

**Ermittlung charakteristischer Boden-
kenngößen für gemischtkörnige und
organische Böden als Grundlage für
Bauvorschriften**

T 2961

T 2961

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

2001, ISBN 3-8167-5984-X

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>

Schlußbericht
zum
Forschungsvorhaben

**Ermittlung charakteristischer Bodenkenngrößen
für gemischtkörnige und organische Böden als Grundlage für
Bauvorschriften**

Werkvertrag P-32-5-11.53-937/00

zwischen dem

Deutschen Institut für Bautechnik (DIBT)

und der

Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik (Degebo)

Bearbeiter:

Dipl.-Ing. Michael Ulrich

Dipl.-Ing. Daniela Bechtloff

Berlin den 15.3.2001

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Stand der Forschung - Literaturlauswertung	6
3	Grundlage und Voraussetzungen für die Forschungsarbeit:	
3.1	Die Datenbank der Degebo	10
3.2	Gemischtkörnige und feinkörnige Böden	12
3.2.1	Proben- und Versuchsumfang	12
3.2.2	Gruppeneinteilung	13
3.2.3	Häufigkeitsverteilungen	15
3.3	Organische Böden	
3.3.1	Proben- und Versuchsumfang	17
3.3.2	Häufigkeitsverteilungen	18
4	Auswertung der gemischtkörnigen und feinkörnigen Böden	
4.1	Drainierte Scherfestigkeit (CU-Versuch)	20
4.1.1	Scherparameter ϕ und c	20
4.1.2	Vergleichsscherfestigkeit	20
4.1.3	Spannungsverhältnisse σ_1/σ_3	21
4.1.4	Statistische Auswertung	25
4.1.5	Ermittlung der Scherparameter $\phi(e)$ und $c(e)$	27
4.2	Einaxiale Druckfestigkeit	31
4.2.1	Abhängigkeiten zwischen den Bodenkenngrößen	31
4.3	Undrainierte Scherfestigkeit (UU-Versuch)	33
4.3.1	Abhängigkeiten zwischen den Bodenkenngrößen	33
5	Auswertung der organischen Böden	
5.1	Allgemeines	35
5.2	Drainierte Scherfestigkeit (CU-Versuch)	36
5.3	Undrainierte Scherfestigkeit (UU-Versuch)	37
5.4	Einaxiale Druckfestigkeit	38
6	Forschungsergebnisse	
6.1	Rechenansätze für die praktische Anwendung	39
6.1.1	Scherparameter ϕ und c	39
6.1.2	Einaxiale Druckfestigkeit	42
6.2	Vergleich mit vorhandenen Erfahrungswerten	43
6.3	Grenzen und Einschränkungen für die praktische Anwendung	45
7	Zusammenfassung	47
8	Literaturverzeichnis	51
	Formelzeichen	
	Verzeichnis der Bilder	

1 Einleitung

Die heutige Geländeform der norddeutschen Tiefebene ist als Ergebnis von drei Eiszeiten und den Interglazialen eine Landschaft aus Grund- und Endmoränen, Urstromtälern mit Sandablagerungen und aus Toteislöchern entstandenen Seengebieten. Im Bereich der Urstromtäler sind häufig organische Böden anzutreffen. In Zwischeneiszeiten entstandene organische Ablagerungen sind durch nachfolgende Eiszeiten sowie Schmelzwasserströme umgelagert und teilweise überdeckt worden.

Die von den Gletschern transportierten Ablagerungen sind ein Gemenge aus Kornfraktionen aller Größen vom Ton bis zu Blöcken. Charakteristisch sind auch Beimengungen von Kalk, die in Oberflächennähe durch versickerndes Oberflächenwasser herausgelöst worden sind. Kalkhaltige Geschiebeböden werden regional als Geschiebemergel, solche ohne Kalkgehalt als Geschiebelehm bezeichnet.

Diese Böden charakterisieren neben Sedimentböden (Sande, Tone) und organischen Böden den geologischen Aufbau der norddeutschen Tiefebene und bestimmen damit in großem Umfang die Baugrundeigenschaften in diesem Gebiet. Für die Bemessung von Erdbauwerken und Gründungen ist vor allem die Ermittlung der Scherfestigkeit dieser Böden von Bedeutung.

Im Entwurf der DIN 1054 vom Dezember 2000 werden charakteristische Werte, in der DIN 1055 Teil 2 Rechenwerte für Wichten und Scherparameter für nichtbindige sowie bindige und einige organische Böden angegeben. Diese sind nach unserer Kenntnis auf der Grundlage umfangreicher Erfahrungen ermittelt worden.

Für gemischtkörnige Böden, wie Sand-Schluff-(SU*)- und Sand-Ton-(ST*)-Gemische nach DIN 18196, zu denen insbesondere die Geschiebeböden aus dem norddeutschen Raum zählen, fehlen entsprechende Angaben in diesen Normen.

Nur in den Empfehlungen des Arbeitsausschusses für Ufereinfassungen (EAU, E9) sind mittlere charakteristische Bodenkenngößen für Vorentwürfe auch für gemischtkörnige Böden als Erfahrungswerte angegeben. Im Vergleich zu früheren Ausgaben werden in der aktuellen Ausgabe 1996 für charakteristische Werte große Streuungen angegeben. Für den früher auch aufgeführten festen Geschiebemergel fehlen hier Angaben völlig, ebenso für

Torf. Eine Überprüfung von an diesen Böden ermittelten Versuchswerten anhand von anerkannten Erfahrungswerten, z.B. aus Tabellen ist somit nicht möglich.

Die Ermittlung der Scherparameter im Labor ist zeit- und kostenintensiv. Für die Durchführung von Scherversuchen an den hier untersuchten Böden werden Sonderproben der Güteklasse 1 nach DIN 4021 benötigt, die im allgemeinen nur mittels aufwendiger Baugrundbohrungen gewonnen werden können. Erfahrungsgemäß sind die ermittelten Scherparameter, vor allem die Kohäsion, aufgrund der Probleme bei der Vorbereitung und Durchführung der Versuche mit großen Streuungen behaftet. Zur Ermittlung zuverlässiger charakteristischer Werte ist demnach eine große Zahl von Einzelversuchen erforderlich.

Wegen häufiger Inhomogenitäten, z.B. Sand- oder Steineinlagerungen, kann nicht aus allen Sonderproben die erforderliche Anzahl von Einzelproben mit den für die Scherversuche notwendigen Abmessungen gewonnen werden. Vielfach besteht daher die Gefahr, daß der Umfang der auswertbaren Versuche, selbst bei scheinbar ausreichender Zahl von Sonderproben, zu gering ist, was zu großen Sicherheitszuschlägen und damit zu unwirtschaftlicher Bemessung führen kann.

Um die bei verhältnismäßig geringem Versuchsumfang ermittelten Scherparameter bewerten und einordnen zu können, bietet sich der Vergleich mit an gleichartigen Böden gewonnenen Erfahrungswerten an.

Bei den in der Degebo über Jahrzehnte im Berliner Raum gesammelten Ergebnissen von Versuchen an Proben aus gemischtkörnigen Böden (sandiger bis stark sandiger Geschiebelehm und -mergel) zeigten sich Abhängigkeiten der Scherfestigkeit sowie der Steifigkeit von der Verdichtung bzw. der Vorbelastung der Böden (Porenanteil), vom Wassergehalt sowie dem Feinkornanteil.

Die Ergebnisse sämtlicher in der Degebo an ungestörten Proben vorgenommenen Versuche wurden in einer Datenbank zusammengefaßt, die mittlerweile ca. 6000 Datensätze enthält. Etwa 5000 Proben aus gemischtkörnigen und feinkörnigen mineralischen Böden sowie ca. 1000 Proben aus organischen Böden wurden erfaßt. Auf der Grundlage dieser relativ großen Stichprobenzahlen soll versucht werden, statistische Auswertungen von Abhängigkeiten auch mehrerer Parameter, wie z.B. den Einfluß von Porenzahl und Feinkorngehalt auf die Scherfestigkeit vorzunehmen.

Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Ermittlung zuverlässiger charakteristischer Bodenkennwerte für gemischtkörnige und ggf. auch für organische Böden. Der Ermessensspielraum für die Festlegung der Bemessungswerte soll eingeeengt und eine Grundlage für eine sichere und wirtschaftliche erdstatische Bemessung von Bauwerken geschaffen werden.

Das Ergebnis der Forschungsarbeit kann die Grundlage für eine Erweiterung der Tabellen der DIN 1055 sowie die Aufnahme charakteristischer Bodenkennwerte für gemischtkörnige und organische Böden in den Anhang B der DIN 1054 oder in andere Regelwerke sein.

2 Stand der Forschung - Literaturlauswertung

In der Vergangenheit wurde wiederholt versucht, durch statistische Methoden die Scherparameter von bindigen Böden (Tone und Schluffe) mit anderen Kenngrößen zu korrelieren. Hierfür wurden neben der Kornverteilung und der Porenzahl e vor allem die Atterbergschen Grenzen w_L und w_p sowie der daraus abgeleitete Plastizitätsindex I_p und die Konsistenzzahl I_C als Maß für die Festigkeit des Bodens herangezogen (z.B. Hauß 1977, Nottrodt 1988, Hirita, Yao, Nirida 1990, Schuppener, Kiekbusch 1988)

Mit diesen Parametern durchgeführte Regressionsanalysen ergaben Korrelationen sehr unterschiedlicher Qualität. Durch die Einbeziehung mehrerer Parameter (multiple Regressionsanalyse) konnte die Vorhersage von Scherparametern gegenüber der einfachen Regressionsanalyse teilweise verbessert werden. Einen bei vielen Untersuchungen auftretenden Nachteil stellte hierbei oft der verhältnismäßig geringe Datenumfang dar, der sich negativ auf die Größe des Vertrauensbereiches auswirkt.

El Nimr, Rizkallah (1977) haben für feinkörnige Böden (TL, TM) mit einem Feinkorngehalt ($d < 0,06$ mm) von 60 % bis 90 % unter anderem eine sehr gute Korrelation der undrainierten Scherfestigkeit mit der Form der Kornverteilungskurve im schluffigen und tonigen Bereich sowie der Wichte auf der Grundlage von 180 untersuchten Bodenproben festgestellt. Die Form der Kurven wurde durch die Siebdurchgänge bei a_1 ($d = 0,002$ mm), a_2 ($d = 0,02$ mm) und a_3 ($d = 0,06$ mm) wiedergegeben. Ausgehend von numerischen Lösungen eines nicht näher beschriebenen Gleichungssystems wurden folgende exponentielle Darstellungen zur Bestimmung der charakteristischen Werte der Scherparameter entwickelt:

$$\phi = 0,24 * a_1^{0,006} / (\gamma^{0,04} * a_2^{0,23}) \quad [\text{Gl. 2.1}]$$

$$c = 0,06 * \gamma^{1,75} a_2^{1,06} / a_1^{0,42} \quad [\text{Gl. 2.2}]$$

γ ist hierbei die Trockenwichte des Bodens. Aus den gültigen Bereichen ($a_1 \leq a_2 \leq a_3$) der möglichen Kombinationen ergibt sich eine Variationsbreite von ca. $24^\circ \leq \phi \leq 28^\circ$ und ca. $11 \text{ kN/m}^2 \leq c \leq 15 \text{ kN/m}^2$.

Die Korrelationskoeffizienten betragen für beide Größen $R \approx 1$. Genauere Angaben zum praktischen Gebrauch sind dem Artikel nicht zu entnehmen.

Von Schuppener (1987) wurden Zusammenhänge zwischen verschiedenen Parametern anhand von Proben aus norddeutschem Klei untersucht. Dieser Boden ist überwiegend aus Tonen und Schluffen zusammengesetzt, weist aber auch organische Bestandteile auf. Unter anderem wurde, ausgehend von der Bestimmung der Zustandsgrenzen nach DIN 18122, der Zusammenhang der undrainierten Scherfestigkeit c_u mit dem Wassergehalt und der Konsistenzzahl sowie der des Reibungswinkels mit dem Plastizitätsindex und der Aktivitätszahl (Plastizitätsindex bezogen auf den Tongehalt) untersucht. Die ermittelten Korrelationskoeffizienten werden mit $R = 0,20$ bis $R = 0,39$ angegeben. Die erzielten Korrelationen werden als unbefriedigend bezeichnet.

In einer weiteren Arbeit zeigen Schuppener, Kieckbusch (1988), daß die Korrelation zwischen Konsistenzzahl und Scherfestigkeit auch für fein- und gemischtkörnige Böden unbefriedigend ist. An verschiedenen Bodenarten (Klei, Geschiebemergel, Beckenton und Tonmergel), wurde versucht, eine Abhängigkeit der undrainierten Scherfestigkeit von der Konsistenzzahl zu finden. Grundlage bildeten die Versuchsergebnisse von Dreiaxialversuchen und Penetrometerversuchen zur Bestimmung von c_u . Die Abhängigkeit zwischen I_C und c_u wurde getrennt für die beiden o.g. ausgeführten Versuchsarten untersucht. Für jede Bodengruppe und Versuchsart waren 24 bis 129 Stichproben vorhanden. Nur bei Proben aus dem Tonmergel und dem Geschiebemergel wurden bei den geringen untersuchten Probenanzahlen nach Meinung der Autoren ausreichend große Korrelationskoeffizienten ($R = 0,7$ bis $R = 0,9$) ermittelt. Die durch die Standardabweichungen gegebenen Streubereiche erschienen den Autoren jedoch für die praktische Anwendung zu groß.

Bezogen auf gemischtkörnige Böden wird als problematisch bezeichnet, daß bei diesen Böden die Fließgrenze sowie der Plastizitätsindex sehr klein sind. Hieraus resultieren große Schwankungen der Konsistenzzahl bereits durch geringe Fehler bei der Bestimmung der Konsistenzgrenzen und des Wassergehalts.

Die Autoren plädieren dafür, die mit einfachen Versuchen, z.B. der Laborflügelsonde oder dem Taschenpenetrometer, zu bestimmende undrainierte Scherfestigkeit als Maß der Tragfähigkeit zu verwenden. Zur Ermittlung der Scherparameter ϕ und c wären dann Korrelationen mit c_u erforderlich, die sich jedoch ohne die Berücksichtigung weiterer Abhängigkeiten nicht herleiten lassen.

In der o.g Arbeit wird auch deutlich gemacht, daß die Bestimmung der Konsistenzgrenzen von gemischtkörnigen Böden nach DIN 18122 nur geringe Aussagekraft besitzt. Abgesehen von der bereits beschriebenen Fehleranfälligkeit der Konsistenzzahl müssen für den vorgeschriebenen Versuchsablauf die Kornanteile mit Durchmesser $d > 0,4$ mm entfernt werden, die bei diesen Böden 15 % bis 30 % der Gesamtmasse betragen. Der Grund hierfür ist nach Meinung der Autoren, daß diese Kornanteile kaum Wasser binden können, weswegen sie zur besseren Durchführbarkeit der Versuche entfernt werden.

Die ermittelten Kenngrößen w_L , w_p , I_p und I_c beschreiben demnach bei Geschiebeböden einen Boden mit grundsätzlich anderer als der tatsächlich vorliegenden Zusammensetzung und damit auch mit anderen bodenmechanischen Eigenschaften.

Für die Berliner Geschiebeböden wurde von Weiß (1978) die Korrelation des natürlichen Wassergehalts w und der Porenzahl e zu den Scherfestigkeitsparametern ϕ und c untersucht. Es wurde jedoch nur eine verhältnismäßig geringe Zahl von Versuchsergebnissen (24 Wertegruppen) ausgewertet. Hieraus ergeben sich, vor allem für c , sehr große Streuungen.

Folgende Beziehungen, bei denen w und e als Dezimalen einzusetzen sind, wurden aufgestellt:

$$\phi = 45,4 - 96,7 * w - 8,4 * e \pm 2,5^\circ \quad [\text{Gl. 2.3}]$$

$$C = 281 - 744 * w - 374 * e \pm 50 \text{ kN/m}^2 \quad [\text{Gl. 2.4}]$$

Untersuchungen, die sich speziell mit der Abhängigkeit zwischen der Porenzahl e als Maß der Verdichtung und den Scherparametern befassen, wurden in der Literatur nicht gefunden. Nur von Hirita, Yao, Nirida, 1990 wurde e als Ergänzung zu den vorrangig untersuchten Parametern w_L , w_p und I_p für feinkörnige Böden untersucht. Insgesamt 734 Proben bildeten die Grundlage der Arbeit.

Der Feinkornanteil der untersuchten Böden lag zwischen ca. 40 % und 100 %. Zusätzlich wurden die Laborversuche auch an künstlichen Mischungen von bindigen Böden und Sand ausgeführt und statistisch ausgewertet. Die Korrelation für ϕ in Abhängigkeit von e und w_p auf der Grundlage von 119 Stichproben erwies sich für natürliche Böden mit $R = 0,27$ als gering. Für die einaxiale Druckfestigkeit dagegen lag der Korrelationskoeffizient für

673 Proben bei ca. $R = 0,7$. Für 120 Proben aus künstlich gemischtem Boden wurde die Abhängigkeit von der Porenzahl, der Fließgrenze und der Liquiditätszahl untersucht. Die multiplen Korrelationskoeffizienten lagen hier zwischen $R = 0,84$ und $R = 0,93$. Dieses Ergebnis zeigt deutlich den Einfluß der Inhomogenität natürlicher Böden auf die Streuung von Versuchswerten.

Eine Abhängigkeit der Kohäsion von den o.g. Parametern wurde nicht untersucht. Hinweise zur praktischen Anwendbarkeit sind in der Arbeit nicht enthalten.

Die bei der Degebo ermittelten bodenmechanischen Kennwerte von organischen Böden (Torf, Wiesenkalk, Faulschlamm) wurden nach Meyer 1974 als repräsentativ für die organischen Böden holozänen (alluvialen) Ursprungs im Norddeutschen Raum herausgehoben. Die hier untersuchten Proben wurden für heutige Verhältnisse und aus statistischer Sicht anhand einer zu geringen Probenanzahl aus einem räumlichen begrenzten Bereich ausgewertet. Dabei stellte sich heraus, daß die ermittelten Versuchswerte meist beträchtliche Streuungen aufweisen, die auf unterschiedliche Einflüsse (z.B. Zusammensetzung, Entstehung, Überlagerung) zurückzuführen sind. Eine statistische Auswertung mit dem Ziel, Abhängigkeiten zwischen diesen Einflüssen und den Kenngrößen zu finden, schlug daher fehl.

3 Grundlagen und Voraussetzungen für die Forschungsarbeit

3.1 Die Datenbank der Degebo

Die Ergebnisse von bodenmechanischen Versuchen, die über einen Zeitraum von etwa drei Jahrzehnten, überwiegend für Bauvorhaben im Berliner Raum, durchgeführt wurden, wurden in der Datenbank der Degebo gesammelt. Dokumentiert sind die örtliche Zuordnung der Bohrung zu einem bestimmten Bauvorhaben, die Entnahmetiefe sowie die Versuchsergebnisse und eine Kurzbeschreibung der Bodenart.

Die Versuche wurden überwiegend im Rahmen der Bearbeitung von konkreten Bauvorhaben durchgeführt. Systematische Untersuchungen aller Parameter waren daher im allgemeinen nicht möglich. Bei der Entnahme mehrerer Proben aus der gleichen Schicht wurde nicht immer auch die Korngrößenverteilung jeder Probe bestimmt. Solche Bodenproben können daher nur aufgrund der Bodenansprache und der bei der Degebo üblichen Einteilung einer Gruppe zugeordnet werden.

Eine Zuordnung zur geologischen Entstehungsgeschichte (z.B. Weichsel- oder Saaleeiszeit bei Geschiebeböden) erfolgte nicht. Bei Geschiebeböden wurde lediglich eine Unterscheidung nach dem Sandanteil (sandig, stark sandig usw.) und nach der ortsüblichen geologischen Bezeichnung getroffen, wobei die Einteilung in Geschiebelehm und -mergel ausschließlich nach der visuellen Ansprache, d.h. der Farbe erfolgte. Der Kalkgehalt wurde sehr selten bestimmt.

Bei den organischen Böden wurden weitere Eigenschaften, wie z.B. der Zersetzungsgrad von Torf, nicht dokumentiert.

In vielen Fällen sind die ausführlichen Versuchsprotokolle für die Scherversuche sowie die der anderen an der jeweiligen Probe durchgeführten Laborversuche nicht mehr vollständig vorhanden.

Neben den bereits angesprochen Problemen bei der Ausarbeitung und beim Einbau der Proben sind bei der Durchführung von bodenmechanischen Versuchen an gemischtkörnigen Böden weitere Schwierigkeiten vorhanden. Zum Beispiel können auch bei visuell gleicher Zusammensetzung durch stellenweise abweichende Korngrößenverteilung oder durch

Einlagerungen in der Einzelprobe unterschiedliche Bruchkriterien maßgebend werden. Beide Bruchdefinitionen können innerhalb eines Scherversuchs bei unterschiedlichen Einzelproben aufgetreten sein. Da die Versuchsprotokolle teilweise nicht mehr vollständig vorhanden sind, kann nicht in jedem Fall eindeutig nachvollzogen werden, ob bei allen Einzelproben eines Versuchs ein echter Bruch eingetreten ist (Überschreitung eines max. Hauptspannungsverhältnisses) oder ob der Versuch bei einer Stauchung von ca. 20 % der Probenhöhe abgebrochen wurde. Beide Bruchdefinitionen können innerhalb eines Scherversuchs bei unterschiedlichen Einzelproben aufgetreten sein.

Ein weiteres Problem ist die Wassersättigung der Proben. Der in DIN 18137 vorgegebene Versuchsablauf setzt voraus, daß der natürliche Sättigungsgrad nahe $S_r = 1$ liegt. Dies ist jedoch häufig nicht der Fall. Wegen der verhältnismäßig geringen Wasserdurchlässigkeit dieser Böden ($k_s = 10^{-6}$ m/s bis $k_s = 10^{-8}$ m/s) kann nicht immer eine volle Sättigung der Probe erzielt werden. Erfahrungsgemäß weisen die Geschiebeböden im Berliner Raum wegen ihres verhältnismäßig geringen Wassergehalts kein ausgeprägtes Zeitsetzungsverhalten auf, d.h. daß die Porenwasserüberdrücke sehr gering sind und sich schnell abbauen. Die während des Abscherens wirksamen effektiven Spannungen weisen somit nur geringe Unterschiede zu den totalen Spannungen auf.

Die inhomogene Zusammensetzung der Geschiebeböden sowie die stellenweise höheren grobkörnigen und kiesigen Anteile führen auch bei der Bestimmung der Konsistenzgrenzen zu Problemen (siehe auch Schuppener/Kiebusch (1988)). Durch das Absieben aller Anteile mit einem Korndurchmesser $> 0,4$ mm bei der Bestimmung der Atterbergschen Grenzen werden bis zu 30 % der Kornfraktionen nicht berücksichtigt.

Eine direkte Schlußfolgerung von der Konsistenzzahl auf die Scherparameter, wie z. B. in der DIN 1055 für die bindigen Böden angegeben, ist für gemischtkörnige Böden praktisch nicht möglich.

Insbesondere geht der Kornanteil im sandigen Bereich, der den Reibungswinkel von gemischtkörnigen Böden gegenüber dem von feinkörnigem maßgebend beeinflusst, nicht in die Betrachtung ein.

Die direkte Bestimmung der Scherparameter von gemischtkörnigen Böden, z.B. im Dreiaxialgerät, ist wegen der vorstehend beschriebenen Probleme sowohl bei der Herstellung und dem Einbau der Proben als auch bei der Versuchsdurchführung mit großen Streuungen behaftet.

Für eine zuverlässige statistische Beurteilung und Bestimmung der charakteristischen Werte der Scherparameter ist deshalb ein großer Stichprobenumfang erforderlich, der in der Praxis für einzelne Bauvorhaben im allgemeinen nicht realisierbar ist. Andererseits besteht die Möglichkeit, an ungestörten sowie eingeschränkt auch an gestörten Bodenproben mit einfach durchzuführenden Versuchen mit geringer Streuung zu ermittelnde Bodenkennwerte (Wassergehalt w , Porenzahl e , Wichten γ und γ_d) in größerem Umfang zu bestimmen.

Die Erfahrung zeigt, daß bei gemischtkörnigen Böden die Kornverteilungskurve, vor allem der Feinkornanteil, ($d \leq 0,06$ mm) die Scherparameter wesentlich beeinflusst. Ausgeprägter ist jedoch der Einfluß der Vorbelastung, deren einfach zu ermittelndes Kennzeichen der Hohlraumgehalt, z.B. in Form der Porenzahl ist.

Die Auswertung der in einer Datenbank der Degebo gesammelten Versuchsergebnisse von ca. 6000 untersuchten Proben aus Geschiebeböden soll das von Weiß (1978) beschriebene Modell bestätigen oder zur Entwicklung eines neuen führen.

Anschließend soll untersucht werden, ob ähnliche Abhängigkeiten auch für organische Böden vorhanden sind.

3.2 Gemischtkörnige und feinkörnige Böden

3.2.1 Proben- und Versuchsumfang

Die Ergebnisse von Versuchen, die im Lauf von ca. 30 Jahren an ca. 5000 ungestörten Bodenproben aus Geschiebeböden im Berliner Raum vorgenommen worden sind, wurden in einer Datenbank zusammengefaßt. Folgende Versuchsarten sind dokumentiert:

- Porenzahl e	ca. 5000 Proben
- Wassergehalt w	ca. 5000 Proben
- Kornverteilung (Feinkornanteil)	ca. 2400 Proben
- Konsistenzgrenzen	ca. 500 Proben

- Reibungswinkel und Kohäsion (CU-Versuch)	ca. 480 Proben
- Undrainierte Kohäsion c_u	ca. 200 Proben
- Einaxiale Druckfestigkeit q_u	ca. 130 Proben

Bei den Triaxial- und Einaxialversuchen wurden nicht nur die ermittelten Scherparameter, sondern auch die Ergebnisse der Einzelversuche in Form der ermittelten Hauptspannungen σ_1 und σ_3 im Bruchzustand in die Datenbank aufgenommen.

3.2.2 Gruppeneinteilung

Der Feinkornanteil $a(0,06)$ der untersuchten und in der Datenbank gesammelten Böden liegt zwischen ca. 15 % und 80 %, überwiegend jedoch zwischen 15 % und 50 %. Damit wurden hauptsächlich Versuchsergebnisse von gemischtkörnigen Böden (SU^*), teils auch von feinkörnigen Böden (TL) gesammelt. Der Tonanteil liegt im allgemeinen unter 15 %.

In der Degebo wird seit Jahrzehnten folgende Einteilung der Geschiebeböden nach dem Siebdurchgang bei $d = 0,06$ mm ($a(0,06)$) verwendet:

Siebdurchgang bei $d = 0,06$ mm	Bezeichnung
15 % bis 26 %	stark sandig
27 % bis 43 %	sandig
44 % bis 55 %	(ohne)
56 % bis 65 %	schluffig
66 % bis 72 %	stark schluffig
72 % bis 90 %	Tonmergel

Diese Einteilung wurde auch in der Datenbank zur vereinfachten Beschreibung der Kornverteilung verwendet.

Im folgenden werden die Böden nach ihrem Feinkornanteil in fünf Gruppen eingeteilt:

Gruppe	a(0,06) Siebdurchgang bei d = 0,06 mm	Bodengruppe nach DIN 18196
1	15 % bis 26 %	SU*
2	27 % bis 33 %	SU*
3	34 % bis 40 %	SU*
4	41 % bis 60 %	TL
5	27 % bis 40 %	SU*

Die Kornverteilungsbänder der untersuchten Böden mit der Gruppeneinteilung sind in Bild 1 dargestellt. Die Grenzwerte der Ungleichförmigkeitszahl $U = d_{60}/d_{10}$ wurden wie folgt bestimmt:

Gruppe 1	7,5	≤	$U < 23$
Gruppe 2	23	≤	$U < 60$
Gruppe 3	60	≤	$U < 400$
Gruppe 4			$U = 400$

Aufgrund der verhältnismäßig großen Versuchszahl konnte der sandige Mergel bzw. Lehm ($26\% < a(0,06) \leq 40\%$) in zwei Untergruppen aufgeteilt werden. Es wurden jedoch nicht bei allen Datensätzen die Größen des Feinkorngehalts a(0,06) zahlenmäßig erfaßt. Teilweise sind nur qualitative Angaben (Mg/Lg, s) vorhanden. Deshalb konnten in den Gruppen 2 und 3 nicht alle Versuchsergebnisse berücksichtigt werden. In einem weiteren Schritt wurden daher die Gruppen 2 und 3 zu einer 5. Gruppe ($26\% < a(0,06) \leq 40\%$) zusammengefaßt, in der auch Versuchsergebnisse ohne genaue Angaben über die Kornverteilung aufgenommen wurden.

Die Gruppe 4 enthält Böden, die nach DIN 18196 nicht als gemischtkörnige, sondern als feinkörnige Böden zu klassifizieren sind. Diese Böden haben jedoch die gleiche geologische Entstehungsgeschichte. Es erschien daher sinnvoll, die Untersuchung auf diese Böden zu erweitern.

Abgesehen von der Gruppe 1 wurde auf annähernd gleich große Stichprobenanzahlen in allen Gruppen geachtet. Eine weitere Aufteilung der Gruppen 2 bis 4 erschien uns nicht als sinnvoll, da sich zum Teil zu geringe Stichprobenzahlen ergeben hätten.

Schluffige Sande ($a(0,06) \leq 15\%$) wurden aufgrund der sehr geringen vorhandenen Stichprobenzahl und der u.E grundsätzlich anderen bodenmechanischen Eigenschaften nicht berücksichtigt.

3.2.3 Häufigkeitsverteilungen

In einem ersten Schritt wurden die Häufigkeitsverteilungen der Kenngrößen $a(0,06)$, e , w , ϕ , c_u und c_u für die Gesamtheit der Proben aus Mergel ermittelt und in den Bildern 2 bis 8 aufgetragen. Zusätzlich wurden jeweils die Summenkurven der Häufigkeitsverteilungen aufgetragen. Es wurden alle Versuchswerte, also auch die "Ausreißer", dokumentiert.

In Bild 2 ist die Verteilung sowie die kumulierte Häufigkeit der Feinkorngehalte $a(0,06)$ für $d \leq 0,06$ mm von 2388 Proben aufgetragen. Demnach liegen ca. 70 % aller untersuchten Proben im Bereich der Gruppen 2 und 3 bzw. der Gruppe 5. Böden der Gruppe 1 wurden nur in ca. 8 % der untersuchten Fälle festgestellt, zur Gruppe 4 gehören ca. 22 % der Proben.

Die Porenzahlen von 4676 untersuchten Proben liegen zwischen $e = 0,2$ und $e = 0,55$. Ca. 90 % aller Proben weisen eine Porenzahl $0,25 < e \leq 0,45$ auf (s. Bild 3).

Die an 5070 Proben festgestellten Wassergehalte liegen zwischen $w = 5\%$ und $w = 19\%$ (s. Bild 4). Ca. 90 % der Werte liegen zwischen $w = 7,5\%$ und $w = 15\%$.

Die an 477 Proben ermittelten Reibungswinkel ϕ liegen zwischen 16° und 40° , davon ca. 90 % zwischen $\phi = 21^\circ$ und $\phi = 40^\circ$ (s. Bild 5). Die Verteilungskurve verläuft sehr flach und leicht asymmetrisch.

Die Werte für die Kohäsion sind in der Bild 6 aufgetragen. Demnach ist die Streuung der Versuchswerte wesentlich größer als die der anderen Kenngrößen. Etwa 90 % aller Werte liegen zwischen $c = 10 \text{ kN/m}^2$ und $c = 130 \text{ kN/m}^2$ mit einem Maximum bei $c = 40 \text{ kN/m}^2$, die Maximalwerte liegen bei ca. $c = 600 \text{ kN/m}^2$. Die Häufigkeitsverteilung ist stark asymmetrisch.

Die in Bild 7 für 130 Proben aufgetragene Verteilung für die einaxiale Druckfestigkeit q_u weist eine ähnliche, asymmetrische Form wie die für c (CU-Versuch) auf. 90 % aller Werte liegen zwischen $q_u = 25 \text{ kN/m}^2$ und $q_u = 375 \text{ kN/m}^2$. Das Maximum liegt bei ca. $q_u = 50 \text{ kN/m}^2$ bis $q_u = 75 \text{ kN/m}^2$, die größten gemessenen Werte liegen bei ca. $q_u = 800 \text{ kN/m}^2$.

Auch die in Bild 8 aufgetragene Häufigkeitsverteilung der undrainierten Kohäsion c_u (200 Proben) weist eine ähnliche, jedoch noch breitere Form auf. 90 % der Werte liegen zwischen $c_u = 50 \text{ kN/m}^2$ und $c_u = 500 \text{ kN/m}^2$ mit einem Maximum bei $c_u = 150 \text{ kN/m}^2$. Die größten gemessenen Werte liegen über $c_u = 800 \text{ kN/m}^2$.

3.3. Organische Böden

3.3.1 Proben- und Versuchsumfang

In die Datenbank wurden Versuche an den im Berliner Raum häufig vorkommenden organischen Bodenarten Torf, Faulschlamm und Wiesenkalk aufgenommen. Untersuchungen an insgesamt 1075 Proben, davon ca. 470 aus Faulschlamm, ca. 200 in Torf und ca. 400 im Wiesenkalk, wurden dokumentiert. Folgende Versuchsanzahlen für alle organischen Bodenarten sind dokumentiert:

-	Porenzahl e	ca. 330 Proben
-	Wassergehalt w	ca. 1030 Proben
-	Konsistenzgrenzen (Nur Faulschlamm und Wiesenkalk)	ca. 270 Proben
-	Reibungswinkel und Kohäsion (CU-Versuch)	
	Torf	13 Proben
	Faulschlamm	77 Proben
	Wiesenkalk	44 Proben
-	Undrainierte Kohäsion c_u	
	Torf	10 Proben
	Faulschlamm	43 Proben
	Wiesenkalk	40 Proben
-	Einaxiale Druckfestigkeit q_u	
	Torf	18 Proben
	Faulschlamm	50 Proben
	Wiesenkalk	23 Proben

3.3.2 Häufigkeitsverteilungen

Ähnlich Abschnitt 3.2.3 wurden die Häufigkeitsverteilungen der Kenngrößen V_{GI} , w , γ_d , ϕ , c , q_u und c_u aus der Gesamtheit der Proben ermittelt und in den Bildern 9 bis 15 jeweils für die drei Bodenarten zum Vergleich nebeneinander aufgetragen. Zusätzlich sind jeweils auch die Summenkurven der Häufigkeitsverteilung dargestellt. Auch hier wurden die Daten zunächst ohne Eliminierung von extrem abweichenden Werten verwendet. Weitere Differenzierungen wie z.B. nach Beimengungen von Sand oder Schluff wurden nicht vorgenommen.

In Bild 9 sind die Verteilung sowie die kumulierte Häufigkeit des Glühverlustes von 84 Proben (Torf), 277 Proben (Faulschlamm) und 258 Proben (Wiesenkalk) aufgetragen. Für Torf ergibt sich eine regellose Verteilung zwischen $V_{gl} = 40\%$ und $V_{gl} = 98\%$. Für Faulschlamm und Wiesenkalk ergeben sich leicht asymmetrische Verteilungen, deren Maximum zwischen $V_{gl} = 10\%$ und $V_{gl} = 18\%$ liegt. 90% bis 95% aller Werte liegen zwischen $V_{gl} = 4\%$ und $V_{gl} = 28\%$.

Die an 184 Torfproben festgestellten Wassergehalte liegen zwischen $w = 60\%$ und $w = 520\%$ (s. Bild 10), das Maximum liegt bei $w = 240\%$. Die Häufigkeitsverteilung ist sehr flach. Bei den 454 Proben aus Faulschlamm liegt der Wassergehalt zwischen $w = 20$ und 300% , das Maximum liegt bei ca. $w = 100\%$. Für die 369 Proben aus Wiesenkalk ergibt sich die kleinste Schwankungsbreite mit $w = 20\%$ bis $w = 200\%$. Das Maximum liegt bei $w = 80\%$.

Für die Trockenwichte weist Torf eine stark asymmetrische Verteilung mit den Grenzen $\gamma_d = 1,5 \text{ kN/m}^3$ und $\gamma_d = 12 \text{ kN/m}^3$ auf (s. Bild 11). Das Maximum liegt bei $\gamma_d = 3,5 \text{ kN/m}^3$. Für Faulschlamm und Wiesenkalk nähern sich die Verteilungen der Normalverteilung. Bei Faulschlamm liegen die Grenzen zwischen $\gamma_d = 2 \text{ kN/m}^3$ und $\gamma_d = 15,5 \text{ kN/m}^3$, bei Wiesenkalk zwischen $\gamma_d = 3 \text{ kN/m}^3$ und $\gamma_d = 14 \text{ kN/m}^3$. Die Maxima liegen bei $\gamma_d = 5,5 \text{ kN/m}^3$ bzw. $\gamma_d = 8 \text{ kN/m}^3$.

Bild 12 enthält die Häufigkeitsverteilungen des beim CU-Versuch ermittelten Reibungswinkels. Bei den nur 13 untersuchten Proben aus Torf ergibt sich keine eindeutige Verteilung, ϕ liegt zwischen $\phi = 12^\circ$ und $\phi = 32^\circ$. Für Faulschlamm (76 Proben) und Wiesenkalk (44 Proben) liegen 90% der Werte zwischen $\phi = 8^\circ$ und $\phi = 30^\circ$, die zugehörigen Maxima liegen bei ca. $\phi = 20^\circ$.

Die zugehörigen Werte für die Kohäsion sind in Bild 13 aufgetragen. Für Torf ergibt sich eine schmale Verteilung mit einer Spannweite von $c = 5 \text{ kN/m}^2$ und $c = 30 \text{ kN/m}^2$ und einem Maximum bei $c = 15 \text{ kN/m}^2$. Die Häufigkeitsverteilungen für Faulschlamm und Wiesenkalk sind stark asymmetrisch. Die Kohäsion liegt zwischen $c = 5 \text{ kN/m}^2$ und $c = 90 \text{ kN/m}^2$, 90% der Werte sind kleiner als $c = 45 \text{ kN/m}^2$. Bei beiden Böden liegt das Maximum bei $c = 10 \text{ kN/m}^2$ bis $c = 20 \text{ kN/m}^2$.

In Bild 14 sind die Verteilungen für die einaxiale Druckfestigkeit q_u aufgetragen. Abweichend von den o.g. Verteilungen wurden hier die Ergebnisse der Einzelversuche (ein bis drei Versuche je ungestörter Probe) zugrunde gelegt. Für die 49 Versuche an Torf ergibt sich eine regellose Verteilung, die Werte liegen zwischen $q_u = 10 \text{ kN/m}^2$ und $q_u = 105 \text{ kN/m}^2$. Auch bei Wiesenkalk (58 Versuche) zeigt sich keine regelmäßige Verteilung. Bei Faulschlamm (134 Einzelversuche) ergibt sich eine stark asymmetrische Verteilung. 90 % aller Werte für Faulschlamm und Wiesenkalk liegen zwischen $q_u = 10 \text{ kN/m}^2$ und $q_u = 45 \text{ kN/m}^2$. der Maximalwert liegt bei $q_u = 10 \text{ kN/m}^2$.

Bei den in Bild 15 aufgetragenen Häufigkeitsverteilungen der Kohäsion c_u aus UU-Versuchen ist für keine der drei Bodenarten eine regelmäßige Verteilung zu erkennen, obwohl auch hier die Ergebnisse der Einzelversuche (Torf 28 Versuche, Faulschlamm 118 Versuche und Wiesenkalk 106 Versuche) verwendet wurden.

4 Auswertung gemischtkörniger und feinkörniger Böden

4.1 Drainierte Scherfestigkeit (CU-Versuch)

Zunächst wurden die Beziehungen zwischen e und w sowie dem Sättigungsgrad S_r einerseits und den Festigkeitsgrößen ϕ , c , c_u und q_u andererseits getrennt nach den Bodengruppen aufgetragen, um eine Übersicht über mögliche Zusammenhänge zu gewinnen. Konsistenz- und Plastizitätsindex wurden wegen der geringen Anzahl der Kombinationen dieser Versuche mit Scherversuchen (ca. 80 Proben, davon ca. 50 für gemischtkörnige Böden mit $a(0,06) \leq 40\%$) und wegen der bei Schuppener/Kieckbusch (1988) beschriebenen geringen Aussagekraft der Kenngrößen nicht weiter untersucht.

4.1.1 Scherparameter ϕ und c

Die Beziehungen $\phi - e$, $\phi - w$, $c - e$ und $c - w$ (Bilder 16 bis 35) weisen große Streuungen auf, klare Abhängigkeiten werden kaum erkennbar.

Die Auftragung der Beziehungen von ϕ und c zum Sättigungsgrad S_r in den Bildern 36 bis 45 zeigt regellose Streuungen, Abhängigkeiten werden nicht sichtbar. Eine statistische Bearbeitung dieser sehr wenig ausgeprägten Abhängigkeiten erscheint nicht sinnvoll.

4.1.2 Vergleichsscherfestigkeit

Bei der in Form einer linearen Regressionsanalyse mit im allgemeinen drei Stichproben durchgeführten Auswertung des CU-Versuchs besteht eine Wechselwirkung zwischen ϕ und C . Es wurde versucht, beide Größen zusammenzufassen. Hierfür wurde für eine fiktive Überlagerungsspannung $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ die Vergleichsscherfestigkeit $\tau_{200} = \sigma \times \tan(\phi) + c$ berechnet und die Abhängigkeit zu e und w in den Bildern 46 bis 55 für die einzelnen Bodengruppen aufgetragen. Überlagerungsspannungen dieser Größenordnung ergeben sich bei einer Bodenüberdeckung von ca. 10 m, was etwa der mittleren Entnahmetiefe der in der Datenbank gesammelten Proben entspricht. Die Auftragung der Vergleichsscherfestigkeit zeigt deutlich geringere Streuungen als bei getrennter Betrachtung der Scherparameter. Es wird erkennbar, daß die Scherfestigkeit mit wachsendem Porenanteil bzw. Wassergehalt abnimmt. Signifikante Unterschiede zwischen den Bodengruppen sind ohne genauere Analyse nicht zu erkennen.

Aus der deutlichen Verringerung der Streuungen bei der Auftragung von τ_{200} gegenüber der von ϕ und c wird die gegenseitige Abhängigkeit der beiden letzteren Größen sichtbar. So führt bei konstantem τ_{200} eine Abminderung von ϕ zu größeren Werten von c und umgekehrt. Will man zur Verringerung der Streuung stark abweichende Werte (Ausreißer) entfernen, müssen gleichzeitig die zugehörigen Werte für ϕ oder c aus der Auswertung genommen werden. Die Kombination von beiden könnte jedoch nahe am Mittelwert von τ_{200} liegen, das Wertepaar ϕ und c müßte dann eigentlich in der weiteren Auswertung berücksichtigt werden. Ein Eliminieren von Wertepaaren aufgrund von Ausreißern einzelner Werte von ϕ oder c würde auch eigentlich brauchbare Versuchswerte entfernen und ist somit nicht sinnvoll.

4.1.3 Spannungsverhältnis σ_1/σ_3

Aus der kombinierten Betrachtung von ϕ und c wird deutlich, daß durch die Versuchsauswertung Streuungen erzeugt werden können, die die bereits durch Probennahme, Bodeninhomogenität und Versuchsdurchführung bedingten Streuungen u.U. noch vergrößern.

Die in der Datenbank gesammelten Scherparameter ϕ und c basieren auf den Ergebnissen von jeweils drei Einzelversuchen im Triaxialgerät, bei denen die Einzelproben bei unterschiedlichen Seitendrücken konsolidiert und abgeschert werden. Die Laststufen der Einzelversuche stehen dabei im allgemeinen im Verhältnis 1 : 2 : 3 (z.B. $\sigma_3 = 100, 200, 300 \text{ kN/m}^2$). Das eigentliche Versuchsergebnis ist der Mohrsche Spannungskreis im Bruchzustand für jeden Einzelversuch.

Die zur Ermittlung der Scherparameter angewandte lineare Regressionsanalyse verwendet gemäß der Norm den für dieses Verfahren geringstmöglichen Stichprobenumfang (drei Einzelversuche) und reagiert daher bei geringer Variation einzelner Werte, insbesondere bei der niedrigsten und höchsten Laststufe, sehr empfindlich. Weiterhin basieren viele in die Datenbank aufgenommene Werte auf einer unvollständigen Auswertung, da vielfach aus den drei Einzelversuchen ein nach Erfahrung des Bearbeiters oder vorgegebenen Kriterien zu stark abweichender Wert ("Ausreißer") entfernt wird und die Scherparameter dann aus nur zwei Einzelversuchen ermittelt werden.

Um diese zufälligen oder willkürlichen Einflüsse weitgehend auszuschließen, ist demnach eine Betrachtung der eigentlichen, unverfälschten Versuchsergebnisse, nämlich der Mohrschen Spannungskreise der Einzelversuche im Bruchzustand erforderlich. Die

Ergebnisse der Einzelversuche an mehreren aus einer Probe gewonnenen Einzelproben können hierbei als unabhängig angesehen werden.

Es erschien demnach sinnvoll, statt der Scherparameter die Abhängigkeit der Ergebnisse der Einzelversuche vom Feinkorngehalt $a(0,06)$, dem Wassergehalt w , der Porenzahl e sowie dem aufgetragenen Seitendruck σ_3 statistisch zu untersuchen.

Bei den Versuchen wurden, vor allem bedingt durch die Entnahmetiefen und die Konsistenz der ungestörten Proben, unterschiedliche Seitendrücke σ_3 aufgebracht.

Folgende Seitendruckkombinationen wurden aufgebracht, wobei aus versuchstechnischen Gründen Abweichungen von $\pm 10\%$ möglich waren:

Laststufe 1	Laststufe 2	Laststufe 3
50 kN/m ²	100 kN/m ²	150 kN/m ²
100 kN/m ²	200 kN/m ²	300 kN/m ²
150 kN/m ²	300 kN/m ²	450 kN/m ²

In Einzelfällen wurde vom Verhältnis 1 : 2 : 3 abgewichen.

Um annähernd gleiche Stichprobenumfänge zu gewährleisten, wurden die Ergebnisse aller Laststufen in drei Belastungsgruppen zusammengefaßt:

1. Stufe $\sigma_3 \leq 120 \text{ kN/m}^2$
2. Stufe $120 \text{ kN/m}^2 < \sigma_3 \leq 220 \text{ kN/m}^2$
3. Stufe $\sigma_3 > 220 \text{ kN/m}^2$

Die Ergebnisse der Einzelversuche wurden in diese Gruppen eingeordnet und diese Zusammenstellungen weiter untersucht.

Für die aufgebrachten Seitendrucke σ_3 ergaben sich in den einzelnen Stufen folgende statistische Größen:

	σ_3 [kN/m ²]	Stichproben- anzahl	Mittelwert [kN/m ²]	Standardab- weichung [kN/m ²]
1. Stufe	$\sigma_3 \leq 120$	391	93	± 18
2. Stufe	$120 < \sigma_3 \leq 220$	428	182	± 23
3. Stufe	$\sigma_3 > 220$	421	307	± 55

In einem weiteren Schritt wurden die Versuchsergebnisse, abhängig vom Feinkorngehalt $a(0,06)$ in die in Abschnitt 3.2.2 festgelegten Gruppen 1 bis 5 eingeordnet.

Für die einzelnen Gruppen ergeben sich in den einzelnen Laststufen folgende Stichprobenumfänge:

Laststufe	1	2	3
Gruppe 1	36	33	30
Gruppe 2	97	105	91
Gruppe 3	105	95	84
Gruppe 4	69	102	117
Gruppe 5	285	326	304

Zur einfacheren Auswertung wurden statt der zu den Seitendrucke σ_3 gehörigen Hauptspannungen σ_1 die dimensionslosen Spannungsverhältnisse σ_1/σ_3 im Bruchzustand in Abhängigkeit von e , w und dem Sättigungsgrad S_r für die einzelnen Gruppen und Laststufen untersucht.

Zunächst wurde eine Auswertung unter Verwendung aller Versuchswerte vorgenommen. In einem weiteren Schritt wurden einzelne extrem abweichende Versuchsergebnisse (Ausreißer) eliminiert, wobei in keinem Fall die nach statistischen Regeln erlaubte Grenze von 10 % der Stichprobenzahlen erreicht wurde. Die insgesamt etwa 20 entfernten Werte (ca. 1,5 % der Gesamtanzahl) lagen überwiegend im Bereich kleiner Porenzahlen ($0,25 < e < 0,3$). Bis auf eine Ausnahme handelte es sich um deutliche Überschreitungen des durch die Regressionskurve gegebenen Mittelwerts.

Die in den Einzelversuchen ermittelten Spannungsverhältnisse σ_1/σ_3 sind für die fünf untersuchten Gruppen getrennt nach Laststufenbereichen über die Porenzahl e in den Bildern 56 bis 73 aufgetragen. Bei der Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses σ_1/σ_3 von e werden wegen der im Vergleich zur Auftragung der Scherparameter wesentlich geringeren Streuungen Tendenzen sichtbar, die bei der Untersuchung von ϕ und c nicht erkennbar werden. Das Verhältnis σ_1/σ_3 und damit die Bruchspannung verringert sich mit wachsender Porenzahl e . Die Streuungen sind bei der kleinsten Laststufe ($\sigma_3 < 120 \text{ kN/m}^2$) am größten und werden mit wachsendem Seitendruck kleiner. Die kleinsten Streuungen weisen bei allen Laststufen die Ergebnisse für die Gruppe 3 ($33 \% \leq a(0,06) < 40 \%$) auf (s. Bilder 58, 64 und 70). Die größten Streuungen wurden bei stark sandigen Böden (Gruppe 1) festgestellt (s. Bilder 56, 62 und 68). Eine wesentliche Ursache hierfür ist wahrscheinlich die gegenüber Böden mit höherem Feinkornanteil größere Inhomogenität der Einzelproben.

Bei der Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses σ_1/σ_3 vom Wassergehalt treten deutlich größere Streuungen auf. Die Auftragung des Spannungsverhältnisses über S_r allein zeigt eine regellose Streuung. Diese Beobachtungen weisen darauf hin, daß die Versuchsergebnisse vom Sättigungsgrad nicht abhängig sind. Die Abhängigkeiten von w sowie S_r wurden für den vorliegenden Bericht nicht weiter untersucht und sind deshalb nicht aufgetragen worden.

4.1.4 Statistische Auswertung

Zur statistischen Auswertung der Daten wurden folgende Regressionsanalysen der zu untersuchenden Abhängigkeiten durchgeführt:

- linear
 - $\sigma_1/\sigma_3 = a + b * e$ [Gl. 4.1]
 - $\sigma_1/\sigma_3 = a + b * (w)$ [Gl. 4.2]
 - $\sigma_1/\sigma_3 = a + b * (S)$ [Gl. 4.3]

- nichtlinear
 - potentiell
 - $\sigma_1/\sigma_3 = a * e^b$ [Gl. 4.4]
 - $\sigma_1/\sigma_3 = a * (w)^b$ [Gl. 4.5]

 - logarithmisch
 - $\sigma_1/\sigma_3 = a + b * \ln(e)$ [Gl. 4.6]
 - $\sigma_1/\sigma_3 = a + b * \ln(w)$ [Gl. 4.7]

 - exponentiell
 - $\sigma_1/\sigma_3 = a * e^{(b * e)}$ [Gl. 4.7]
 - $\sigma_1/\sigma_3 = a * \exp(b * (w))$ [Gl. 4.8]

- Multiple Regressionsanalyse
 - $\sigma_1/\sigma_3 = a * \exp^{b1 * w^{b2}}$ [Gl. 4.9]

Die geringsten Korrelationen zeigten sich bei linearem Ansatz, die besten fast in allen Fällen beim potentiellen Ansatz. Die multiple Regressionsanalyse zeigte keine brauchbaren Ergebnisse.

Für alle weiteren Untersuchungen wurde daher der potentielle Ansatz gewählt. Die berechneten Regressionskurven sind zusammen mit den zugehörigen Gleichungen in den Bildern 56 bis 73 eingetragen. In den Bildern 61, 67 und 73 sind zum Vergleich die Ergebnisse für die Gruppen 1 bis 4 zusammengefaßt.

Für $\sigma_1/\sigma_3 = f(e)$ lagen die Korrelationskoeffizienten zwischen $R = 0,5$ und $R = 0,8$, wobei sich die besten Übereinstimmungen in der höchsten Laststufe ($\sigma_3 > 220 \text{ kN/m}^2$) für die Gruppe 3 ergaben (s. Bild 70).

Für $\sigma_1/\sigma_3 = f(w)$ wurden wegen der zum Teil erheblich größeren Streuungen Korrelationskoeffizienten zwischen $R = 0,04$ und $R = 0,7$ ermittelt. Die besten Korrelationen wurden für die Gruppe 4 festgestellt, die geringsten ($R = 0,04$) für die Gruppe 3. Aufgrund der sehr großen Unterschiede der Korrelationen war eine weitere Auswertung nicht sinnvoll, auf eine Wiedergabe der ermittelten Abhängigkeiten wurde daher verzichtet. Für $\sigma_1/\sigma_3 = f(S_r)$ liegen die Korrelationen nahe Null.

Versuchsweise wurden zusätzlich in einer multiplen Regressionsanalyse die Variablen e und w als Unabhängige eingeführt. Die Korrelationskoeffizienten lagen, wie für die Abhängigkeit von e , zwischen $R = 0,5$ und $R = 0,8$. Gegenüber der einfachen Regressionsanalyse $\sigma_1/\sigma_3 = f(e)$ zeigten sich jedoch sehr viel größere Abweichungen für die Grenzen der Vertrauensbereiche von den Mittelwertkurven.

In der weiteren Auswertung wurde daher davon ausgegangen, daß das Spannungsverhältnis σ_1/σ_3 beim CU-Versuch vom natürlichen Wassergehalt der Probe unabhängig ist. Wir beschränkten uns darauf, die Abhängigkeit von der Porenzahl zu untersuchen.

Das Spannungsverhältnis σ_1/σ_3 beträgt für $e = 0,25$ zwischen ca. 8,0 und 4,7, für $e = 0,5$ zwischen ca. 4,0 und 2,2. Trägt man die ermittelten Kurven für die verschiedenen Bodengruppen für die drei untersuchten Laststufenbereiche übereinander auf, zeigen sich nur geringe Unterschiede im Kurvenverlauf und der Größe von σ_1/σ_3 (s. Bilder 61, 67 und 73). Einen deutlich flacheren Verlauf zeigen nur die Kurven für den stark sandigen Boden (Gruppe 1).

4.1.5 Ermittlung der Scherparameter $\phi(e)$ und $c(e)$

Aus den Funktionen

$$\sigma_1/\sigma_3 = f(e) = a * e^b$$

für die drei untersuchten Laststufenbereiche wurden für diskrete Werte von e die Bruchspannungskreise berechnet.

Bei der Auswertung der Spannungsverhältnisse wurde, getrennt nach Bodengruppen, für jede Laststufe auch der Mittelwert der Seitendrücke σ_3 aller Versuche berechnet. Auf dieser Grundlage wurden mit den ermittelten Spannungsverhältnissen $\sigma_1/\sigma_3 = f(e)$ die Hauptspannungen im Bruchzustand berechnet. Folgende Mittelwerte ergaben sich für die Gruppen 1 bis 5:

- | | |
|--------------|---|
| 1. Laststufe | $\sigma_3 = 90,5 \text{ kN/m}^2 \text{ bis } 93,2 \text{ kN/m}^2$ |
| 2. Laststufe | $\sigma_3 = 178,1 \text{ kN/m}^2 \text{ bis } 186,7 \text{ kN/m}^2$ |
| 3. Laststufe | $\sigma_3 = 292,7 \text{ kN/m}^2 \text{ bis } 322,6 \text{ kN/m}^2$ |

Die zu diesen Seitendrücken gehörigen Vertikalspannungen wurden dann mittels

$$\sigma_1 = f(e) * \sigma_3$$

errechnet und stellen die Bruchspannungen dar. Aus jeweils drei für die einzelnen Laststufen in dieser Weise errechneten Spannungskreisen wurde dann in der in DIN 18137 dargestellten Form $\phi(e)$ und $c(e)$ ermittelt.

Der Verlauf der ermittelten Funktionen der Mittelwerte

$$\phi = f(e) \text{ und } c = f(e) \text{ sowie } \tau_{200} = \sigma * \tan(\phi) + c = f(e)$$

ist für die einzelnen Bodengruppen in den Bildern 74 bis 78 aufgetragen.

Zusätzlich wurden in den o.g. Bildern die unteren und oberen Grenzen für einen Vertrauensbereich von 90 % (5 % -Fraktile der Verteilung der Mittelwerte) für ϕ und c ermittelt und aufgetragen. Hierfür wurden in jedem Laststufenbereich die Ober- und Untergrenzen der Vertrauensbereiche der Mittelwerte von $\sigma_1/\sigma_3 = f(e)$ berechnet und in die Ermittlung von c und ϕ eingeführt. Für die Seitendrucke σ_3 wurden entsprechend auch die oberen und unteren 5 % -Fraktile des Mittelwerts verwendet, um auch diese Streuung zu berücksichtigen.

Die 5 % - Fraktile (Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 5\%$) der Mittelwerte stellen nach (Schuppener, 1999) in den Bestimmungen des Eurocodes EC7-1 die charakteristischen Kennwerte des betrachteten Bodens dar.

In den Bildern 79 und 80 wurden zusätzlich die für alle Bodengruppen ermittelten Kurven der Mittelwerte bzw. die der unteren 5 % - Fraktile von ϕ , c und τ_{200} zusammengefaßt, um den Einfluß des Feinkorngehalts $a(0,06)$ sichtbar zu machen.

Die Funktionen

$$\phi = f(w) \text{ und } c = f(w)$$

wurden wegen der in Abschnitt 4.1.2 dargestellten Probleme nicht weiter untersucht.

Im Folgenden werden zur besseren Vergleichbarkeit die Ergebnisse der Zusammenstellung über den Bereich $e = 0,25$ bis $0,5$ beschrieben, obwohl die festgestellten Porenzahlen abhängig von der Bodengruppe zwischen $e = 0,27$ und $e = 0,44$ (Gruppe 1) bzw $e = 0,3$ bis $e = 0,45$ (Gruppe 4) liegen. Die Mittelwerte sowie die 5 %-Fraktile der Scherparameter ϕ und c sowie die abgeleitete Vergleichscherfestigkeit für alle Bodengruppen sind in den Bildern 79 und 80 zur besseren Übersicht zusammengefaßt.

Bei allen Bodengruppen nimmt der Mittelwert von ϕ mit steigendem e nahezu linear ab (s. Bild 79). Der Mittelwert liegt für $e = 0,25$ zwischen ca. 36° und $38,5^\circ$, für $e = 0,5$ zwischen 18° und 26° . Für große Porenanteile wird der Reibungswinkel um so geringer, je höher der Feinkorngehalt ist. Bei ca. $e = 0,27$ beträgt der Reibungswinkel bei allen gemischtkörnigen Böden (Gruppen 1, 2, 3 und 5) etwa $\phi = 35^\circ$.

Die untere Grenze des Vertrauensbereichs für den Mittelwert (5 % Irrtumswahrscheinlichkeit) liegt zwischen $35,5^\circ$ und $37,5^\circ$ für $e = 0,25$ bzw. zwischen $16,4^\circ$ und $23,2^\circ$ für $e = 0,5$ (s. Bild 80). Die größte Streuung tritt, vermutlich wegen der großen Inhomogenität dieser Böden, bei den stark sandigen Böden (Gruppe 1) auf, während die der Gruppe 4 den kleinsten Streubereich aufweisen.

Die Abhängigkeit der Mittelwerte der Kohäsion von der Porenzahl zeigt bei den gemischtkörnigen Böden (Gruppen 1 bis 3 und 5) ebenfalls für wachsendes e eine stetige Abnahme von ca. 65 kN/m^2 bis 83 kN/m^2 bei $e = 0,25$ auf 14 kN/m^2 bis 34 kN/m^2 bei $e = 0,5$ (s. Bild 79). Die Kurven laufen annähernd parallel, eine stetige Abhängigkeit vom Feinkorngehalt, wie beim Reibungswinkel zu beobachten, zeigt sich nicht.

Bei den tonigen Böden (Gruppe 4) ist ein wesentlich flacherer Verlauf der Kurve festzustellen. Der Mittelwert der Kohäsion verringert sich von ca. 60 kN/m^2 bei $e = 0,25$ auf 50 kN/m^2 bei $e = 0,5$.

Die Abweichung der 5 %-Fraktile vom Mittelwert ist, vor allem bei den Gruppen 1 und 4, deutlich größer als beim Reibungswinkel. Die unteren Grenzen des Vertrauensbereichs liegen bei den sandigen Böden für $e = 0,25$ bei ca. 53 kN/m^2 bis 70 kN/m^2 , für $e = 0,5$ zwischen 11 kN/m^2 und 24 kN/m^2 (s. Bild 80).

Bei den tonigen Böden (Gruppe 4) steigt c von 48 kN/m^2 bei $e = 0,25$ auf 55 kN/m^2 bei $e = 0,35$ an, um dann bis $e = 0,5$ auf ca. 45 kN/m^2 leicht zu fallen.

Betrachtet man die aus $\phi(e)$ und $C(e)$ errechnete Vergleichsscherfestigkeit τ_{200} , zeigt sich ebenfalls eine stetige Abnahme mit wachsendem e . Bei den sandigen bzw. stark sandigen Böden ergeben sich Mittelwerte von 211 kN/m^2 bis 233 kN/m^2 für $e = 0,25$ bzw. 96 kN/m^2 bis 134 kN/m^2 für $e = 0,5$ (s. Bild 79). Für die Böden der Gruppe 4 liegt die Vergleichsscherfestigkeit zwischen 114 kN/m^2 für $e = 0,25$ und 212 kN/m^2 für $e = 0,5$. Die Mittelwertkurven unterscheiden sich nur geringfügig, die für stark sandigen sowie für feinkörnigen Boden (Gruppen 1 und 4) verlaufen jedoch deutlich flacher.

Bedingt durch die unterschiedlichen Streuungen verlaufen die Kurven der 5 %-Fraktile für τ_{200} nahezu parallel in einem Band von ca. 25 kN/m^2 Breite (s. Bild 80). Die Vergleichsscherfestigkeit τ_{200} beträgt für $e = 0,25$ ca. 195 kN/m^2 bis 220 kN/m^2 , für $e = 0,5$ zwischen ca. 85 kN/m^2 und 110 kN/m^2 . Eindeutige Tendenzen hinsichtlich der Abhängigkeit vom Feinkorngehalt sind nicht zu erkennen.

Zur Überprüfung der Ergebnisse des o.g. Verfahrens wurden die in der Datenbank gespeicherten, aus jeweils zwei bis drei Einzelversuchen abgeleiteten, ursprünglichen Versuchswerte für ϕ und c sowie die aus diesen Größen berechneten Vergleichsscherfestigkeiten τ_{200} in den Bildern 81 bis 85 zusammen mit den aus der statistischen Analyse der Spannungsverhältnisse ermittelten Kurven der Mittelwerte sowie den Grenzen des unteren Vertrauensbereiches für $\phi(e, a(0,06))$ und $c(e, a(0,06))$ aufgetragen. Zusätzlich wurde, ebenfalls mit einem potentiellen Ansatz, eine Regressionsanalyse der Versuchswerte ϕ , c und τ_{200} vorgenommen und für jede Bodengruppe die Regressionskurven der Mittelwerte aufgetragen. In Bild 86 sind die Ergebnisse dieser Regressionsanalysen für alle Bodengruppen zusammengefaßt. Die in der Datenbank gespeicherten Versuchsergebnisse von ϕ und c entstammen einer anderen Grundgesamtheit als die aus den statistisch ermittelten Funktionen $\sigma_1/\sigma_3 = f(e)$ berechneten. Beide Ergebnisse sind daher als unabhängig voneinander zu betrachten.

Aufgrund der großen Streuungen der Versuchswerte liegen die errechneten Korrelationskoeffizienten für ϕ nur zwischen $R = 0,37$ und $R = 0,66$, für c zwischen $R = 0,25$ und $R = 0,51$.

Der Verlauf der Regressionskurven ähnelt dem der statistischen Auswertung. Sie weisen jedoch für beide Scherparameter überwiegend eine stärkere Krümmung auf. Während die Kurven für ϕ mit zunehmendem e abflachen, weisen die für c ermittelten Kurven größere Anfangswerte und eine deutlich größere Steigung auf.

Der Reibungswinkel liegt für $e = 0,25$ zwischen ca. 32° (Gruppe 4) und 40° (Gruppe 3), für $e = 0,5$ zwischen ca. 20° (Gruppe 4) und 27° (Gruppe 1) (s. Bild 86). Die geringste Abnahme des Reibungswinkels zeigt sich für die stark sandigen Böden (Gruppe 1), während die feinkörnigen Böden (Gruppe 4) durchweg die kleinsten Werte für den Reibungswinkel aufweisen. Ein Zusammenhang des Feinkornanteils mit der Größe des Reibungswinkels ist nur ansatzweise zu erkennen.

Die Kohäsion liegt zwischen ca. 67 kN/m^2 und 118 kN/m^2 für $e = 0,25$ bzw. zwischen ca. 8 kN/m^2 und 37 kN/m^2 für $e = 0,5$ (s. Bild 86). Die stark sandigen Böden (Gruppe 1) weisen für große Porenanteile eine größere Kohäsion als die sandigen (Gruppen 2, 3 und 5) auf. Die Kurve für die Gruppe 4 ($a(0,06) > 40\%$) weist über den gesamten Bereich die größten Werte auf. Tendenzen der Abhängigkeit der Kohäsion vom Feinkorngehalt sind nicht zu erkennen.

Die ebenfalls in Bild 86 aufgetragenen Regressionskurven der Vergleichsscherfestigkeit τ_{200} liegen dicht beieinander, wobei die der sandigen Böden ($26 \% < a(0,06) \leq 40 \%$) praktisch deckungsgleich sind. Den höchsten Anfangswert bei $e = 0,25$ weisen die tonigen Böden (Gruppe 4) mit $\tau_{200} = 270 \text{ kN/m}^2$ auf, den kleinsten die Böden der Gruppe 1 ($\tau_{200} = 230 \text{ kN/m}^2$). Bei $e = 0,5$ ergibt sich die höchste Vergleichsscherfestigkeit für die stark sandigen Böden, die geringste für die sandigen Böden. Die Werte liegen zwischen $\tau_{200} = 140 \text{ kN/m}^2$ für stark sandige Böden (Gruppe 1) und $\tau_{200} = 100 \text{ kN/m}^2$ für die sandigen (Gruppen 2, 3 und 5).

4.2 Einaxiale Druckfestigkeit q_u

4.2.1 Abhängigkeiten zwischen den Bodenkenngrößen

Die einaxiale Druckfestigkeit nach DIN 18136 von gemischtkörnigen und feinkörnigen Böden wurde an insgesamt 130 ungestörten Proben mit ca. 300 Einzelversuchen untersucht. Die Ergebnisse wurden in die fünf Bodengruppen eingeordnet, wobei sich folgende Stichprobenzahlen (Einzelversuche) ergaben:

1	$15 \% \leq a(0,06) \leq 26 \%$	26 Einzelversuche
2	$26 \% < a(0,06) \leq 33 \%$	32 Einzelversuche
3	$33 \% < a(0,06) \leq 40 \%$	44 Einzelversuche
4	$40 \% < a(0,06) \leq 60 \%$	178 Einzelversuche
5	$26 \% < a(0,06) \leq 40 \%$	90 Einzelversuche

Wie bei der Auswertung der CU-Versuche lagen nicht für alle Proben der Gruppen 2 und 3 Informationen über den Feinkorngehalt vor, so daß, um alle Versuche an sandigem Mergel bzw. Lehm zu erfassen, zusätzlich die Gruppe 5 ($26 \% < a(0,06) \leq 40 \%$) eingerichtet wurde, die auch die Ergebnisse der Gruppen 2 und 3 beinhaltet.

Die Versuchswerte wurden ebenfalls abhängig von e und w aufgetragen (Bilder 87 bis 97). Auch hier wurden Regressionsanalysen mit unterschiedlichen Ansätzen (linear, logarithmisch, exponentiell und potentiell) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, daß für e und w auch hier ein potentieller Ansatz der Form

$$q_u = a * e^b \quad \text{bzw.} \quad q_u = a * w^b$$

die besten Korrelationen ergab. Die ermittelten Kurven und die Regressionsgleichungen sind zusammen mit den zugehörigen unteren und oberen Grenzen des 5 %-Vertrauensbereichs in den Bildern 87 bis 97 aufgetragen.

Die zusätzlich untersuchten Korrelationen für S_r erwiesen sich bei allen Ansätzen als nahezu Null, so daß wie bei den CU-Versuchen auch hier diese Abhängigkeit nicht weiter untersucht wurde.

Die Korrelationskoeffizienten für die Abhängigkeit vom Wassergehalt (ca. $R = 0,5$ bis $R = 0,8$) waren, abgesehen von der Gruppe 3, größer als die der Porenzahl (ca. $R = 0,45$ bis $R = 0,75$). Bei der Gruppe 1 (stark sandige Böden) war der Unterschied am größten, hier betrug der Korrelationskoeffizient $0,45$ für e bzw. $0,65$ für w .

Für stark sandige und sandige Böden ergaben sich für die Mittelwertkurven der Abhängigkeit von w für $w > 8\%$ ein Band mit einer Breite von ca. 15 kN/m^2 bis 20 kN/m^2 (Bild 98), für die Abhängigkeit von e sind die Kurven der Gruppen 2, 3 und 4 für $e > 0,3$ fast identisch (Bild 100). Die Gruppe 1 weist für den gesamten Bereich von e deutlich größere Werte auf. Eine eindeutige Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit vom Feinkorngehalt läßt sich für gemischtkörnige Böden nicht erkennen.

Die feinkörnigen Böden ($a(0,06) > 40\%$) weisen für große Porenzahlen bzw. Wassergehalte eine signifikant höhere Druckfestigkeit auf, die Korrelation ist jedoch wesentlich geringer. Aufgrund der stark unterschiedlichen Probenzahl in den einzelnen Gruppen ergeben sich unterschiedlich weite Vertrauensbereiche, wodurch die Kurven der unteren Grenzen für kleine Werte von e bzw. w weiter auseinander liegen als die Mittelwertkurven (s. Bilder 99 und 101).

Die Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit von w weist nicht nur größere Korrelationen auf, sondern die Lage der Kurven für die einzelnen Gruppen zueinander entspricht den bodenmechanischen Gegebenheiten (s. Bilder 98 und 99). Die bei der Abhängigkeit von e ermittelte, überproportional große Festigkeit der Böden der Gruppe 1 widerspricht der Erfahrung, daß der für q_u maßgebende Kohäsionsanteil mit sinkendem Feinkornanteil ebenfalls geringer werden müßte (s. Bild 100). Der Verlauf dieser Kurve ist demnach, bedingt durch die geringe Versuchszahl und die große Streuung, nicht

repräsentativ für diese Böden. Der weiteren Betrachtung wurde daher allein die Abhängigkeit von w zugrunde gelegt.

Die in Bild 98 für die Gruppen 1 bis 3 und 5 aufgetragenen Mittelwertkurven liegen für Wassergehalte $w > 8\%$ dicht beieinander. In den Gruppen 1 bis 3 zeigt sich gegenüber der Gruppe 5 für $w < 8\%$ eine niedrigere Festigkeit. In diesem Bereich sind überwiegend Versuchsergebnisse vorhanden, für die der Feinkorngehalt nicht genau definiert ist und die in die Gruppe 5 eingeordnet werden mußten. Es kann daher davon ausgegangen werden, daß diese Kurve für alle sandigen Böden repräsentativ ist. Werden alle Versuche für Böden mit $a(0,06) \leq 40\%$ einschließlich denen der Gruppe 1 zusammengefaßt, entspricht die Mittelwertkurve der der Gruppe 5 (s. Bilder 97 und 98). Diese aus 204 Einzelversuchen berechnete Mittelwertkurve kann demnach, wie auch die zugehörige untere 5 %-Grenze des Vertrauensbereiches, als repräsentativ für alle gemischtkörnigen Böden angesehen werden (s. Bilder 98 und 99).

4.3 Undrainierte, unkonsolidierte Scherfestigkeit c_u

4.3.1 Abhängigkeiten zwischen den Bodenkenngrößen

Die undrainierte, unkonsolidierte Scherfestigkeit gemischtkörniger und feinkörniger Böden wurde an insgesamt 196 ungestörten Proben mit ca. 400 Einzelversuchen nach DIN 18137 untersucht. Die Ergebnisse wurden, wie bei den vorangegangenen Untersuchungen, in fünf Bodengruppen abhängig vom Feinkorngehalt ($a(0,06)$ - Siebdurchgang bei $d = 0,06$ mm) eingeordnet, wobei sich folgende Stichprobenzahlen (Einzelversuche) ergaben:

1	$15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$	74 Einzelversuche
2	$26\% < a(0,06) \leq 33\%$	109 Einzelversuche
3	$33\% < a(0,06) \leq 40\%$	73 Einzelversuche
4	$40\% < a(0,06) \leq 60\%$	18 Einzelversuche
5	$26\% < a(0,06) \leq 40\%$	296 Einzelversuche

Wie bei der Auswertung der CU-Versuche wurde wegen der zum Teil nur qualitativen Angaben über den Feinkorngehalt zusätzlich die Gruppe 5 ($26\% < a(0,06) < 40\%$) eingerichtet, die auch die Ergebnisse der Gruppen 2 und 3 beinhaltet.

Die Auftragung ergab große Streuungen der ermittelten Bruchspannungen $(\sigma_1/\sigma_3)/2 = c_u$, so daß eine Ermittlung von repräsentativen Mittelwerten bzw. charakteristischen Werten nicht möglich erschien (s. Bilder 102 bis 106). Die Korrelationskoeffizienten für versuchsweise durchgeführte Regressionsanalysen mit dem potentiellen Ansatz lagen zwischen $R = 0,11$ und $R = 0,48$. Die Auswertung dieser Versuche wurde daher nicht weiter verfolgt.

5 Organische Böden

5.1 Allgemeines

Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, ist die Anzahl der in der Datenbank erfaßten Versuchsergebnisse von organischen Böden erheblich geringer als die der gemischt- und feinkörnigen mineralischen Böden. Einige der für mineralische Böden üblichen Versuche, wie z.B. die Bestimmung des Porengehalts, der Korngrößenverteilung oder der Atterbergschen Grenzen sind, z.B. bei Torf, nicht durchführbar. Im Vergleich zu mineralischen Böden hat die Überlagerungsspannung wegen der großen Zusammendrückbarkeit der organischen Böden einen wesentlich größeren Einfluß auf die Steifigkeit und die Scherfestigkeit. Viele der genannten Einflüsse lassen sich in einer Datenbank, die auf der Grundlage von projektbezogenen Untersuchungen entstanden ist, gar nicht oder nur sehr ungenau erfassen.

Drei Bodengruppen (Torf, Faulschlamm, Wiesenalk) wurden in der Datenbank erfaßt. Torf weist gegenüber Faulschlamm und Wiesenalk eine unterschiedliche Struktur, Zusammensetzung und Materialeigenschaften auf. Zur statistischen Auswertung müssen die Bodenarten daher getrennt untersucht werden. Hieraus resultieren, insbesondere bei Torf, zum Teil sehr geringe Stichprobenzahlen.

Aufgrund der Entstehungsgeschichte der Degebo-Datenbank als Sammlung von in mehreren Jahrzehnten für die Gutachtertätigkeit gewonnenen Versuchsergebnissen sind nur verhältnismäßig wenige Datensätze vorhanden, die Kombinationen der Ergebnisse sämtlicher, an organischen Böden durchführbarer Versuche enthalten. Aus diesem Grund wurde z.B. nur für eine verhältnismäßig geringe Anzahl von CU-, UU- und Einaxialversuchen der organische Anteil der Proben bestimmt. Weitere Einflüsse, wie etwa die Auflast durch Auffüllungen oder die Dicke und Abfolge der organischen Schichten, sind oft nicht mehr nachvollziehbar und daher in der Datenbank nicht enthalten.

Wir mußten uns daher bei der Auswertung auf die Untersuchung auf den Wassergehalt, die Feuchtwichte und die Trockenwichte beschränken. Sowohl der Wassergehalt als auch die Wichten können für gleichartige Böden als Anhaltswerte für die Zusammendrückung angesehen werden, der die Probe unterworfen worden ist.

Bereits die Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Kenngrößen zeigen, daß die für Torf sehr geringen Stichprobenzahlen zu überwiegend regellosen Verteilungen geführt haben (s. Bilder 9 bis 14). Gleichzeitig wies die Auftragung der Abhängigkeiten der Kenngrößen (z.B. $q_u - w$) sehr große Streuungen auf. Auf eine weitere statistische Auswertung mußte daher verzichtet werden. In der Folge werden nur die Ergebnisse für Faulschlamm und Wiesenkalk dargestellt.

5.2 Drainierte Scherfestigkeit (CU-Versuch)

Im ersten Schritt wurden, wie bei den mineralischen Böden, getrennt nach Bodenarten die Abhängigkeit der untersuchten Kenngrößen w und γ_d zu den Scherparametern ϕ und c sowie als zusammengesetzte Größe die Vergleichsscherfestigkeit τ_{200} in den Bildern 107 bis 110 aufgetragen.

Bei allen aufgetragenen Größen und Abhängigkeiten zeigen sich sehr starke Streuungen. Auch für die Vergleichsscherfestigkeit τ_{200} , die bei den Versuchen an Mergel nur noch geringe Streuungen aufwies, verringern sich hier die Streuungen nicht.

Ebenfalls in den Bildern 107 bis 110 dargestellt sind die Ergebnisse von Regressionsanalysen mit einem potentiellen Ansatz, die für die drei Größen ϕ , c und τ_{200} vorgenommen wurde. Wegen der sehr kleinen Korrelationskoeffizienten wurde auf eine Ermittlung der Vertrauensbereiche verzichtet.

Für Faulschlamm und Wiesenkalk ergeben sich sehr ähnliche Tendenzen für die Mittelwertkurven:

In Abhängigkeit vom Wassergehalt fällt der Reibungswinkel von ca. $\phi = 25^\circ$ bei $w = 50\%$ auf ca. $\phi = 17^\circ$ für $w = 200\%$ bis $w = 250\%$. Die Kohäsion liegt zwischen ca. $c = 12 \text{ kN/m}^2$ und $c = 20 \text{ kN/m}^2$ und nimmt mit steigendem Wassergehalt leicht ab (s. Bilder 107 und 108). Für die Vergleichsscherfestigkeit τ_{200} zeigt sich für beide Bodenarten ein Abfall von $\tau_{200} = 120 \text{ kN/m}^2$ bei $w = 50\%$ auf $\tau_{200} = 80 \text{ kN/m}^2$ bei $w = 200\%$ bis $w = 250\%$. Die Korrelationskoeffizienten betragen beim Reibungswinkel und τ_{200} nur ca. $R = 0,4$, bei der Kohäsion sogar nur ca. $R = 0,09$.

Für die Abhängigkeit der Scherfestigkeit von der Trockenwichte zeigt sich bei beiden Bodenarten eine ähnliche Zunahme sowohl von ϕ als auch von c (s. Bilder 109 und 110).

Der Reibungswinkel wächst von $\phi = 20^\circ$ bei $\gamma_d = 5 \text{ kN/m}^3$ auf ca. $\phi = 25^\circ$ bei $\gamma_d = 10 \text{ kN/m}^3$. Der Mittelwert der Kohäsion liegt bei Faulschlamm zwischen $c = 12 \text{ kN/m}^2$ und $c = 17 \text{ kN/m}^2$, bei Wiesenkalk zwischen $c = 19 \text{ kN/m}^2$ und $c = 21 \text{ kN/m}^2$. Die abgeleitete Vergleichsscherfestigkeit τ_{200} zeigt einen Anstieg von $\tau_{200} = 90 \text{ kN/m}^2$ bei $\gamma_d = 5 \text{ kN/m}^3$ auf $\tau_{200} = 110 \text{ kN/m}^2$ (Faulschlamm) bis $\tau_{200} = 120 \text{ kN/m}^2$ (Wiesenkalk).

Versuche, analog der Vorgehensweise bei Mergel die Hauptspannungsverhältnisse in den verschiedenen Laststufen auszuwerten, ergaben ebenfalls sehr große Streuungen und bei einer Berechnung der Mittelwertkurven sehr geringe Korrelationen. Die Auswertung wurde daher abgebrochen.

5.3 Undrainierte Scherfestigkeit (UU-Versuch)

Grundlage für die folgenden Untersuchungen bilden, wie bereits in Abschnitt 4.2, die Ergebnisse der Einzelversuche. Bereits die Darstellung der Häufigkeitsverteilungen zeigt eine große Streubreite der Versuchswerte für die undrainierte Kohäsion c_u . Auch bei der Auftragung der Abhängigkeiten zu w und γ_d sind große Streuungen zu beobachten (s. Bilder 111 bis 114). Wie bei den Ergebnissen der CU-Versuche nimmt c_u mit wachsendem w ab, mit wachsendem γ_d zu.

Bei $w = 50 \%$ beträgt der Mittelwert von $c_u = 30 \text{ kN/m}^2$ für Faulschlamm, $c_u = 60 \text{ kN/m}^2$ für Wiesenkalk (s. Bilder 111 und 112). Bis $w = 250 \%$ sinkt die Kohäsion für beide Bodenarten auf ca. $c_u = 12 \text{ kN/m}^2$ ab. Die Korrelation liegt für Faulschlamm bei ca. $R = 0,58$, für Wiesenkalk bei nur $R = 0,25$.

Betrachtet man den Einfluß der Trockenwichte (s. Bilder 113 und 114), steigt für beide Bodenarten c_u mit wachsendem γ_d an. Bei $\gamma_d = 3 \text{ kN/m}^3$ beträgt $c_u = 10 \text{ kN/m}^2$ und wächst auf $c_u = 30 \text{ kN/m}^2$ bis $c_u = 40 \text{ kN/m}^2$ bei ca. $\gamma_d = 10 \text{ kN/m}^3$ an. Die Korrelationskoeffizienten betragen $R = 0,56$ (Faulschlamm) und $R = 0,26$ für Wiesenkalk.

Die beschriebenen Abhängigkeiten zeigen zwar bodenmechanisch sinnvolle Tendenzen (z.B. Zunahme mit zunehmendem w), sind aber aufgrund der sehr geringen Korrelationen nicht als Grundlage für eine weitere Bearbeitung geeignet.

5.4 Einaxiale Druckfestigkeit

Wie im vorhergehenden Abschnitt wurden die Ergebnisse der Einzelversuche untersucht. In den Bildern 115 bis 118 wurden die Abhängigkeiten von q_u zu w und γ_d aufgetragen. In allen Fällen zeigen sich sehr große Streuungen und nur sehr schwache, zum Teil widersprüchliche Abhängigkeiten, wie z.B. eine Zunahme von q_u mit wachsendem w . Die in den Regressionsanalysen ermittelten Korrelationen lagen zwischen $R = 0,02$ und $0,23$. Die Ergebnisse haben damit keinerlei Aussagekraft, die Bearbeitung wurde daher nicht weiter verfolgt.

6 Forschungsergebnisse

6.1 Rechenansatz für die praktische Anwendung

Ziel des Forschungsvorhabens ist, dem Planer eine Methode an die Hand zu geben, mittels einfach zu ermittelnder Bodenkenngrößen eine statistisch gesicherte Voraussage der zu erwartenden charakteristischen Werte der Scherparameter zu ermöglichen. Die in den Abschnitten 4.1.3 und 4.3.2 dargestellten Ergebnisse zeigen, daß für feinkörnige und gemischtkörnige Böden eine Ermittlung der Scherfestigkeitsparameter ϕ , c sowie der einaxialen Druckfestigkeit q_u mit Hilfe der Porenzahl e bzw. des Wassergehalts w in Abhängigkeit vom Feinkorngehalt $a(0,06)$ möglich ist. Leider stellte sich auch heraus, daß für die undrainierte Kohäsion von gemischt- und feinkörnigen Böden sowie für alle Parameter (ϕ , c , c_u und q_u) von organischen Böden aufgrund der vorliegenden Daten keine sinnvollen Ergebnisse zu erzielen waren. Im folgenden werden Rechenansätze vorgestellt, die aufgrund der in den Abschnitten 4.1.3 und 4.3.2 erzielten Ergebnisse entwickelt wurden.

6.1.1 Scherparameter ϕ und c (CU-Versuch)

Die in Bild 80 dargestellten unteren Grenzen der Vertrauensbereiche für ϕ und c bei einer Unterschreitungswahrscheinlichkeit von 5 % können nach EC7-1 als die Funktionen $\phi_k(e, a(0,06))$ und $c_k(e, a(0,06))$ angesehen werden. Sie sind jedoch für die unmittelbare praktische Anwendung für beliebige Feinkornanteile nicht geeignet, da die ermittelten Kurven, bezogen auf $a(0,06)$, Mittelwerte der Bodengruppen darstellen. Hier sind Rechenansätze in Form von einfachen Funktionen zu entwickeln, die die kontinuierliche Variation sowohl von e als auch von $a(0,06)$ ermöglichen.

6.1.1.1 Reibungswinkel

Der Reibungswinkel zeigt eine stetige Abhängigkeit sowohl vom Porenanteil als auch vom Feinkorngehalt. Die Abhängigkeit von e ist nahezu linear, wobei die Neigung der Geraden mit steigendem Feinkorngehalt zunimmt. Es liegt daher nahe, als Rechenansatz lineare Funktionen zu verwenden, deren Neigung vom Feinkorngehalt abhängt.

Nach Bild 80 liegt für $e = 0,25$ der charakteristische Wert des Reibungswinkels ϕ (ϕ_k) für die sandigen Böden der Gruppen 1, 2, 3 und 5 ($a(0,06) < 40\%$) zwischen $\phi_k = 37,5^\circ$ und

$\phi_k = 36,3^\circ$ sowie bei $\phi_k = 35,8^\circ$ für die Gruppe 4 ($a(0,06) > 40\%$). Ein gemeinsamer Anfangswert für alle gemischtkörnigen Böden (Gruppen 1,2,3 und 5) bietet sich an. Dieser wurde mit $\phi_k(e = 0,25) = 36^\circ$ gewählt. Da die Kurve für die Böden der Gruppe 4 über den gesamten Bereich unterhalb der übrigen Gruppen verläuft, wurde hier $\phi_k(e = 0,25) = 35^\circ$ gewählt. Bei $e = 0,5$ zeigt sich bei den gemischtkörnigen Böden eine stetige Abnahme des Reibungswinkels mit zunehmendem Feinkorngehalt. Für diese Abhängigkeit wurde durch Vergleichsrechnungen folgende Beziehung aufgestellt:

$$\phi_k(e=0,5) = - 306 * a(0,06)^2 + 123 * a(0,06) + 12,5 \quad [\text{Gl. 6.1}]$$

Hierbei ist $a(0,06)$ als dimensionslose Größe mit $0,15 \leq a(0,06) \leq 0,4$ einzusetzen. Die Grenzen des Reibungswinkels $\phi(e=0,5)$ liegen damit zwischen $\phi = 27^\circ$ für $a(0,06) = 15\%$ und $\phi = 16^\circ$ für $a(0,06) = 40\%$. Da für feinkörnige Böden der Gruppe 4 wegen der verhältnismäßig kleinen Stichprobenzahl keine weitere Unterteilung vorgenommen wurde, ist eine Aussage über die Abhängigkeit von ϕ_k vom Feinkorngehalt nicht sinnvoll. Wir schlagen deshalb vor, für die untersuchten feinkörnigen Böden der Gruppe 4 ($40\% \leq a(0,06) \leq 60\%$) konstant $\phi_k(e=0,5) = 16^\circ$ anzusetzen.

Zur Überprüfung des Ansatzes wurden die Funktionen $\phi_k(e, a(0,06))$ für die mittleren Feinkorngehalte der jeweiligen Bodengruppen berechnet und in die Bilder 81 bis 85 eingetragen. Folgende repräsentative Feinkorngehalte wurden in Gl. 6.1 eingesetzt:

Gruppe 1 - $a(0,06) = 21\%$ (Bereich $15\% \leq a(0,06) < 26\%$)

Gruppe 2 - $a(0,06) = 29\%$ (Bereich $26\% < a(0,06) \leq 33\%$)

Gruppe 5 - $a(0,06) = 34\%$ (Bereich $26\% < a(0,06) \leq 40\%$)

Gruppe 3 - $a(0,06) = 37\%$ (Bereich $33\% < a(0,06) \leq 40\%$)

Die berechneten Geraden liegen überwiegend unterhalb bzw. auf der Kurve der unteren Grenze des Vertrauensbereichs. Bei den stark sandigen Böden der Gruppe 1 verläuft die Rechenwertkurve für $e = 0,35$ oberhalb der Grenzwertkurve, ebenso bei der Gruppe 2 für Porenzahlen $e = 0,4$ (s. Bilder 81 und 82). In beiden Fällen sind in diesen Bereichen fast keine Versuchswerte vorhanden, wodurch sich der Abstand zwischen Mittelwertkurve und der unteren Grenze des Vertrauensbereiches stark vergrößert. Bei den übrigen

Bodengruppen (Gruppe 3,4 und 5) liegen die Rechenwerte durchgängig unterhalb der Grenzwertkurve (s. Bilder 83 bis 85).

Wie bereits eingangs beschrieben, liegen ca. 95 % der festgestellten Porenzahlen zwischen $e = 0,25$ und $e = 0,45$ (s. Bild 3). Größere Werte von e sind demnach nicht relevant für die Praxis, d.h. die extrem kleinen Werte für $\phi_k(e = 0,5)$ stellen nur ein Hilfsmittel für die Berechnung des Reibungswinkels dar. Das Maximum der Häufigkeitsverteilung von e liegt bei $e = 0,34$. In der folgenden Tabelle sind die mit dem vorgestellten Rechenansatz für $e = 0,35$ und $e = 0,45$ und den o.g. mittleren Feinkorngehalten errechneten Werte dargestellt (s. auch Bilder 81 bis 85):

Gruppe	$a(0,06)$	$\phi_k(e=0,35)$	$\phi_k(e=0,45)$
1	21	31,5 °	27 °
2	29	30,5 °	25 °
3	37	28 °	21 °
4	-	27,4 °	20 °
5	34	29 °	22,5 °

6.1.1.2 Kohäsion

Die für die einzelnen Bodengruppen ermittelten Abhängigkeiten von c_k (entsprechend der unteren Grenze des Vertrauensbereichs) sind wegen der großen Empfindlichkeit sowie der starken Streuungen dieser Kenngröße nicht eindeutig. Der untere Grenzwert des Vertrauensbereichs für c nimmt für die nach Definition der DIN 18136 gemischtkörnigen Böden ($a(0,06) \leq 40\%$) mit wachsendem Porenanteil stetig ab, alle Werte liegen in einem Band mit einer Breite von ca. 21 kN/m² für $e = 0,25$ bzw. ca. 12 kN/m² für $e = 0,5$ (s. Bild 80). Bei den feinkörnigen Böden ($a(0,06) = 40\%$) ergibt sich, bedingt durch die Streuungen für $e < 0,3$ bzw. $e > 0,45$, ein leichtes Maximum bei $e = 0,35$.

Wegen der unterschiedlichen Verläufe der Kurven wurden, als auf der sicheren Seite liegend, folgende einfache Ansätze gewählt:

Gemischtkörnige Böden (Gruppen 1, 2, 3 und 5):

$$c_k(e=0,25) = 50 \text{ kN/m}^2$$

$$c_k(e=0,50) = 11 \text{ kN/m}^2$$

feinkörnige Böden (Gruppe 4):

$$c_k(e=0,25) = 45 \text{ kN/m}^2$$

$$c_k(e=0,50) = 40 \text{ kN/m}^2$$

Die sich ergebenden Geraden wurden zur Information ebenfalls in die Zusammenstellungen der Mittel- und Grenzwerte von c (Bilder 81 bis 85) eingetragen.

Für das Maximum der Häufigkeitsverteilung von e (s. Bild 3) bzw. die Obergrenze des praxisrelevanten Bereiches ergeben sich mit dem Rechenansatz folgende charakteristische Werte für die Kohäsion:

Gruppen 1 bis 3, 5)

$$\text{für } e = 0,35 \quad c_k = 34 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{für } e = 0,45 \quad c_k = 19 \text{ kN/m}^2$$

Gruppe 4

$$\text{für } e = 0,35 \quad c_k = 43,8 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{für } e = 0,45 \quad c_k = 41,3 \text{ kN/m}^2$$

6.1.1.3 Vergleichsscherfestigkeit

Zur Überprüfung wurde mit Hilfe der beiden Ansätze die Vergleichsscherfestigkeit τ_{200} berechnet und ebenfalls in die Darstellung der Mittel- und Grenzwerte (Bilder 81 bis 85) aufgenommen. Für alle Gruppen liegt die sich ergebende Gerade unterhalb der Grenzwertkurve.

6.1.2 Einaxiale Druckfestigkeit q_u

Die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse ergab für die Abhängigkeit zwischen q_u und w keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen 1 bis 3 und 5 ($15 \% \leq a(0,06) \leq 40\%$).

Versuchswerte für diese Böden sind im gesamten Bereich zwischen $w = 6 \%$ und $w = 18 \%$ vorhanden. (s. Bilder 92 bis 94 sowie 96)

Für die feinkörnigen Böden der Gruppe 4 sind Versuchswerte überwiegend zwischen $w = 10\%$ und $w = 16\%$ vorhanden (s. Bild 96). Für $w < 10\%$ weichen daher die Kurven der unteren Vertrauensgrenzen stark von den Mittelwertkurven ab. Eine statistisch gesicherte Abhängigkeit zwischen dem charakteristischen Wert von q_u und w kann demnach für diese Böden nur für $w = 10\%$ angegeben werden.

Für die Abschätzung der charakteristischen Werte der einaxialen Druckfestigkeit von fein- und gemischtkörnigen Böden schlagen wir daher folgende Funktionen vor, die in den o.g. Bereichen von w den Verlauf der Kurven der unteren 5 %-Fraktile (s. Bild 101) am besten wiedergeben:

gemischtkörnige Böden

$$q_u(w) = 421610 * w^{-3,6715} \text{ für } 6\% < w < 18\% \quad [\text{Gl. 6.2}]$$

feinkörnige Böden

$$q_u(w) = 1079 * \exp(-0,1638 * w) \text{ für } 10\% < w < 18\% \quad [\text{Gl. 6.3}]$$

Die Funktionen sind zusammen mit den Kurven der 5 %-Fraktile für die einzelnen Bodengruppen in Bild 99 aufgetragen.

6.2 Vergleich mit vorhandenen Erfahrungswerten

Mit den gewählten Rechenansätzen für $\phi_{(e;a(0,06))}$ und $c_{(e;a(0,06))}$ ist es möglich, bei bekanntem Porenanteil und Feinkorngehalt die charakteristischen Werte für den Reibungswinkel und die Kohäsion von gemischt- und feinkörnigen Böden mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 5\%$ abzuschätzen. Für die Verwendung als Rechenwerte sind die Scherparameter mit Teilsicherheitsbeiwerten zu reduzieren, z.B. nach EAU mit

$$\text{cal } \tan(\phi) = \tan \phi_k / 1,1 \quad \text{und} \quad \text{cal } c = c_k / 1,3 \quad [\text{Gl. 6.4}]$$

Vergleicht man die so ermittelten Rechenwerte mit den Angaben von Erfahrungswerten der EAU (Tabelle E 9-1) zeigt sich, vor allem für ϕ , eine gute Übereinstimmung. In der Ausgabe von 1990 wird für festen Geschiebemergel ein Rechenwert von $\text{cal } \phi = 30^\circ$

angegeben, für weichen bis halbfesten Lehm $\text{cal } \phi = 27,5^\circ$. Für Ton wird der Reibungswinkel zwischen $17,5^\circ$ und 25° angegeben. Diese oder größere Werte ergeben sich mit dem o.g. Rechenansatz und den Teilsicherheitsbeiwerten für folgende Porenanteile:

Gruppe 1	$e \approx 0,32$ bis $0,38$ ($a(0,06) = 21\%$)
Gruppe 2	$e \approx 0,3$ bis $0,35$ ($a(0,06) = 29\%$)
Gruppe 3	$e \approx 0,28$ bis $0,33$ ($a(0,06) = 37\%$)
Gruppe 5	$e \approx 0,3$ bis $0,34$ ($a(0,06) = 33\%$)
Gruppe 4	$e \approx 0,35$ bis $0,45$ ($a(0,06) > 40\%$)

In diesen Bereichen liegen auch die Maxima der Häufigkeitsverteilungen von e für die untersuchten Bodenarten (s. Bild 2)

Eine weitere Angabe für Rechenwerte der Scherparameter ist der Tabelle 2 der DIN 1055, Teil 2, zu entnehmen. Demnach kann für leichtplastische Tone (TL) unabhängig von der Konsistenz $\text{cal } \phi = 27,5^\circ$ angesetzt werden. Mit dem vorliegenden Ansatz und dem o.g. Teilsicherheitsbeiwert ergibt sich ein solcher Rechenwert für $e < 0,33$.

In der Ausgabe 1996 der EAU werden charakteristische Werte für den Reibungswinkel angegeben, nämlich $\phi' = 30^\circ$ bis $\phi' = 35^\circ$ für "geringplastische Tone, z.B. Geschiebelehm und -mergel" sowie $\phi' = 25^\circ$ bis $\phi' = 30^\circ$ für mittelplastische Tone, zu denen hier auch Geschiebemergel gezählt wird. Diese Werte entsprechen den mit dem Rechenansatz für Porenzahlen zwischen $e = 0,25$ und $e = 0,33$ (Geringplastische Tone) sowie $e = 0,33$ bis $e = 0,38$ (mittelplastische Tone) berechneten Reibungswinkeln. Da sehr geringe Porenanteile ($e < 0,3$) nicht sehr häufig sind, entsprechen diese Angaben für geringplastische Tone den in der vorliegenden Untersuchung festgestellten Obergrenzen.

Für die Kohäsion $\text{cal } c$ werden in der Tabelle der Ausgabe 1990 der EAU Rechenwerte zwischen $\text{cal } c = 0$ (weicher Ton) und $\text{cal } c = 25 \text{ kN/m}^2$ (fester Geschiebelehm bzw. -mergel) angegeben. Aus den Rechenansätzen ergeben sich Rechenwerte zwischen ca. $\text{cal } c = 8 \text{ kN/m}^2$ für $e = 0,5$ und $\text{cal } c = 40 \text{ kN/m}^2$ für $e = 0,25$ für die gemischtkörnigen Böden.

Die Tabelle 2 der DIN 1055 gibt für leichtplastische Tone, abhängig von der Konsistenz, Rechenwerte zwischen $c = 0$ (weicher) und $c = 5 \text{ kN/m}^2$ (halbfest) an. Nach der vorliegenden Untersuchung ergeben sich für feinkörnige Böden abhängig von e Rechenwerte zwischen ca. $c = 30 \text{ kN/m}^2$ und $c = 35 \text{ kN/m}^2$.

Die Tabelle 9-1 der Ausgabe der EAU von 1996 gibt für die charakteristischen Werte der Kohäsion Größen von 0 bis 20 kN/m^2 an. Hieraus ergeben sich Rechenwerte, die noch geringer als die in der Ausgabe von 1990 angegebenen sind.

Weiß (1978) gibt Beziehungen für die Ermittlung der Scherparameter mit Hilfe der Porenzahl und des Wassergehalts an (Gl. 2.3 und 2.4). Setzt man Sättigungsgrade von $S_r = 0,8$ bis $S_r = 1,0$ voraus, ergeben sich für den Reibungswinkel gute Übereinstimmungen mit dem vorliegenden Ansatz für Böden mit $20 \% \leq a(0,06) \leq 30 \%$ und $e \leq 0,45$. Die Kohäsion ist beim Ansatz nach Weiß wesentlich größer und sinkt mit wachsendem e und w stark ab. Bei $S_r = 80 \%$ ist c bei beiden Modellen für $e = 0,45$ etwa gleich groß.

Rechenwerte oder charakteristische Werte für die einaxiale Druckfestigkeit feinkörniger und gemischtkörniger Böden sind in den o.g. Regelwerken nicht vorhanden, dafür aber Werte für die undrainierte Kohäsion. Eine Berechnung von c_u aus q_u ist mittels

$$c_u = q_u/2 \quad [\text{Gl. 6.5}]$$

möglich und auch in einigen Normen, wie z.B. in DIN 4014 zur Vorbemessung gestattet. Für gemischtkörnige Böden ergeben sich für dem Ansatz nach Gl. 6.2 mit Gl. 6.5 für c_{uk} zwischen 100 kN/m^2 ($w = 8 \%$) und 5 kN/m^2 ($w = 18 \%$). Für feinkörnige Böden liegt c_{uk} zwischen 104 kN/m^2 ($w = 10 \%$) und 28 kN/m^2 ($w = 18 \%$). Die in der Tabelle 9-1 der EAU 1996 angegebenen charakteristischen Werte liegen zwischen 5 kN/m^2 bis 20 kN/m^2 (geringplastische Tone, weich) bis 50 kN/m^2 (geringplastische Tone, halbfest). Für mittelplastischen Ton liegt c_{uk} zwischen 10 kN/m^2 bis 40 kN/m^2 (weich) und 150 kN/m^2 (halbfest). Für die Ansätze für gemischtkörnige und feinkörnige Bodenarten besteht demnach eine gute Übereinstimmung mit den Werten der EAU.

6.3 Grenzen und Einschränkungen für die praktische Anwendung

Insgesamt werden durch die vorliegende Untersuchung die Angaben der EAU präzisiert. Statt des für gemischtkörnige Böden wenig aussagefähigen Kriteriums der Konsistenz hat

sich der Einfluß des Porenanteils auf die Scherparameter als maßgebend herausgestellt. Der Einfluß des Feinkorngehalts zeigt sich beim Reibungswinkel. Bei der Kohäsion sind die Streuungen generell so groß, daß vorsichtshalber die für alle Bodengruppen ermittelte Untergrenze für den gesamten Bereich der gemischtkörnigen Böden angesetzt wurde.

Die ermittelte Funktion ergibt dennoch deutlich größere charakteristische bzw. Rechenwerte für die Kohäsion als in den Tabellen der EAU oder der DIN 1055 angegeben. Im Gegensatz dazu stimmen die Tabellenwerte für den Reibungswinkel mit denen des Rechenansatzes bis ca. $e < 0,4$, bezogen auf die Werte der DIN 1055 für leichtplastische Tone sogar nur bis ca. $e < 0,33$ gut überein. Es ist zu vermuten, daß in den o.g. Regelwerken aufgrund der erfahrungsgemäß großen Schwankungen der Versuchswerte der Kohäsion zusätzliche Sicherheitsbetrachtungen zu der starken Reduzierung dieser Werte geführt haben.

Zieht man die Kombination beider Größen, die Vergleichsscherfestigkeit τ_{200} zum Vergleich des vorliegenden Ansatzes mit den Tabellenwerten heran, weist der Rechenansatz für alle untersuchten Bodenarten im Bereich $e < 0,45$ größere Werte auf, d.h. der geringere Reibungswinkel wird durch die größere Kohäsion kompensiert.

Die in den Bildern 74 bis 86 verwendeten Grenzen für die Porenzahl ($0,25 \leq e \leq 0,5$) entsprechen nicht dem in der Praxis normalerweise vorkommenden Wertebereich. Sie wurden einerseits gewählt, um auch Versuche mit extremen Porenzahlen darstellen zu können, andererseits wurde durch die Verwendung dieser Bereiche die Entwicklung der Rechenansätze vereinfacht. In den Bereichen für $e > 0,4$ (Gruppe 1), $e > 0,45$ für die sandigen (Gruppen 2, 3 und 5) sowie $e < 0,3$ und $e > 0,45$ für die tonigen Böden (Gruppe 4) sind nur sehr wenige Versuchswerte vorhanden. Der Verlauf der ermittelten Kurven in diesem Bereich ist demnach statistisch nicht gesichert. Für die praktische Anwendung sollten die Rechenansätze daher nur für folgende Bereiche verwendet werden:

$$15 \% < a(0,06) \leq 26 \% \quad 0,25 \leq e < 0,4$$

$$26 \% < a(0,06) \leq 40 \% \quad 0,25 \leq e < 0,45$$

$$40 \% < a(0,06) \leq 60 \% \quad 0,3 \leq e < 0,45$$

Da die Untersuchung auf Geschiebelehm und -mergel aus dem Berliner Raum beschränkt wurde, können die vorstehenden Ansätze auch nur für Böden gleicher Zusammensetzung und geologischer Herkunft verwendet werden.

7 Zusammenfassung

Ziel des Forschungsvorhabens war, mittels statistischer Methoden aus einer vorliegenden Datensammlung Kriterien zu finden, die es gestatten, mit Hilfe der Ergebnisse einfach durchzuführender bodenmechanischer Versuche die charakteristischen Werte der Scherparameter von gemischtkörnigen und organischen Böden überschläglich zu ermitteln. Das Ziel wurde nur zum Teil erreicht. Für die Scherparameter im konsolidierten Zustand ϕ und c und die einaxiale Druckfestigkeit q_u war dies möglich, für die undrained Kohäsion c_u liegen dagegen nicht genügend Daten vor. Ebenso erwies sich die Anzahl der in Jahrzehnten in der Degebo gesammelten Daten von Proben aus organischen Böden für die statistische Untersuchung als nicht ausreichend.

Für die Größe des Reibungswinkels und der Kohäsion von gemischtkörnigen Böden wurde eine Abhängigkeit von der Porenzahl sowie vom Feinkorngehalt festgestellt. Auch bei den zusätzlich untersuchten feinkörnigen Böden mit maximal 60 % Feinkorngehalt, die eine ähnliche Entstehungsgeschichte wie die gemischtkörnigen aufweisen, konnte diese Abhängigkeit ansatzweise festgestellt werden. Die Abhängigkeit vom Wassergehalt erwies sich als vergleichsweise gering und wurde daher nicht weiter verfolgt.

Da ϕ und c für eine brauchbare statistische Auswertung zu große Streuungen aufwiesen, wurden die bei den Einzelversuchen ermittelten Bruchspannungsverhältnisse σ_1/σ_3 , die deutlich geringere Streuungen aufweisen, untersucht. Auf dieser Grundlage konnte ein einfacher Rechenansatz für die Abschätzung der charakteristischen Werte der o.g. Kenngrößen für die praktische Anwendung entwickelt werden.

Im Vergleich zu den wenigen, bisher in Regel- oder Standardwerken (z.B. EAU) angegebenen, zum Teil sehr groben Orientierungswerten wurde auf einen Bezug zu der für gemischtkörnige Böden wenig aussagekräftigen Konsistenz verzichtet. Durch die Einbeziehung der Entstehungsgeschichte und der Vorbelastung der Böden in Form der Porenzahl kann eine wesentlich differenziertere Aussage über die Größe der zu erwartenden Scherparameter getroffen werden. Die mit dem neu entwickelten Rechenansatz

berechneten Scherparameter weisen für die am häufigsten angetroffenen Porenzahlen ($e = 0,3$ bis $e = 0,45$) eine gute Übereinstimmung mit den bisher veröffentlichten Anhaltswerten, insbesondere für den Reibungswinkel auf. Für die Kohäsion ergeben sich aus der vorliegenden Untersuchung grundsätzlich deutlich höhere Werte, was vermutlich darauf zurückzuführen ist, daß in Regelwerken bei der Angabe dieser Kenngröße sicherheitstheoretische Überlegungen aus der Praxis, wie z.B. die Auswirkung von Sandeinlagerungen im gemischtkörnigen Boden, eingeflossen sind.

Neben dem genannten Rechenansatz zur Abschätzung der Scherparameter können auch die Ergebnisse der Untersuchung der Abhängigkeit zwischen dem Bruchspannungsverhältnis und der Porenzahl unmittelbar zur Überprüfung der Ergebnisse von Dreiaxialversuchen herangezogen werden, da im Zuge der Bearbeitung hier ebenfalls charakteristische Werte in Form der unteren 5 %-Fraktile ermittelt wurden.

Für die einaxiale Druckfestigkeit von gemischt- und feinkörnigen Böden konnte eine einfache Beziehung zwischen der Druckfestigkeit und dem Wassergehalt des Bodens aufgestellt werden.

Der Versuch, eine ähnliche Beziehung für die undrainierte Kohäsion zu finden, schlug fehl, da sich die vorhandenen Stichprobenzahlen zu klein für eine statistisch gesicherte Auswertung erwiesen. Zum Teil zeigten sich für die Abhängigkeit vom Feinkorngehalt widersprüchliche Tendenzen, generell waren die Streuungen so groß, daß sich bei den durchgeführten Regressionsanalysen nur sehr kleine Korrelationskoeffizienten ergaben.

Für die in der Datenbank ebenfalls erfaßten Ergebnisse von Versuchen an Proben organischer Böden aus dem Berliner Raum (Torf, Faulschlamm und Wiesenalk) wurde ebenfalls versucht, Beziehungen zwischen der Scher- bzw. Druckfestigkeit und den Ergebnissen einfacher Versuche zu finden. Kombinationen aller relevanten Versuchsergebnisse lagen nicht für alle Datensätze vor. Wir mußten uns daher darauf beschränken, die Beziehung der Scherparameter zum Wassergehalt und der Wichte zu untersuchen. Es konnten zwar Tendenzen für Abhängigkeiten gefunden werden, für statistisch gesicherte Aussagen erwiesen sich jedoch die festgestellten Korrelationen als zu klein.

Wie die Literaturlauswertung zeigte, haben zu geringe Datenbestände bei vielen statistischen Untersuchungen zu Problemen geführt. Bei der vorliegenden Arbeit zeigte sich, daß die in Form von 5 %-Fraktile ermittelten charakteristischen Werte für die Kohäsion beim CU-

Versuch, bedingt durch bereichsweise zu geringe Stichprobenzahlen, weit von der Mittelwertkurve entfernt sind (s. Bilder 79 und 80). Für feinkörnige Böden sind die Abweichungen sogar so groß, daß sich hier eine andere Kurvenform mit einem Maximum bei ca. $e = 0,35$ ergibt. Die bei den Mittelwertkurven ohnehin nur schwach sichtbaren Abhängigkeiten der Kohäsion vom Feinkorngehalt verschwinden bei den Kurven der 5 %-Fraktilen fast völlig. Für den Rechenansatz wurde daher als auf der sicheren Seite liegender Ansatz für gemischtkörnige Böden die Untergrenze aller Kurven gewählt. Die in den Regelwerken angegebenen charakteristischen Werte als auch die Rechenwerte sind dennoch deutlich kleiner als die aus dem neuen Ansatz errechneten. Die starke, auch durch die Empfindlichkeit der Kohäsion bei der Auswertung bedingte Streuung der Versuchswerte führt also sowohl in den Regelwerken als auch in der vorliegenden Arbeit zu sehr vorsichtigen Angaben.

Die statistischen Analysen ergaben konsistente Abhängigkeiten des Hauptspannungsverhältnisses und damit auch der Scherparameter ϕ und c von der Porenzahl. Die Abhängigkeit von σ_1/σ_3 vom Wassergehalt wurde ebenfalls untersucht, sie wies jedoch wesentlich größere Streuungen sowie geringere Korrelationen auf. Ein Versuch, analog der Vorgehensweise bei der Abhängigkeit von der Porenzahl die Scherparameter aus $\sigma_1/\sigma_3 = f(w)$ zu ermitteln, erbrachte widersprüchliche Ergebnisse. Die Scherparameter wurden daher bei der weiteren Untersuchung für alle Bodengruppen als unabhängig von w angesehen. Es ist jedoch möglich, daß bei einer Untersuchung von feinkörnigen Böden ($40 \% \leq a(0,06) \leq 60 \%$) bei wesentlich größerer Stichprobenzahl und der dadurch möglichen feineren Unterteilung von $a(0,06)$ eine Abhängigkeit auch vom Wassergehalt festgestellt werden kann.

Mit Hilfe größerer Stichprobenzahlen wäre auch eine Korrektur der in der vorliegenden Arbeit ermittelten, verhältnismäßig stark streuenden charakteristischen Werte der Kohäsion möglich. Es ist ferner zu erwarten, daß auf dieser Grundlage auch eine statistisch gesicherte Aussage über die Abhängigkeit der undrainierten Scherfestigkeit von anderen Parametern möglich wird.

Die vorgestellten Rechenansätze stellen einen ersten Versuch dar, die Abhängigkeiten der Scherparameter ϕ , c und q_u zu anderen Bodenkenngrößen zu beschreiben und damit Anhaltswerte für die Gültigkeit von anderweitig im Labor ermittelten Scherparametern zu liefern. Unseres Erachtens sind weitere Untersuchungen an möglichst umfangreichen Datensammlungen erforderlich. Die praktische Anwendung sollte unter kritischer Berücksichtigung der eigenen Erfahrungen erfolgen.

Die vorliegende Untersuchung beschränkt sich auf Böden aus dem Berliner Raum, die jedoch für die gesamte norddeutsche Tiefebene charakteristisch sind. Um feststellen zu können, ob die vorliegenden Ergebnisse allgemein auf gemischtkörnige Böden auch aus anderen Regionen und anderer geologischer Entstehungsgeschichte angewandt werden können, sind weitergehende Untersuchungen notwendig.

8 Literatur

V. Rizkallah, A. El Nimr, Applicability of Regression Analysis in Soil Mechanics with the Help of Data Banks, II Int. Conf. on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering, Aachen, 1975

A. El Nimr, V. Rizkallah, Application of Regression Analysis to Study Properties of North German Clays, IX ICSMFE, Tokio, 1977

L. Sachs, angewandte Statistik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1978

J. Hanisch, W. Struck, Charakteristischer Wert einer Boden- oder Materialeigenschaft aus Stichprobenergebnissen und zusätzlicher Information, Bautechnik 10/1985

K.-D. Hauß, Beispiele für die Anwendung statistischer Methoden in der Bodenmechanik, Mitteilungsblatt der BAW, Nr. 41, 1977

S. Hirata, S. Yao, K. Nishida, Multiple Regression Analysis Between the Mechanical and Physical Properties of Cohesive Soils, Soils and Foundations Vol. 30 1990

Meyer, K. Die bodenmechanischen Eigenschaften holozäner -alluvialer- organischer Böden im Berliner Raum, Mitteilungen der DEGEBO, Heft 30, 1974

H.P Nottrodt, Zur Statistik der effektiven Scherparameter, Schriften der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar 1988

B. Schuppener, Erfahrungen mit bodenmechanischen Laborversuchen an Klei, Mitteilungsblatt der BAW, Nr. 60, 1987

B. Schuppener, M. Kiekbusch, Plädoyer für die Abschaffung und den Ersatz der Konsistenzzahl, Geotechnik 4/1988

B. Schuppener, Die Festlegung charakteristischer Bodenkennwerte - Empfehlungen des Eurocodes 7 Teil 1 und die Ergebnisse einer Umfrage, Geotechnik Sonderheft 1999

Weiß, K. Die Hauptbodenarten im Raum Berlin als Baugrund, Baugrundtagung 1978 in Berlin)

Empfehlungen des Arbeitsausschusses für Ufereinfassungen 1990 und 1996, Ernst & Sohn, Berlin

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
a	%	Siebdurchgang (Masseanteil)
d	mm	Korndurchmesser
c	kN/m ²	Kohäsion
c _u	kN/m ²	Kohäsion des undränierten Bodens
e	-	Porenzahl
φ	°	Reibungswinkel
w	%	Wassergehalt
S _r	-	Sättigungsgrad
σ ₁	kN/m ²	vertikale Hauptspannung
σ ₃	kN/m ²	horizontale Hauptspannung (Seitendruck)
q _u	kN/m ²	einaxiale Druckfestigkeit
τ ₂₀₀	kN/m ²	Vergleichsscherfestigkeit
w _L	%	Fließgrenze
w _P	%	Ausrollgrenze
I _P	-	Plastizitätsindex
I _C	-	Konsistenzindex
R	-	Korrelationskoeffizient
I _L	-	Liquiditätszahl
γ	kN/m ³	Feuchtwichte
γ _d	kN/m ³	Trockenwichte
V _{gl}	%	Glühverlust
α	%	Irrtumswahrscheinlichkeit
k	m/s	Durchlässigkeitsbeiwert
s	-	Standardabweichung
k (Index)	-	charakteristischer Wert einer Kenngröße

Anlagen zum Schlußbericht

**Ermittlung charakteristischer Bodenkenngrößen
für gemischtkörnige und organische Böden als
Grundlage für Bauvorschriften**

Berlin, den 15.3.2001

Verzeichnis der Bilder

1	Mergel	Einteilung der Bodengruppen	
2	Mergel	Häufigkeitsverteilung des Feinkorngehalts $a(0,06)$ (2388 Proben)	
3	Mergel	Häufigkeitsverteilung der Porenzahl (4676 Proben)	
4	Mergel	Häufigkeitsverteilung des Wassergehalts (5070 Proben)	
5	Mergel	Häufigkeitsverteilung des Reibungswinkels ϕ (CU-Versuch, 477 Proben)	
6	Mergel	Häufigkeitsverteilung der Kohäsion c (CU-Versuch, 477 Proben)	
7	Mergel	Häufigkeitsverteilung der einaxialen Druckfestigkeit (130 Proben)	
8	Mergel	Häufigkeitsverteilung der undränierten Kohäsion (UU-Versuch, 200 Proben)	
9	Organische Böden	Häufigkeitsverteilung des Glühverlusts	
10	Organische Böden	Häufigkeitsverteilung des Wassergehalts	
11	Organische Böden	Häufigkeitsverteilung der Trockenwichte	
12	Organische Böden	Häufigkeitsverteilung des Reibungswinkels (CU-Versuch)	
13	Organische Böden	Häufigkeitsverteilung der Kohäsion (CU-Versuch)	
14	Organische Böden	Häufigkeitsverteilung der einaxialen Druckfestigkeit	
15	Organische Böden	Häufigkeitsverteilung der undränierten Kohäsion (UU-Versuch)	
16	Mergel	$15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$ (37 Versuche)	$\phi - e$
17	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 33\%$ (90 Versuche)	$\phi - e$
18	Mergel	$33\% < a(0,06) \leq 40\%$ (98 Versuche)	$\phi - e$
19	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 40\%$ (305 Versuche)	$\phi - e$
20	Mergel	$40\% < a(0,06) \leq 60\%$ (135 Versuche)	$\phi - e$
21	Mergel	$15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$ (37 Versuche)	$c - e$
22	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 33\%$ (90 Versuche)	$c - e$
23	Mergel	$33\% < a(0,06) \leq 40\%$ (98 Versuche)	$c - e$
24	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 40\%$ (305 Versuche)	$c - e$
25	Mergel	$40\% < a(0,06) \leq 60\%$ (135 Versuche)	$c - e$
26	Mergel	$15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$ (37 Versuche)	$\phi - w$
27	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 33\%$ (90 Versuche)	$\phi - w$
28	Mergel	$33\% < a(0,06) \leq 40\%$ (98 Versuche)	$\phi - w$
29	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 40\%$ (305 Versuche)	$\phi - w$
30	Mergel	$40\% < a(0,06) \leq 60\%$ (135 Versuche)	$\phi - w$

31	Mergel	$15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$ (37 Versuche)	c - w
32	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 33\%$ (90 Versuche)	c - w
33	Mergel	$33\% < a(0,06) \leq 40\%$ (98 Versuche)	c - w
34	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 40\%$ (305 Versuche)	c - w
35	Mergel	$40\% < a(0,06) \leq 60\%$ (135 Versuche)	c - w
36	Mergel	$15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$ (37 Versuche)	ϕ - S _r
37	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 33\%$ (90 Versuche)	ϕ - S _r
38	Mergel	$33\% < a(0,06) \leq 40\%$ (98 Versuche)	ϕ - S _r
39	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 40\%$ (305 Versuche)	ϕ - S _r
40	Mergel	$40\% < a(0,06) \leq 60\%$ (135 Versuche)	ϕ - S _r
41	Mergel	$15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$ (37 Versuche)	c - S _r
42	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 33\%$ (90 Versuche)	c - S _r
43	Mergel	$33\% < a(0,06) \leq 40\%$ (98 Versuche)	c - S _r
44	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 40\%$ (305 Versuche)	c - S _r
45	Mergel	$40\% < a(0,06) \leq 60\%$ (135 Versuche)	c - S _r
46	Mergel	$15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$ (37 Versuche)	τ_{200} - e
47	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 33\%$ (90 Versuche)	τ_{200} - e
48	Mergel	$33\% < a(0,06) \leq 40\%$ (98 Versuche)	τ_{200} - e
49	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 40\%$ (305 Versuche)	τ_{200} - e
50	Mergel	$40\% < a(0,06) \leq 60\%$ (135 Versuche)	τ_{200} - e
51	Mergel	$15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$ (37 Versuche)	τ_{200} - w
52	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 33\%$ (90 Versuche)	τ_{200} - w
53	Mergel	$33\% < a(0,06) \leq 40\%$ (98 Versuche)	τ_{200} - w
54	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 40\%$ (305 Versuche)	τ_{200} - w
55	Mergel	$40\% < a(0,06) \leq 60\%$ (135 Versuche)	τ_{200} - w
56	Mergel	$15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$	$\sigma_3 \leq 120 \text{ kN/m}^2, \sigma_1/\sigma_3 - e$
57	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 33\%$	$\sigma_3 \leq 120 \text{ kN/m}^2, \sigma_1/\sigma_3 - e$
58	Mergel	$33\% < a(0,06) \leq 40\%$	$\sigma_3 \leq 120 \text{ kN/m}^2, \sigma_1/\sigma_3 - e$
59	Mergel	$40\% < a(0,06) \leq 60\%$	$\sigma_3 \leq 120 \text{ kN/m}^2, \sigma_1/\sigma_3 - e$
60	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 40\%$	$\sigma_3 \leq 120 \text{ kN/m}^2, \sigma_1/\sigma_3 - e$
61	Mergel	Zusammenfassung	$\sigma_3 \leq 120 \text{ kN/m}^2, \sigma_1/\sigma_3 - e$
62	Mergel	$15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$	$120 \text{ kN/m}^2 < \sigma_3 \leq 220 \text{ kN/m}^2, \sigma_1/\sigma_3 - e$
63	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 33\%$	$120 \text{ kN/m}^2 < \sigma_3 \leq 220 \text{ kN/m}^2, \sigma_1/\sigma_3 - e$
64	Mergel	$33\% < a(0,06) \leq 40\%$	$120 \text{ kN/m}^2 < \sigma_3 \leq 220 \text{ kN/m}^2, \sigma_1/\sigma_3 - e$
65	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 40\%$	$120 \text{ kN/m}^2 < \sigma_3 \leq 220 \text{ kN/m}^2, \sigma_1/\sigma_3 - e$
66	Mergel	$40\% < a(0,06) \leq 60\%$	$120 \text{ kN/m}^2 < \sigma_3 \leq 220 \text{ kN/m}^2, \sigma_1/\sigma_3 - e$

67	Mergel	Zusammenfassung	$120 \text{ kN/m}^2 < \sigma_3 \leq 220 \text{ kN/m}^2, \sigma_1/\sigma_3 - e$
68	Mergel	$15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$	$\sigma_3 > 220 \text{ kN/m}^2, \sigma_1/\sigma_3 - e$
69	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 33\%$	$\sigma_3 > 220 \text{ kN/m}^2, \sigma_1/\sigma_3 - e$
70	Mergel	$33\% < a(0,06) \leq 40\%$	$\sigma_3 > 220 \text{ kN/m}^2, \sigma_1/\sigma_3 - e$
71	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 40\%$	$\sigma_3 > 220 \text{ kN/m}^2, \sigma_1/\sigma_3 - e$
72	Mergel	$40\% < a(0,06) \leq 60\%$	$\sigma_3 > 220 \text{ kN/m}^2, \sigma_1/\sigma_3 - e$
73	Mergel	Zusammenfassung	$\sigma_3 > 220 \text{ kN/m}^2, \sigma_1/\sigma_3 - e$
74	Mergel	$15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$	Scherparameter ϕ und c aus statistischer Auswertung von σ_1/σ_3
75	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 33\%$	Scherparameter ϕ und c aus statistischer Auswertung von σ_1/σ_3
76	Mergel	$33\% < a(0,06) \leq 40\%$	Scherparameter ϕ und c aus statistischer Auswertung von σ_1/σ_3
77	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 40\%$	Scherparameter ϕ und c aus statistischer Auswertung von σ_1/σ_3
78	Mergel	$40\% < a(0,06) \leq 60\%$	Scherparameter ϕ und c aus statistischer Auswertung von σ_1/σ_3
79	Mergel	Zusammenfassung der Mittelwerte	Scherparameter ϕ und c aus statistischer Auswertung von σ_1/σ_3
80	Mergel	Zusammenfassung 5% Unterschreitungswahrscheinlichkeit	Scherparameter ϕ und c aus statistischer Auswertung von σ_1/σ_3
81	Mergel	$15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$	Regressionsanalyse der Scherparameter ϕ und c
82	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 33\%$	Regressionsanalyse der Scherparameter ϕ und c
83	Mergel	$33\% < a(0,06) \leq 40\%$	Regressionsanalyse der Scherparameter ϕ und c
84	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 40\%$	Regressionsanalyse der Scherparameter ϕ und c
85	Mergel	$40\% < a(0,06) \leq 60\%$	Regressionsanalyse der Scherparameter ϕ und c
86	Mergel	Mittelwerte im Vergleich	Regressionsanalyse der Scherparameter ϕ und c
87	Mergel	$15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$ (26 Versuche)	$q_u - e$
88	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 33\%$ (32 Versuche)	$q_u - e$
89	Mergel	$33\% < a(0,06) \leq 40\%$ (44 Versuche)	$q_u - e$
90	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 40\%$ (178 Versuche)	$q_u - e$
91	Mergel	$40\% < a(0,06) \leq 60\%$ (90 Versuche)	$q_u - e$
92	Mergel	$15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$ (26 Versuche)	$q_u - w$
93	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 33\%$ (32 Versuche)	$q_u - w$
94	Mergel	$33\% < a(0,06) \leq 40\%$ (44 Versuche)	$q_u - w$
95	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 40\%$ (178 Versuche)	$q_u - w$
96	Mergel	$40\% < a(0,06) \leq 60\%$ (90 Versuche)	$q_u - w$
97	Mergel	$15\% \leq a(0,06) \leq 40\%$ (204 Versuche)	$q_u - w$
98	Mergel	Zusammenfassung Mittelwerte	$q_u - w$
99	Mergel	Zusammenfassung der unteren Grenzen $\alpha = 5\%$	$q_u - w$

100	Mergel	Zusammenfassung der Mittelwerte	$q_u - e$
101	Mergel	Zusammenfassung der unteren Grenzen $\alpha = 5\%$	$q_u - e$
102	Mergel	$15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$ (74 Einzelversuche - UU-Versuch)	$c_u - e$
103	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 33\%$ (109 Einzelversuche - UU-Versuch)	$c_u - e$
104	Mergel	$33\% < a(0,06) \leq 40\%$ (73 Einzelversuche - UU-Versuch)	$c_u - e$
105	Mergel	$26\% < a(0,06) \leq 40\%$ (296 Einzelversuche - UU-Versuch)	$c_u - e$
106	Mergel	$40\% < a(0,06) \leq 60\%$ (18 Einzelversuche - UU-Versuch)	$c_u - e$
107	Faulschlamm	Regressionsanalyse der Scherparameter in Abhängigkeit von w (77 Versuche)	
108	Wiesenkalk	Regressionsanalyse der Scherparameter in Abhängigkeit von w (44 Versuche)	
109	Faulschlamm	Regressionsanalyse der Scherparameter in Abhängigkeit von γ_d (77 Versuche)	
110	Wiesenkalk	Regressionsanalyse der Scherparameter in Abhängigkeit von γ_d (44 Versuche)	
111	Faulschlamm	UU-Versuche (118 Versuche)	$c_u - w$
112	Wiesenkalk	UU Versuche (106 Versuche)	$c_u - w$
113	Faulschlamm	UU-Versuche (118 Versuche)	$c_u - \gamma_d$
114	Wiesenkalk	UU Versuche (106 Versuche)	$c_u - \gamma_d$
115	Faulschlamm	Einaxialversuch (134 Versuche)	$q_u - w$
116	Wiesenkalk	Einaxialversuch (58 Versuche)	$q_u - w$
117	Faulschlamm	Einaxialversuch (134 Versuche)	$q_u - \gamma_d$
118	Wiesenkalk	Einaxialversuch (58 Versuche)	$q_u - \gamma_d$

Mergel - Einteilung der Bodengruppen

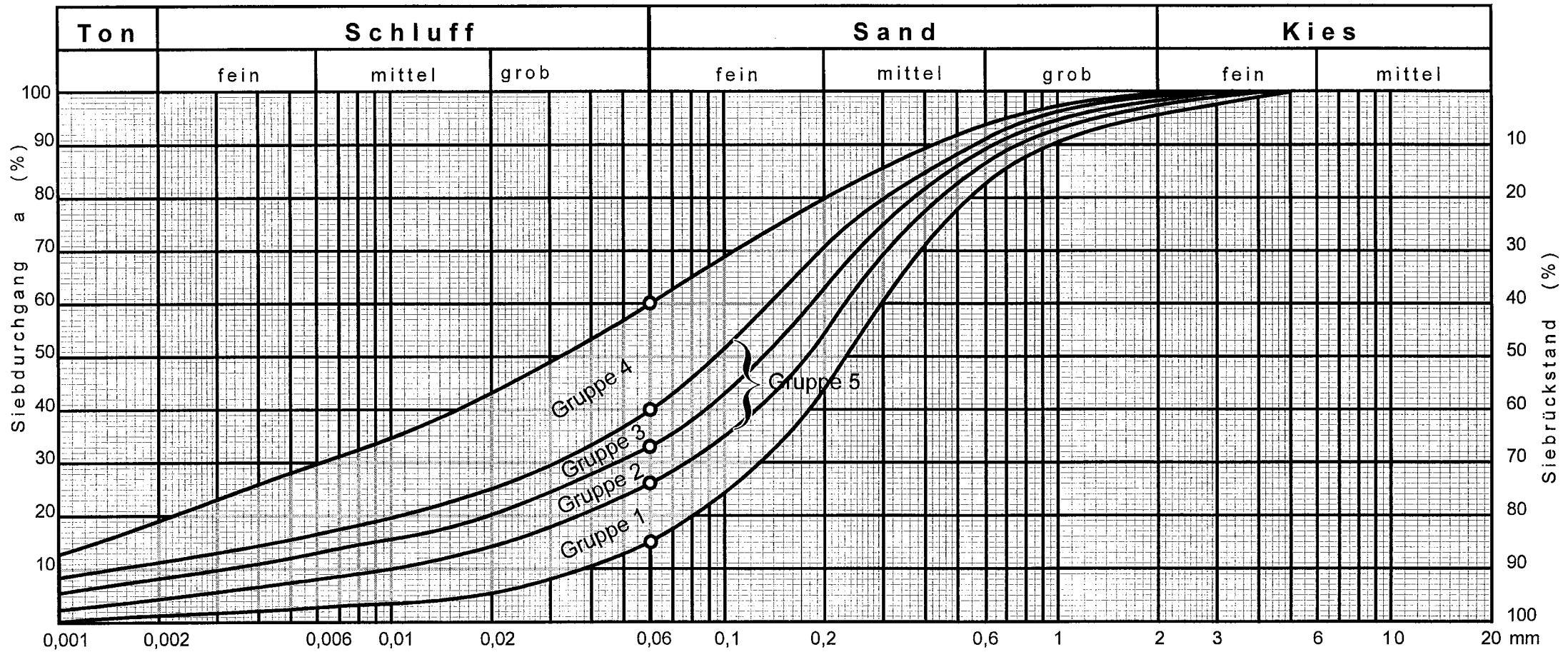


Bild 1

Mergel - Häufigkeitsverteilung des Feinkorngehalts $a(0,06)$ (2388 Proben)

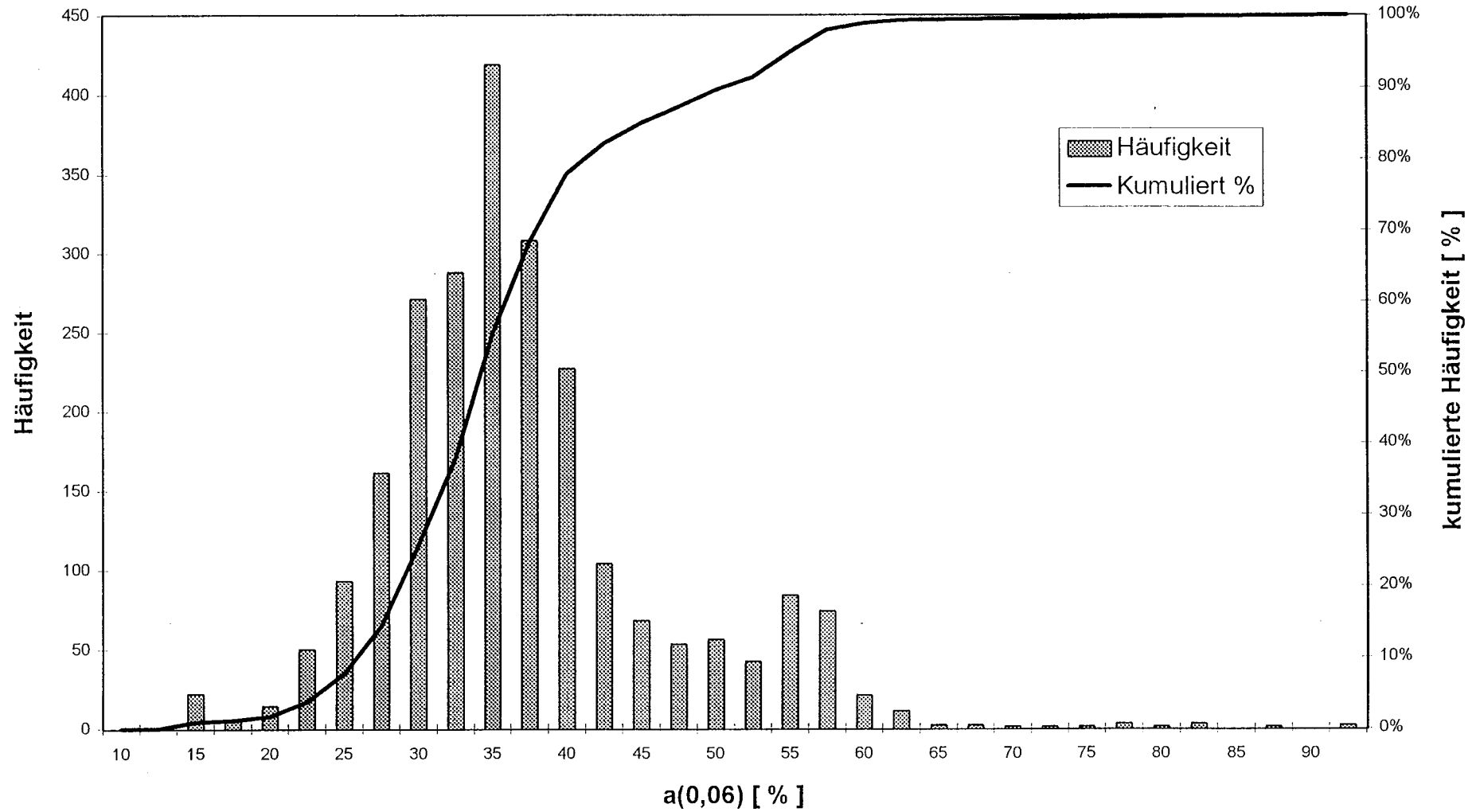


Bild 2

Mergel - Häufigkeitsverteilung der Porezahl (4676 Proben)

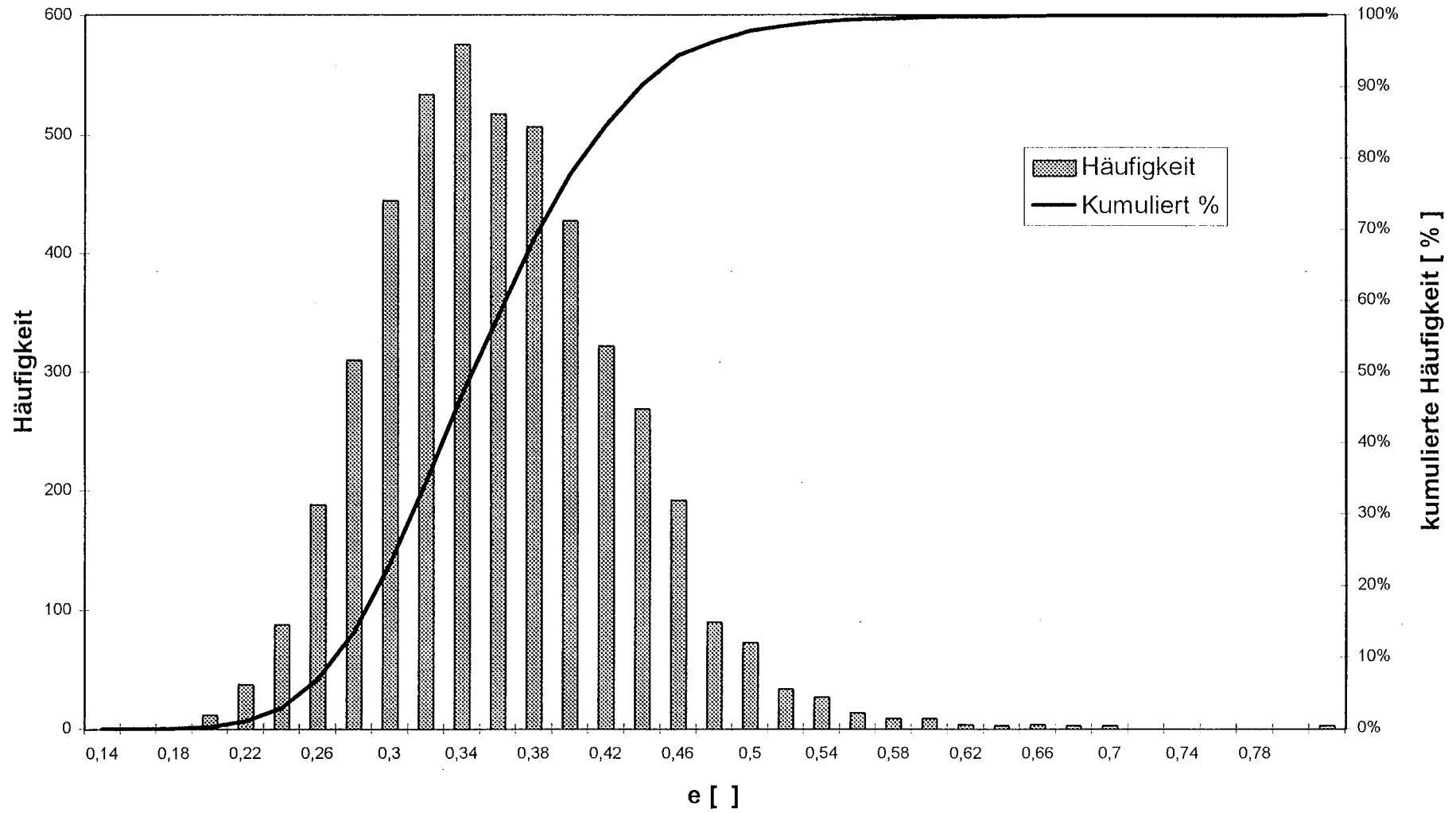


Bild 3

Mergel - Häufigkeitsverteilung des Wassergehalts (5070 Proben)

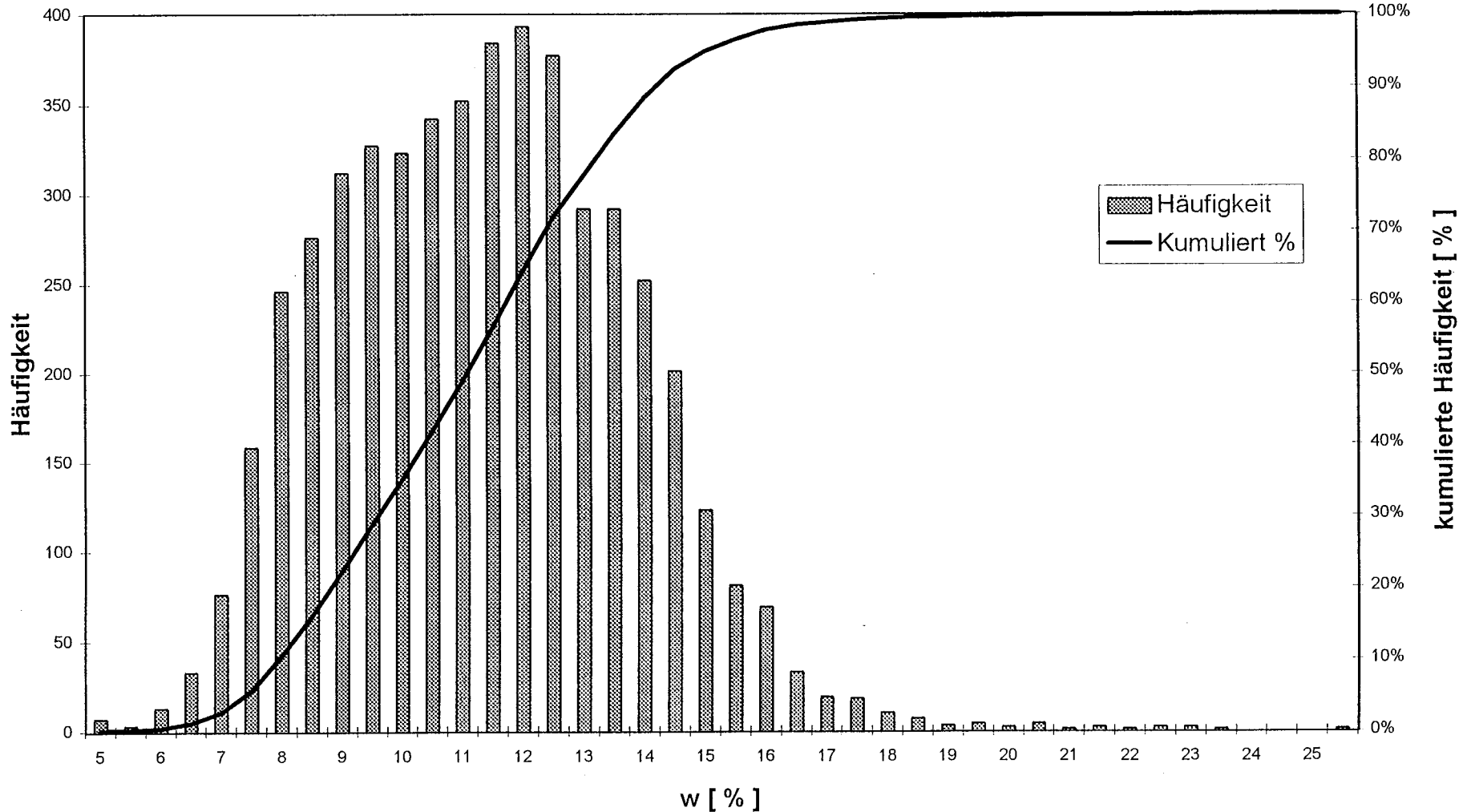


Bild 4

Mergel - Häufigkeitsverteilung des Reibungswinkels ϕ
(CU-Versuch) (477 Proben)

Deutsche Forschungsgesellschaft
für Bodenmechanik
(Degebo)

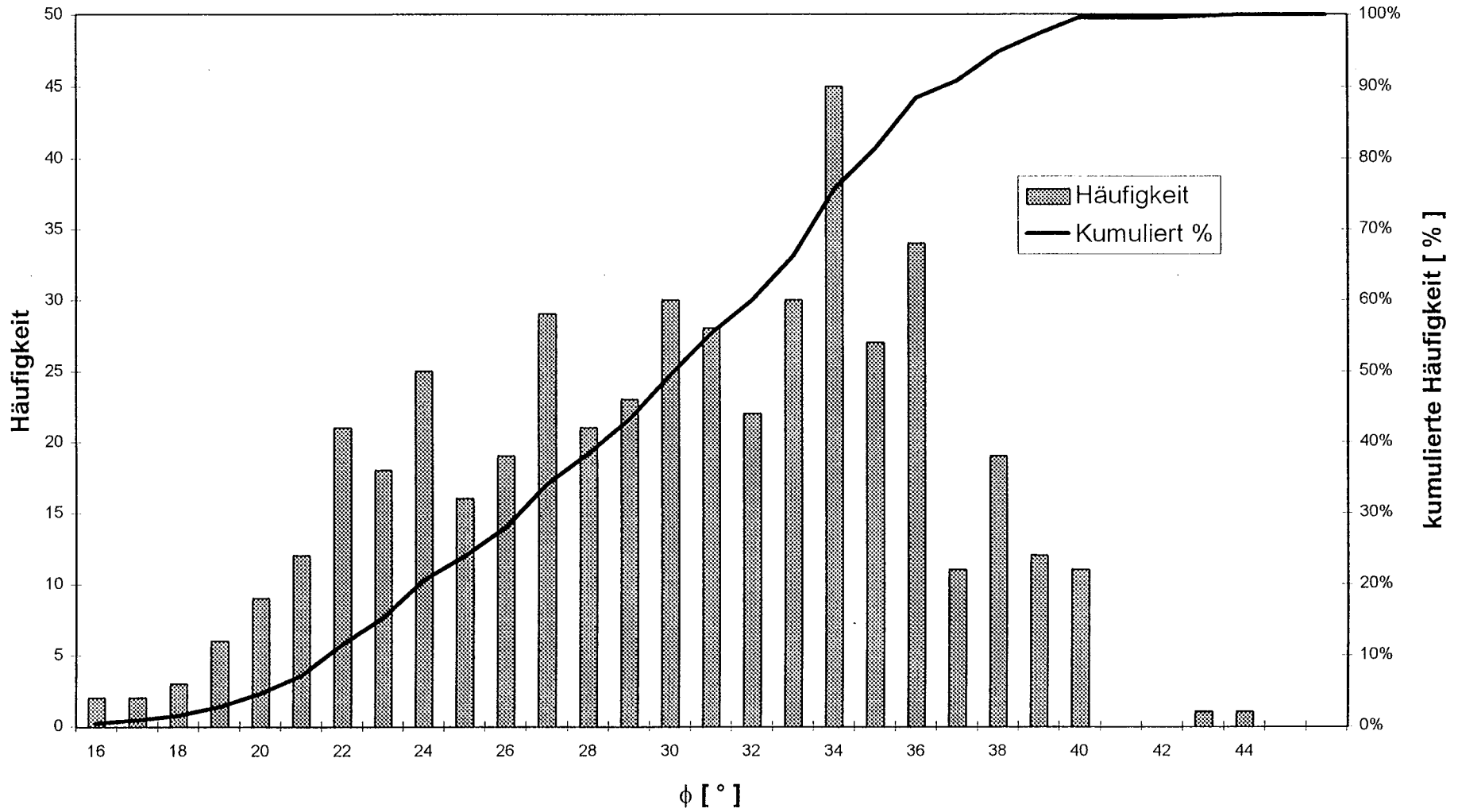


Bild 5

Mergel - Häufigkeitsverteilung der Kohäsion c (CU-Versuch) (477 Proben)

Deutsche Forschungsgesellschaft
für Bodenmechanik
(Degebo)

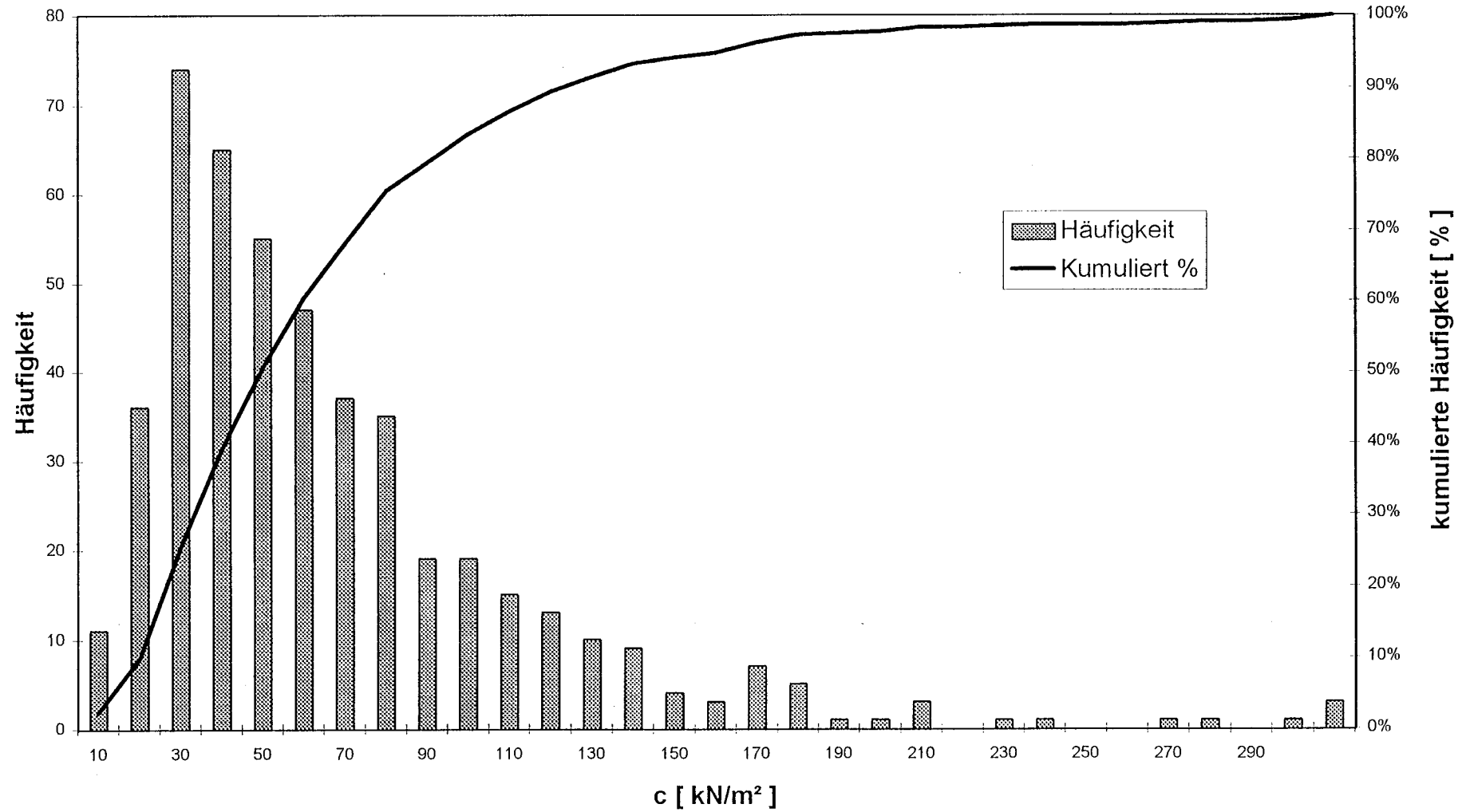


Bild 6

Mergel - Häufigkeitsverteilung der einaxialen Druckfestigkeit (130 Proben)

Deutsche Forschungsgesellschaft
für Bodenmechanik
(Degebo)

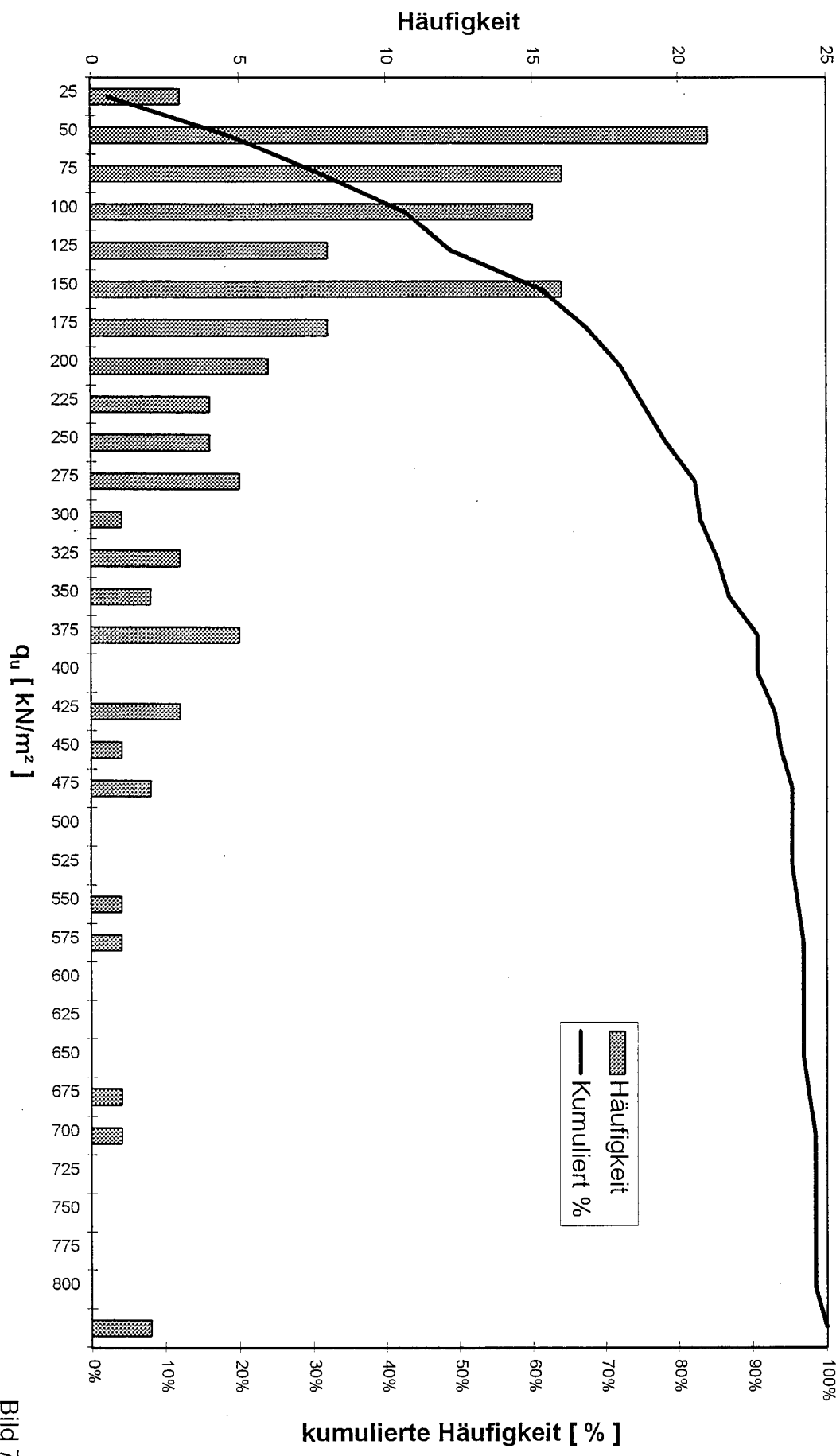


Bild 7

Mergel - Häufigkeitsverteilung der undraineden Kohäsion
(UU-Versuch) (200 Proben)

Deutsche Forschungsgesellschaft
für Bodenmechanik
(Degebo)

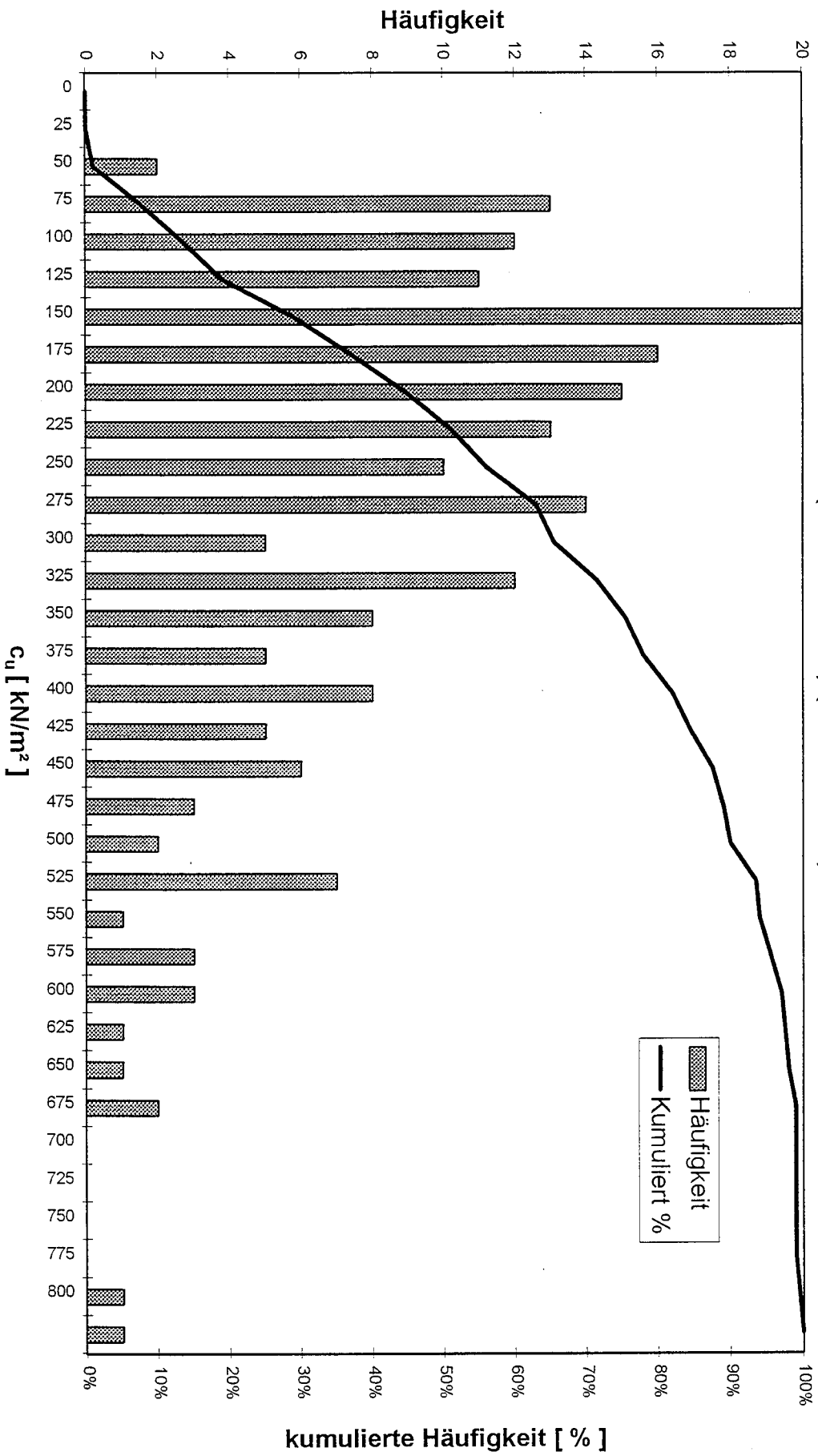
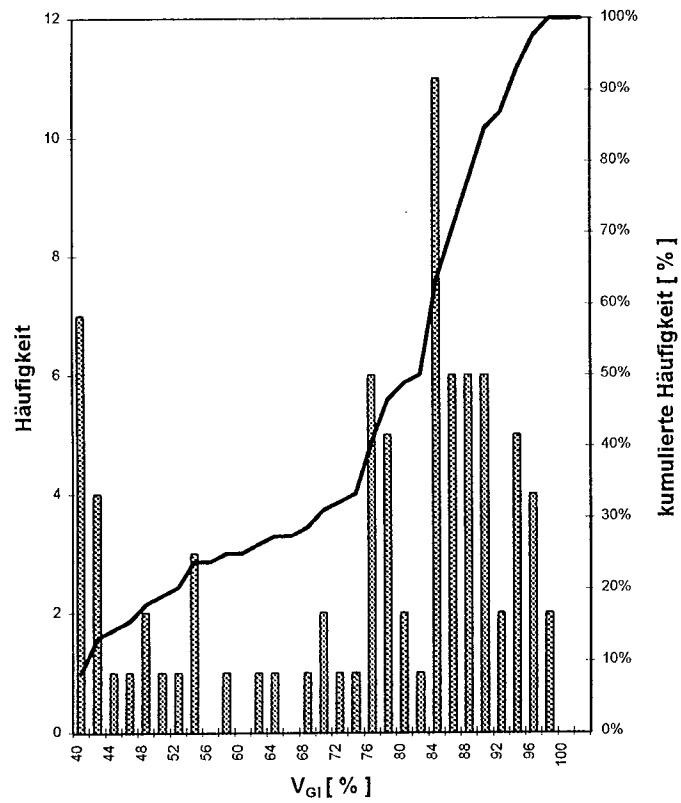


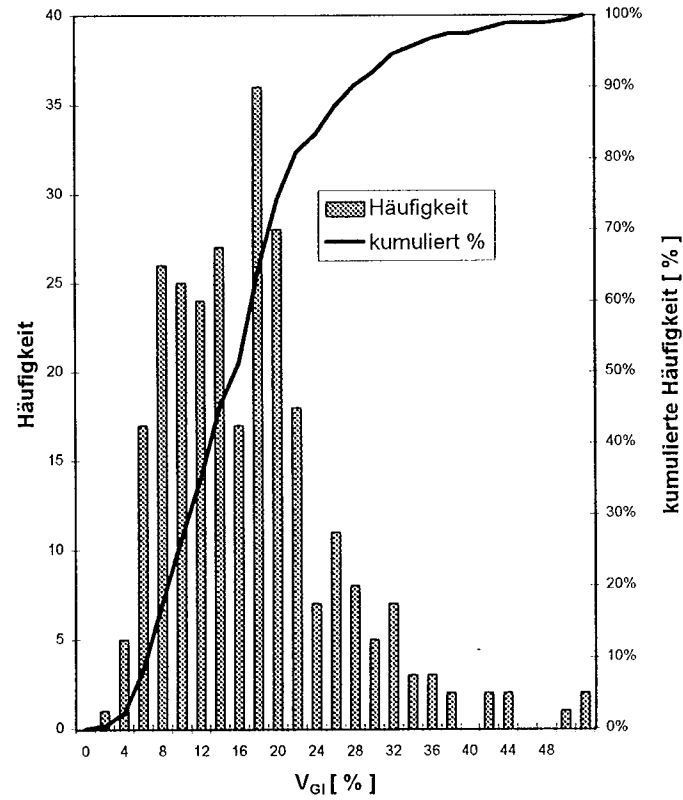
Bild 8

organische Böden - Häufigkeitsverteilung des Glühverlusts

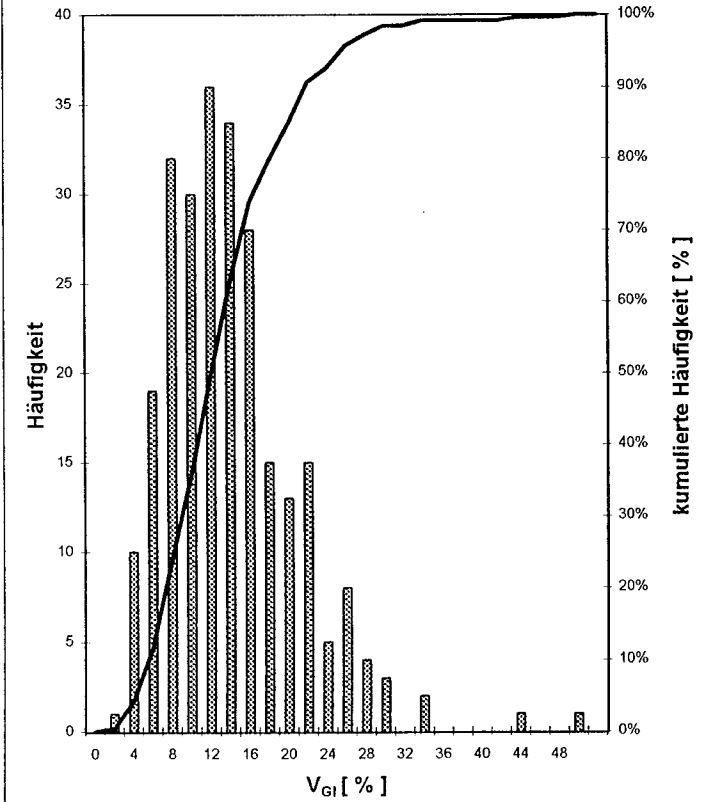
Torf (84 Proben)



Faulschlamm (277 Proben)

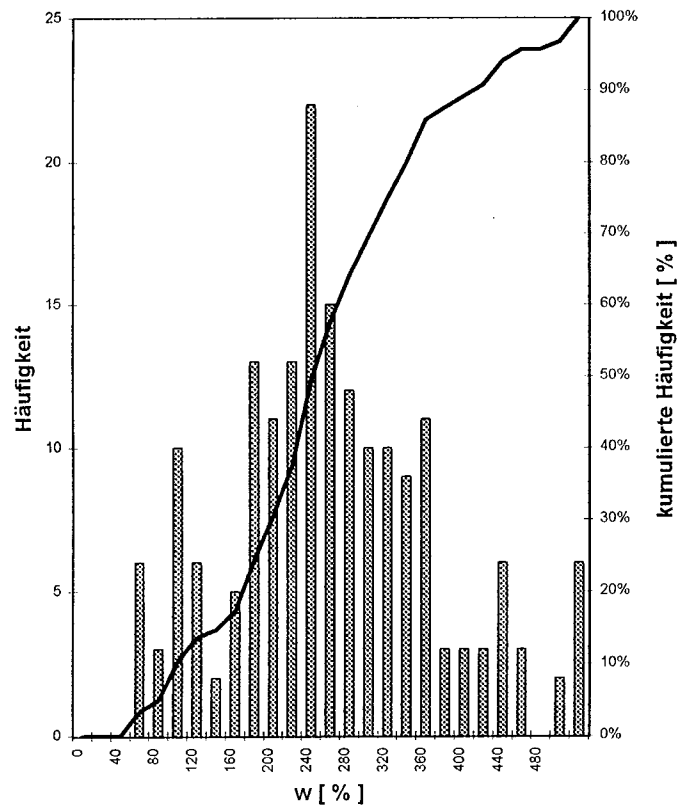


Wiesenkalk (258 Proben)

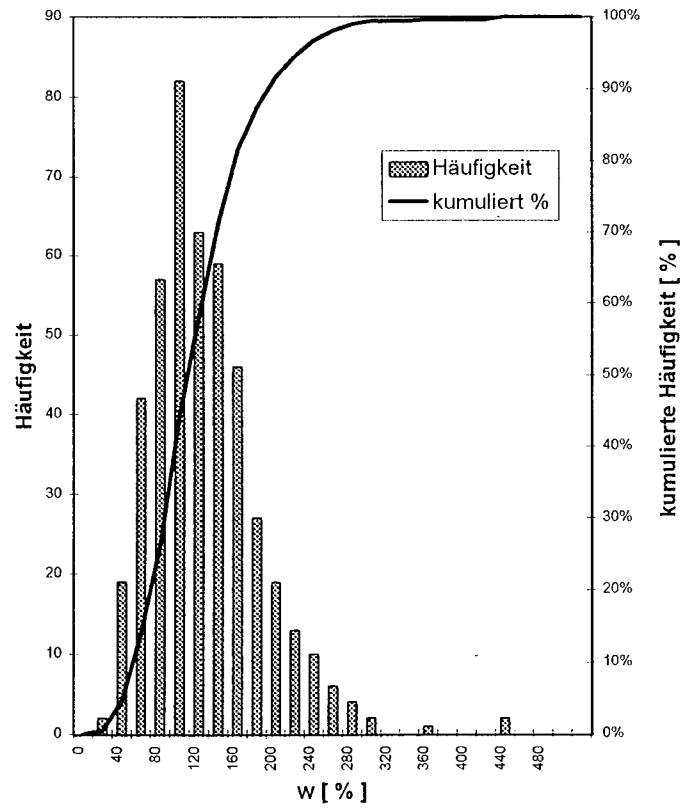


organische Böden - Häufigkeitsverteilung des Wassergehalts

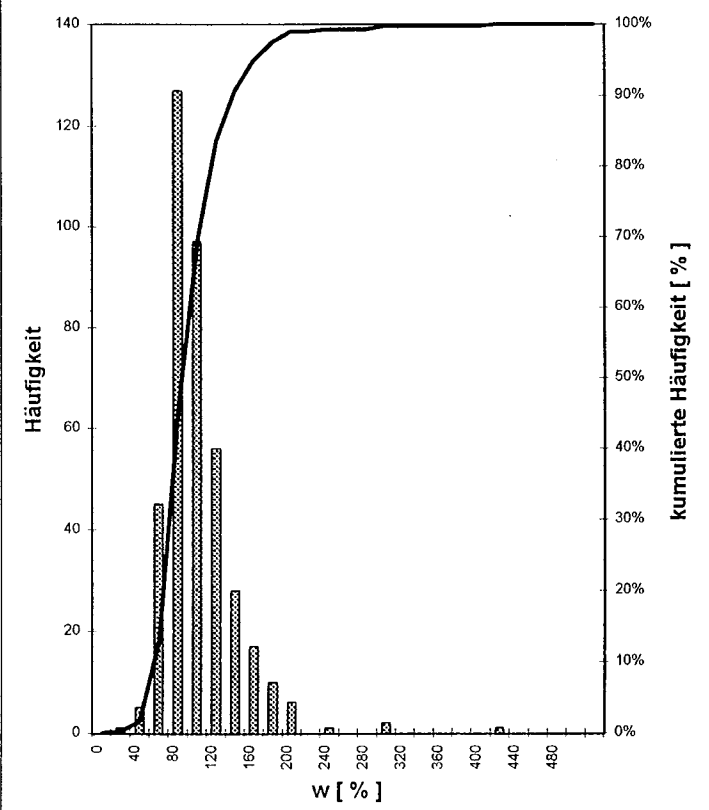
Torf (184 Proben)



Faulschlamm (454 Proben)



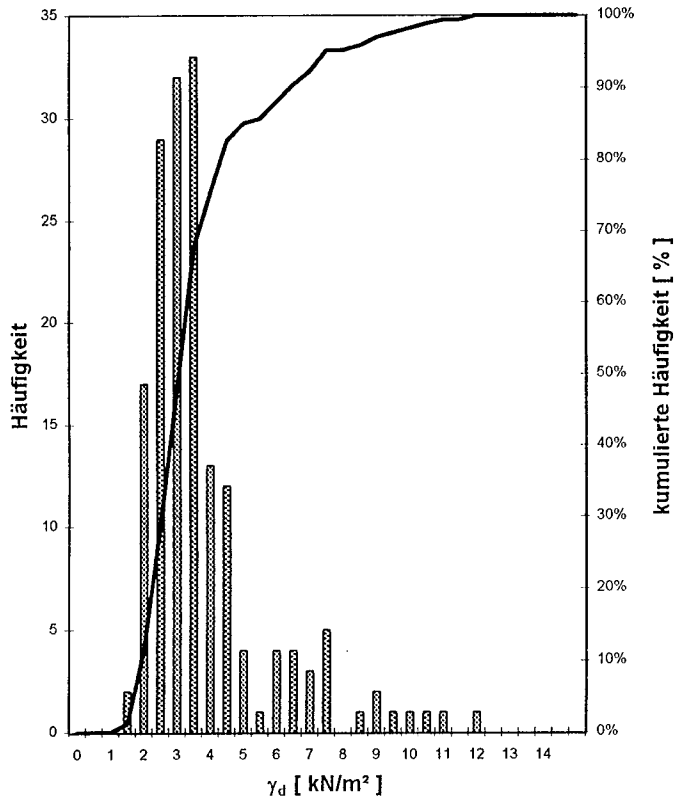
Wiesenkalk (369 Proben)



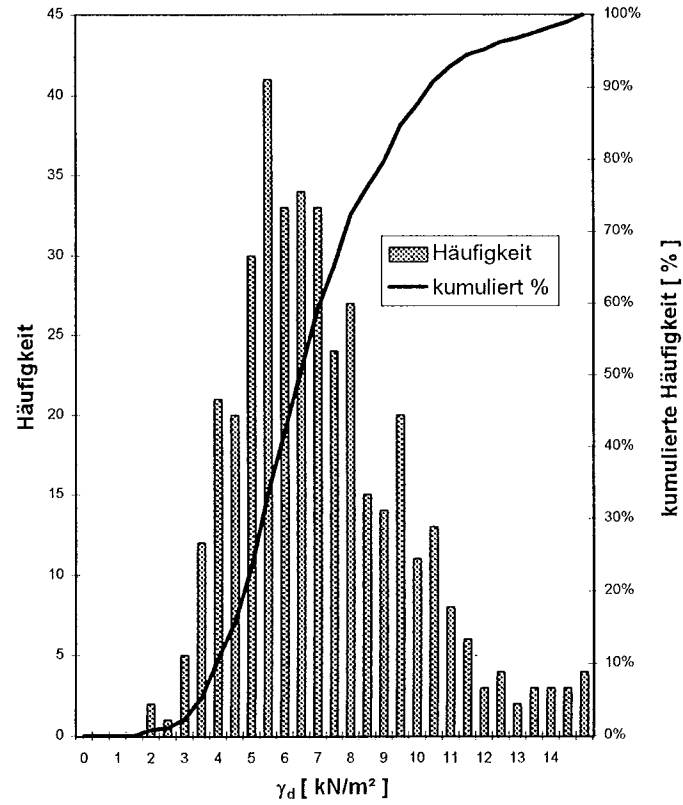
organische Böden - Häufigkeitsverteilung der Trockenwichte

Deutsche Forschungsgesellschaft
für Bodenmechanik
(Degebo)

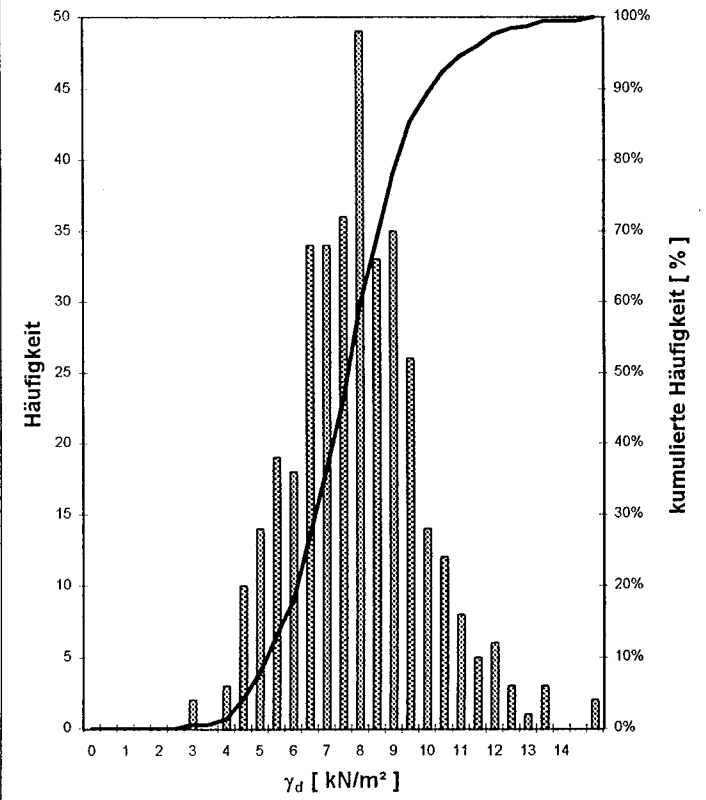
Torf (166 Proben)



Faulschlamm (367 Proben)



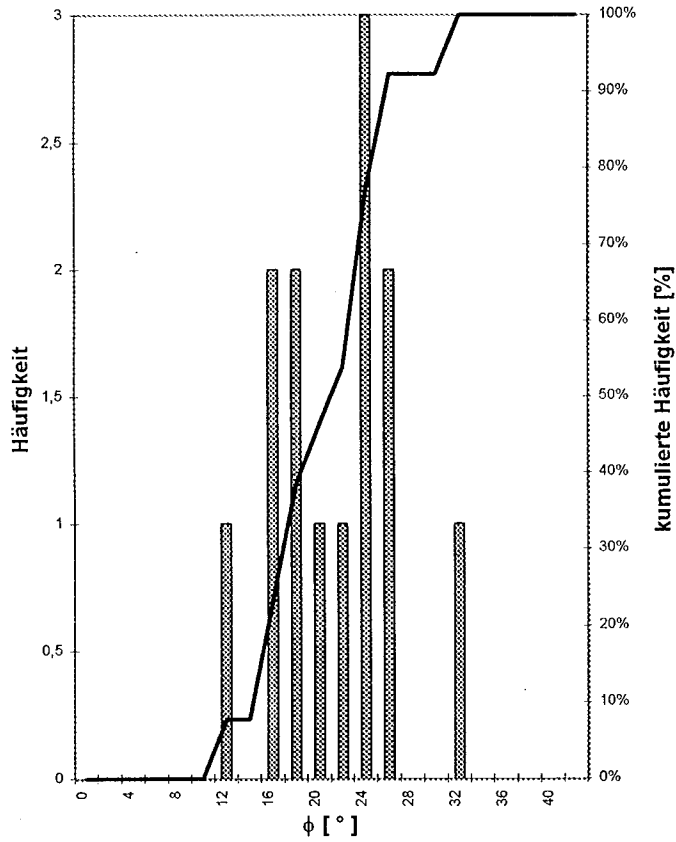
Wiesenkalk (393 Proben)



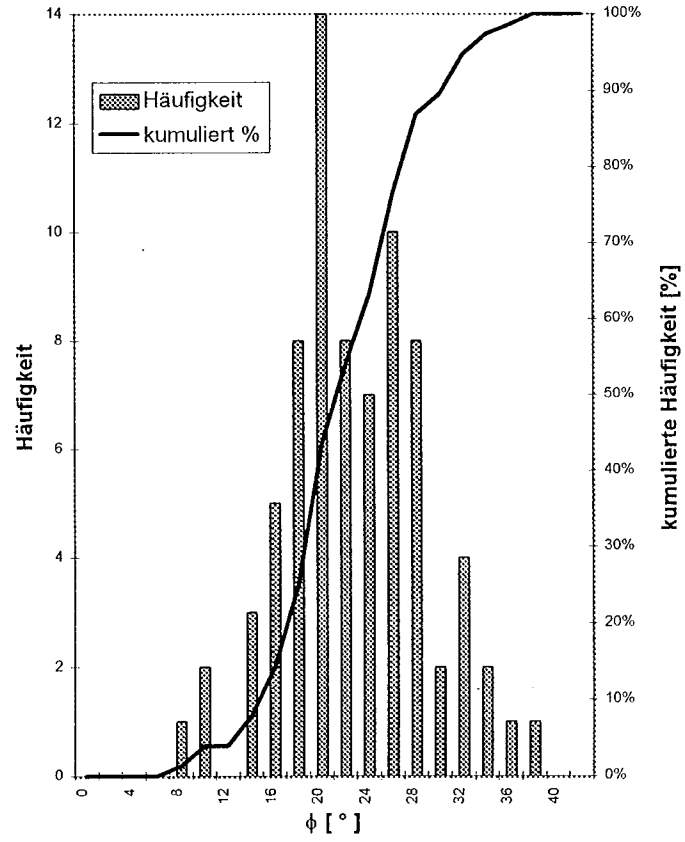
organische Böden - Häufigkeitsverteilung des Reibungswinkels (CU-Versuch)

Deutsche Forschungsgesellschaft
für Bodenmechanik
(Degebo)

Torf (13 Proben)



Faulschlamm (76 Proben)



Wiesenkalk (44 Proben)

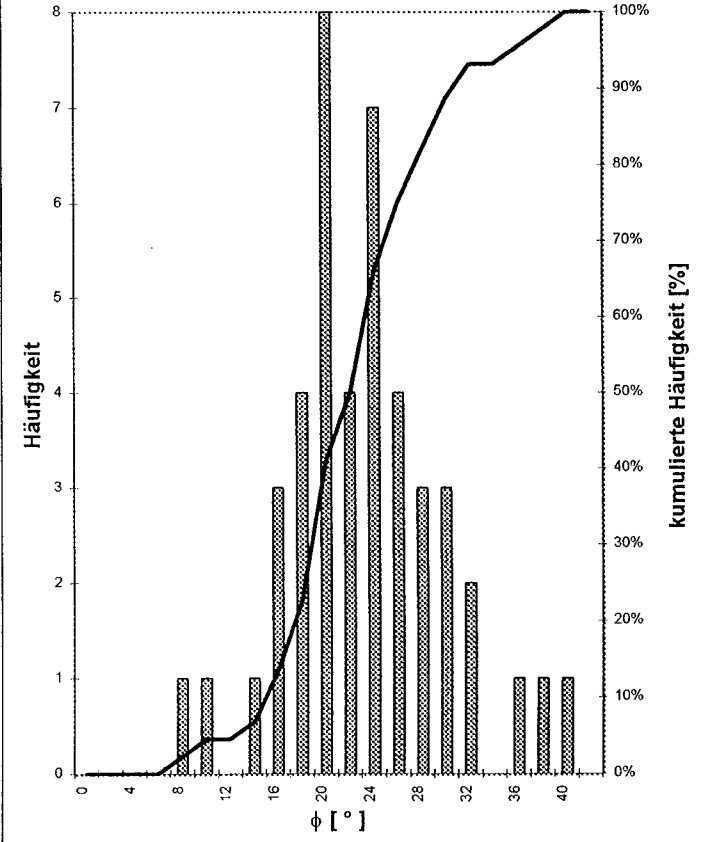
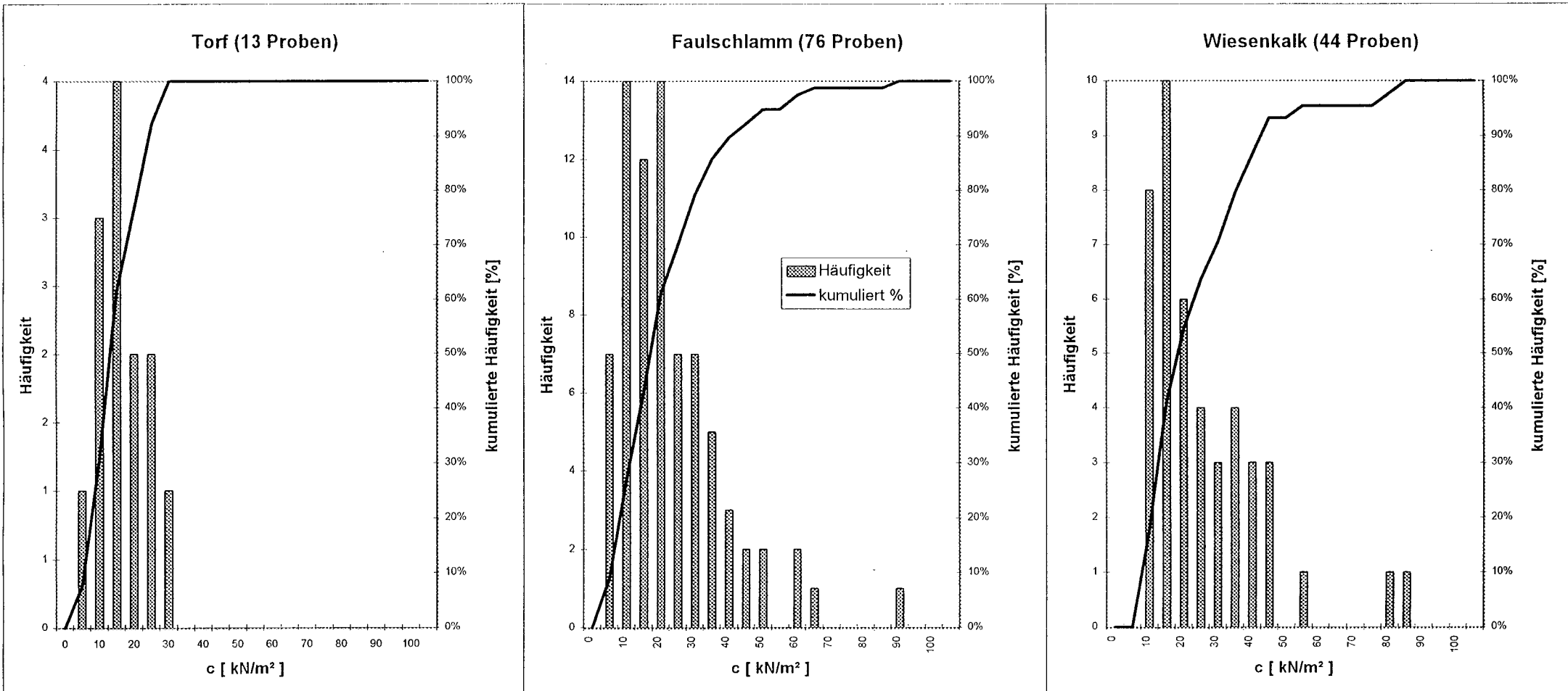


Bild 12

organische Böden - Häufigkeitsverteilung der Kohäsion
(CU-Versuch)

Deutsche Forschungsgesellschaft
für Bodenmechanik
(Degebo)



organische Böden - Häufigkeitsverteilung der einaxialen Druckfestigkeit

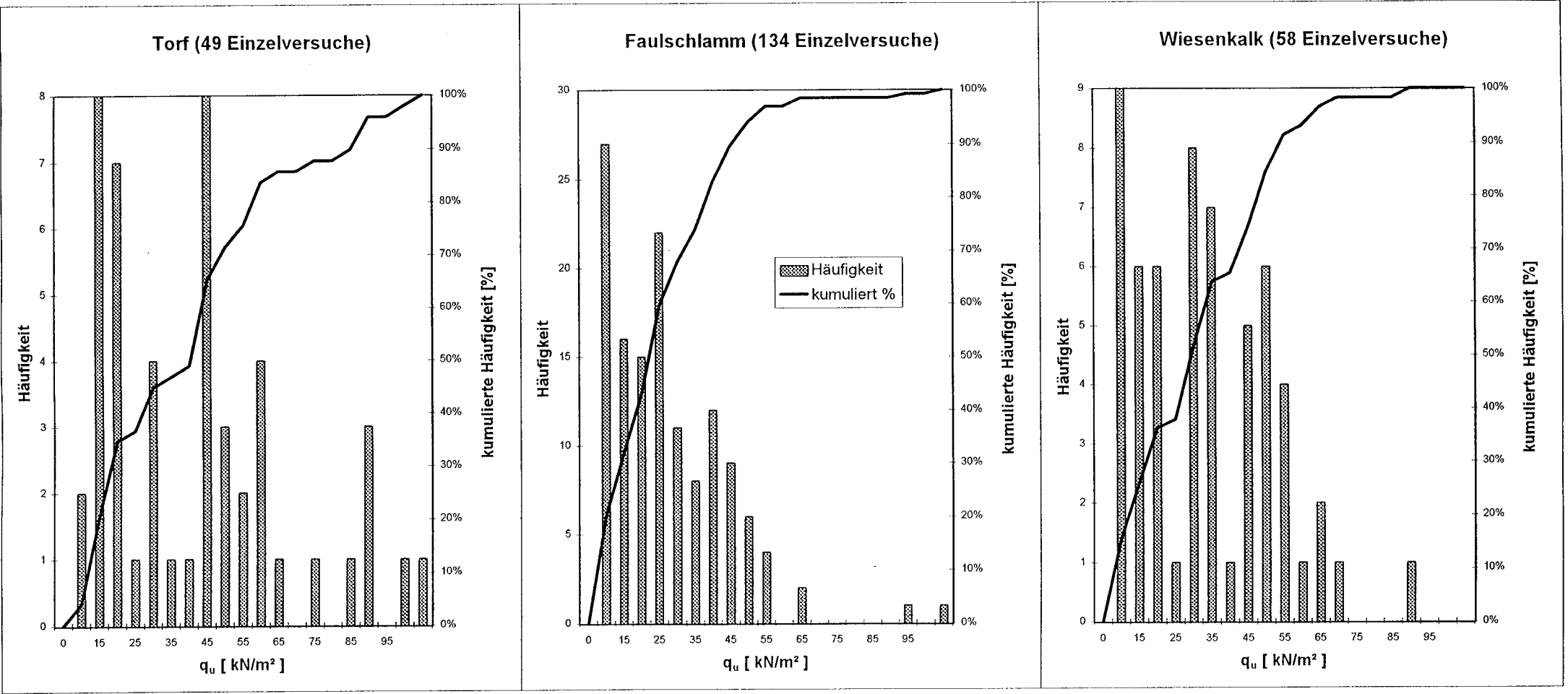
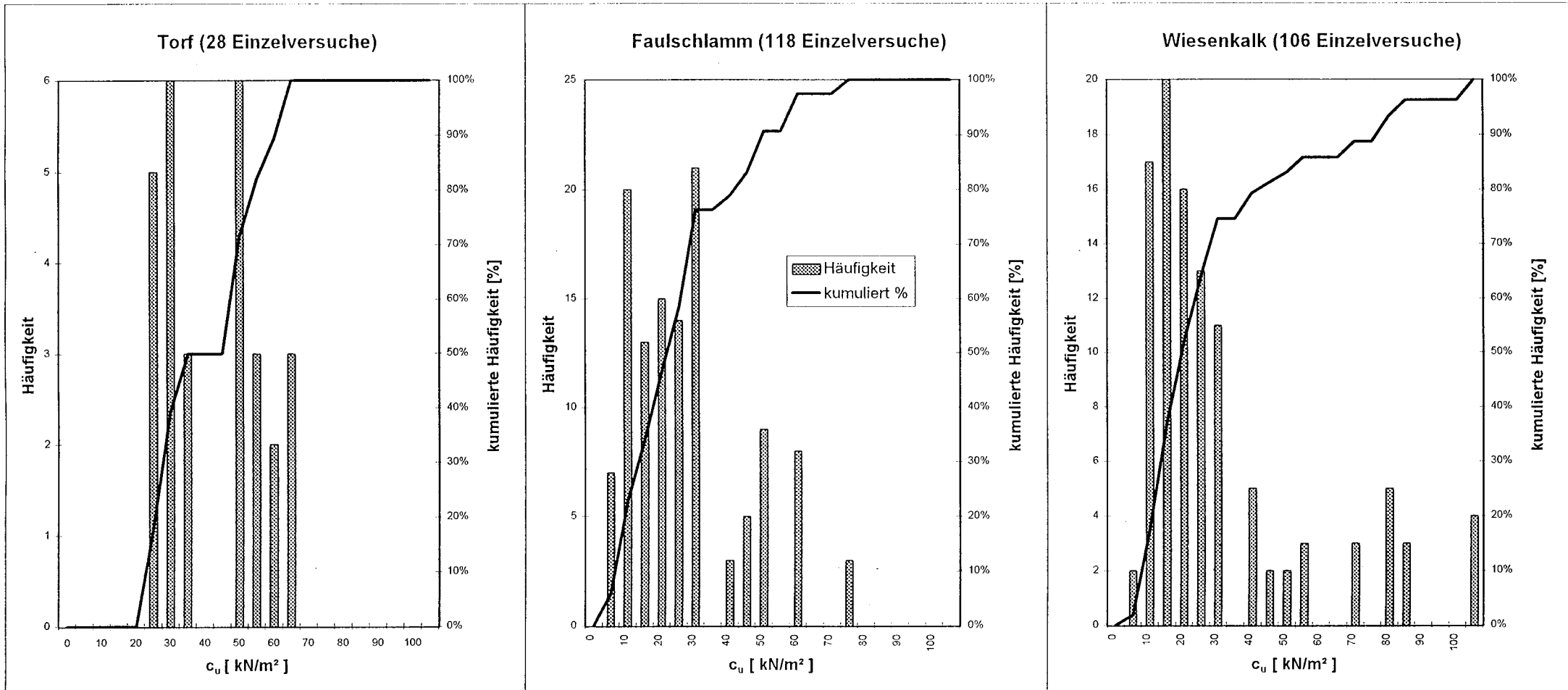


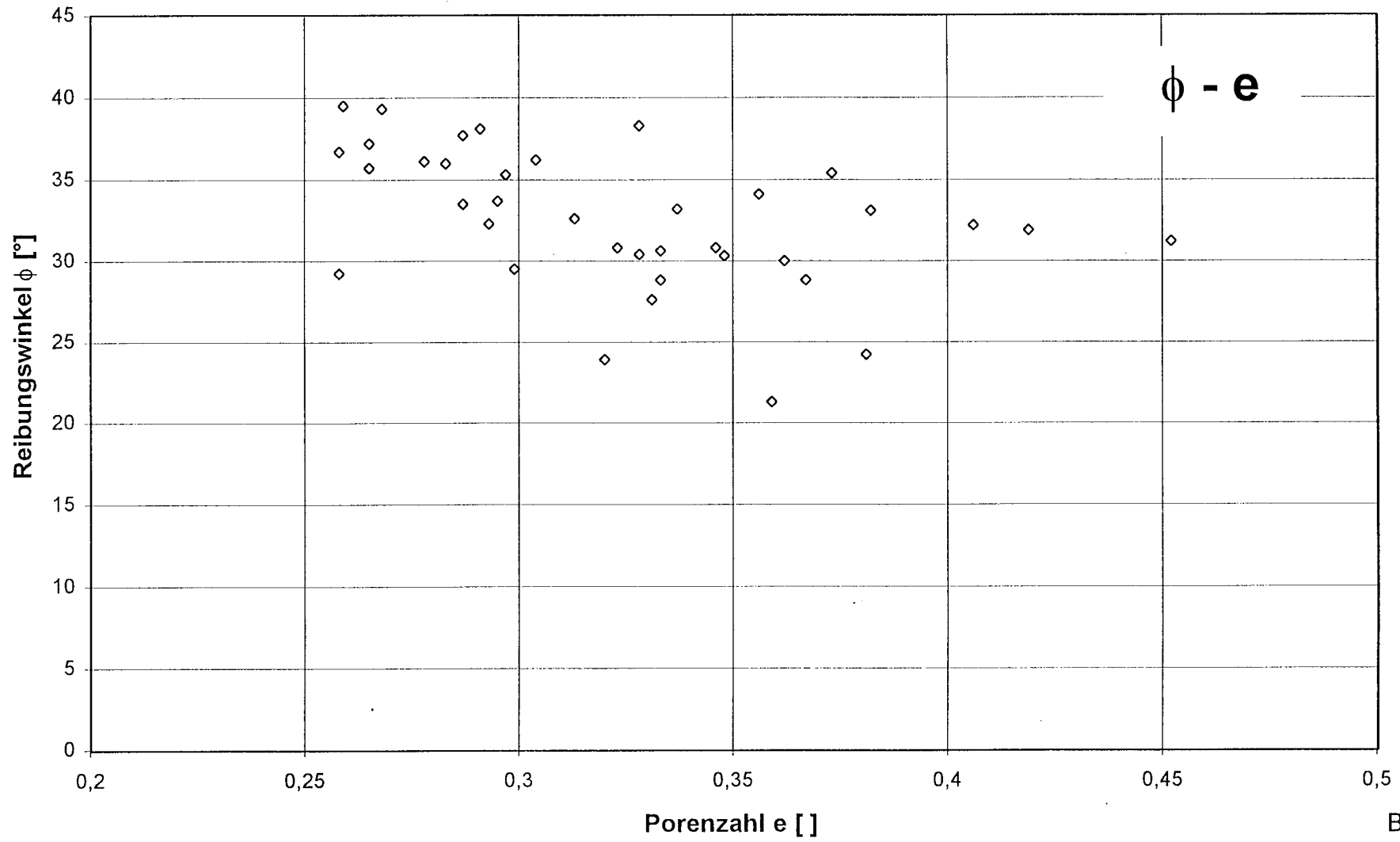
Bild 14

organische Böden - Häufigkeitsverteilung der undrainierten Kohäsion
(UU-Versuch)

Deutsche Forschungsgesellschaft
für Bodenmechanik
(Degebo)



Mergel $15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$ (37 Versuche)



Mergel $26\% < a(0,06) \leq 33\%$ (90 Versuche)

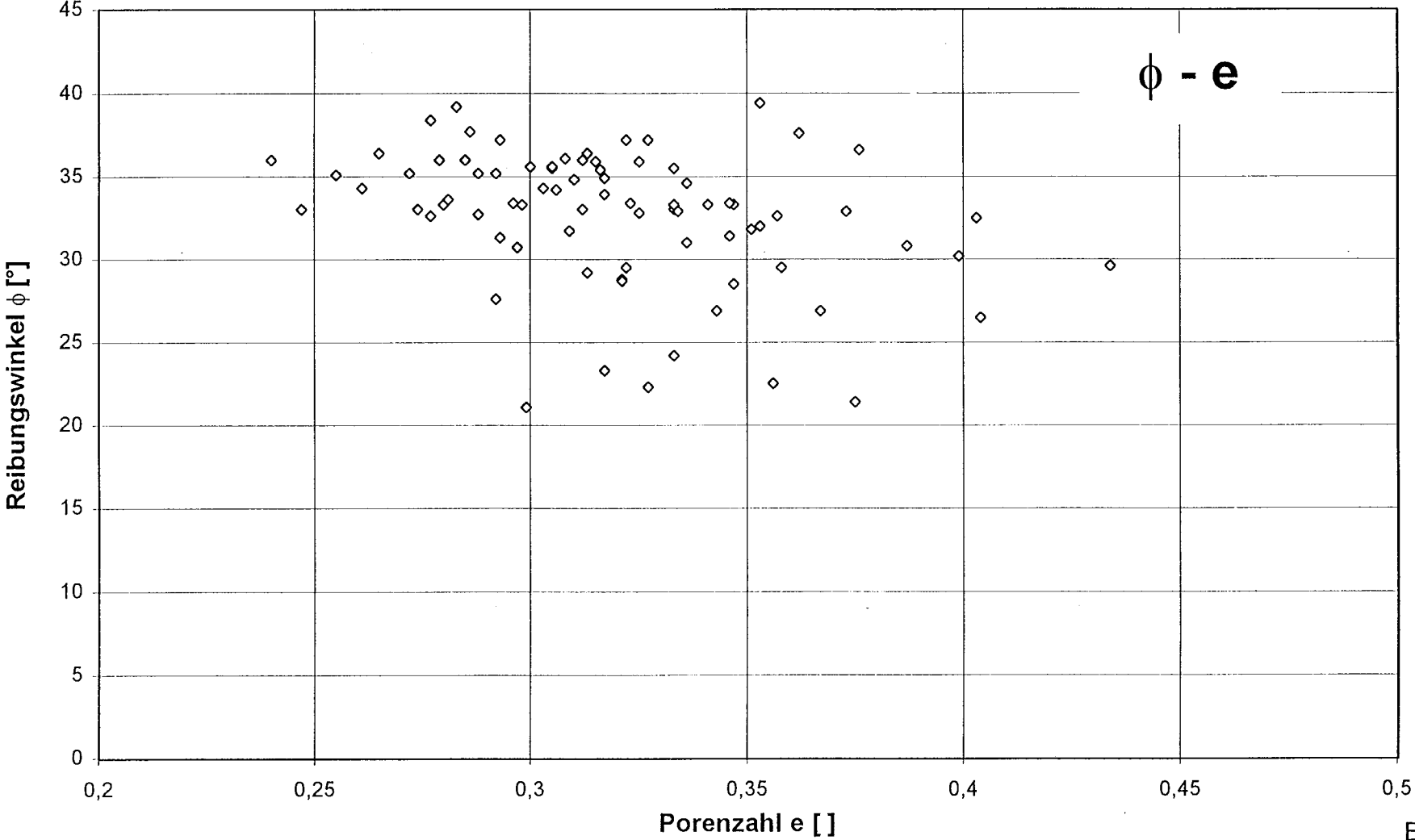


Bild 17

Mergel $33\% < a(0,06) \leq 40\%$ (98 Versuche)

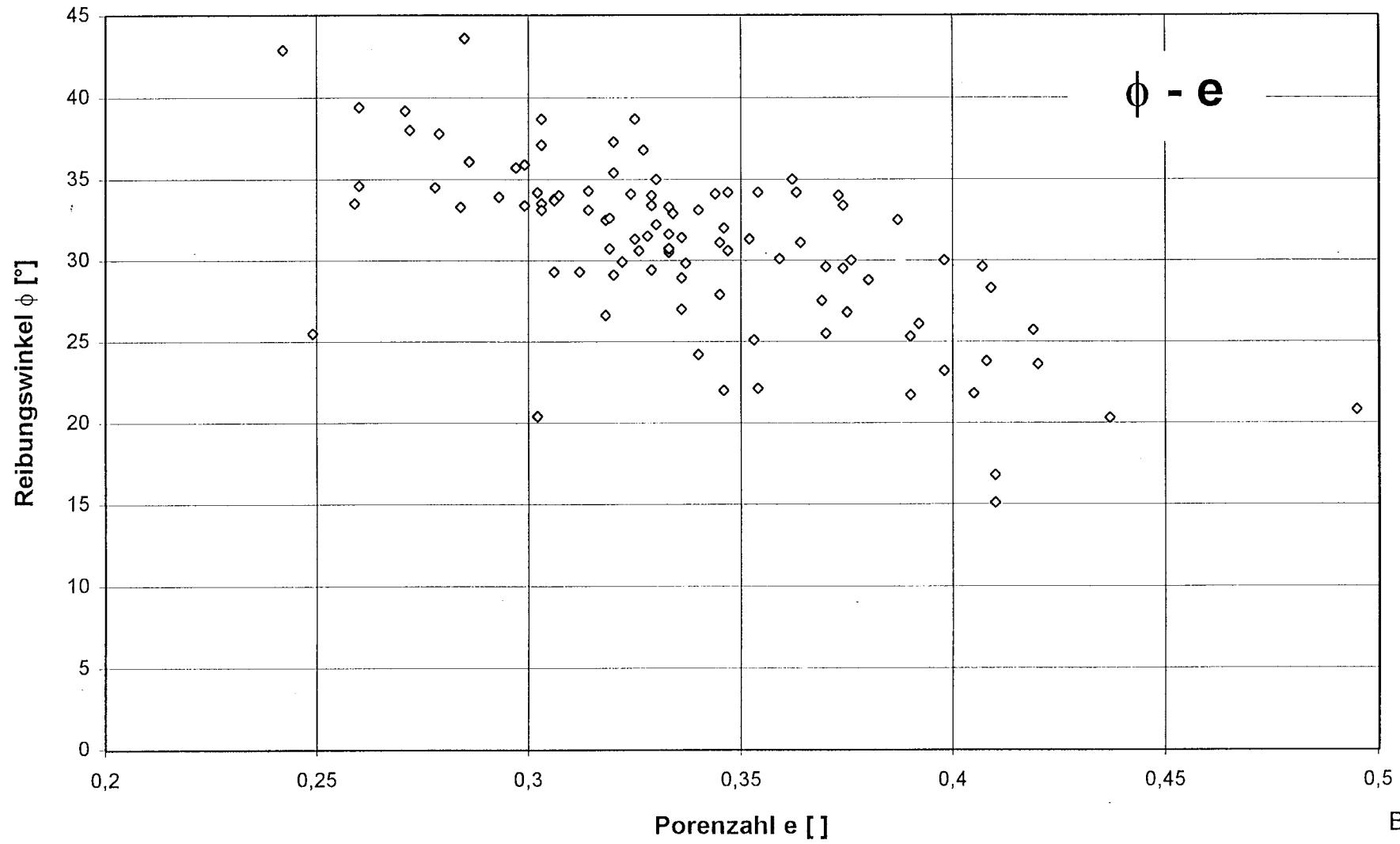


Bild 18

Mergel $26\% < a(0,06) \leq 40\%$ (305 Versuche)

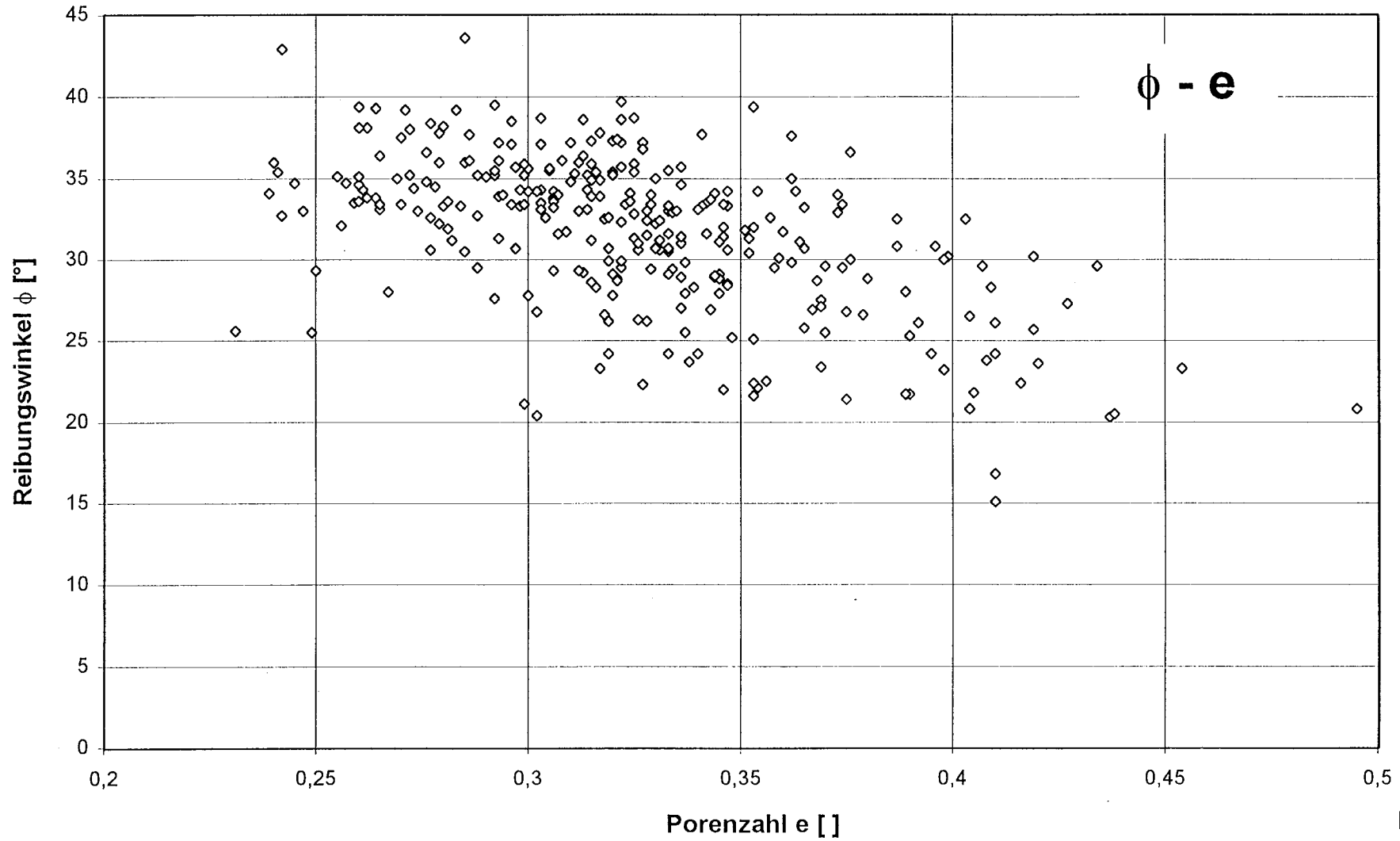


Bild 19

Mergel $40\% < a(0,06) \leq 60\%$ (135 Versuche)

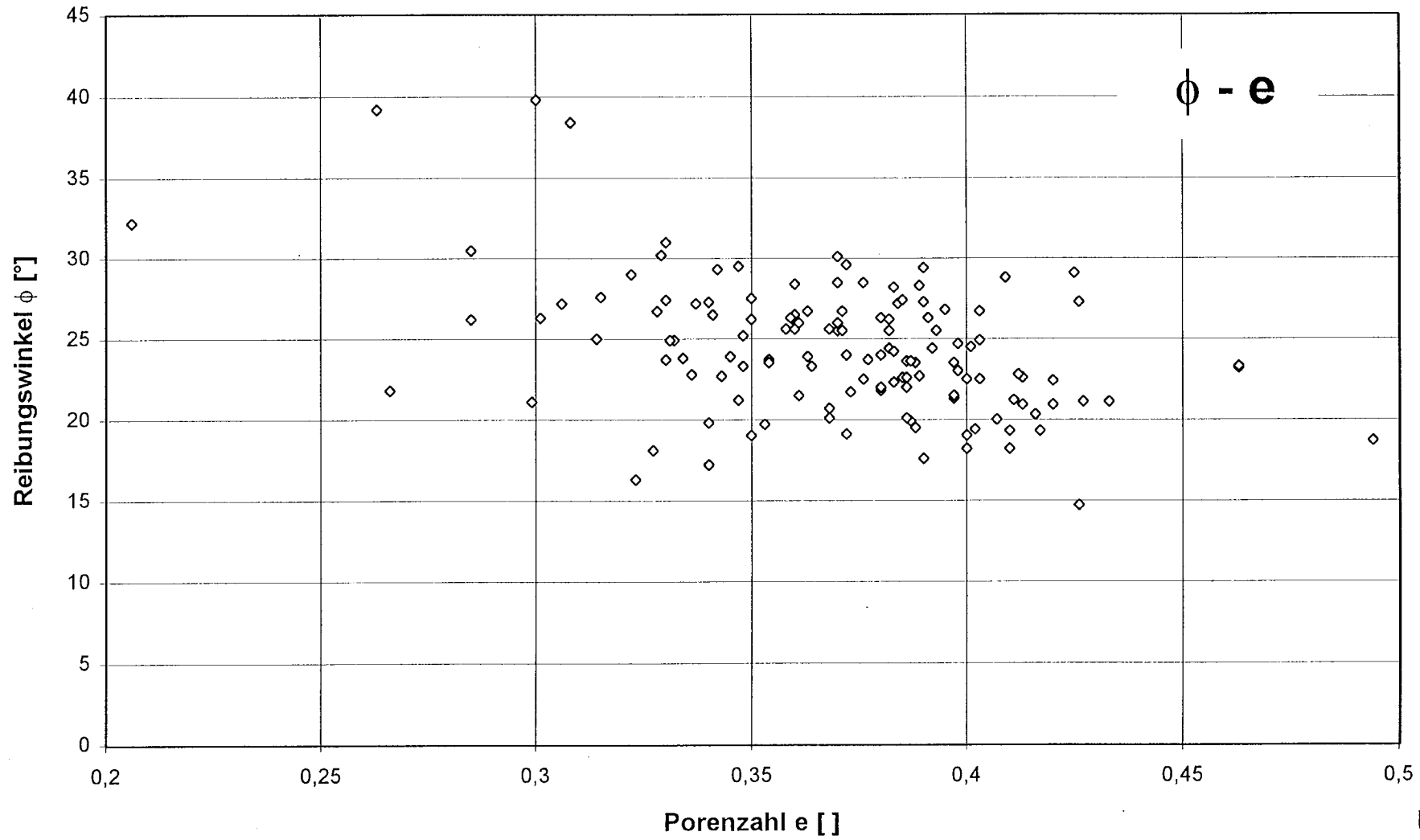
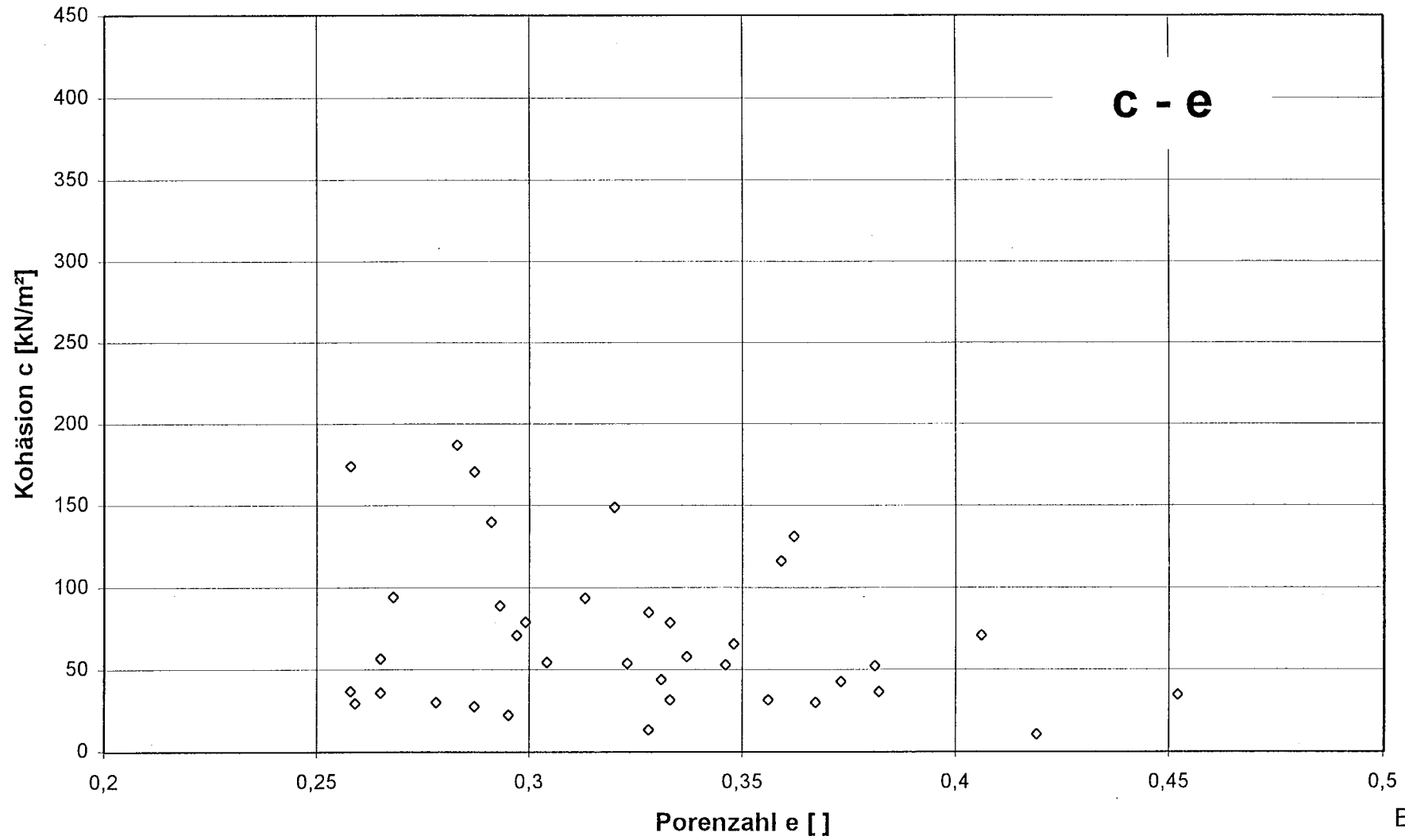


Bild 20

Mergel $15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$ (37 Versuche)



Mergel $26\% < a(0,06) \leq 33\%$ (90 Versuche)

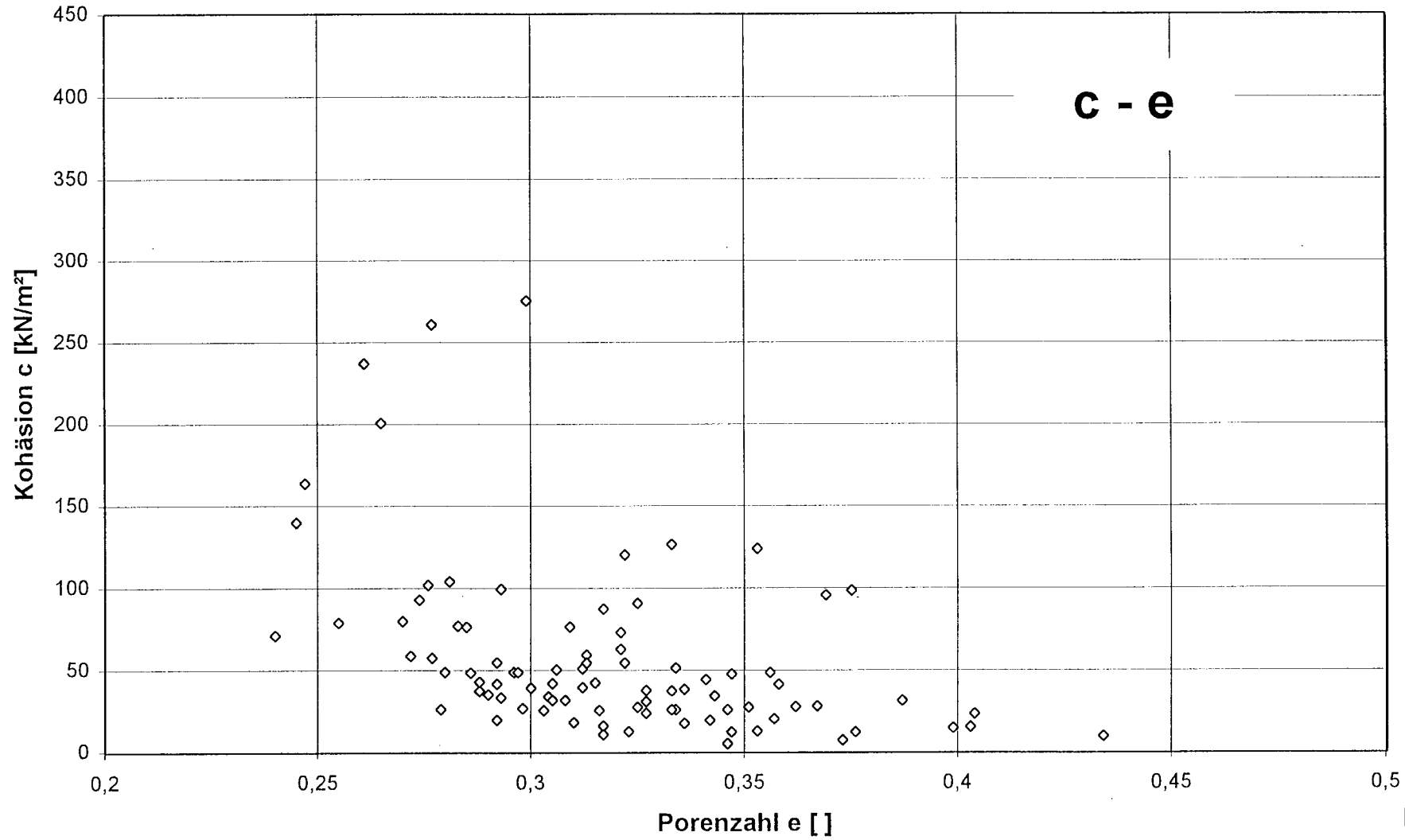


Bild 22

Mergel $33\% < a(0,06) \leq 40\%$ (98 Versuche)

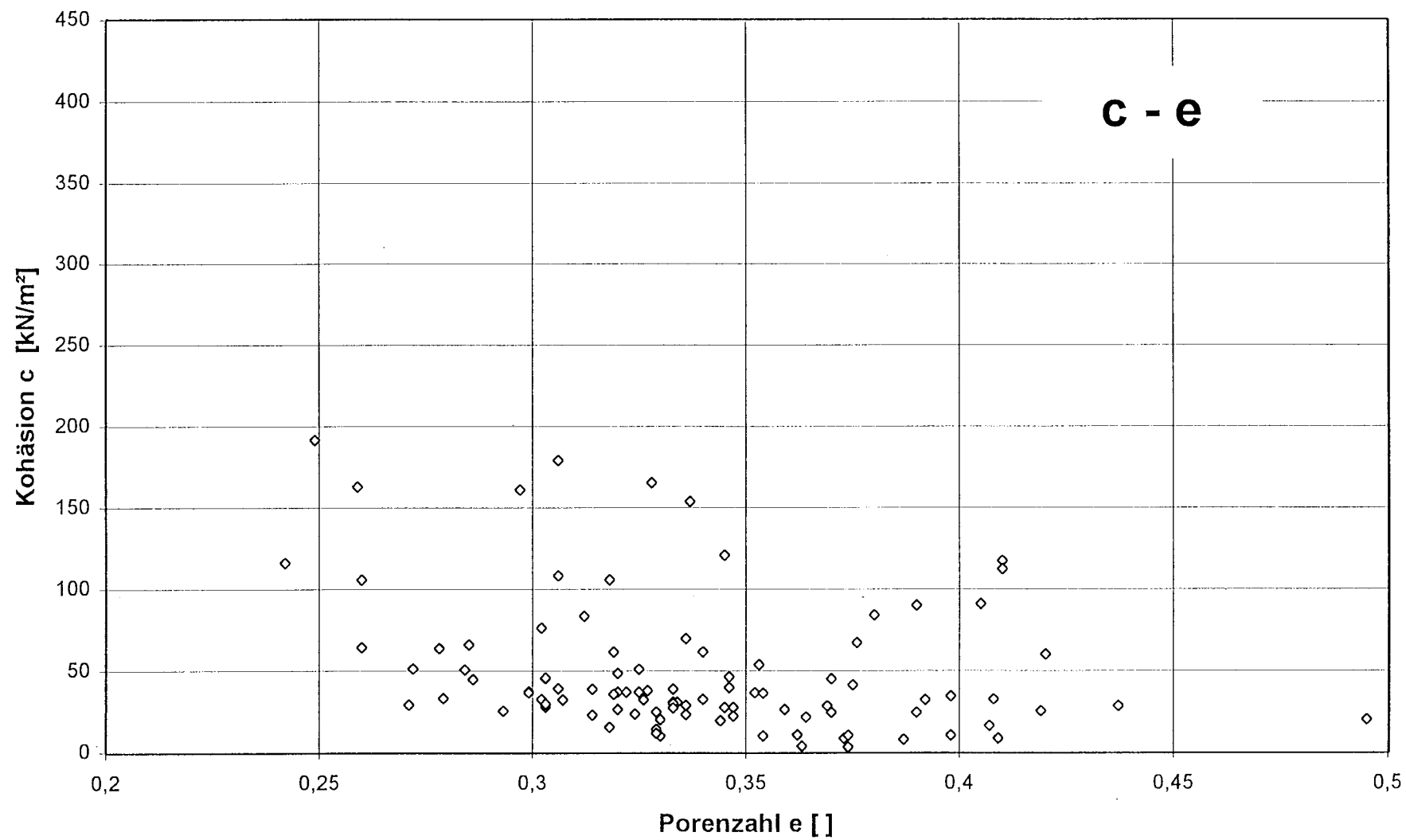


Bild 23

Mergel $26\% < a(0,06) \leq 40\%$ (305 Versuche)

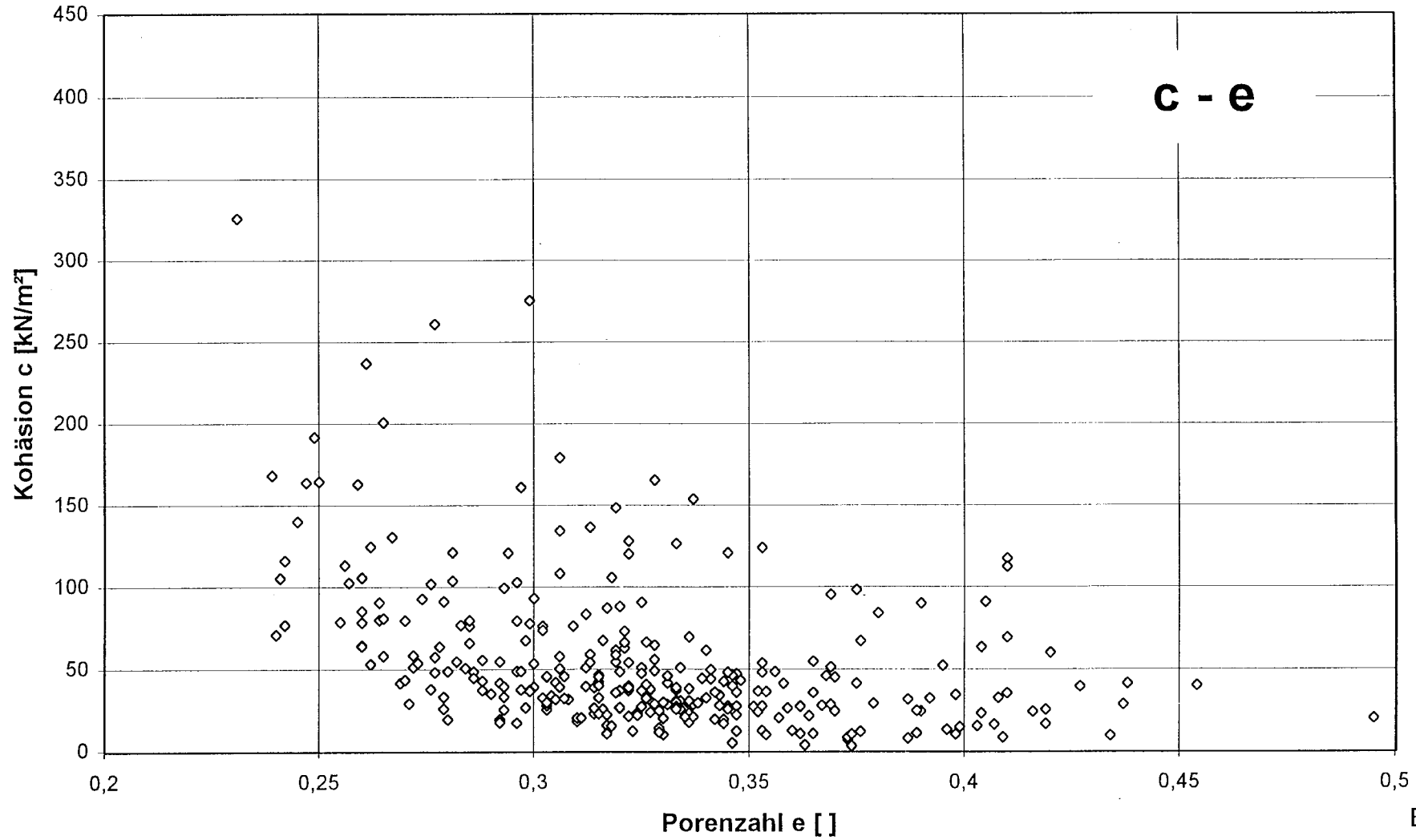
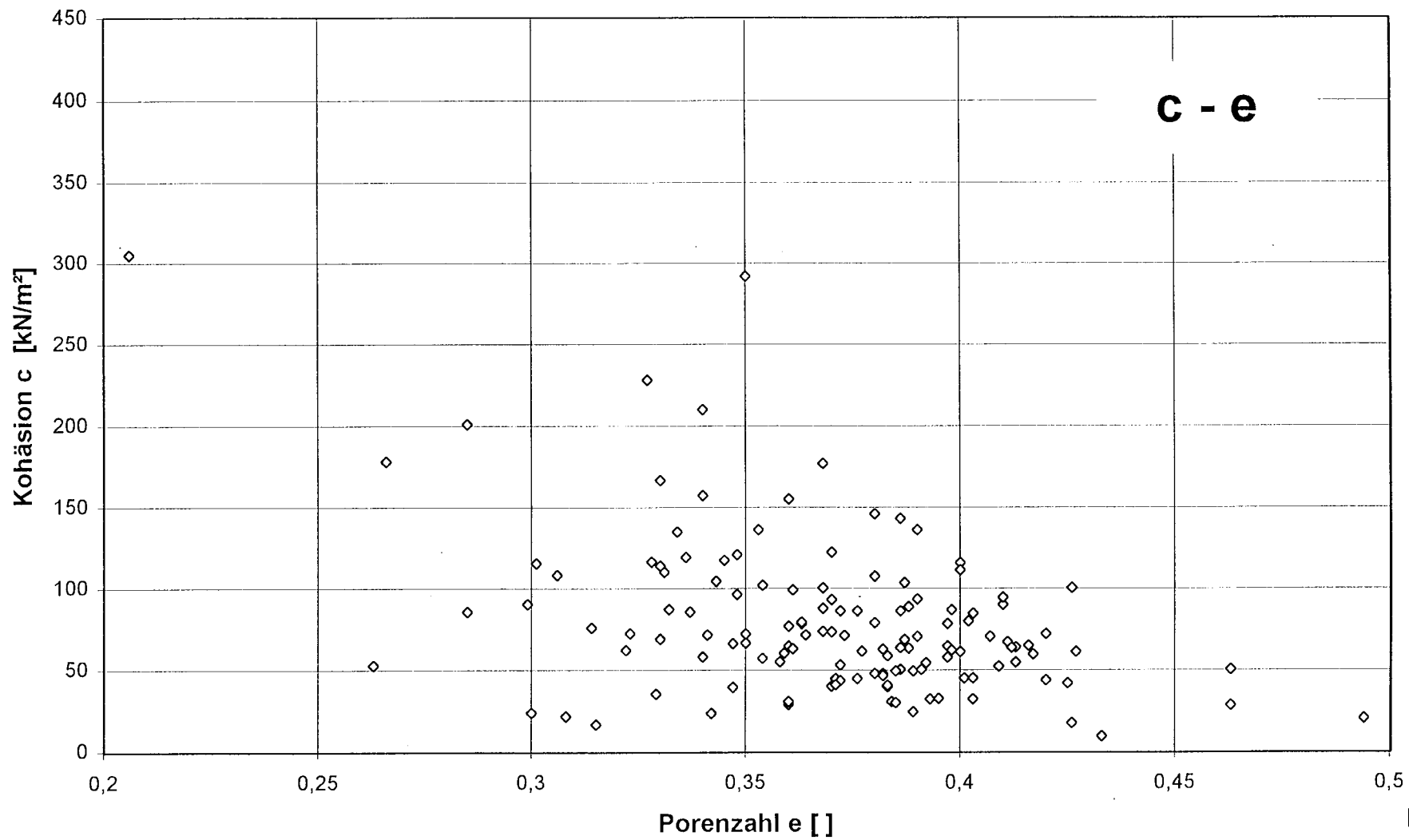
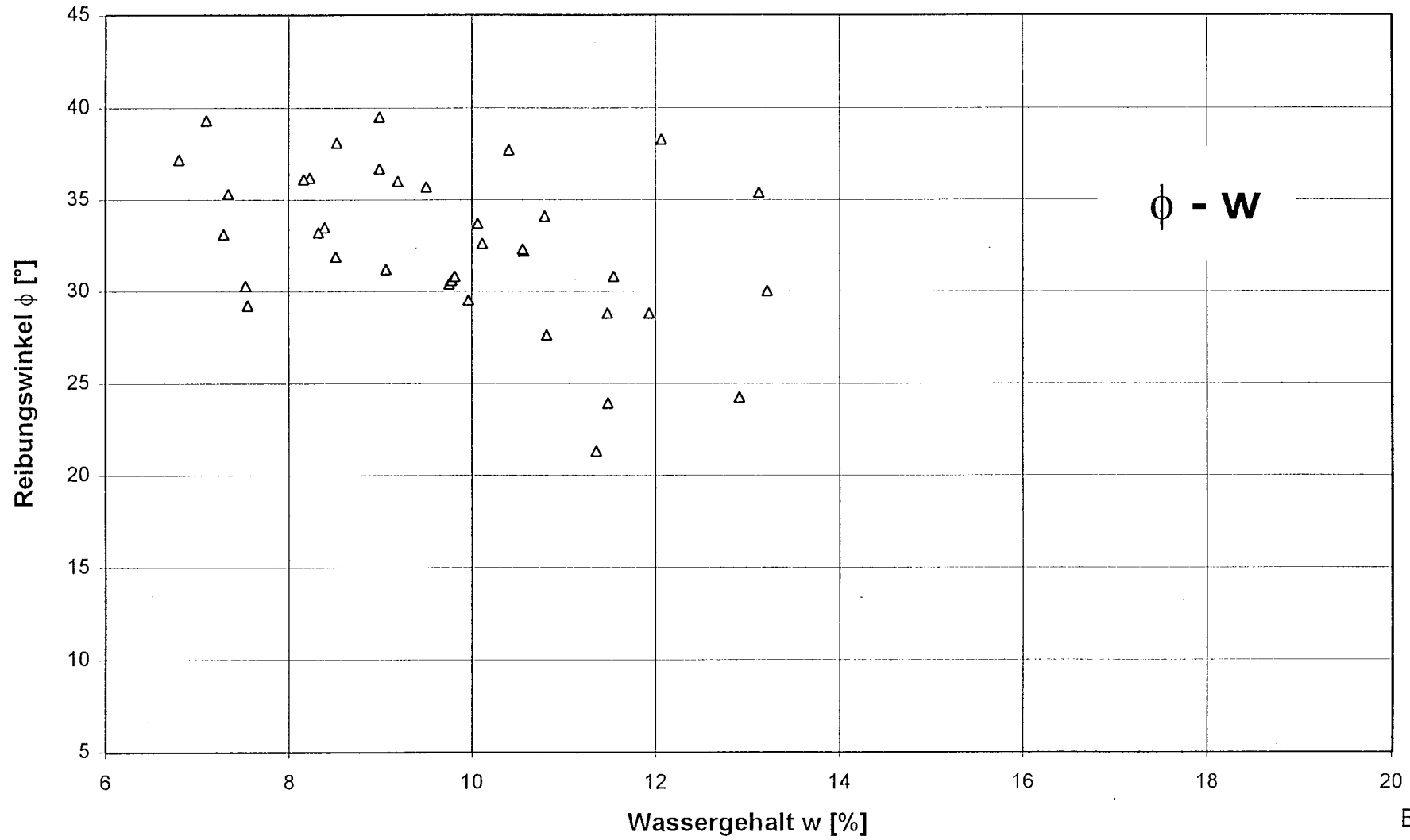


Bild 24

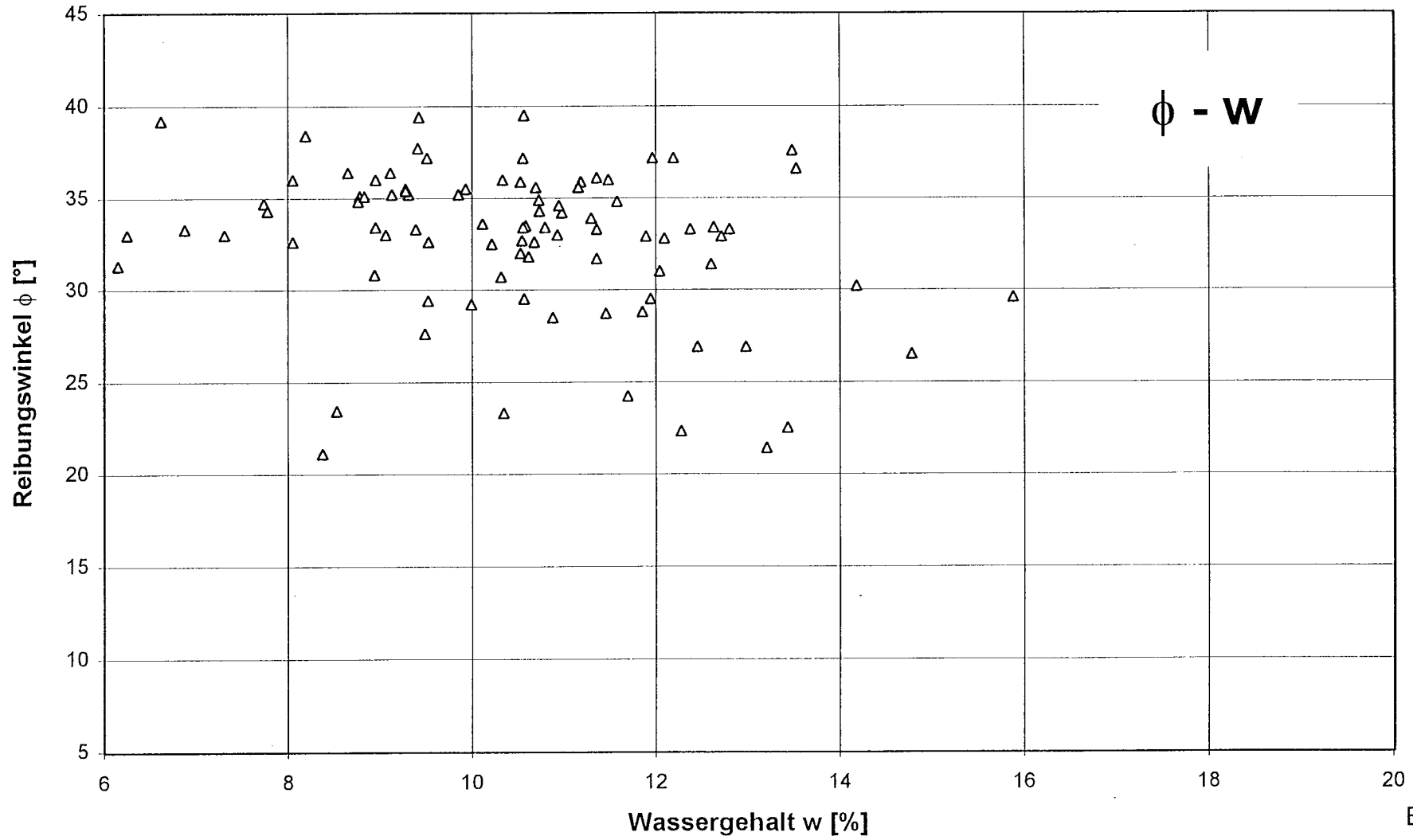
Mergel $40\% < a(0,06) \leq 60\%$ (135 Versuche)



Mergel $15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$ (37 Versuche)



Mergel $26\% < a(0,06) \leq 33\%$ (90 Versuche)



Mergel $33\% < a(0,06) \leq 40\%$ (98 Versuche)

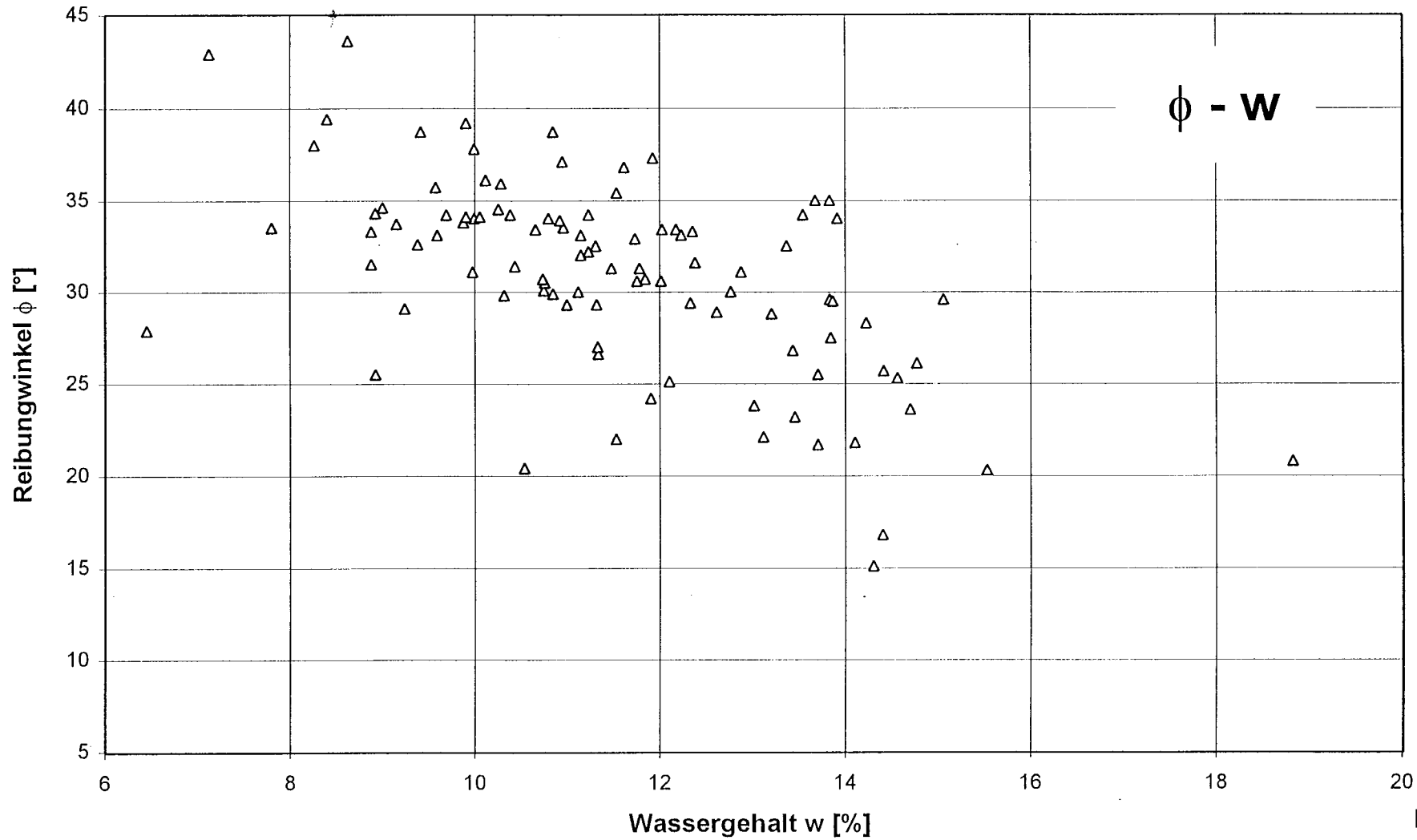
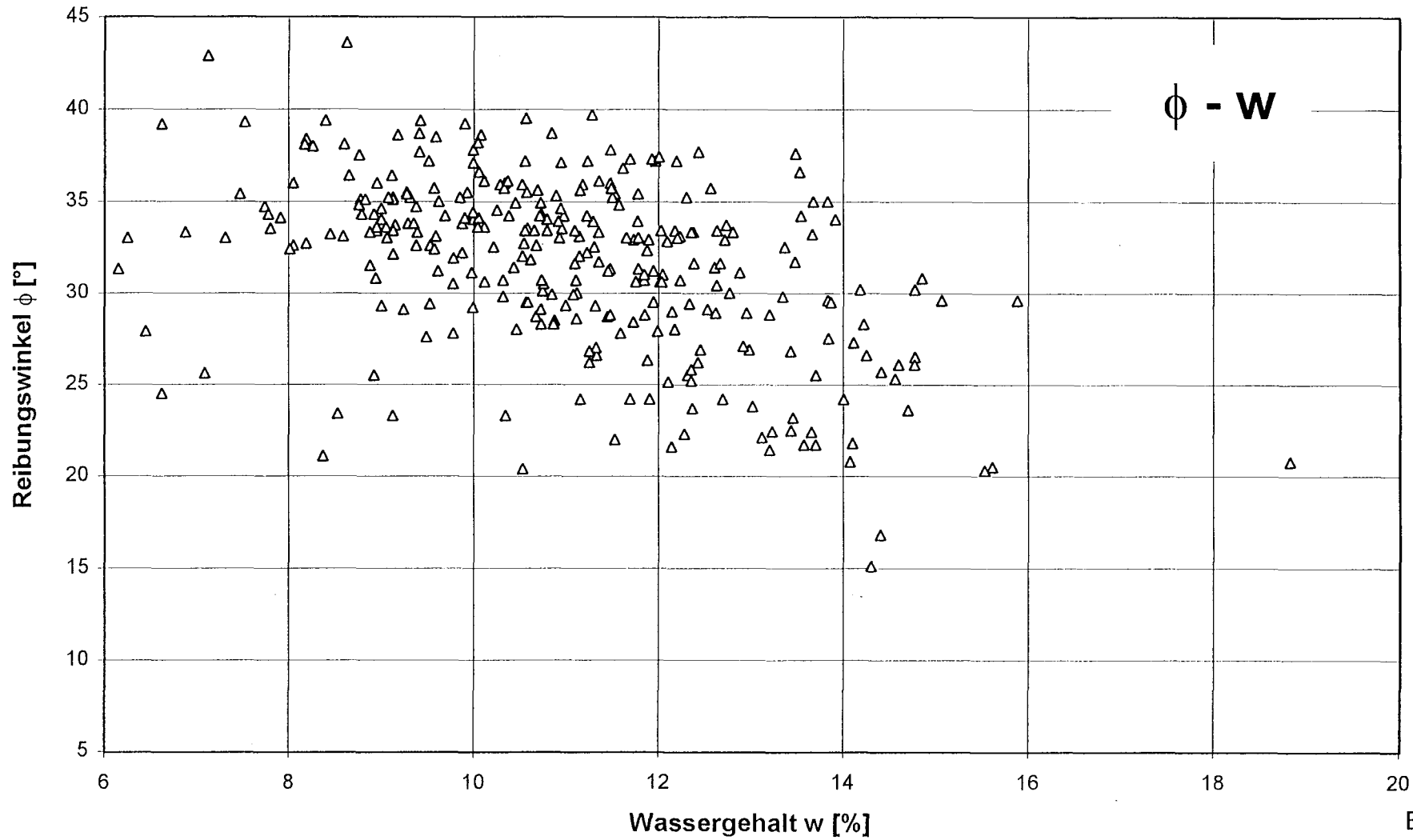
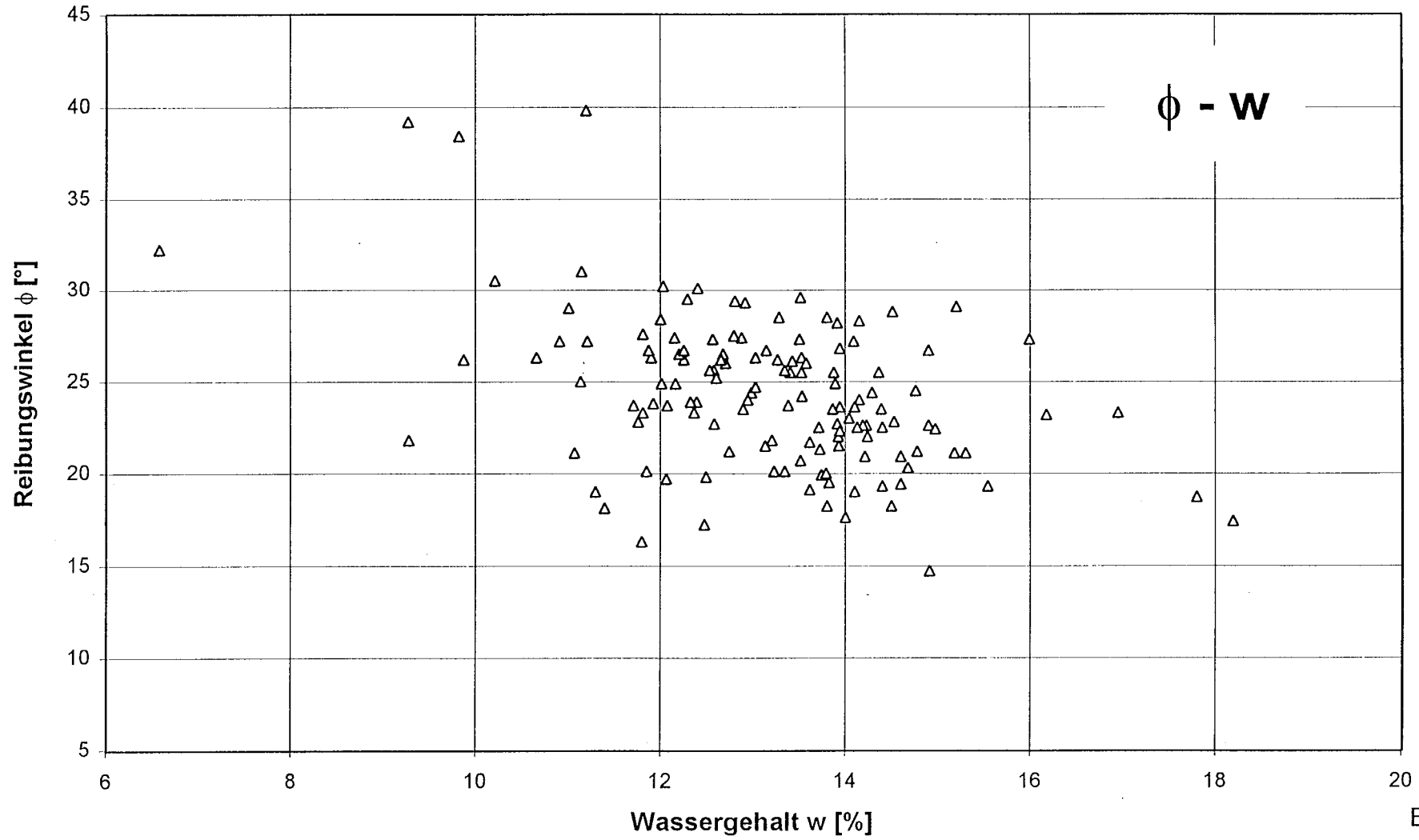


Bild 28

Mergel $26\% < a(0,06) \leq 40\%$ (305 Versuche)



Mergel $40\% < a(0,06) \leq 60\%$ (135 Versuche)



Mergel $15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$ (37 Versuche)

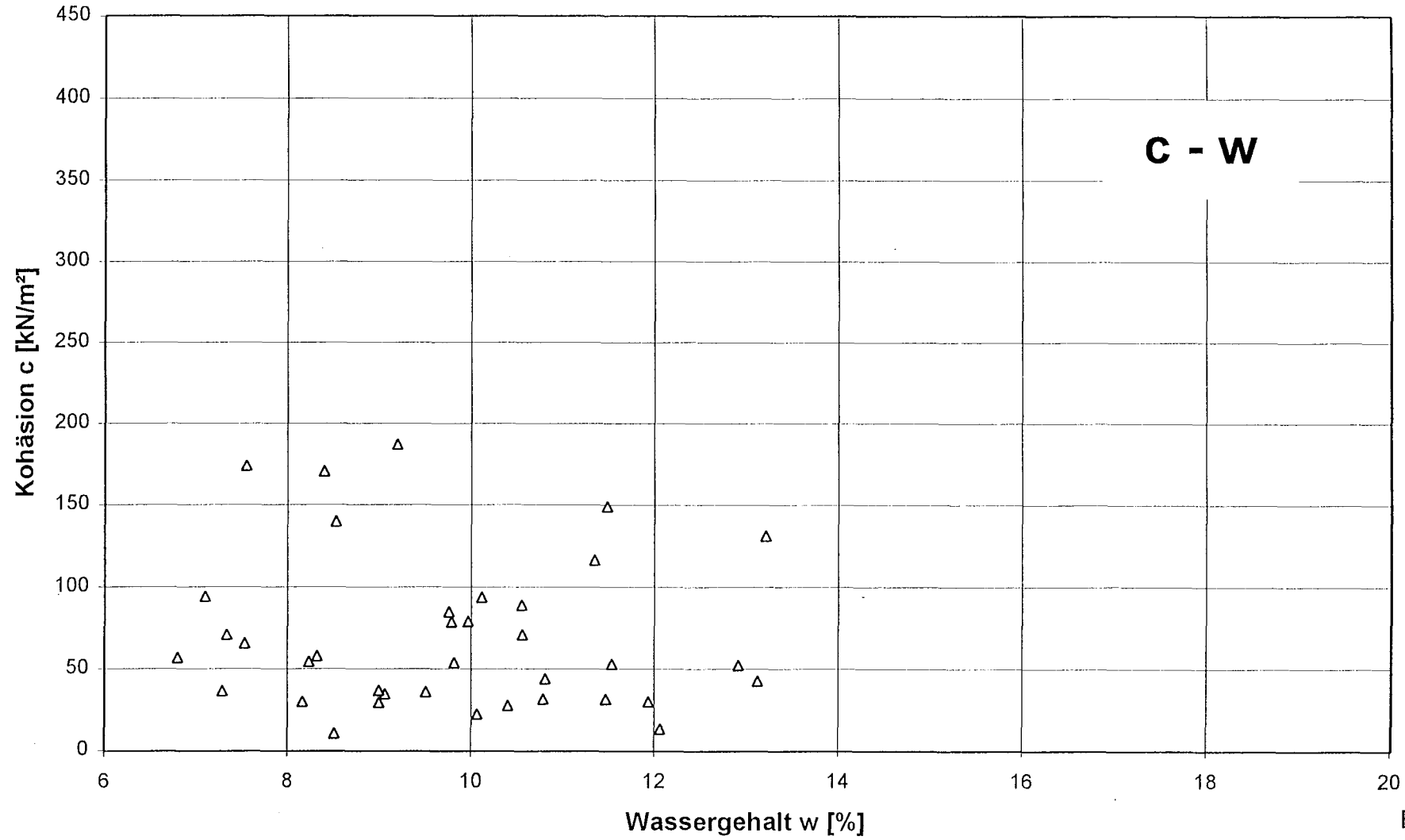


Bild 31

Mergel $26\% < a(0,06) \leq 33\%$ (90 Versuche)

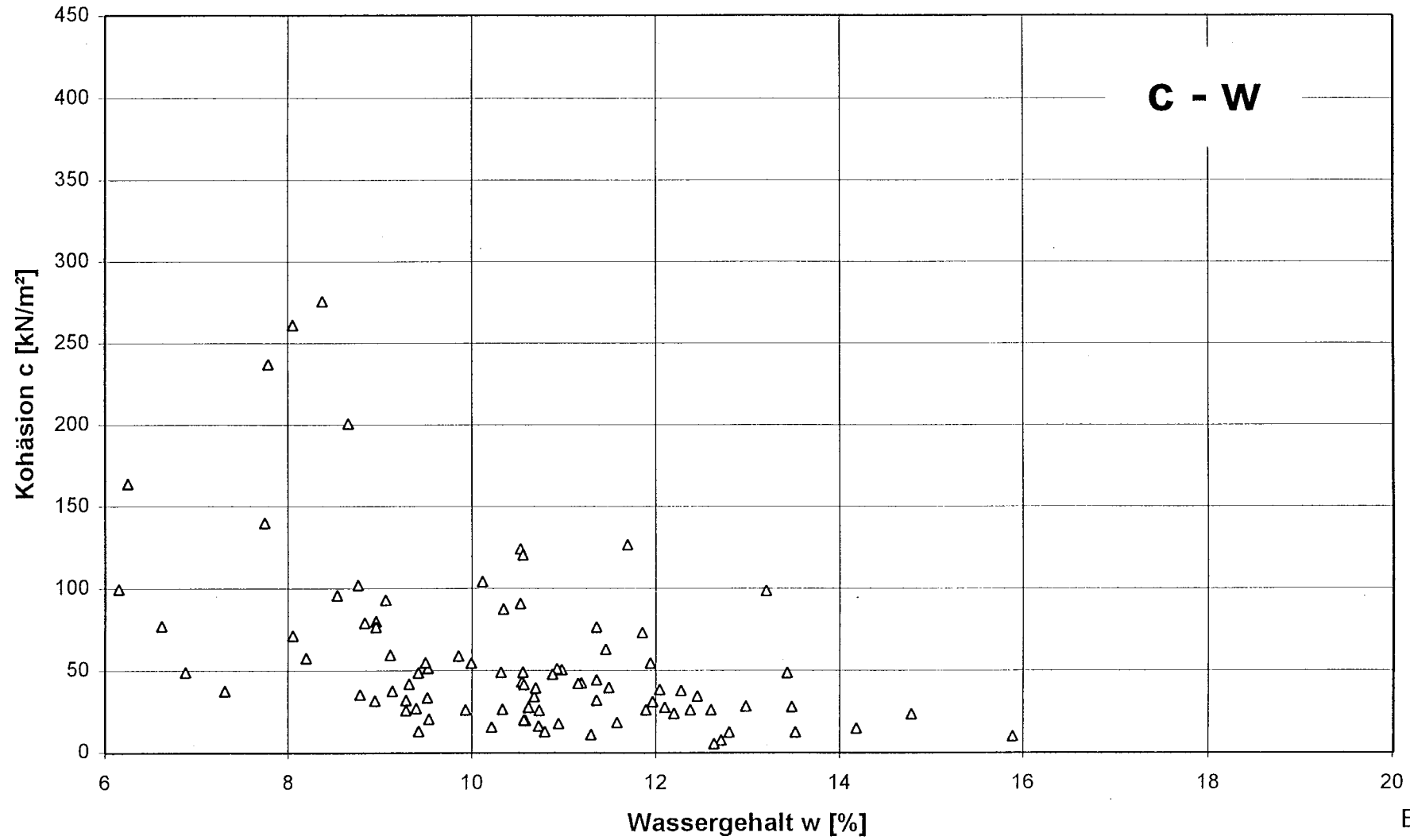
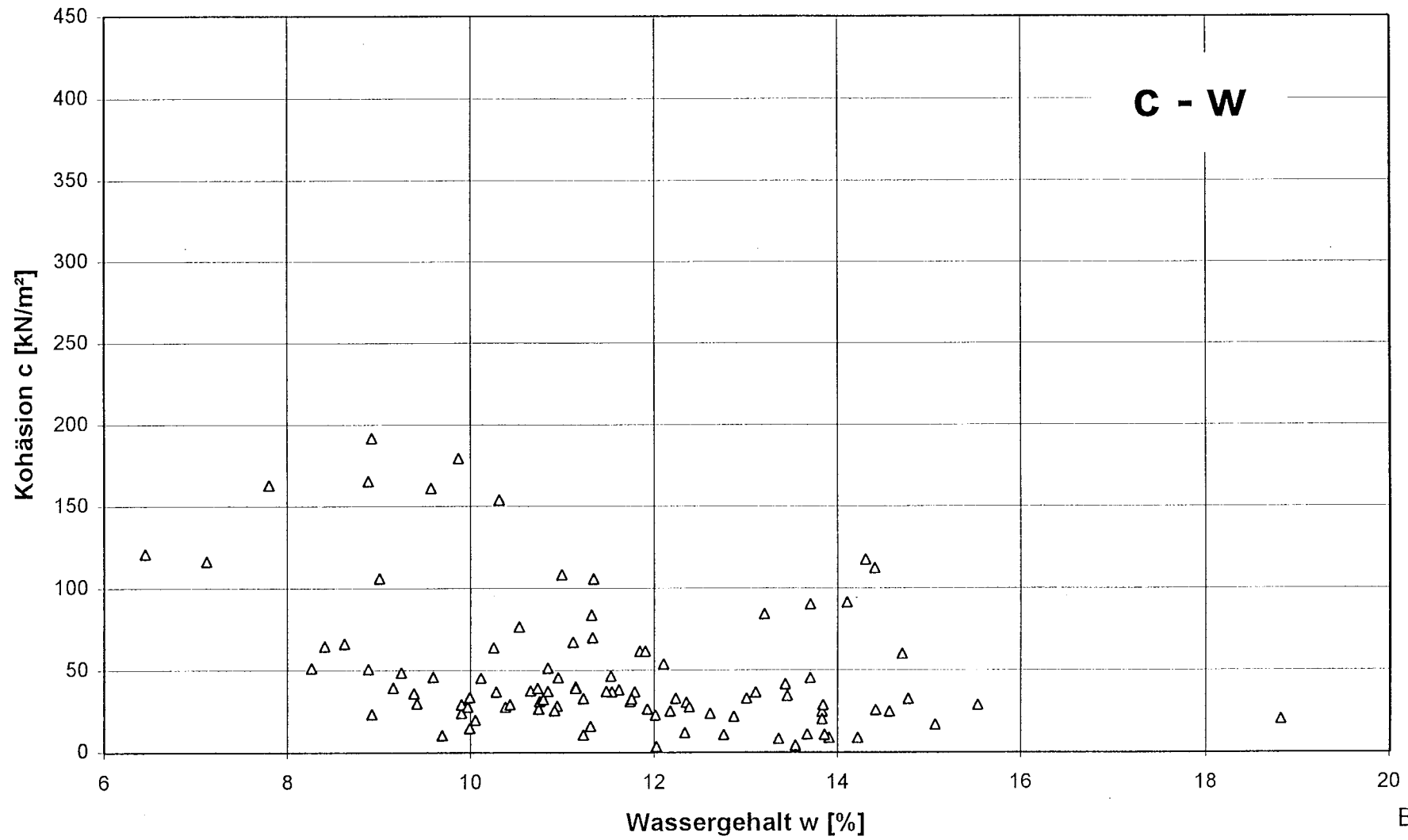


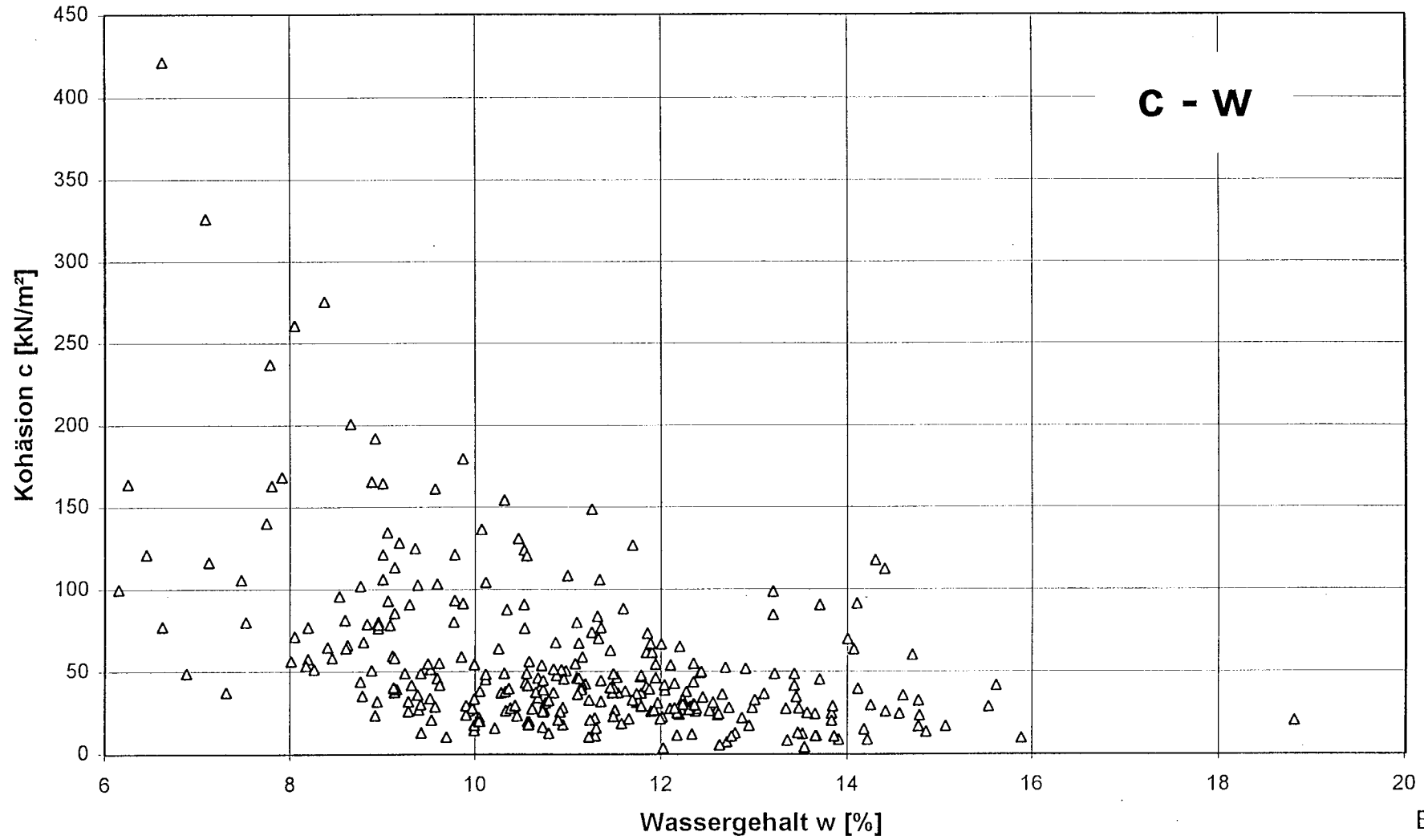
Bild 32

Mergel $33\% < a(0,06) \leq 40\%$ (98 Versuche)



Mergel $26\% < a(0,06) \leq 40\%$ (305 Versuche)

C - W



Mergel $40\% < a(0,06) \leq 60\%$ (135 Versuche)

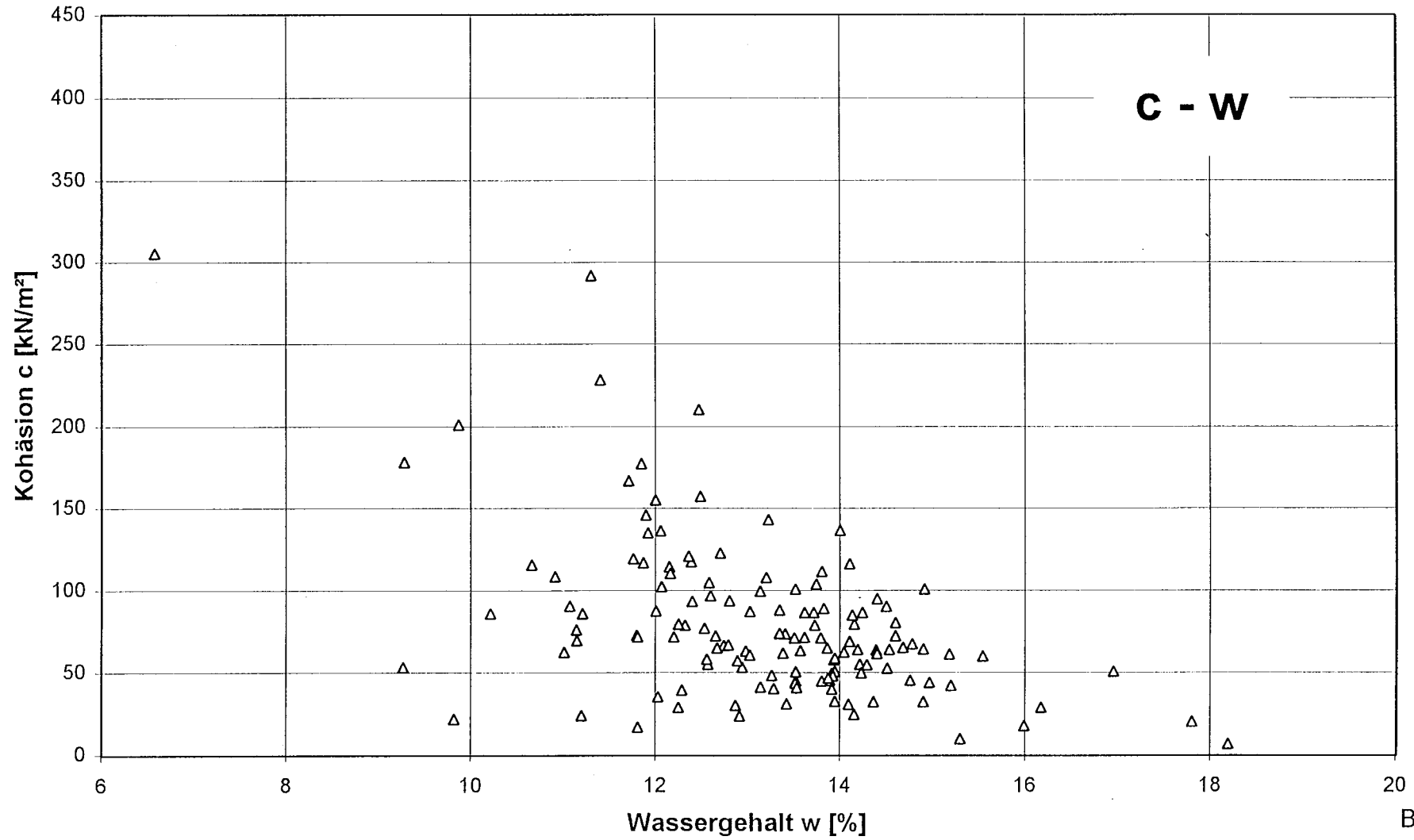
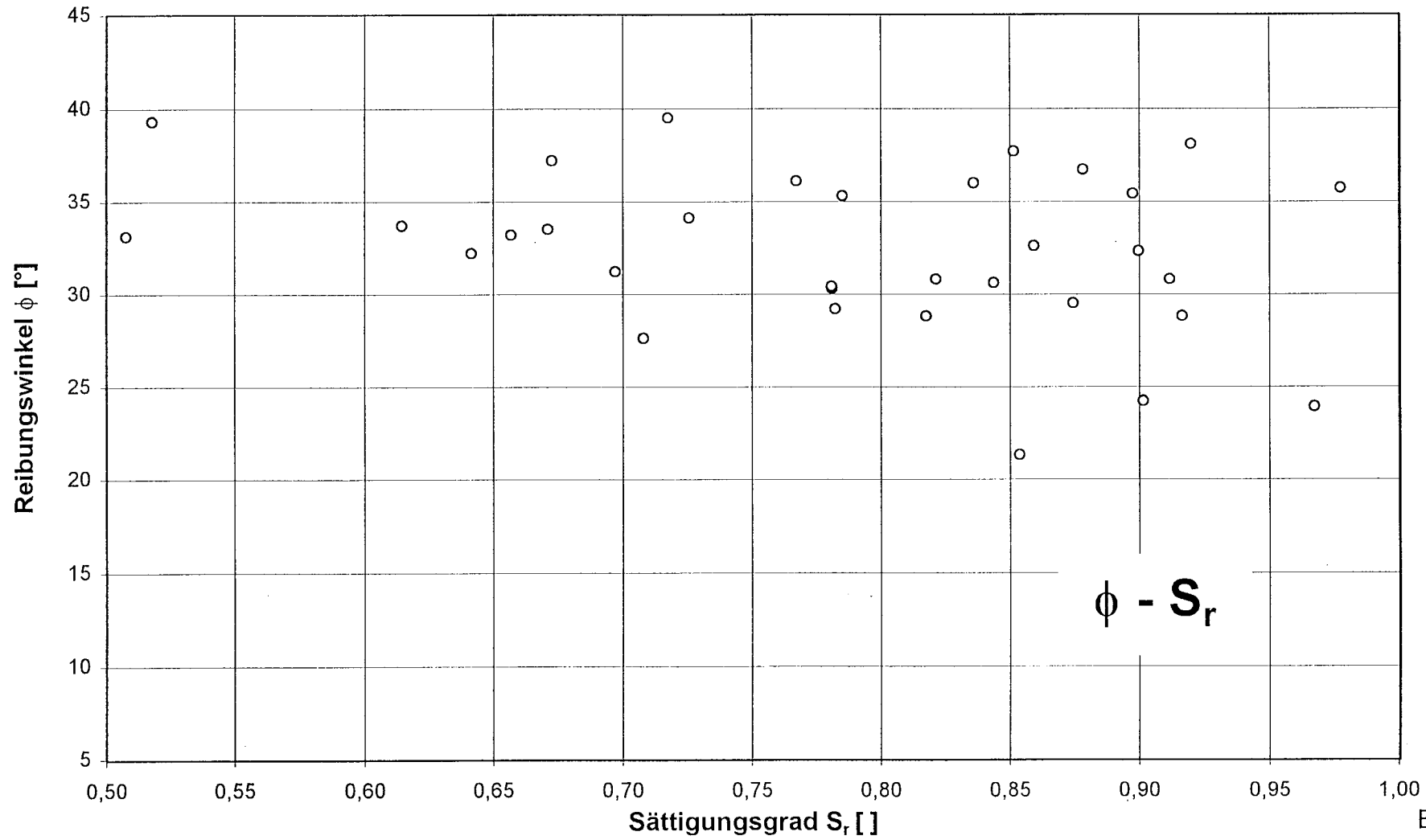


Bild 35

Mergel $15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$ (37 Versuche)



Mergel $26\% < a(0,06) \leq 33\%$ (90 Versuche)

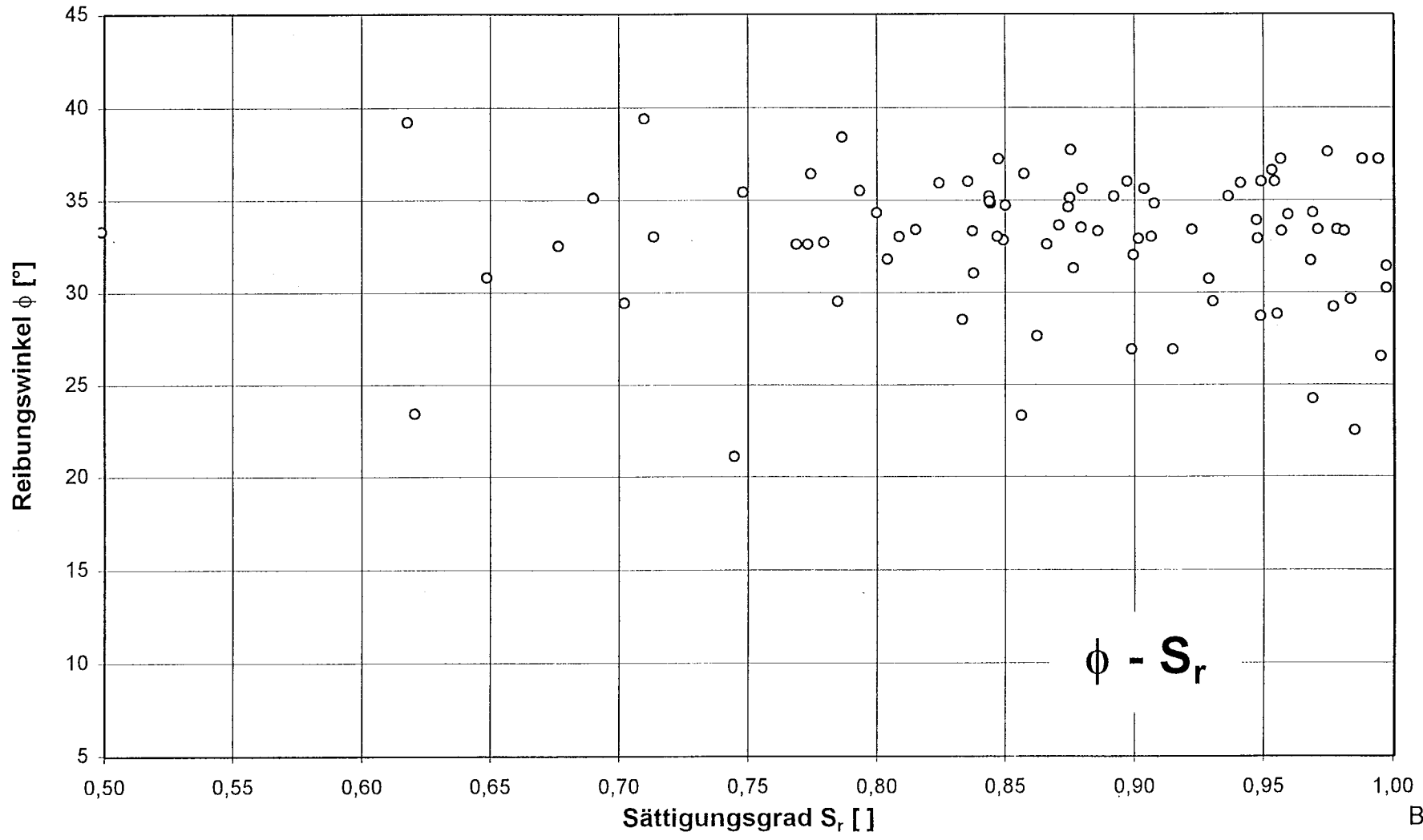


Bild 37

Mergel 33% < a(0,06) ≤ 40% (98 Versuche)

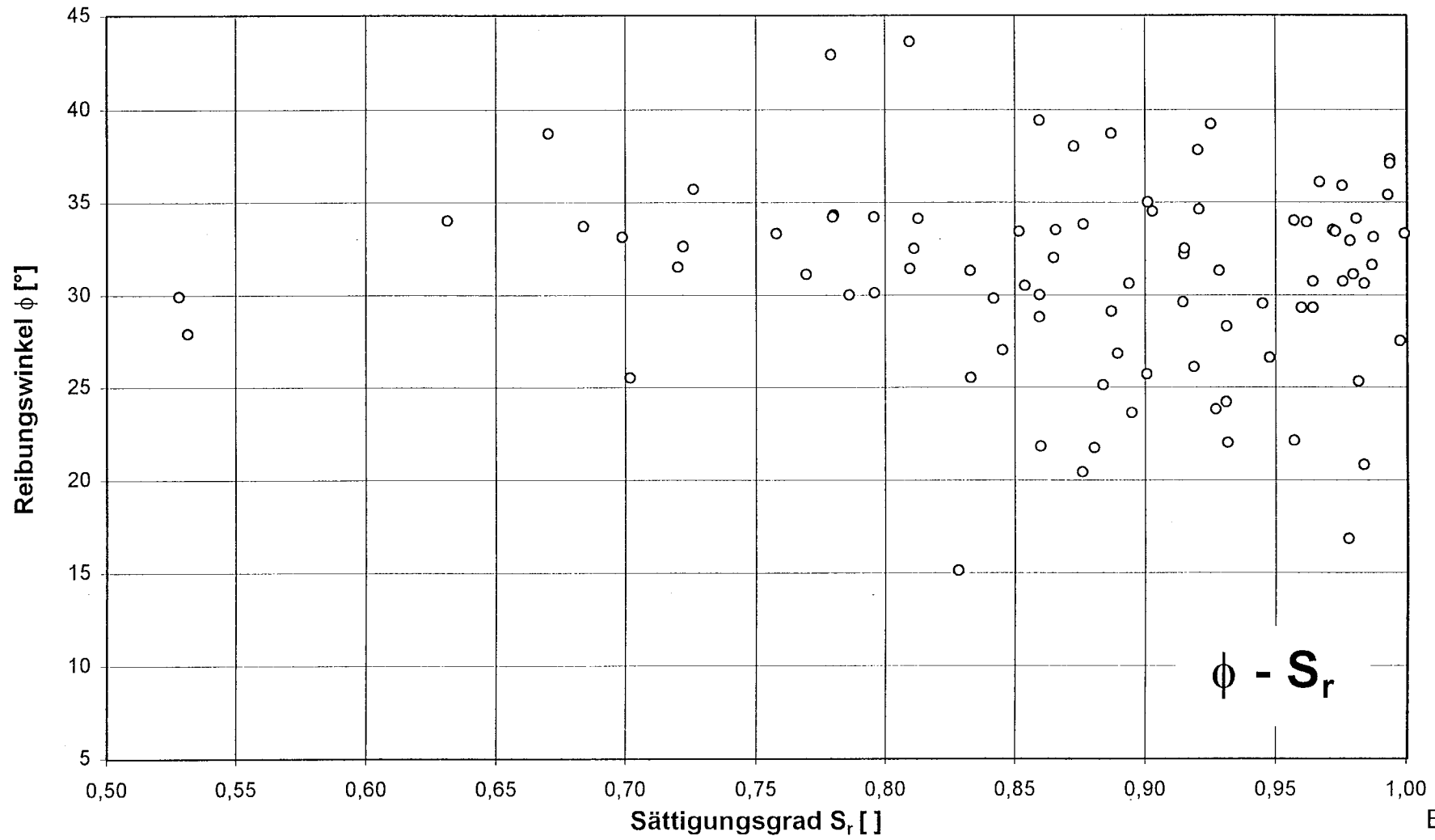


Bild 38

Mergel $26\% < a(0,06) \leq 40\%$ (305 Versuche)

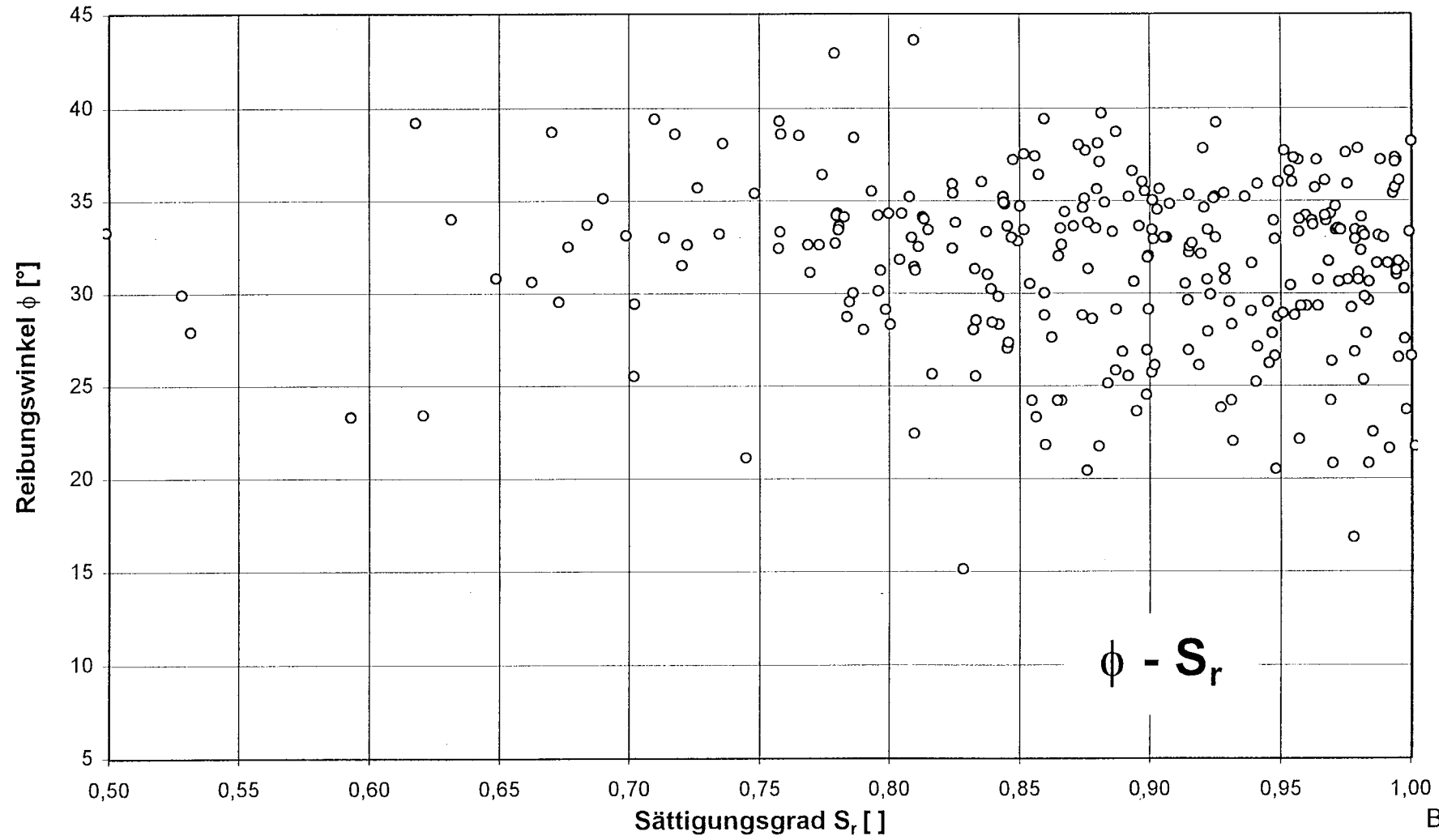


Bild 39

Mergel $40\% < a(0,06) \leq 60\%$ (135 Versuche)

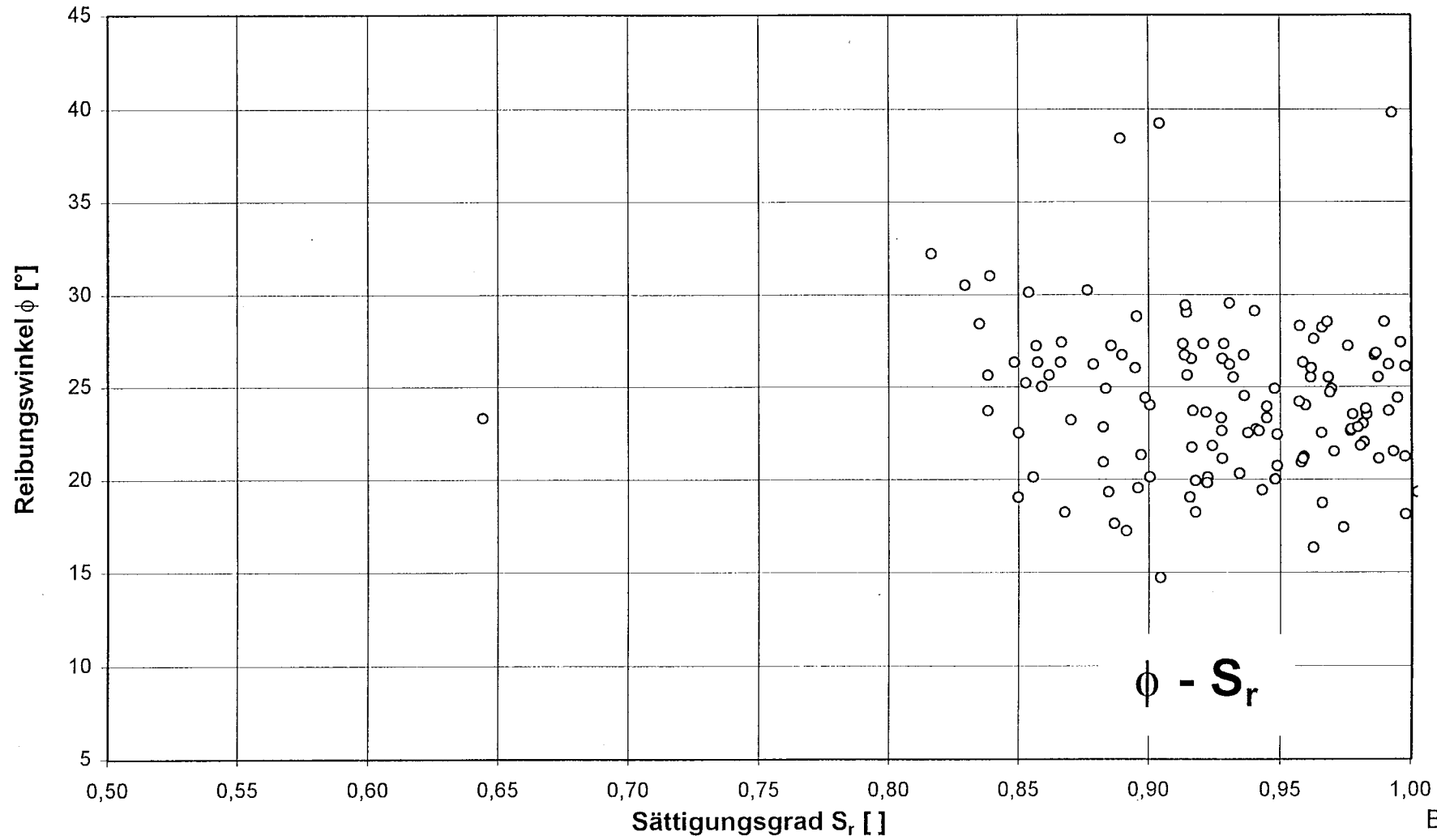
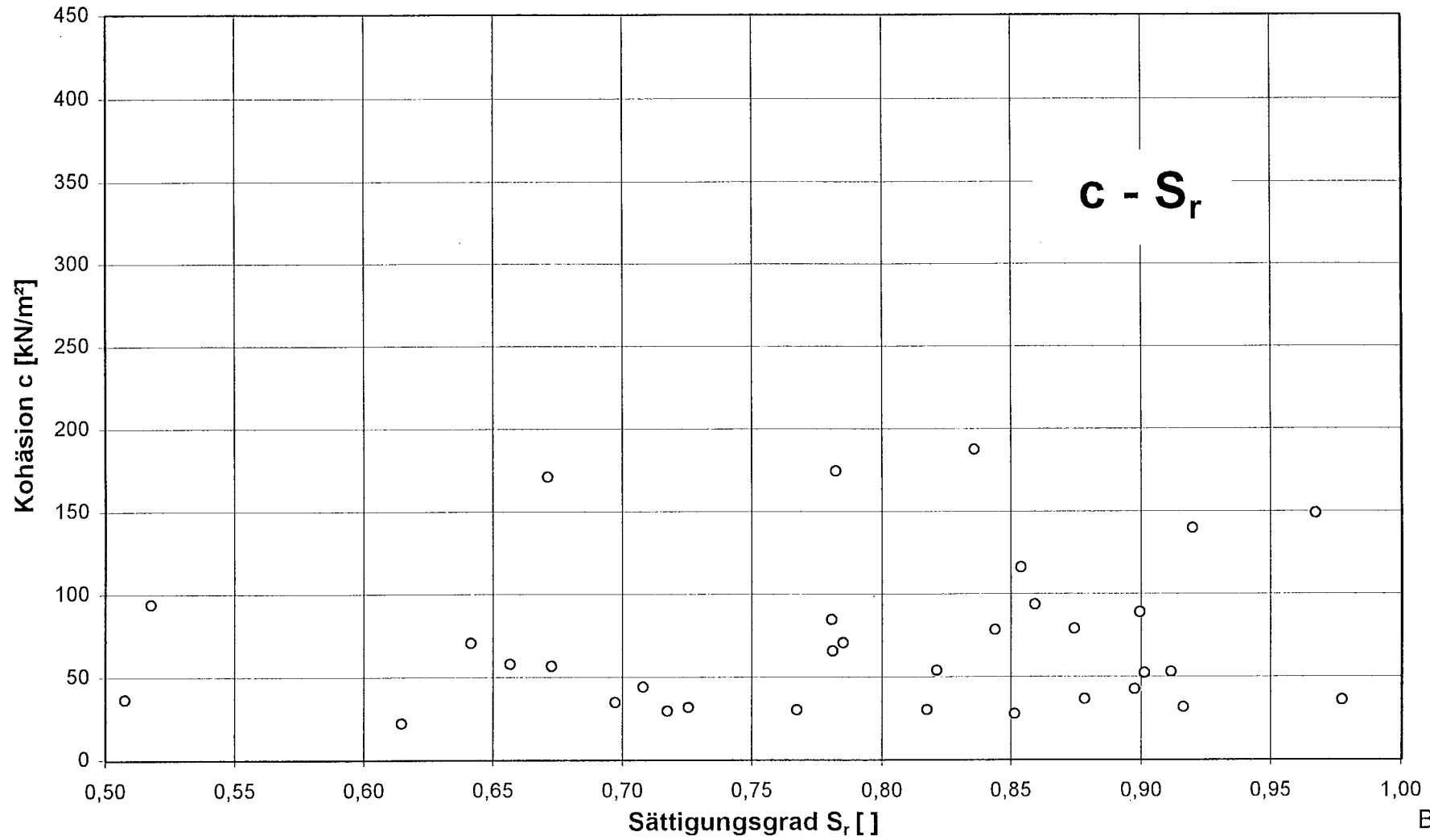


Bild 40

Mergel $15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$ (37 Versuche)



Mergel 26% < a(0,06) ≤ 33% (90 Versuche)

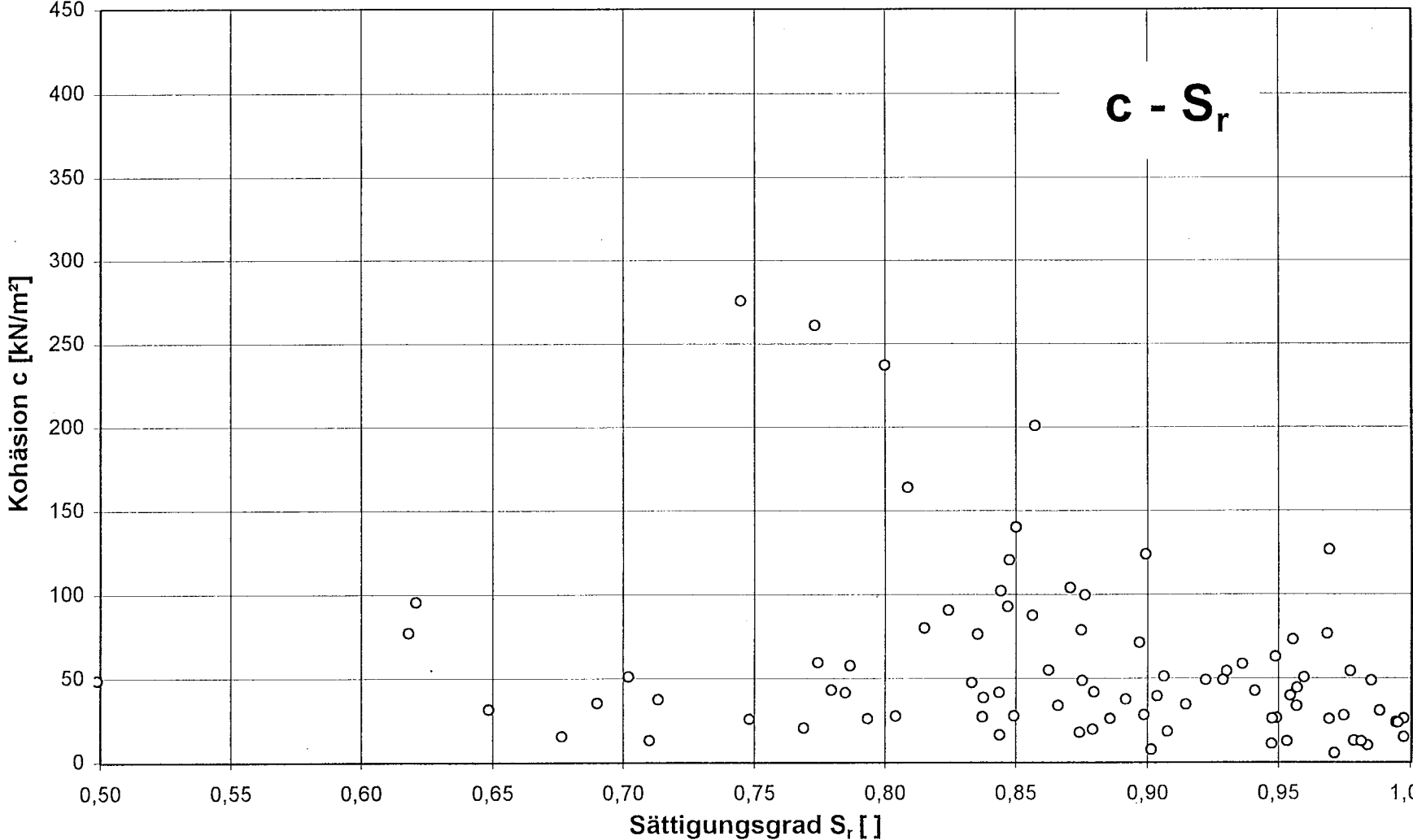


Bild 42

Mergel $33\% < a(0,06) \leq 40\%$ (98 Versuche)

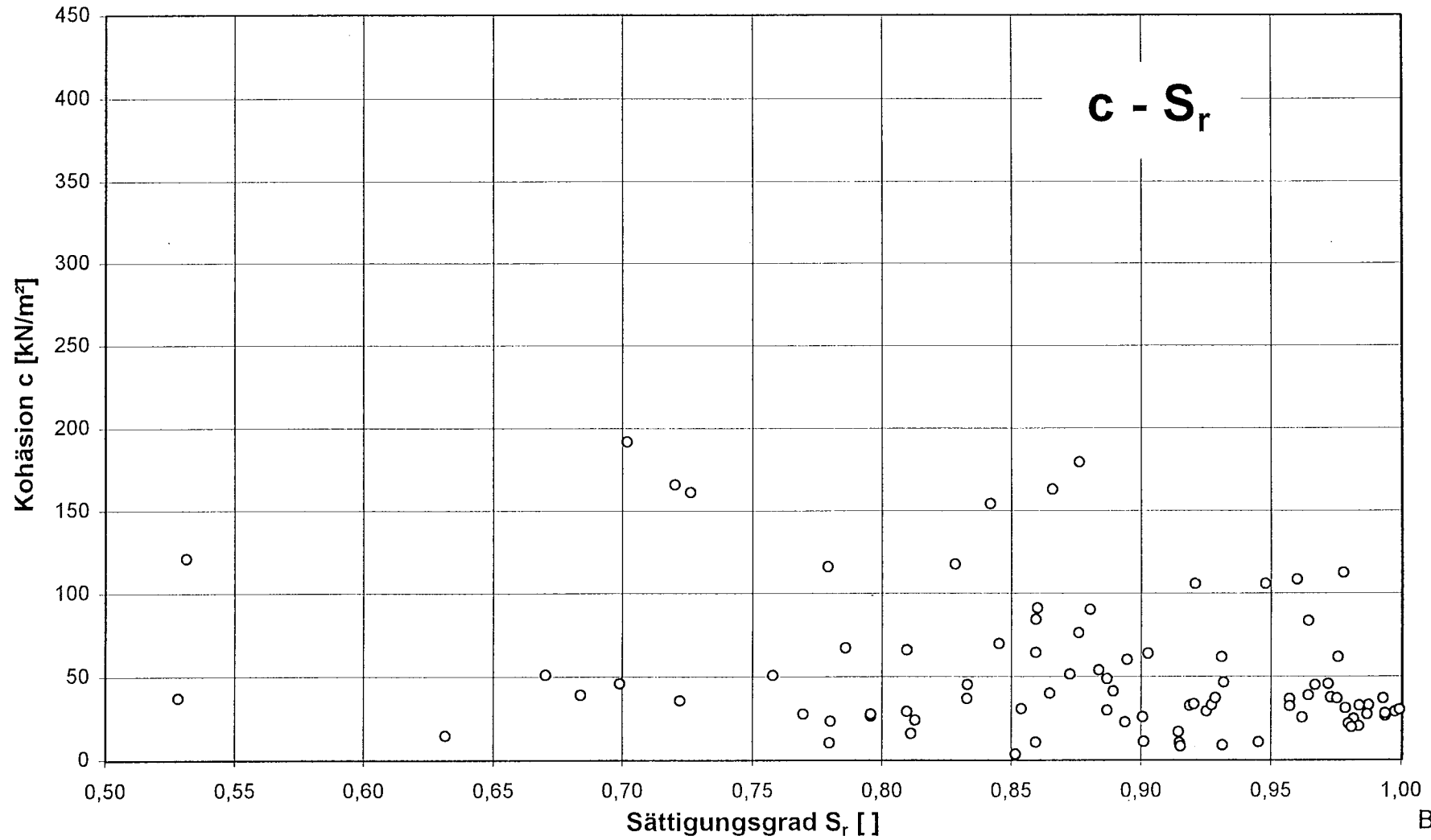


Bild 43

Mergel 26% < a(0,06) ≤ 40% (305 Versuche)

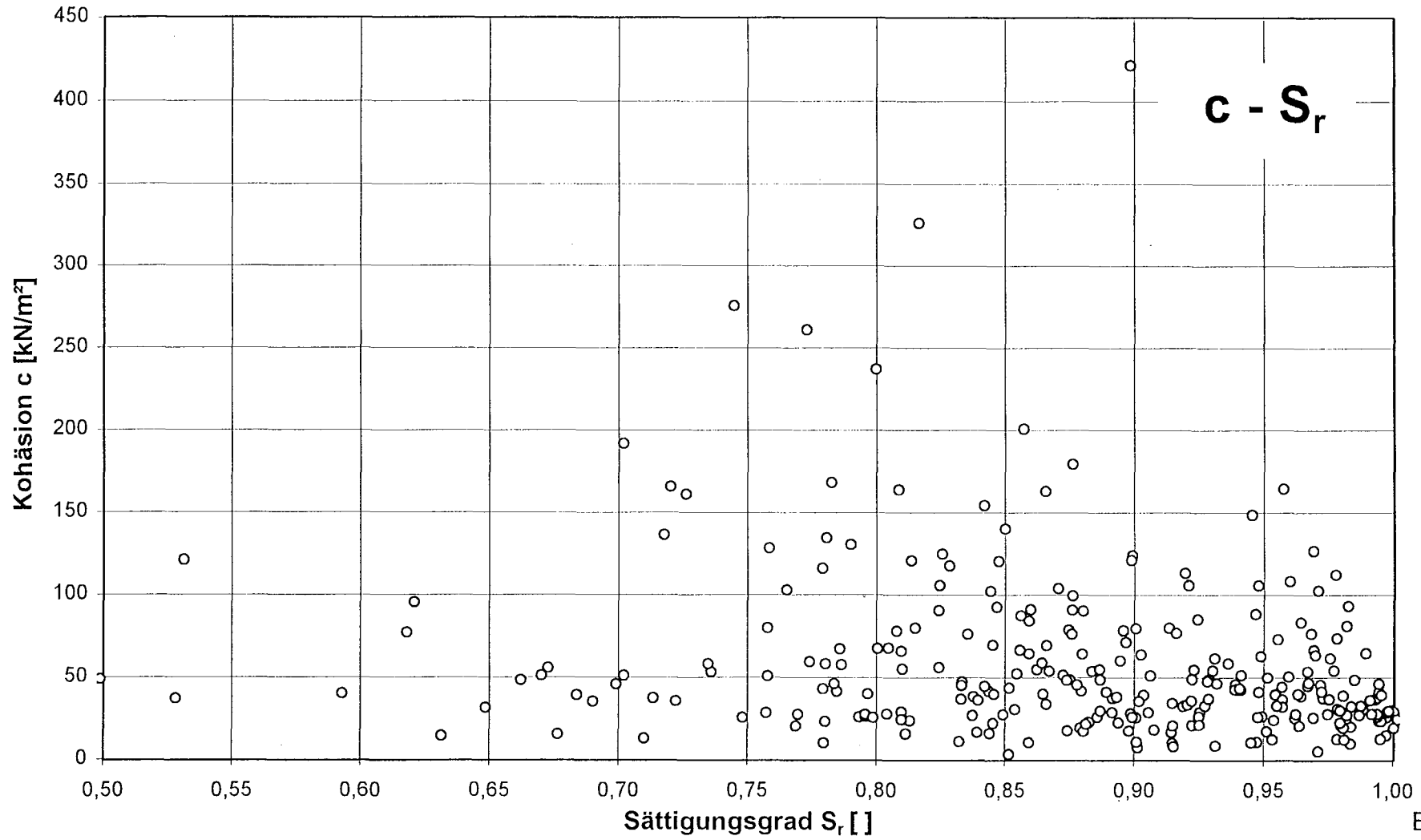


Bild 44

Mergel $40\% < a(0,06) \leq 60\%$ (135 Versuche)

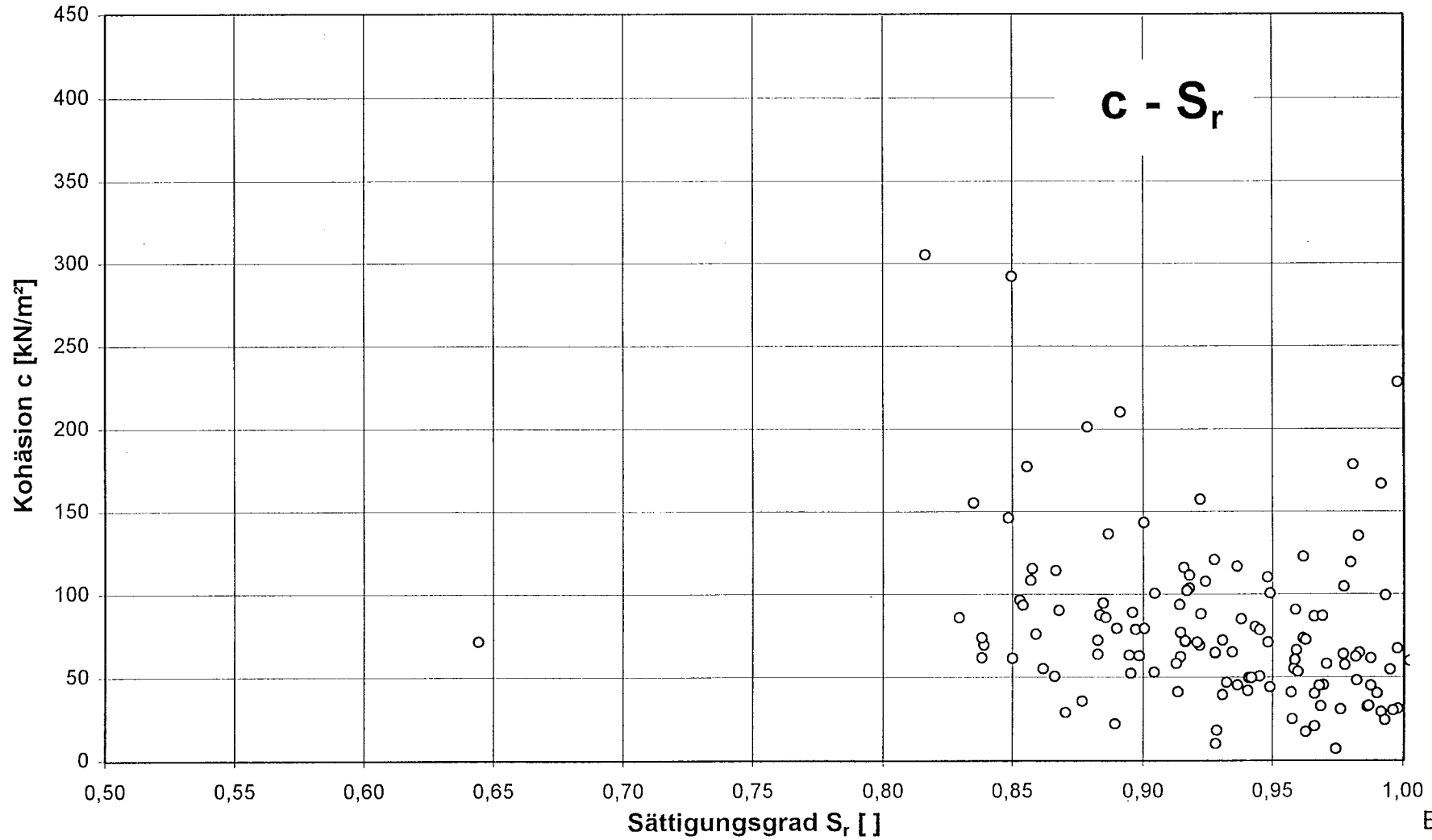


Bild 45

Mergel $15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$ (37 Versuche)

$\tau_{200} - e$

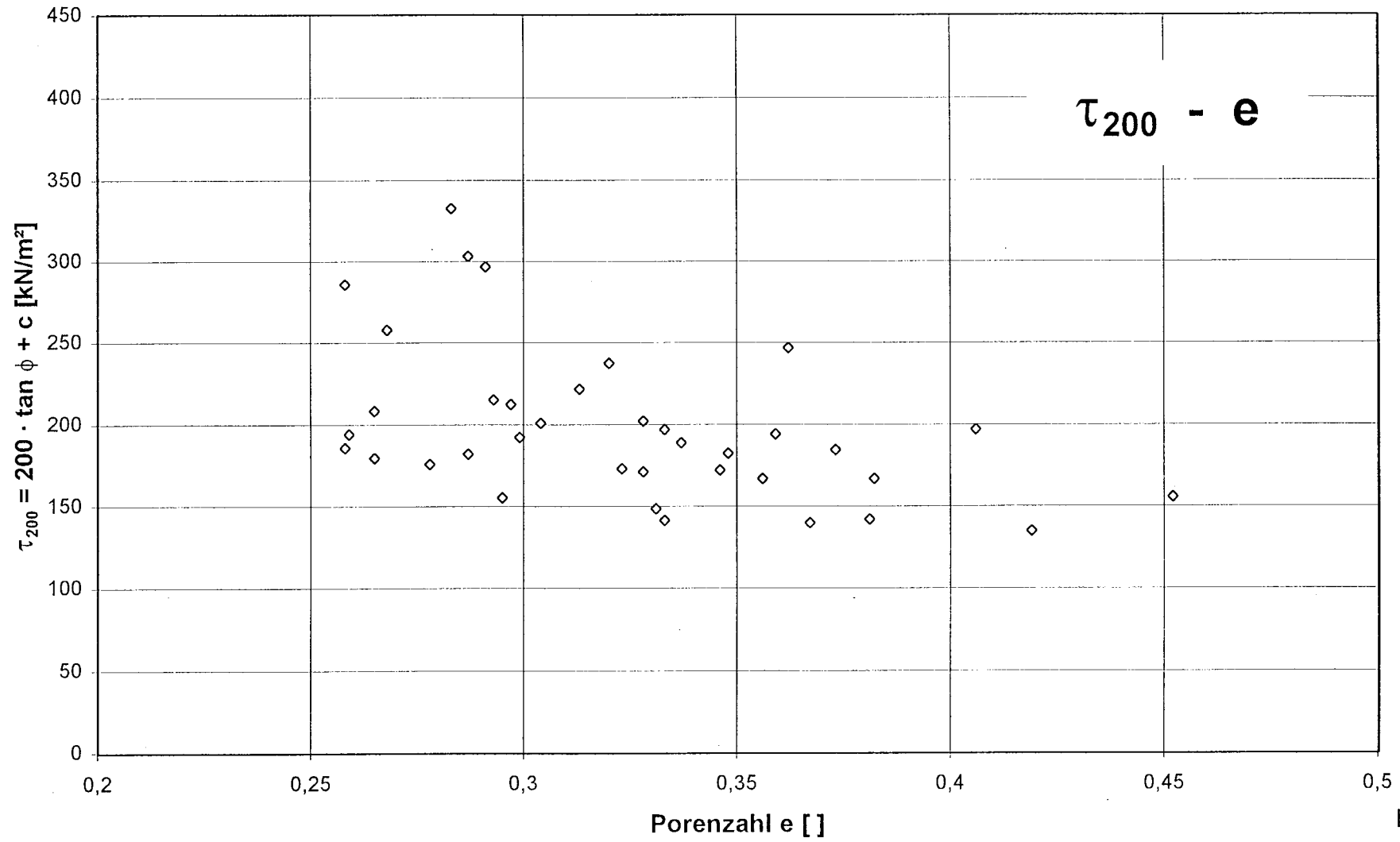


Bild 46

Mergel 26% < a(0,06) ≤ 33% (90 Versuche)

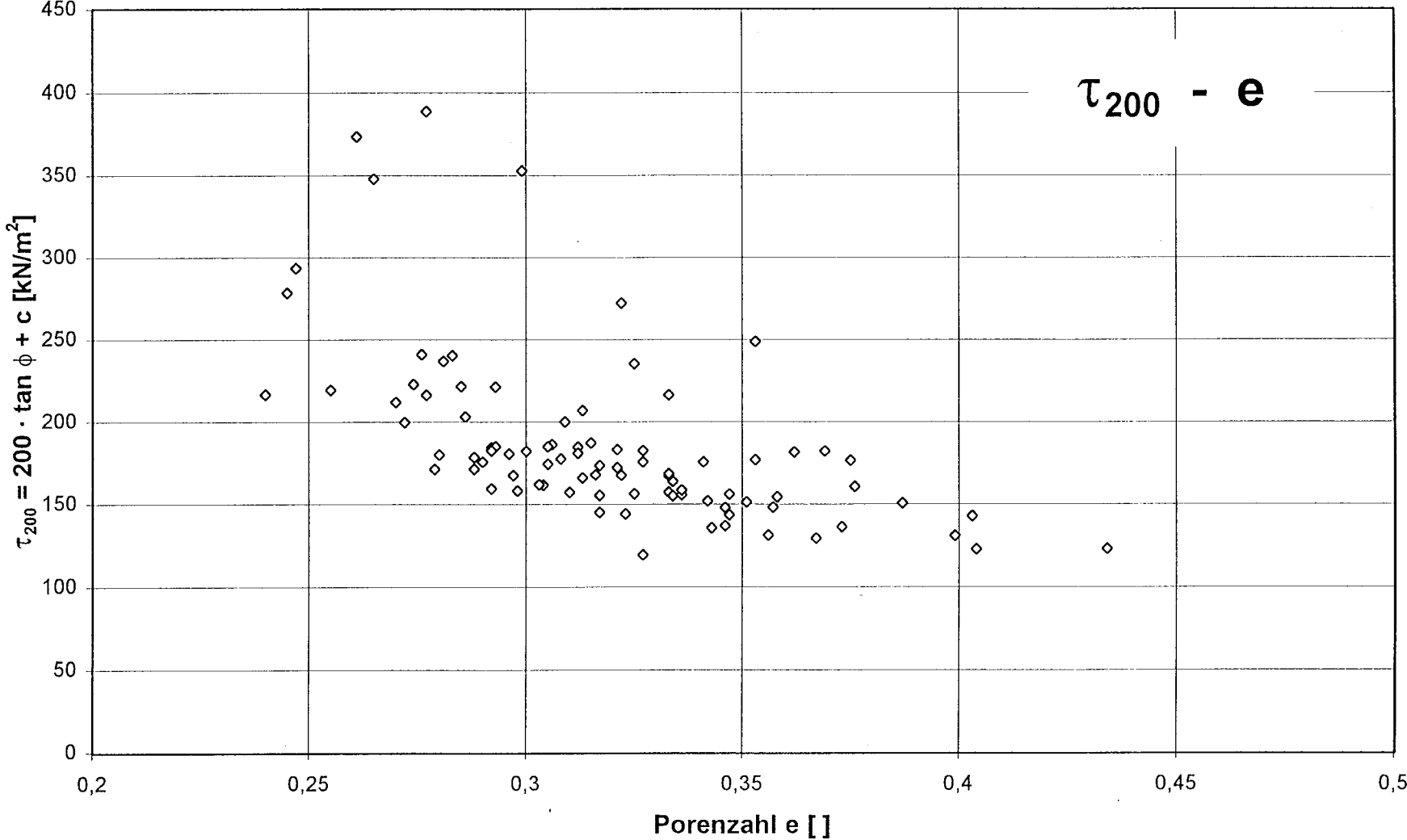


Bild 47

Mergel $26\% < a(0,06) \leq 40\%$ (305 Versuche)

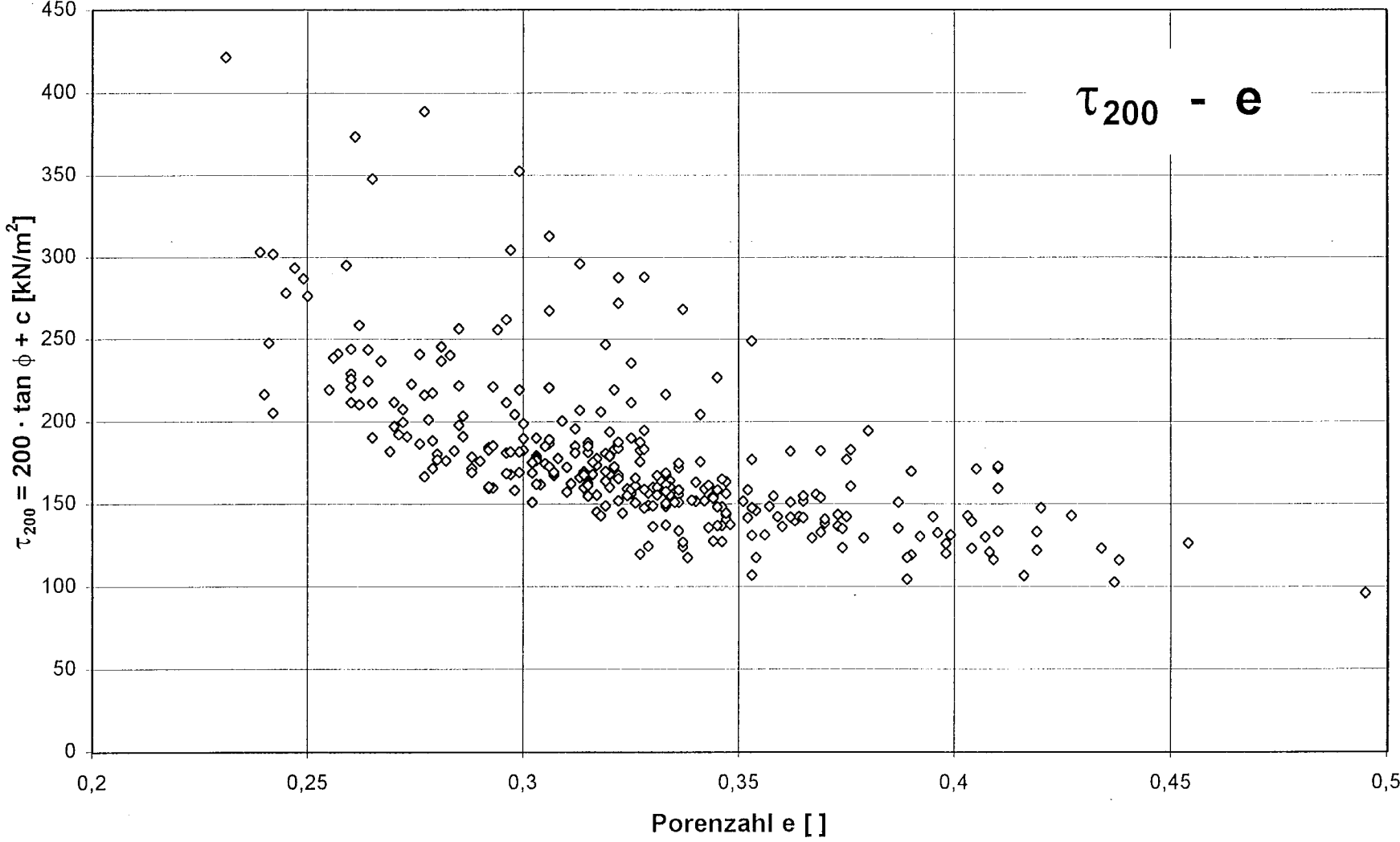


Bild 49

Mergel 40% < a(0,06) ≤ 60% (135 Versuche)

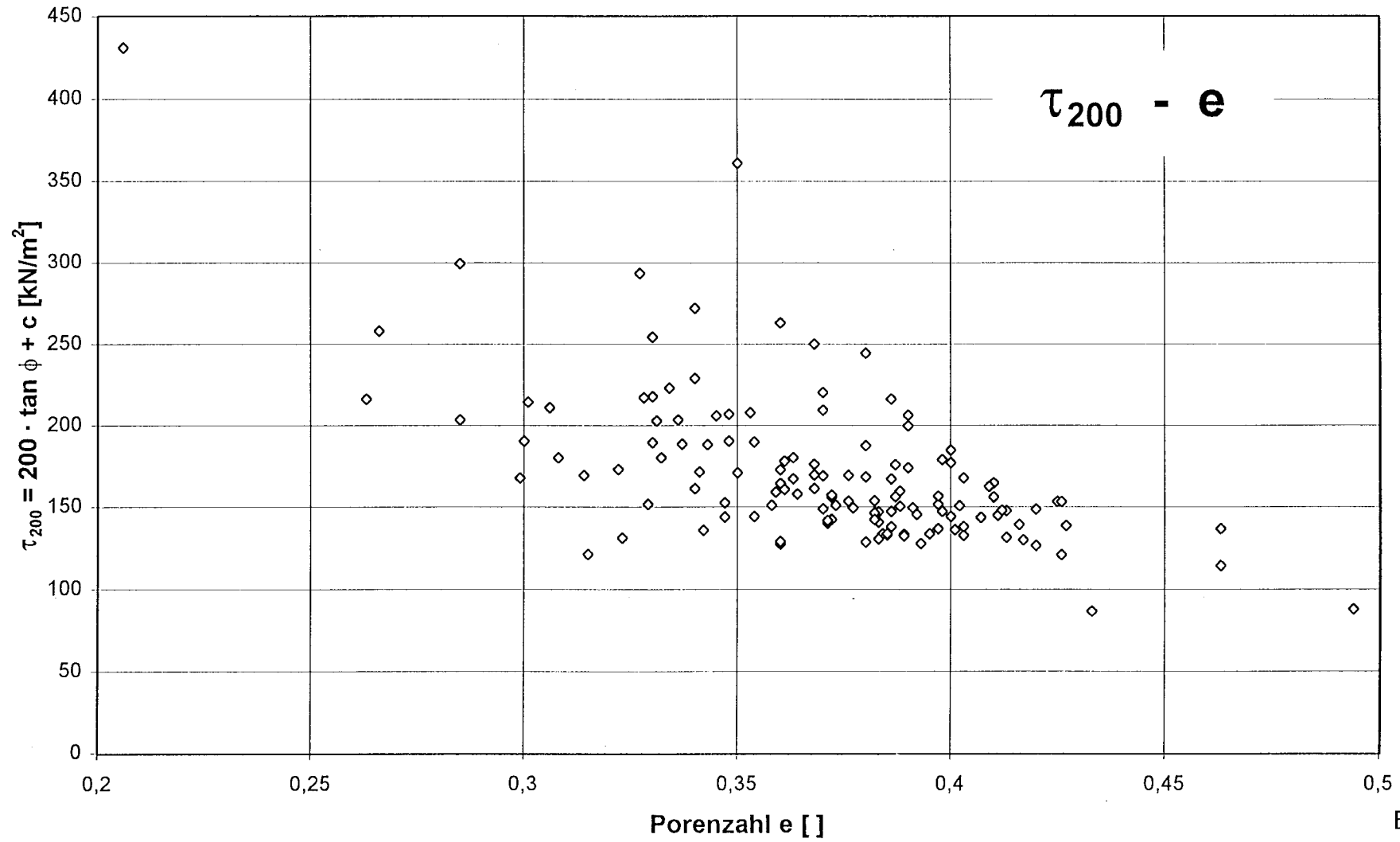


Bild 50

Mergel $15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$ (37 Versuche)

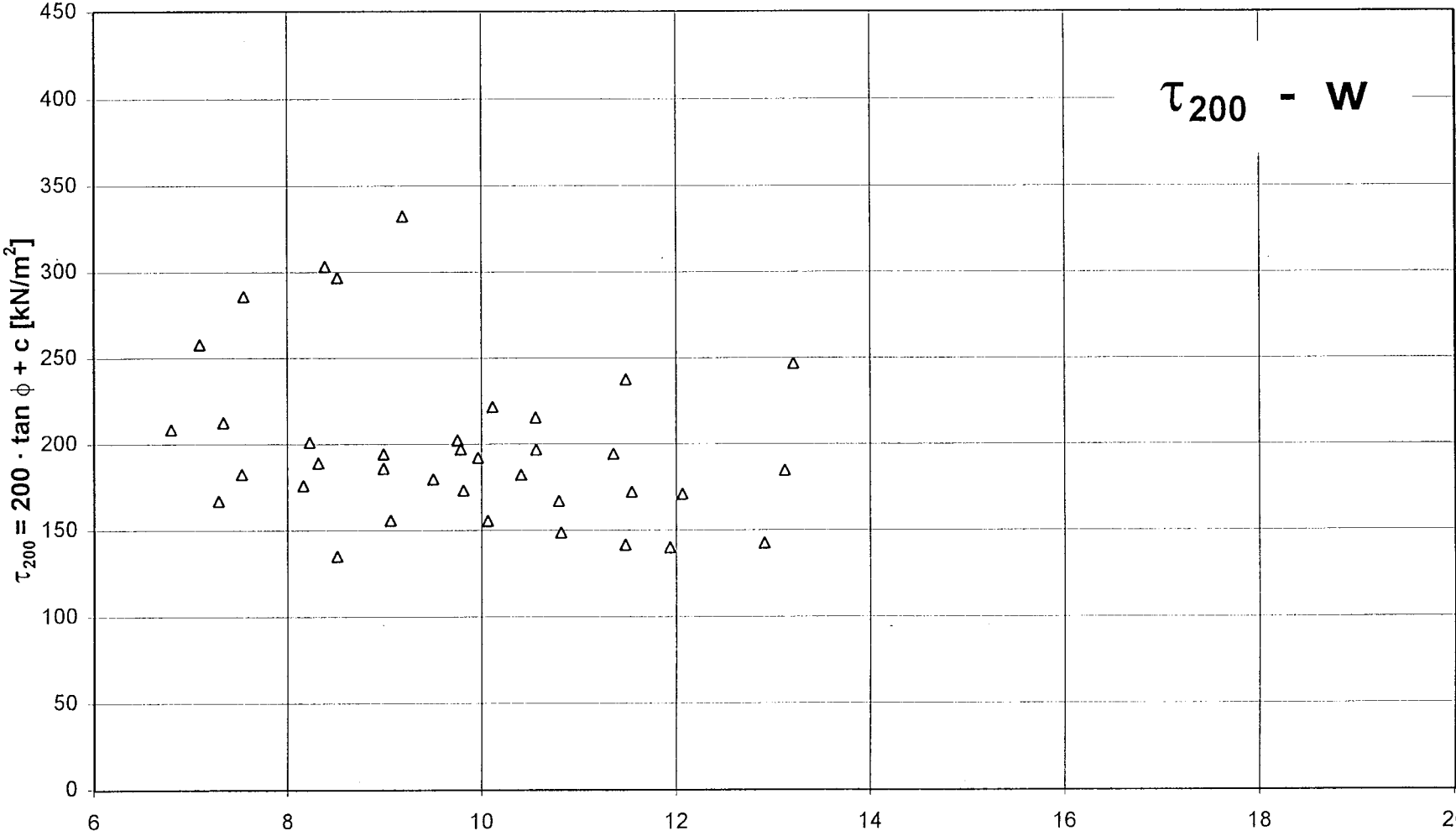


Bild 51

Mergel 26% < a(0,06) ≤ 33% (90 Versuche)

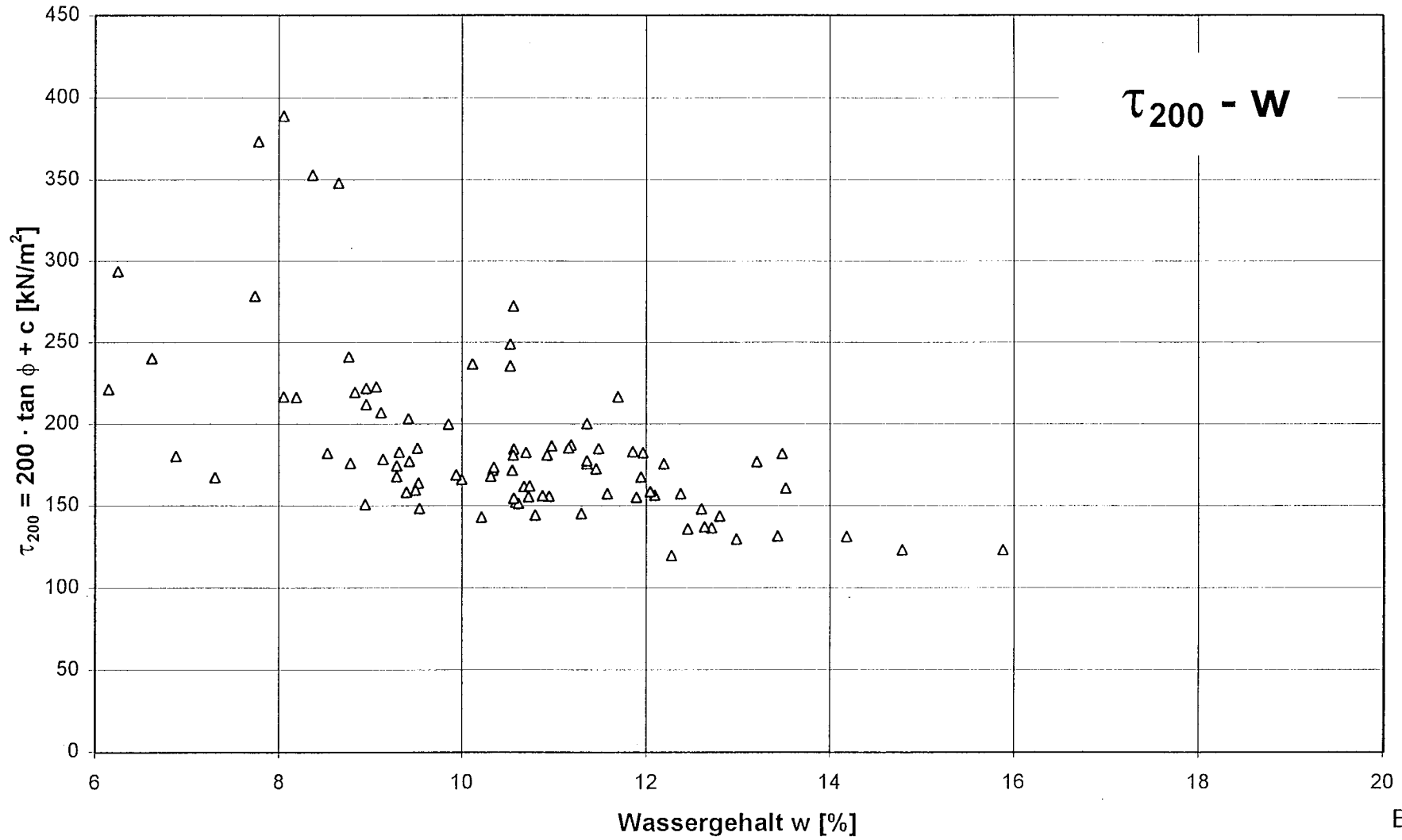


Bild 52

Mergel 33% < a(0,06) ≤ 40% (98 Versuche)

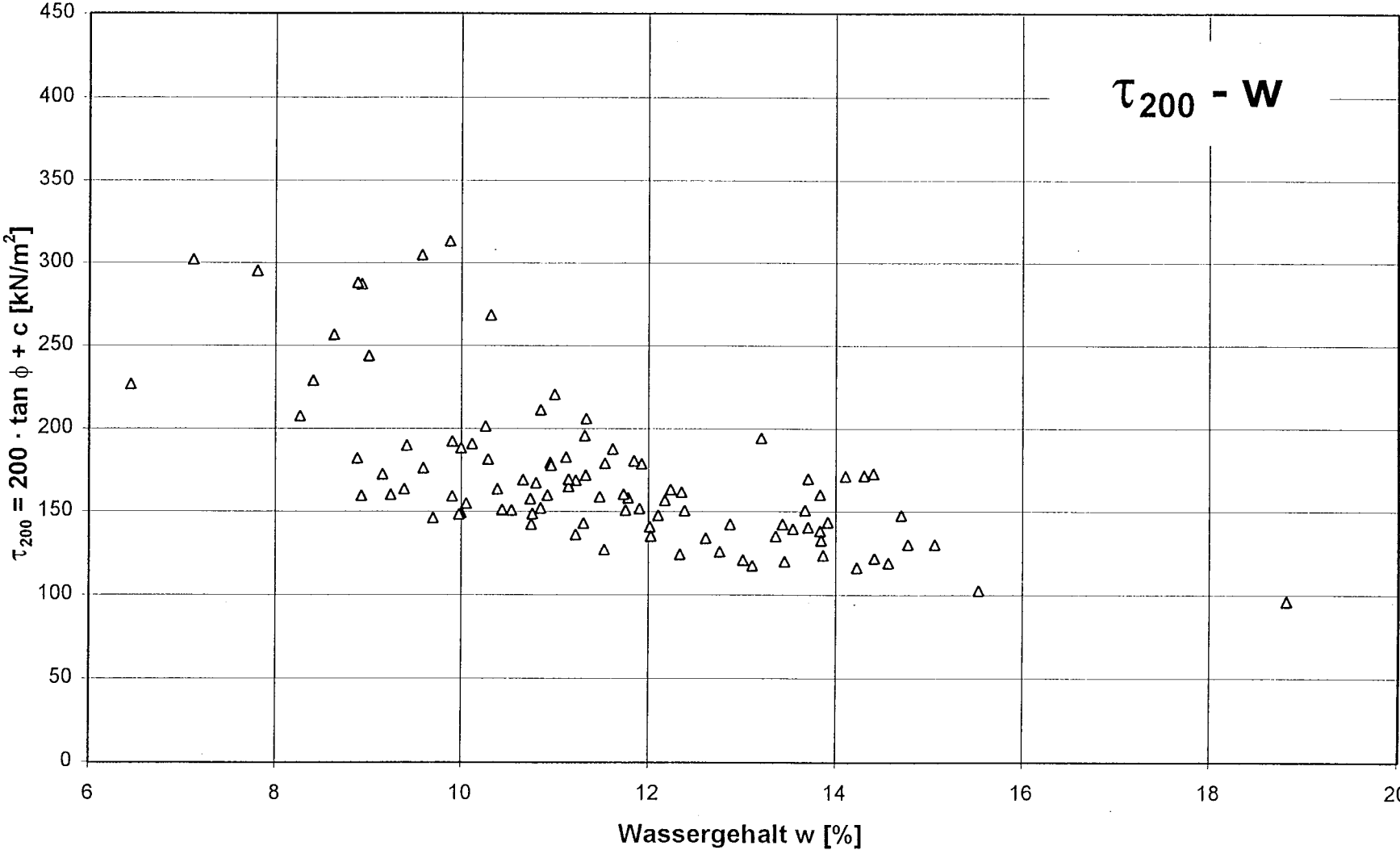


Bild 53

Mergel 26% < a(0,06) ≤ 40% (305 Versuche)

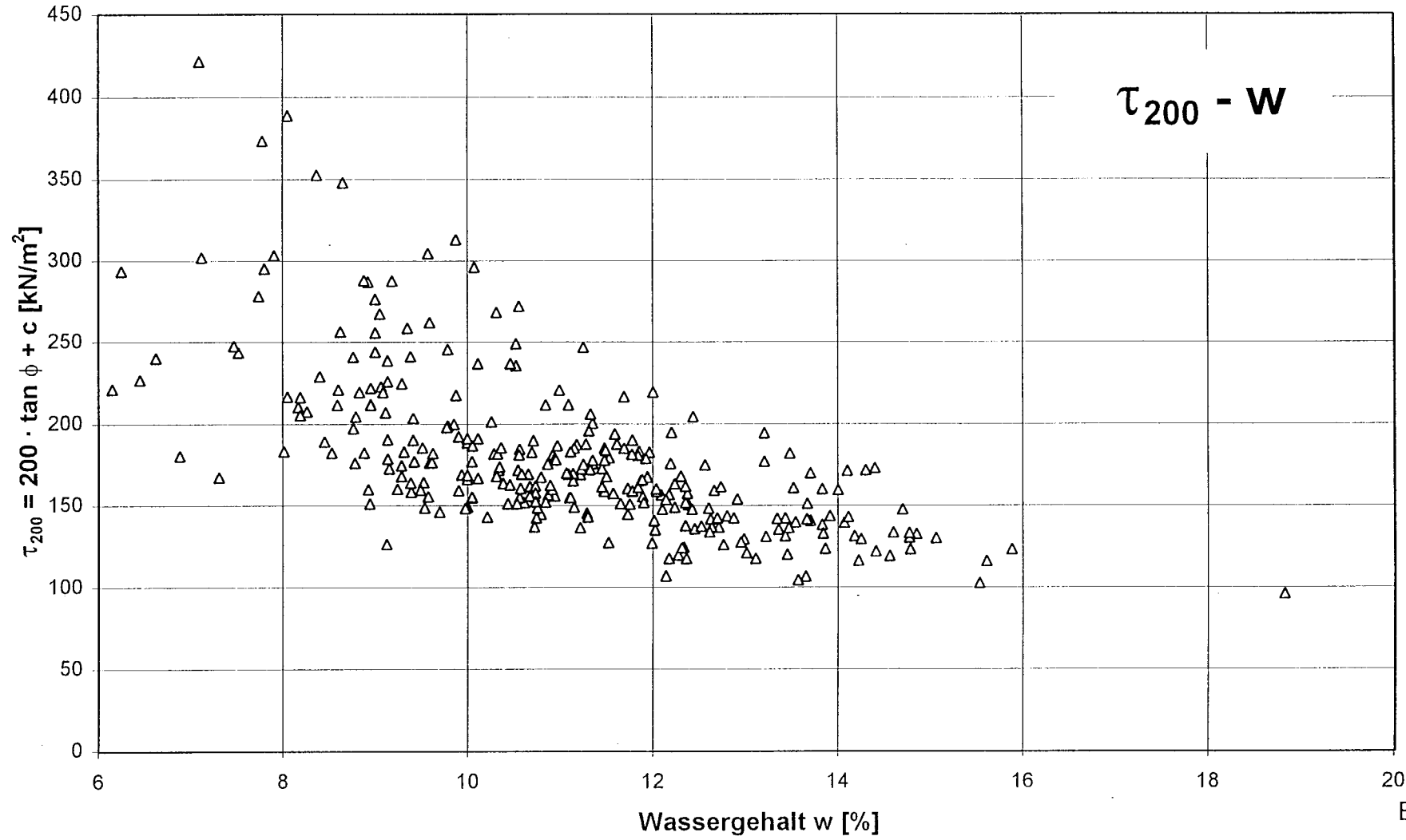


Bild 54

Mergel 40% < a(0,06) ≤ 60% (135 Versuche)

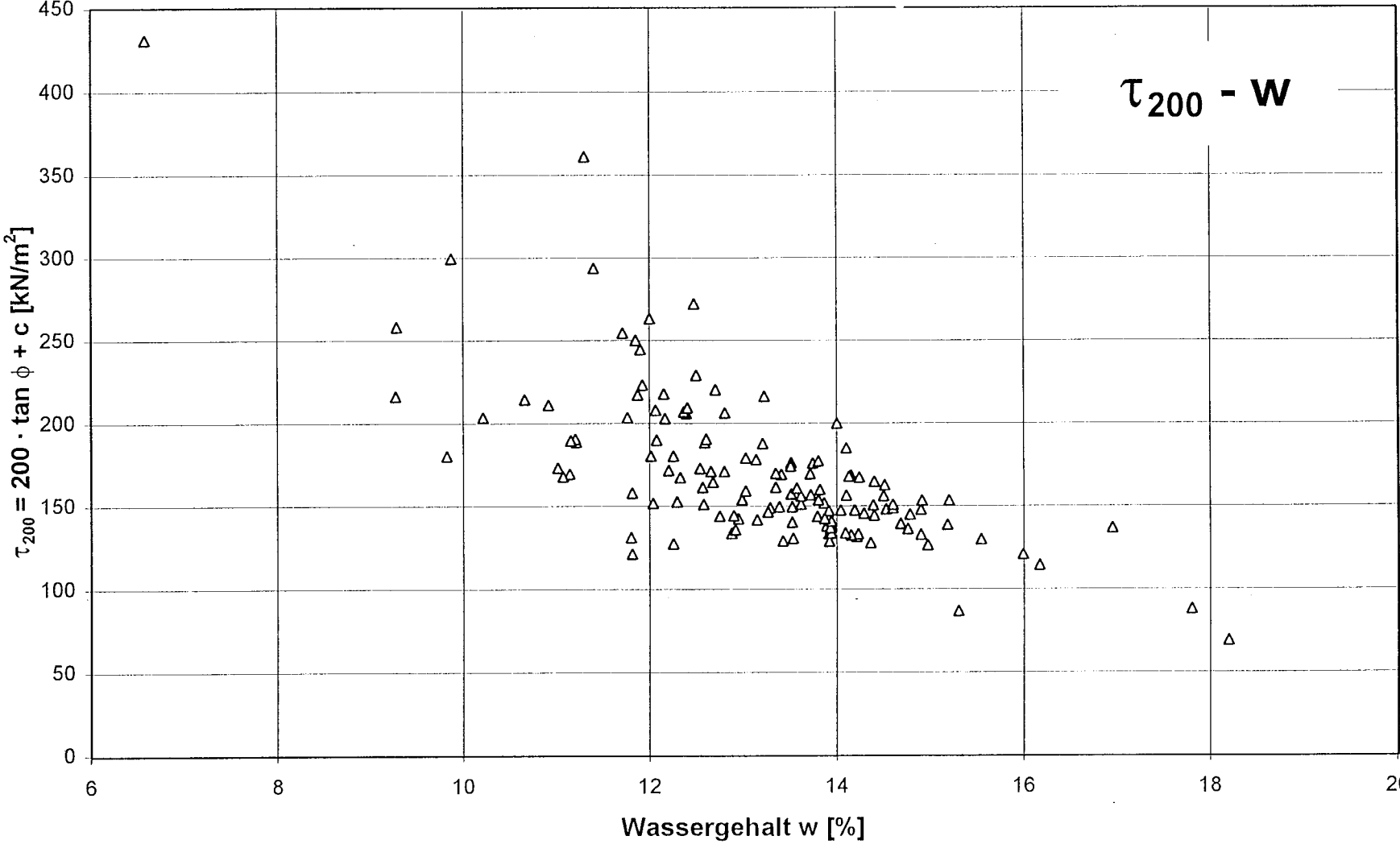


Bild 55

Mergel $15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$

$\sigma_3 \leq 120 \text{ kN/m}^2$

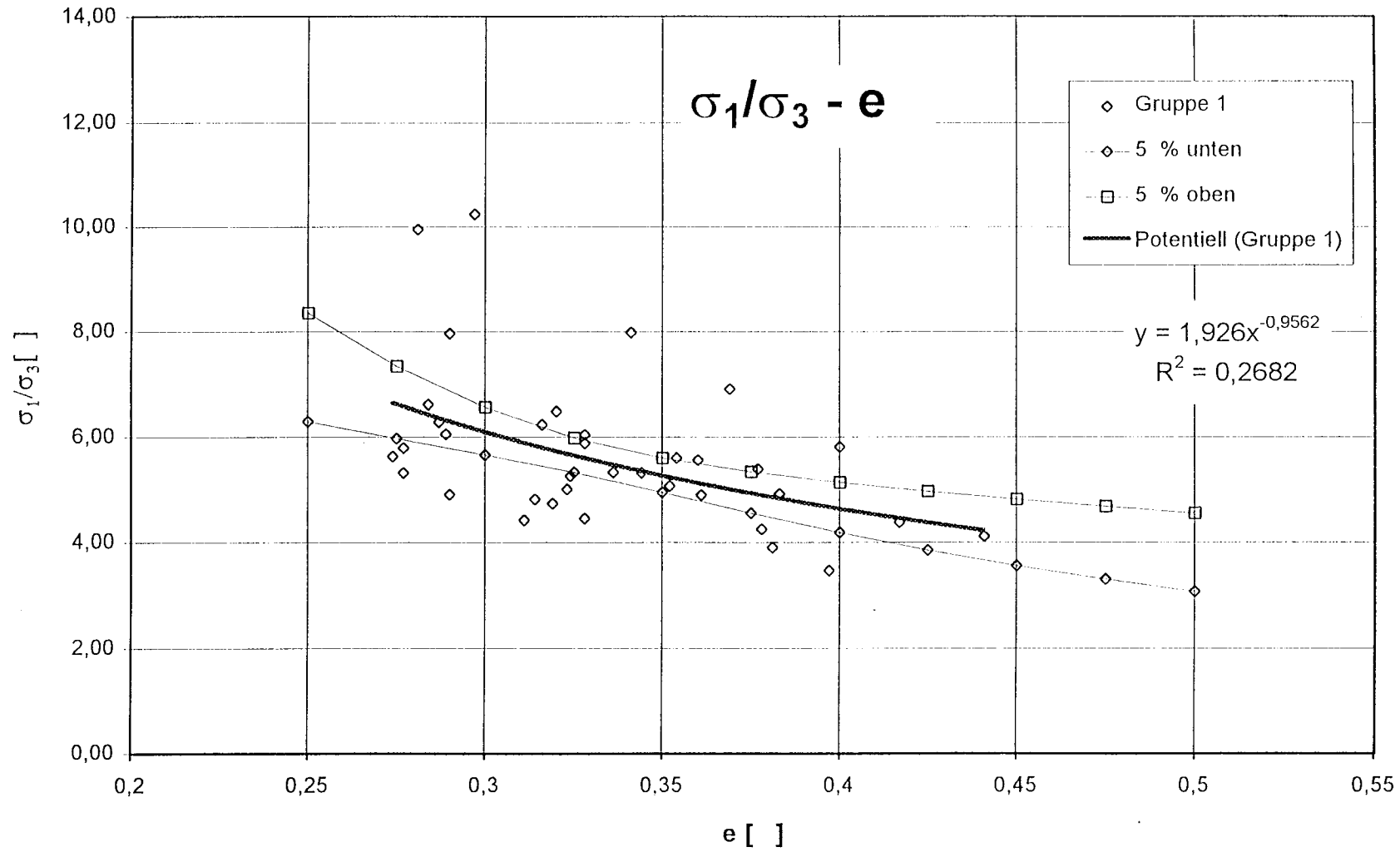


Bild 56

Mergel $26\% < a(0,06) \leq 33\%$

$\sigma_3 \leq 120 \text{ kN/m}^2$

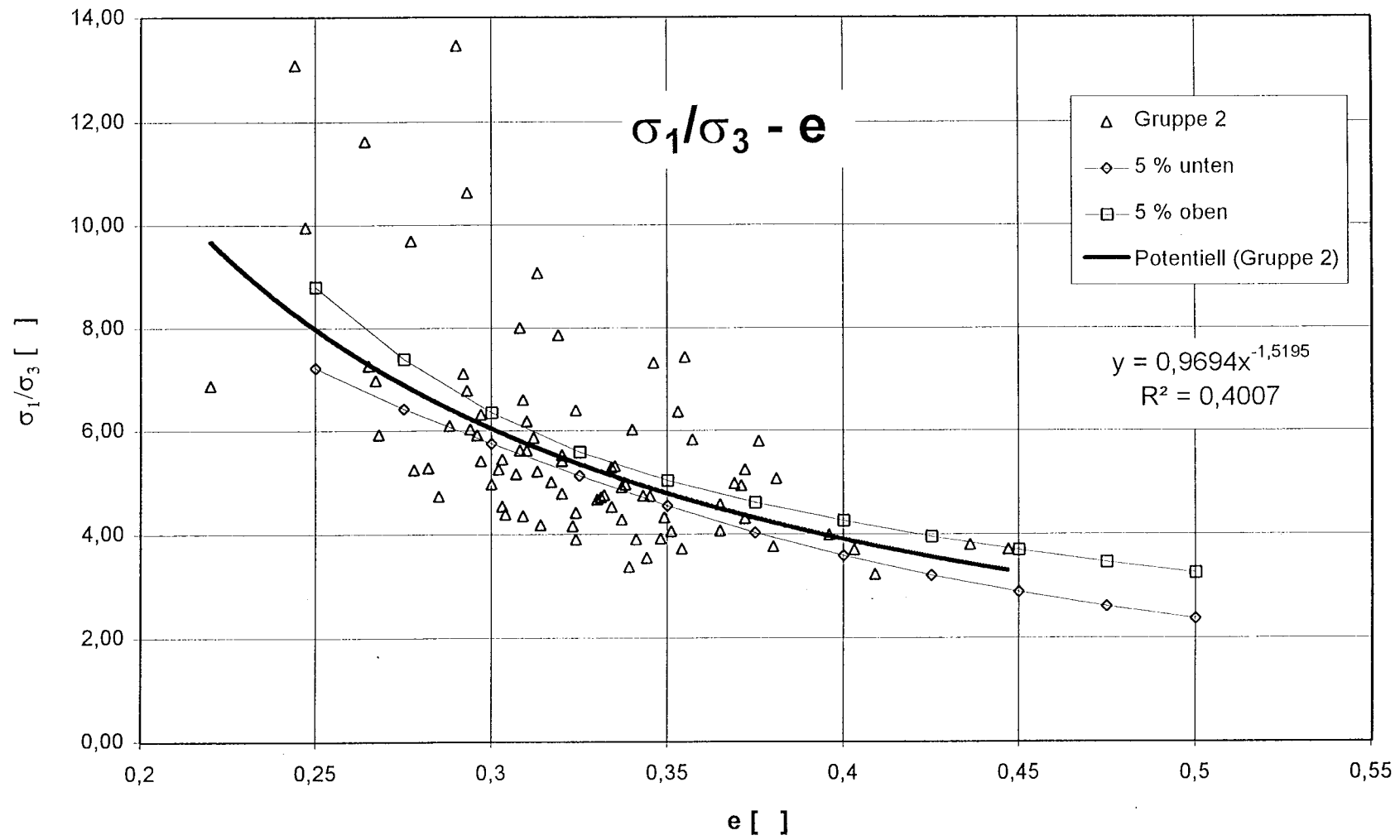


Bild 57

Mergel $33\% < a(0,06) \leq 40\%$

$\sigma_3 \leq 120 \text{ kN/m}^2$

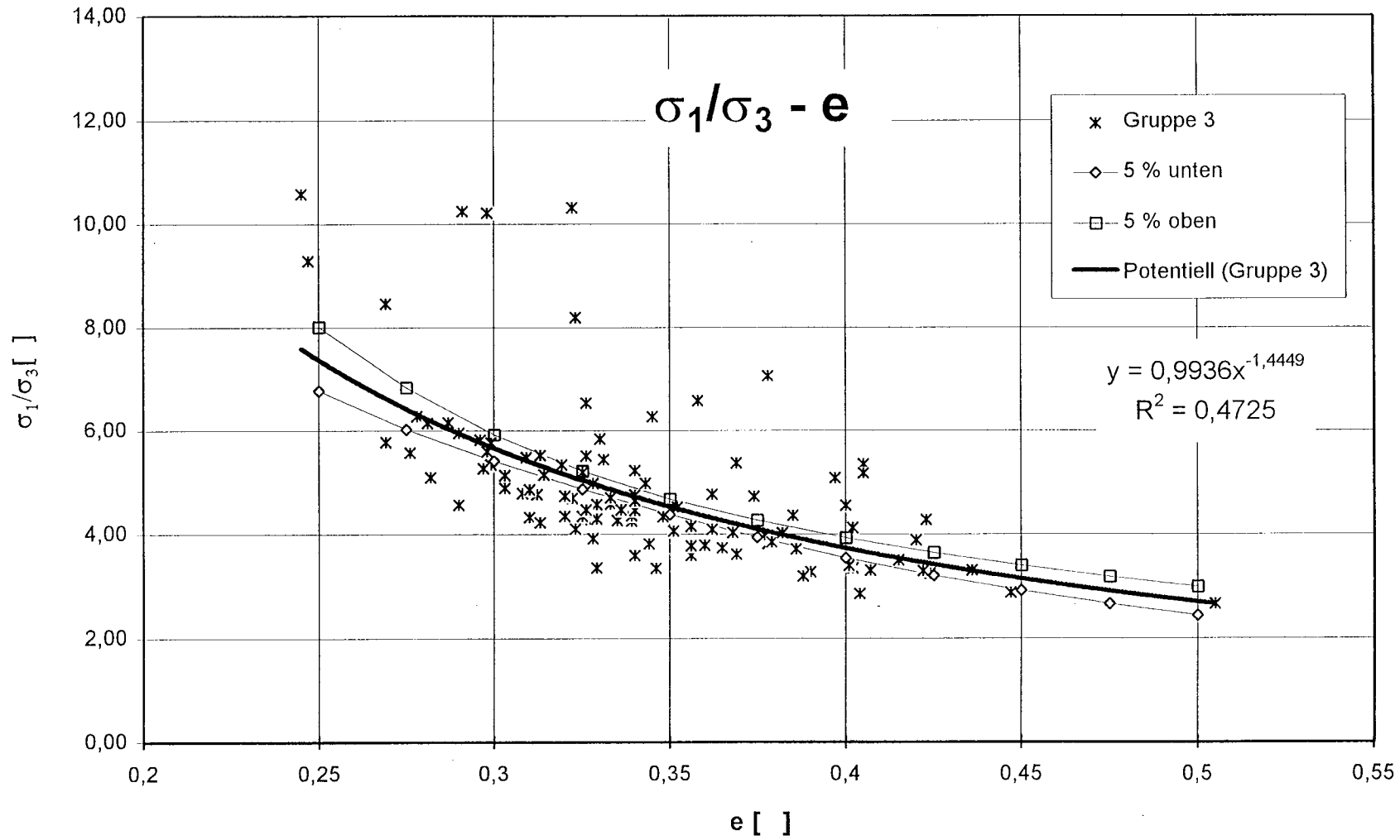
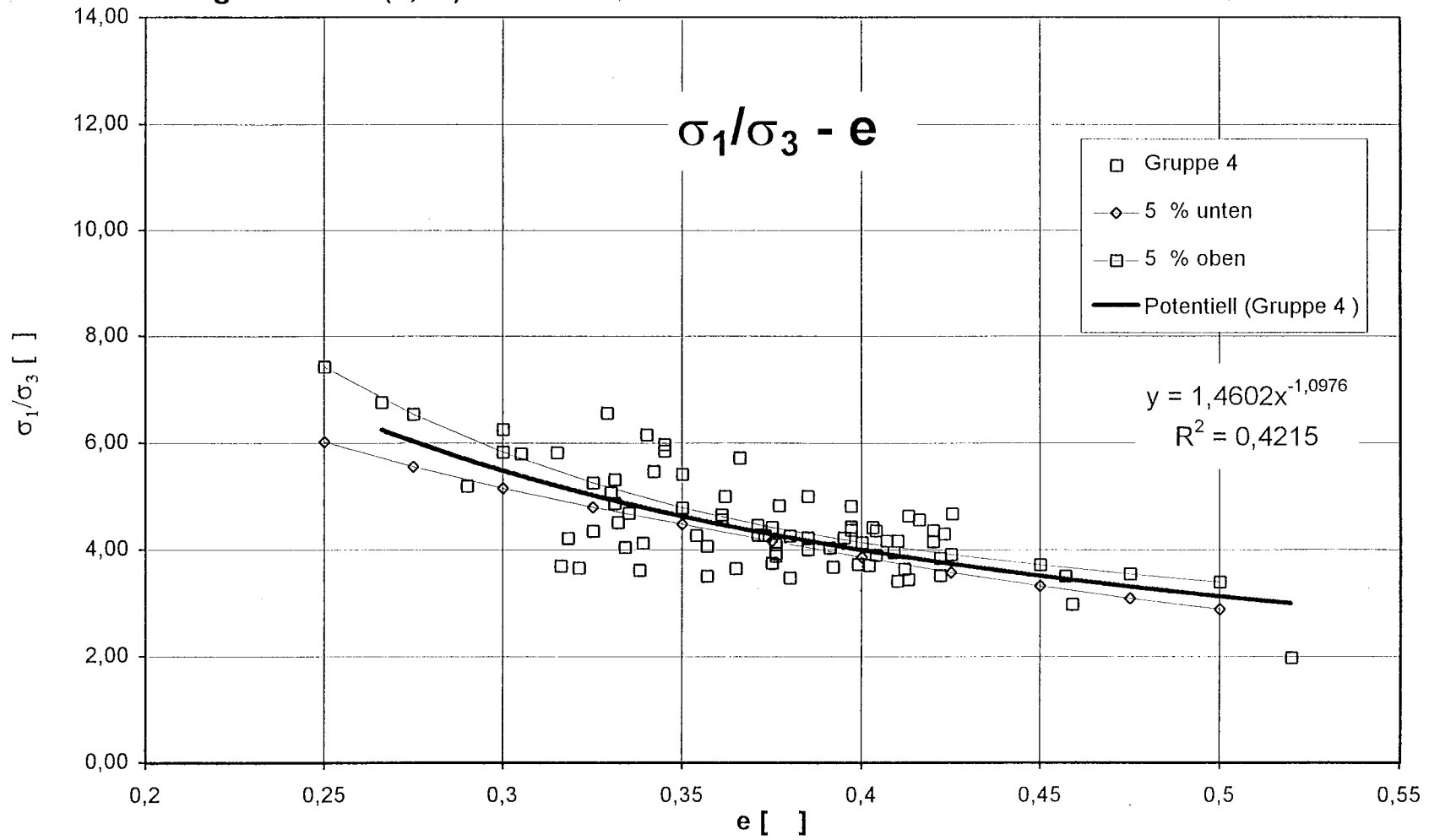


Bild 58

Mergel $40\% < a(0,06) \leq 60\%$

$\sigma_3 \leq 120 \text{ kN/m}^2$



Mergel $26\% < a(0,06) \leq 40\%$

$\sigma_3 \leq 120 \text{ kN/m}^2$

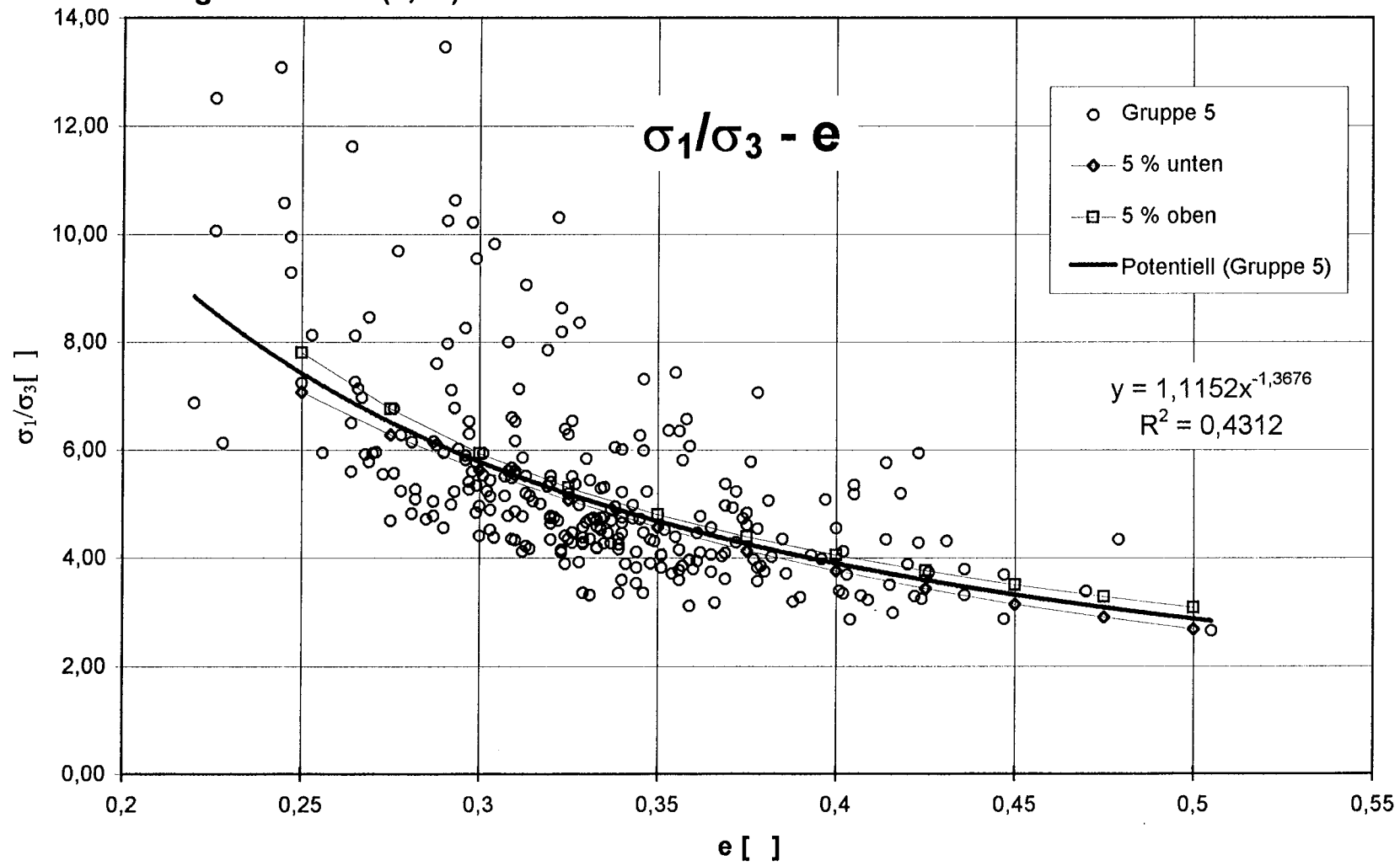
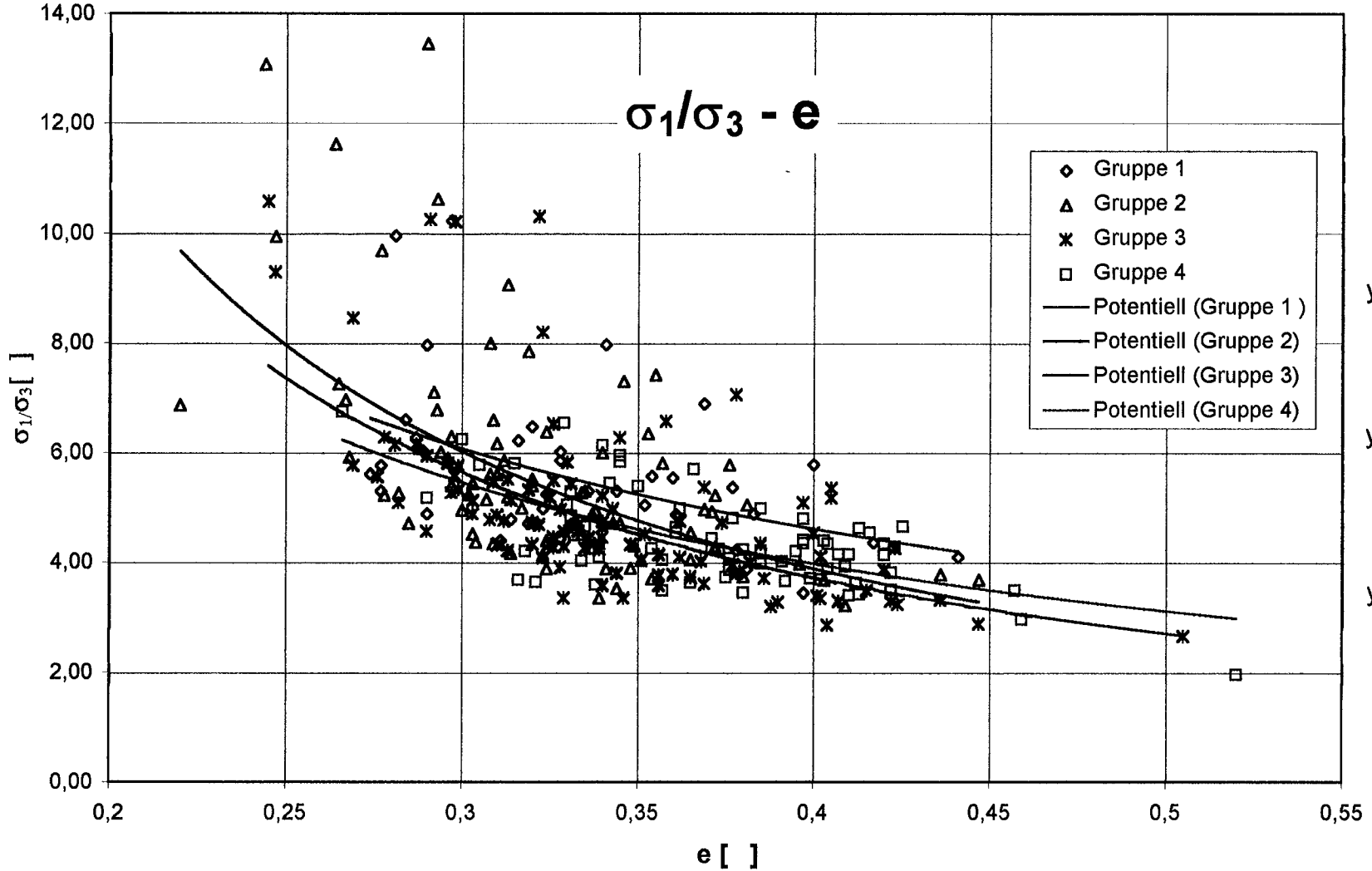


Bild 60

Mergel Zusammenfassung

$\sigma_3 \leq 120 \text{ kN/m}^2$



$y = 1,926x^{-0,9562}$
 $R^2 = 0,2682$

$y = 0,9694x^{-1,5195}$
 $R^2 = 0,4007$

$y = 0,9936x^{-1,4449}$
 $R^2 = 0,4725$

$y = 1,4612x^{-1,0969}$
 $R^2 = 0,4212$

Bild 61

Mergel $15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$ $120 \text{ kN/m}^2 < \sigma_3 \leq 220 \text{ kN/m}^2$

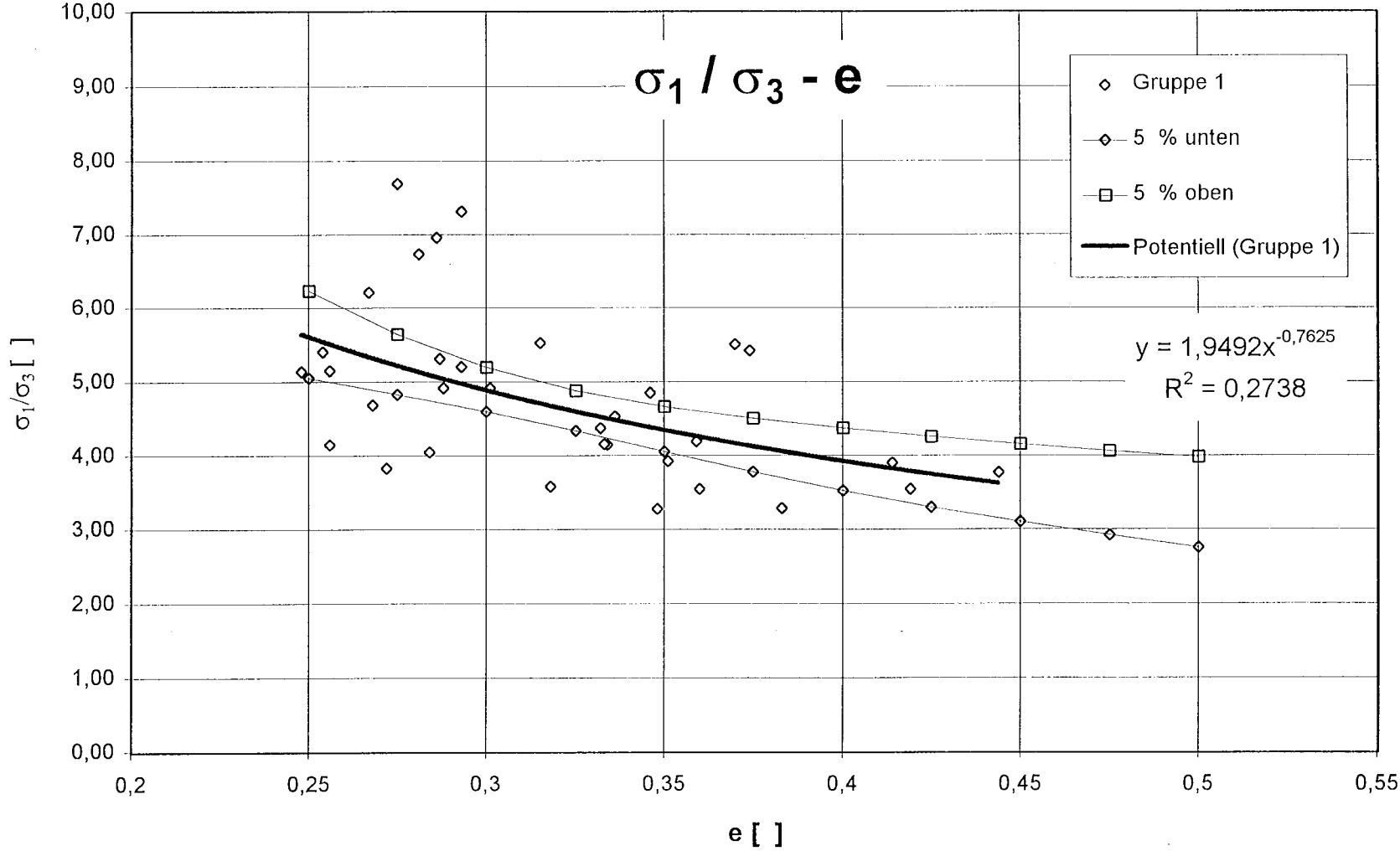


Bild 62

Mergel $26\% < a(0,06) \leq 33\%$ $120 \text{ kN/m}^2 < \sigma_3 \leq 220 \text{ kN/m}^2$

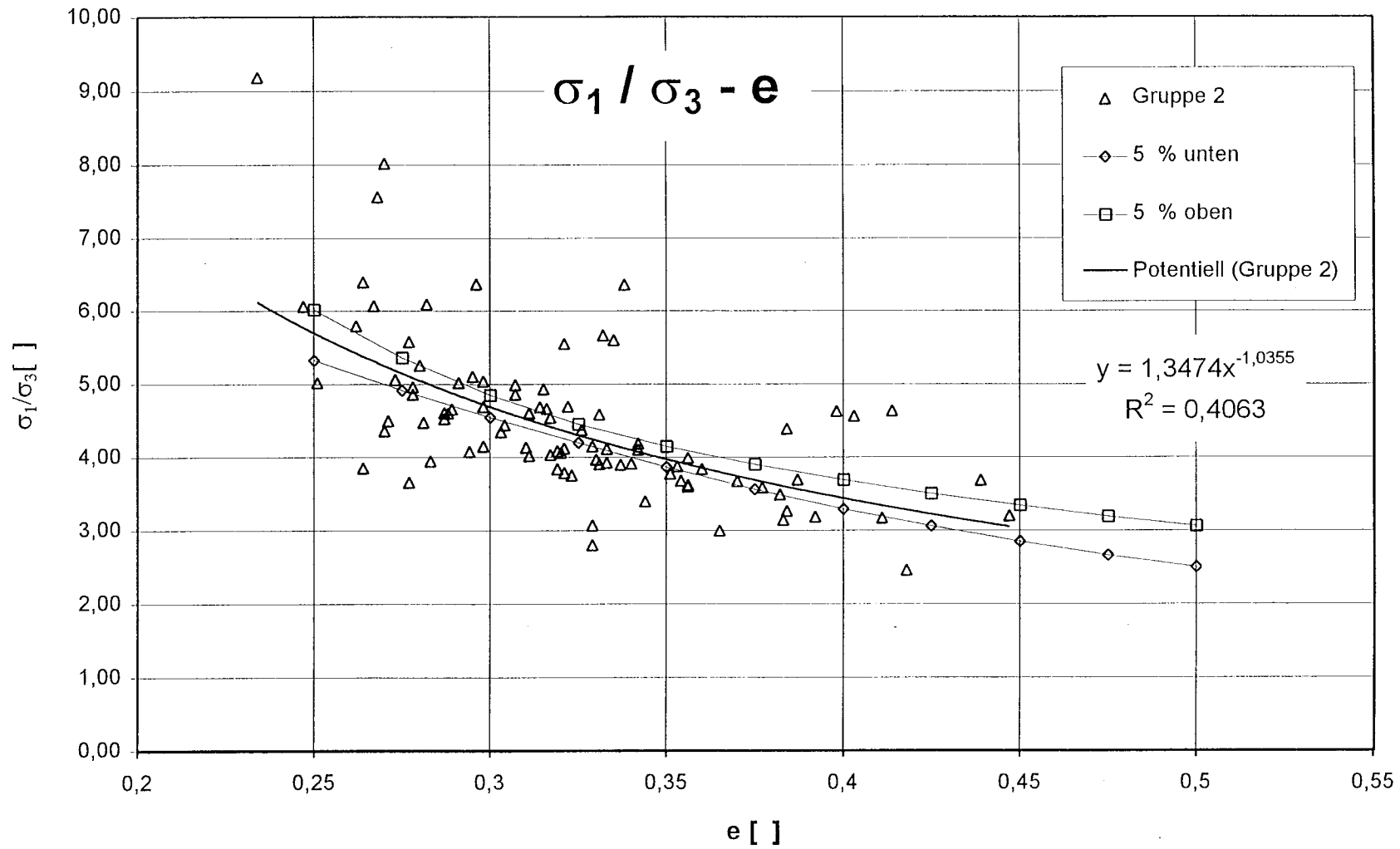


Bild 63

Mergel $33\% < a(0,06) \leq 40\%$ $120 \text{ kN/m}^2 < \sigma_3 \leq 220 \text{ kN/m}^2$

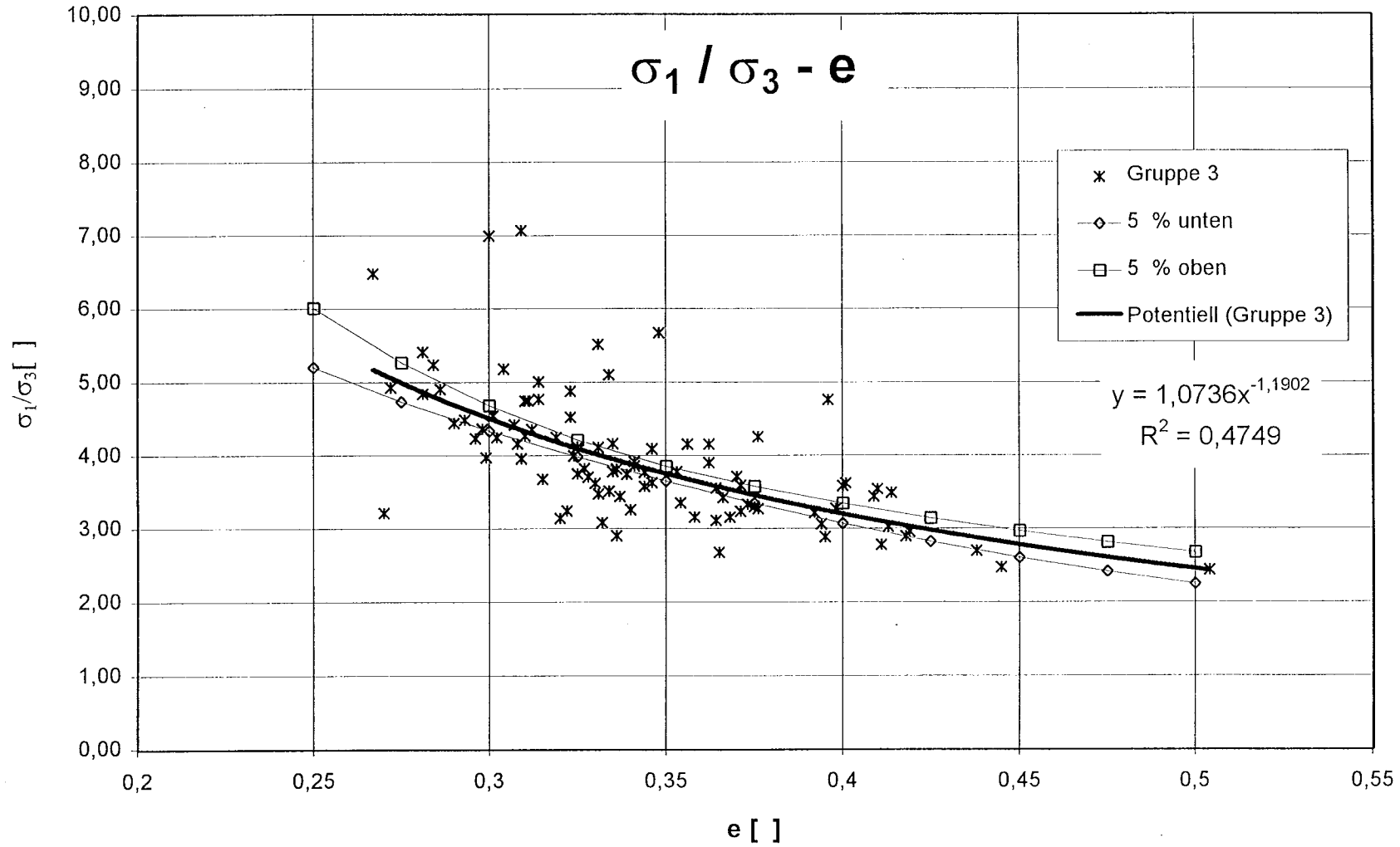


Bild 64

Mergel $26\% < a(0,06) \leq 40\%$ $120 \text{ kN/m}^2 < \sigma_3 \leq 220 \text{ kN/m}^2$

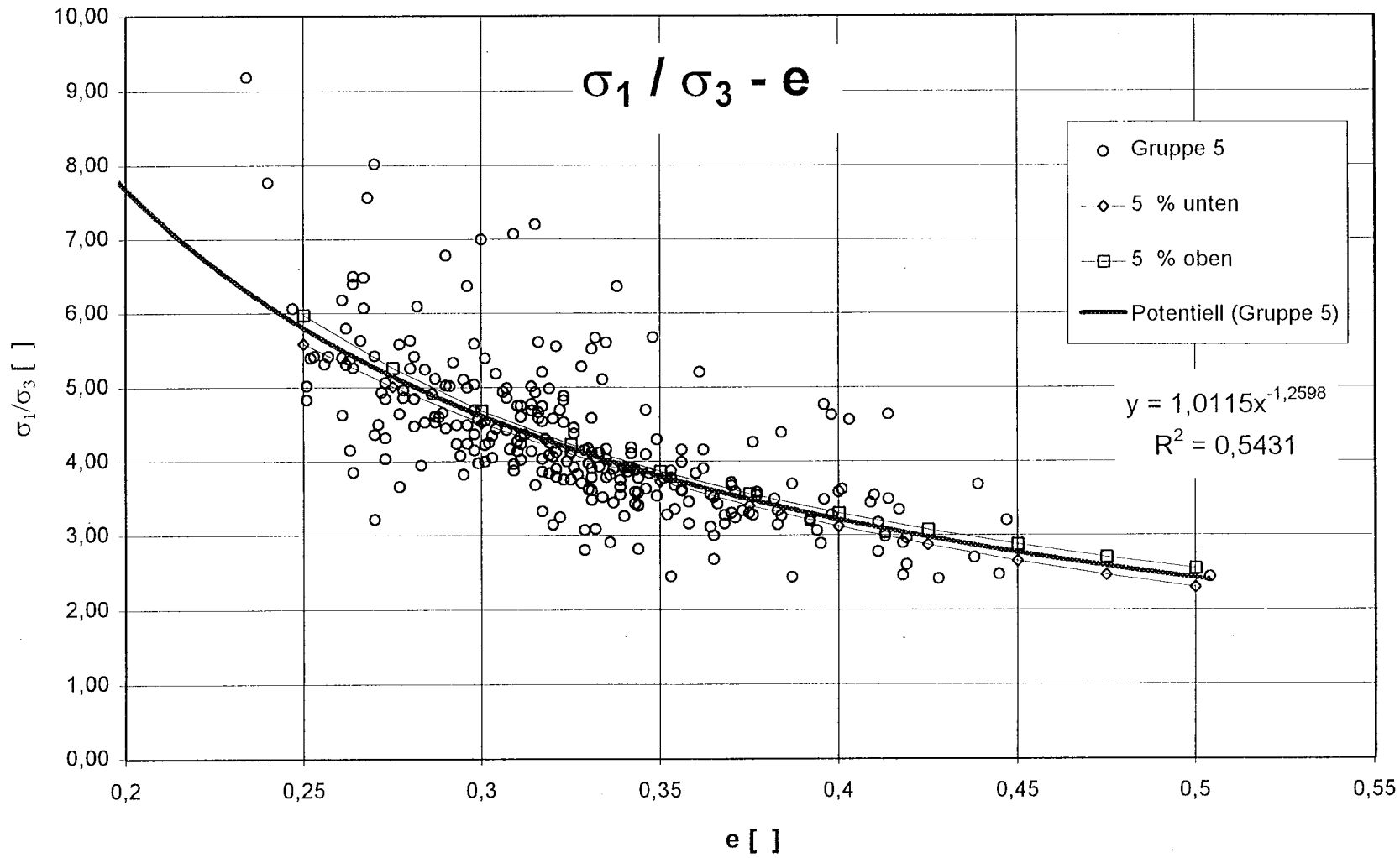


Bild 65

Mergel $40\% < a(0,06) \leq 60\%$ $120 \text{ kN/m}^2 < \sigma_3 \leq 220 \text{ kN/m}^2$

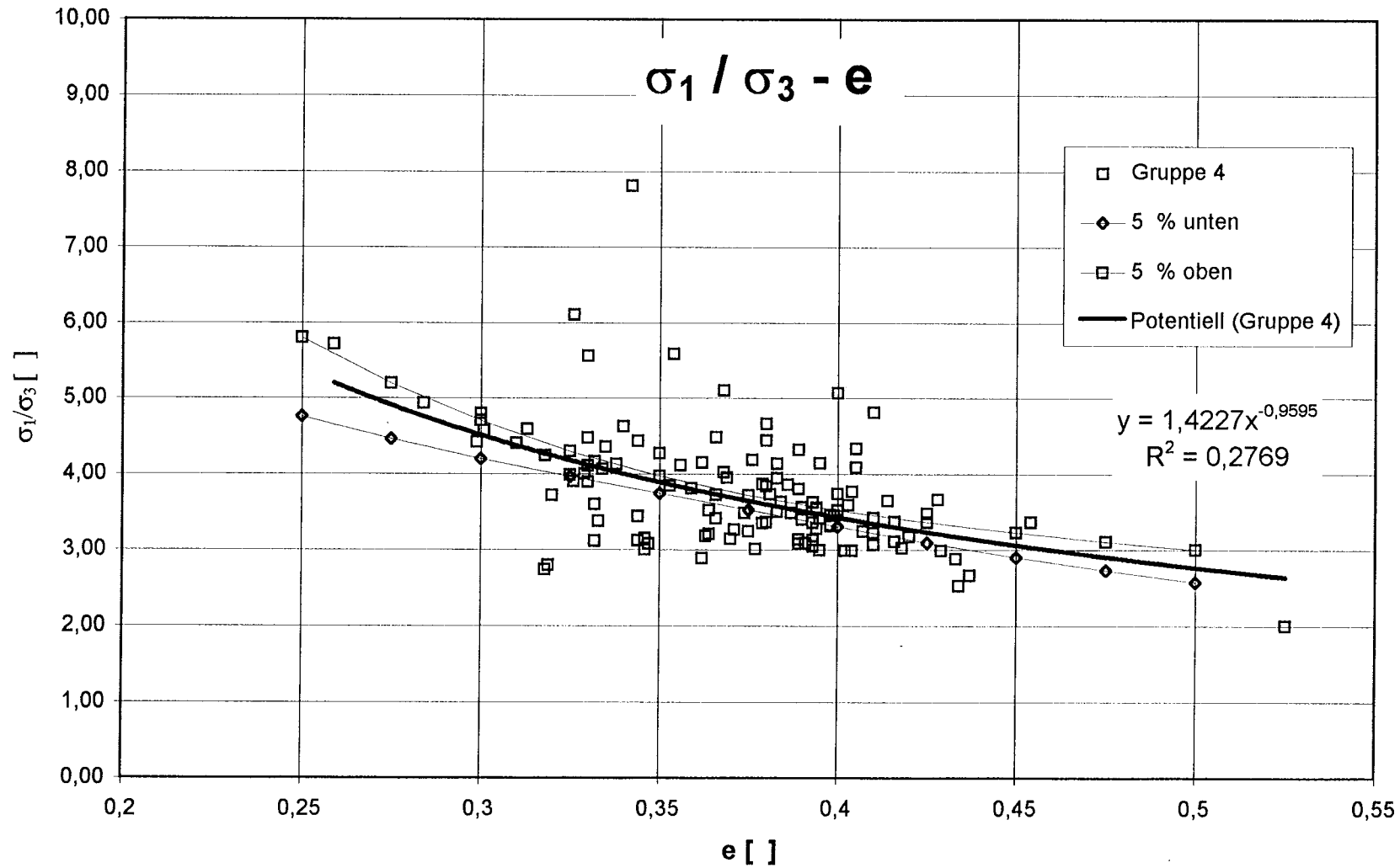


Bild 66

Mergel Zusammenfassung $120 \text{ kN/m}^2 < \sigma_3 \leq 220 \text{ kN/m}^2$

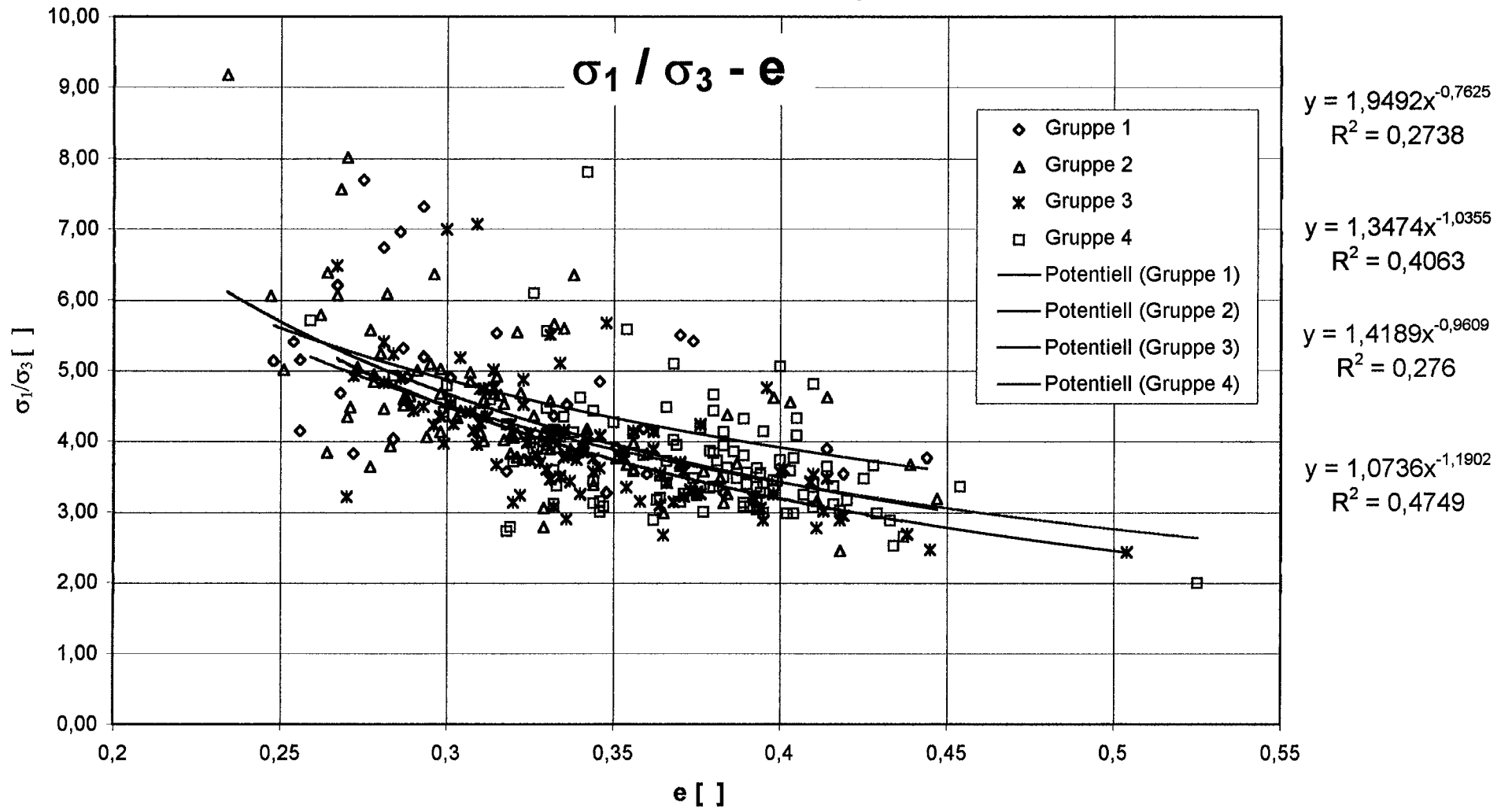


Bild 67

Mergel $15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$

$\sigma_3 > 220 \text{ kN/m}^2$

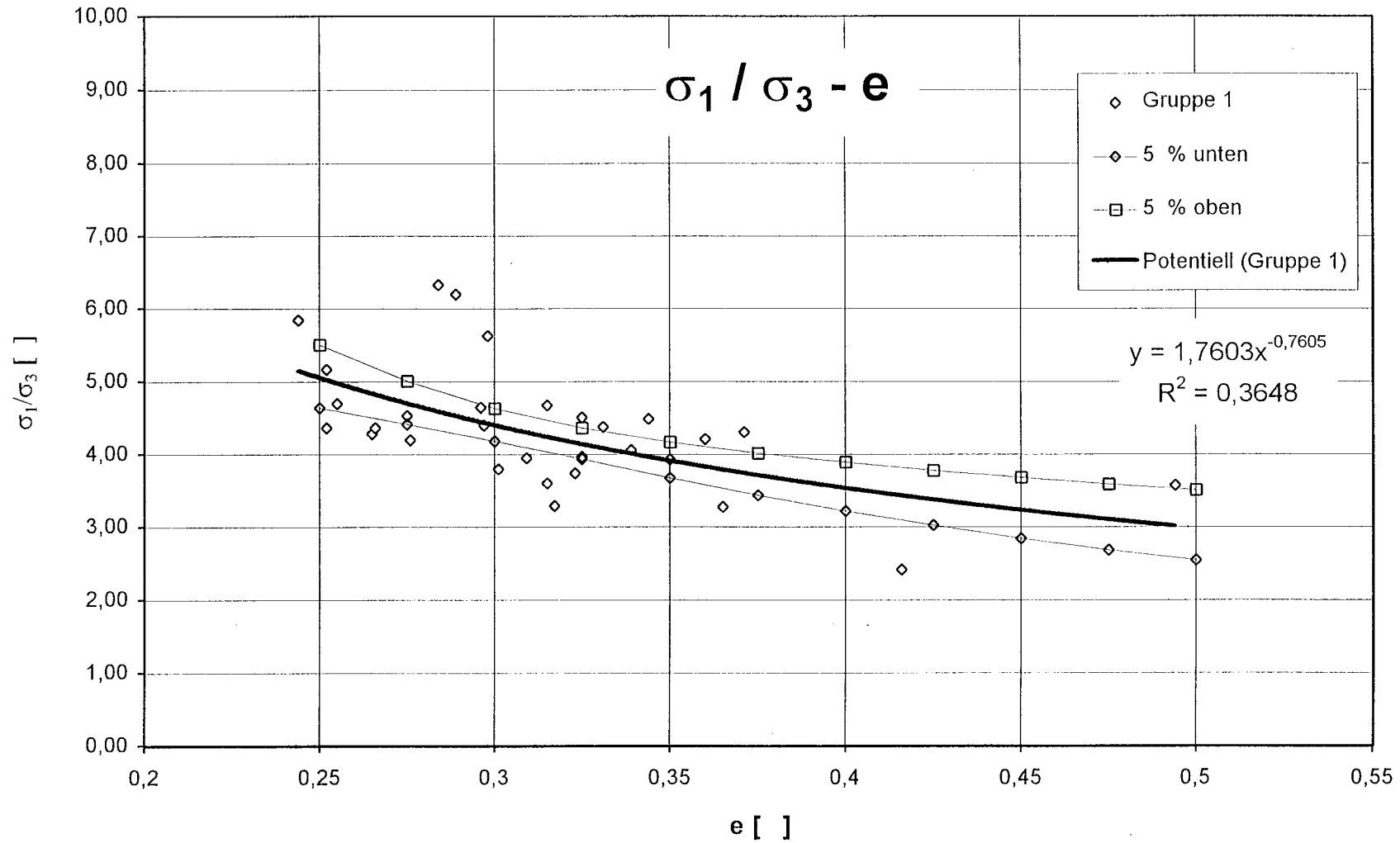


Bild 68

Mergel $26\% < a(0,06) \leq 33\%$

$\sigma_3 > 220 \text{ kN/m}^2$

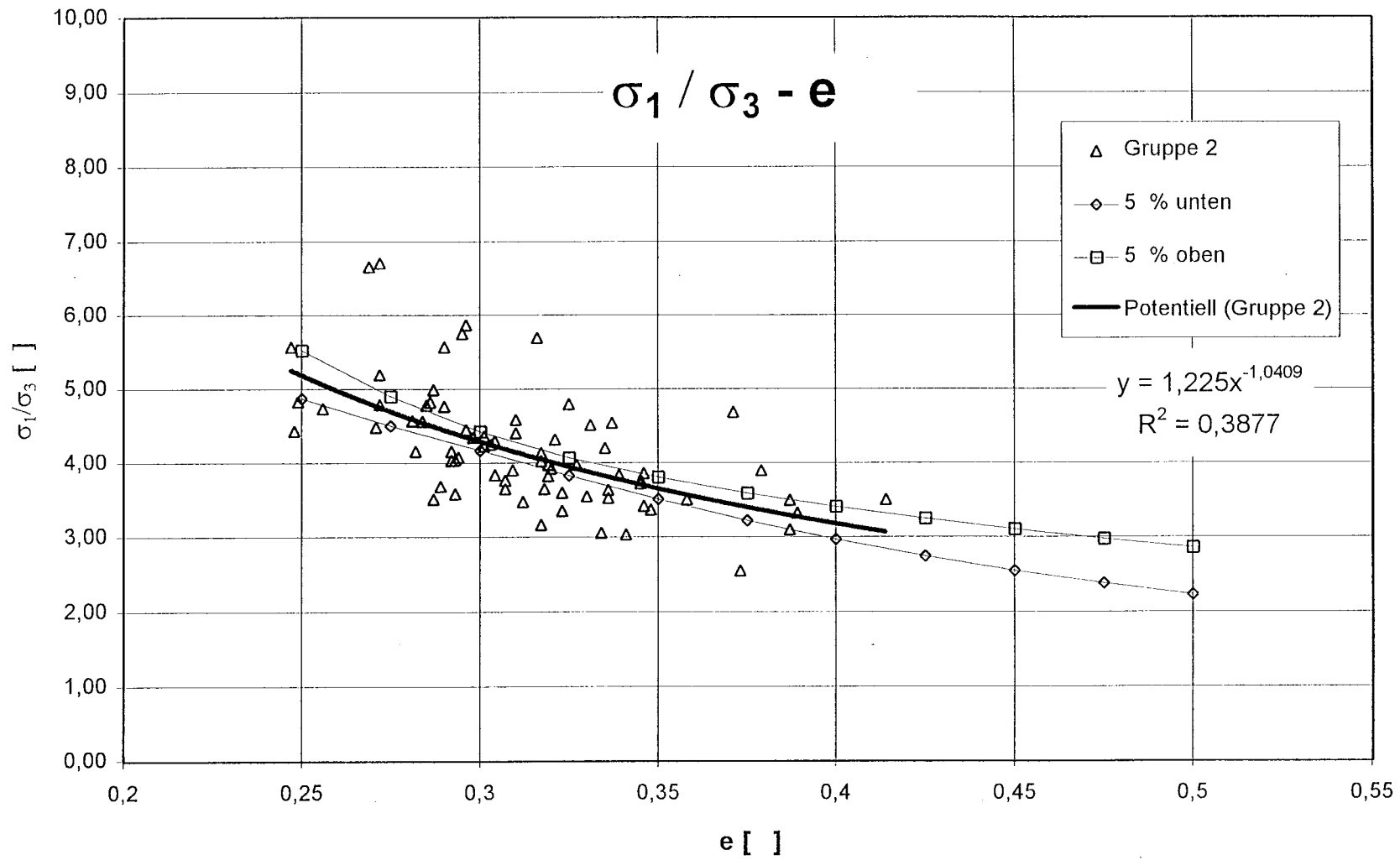


Bild 69

Mergel 33% < a(0,06) ≤ 40 %

$\sigma_3 > 220 \text{ kN/m}^2$

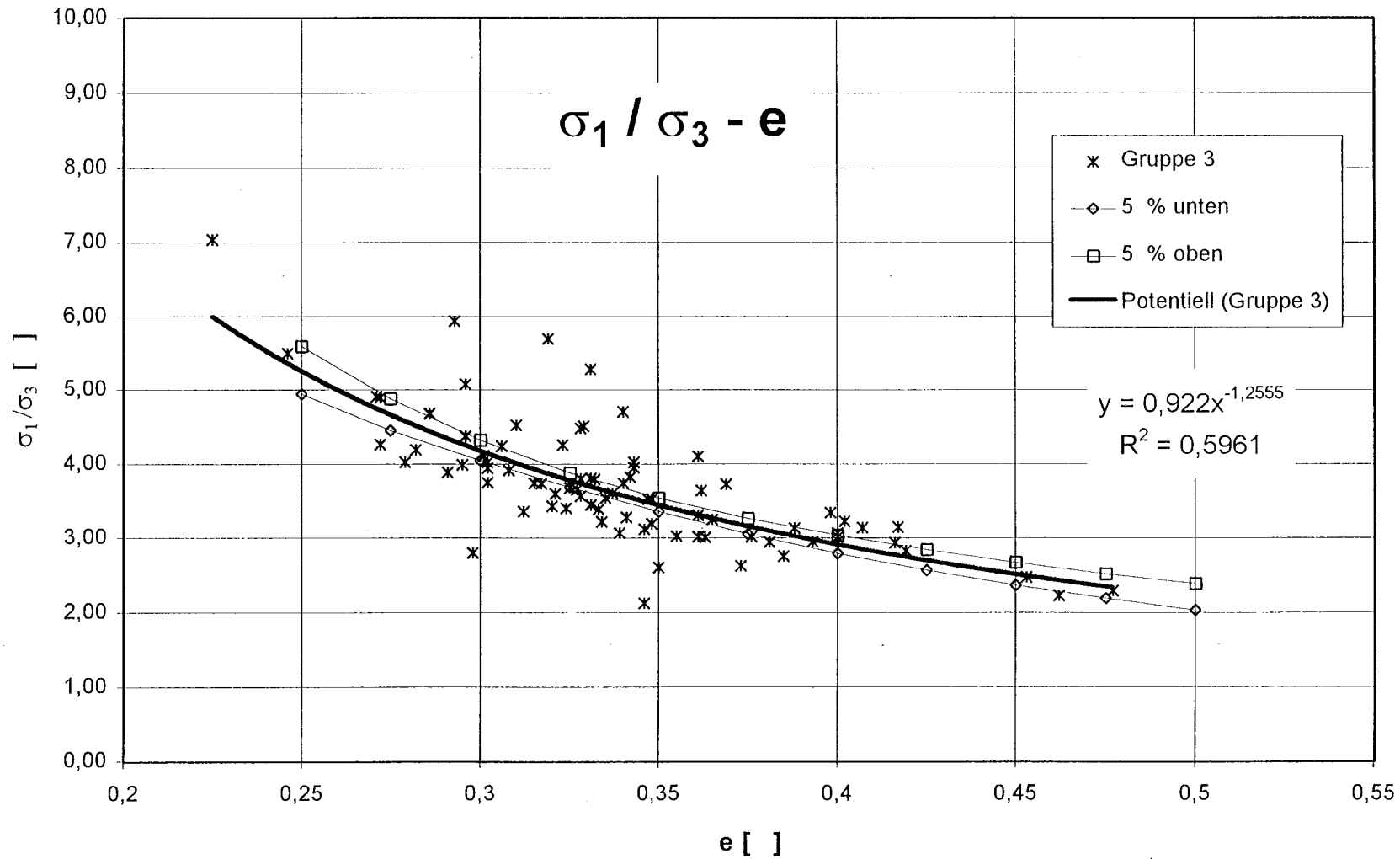


Bild 70

Mergel $26 \% < a(0,06) \leq 40\%$

$\sigma_3 > 220 \text{ kN/m}^2$

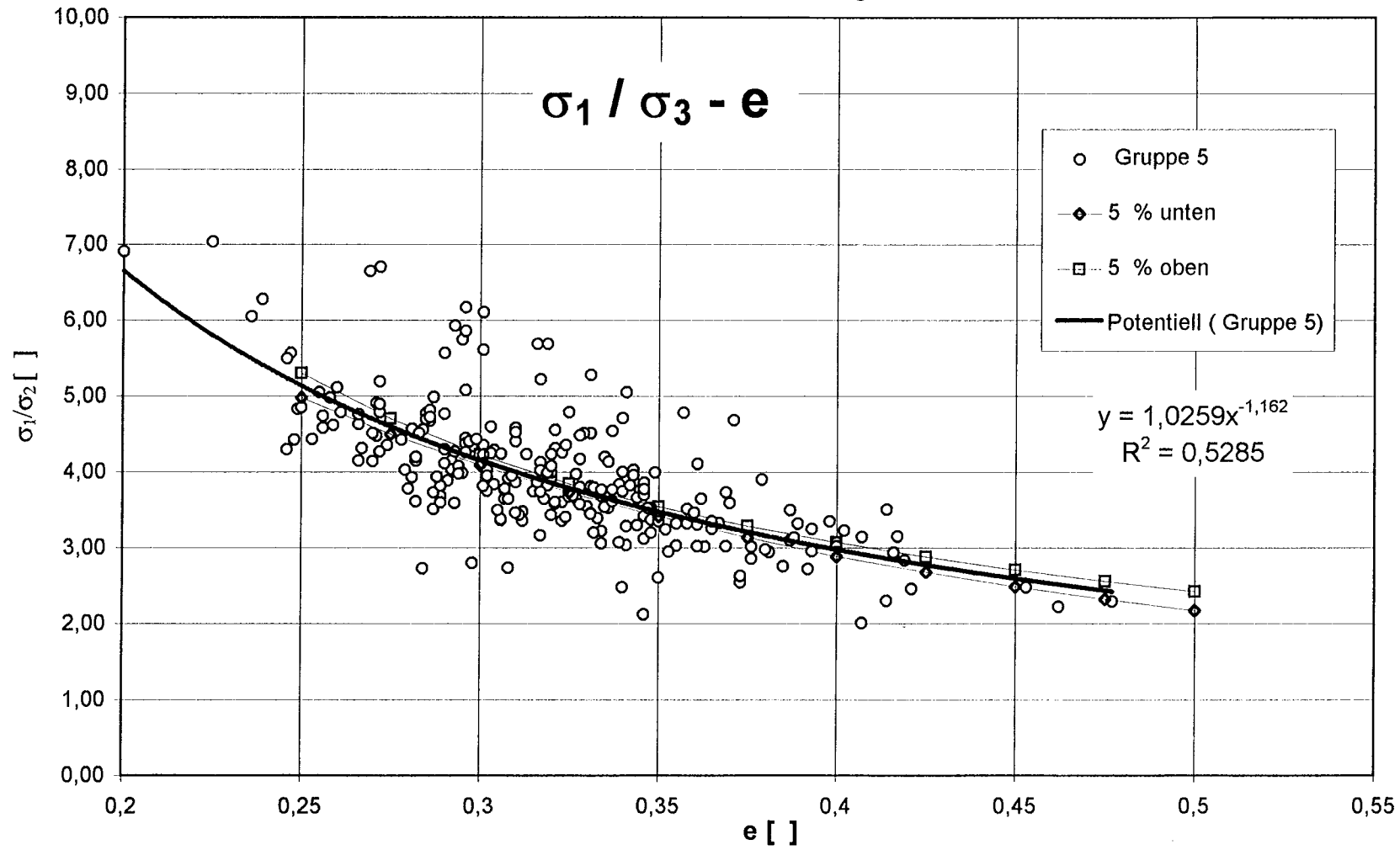


Bild 71

Mergel $40\% < a(0,06) \leq 60\%$

$\sigma_3 > 220 \text{ kN/m}^2$

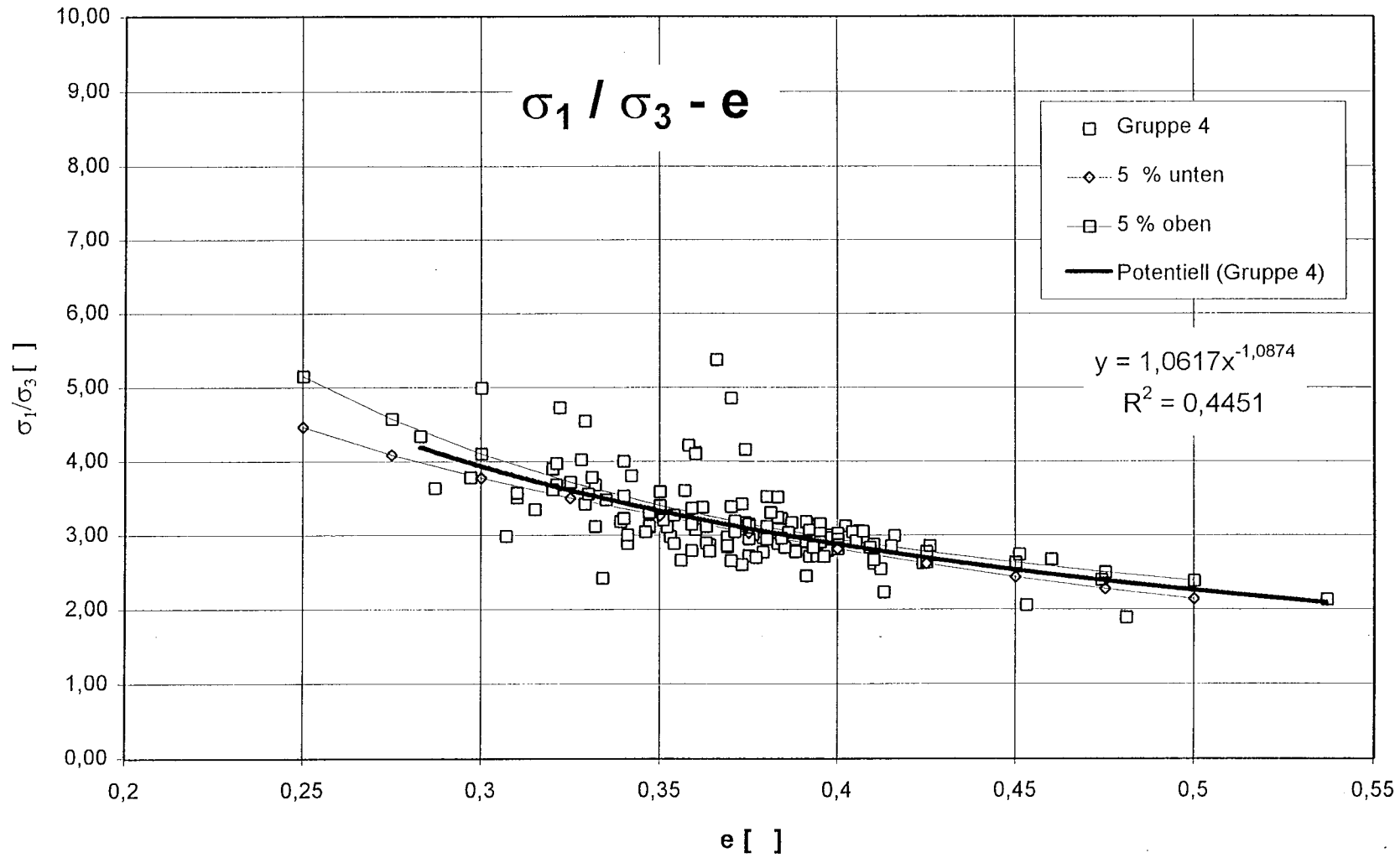


Bild 72

Mergel Zusammenfassung

$\sigma_3 > 220 \text{ kN/m}^2$

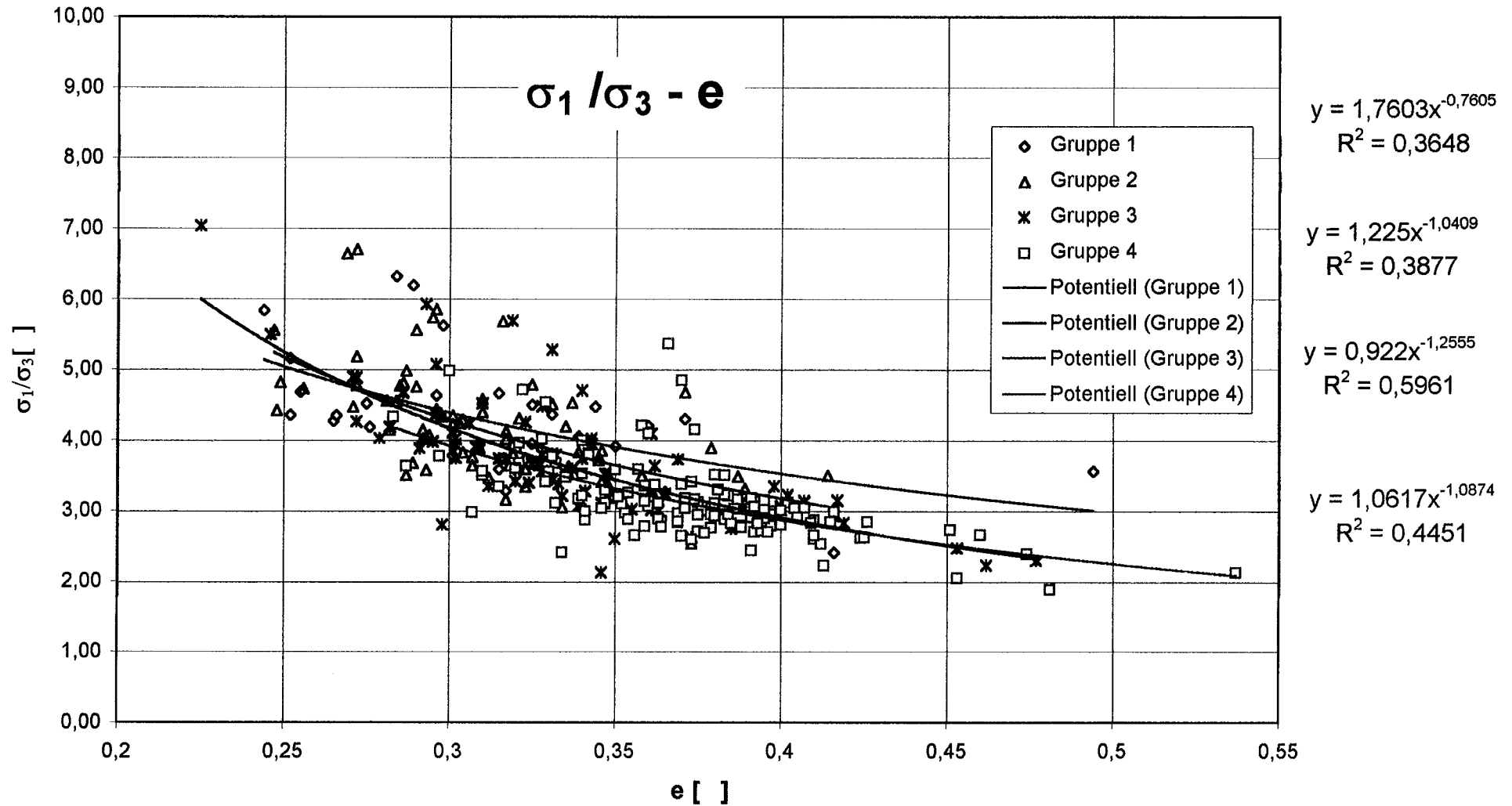


Bild 73

Scherparameter ϕ und c aus statistischer Auswertung von σ_1/σ_3

Deutsche Forschungsgesellschaft
für Bodenmechanik
(Degebo)

Mergel $15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$

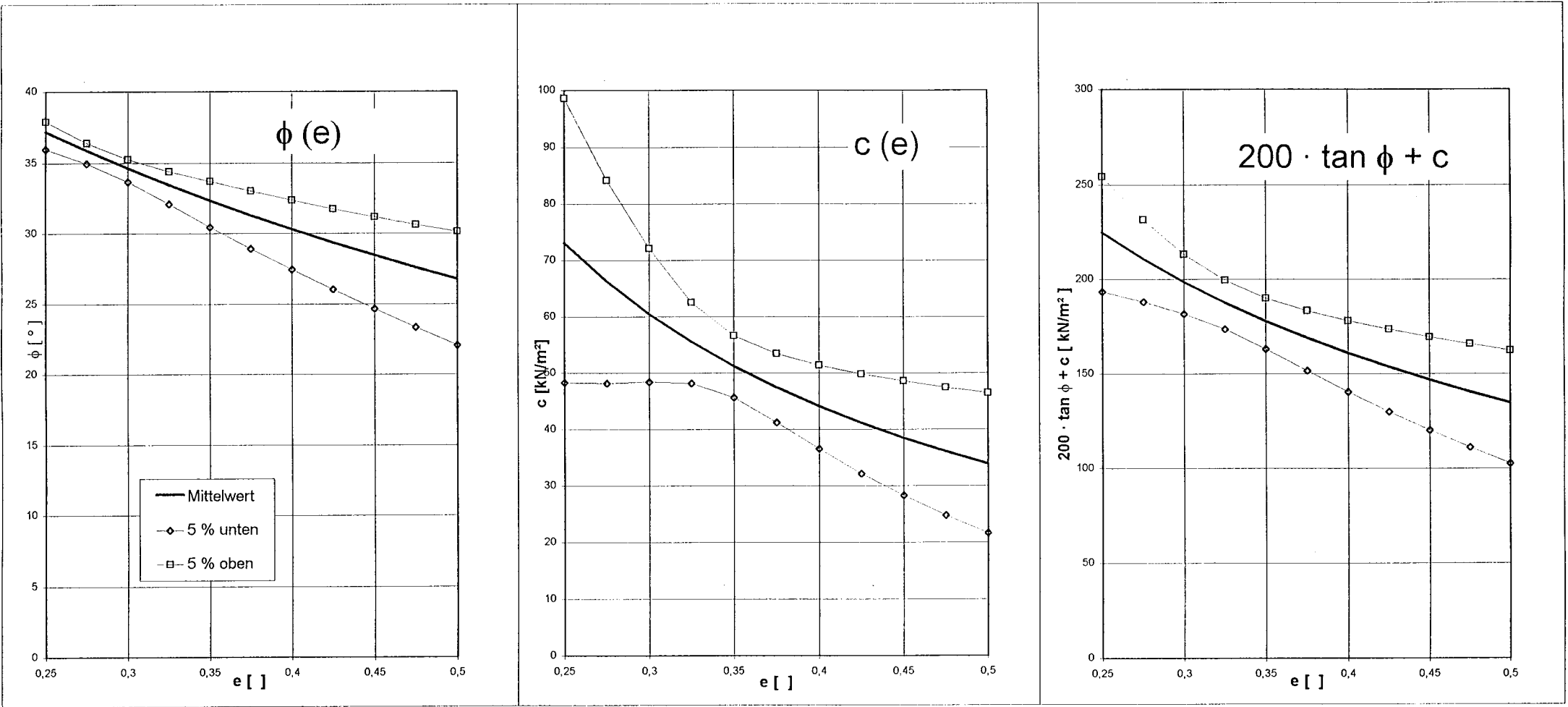


Bild 74

Scherparameter ϕ und c aus statistischer Auswertung von σ_1/σ_3

Mergel $26\% < a(0,06) \leq 33\%$

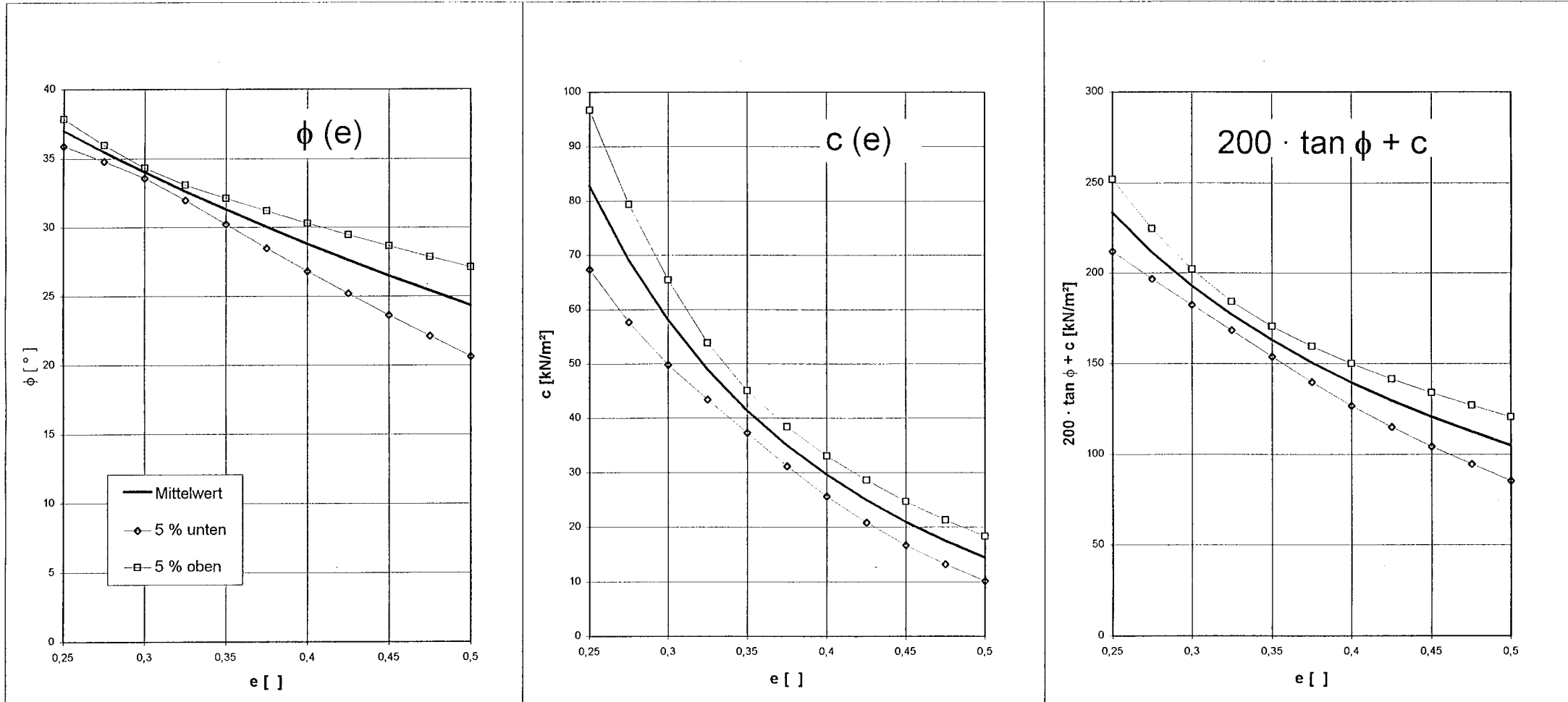
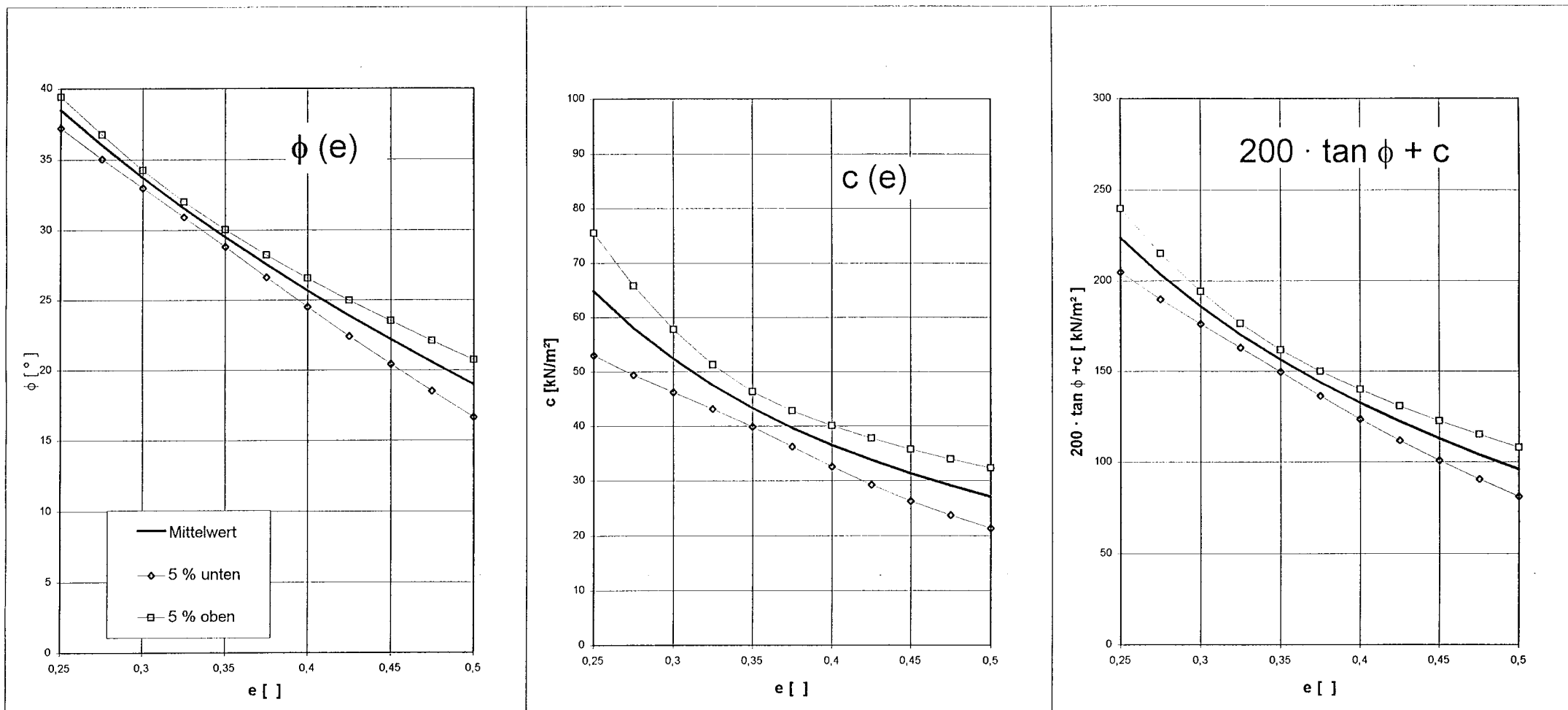


Bild 75

Scherparameter ϕ und c aus statistischer Auswertung von σ_1/σ_3

Mergel $33\% < a(0,06) \leq 40\%$



Scherparameter ϕ und c aus statistischer Auswertung von σ_1/σ_3
Mergel $26\% < a(0,06) \leq 40\%$

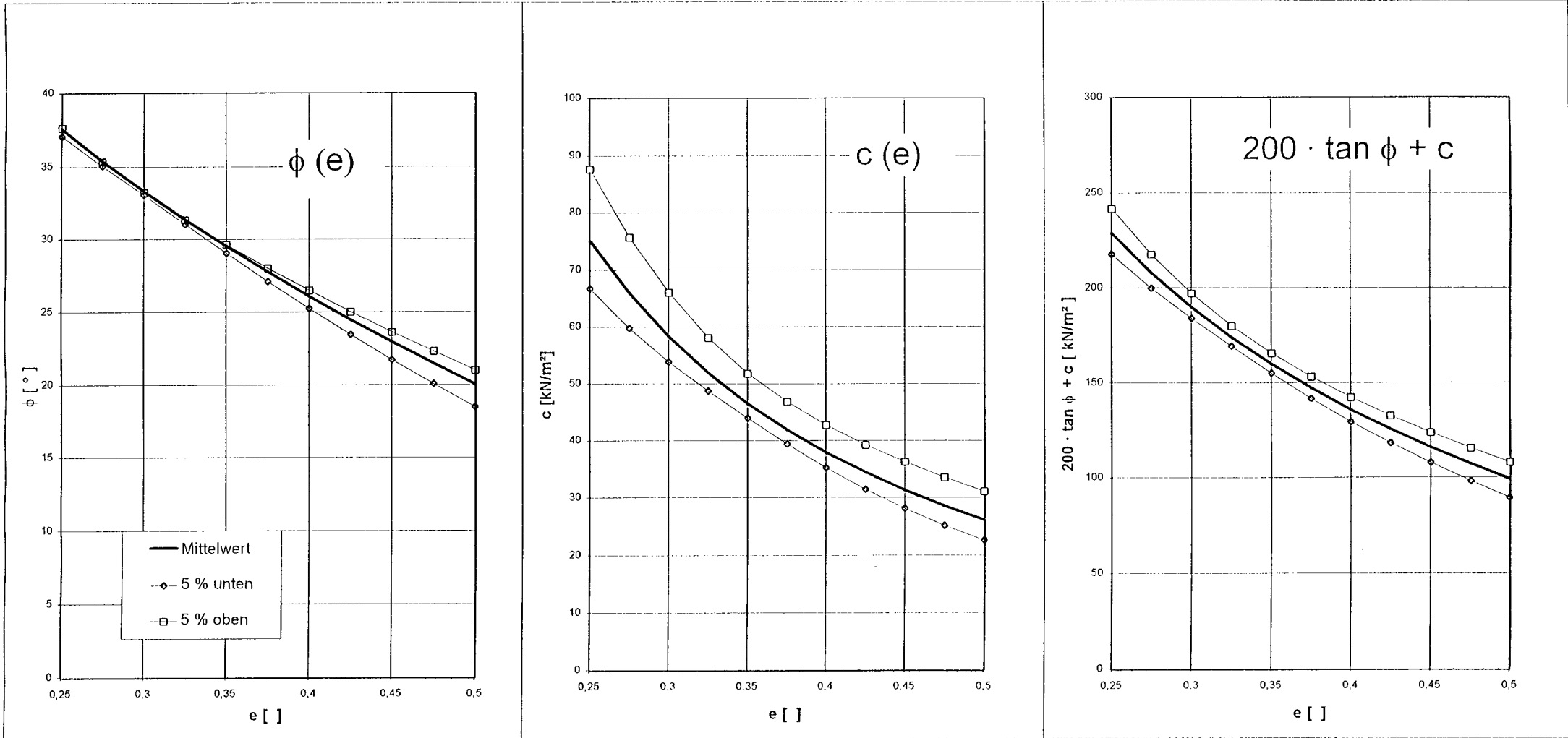


Bild 77

Scherparameter ϕ und c aus statistischer Auswertung von σ_1/σ_3

Mergel $40\% < a(0,06) \leq 60\%$

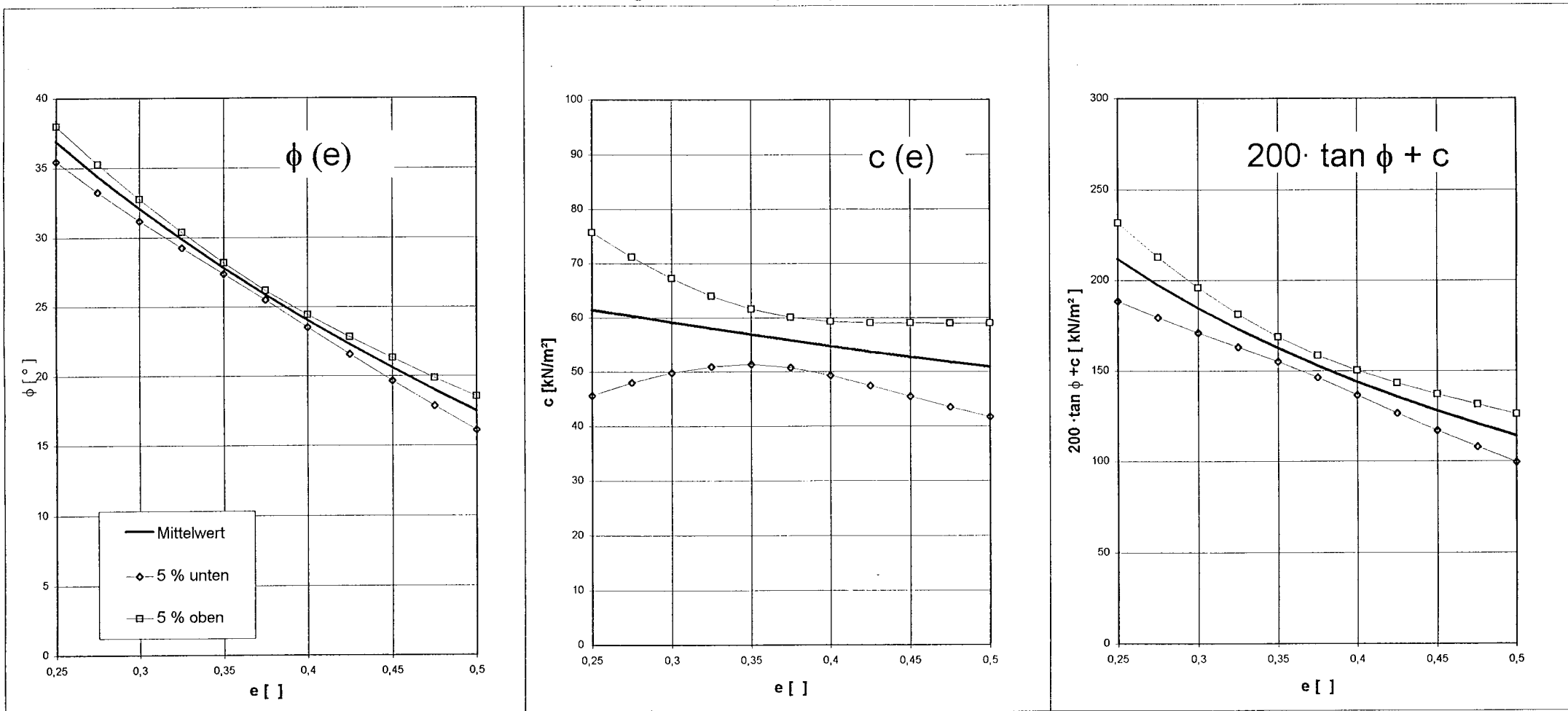


Bild 78

Scherparameter ϕ und c aus statistischer Auswertung von σ_1/σ_3
Mergel Zusammenfassung der Mittelwerte

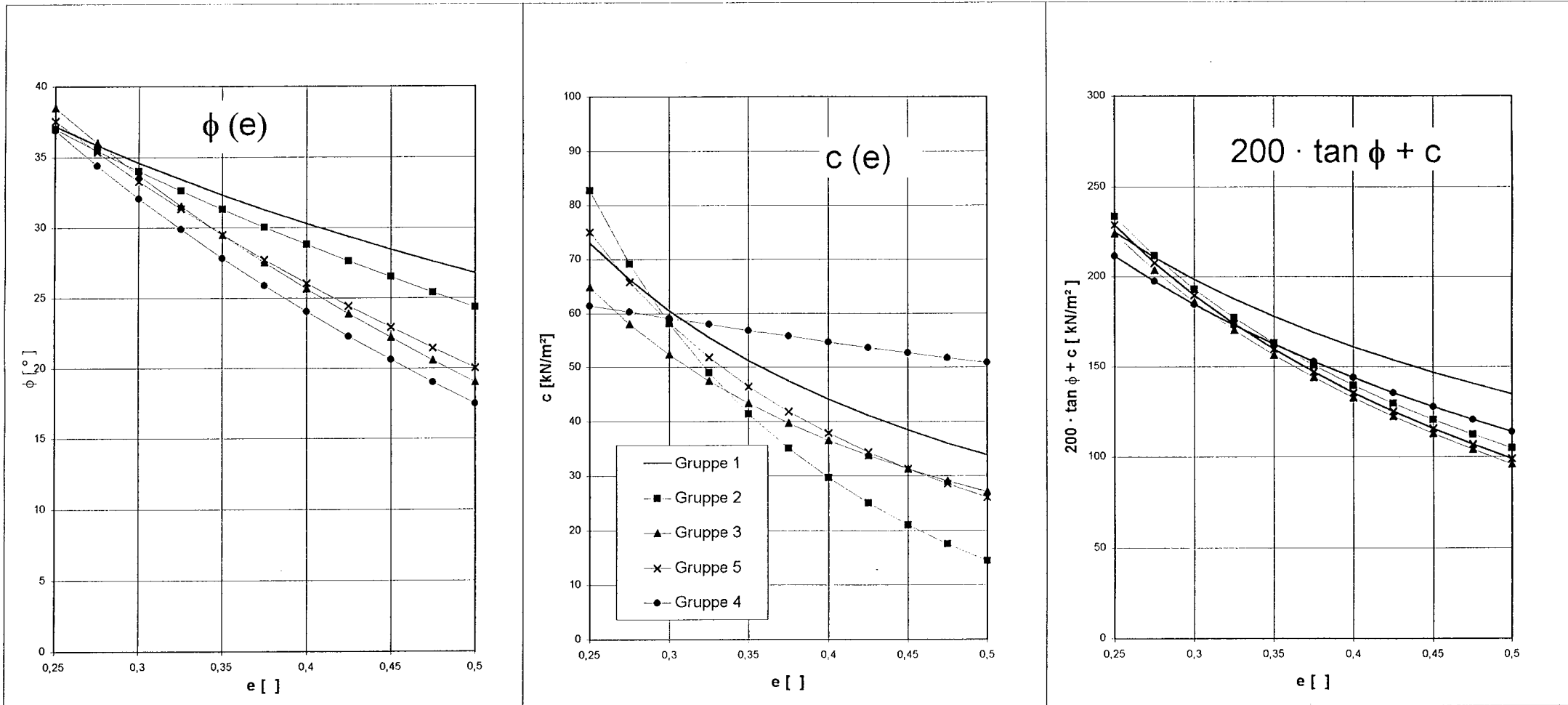


Bild 79

Scherparameter ϕ und c aus statistischer Auswertung von σ_1/σ_3
Mergel Zusammenfassung 5% Unterschreitungswahrscheinlichkeit

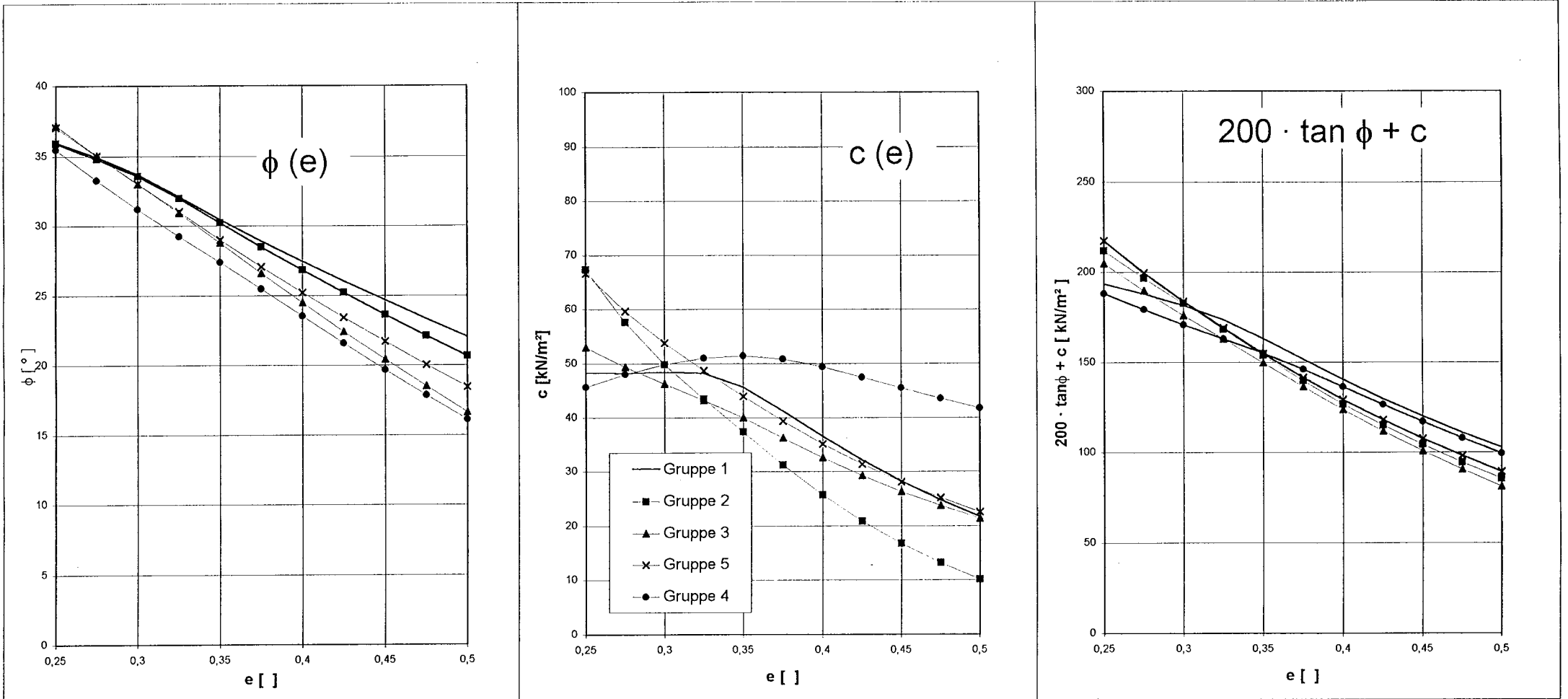


Bild 80

Regressionsanalyse der Scherparameter ϕ und c
 Mergel $15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$

Deutsche Forschungsgesellschaft
 für Bodenmechanik
 (Degebo)

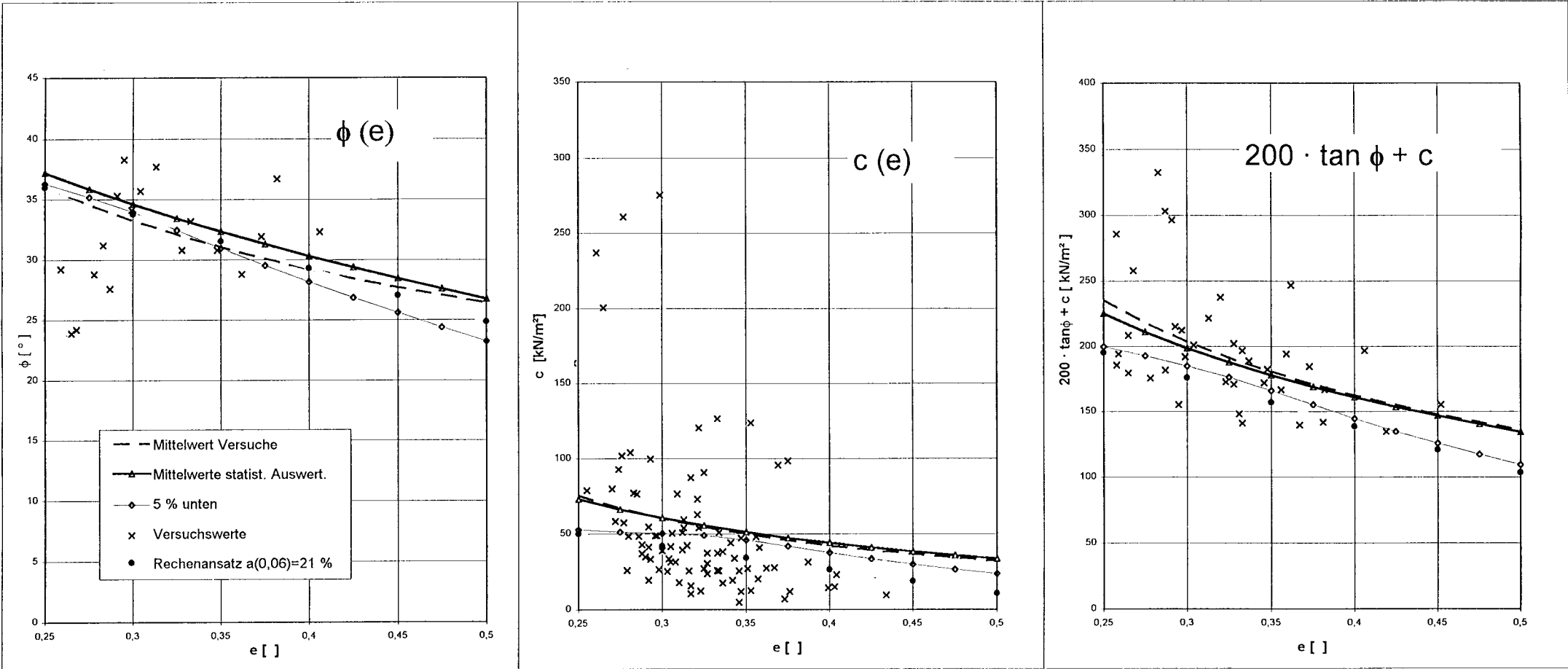


Bild 81

Regressionsanalyse der Scherparameter ϕ und c
Mergel $26\% < a(0,06) \leq 33\%$

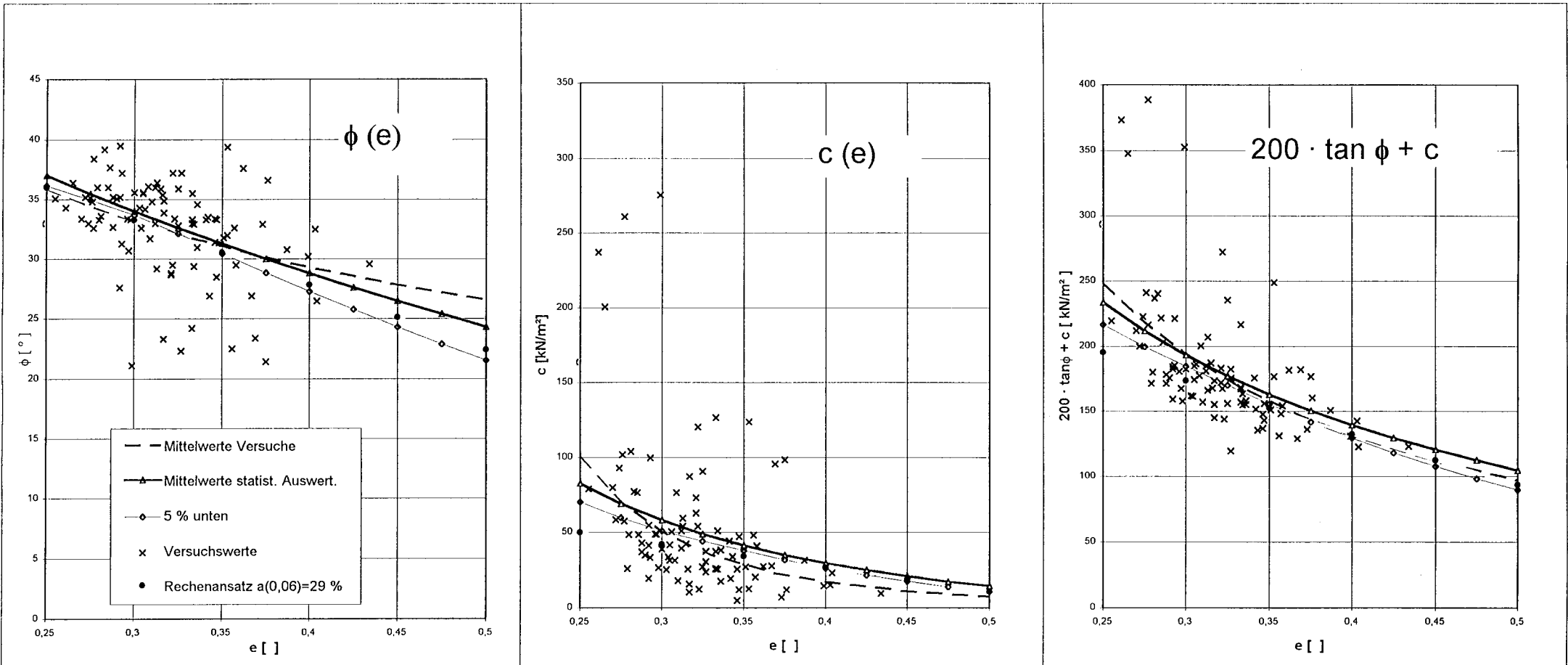


Bild 82

Regressionsanalyse der Scherparameter ϕ und c
Mergel $33\% < a(0,06) \leq 40\%$

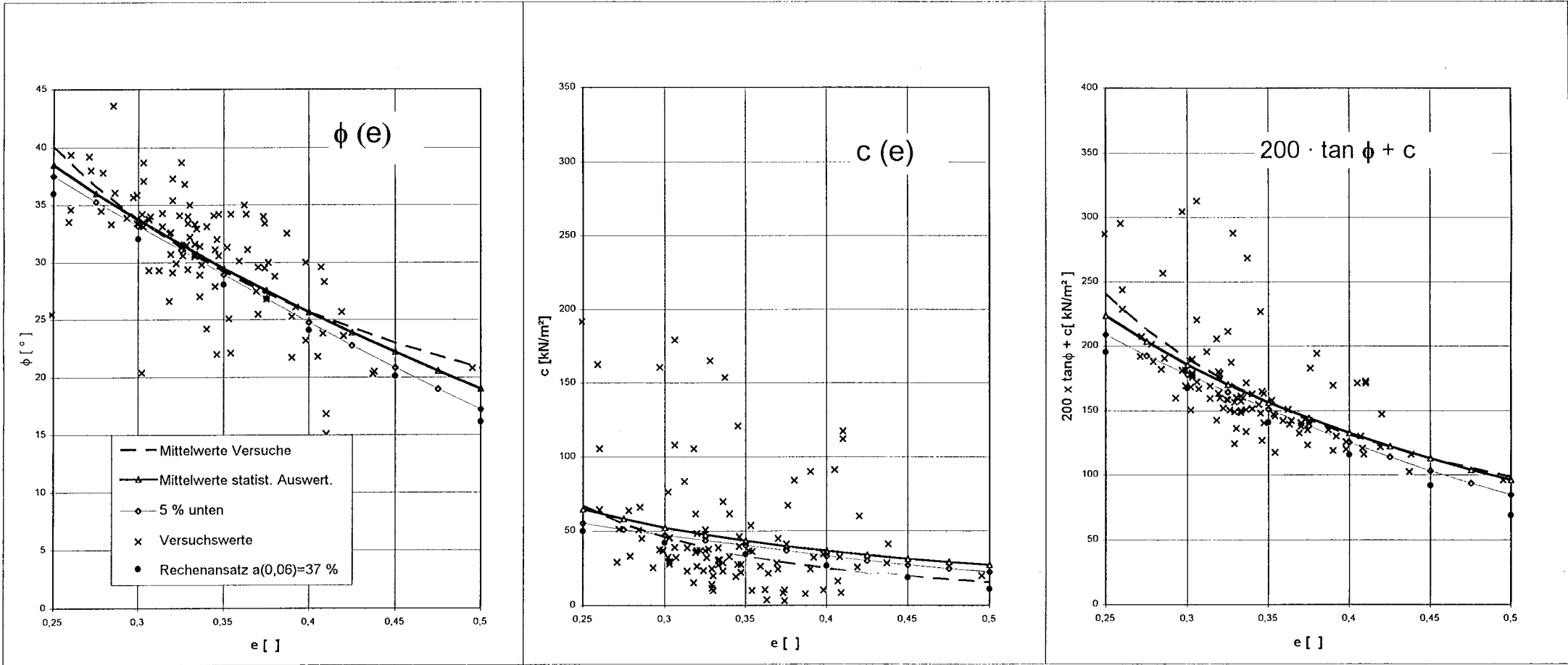


Bild 83

Regressionsanalyse der Scherparameter ϕ und c

Mergel $26\% < a(0,06) \leq 40\%$

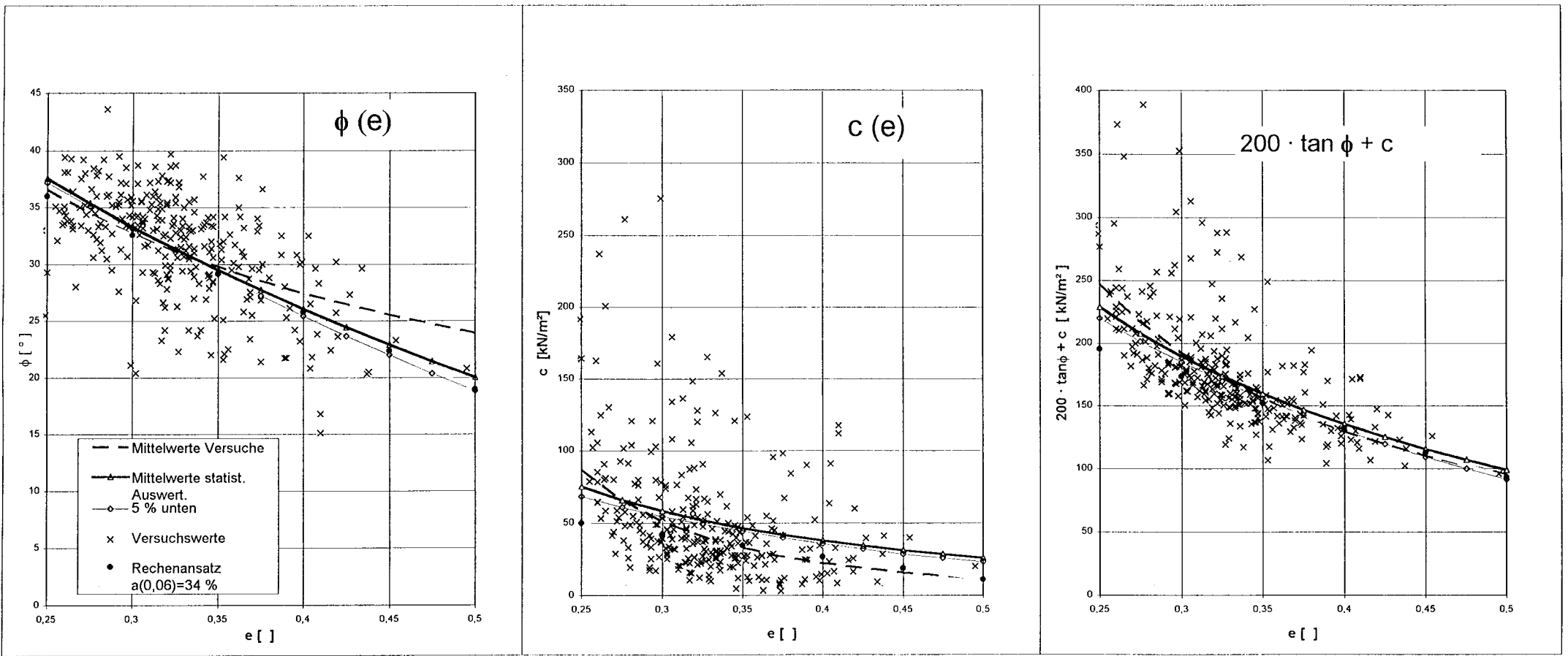
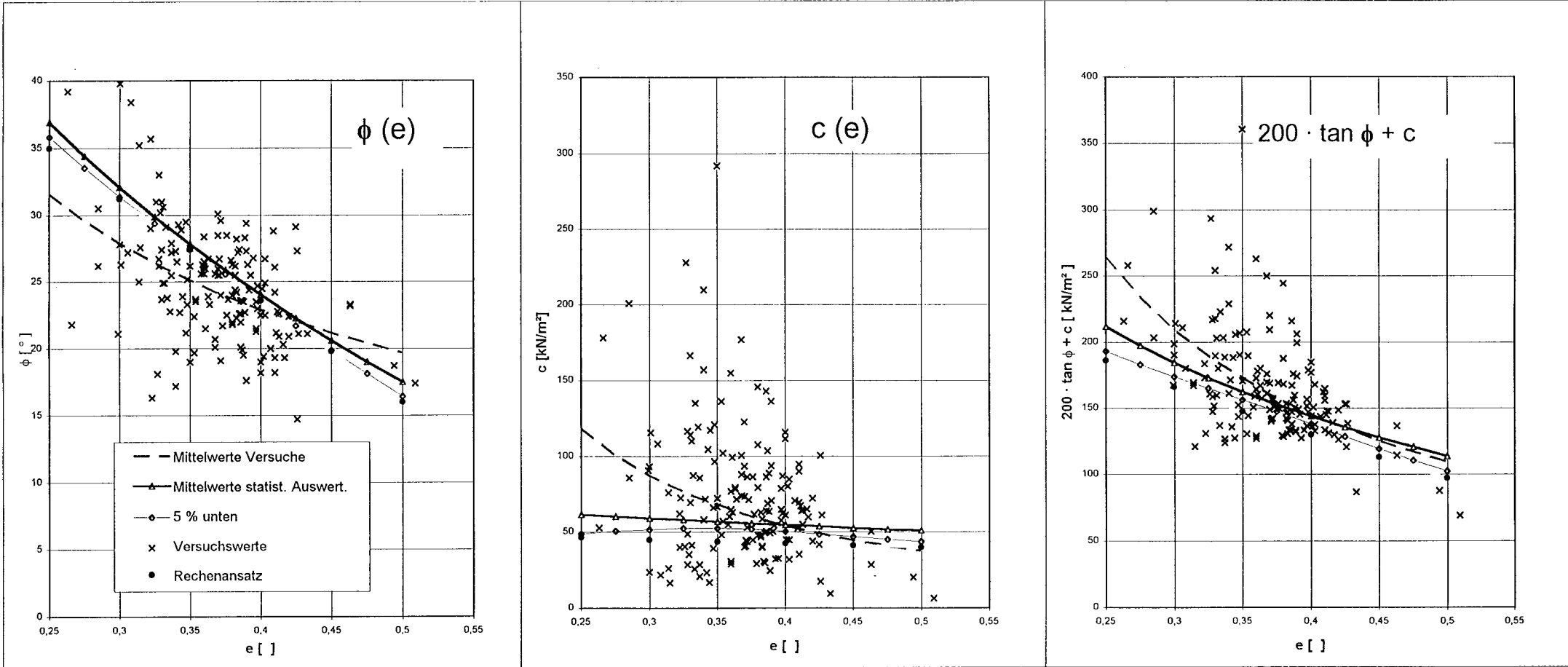


Bild 84

Regressionsanalyse der Scherparameter ϕ und c
Mergel $40\% < a(0,06) \leq 60\%$



Regressionsanalyse der Scherparameter ϕ und c
Mittelwerte im Vergleich

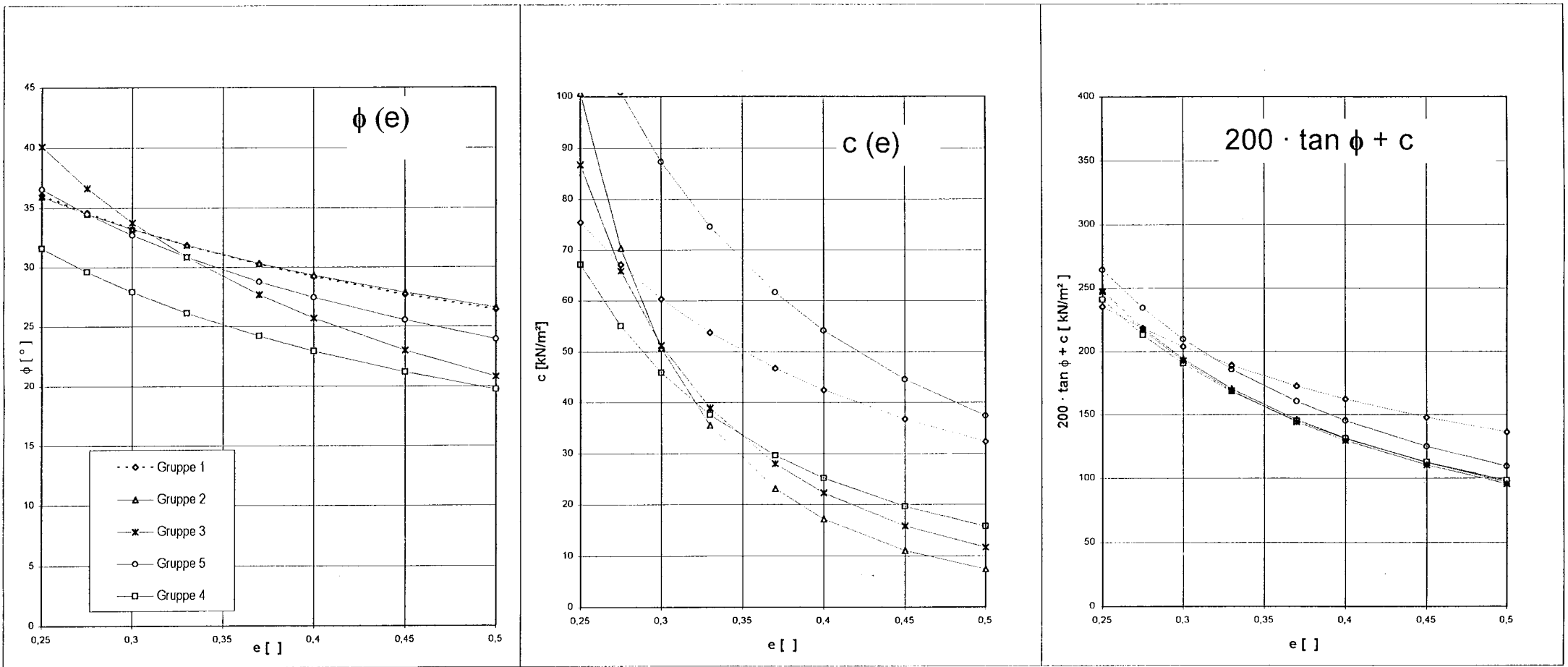


Bild 86

Mergel $15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$ (26 Versuche)

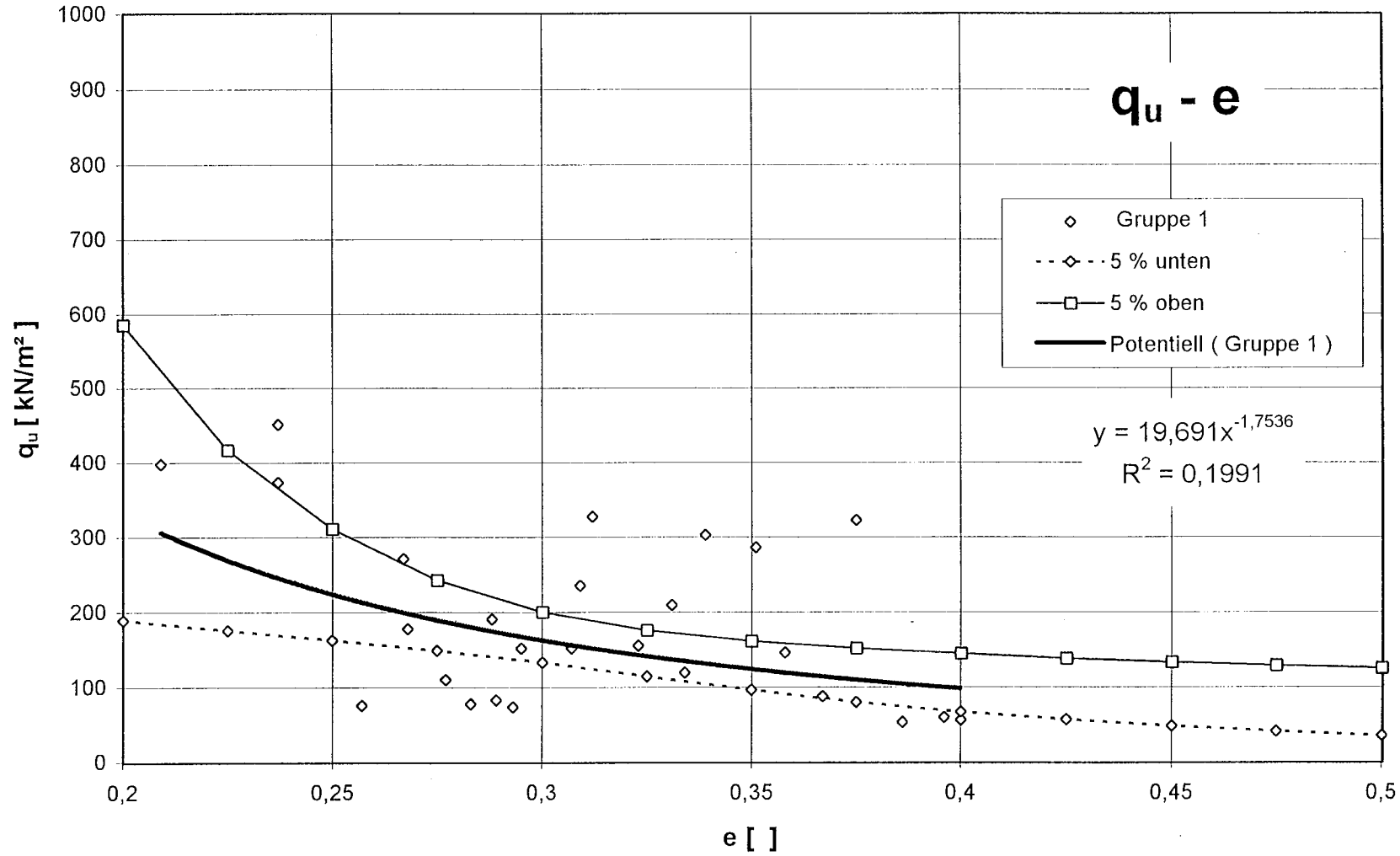


Bild 87

Mergel 26 % < a(0,06) ≤ 33% (32 Versuche)

$q_u - e$

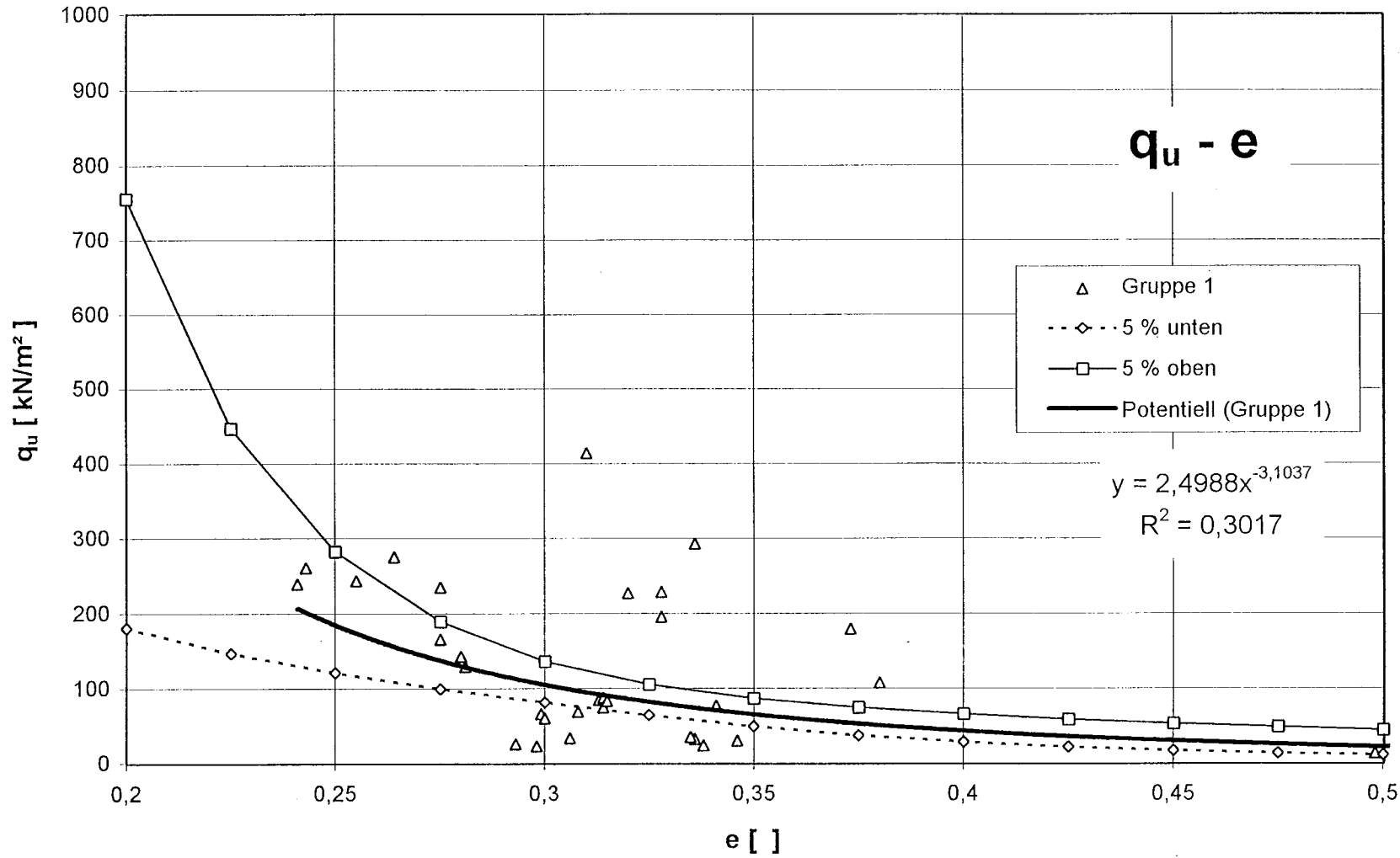


Bild 88

Mergel 33% $< a(0,06) \leq 40\%$ (44 Versuche)

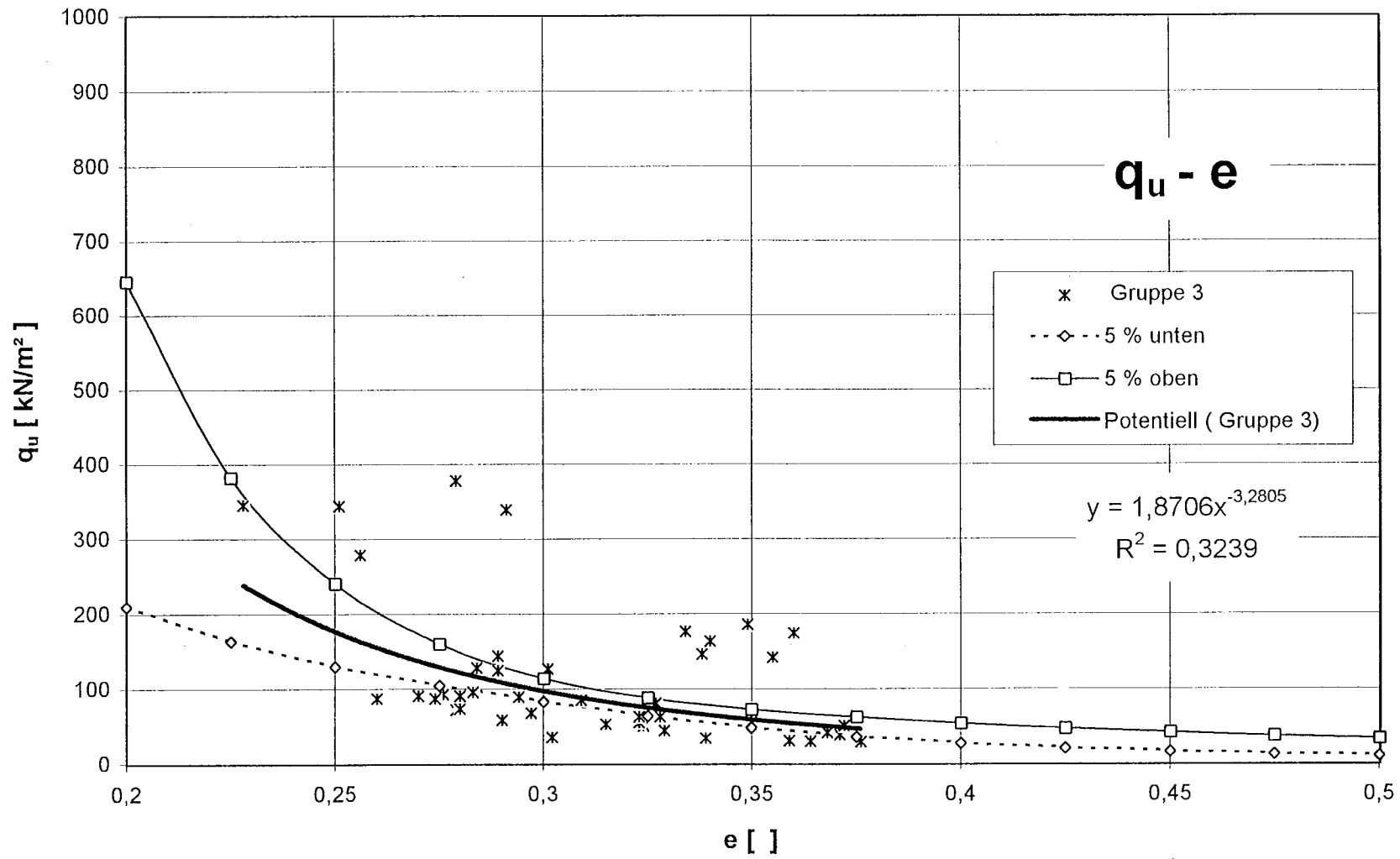


Bild 89

Mergel 26% < a(0,06) ≤ 40% (178 Versuche)

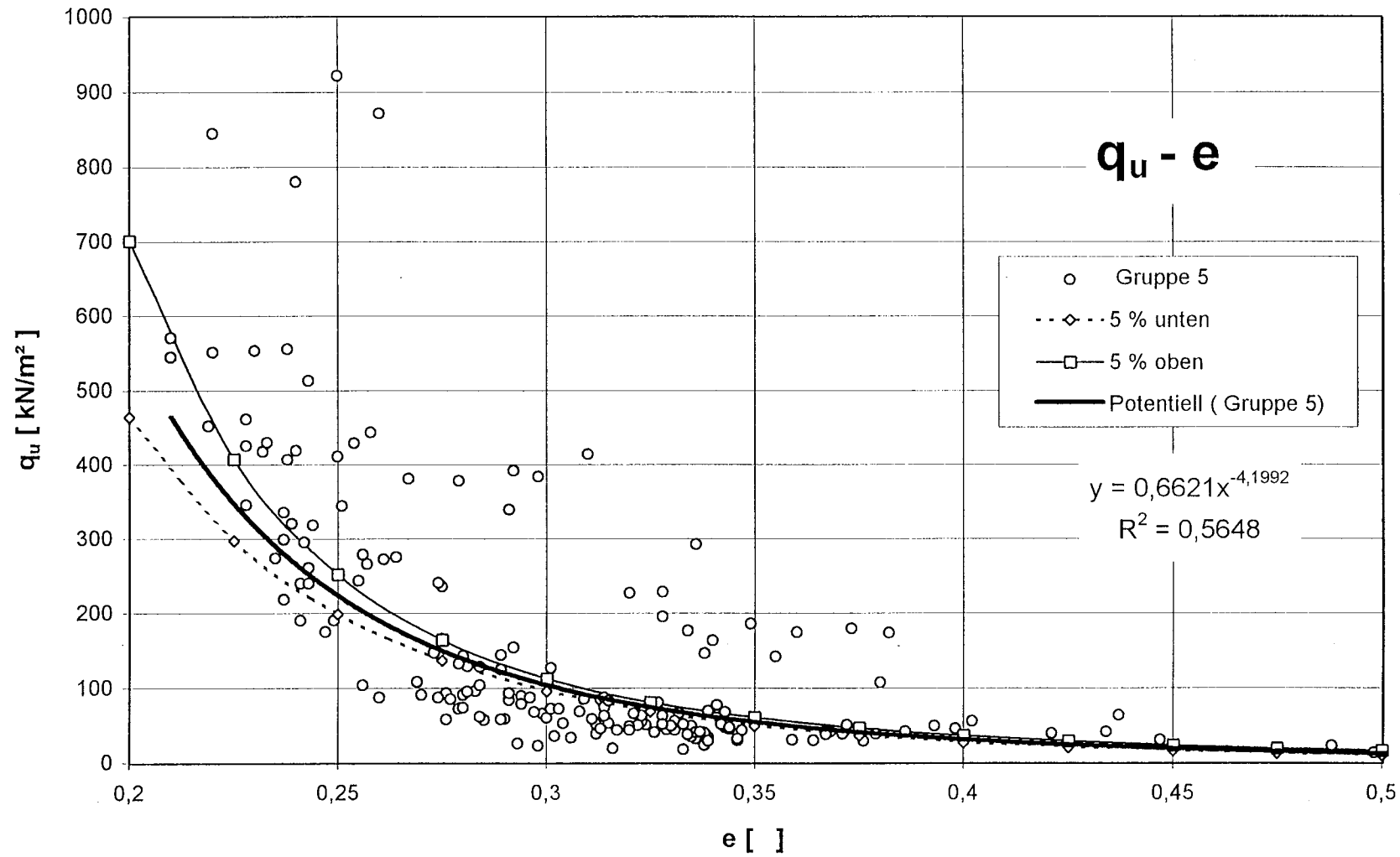


Bild 90

Mergel $40\% < a(0,06) \leq 60\%$ (90 Versuche)

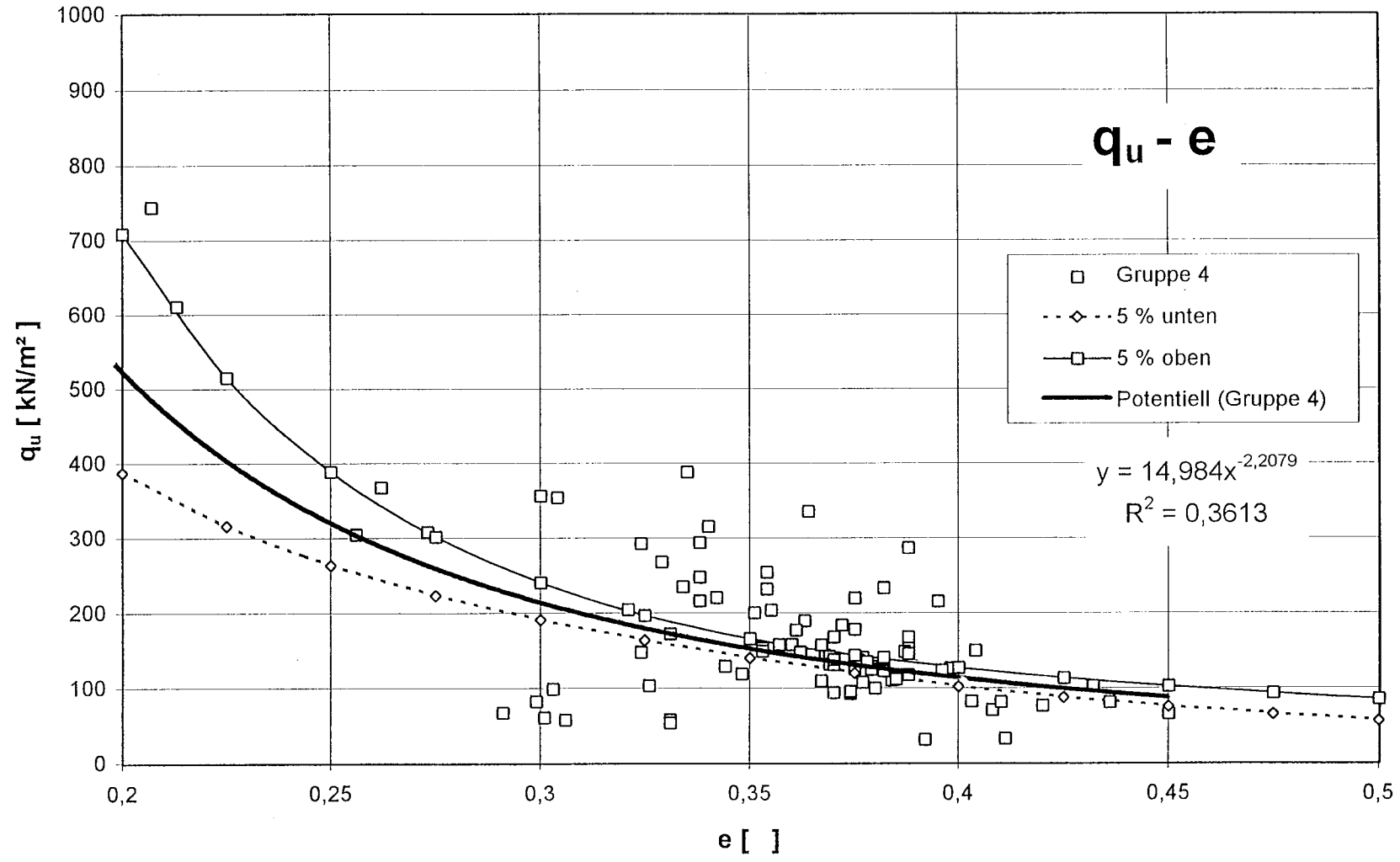


Bild 91

Mergel $15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$ (26 Versuche)

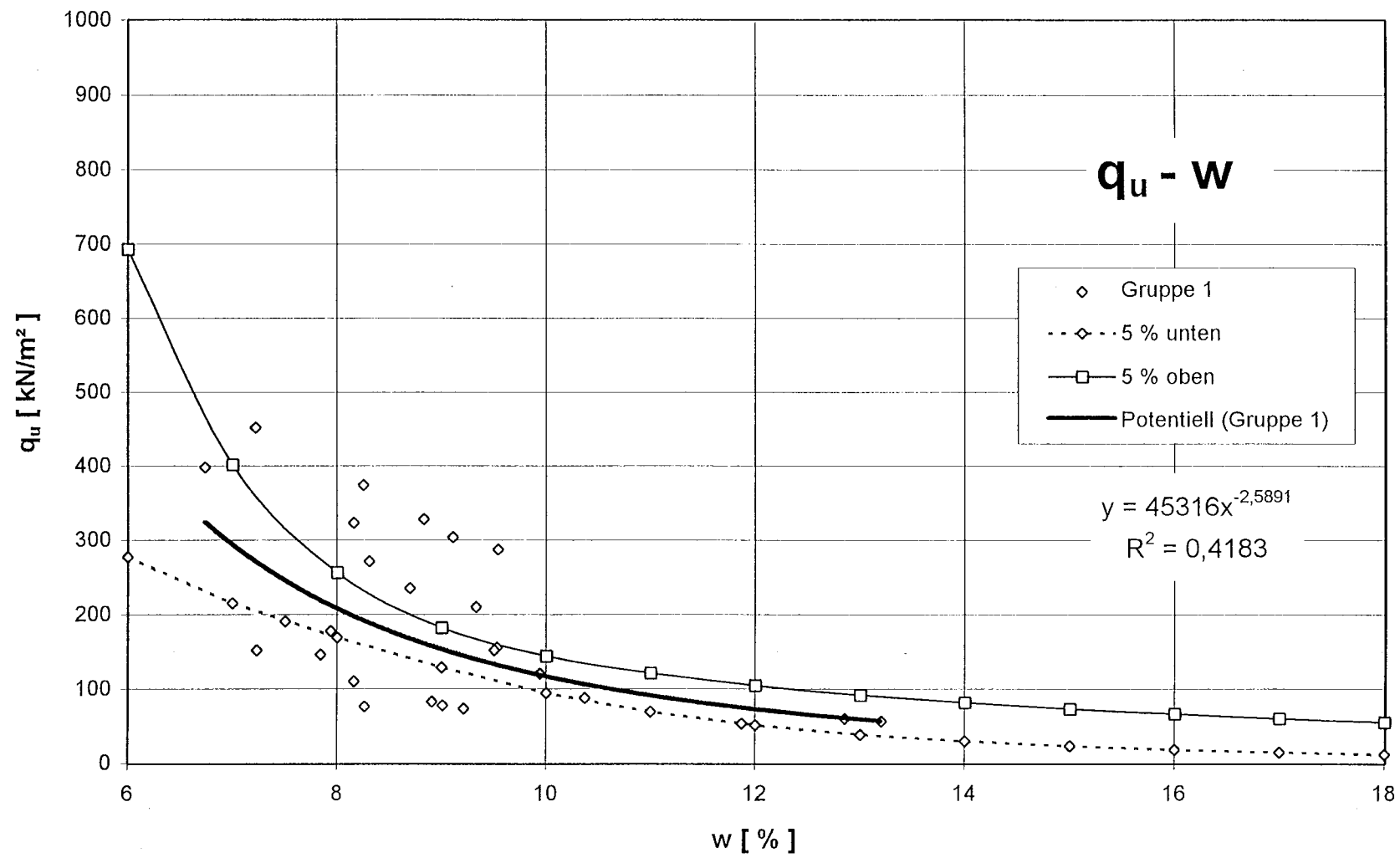


Bild 92

Mergel $26\% < a(0,06) \leq 33\%$ (32 Versuche)

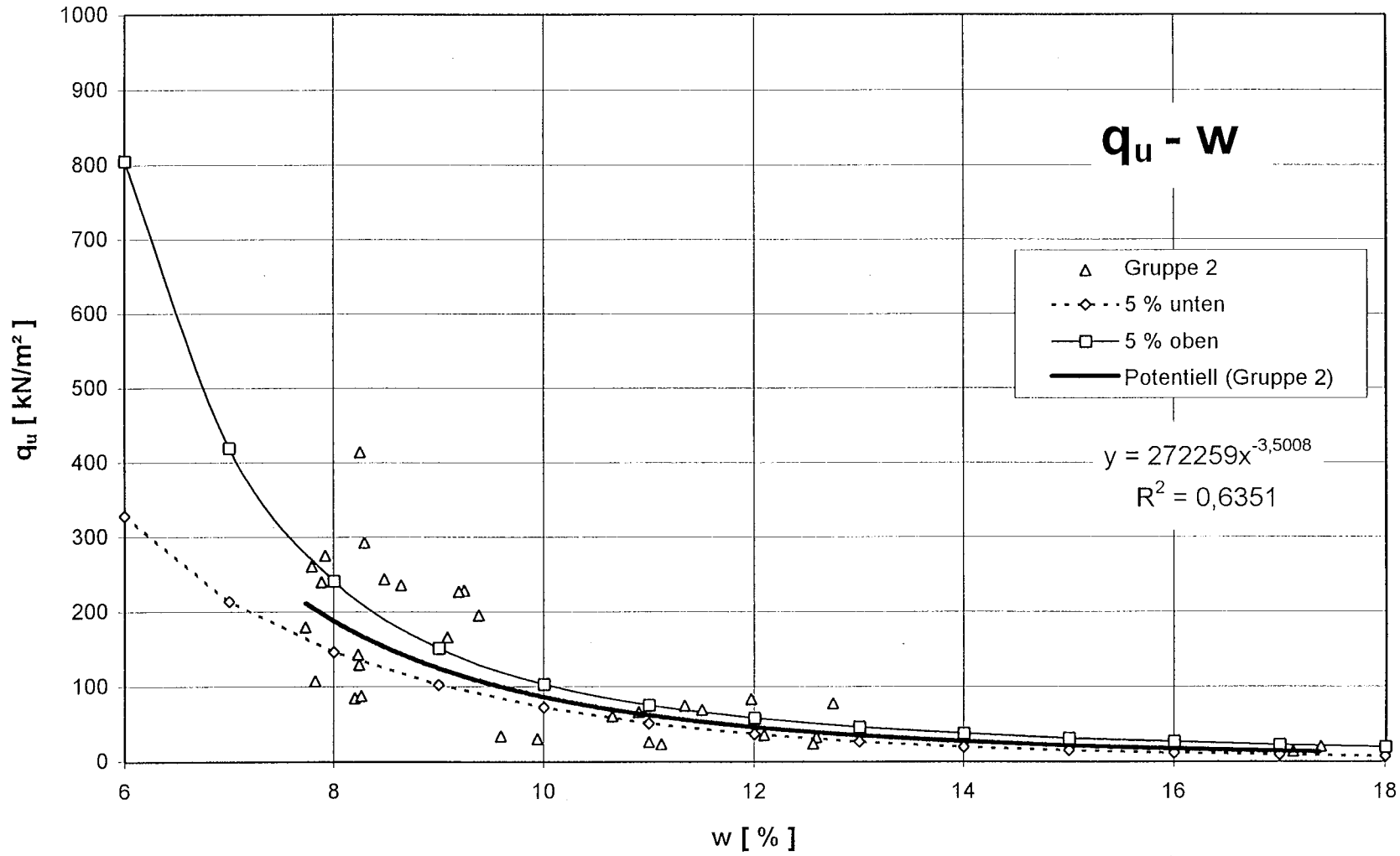
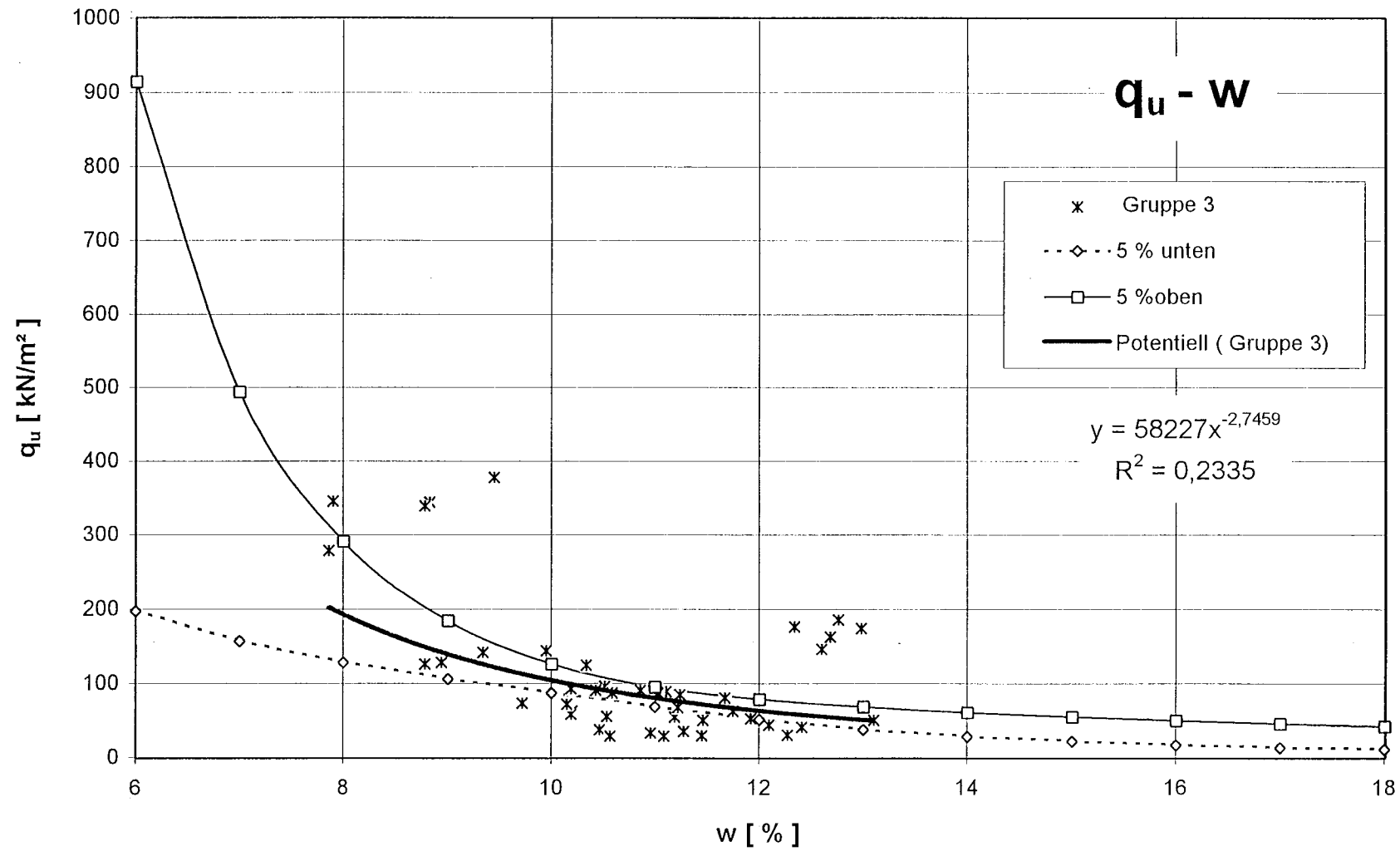


Bild 93

Mergel 33% < a(0,06) ≤ 40% (44 Versuche)



Mergel $26\% < a(0,06) \leq 40\%$ (178 Versuche)

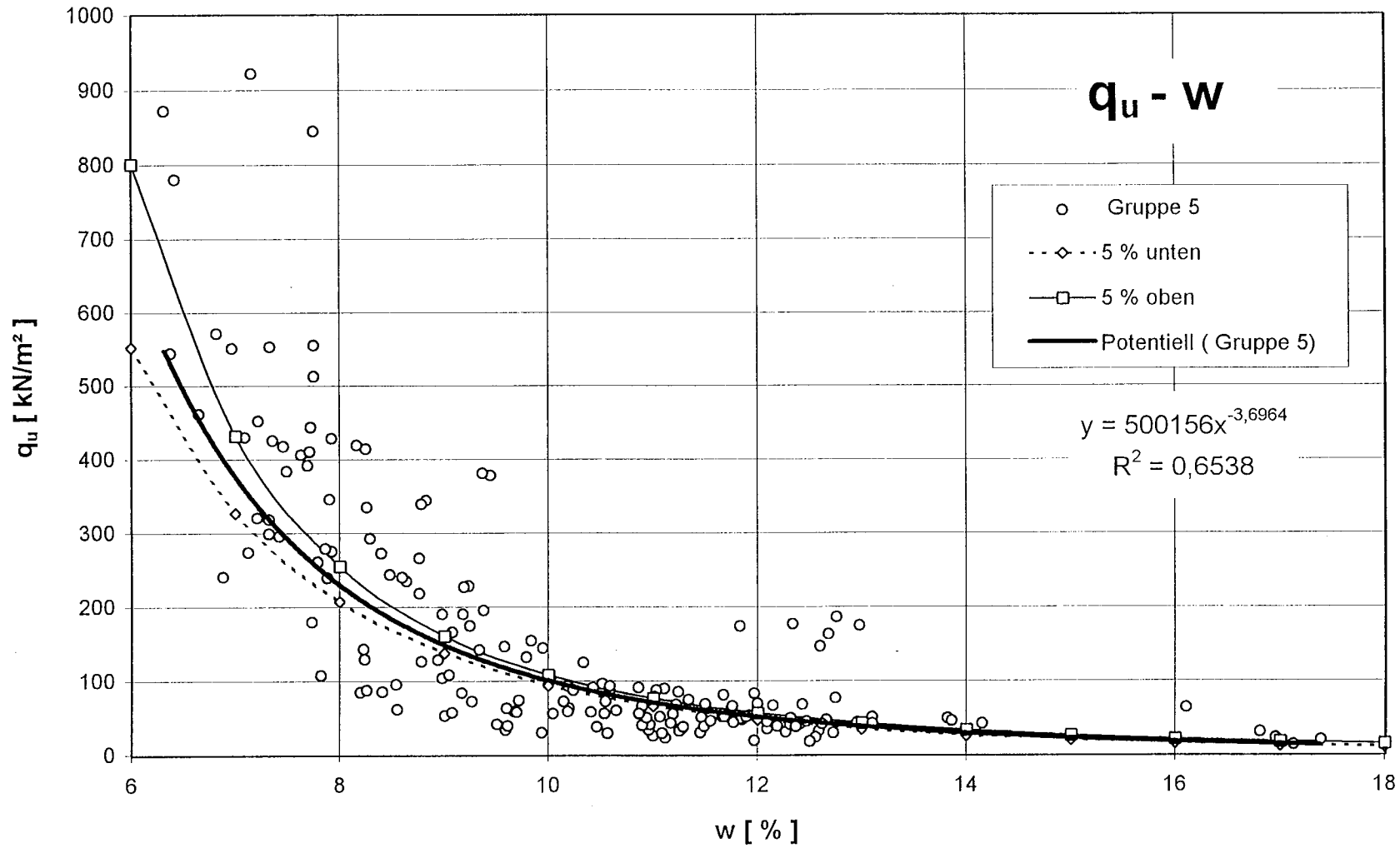


Bild 95

Mergel $40\% < a(0,06) \leq 60\%$ (90 Versuche)

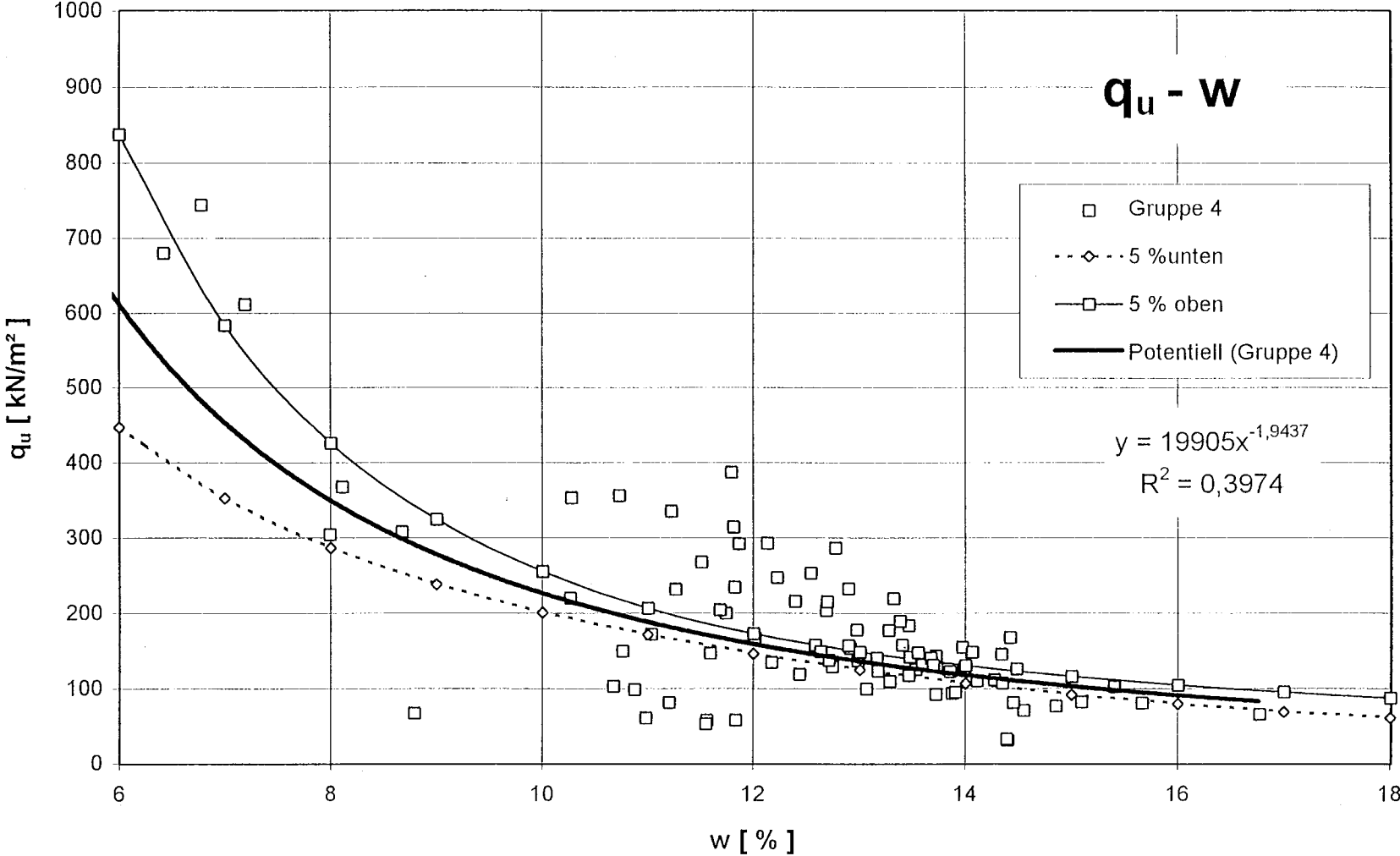
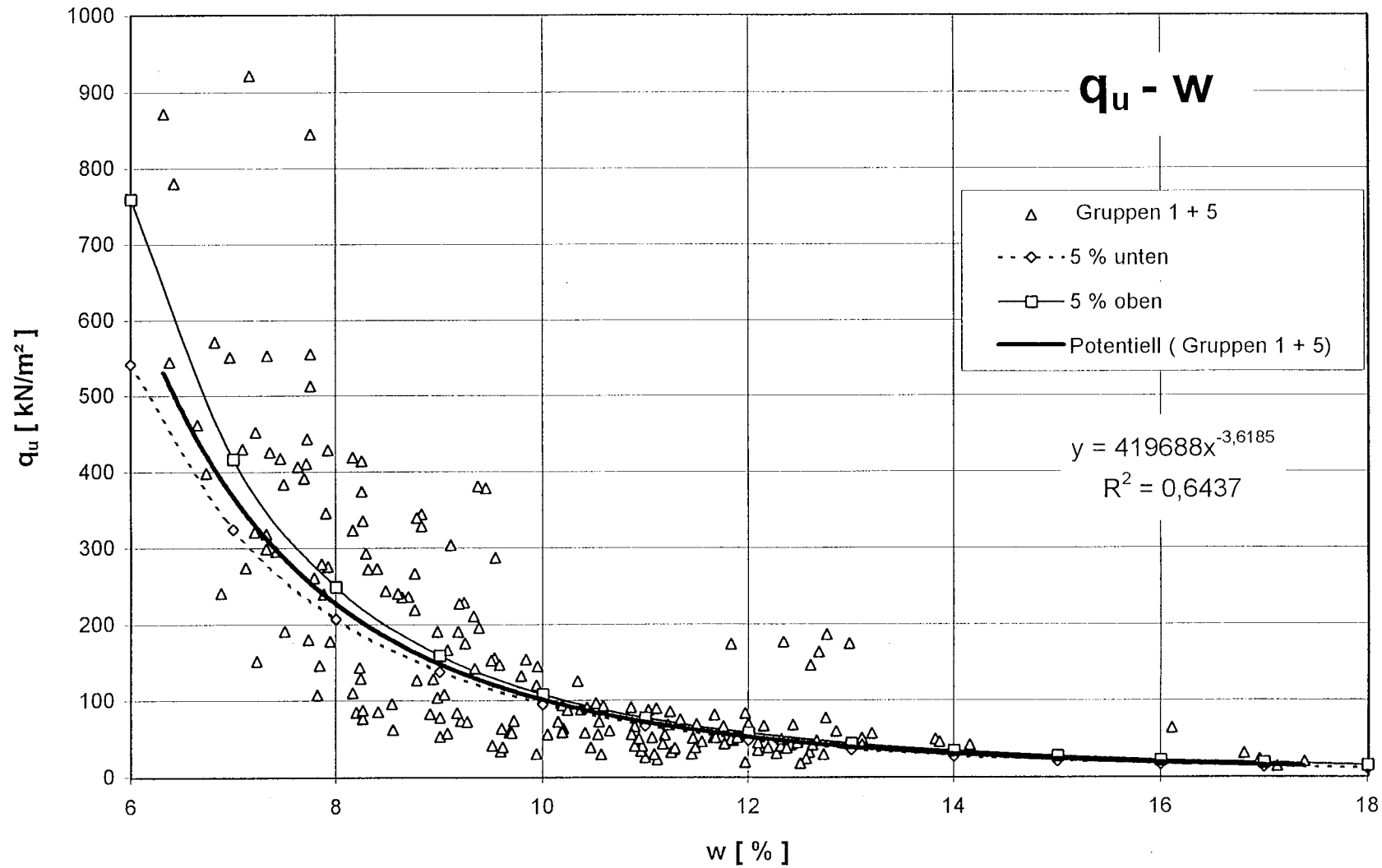


Bild 96

Mergel $15\% \leq a(0,06) \leq 40\%$ (204 Versuche)



Mergel - Zusammenfassung der Mittelwerte

$q_u - w$

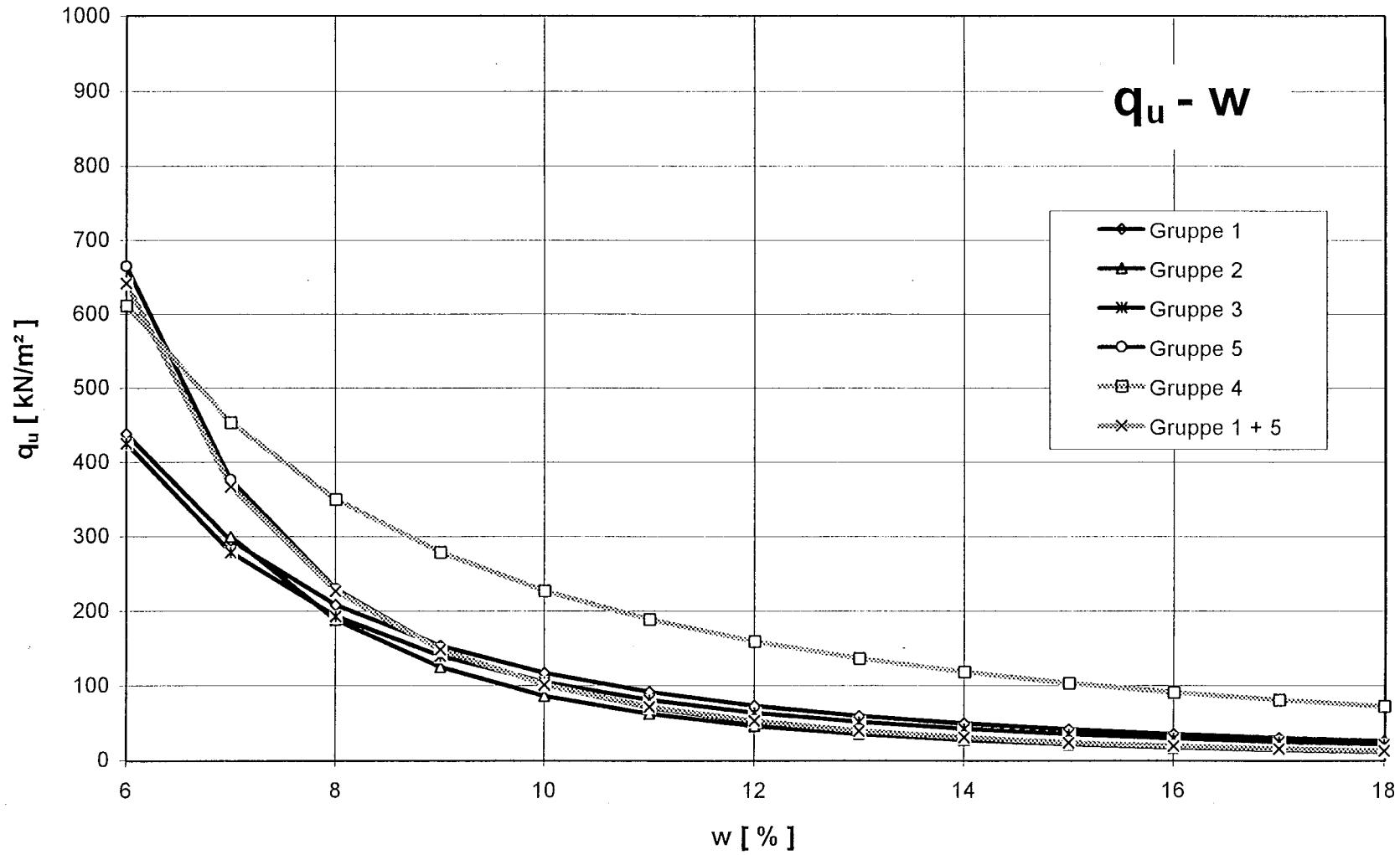


Bild 98

Mergel - Zusammenfassung der unteren Grenzen $\alpha = 5\%$

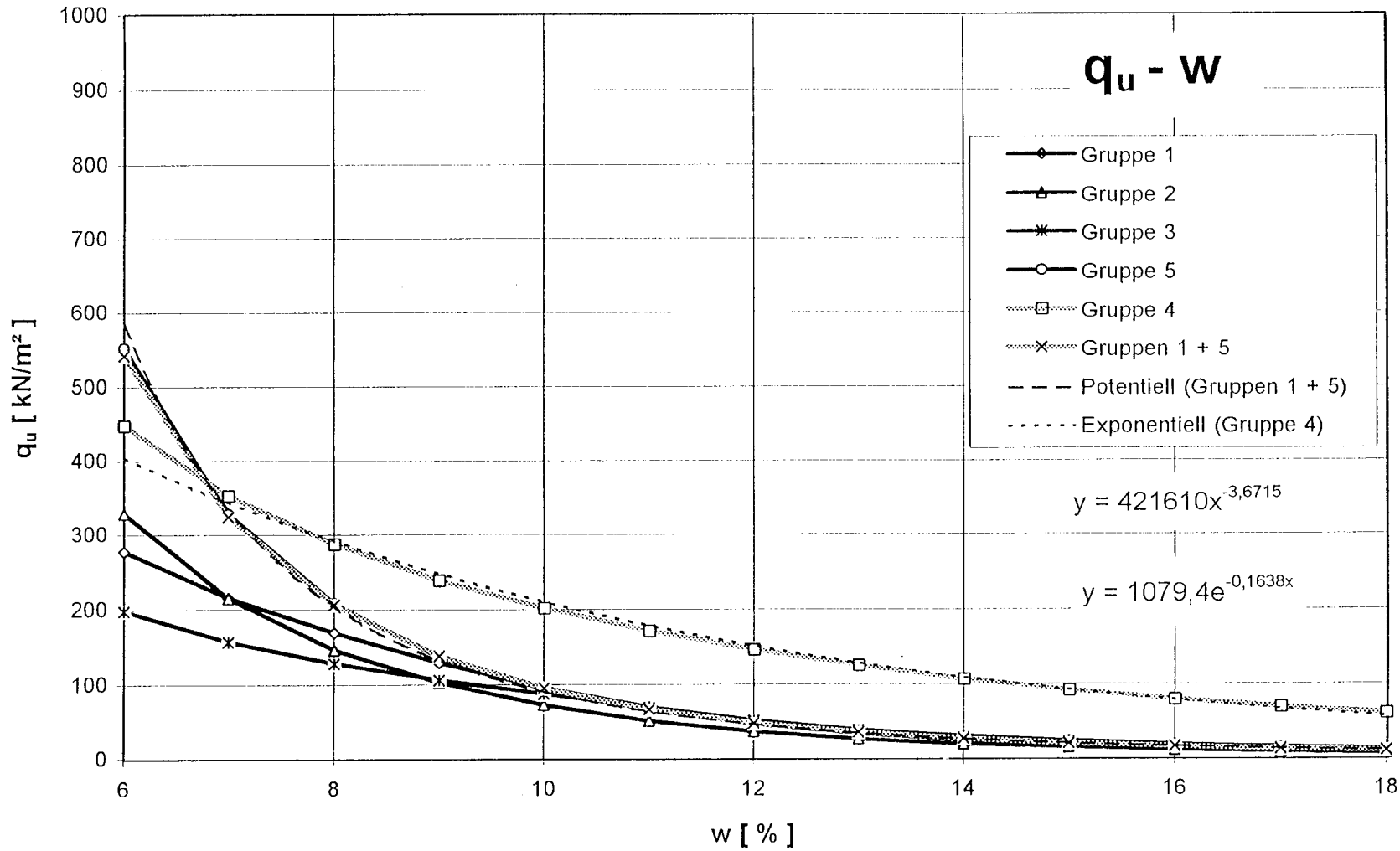


Bild 99

Mergel - Zusammenfassung der Mittelwerte

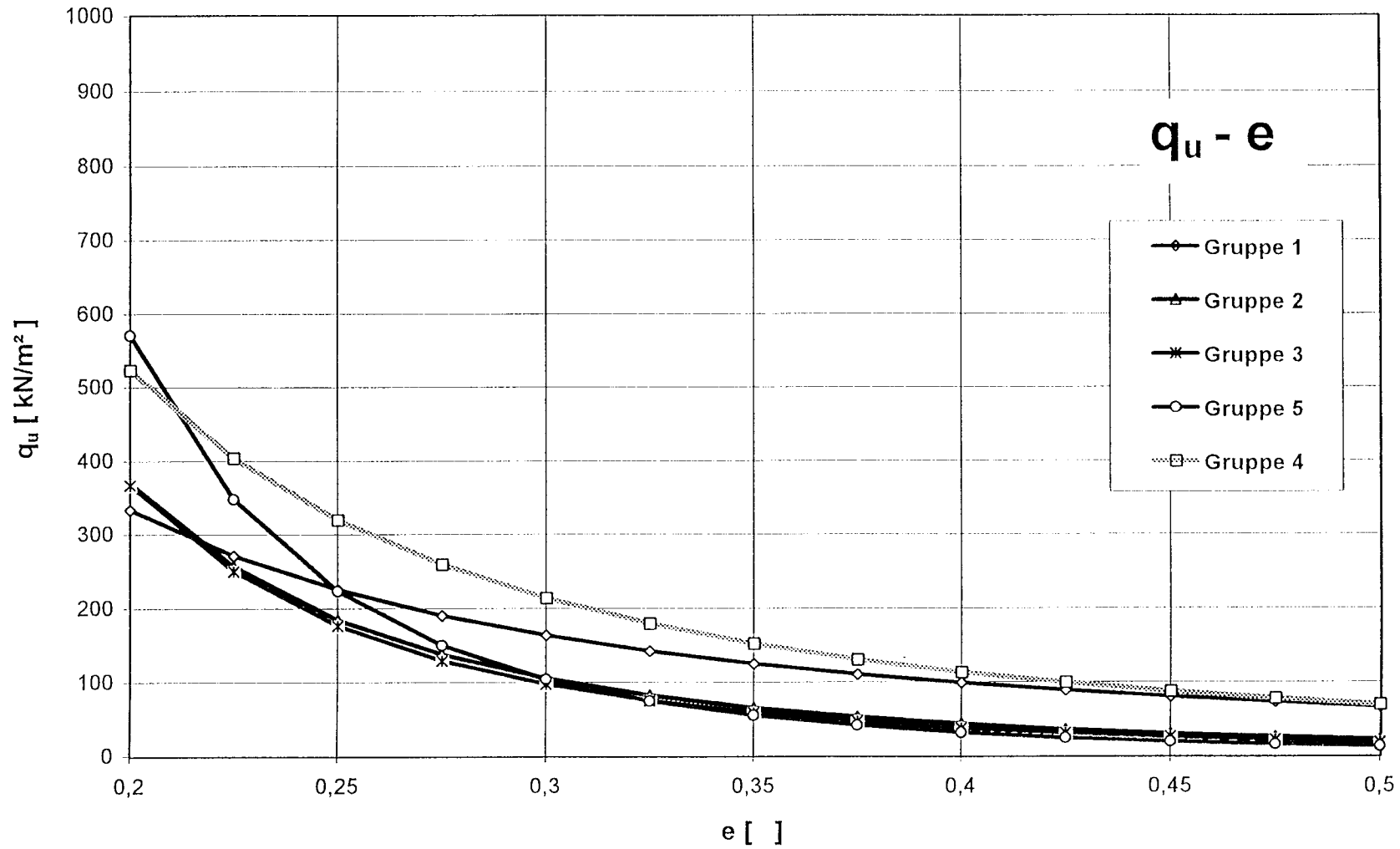
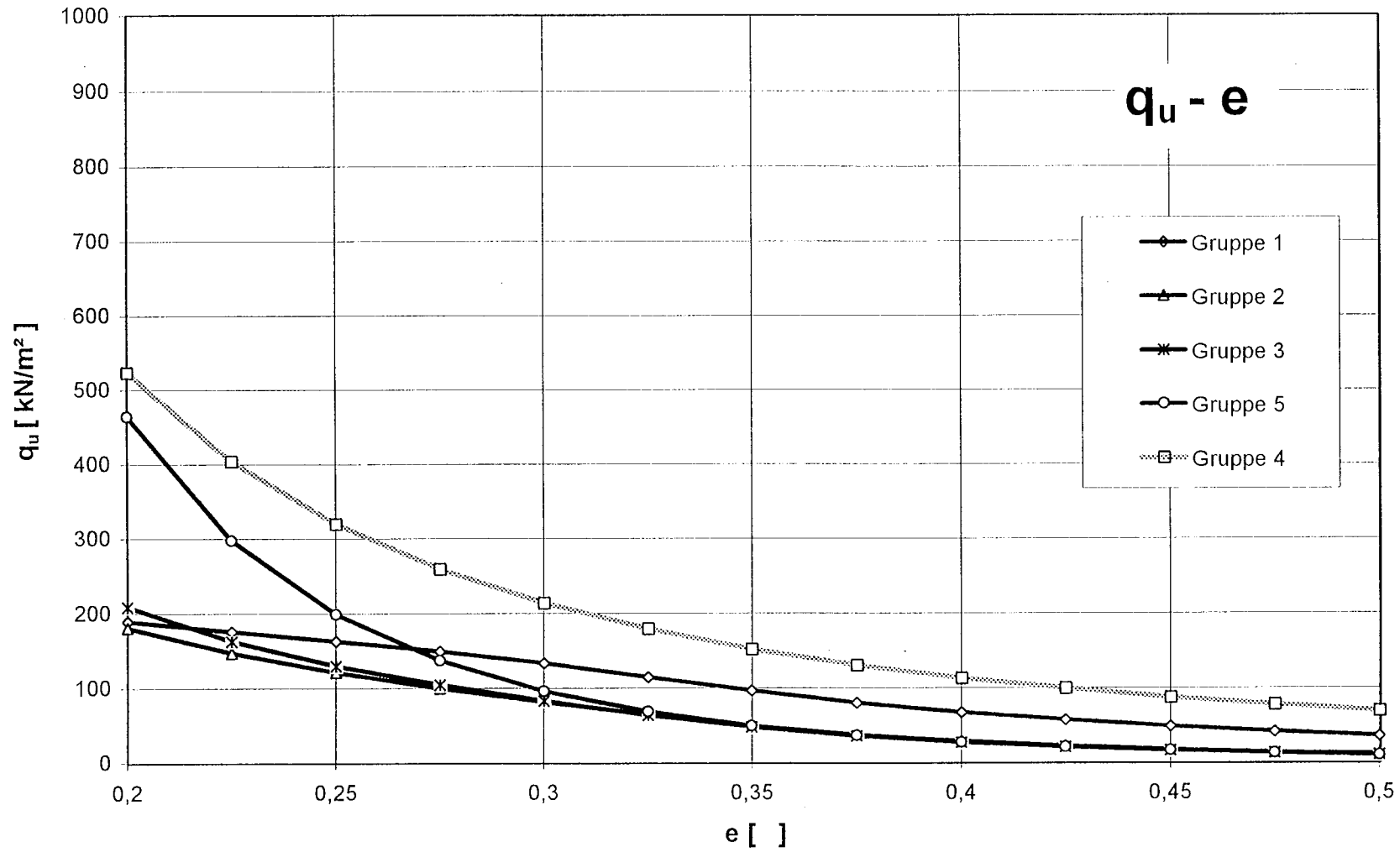


Bild 100

Mergel - Zusammenfassung der unteren Grenzen $\alpha = 5\%$



Mergel $15\% \leq a(0,06) \leq 26\%$ (74 Einzelversuche - UU-Versuch)

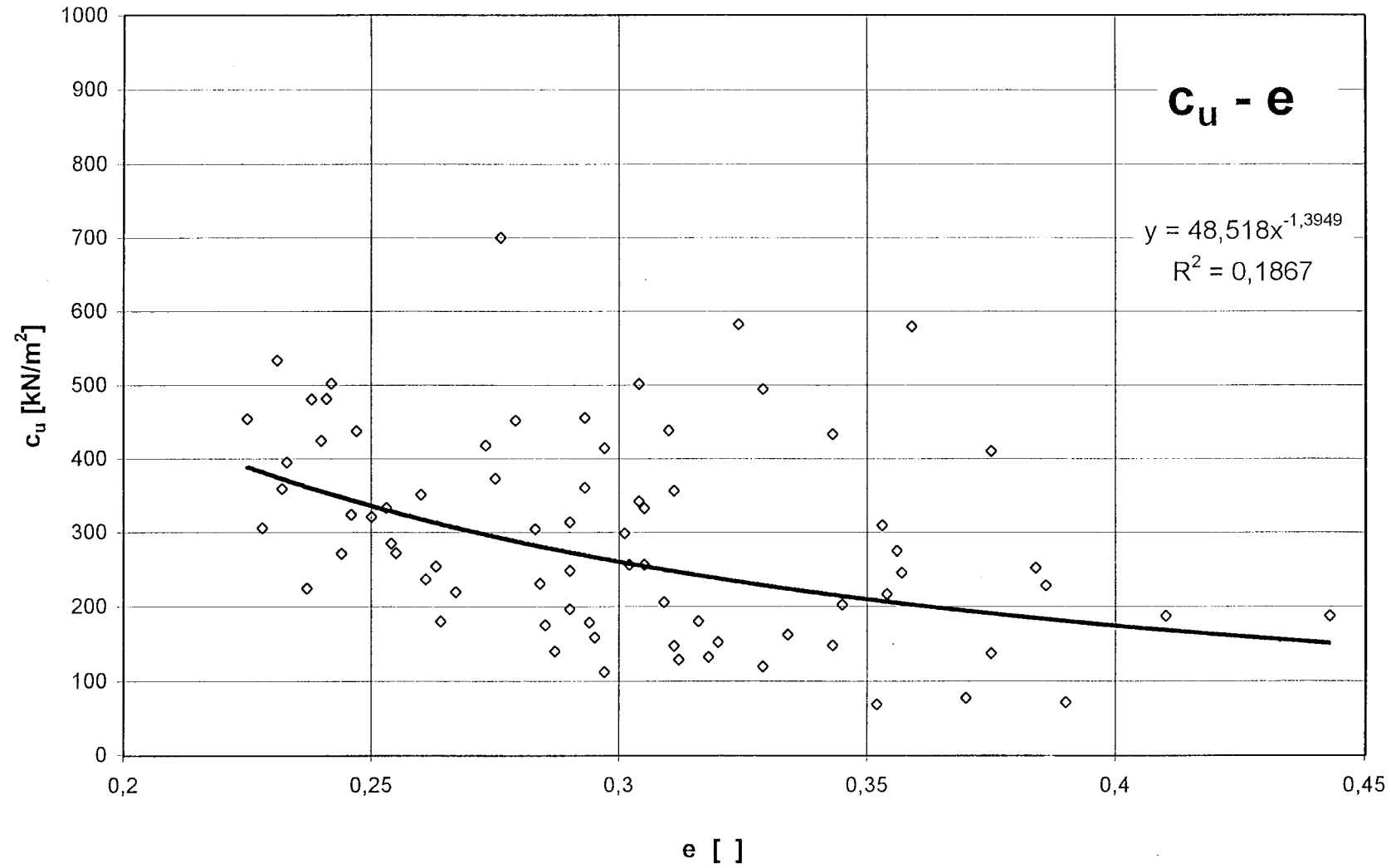


Bild 102

Mergel 26% < a(0,06) ≤ 33 % (109 Einzelversuche - UU-Versuch)

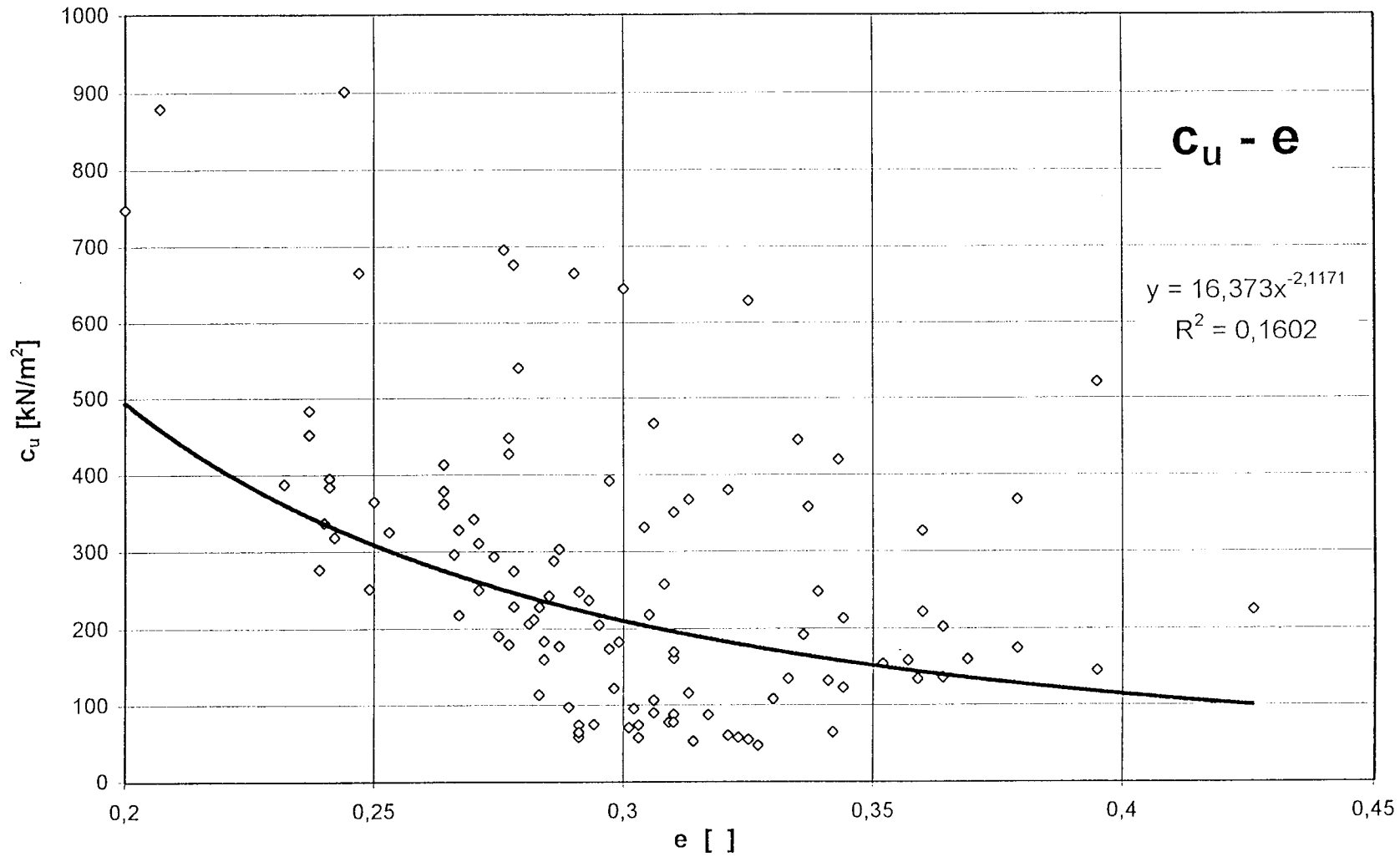


Bild 103

Mergel 33 % < a(0,06) ≤ 40 % (73 Einzelversuche - UU-Versuch)

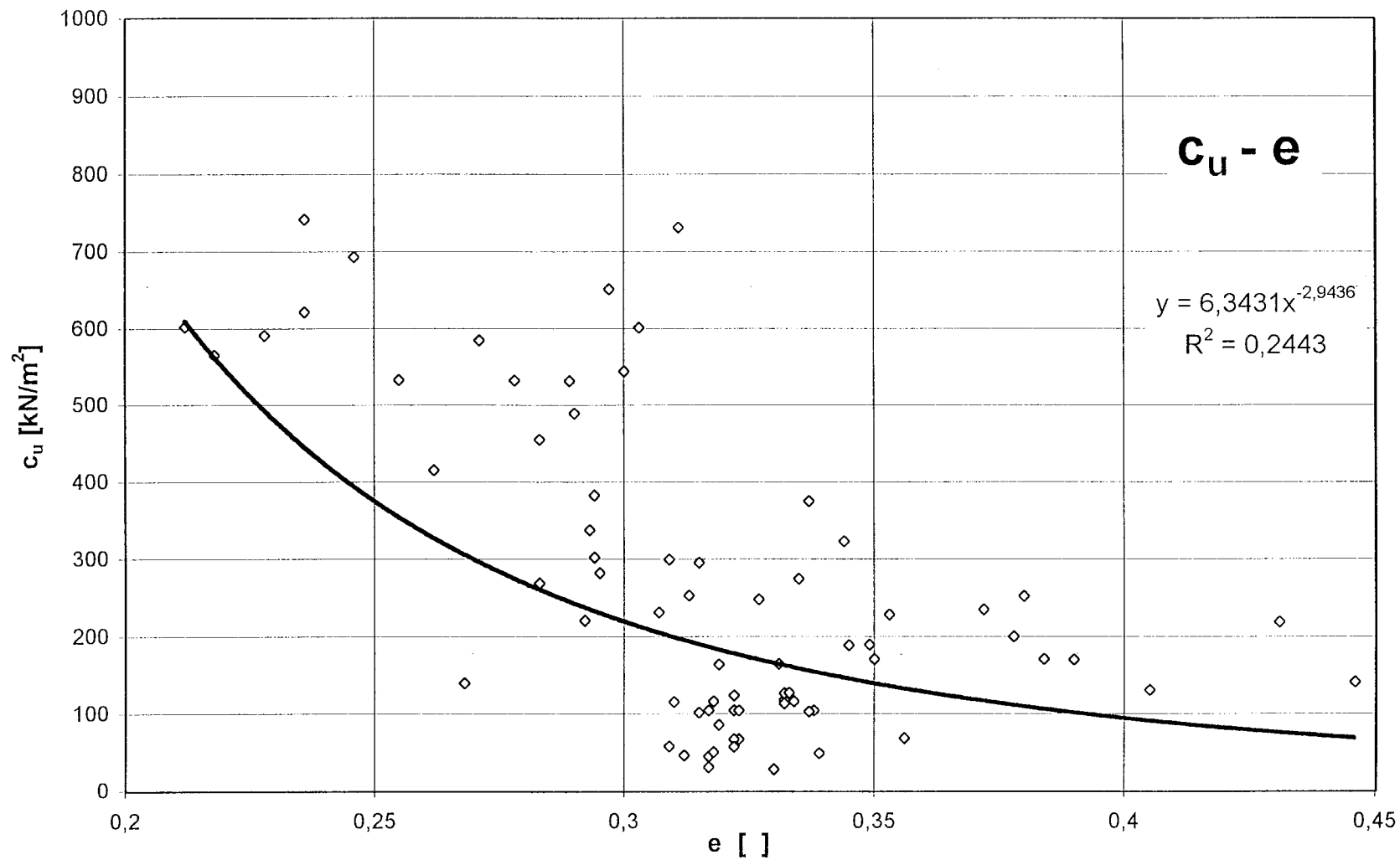
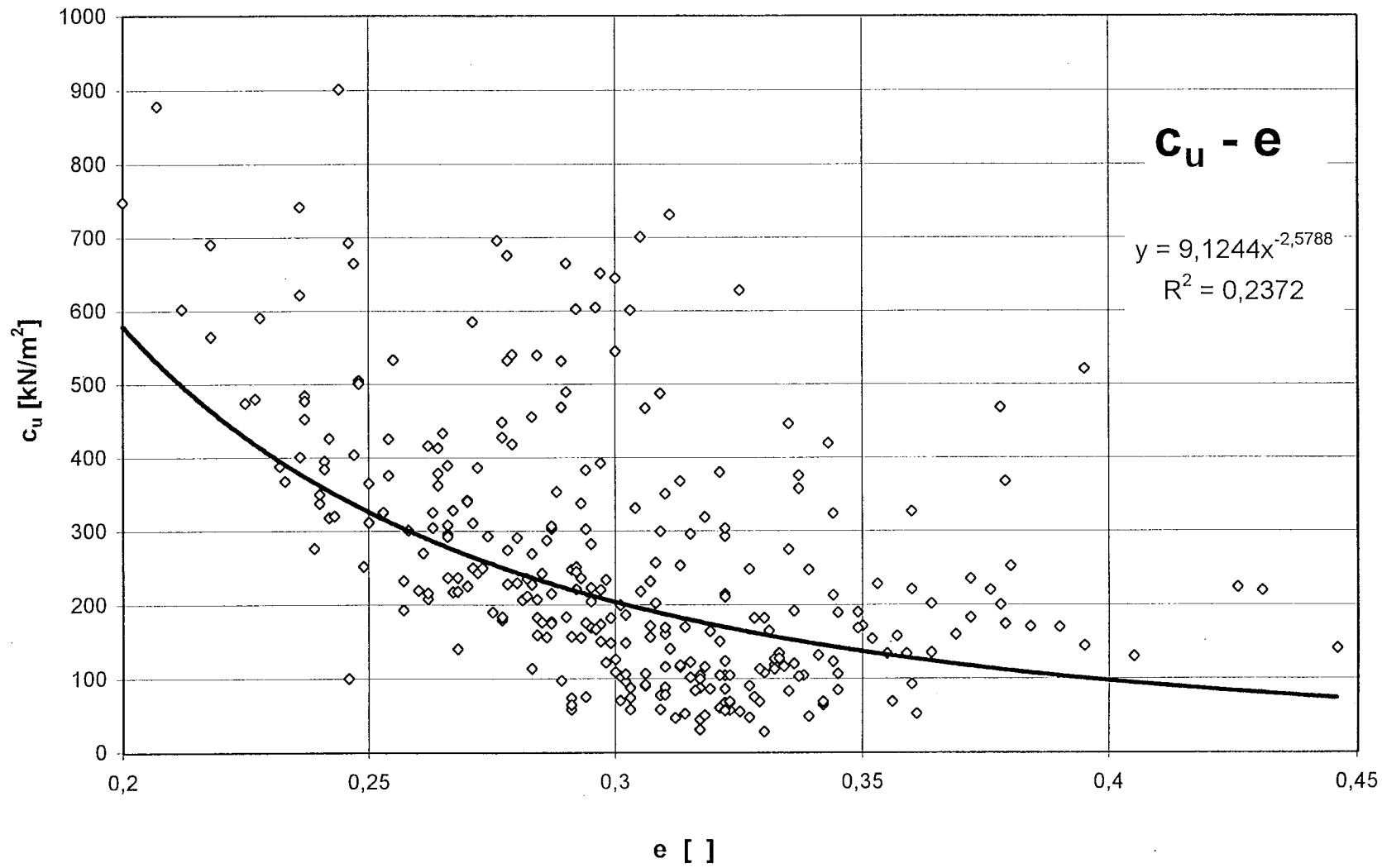


Bild 104

Mergel 26 % < a(0,06) ≤ 40 % (296 Einzelversuche - UU-Versuch)



Mergel $40\% < a(0,06) \leq 60\%$ (18 Einzelversuche - UU-Versuche)

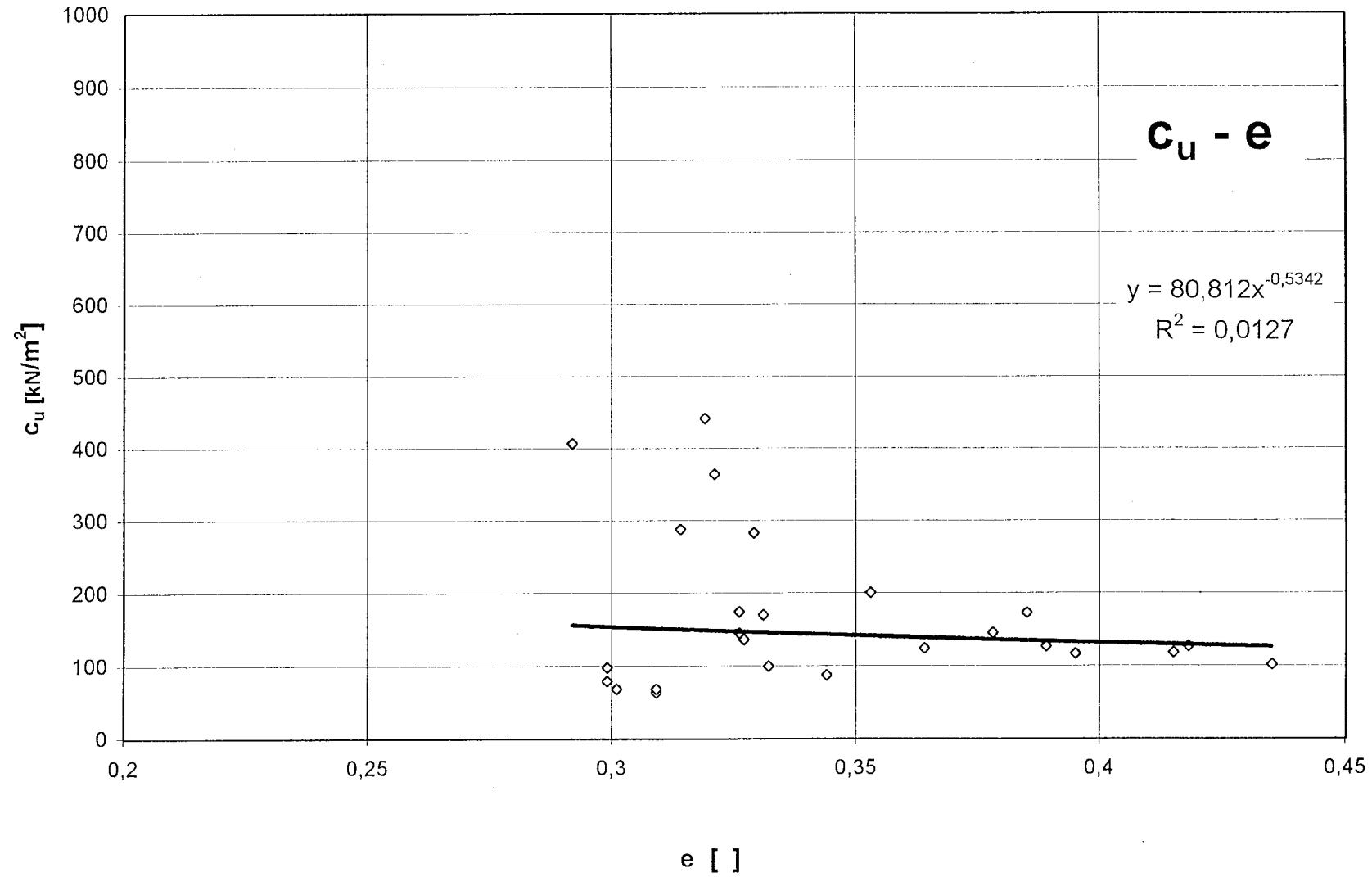
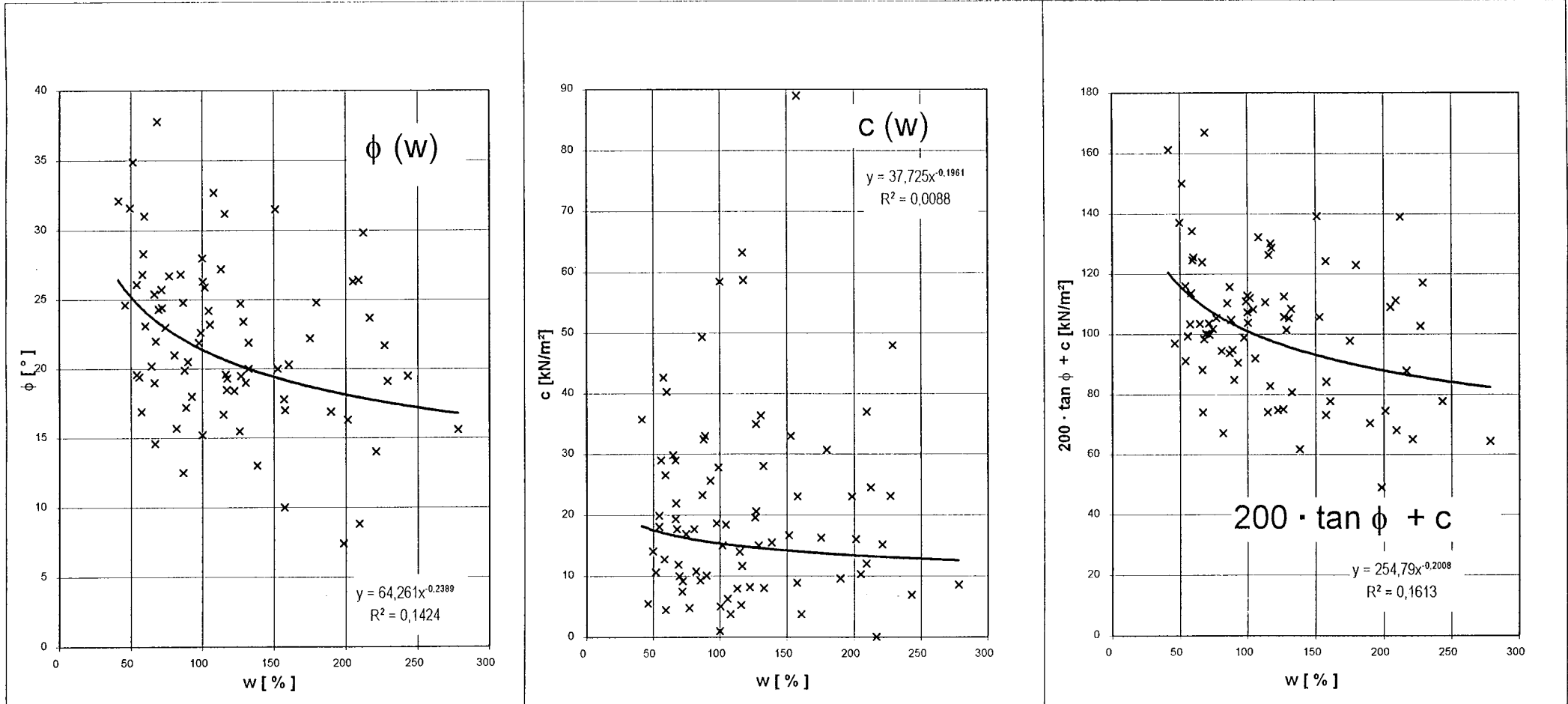


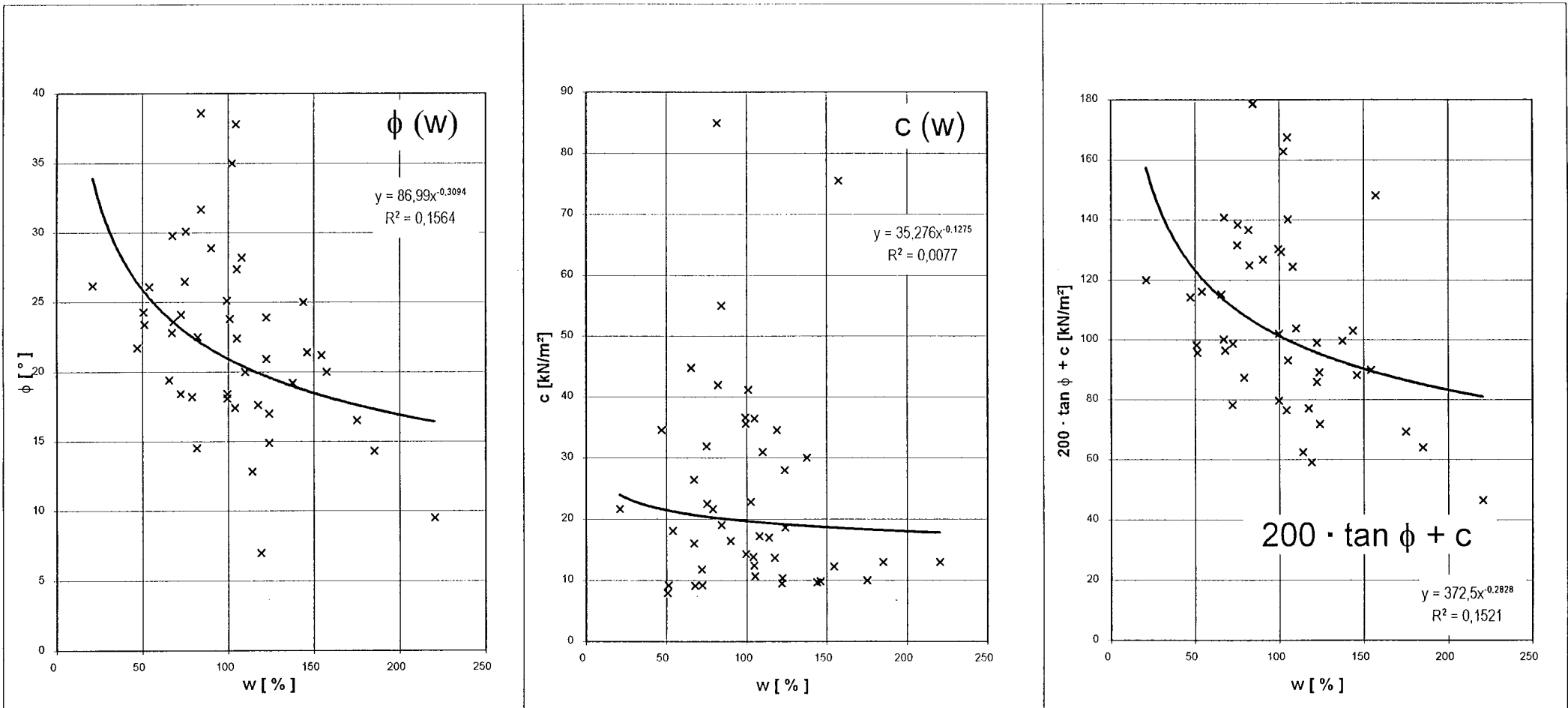
Bild 106

Regressionsanalyse der Scherparameter ϕ und c
 Faulschlamm (77 Versuche)

Deutsche Forschungsgesellschaft
 für Bodenmechanik
 (Degebo)

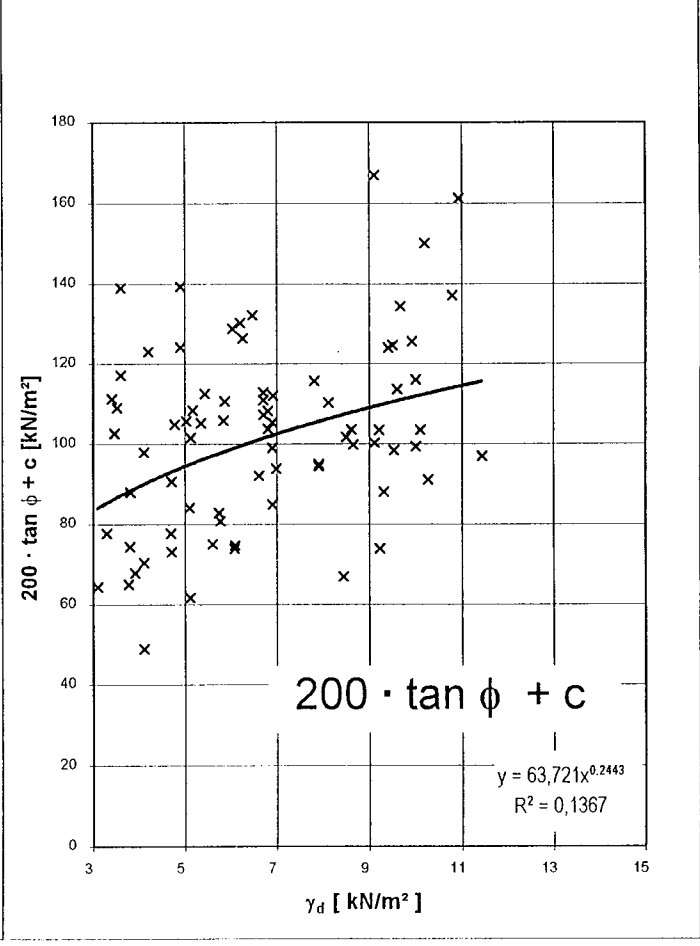
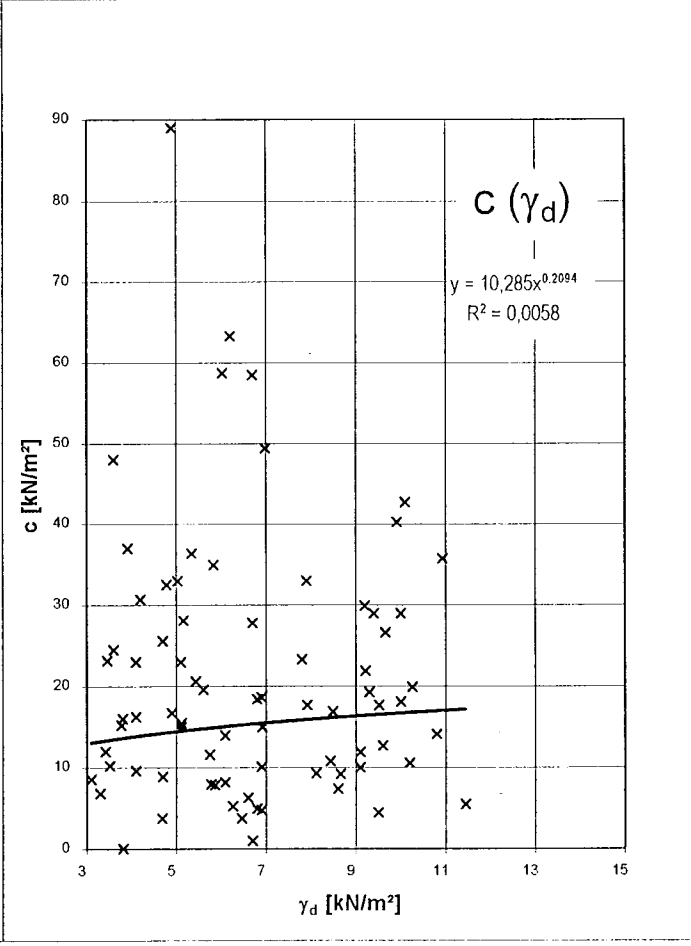
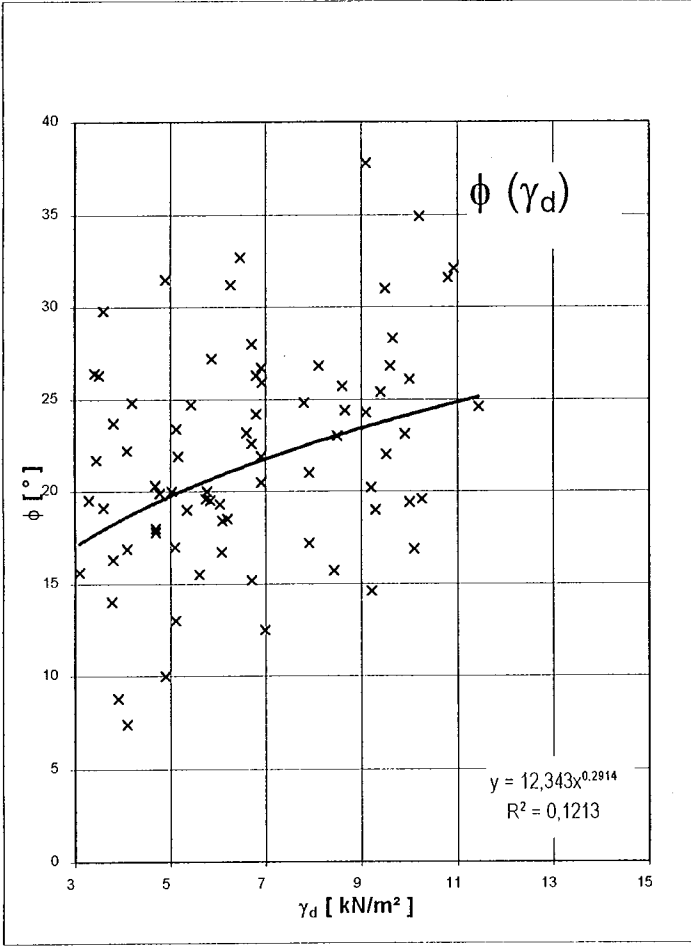


Regressionsanalyse der Scherparameter ϕ und c
Wiesenkalk (44 Versuche)



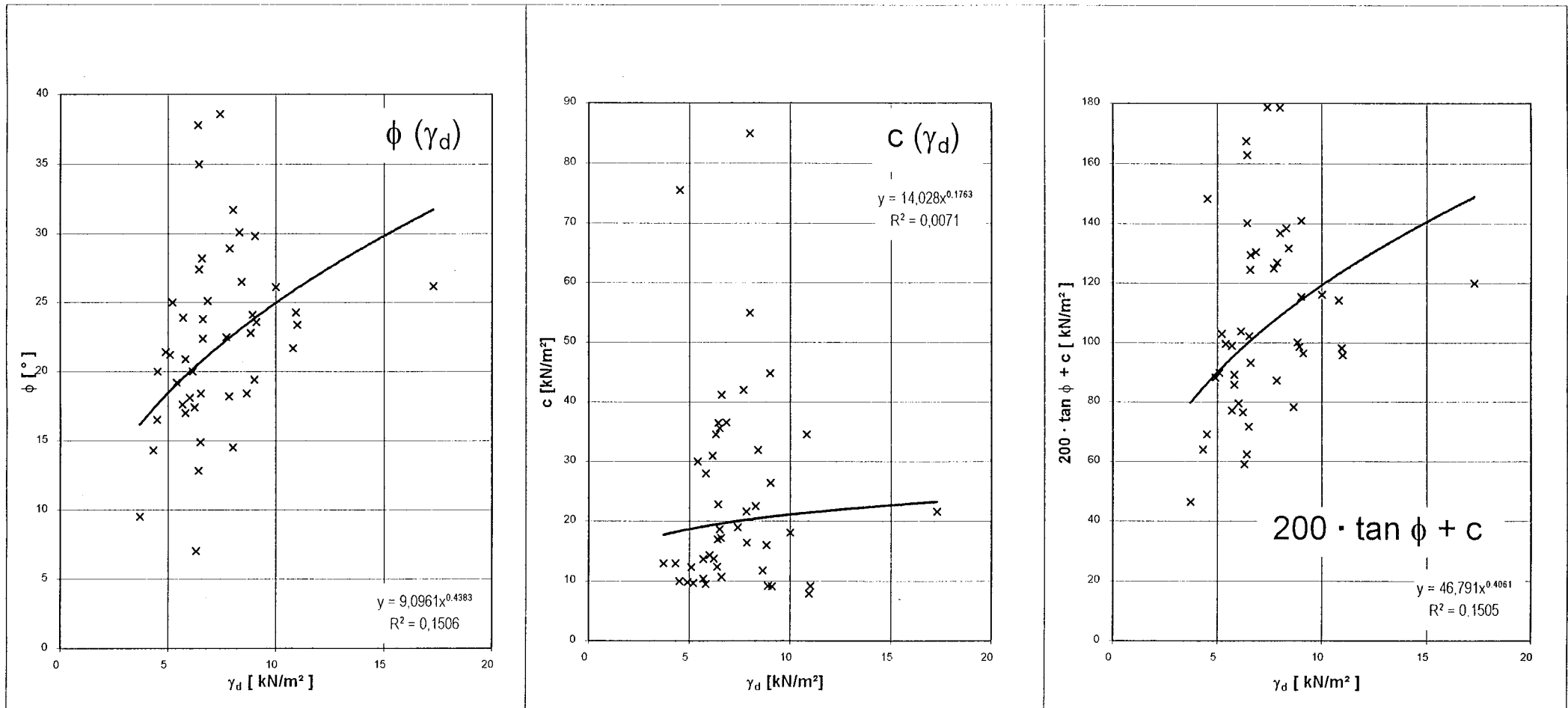
Regressionsanalyse der Scherparameter ϕ und c
 Faulschlamm (77 Versuche)

Deutsche Forschungsgesellschaft
 für Bodenmechanik
 (Degebo)



Regressionsanalyse der Scherparameter ϕ und c
Wiesenkalk (44 Versuche)

Deutsche Forschungsgesellschaft
für Bodenmechanik
(Degebo)



Faulschlamm - UU-Versuche (118 Versuche)

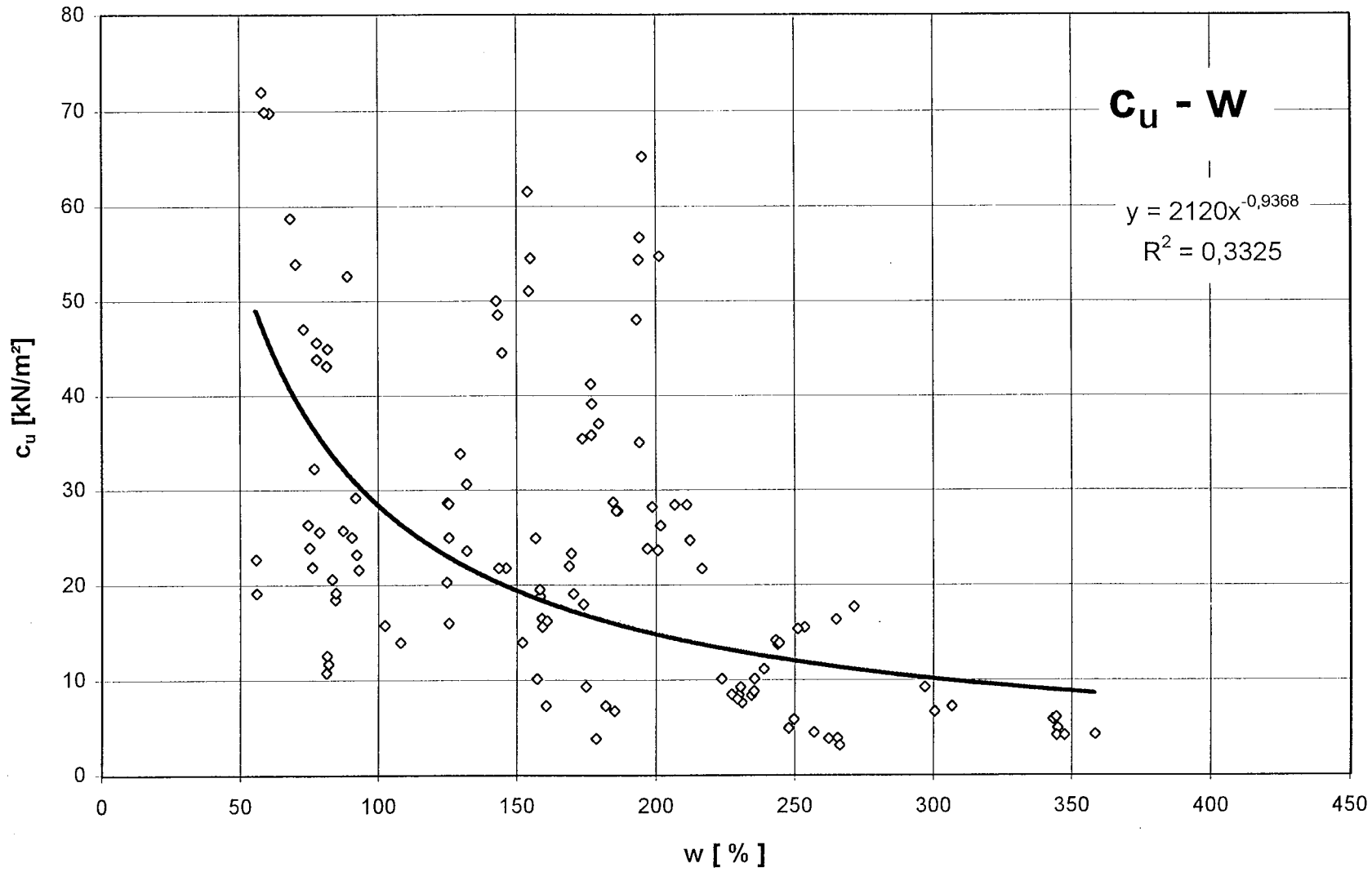


Bild 111

Wiesenkalk - UU-Versuche (106 Versuche)

Deutsche Forschungsgesellschaft
für Bodenmechanik
(Degebo)

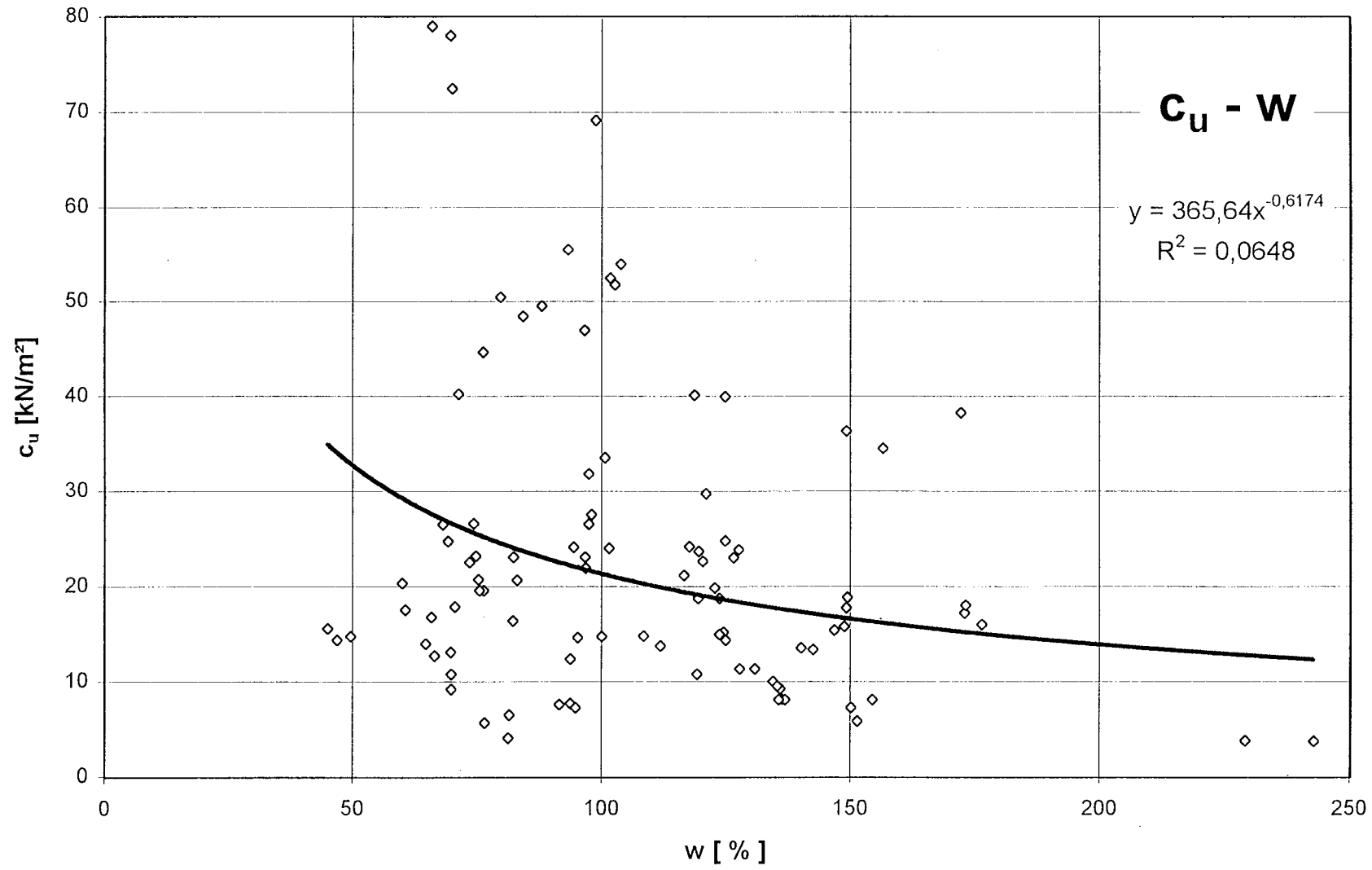


Bild 112

Faulschlamm - UU-Versuche (118 Versuche)

Deutsche Forschungsgesellschaft
für Bodenmechanik
(Degebo)

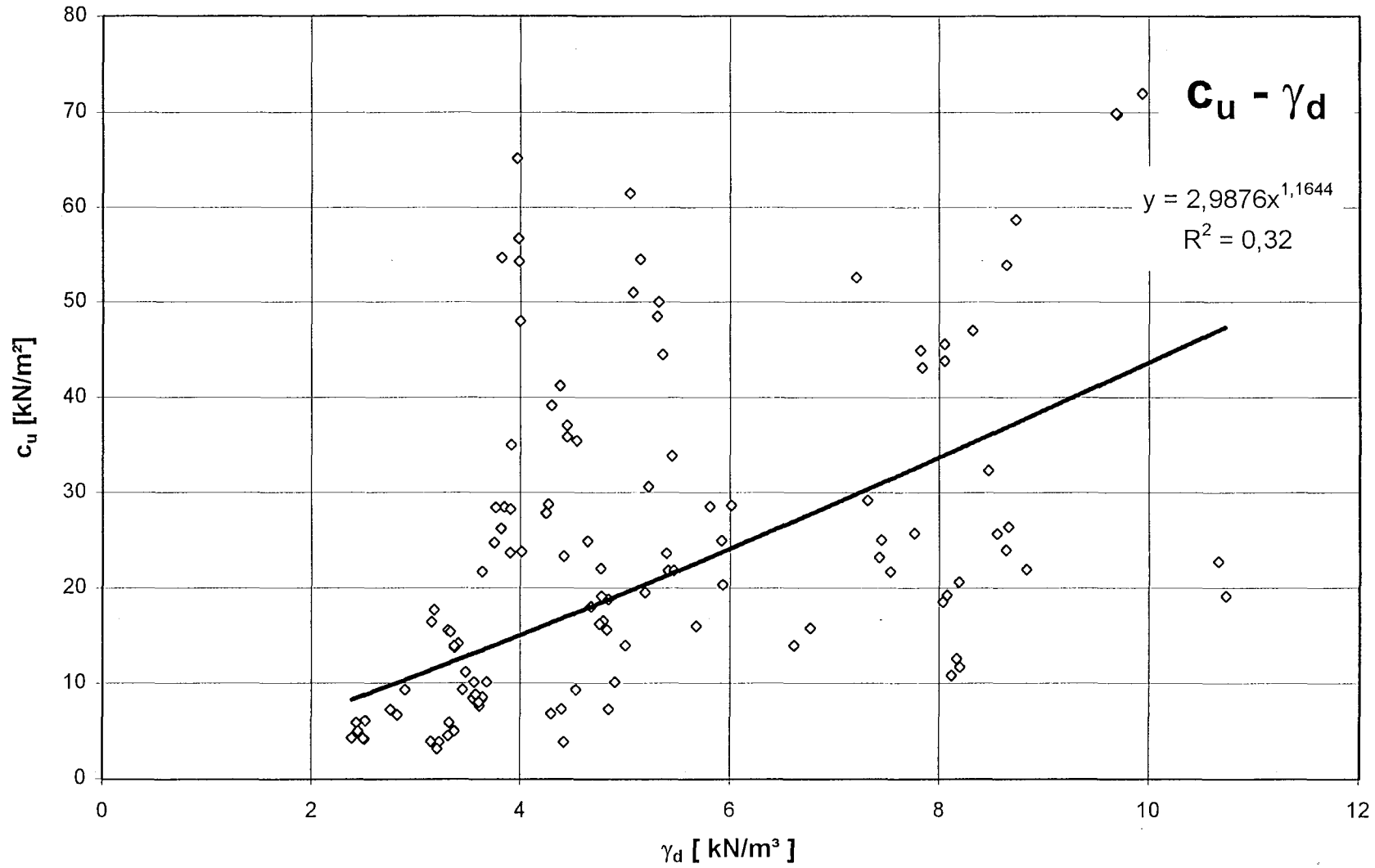


Bild 113

Wiesenkalk - UU-Versuche (106 Versuche)

Deutsche Forschungsgesellschaft
für Bodenmechanik
(Degebo)

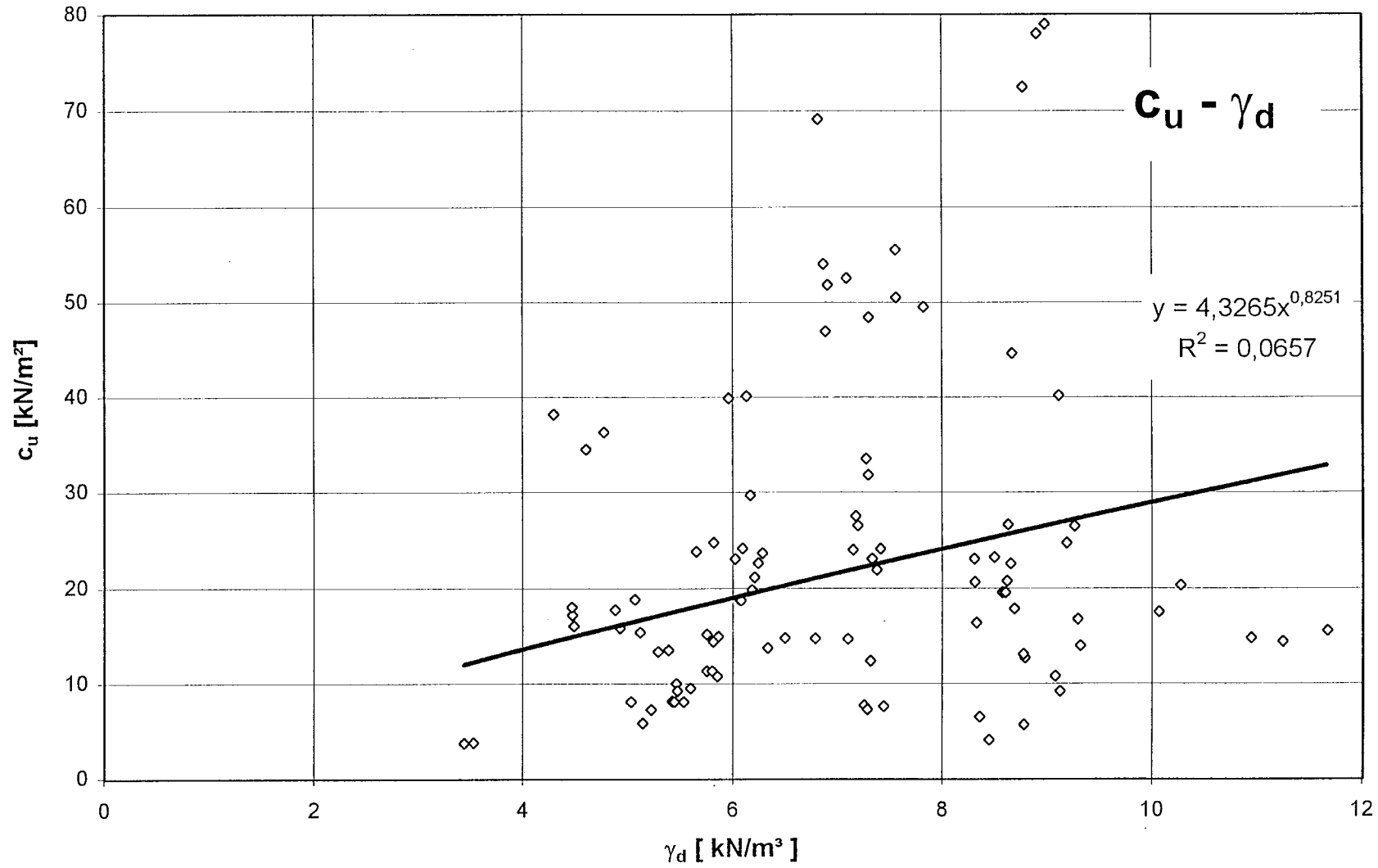


Bild 114

Faulschlamm - Einaxialversuch (134 Versuche)

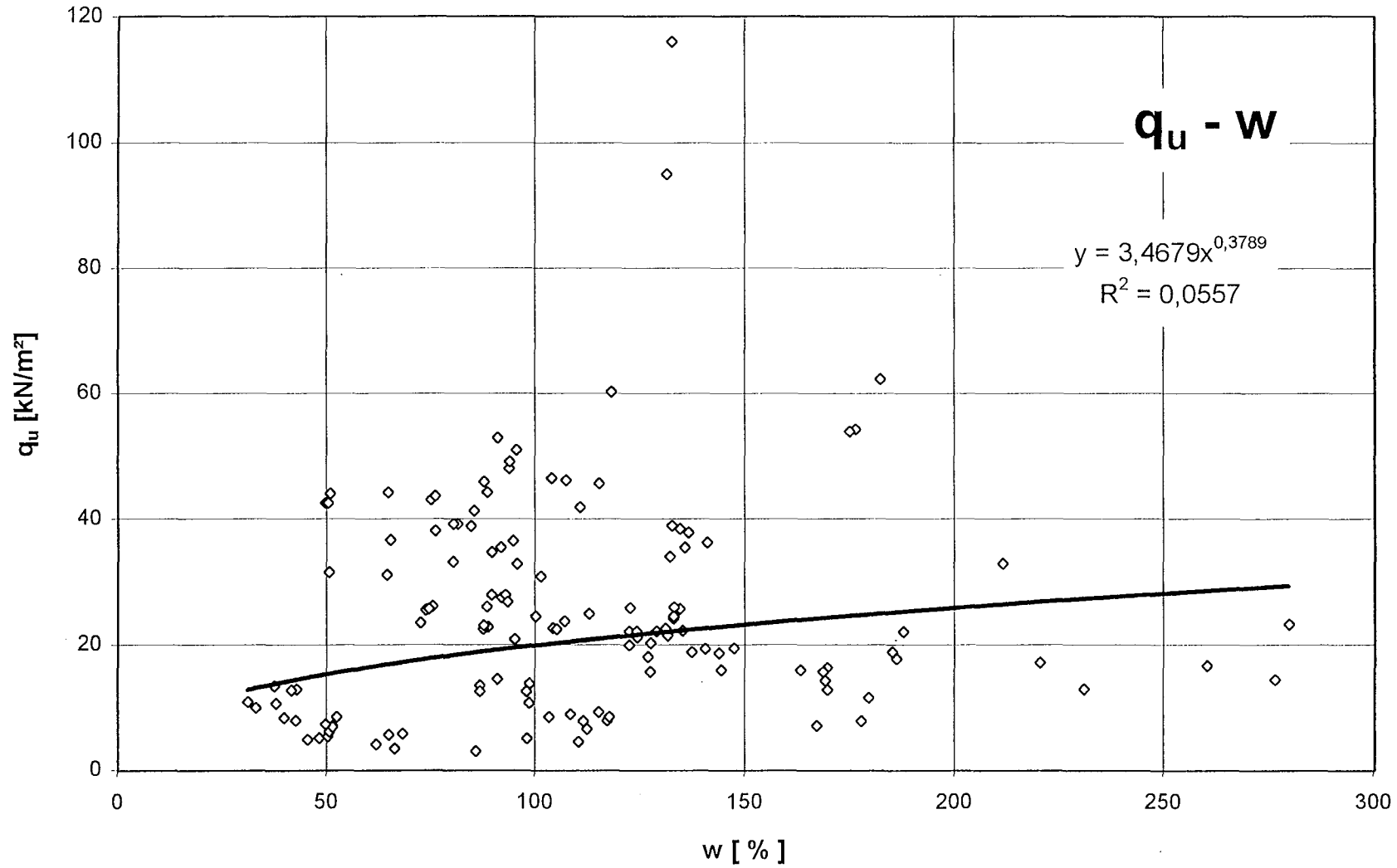


Bild 115

Wiesenkalk - Einaxialversuch (58 Versuche)

Deutsche Forschungsgesellschaft
für Bodenmechanik
(Degebo)

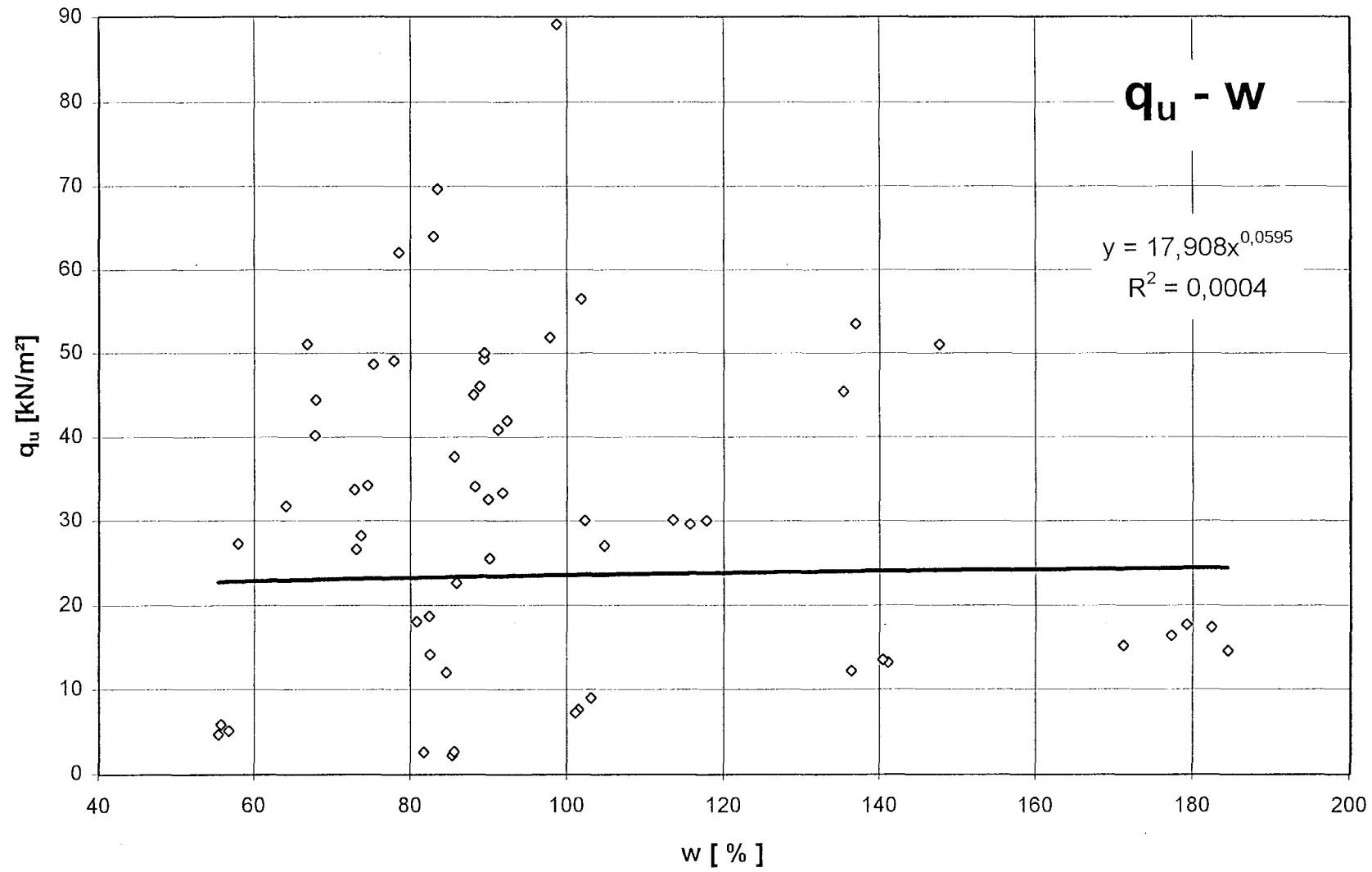


Bild 116

Faulschlamm - Einaxialversuch (134 Versuche)

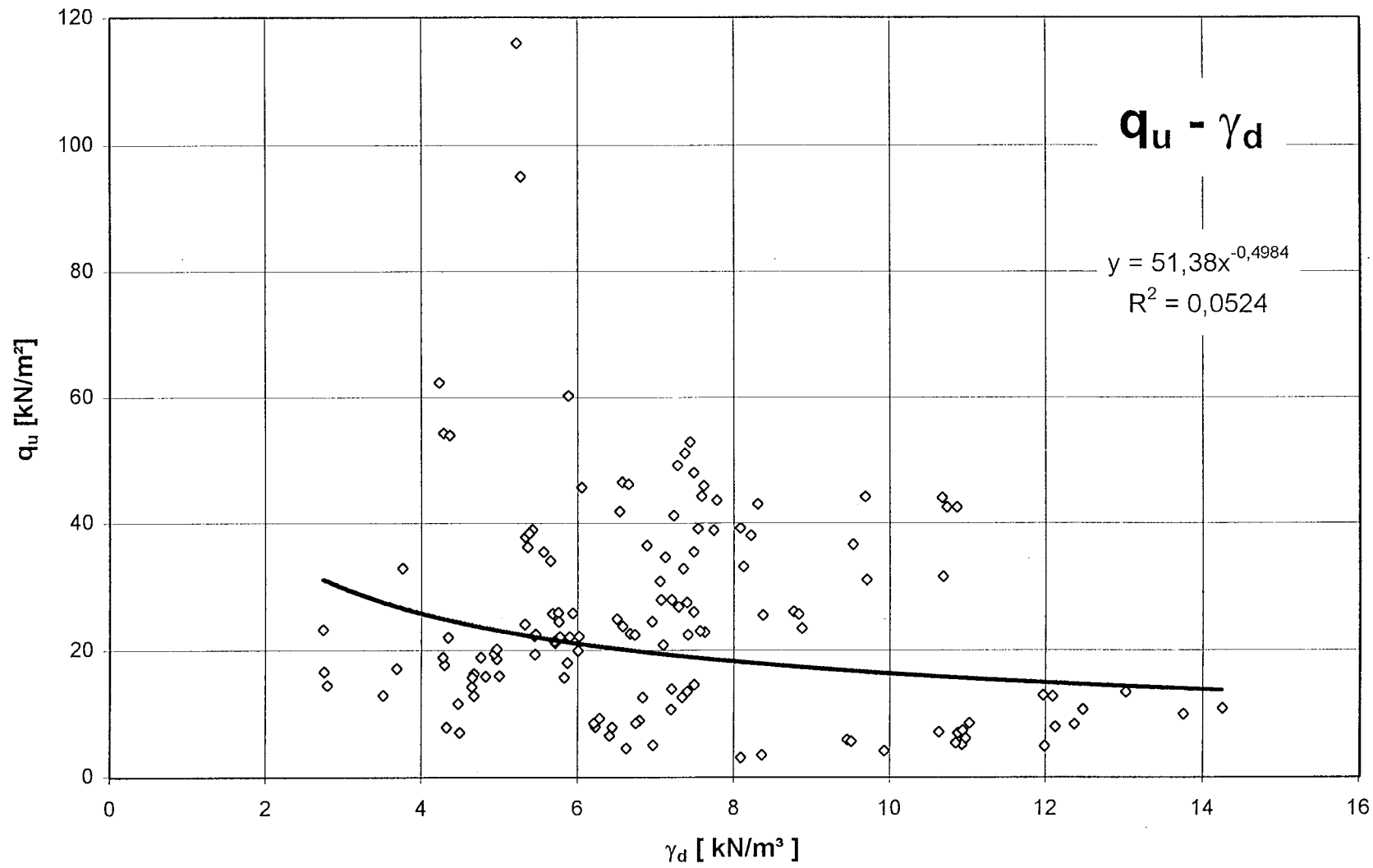


Bild 117

Wiesenkalk - Einaxialversuch (58 Versuche)

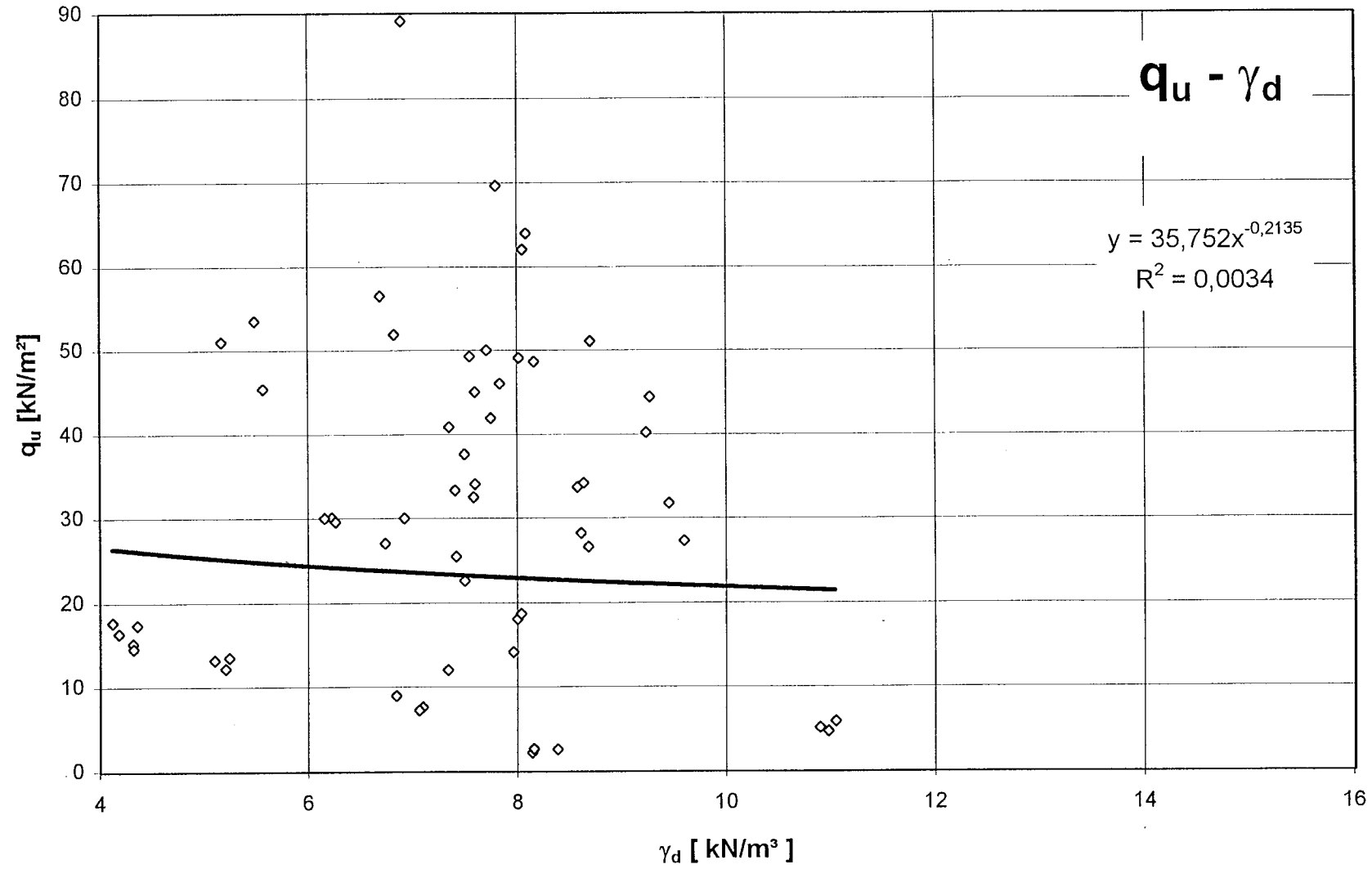


Bild 118