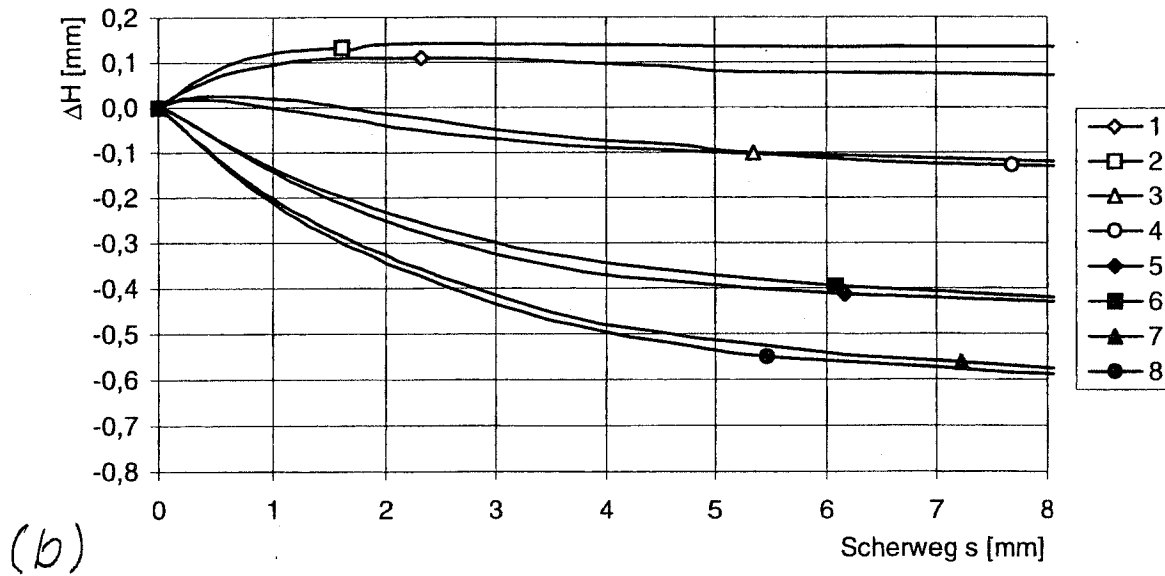
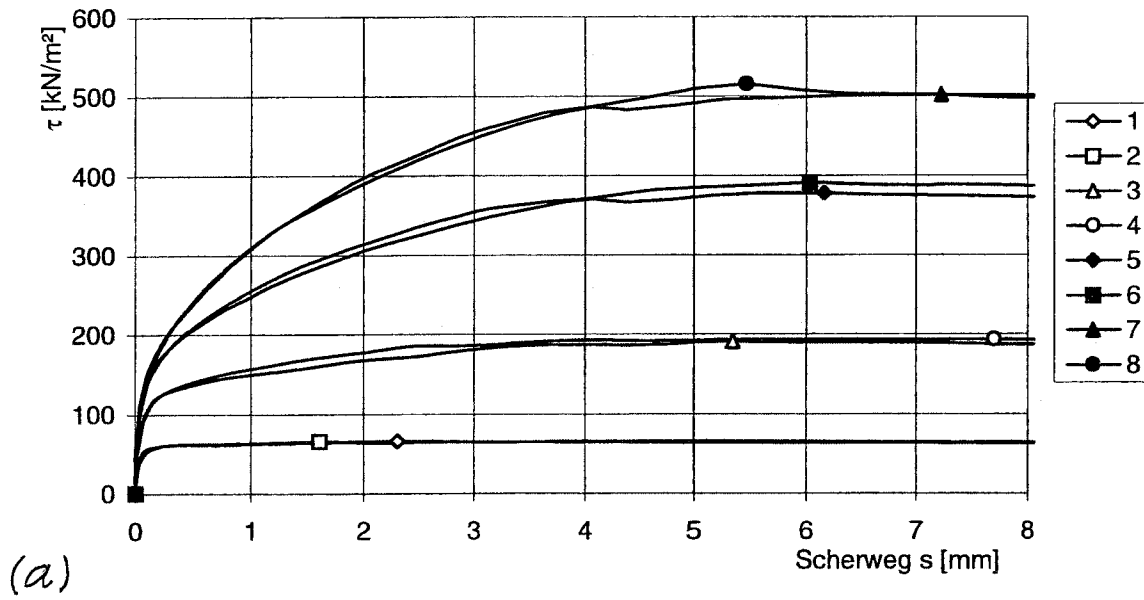
Rahmenscherversuche mit konventionellem Gerät

Bodenart: Seeton, aufbereitet

Rahmen: 6x6 cm²

Schergeschwindigkeit: 0,023 mm/min

Versuch Nr.:	Normalspannung		max. Scherspannung		Scherweg s bei τ_f mm	Wassergehalt	
	σ'_c kN/m ²	σ' kN/m ²	τ_{ges} kN/m ²	τ_f kN/m ²		Einbau %	Ausbau %
		0	0	0			
1	800	100	69,2	66,2	2,306	35,3	17,7
2	800	100	68,6	65,6	1,613	34,4	17,8
3	800	300	194,3	191,3	5,348	34,6	17,2
4	800	300	196,4	193,4	7,700	32,4	16,5
5	800	600	381,5	378,5	6,162	34,7	15,9
6	800	600	394,2	391,2	6,034	34,0	15,6
7	800	800	504,9	501,9	7,225	34,7	15,5
8	800	800	518,3	515,3	5,469	33,2	15,1
Versuch ohne Probe			3,0	0,0			



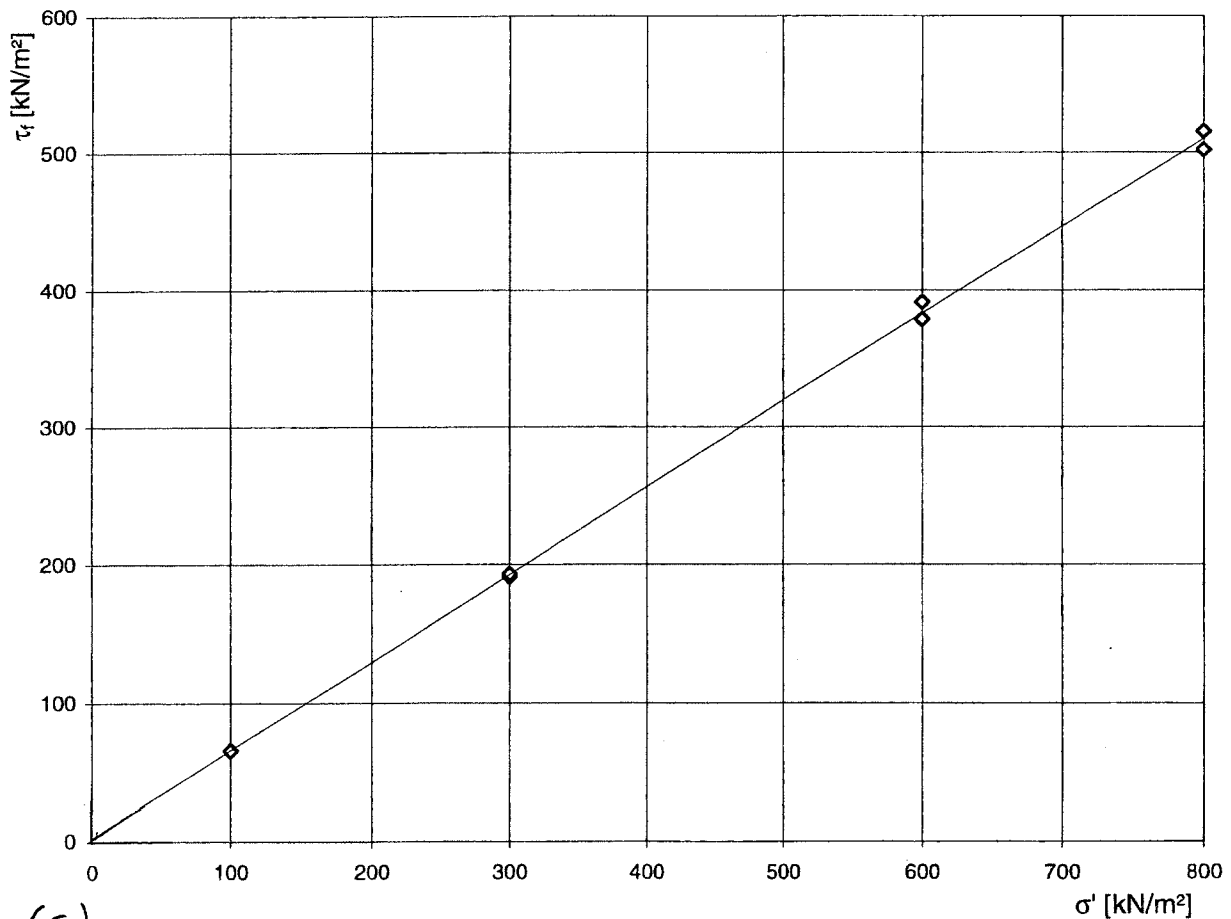
Rahmenscherversuche mit konventionellem Gerät

Bodenart: Seeton, aufbereitet

Rahmen: 6x6 cm²

Abschergeschwindigkeit: 0,023 mm/min

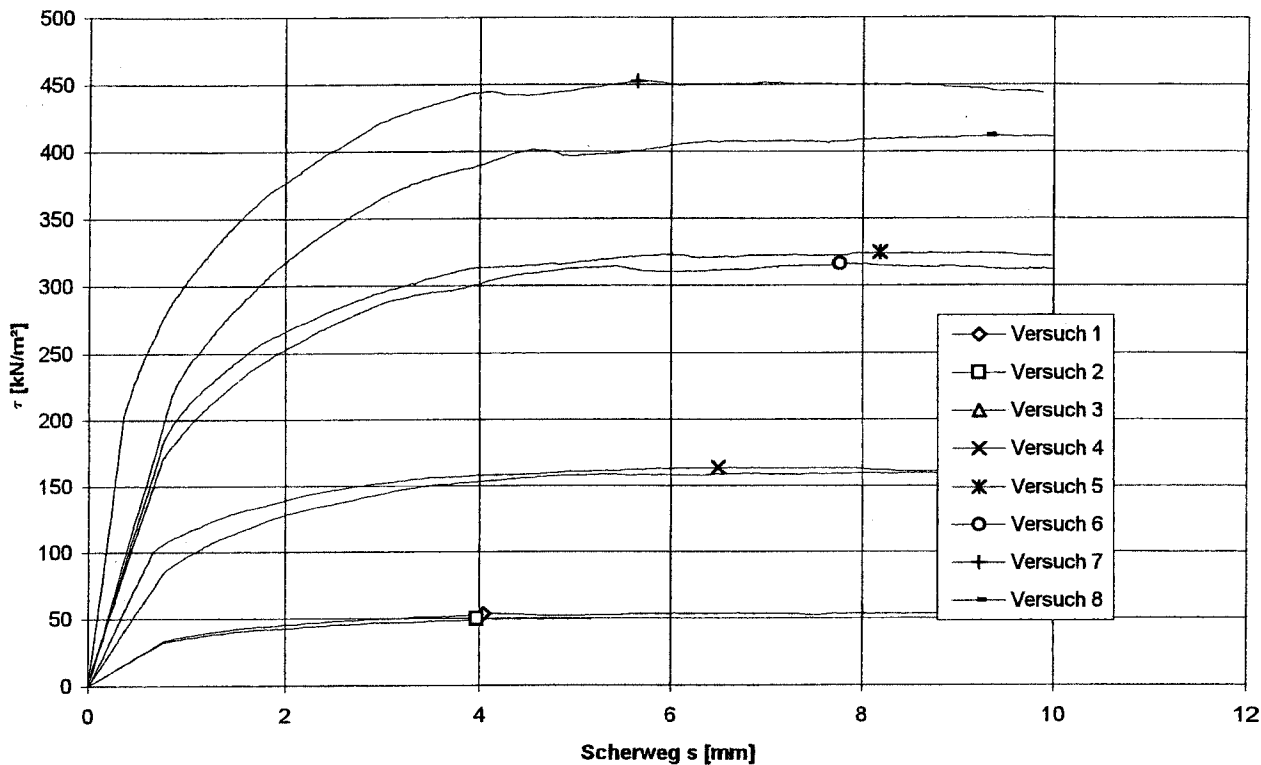
Versuchs- bezeichnung	Normalspannung		max.Scherspannung		Scherweg s bei τ_f mm	Wassergehalt	
	σ'_c kN/m ²	σ' kN/m ²	τ_{ges} kN/m ²	τ_f kN/m ²		Einbau %	Ausbau %
Kohäsion		0		2,7			
TugRSue100a	800	100	69,2	66,2	2,31	35,3	17,7
TugRSue100b	800	100	68,6	65,6	1,61	34,4	17,8
TugRSue300a	800	300	194,3	191,3	5,348	34,6	17,2
TugRSue300c	800	300	196,4	193,4	7,700	32,4	16,5
TugRSue600a	800	600	381,5	378,5	6,162	34,7	15,9
TugRSue600b	800	600	394,2	391,2	6,034	34,0	15,6
TugRSn800c	800	800	504,9	501,9	7,225	34,7	15,5
TugRSn800d	800	800	518,3	515,3	5,469	33,2	15,1
Versuch ohne Probe			3,0	0,0			

**Schergerade bestimmt durch lineare Regression:**

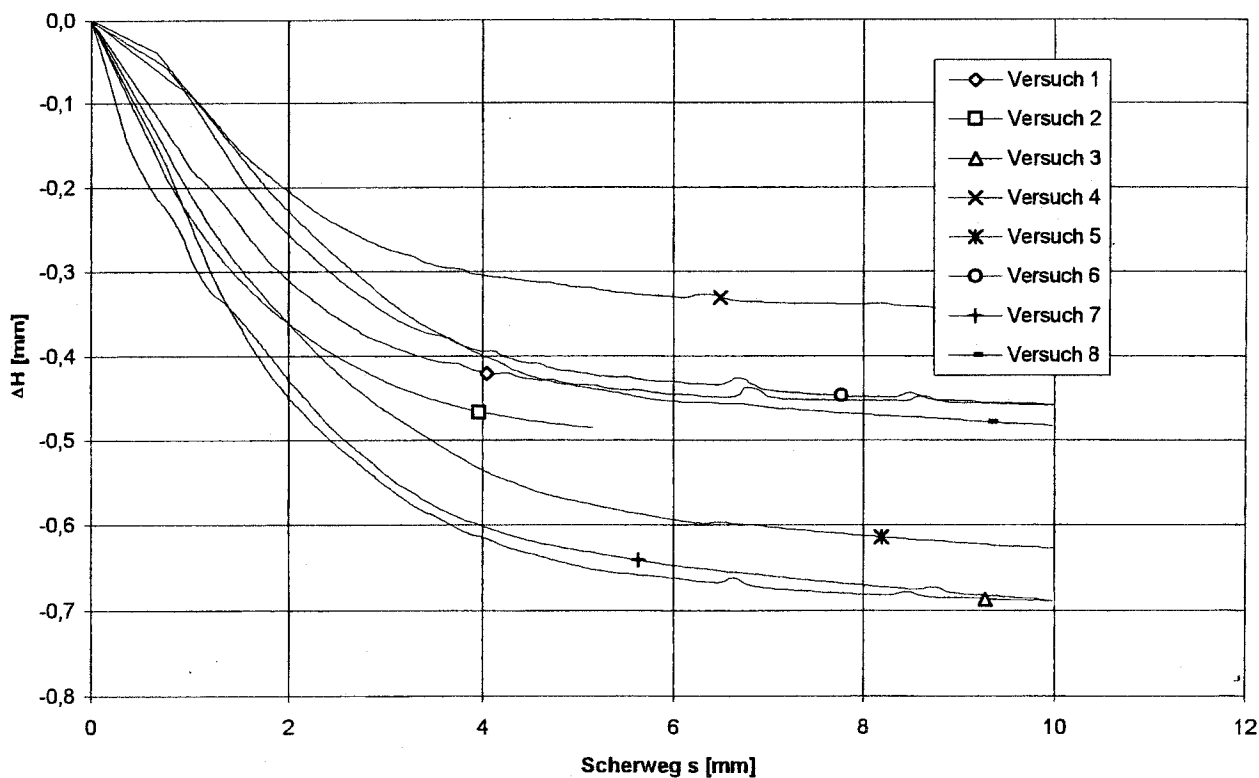
Steigung $\tan \varphi'$	0,6339
effektiver Reibungswinkel φ' [°]	32,4
Kohäsion c' [kN/m ²]	2,7
Bestimmtheitsmaß R^2 der linearen Regression	0,9994

Parallelgeführte Rahmenscherversuche an Seeton, normalkonsolidiert

Bodenart: Seeton, aufbereitet
 Schergeschwindigkeit: 0,023 mm/min
 Probenfläche: 6x6 cm², Ecken abgerundet (Radius=4mm)
 Mindestkonsolidierungszeit: 8 h
 Versuchsgerät: parallelgeführtes Rahmenschergerät RS5 der Fa. Wille Geotechnik



a)

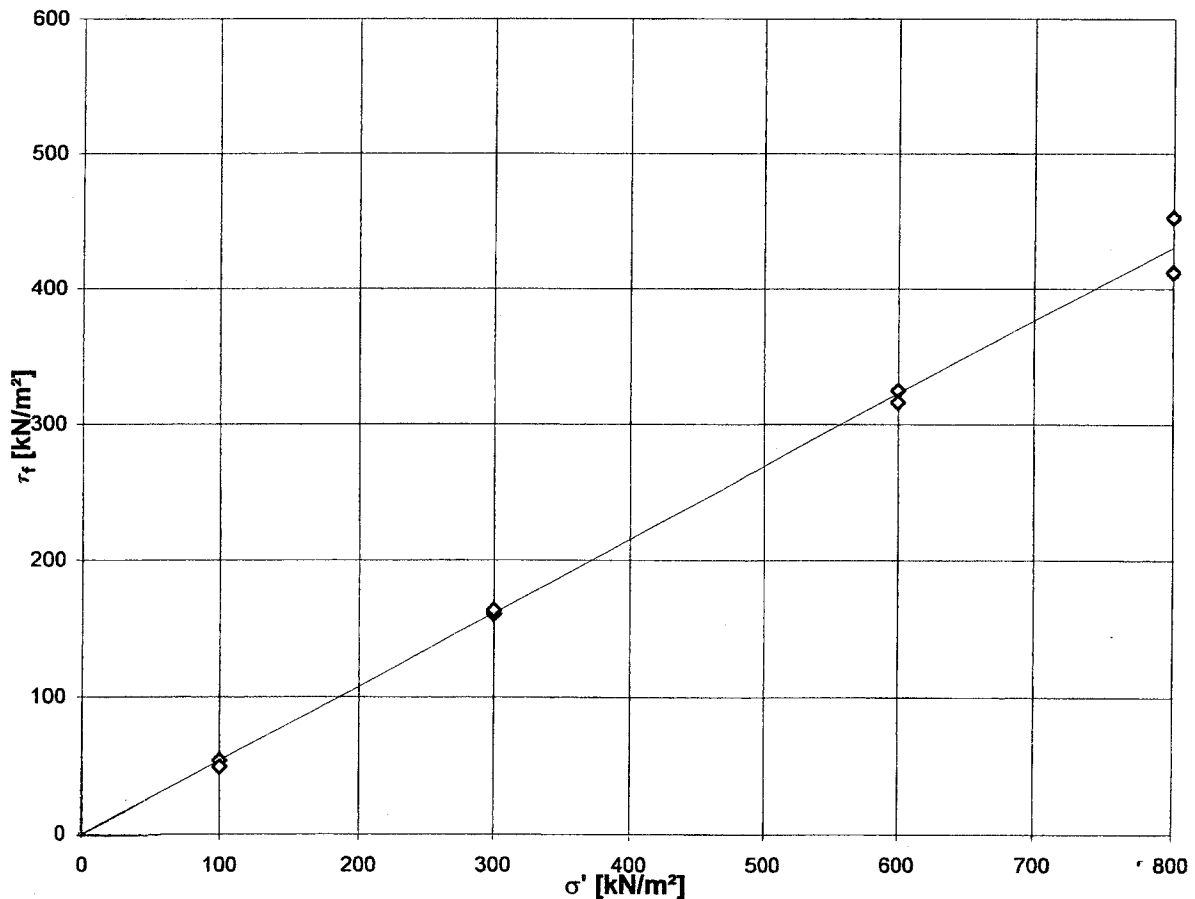


b) (Kurven wahrscheinlich durch Software-Fehler verfälscht)

Parallelgeführte Rahmenscherversuche an Seeton, normalkonsolidiert

Bodenart: Seeton, aufbereitet
 Schergeschwindigkeit: 0,023 mm/min
 Probenfläche: 6x6 cm², Ecken abgerundet (Radius=4mm)
 Mindestkonsolidierungszeit: 8 h
 Versuchsgerät: parallelgeführtes Rahmenschergerät RS5 der Fa. Wille Geotechnik

Versuchs-Nr.	Normalspannung		max. Scherfestigkeit		Wassergehalt	
	σ'_c kN/m ²	σ' kN/m ²	τ_f kN/m ²	s mm	Einbau %	Ausbau %
		0	0,0			
1	100	100	53,8	6,70	32,8	19,0
2	100	100	49,3	5,14	33,7	19,7
3	300	300	160,6	9,26	39,0	17,5
4	300	300	163,5	6,50	33,3	17,1
5	600	600	324,9	8,18	32,9	16,0
6	600	600	316,2	7,76	33,5	15,8
7	800	800	452,5	5,36	38,9	15,6
8	800	800	412,1	9,32	33,1	15,3



c)

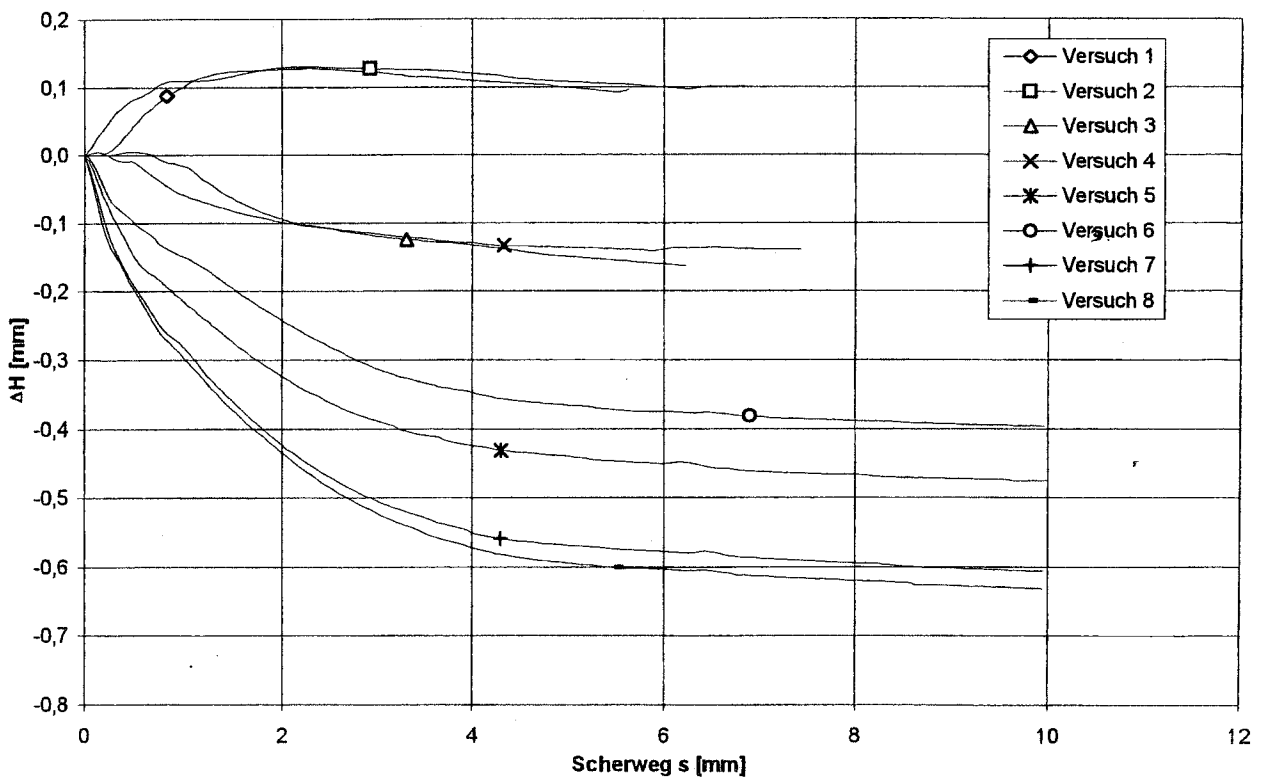
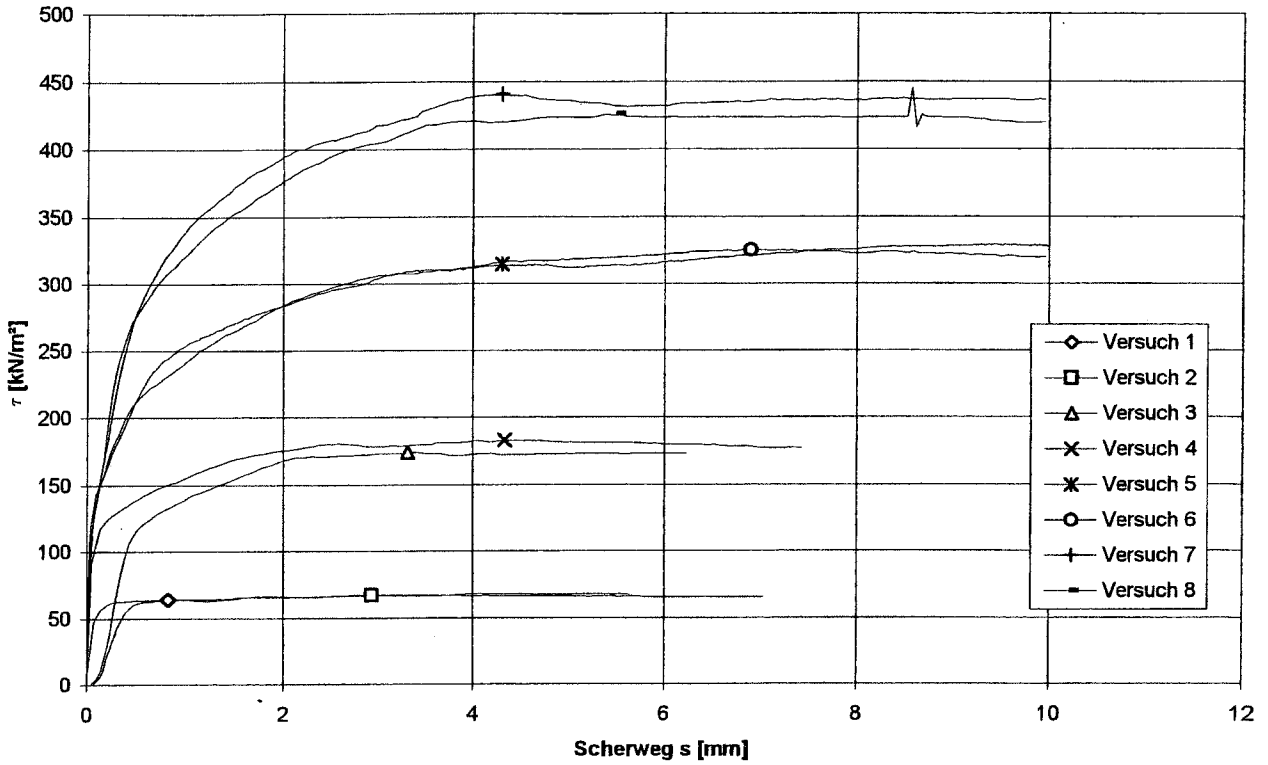
Schergerade bestimmt durch lineare Regression:

Steigung $\tan \varphi'$ 0,5381
 Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ_s' [°] 28,3
 Kohäsion c' [kN/m²] 0,0
 Bestimmtheitsmaß R^2 der linearen Regression 0,9960

Parallelgeführte Rahmenscherversuche an Seeton, überkonsolidiert

Bodenart: Seeton, aufbereitet
 Schergeschwindigkeit: 0,023 mm/min
 Probenfläche: 6x6 cm², Ecken abgerundet (Radius=4mm)
 Mindestkonsolidierungszeit: 8 h
 Entlastungszeit: 1 h
 Versuchsgerät: parallelgeführtes Rahmenschergerät RS5 der Fa. Wille Geotechnik

a)

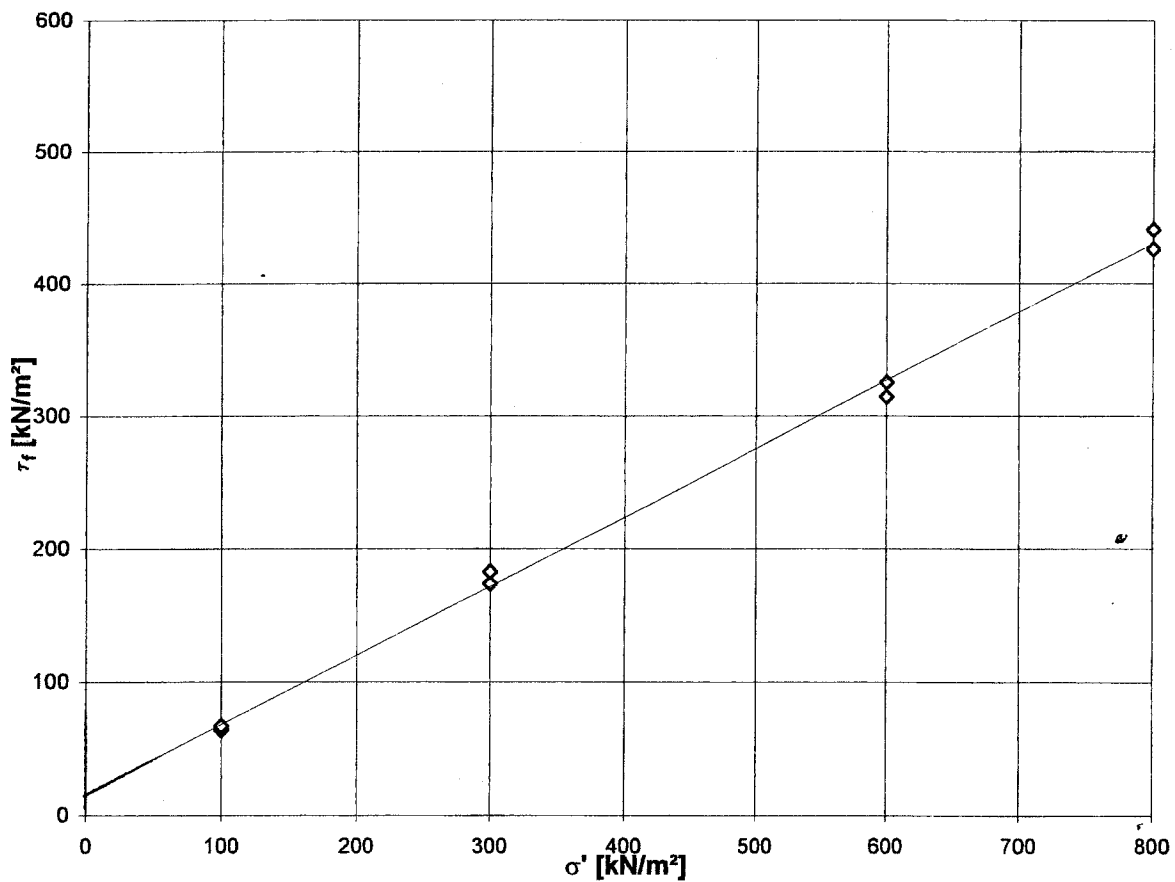


b)

Parallelgeführte Rahmenscherversuche an Seeton, überkonsolidiert

Bodenart: Seeton, aufbereitet
 Schergeschwindigkeit: 0,023 mm/min
 Probenfläche: 6x6 cm², Ecken abgerundet (Radius=4mm)
 Mindestkonsolidierungszeit: 8 h
 Entlastungszeit: 1 h
 Versuchsgerät: parallelgeführtes Rahmenschergerät RS5 der Fa. Wille Geotechnik

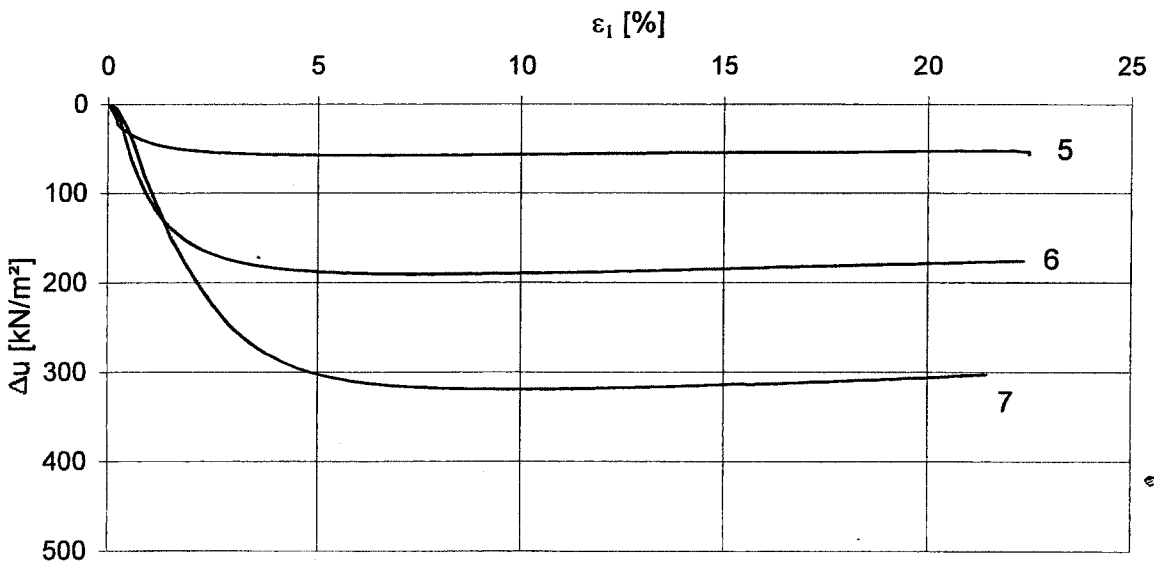
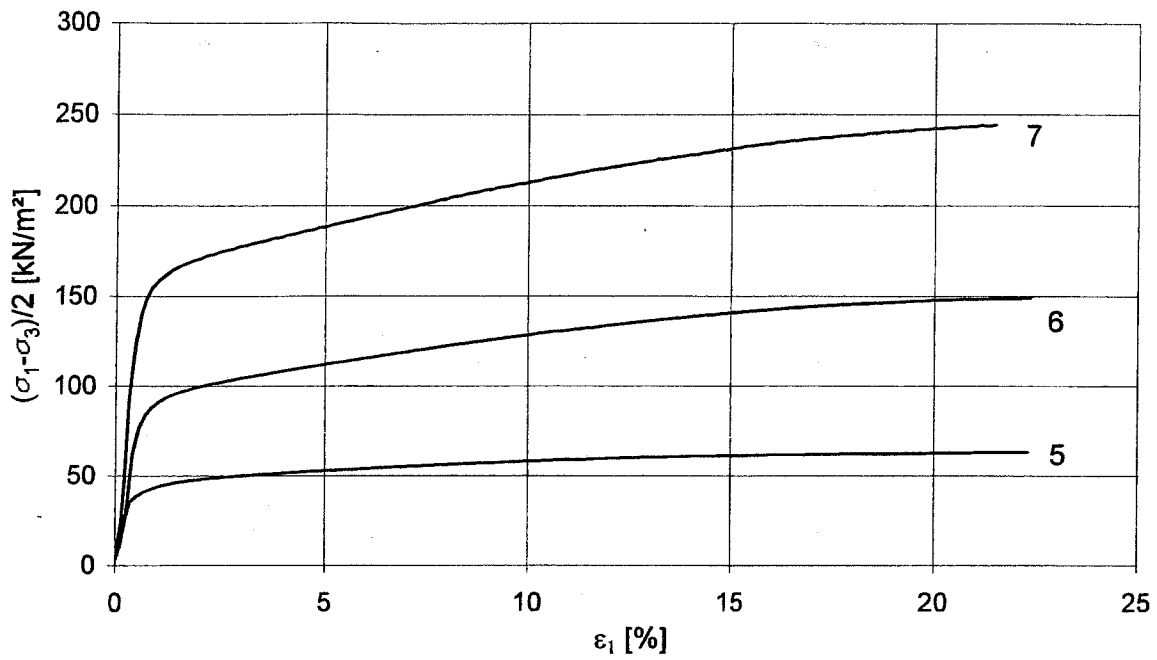
Versuchs-Nr.	σ'_c kN/m ²	σ' kN/m ²	τ_f kN/m ²	Scherweg s bei τ_f mm	Wassergehalt	
					Einbau %	Ausbau %
		0	16,3			
1	800	100	63,93	0,84	36,4	19,0
2	800	100	66,71	2,92	34,8	18,7
3	800	300	173,82	3,31	35,9	17,7
4	800	300	182,73	4,34	34,8	18,4
5	800	600	314,48	4,31	35,7	16,4
6	800	600	325,35	6,90	34,6	16,0
7	800	800	440,95	4,31	34,3	15,5
8	800	800	426,04	5,50	33,9	15,8



c) Schergerade bestimmt durch lineare Regression:

Steigung $\tan \phi'$	0,5176
effektiver Reibungswinkel ϕ' [°]	27,4
Kohäsion c' [kN/m ²]	16,3
Bestimmtheitsmaß R^2 der linearen Regression	0,9979

a)



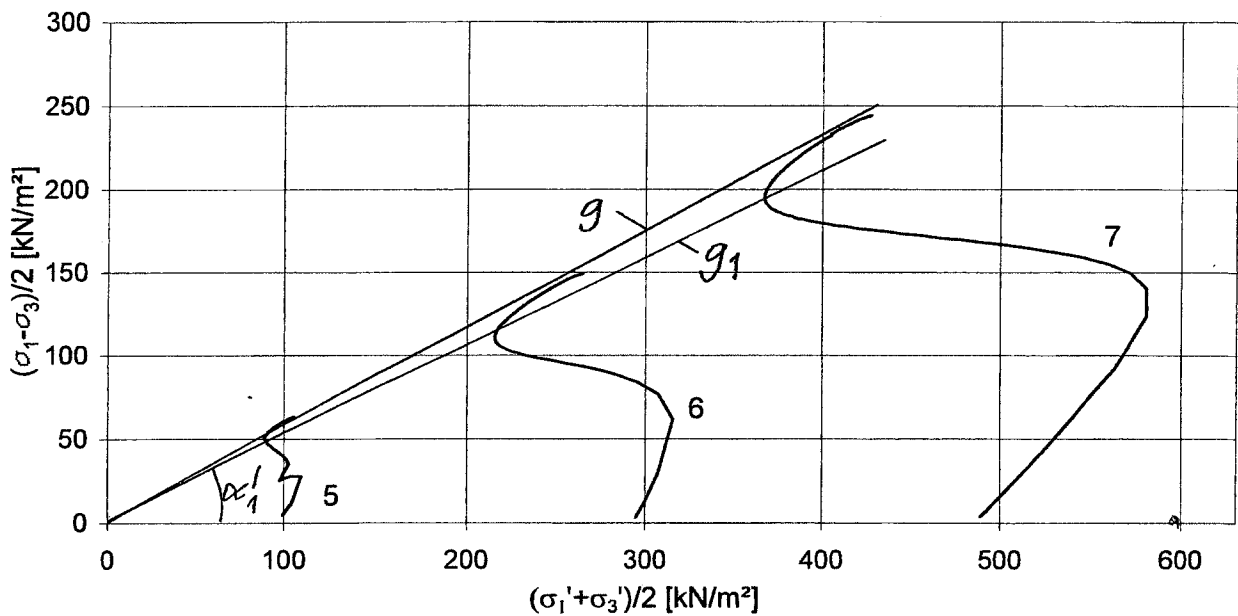
b)

Triaxial CU-Versuche an aufbereitetem Seeton, normalkonsolidiert

Der aufbereitete Seeton wurde ödometrisch mit 100 kN/m² vorkonsolidiert, daraus wurden dann die Einzelproben ausgestochen.

Probendurchmesser d_0 : 50 mm
 Probenhöhe h_0 : 50 mm
 Sättigungsdruck u_0 : 500 kN/m²
 Stauchungsgeschwindigkeit v : 0,208 mm/min

Versuchs- stand Nr.	σ_3 [kN/m ²]	Max. $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ [kN/m ²]	Max. $(\sigma_1' + \sigma_3')/2$ [kN/m ²]	ϵ_f [%]	Δu_f [kN/m ²]
5	600	63,2	104,6	22,3	53,4
6	800	149,0	263,8	21,8	176,5
7	1000	244,3	427,1	21,5	302,5



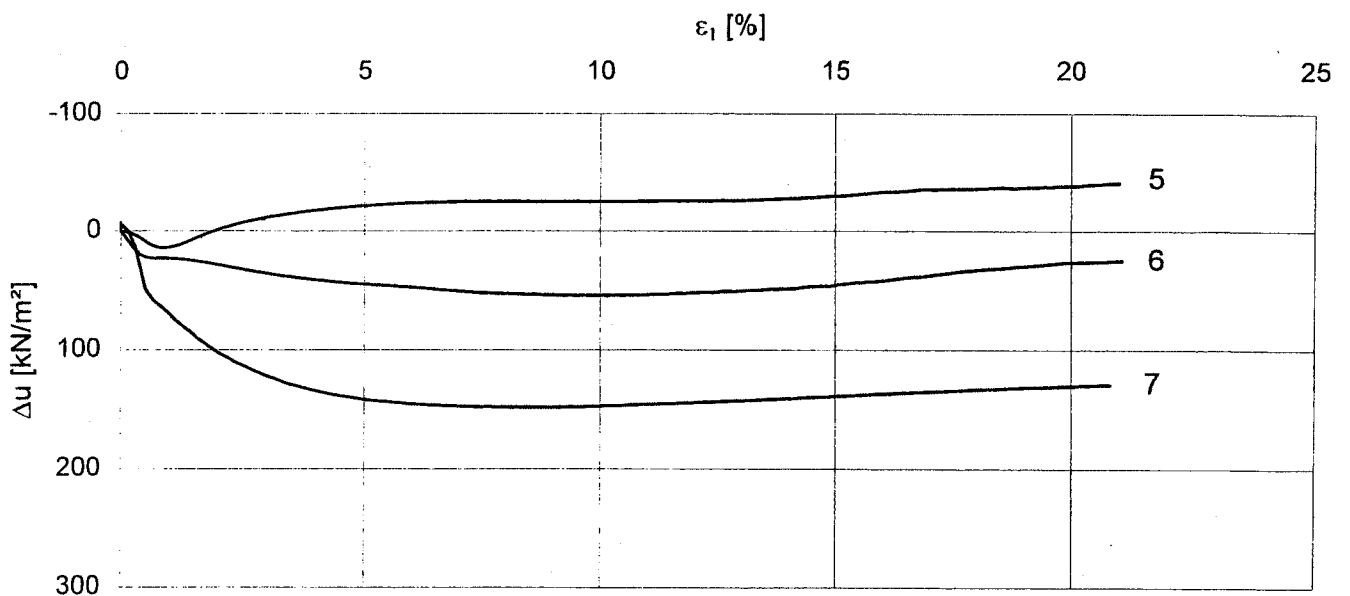
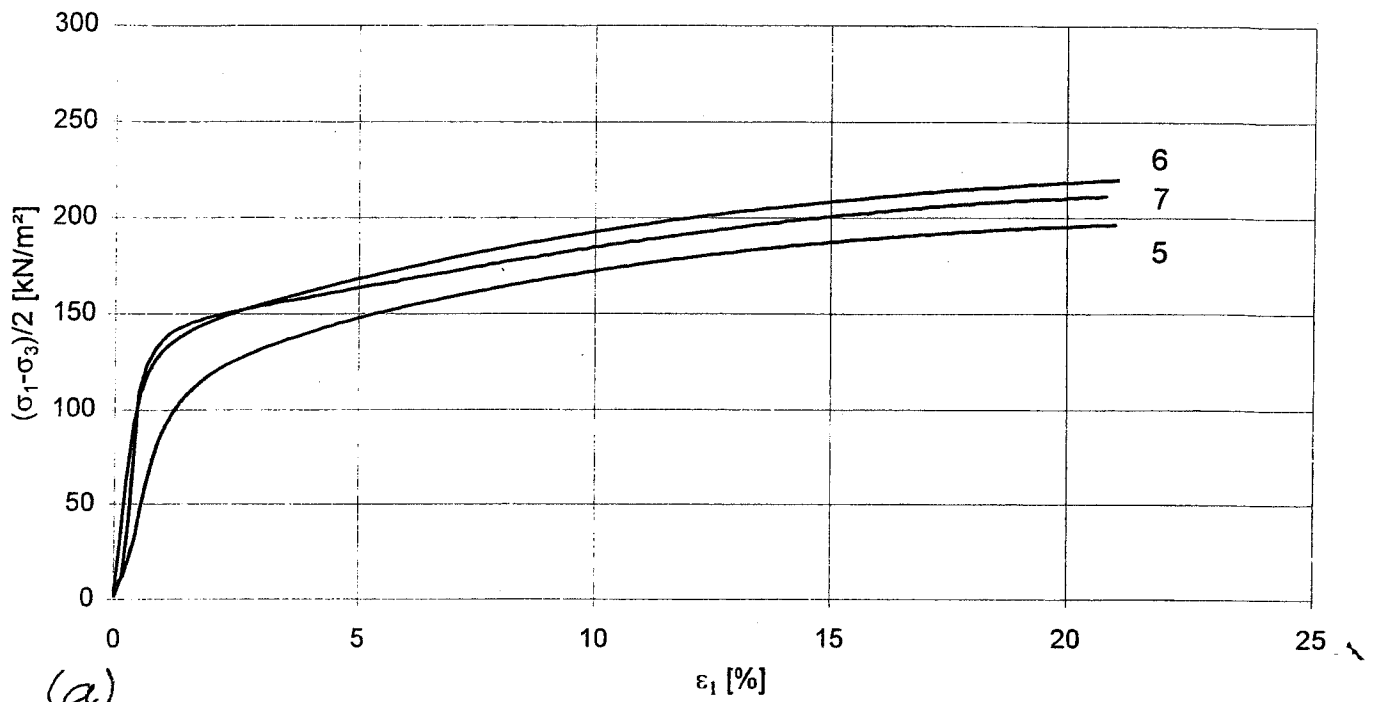
c)

$$\sin \varphi' = \tan \alpha'$$

$$g: \tan \alpha' = 0,5757, \varphi'_s = 35,1^\circ$$

$$g_1: \tan \alpha'_1 = 0,528, \varphi'_1 = 31,9^\circ$$

Triaxial CU-Versuche an aufbereitetem Seeton, überkonsolidiert



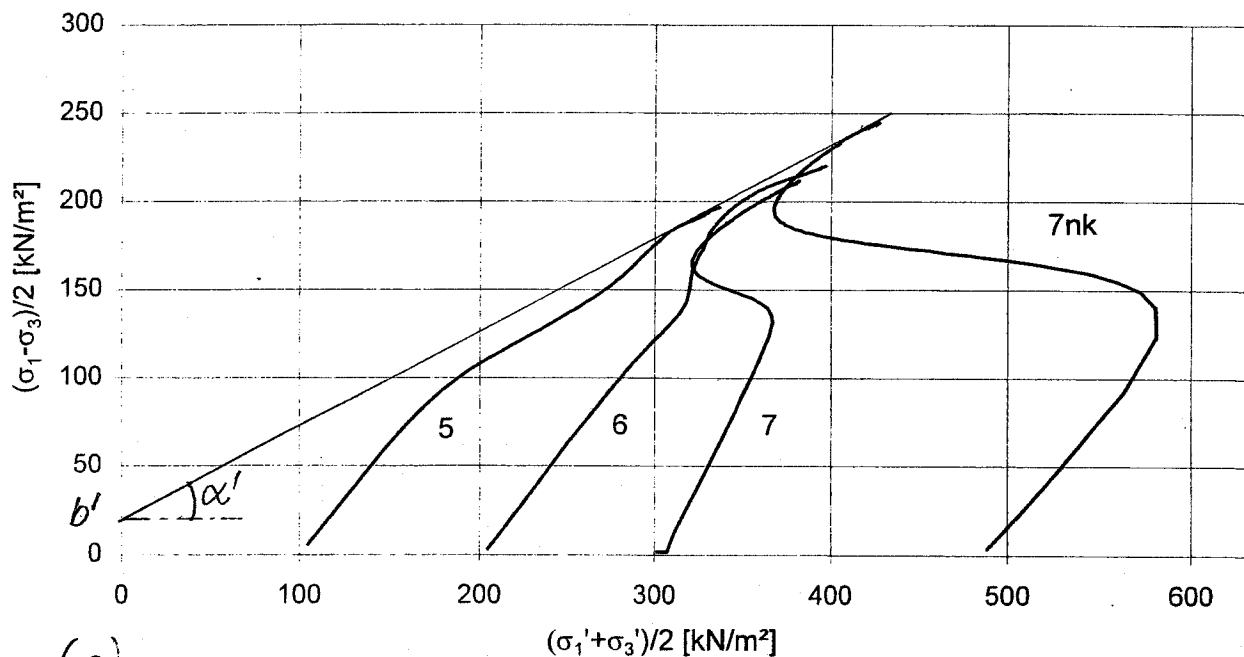
Triaxial CU-Versuche an aufbereitetem Seeton, überkonsolidiert

Der aufbereitete Seeton wurde ödometrisch mit 100 kN/m² vorkonsolidiert, daraus wurden dann die Einzelproben ausgestochen.

Probendurchmesser d_0 : 50 mm
 Probenhöhe h_0 : 50 mm
 Maximaler Zellendruck bei Sättigung und Konsolidation σ_{3m} : 1250 kN/m²
 Sättigungsdruck u_0 : 750 kN/m²
 Stauchungsgeschwindigkeit v : 0.208 mm/min

Versuchs-stand Nr.	σ_3 [kN/m ²]	Max. $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ [kN/m ²]	Max. $(\sigma_1' + \sigma_3')/2$ [kN/m ²]	ϵ_r [%]	Δu_r [kN/m ²]
5	850	196.6	336.7	21.0	-40.7
6	950	219.9	396.6	21.1	25.0
7	1050	211.5	381.7	20.8	129.1
7nk	1000	244.3	427.1	21.5	302.5

Nr. 7 von Anlage 7.1



(c)

$\tan \alpha' = 0,528$
 $b' = 13 \text{ kN/m}^2$

Bauforschung für die Praxis

- Brandschutzkosten im Wohnungsbau**
Karl Deters
Band 59, 2001, 245 S., Abb., Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4258-0
€ 50,- | sFr 86,-
- Gemeinschaftliches Wohnen im Alter**
R. Weeber, G. Wöfle, V. Rösner
Band 58, 2001, 175 S., Abb., Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4257-2
€ 46,- | sFr 79,-
- Entwicklung eines Bewertungssystems für ökonomisches und ökologisches Bauen und gesundes Wohnen**
C.J. Diederichs, P. Getto, S. Streck
Band 57, 2002, 230 S., mit CD-ROM, Abb., Tab., kart., ISBN 3-8167-4256-4
€ 50,- | sFr 86,-
- Vergabeverfahren und Baukosten**
Hannes Weeber, Simone Bosch
Band 56, 2001, 192 S., Abb., Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4255-6
€ 50,- | sFr 86,-
- Konzepte für die praxisorientierte Instandhaltungsplanung im Wohnungsbau**
Ralf Spilker, Rainer Oswald
Band 55, 2000, 71 S., 5 Abb., zahlr. Tab., kart., ISBN 3-8167-4254-8
€ 22,- | sFr 39,50
- Bewährung innen wärmedämmter Fachwerkbauten**
Problemstellung und daraus abgeleitete Konstruktionsempfehlungen
Reinhard Lamers, Daniel Rosenzweig, Ruth Abel
Band 54, 2000, 173 S., 123 Abb., kart.,
ISBN 3-8167-4253-X
€ 25,- | sFr 44,-
- Überprüfbarkeit und Nachbesserbarkeit von Bauteilen - untersucht am Beispiel der genutzten Flachdächer**
Rainer Oswald, Ralf Spilker, Klaus Wilmes
Band 53, 1999, 133 S., 49 Abb., 4 Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4252-1
€ 37,- | sFr 63,-
- Bauschadensfibel für den privaten Bauherrn und Hauskäufer**
Rainer Oswald, Ruth Abel, Volker Schnapauff
Band 52, 1999, 140 S., 19 Abb., 3 Tab., fester Einband, ISBN 3-8167-4251-3
€ 25,- | sFr 44,-
- Balkone, kostengünstig und funktionsgerecht**
Hannes Weeber, Margit Lindner
Band 51, 1999, 146 S., 102 Abb., 26 Tab., kart., ISBN 3-8167-4250-5
€ 38,- | sFr 65,-
- Kostenfaktor Erschließungsanlagen**
Hannes Weeber, Michael Rees
Band 50, 1999, 226 S., 107 Abb., 15 Tab., kart., ISBN 3-8167-4249-1
€ 50,- | sFr 86,-
- Eigenleistung beim Bauen**
Wie Eigentümer und Mieter sich am Bau ihrer Wohnung beteiligen können
R. Weeber, H. Weeber, S. Kleebaur, H. Gerth, W. Pohrt
Band 49, 1999, 154 S., 25 Abb., 12 Tab.,
ISBN 3-8167-4248-3
€ 22,- | sFr 39,50
- Kosteneinsparung durch Bauzeitverkürzung**
Barbara Bredenbals, Heinz Hullmann
Band 48, 1999, 174 S., 38 Abb., 36 Tab.,
ISBN 3-8167-4247-5
€ 37,- | sFr 64,-
- Das wärme- und feuchteschutztechnische Verhalten von stählernen Fassadendurchdringungen**
Lutz Franke, Gernod Deckelmann
Band 47, 1998, 74 S., 38 Abb., 13 Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4246-7
€ 15,- | sFr 26,-
- Kostengünstige bauliche Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs im Wohnungsbestand**
R. Oswald, R. Lamers, V. Schnapauff, R. Spilker, K. Wilmes
Band 46, 1998, 100 S., 57 Abb., kart.
ISBN 3-8167-4245-9
€ 17,- | sFr 30,50
- Sicherung des baulichen Holzschutzes**
Horst Schulze
Band 45, 1998, 168 S., 136 Abb., 10 Tab., kart., ISBN 3-8167-4244-0
€ 22,- | sFr 39,50
- Luftdichtigkeit von industriell errichteten Wohngebäuden in den neuen Bundesländern**
Wolfgang Richter, Dirk Reichel
Band 44, 1998, 88 S., 34 Abb., 15 Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4243-2
€ 15,- | sFr 26,-
- Leitfaden Kostendämpfung im Geschoßwohnungsbau**
Karl Deters, Joachim Arlt
Band 43, 1998, 162 S., 135 Abb., 34 Tab., kart., ISBN 3-8167-4242-4
€ 22,- | sFr 39,50
- Langzeitbewährung und Entwicklungstendenzen von Kunststoff-Bauprodukten im Wohnungsbau**
Dieter Arlt, Rainer Weltring
Band 42, 1998, 137 S., 90 Abb., 7 Graph., kart., ISBN 3-8167-4241-6
€ 20,- | sFr 35,-
- Ausschreibungshilfen für recyclinggerechte Wohnbauten**
Barbara Bredenbals, Wolfgang Willkomm
Band 41, 1998, 172 S., 28 Abb., kart.
ISBN 3-8167-4240-8
€ 22,- | sFr 39,50
- Gebrauchsanweisung für Häuser**
Volker Schnapauff, Silke Richter-Engel
Band 40, 1997, 116 S., 4 Abb., 7 Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4239-4
€ 19,- | sFr 34,-
- Ergänzender Neubau in bestehenden Wohnsiedlungen**
H. Weeber, R. Weeber, M. Lindner, u. a.
Band 39, 1997, 194 S., 230 Abb., kart.,
ISBN 3-8167-4238-6
€ 25,- | sFr 44,-
- Lüftung in industriell errichteten Wohnhäusern**
Wilfried Jank
Band 37, 1997, 66 S., 17 Abb., 12 Tab., 13 Tafeln, kart., ISBN 3-8167-4236-X
€ 15,- | sFr 26,-
- Auswirkungen der neuen Wärmeschutzverordnung auf den Schallschutz von Gebäuden**
Siegfried Koch, Werner Scholl
Band 36, 1997, 72 S., 33 Abb., 2 Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4235-1
€ 15,- | sFr 26,-
- Baukostensenkung durch gesicherte Schadensbeurteilung an haufwerksportigen Leichtbetonelementen der industriell errichteten Wohnbauten der ehemaligen DDR**
Mirko Neumann, Mathias Reuschel
Band 35, 1997, 320 S., 227 Abb., 105 Tab., kart., ISBN 3-8167-4234-3
€ 41,- | sFr 70,-
- Verhinderung von Emissionen aus Baustoffen durch Beschichtungen**
Lutz Franke, Martin Wesselmann
Band 34, 1997, 68 S., 11 Abb., 9 Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4233-5
€ 15,- | sFr 26,-
- Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) im Wohnungsbau**
Institut für Bauforschung e.V., Hannover
Band 32, 1997, 250 S., 128 Abb., 20 Tab., kart., ISBN 3-8167-4231-9
€ 30,- | sFr 51,50

BESTELLSCHEIN

Titel ankreuzen und im Umschlag oder per Fax (07 11) 970 - 25 08 oder -25 07 senden an:
Fraunhofer IRB Verlag
 Fraunhofer-Informationszentrum
 Raum und Bau IRB
 Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart
 Telefon (07 11) 970 - 25 00
 E-Mail: info@irb.fhg.de
 URL: <http://www.IRBbuch.de>
 Absender
 Straße/PF
 PLZ/Ort
 Datum
 Unterschrift

02/2002 [BfP-alle|Titel-Anzeige.qxd]

- Niedrigenergiehäuser unter Verwendung des Dämmstoffes Styropor**
Teil 1, Konstruktionsempfehlungen und optimierte Anschlußsituationen (Details)
W.-H. Pohl, S. Horschler, R. Pohl
Teil 2, Quantitative Darstellung der Wirkung von Wärmebrücken
Gerd Hauser, Horst Stiegel
Band 31, 1997, 294 S., 169 Abb., kart., ISBN 3-8167-4230-0
€ 14,- | sFr 25,-
- Fenster - Sanierung und Modernisierung**
Hans-Rudolf Neumann
Band 30, 1997, 134 S., 90 Abb., 11 Tab., kart., ISBN 3-8167-4229-7
€ 20,- | sFr 35,-
- Schäden an nicht industriell hergestellten Wohnbauten der neuen Bundesländer**
R. Oswald, R. Spilker, V. Schnapauff, u. a.
Band 29, 1996, 116 S., 66 Abb., 30 Tab., kart., ISBN 3-8167-4228-9
€ 17,- | sFr 30,50
- Parkierungsanlagen im verdichteten Wohnungsbau**
Hannes Weeber, Rotraut Weeber
Band 28, 1997, 156 S., 60 Abb., 28 Tab., kart., ISBN 3-8167-4227-0
€ 22,- | sFr 39,50
- Möglichkeiten der Einsparung von Wohnkosten durch Mieterbeteiligung**
M. Elff, K. Goldt, B. Harms, u. a.
Band 27, 1997, 157 S., 3 Abb., 8 Tab., kart., ISBN 3-8167-4226-2
€ 22,- | sFr 39,50
- Die Berechnung von Flachdecken über Zustands- und Einflußflächen**
Max Baerschneider
Band 26, 1996, 380 S., 196 Tab., kart., zweibändig, ISBN 3-8167-4225-4
€ 49,- | sFr 83,50
- Feuchttransportvorgänge in Stein und Mauerwerk - Messung und Berechnung**
M. Krus, H.-M. Künzel, K. Kießl
Band 25, 1996, 75 S., 31 Abb., 2 Tab., kart., ISBN 3-8167-4224-6
€ 15,- | sFr 26,-
- Wohngebäudesanierung und Privatisierung**
Hannes Weeber, Michael Rees
Band 24, 1996, 107 S., 51 Abb., 17 Tab., kart., ISBN 3-8167-4223-8
€ 20,- | sFr 35,-
- Der Feuchtehaushalt von Holz-Fachwerkwänden**
Helmut Künzel
Band 23, 1996, 85 S., 32 Abb., 10 Tab., kart., ISBN 3-8167-4222-X
€ 15,- | sFr 26,-
- Neue Konstruktionsalternativen für recyclingfähige Wohngebäude**
Barbara Bredenbals, Wolfgang Willkomm
Band 22, 1996, 110 S., 26 Abb., 3 Tab., kart., ISBN 3-8167-4221-1
€ 17,- | sFr 30,50
- Standisicherheit der Wohnbauten in Fertigteilbauweise in den neuen Bundesländern**
E. Cziesielski, N. Fouad, F.-U. Vogdt
Band 21, 1996, 226 S., 71 Abb., kart., ISBN 3-8167-4220-3
€ 30,- | sFr 51,50
- Sicherheit von Glasfassaden**
X. Shen, H. Techen, J. D. Wörner
Band 20, 1996, 38 S., 26 Abb., 4 Tab., kart., ISBN 3-8167-4219-X
€ 12,- | sFr 21,50
- Kostengünstige Umnutzung aufgegebener militärischer Einrichtungen für Wohnzwecke, Wohnergängungseinrichtungen und andere Nutzungen**
B. Jacobs, J. Kirchoff, J. Mezler
Band 19, 1996, 204 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4218-1
€ 28,- | sFr 47,50
- Holztafelbauweise im mehrgeschossigen Wohnungsbau**
Barbara Bredenbals, Heinz Hullmann
Band 18, 1996, 237 S., 116 Abb., 23 Tab., kart., ISBN 3-8167-4217-3
€ 30,- | sFr 51,50
- Gefährdungspotentiale asbesthaltiger Massenbaustoffe in den neuen Bundesländern**
Klaus Bergner, unter Mitarbeit von Franka Stodollik und Hans-Otto Eckler
Band 17, 1996, 75 S., 26 Abb., 9 Tab., kart., ISBN 3-8167-4216-5
€ 15,- | sFr 26,-
- Transparent gedämmte Altbauten**
G. H. Bondzio, K. Brandstetter, P. Sulzer, S. Al Bosta, u. a.
Band 15, 1996, 130 S., 44 Abb., 7 Tab., kart., ISBN 3-8167-4214-9
€ 22,- | sFr 39,50
- Kosten und Techniken für das "Überwintern" erhaltenswerter Bausubstanz**
Michael Rees, Hannes Weeber
Band 14, 1995, 190 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4213-0
€ 25,- | sFr 44,-
- Menschengerechte Raumklimatisierung durch Quelllüftung und Flächenkühlung**
Erhard Mayer (Hrsg.)
Band 13, 1995, 190 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4212-2
€ 25,- | sFr 44,-
- Zusätzliche Wärmedämmsysteme bei Fertigteilbauten**
Typenserie P2
P. Bauer, B. Loeser, H. Schwarzgig, T. Spengler
Band 12, 1995, 118 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4211-4
€ 20,- | sFr 35,-
- Körperschalldämmung von Sanitärräumen**
Karl Gösele, Volker Engel
Band 11, 1995, 76 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4210-6
€ 15,- | sFr 26,-
- Bauschäden an Holzbalkendecken in Feuchtraumbereichen**
Gertraud Hofmeister
Band 9, 1995, 210 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4208-4
€ 25,- | sFr 44,-
- Ökologische Auswirkungen von Hochhäusern**
Band 8, 1995, 418 S., 114 Abb., kart., ISBN 3-8167-4207-6
€ 50,- | sFr 86,-
- Wohnhochhäuser heute**
H. Weeber, R. Weeber, M. Hasenmaier, u. a.
Band 7, 1995, 165 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4206-8
€ 25,- | sFr 44,-
- Abfallvermeidung in der Bauproduktion**
Barbara Bredenbals, Wolfgang Willkomm
Band 6, 1994, 198 S., 75 Abb., 16 Tab., kart., ISBN 3-8167-4205-X
€ 25,- | sFr 44,-
- Barrierefreie Erschließungssysteme von Wohngebäuden**
R. Weeber, M. Rees, H. Weeber
Band 5, 1994, 64 S., 52 Abb., 6 Tab., kart., ISBN 3-8167-4204-1
€ 12,- | sFr 21,50
- Die Ausführung des Umkehrdaches bei erhöhten Anforderungen an den Wärmeschutz**
Lutz Franke, Gernod Deckelmann
Band 4, 1994, 80 S., zahlreiche Abb. und Tab., kart., ISBN 3-8167-4203-3
€ 20,- | sFr 35,-
- Niveaugleiche Türschwellen bei Feuchträumen und Dachterrassen**
R. Oswald, A. Klein, K. Wilmes
Band 3, 1994, 56 S., 48 Abb., kart., ISBN 3-8167-4202-5
€ 12,- | sFr 21,50
- Wohnbauten in Fertigteilbauweise in den neuen Bundesländern**
R. Oswald, V. Schnapauff, R. Lamers, u. a.
Band 2, 1995, 333 S., 515 Abb., kart., ISBN 3-8167-4201-7
€ 40,- | sFr 69,50
- Heizung und Lüftung im Niedrigenergiehaus**
Gerhard Hausladen, Peter Springl
Band 1, 1994, 214 S., 74 Abb., 17 Tab., kart., ISBN 3-8167-4200-9
€ 25,- | sFr 44,-
- Informieren Sie mich bitte laufend über neue **Fachbücher**

BESTELLSCHEIN

■ **Titel ankreuzen und im Umschlag oder per Fax (07 11) 970 - 2508 oder -2507 senden an:**

■ **Fraunhofer IRB Verlag**

■ Fraunhofer-Informationszentrum
■ Raum und Bau IRB

■ **Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart**

■ **Telefon (07 11) 970 - 2500**

■ **E-Mail: info@irb.fhg.de**

■ **URL: <http://www.IRBbuch.de>**

■ Absender

■

■

■ Straße/PF

■ PLZ/Ort

■ Datum

■ Unterschrift

Schadenfreies Bauen

Herausgegeben von Professor Günter Zimmermann

- Schadenfreies Bauen**
Gesamtausgabe Bände 1 – 26
2002, alle Bände mit festem Einband
ISBN 3-8167-5796-0
€ 1037,- | sFr 1744,-
Bei Abnahme der Gesamtausgabe
sparen Sie € 115,-
- Schäden an polymeren Beschichtungen**
Robert Engelfried
Band 26: 2001, 146 S., 94 Abb., 14 Tab.,
ISBN 3-8167-5795-2
€ 40,- | sFr 68,50
- Schäden an Belägen und Bekleidungen mit Keramik- und Werksteinplatten**
Günter Zimmermann
Band 25: 2001, 200 S., 175 Abb., 16 Tab.,
ISBN 3-8167-5791-X
€ 48,- | sFr 82,50
- Schäden an Installationsanlagen**
Heizungs- und Raumluftechnische Anlagen,
Trinkwasser-, Abwasser- und Gasinstallations-
anlagen
Heinz Wirth, Stefan Wirth
Band 24: 2001, 270 S., 114 Abb., 33 Tab.,
ISBN 3-8167-5790-1
€ 57,- | sFr 96,-
- Schäden an Türen und Toren**
Ralf Schumacher
Band 23: 2001, 372 S., 291 Abb., 32 Tab.,
ISBN 3-8167-4169-X
€ 71,- | sFr 118,-
- Schäden an elastischen und textilen Bodenbelägen**
Hans-Joachim Scheewe
Band 22: 2001, 232 S., 80 überw. farb. Abb.,
50 Tab.,
ISBN 3-8167-4168-1
€ 50,- | sFr 86,-
- Schäden an Glasfassaden und -dächern**
Peter Küffner, Oliver Lummertzheim
Band 21: 2000, 132 S., 106 z.T. farb. Abb.,
6 Tab.,
ISBN 3-8167-4165-7
€ 40,- | sFr 68,50
- Schäden an Wärmedämm-Verbundsystemen**
Erich Cziesielski, Frank Ulrich Vogdt
Band 20: 2000, 202 S., 75 Konstruktionsskiz-
zen, 28 Tab. u. Diagramme, 98 Fotos,
ISBN 3-8167-4164-9
€ 50,- | sFr 86,-
- Schäden an Außenwänden aus Mehrschicht-Betonplatten**
Ralf Ruhnau, Nabil Fouad
Band 19: 1998, 104 S., 61 Abb., 7 Tab.,
ISBN 3-8167-4160-6
€ 35,- | sFr 60,50
- Schäden an Deckenbekleidungen und abgehängten Decken**
Hubert Satzger
Band 18: 1998, 78 S., 59 Abb., 5 Tab.,
ISBN 3-8167-4159-2
€ 23,- | sFr 40,50
- Schäden an Dränanlagen**
Wilfried Muth
Band 17: 1997, 114 S., 128 Abb., 10 Tab.,
ISBN 3-8167-4154-1
€ 35,- | sFr 60,50
- Tauwasserschäden**
Richard Jenisch
Band 16: 2. überarb. Aufl., 2001, 129 S.,
66 Abb., 6 Tab., ISBN 3-8167-5792-8
€ 37,- | sFr 62,50
- Schäden an Estrichen**
Klaus G. Aurnhammer
Band 15: 2., erg. Aufl., 1999, 216 S., 44 Abb.;
17 Tab.,
ISBN 3-8167-4162-2
€ 46,- | sFr 78,-
- Schäden an Tragwerken aus Stahlbeton**
Bernhard Brand, Gerhard Glatz
Band 14: 1996, 217 S., 129 Abb., 24 Tab.,
ISBN 3-8167-4153-3
€ 46,- | sFr 78,-
- Schäden an Außenwänden aus Ziegel- und Kalksandstein-Verblendmauerwerk**
Helmut Klaas, Erich Schulz
Band 13: 1995, 224 S., 162 Abb., 13 Tab.,
ISBN 3-8167-4152-5
€ 46,- | sFr 78,-
- Schäden an Metallfassaden und -dachdeckungen**
Franz Lubinski, Fritz Röbber, Uwe Nagel, u. a.
Band 12: 2. erw. Aufl., 2001, 415 S., 303
Abb., 22 Tab.,
ISBN 3-8167-4166-5
€ 76,- | sFr 127,-
- Schäden an Außenmauerwerk aus Naturstein**
Martin Sauder, Renate Schloenbach
Band 11: 1995, 274 S., 95 Abb., 31 Tab.,
ISBN 3-8167-4150-9
€ 50,- | sFr 86,-
- Schäden an Außenwänden mit Asbestzement-, Faserzement- und Schieferplatten**
Klaus W. Liersch
Band 10: 1995, 146 S., 86 Abb., 20 Tab.,
ISBN 3-8167-4149-5
€ 38,- | sFr 65,-
- Schäden an Fassadenputzen**
Helmut Künzel
Band 9: 2. erw. Aufl., 2000, 142 S., mit zahlr.
Abb. und Tab.,
ISBN 3-8167-4167-3
€ 38,- | sFr 65,-
- Schäden an Abdichtungen in Innenräumen**
Erich Cziesielski, Michael Bonk
Band 8: 1994, 112 S., 55 Abb., 4 Tab.,
ISBN 3-8167-4147-9
€ 33,- | sFr 57,-
- Rissschäden an Mauerwerk**
Ursachen erkennen - Rißschäden vermeiden.
Werner Pfefferkorn
Band 7: 3. überarb. Aufl., 2002, 292 S.,
290 Abb., 18 Tab.,
ISBN 3-8167-5793-6
€ 53,- | sFr 89,-
- Schäden an Fenstern**
Wolfgang Klein
Band 6: 1994, 154 S., 92 Abb., 2 Tab.,
ISBN 3-8167-4145-2
€ 37,- | sFr 64,-
- Schäden an Wänden und Decken in Holzbauart**
Horst Schulze
Band 5: 1993, 158 S., 140 Abb.,
ISBN 3-8167-4144-4
€ 37,- | sFr 64,-
- Schäden an Industrieböden**
Erich Cziesielski, Thomas Schrepfer
Band 4: 2., erw. Aufl., 1999, 169 S., 69 Abb.,
33 Tab.,
ISBN 3-8167-4163-0
€ 46,- | sFr 78,-
- Schäden an Sichtbetonflächen**
Heinz Klopfer
Band 3: 1993, 123 S., 77 Abb., 9 Tab.,
ISBN 3-8167-4142-8
€ 35,- | sFr 60,50
- Schäden an Flachdächern und Wannens aus wasserundurchlässigem Beton**
Gottfried C.O. Lohmeyer
Band 2: 3. neu bearb. Aufl., 2001, 272 S.,
171 Abb., 28 Tab.,
ISBN 3-8167-5794-4
€ 50,- | sFr 86,-
- Schäden an Außenwandfugen im Beton- und Mauerwerksbau**
Ralf Ruhnau
Band 1: 1992, 132 S., 87 Abb.,
ISBN 3-8167-4140-1
€ 35,- | sFr 60,50

BESTELLSCHEIN

■ Titel ankreuzen und im Umschlag oder
■ per Fax (07 11) 970 - 25 08 oder -25 07
■ senden an:

Fraunhofer IRB Verlag

■ Fraunhofer-Informationszentrum
■ Raum und Bau IRB

■ Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart

■ Telefon (07 11) 970 - 25 00

■ E-Mail: info@irb.fhg.de

■ URL: <http://www.IRBbuch.de>

■ Absender

■

■

■

■

■ Straße/PF

■

■ PLZ/Ort

■

■ Datum

■

■ Unterschrift

Die »Bauschäden-Sammlung« in 13 Bänden

Herausgegeben von Professor Günter Zimmermann



In der Fachwelt hat diese Zusammenstellung von typischen Bauschadensfällen als wichtiger Beitrag zur Verbesserung der Bau- und Planungsleistungen großes Ansehen erlangt.

Die 13 Bände mit dem Untertitel »Sachverhalt - Ursachen - Sanierung« enthalten Schadensberichte aus allen baukonstruktiven Bereichen und sind durch Themen- und Sachregister erschlossen.

Der Nutzer kann so auf Anhieb feststellen,

- ob ein gleicher oder ähnlicher Schaden bereits dokumentiert ist,
- welche Schäden für ein bestimmtes Bauteil typisch sind,
- wie diese Schäden vermieden werden können oder welche Maßnahmen zu ihrer Behebung in Frage kommen.

Seit 3 Jahrzehnten ist die »Bauschäden-Sammlung« eine ständige Rubrik des »Deutschen Architektenblattes«.

Bauschäden-Sammlung, Band 13 Sachverhalt - Ursachen - Sanierung

2001, 184 Seiten,
zahlreiche, überwiegend farbige
Abbildungen, fester Einband,
ISBN 3-8167-4185-1
€ 27,- | sFr 44,-

Der Herausgeber

Professor Günter Zimmermann, ein bekannter Bausachverständiger mit langjähriger Erfahrung, betreut seit 3 Jahrzehnten die »Bauschäden-Sammlung« im »Deutschen Architektenblatt« und ist auch für die Herausgabe der Buchausgabe verantwortlich.

BESTELLSCHEIN

- Band 1: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 2: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 3: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 4: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 5: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 6: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 7: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 8: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 9: 184 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 10: 184 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 11: 184 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 12: 184 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 13: 184 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-

Sie sparen € 36,- bei Abnahme der

- Bände 1-13 komplett:
€ 315,- | sFr 476,-

Alle Bände im Format A 5 quer, mit zahlreichen, zum Teil farbigen Abbildungen, festem Einband und Fadenheftung

Titel ankreuzen und im Umschlag oder per Fax (07 11) 970 - 25 08 oder -25 07 senden an:

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum
Raum und Bau IRB

Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart
Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
E-Mail: info@irb.fhg.de
URL: <http://www.IRBbuch.de>

Absender

Straße/PF

PLZ/Ort

Datum

Unterschrift

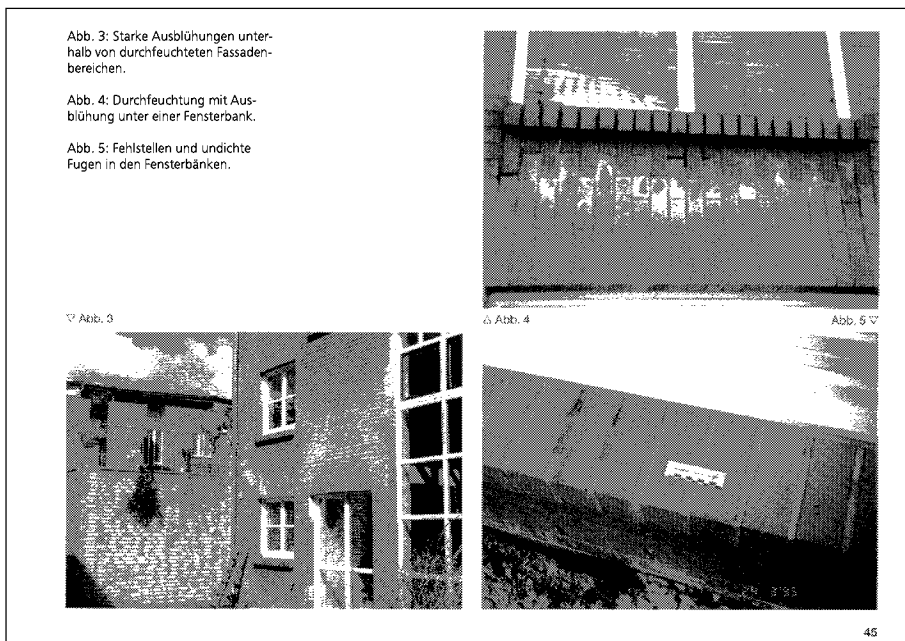


Abb. 3: Starke Ausblühungen unterhalb von durchfeuchteten Fassadenbereichen.

Abb. 4: Durchfeuchtung mit Ausblühung unter einer Fensterbank.

Abb. 5: Fehlstellen und undichte Fugen in den Fensterbänken.

Abb. 3

Abb. 4

Abb. 5