

Grundlagen kohäsiver Schüttgüter

T 1414

T 1414

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

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 irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

I n s t i t u t f ü r S i l o t e c h n i k B r a u n s c h w e i g

Schlußbericht
zum Forschungsvorhaben
"Grundlagen
kohäsiver Schüttgüter"

Dr.-Ing. Peter Martens
und
Dr.-Ing. Karl Wolf

Dieses Forschungsvorhaben wurde vom Institut für Bautechnik, Berlin
finanziert.

1984

Inhaltsverzeichnis	Seite
Vorwort	4
1 Ziel der Untersuchungen	5
2 Umschreibung der Kohäsion	6
3 Theoretische Grundlagen	9
3.1 Klassische Haufwerkstheorie	9
3.2 Neuere Grundlagen der Haufwerkstheorie	11
3.3 Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung	16
4 Geräte zur Bestimmung der Kohäsion	21
5 Berücksichtigung der Kohäsion beim Silobetrieb	24
6 Vorversuche	29
7 Hauptversuche	33
7.1 Grundmaterial	33
7.2 Zusätze	36
7.3 Zusammensetzung der Materialproben	37
7.4 Scherversuche	38
7.5 Messung der Fließfähigkeit und des Schüttwinkels	42
7.6 Ergebnisse der Scher- und Auslaufversuche	44
8 Zusammenfassung und Ausblick	55
Literaturverzeichnis	57
Anlagen 6.1 bis 6.16	
Anlagen 7.1 bis 7.11	

Vorwort

Die Silolasten infolge nicht kohäsiver Schüttgüter wurden in den vergangenen Jahrzehnten umfassend untersucht. Die seit dem Erscheinen der Silonorm DIN 1055 Teil 6 - Lasten in Silozellen - im Jahre 1964 enthaltenden weiteren nationalen Regelwerke beziehen sich ebenfalls - wie die DIN 1055 T 6 - nur auf kohäsionslose Schüttgüter. Andererseits ist festzustellen, daß sich in den vergangenen Jahrzehnten nicht nur die Anzahl der in Silos einzulagernden Schüttgüter um ein vielfaches vermehrt hat, sondern daß von dieser Vermehrung insbesondere die kohäsiven Schüttgüter betroffen sind.

Aufgrund dieser neuen Entwicklung bedarf es besonderer Anstrengungen, das rheologische Verhalten kohäsiver Schüttgüter genauer kennen zu lernen, um Silos sicher und wirtschaftlich auch für die Einlagerung kohäsiver Schüttgüter konstruieren zu können.

Mit dem Forschungsvorhaben "Grundlagen kohäsiver Schüttgüter", das dankenswerterweise vom Institut für Bautechnik in Berlin finanziert wurde, konnte ein erster Schritt getan werden, um kohäsive und nicht kohäsive Schüttgüter miteinander vergleichen zu können.

Der größte Teil der durchzuführenden Versuche wurde von Dipl.-Ing. Lipowicz erledigt, während Dr.-Ing. Wolf die Ergänzungsversuche und die Zusammenfassung übernommen hat. Beiden Herren sei an dieser Stelle gedankt.

Peter Martens.

1 Ziel der Untersuchungen

Die Silolasten sind bei kohäsiven Schüttgütern heute noch weitgehend unbekannt. Anders verhält es sich mit den Materialeigenschaften von kohäsiven Schüttgütern oder von kohäsiven Böden. Hier liegt eine Vielzahl von Forschungsergebnissen vor, die auf dem Gebiet der Verfahrenstechnik und der Bodenmechanik gewonnen wurden.

Es wurden zwar Messungen der Silolasten an Schrotten und anderen kohäsiven Schüttgütern in Großsilos oder Modellsilos vorgenommen, jedoch ist eine Einordnung der gemessenen Lasten in die Jannssen'sche Silotheorie derzeit noch nicht möglich.

Auch in der z. Z. in Überarbeitung befindlichen DIN 1055 Teil 6 /23/ ist keine konkrete Angabe über kohäsives Schüttgut enthalten. Der entwerfende Ingenieur ist somit auf Schätzungen der Silolasten angewiesen.

Dieses Forschungsvorhaben soll als Tastversuch angesehen werden, ein jederzeit reproduzierbares kohäsives Schüttgut für Versuchszwecke zu finden. Als Ausgangsmaterial wurde Quarzsand der Kornfraktion 3 - 5 mm gewählt. Für dieses kohäsionslose Schüttgut liegen umfangreiche Meßergebnisse der Braunschweiger und Karlsruher Siloforschung vor. Dem Quarzsand wurden Additive in fester, pastenartiger und flüssiger Form hinzugefügt, um ein Versuchsmaterial mit einer bestimmbaren und jederzeit reproduzierbaren Kohäsion zu finden. Hierbei wurde unter Laborbedingungen das Stoff- und Fließverhalten der verschiedenen Materialien studiert. Hiermit sollten Voraussetzungen für spätere Untersuchungen an größeren Modellsilos geschaffen werden.

2 Umschreibung der Kohäsion

Von der zur Zeit gültigen Silonorm DIN 1055 Teil 6 "Lasten in Silozellen" - Ausgabe November 1964 - /22/, werden nur die körnigen und staubförmigen Schüttgüter mit geringer Kohäsion erfaßt.

In der Neufassung der Silonorm - Entwurf DIN 1055 T 6 vom Februar 1984 - /23/ werden in Tab. 1 körnige und staubförmige Schüttgüter aufgeführt, auf die die Vorschrift anwendbar ist. Hierbei werden ebenfalls solche Schüttgüter einbezogen, die damit vergleichbar sind. Im besonderen wird aber darauf hingewiesen, daß stark kohäsive Schüttgüter nicht von dieser Norm erfaßt werden. Eine starke Kohäsion ist bei Futtermitteln und Schrotten zu erwarten und bei Schüttgütern, deren Korngröße kleiner als 100 µm ist. Allerdings werden im Beiblatt zur Norm einige Richtwerte angegeben, die es gestatten, die Lasten aus kohäsiven Schüttgütern abzuschätzen.

Bei der Lagerung von kohäsiven Schüttgütern können die verschiedenartigsten Schwierigkeiten auftreten. So kann z. B. eine Brücken- oder Schachtbildung im Schüttgut einen störungsfreien Abzug verhindern und den Betriebsablauf unterbrechen. Einstürzende Schüttgutbrücken oder Schüttgutmassen führen häufig zu einer Überbeanspruchung der Silokonstruktion. Die Folgen davon sind, daß sichtbare Siloschäden auftreten oder die Siloanlage sogar einstürzt. Auch sind bisher nur wenige theoretische und empirische Untersuchungen bekannt, die sich mit dem Verhalten von kohäsivem Schüttgut im Silo befassen, bzw. deren Ergebnisse auf den Silobetrieb anwendbar sind.

Für die Gewährleistung eines störungsfreien Auslaufs ist es bei körnigen Schüttgütern ausreichend, den inneren Reibungswinkel, den Wandreibungswinkel und die Schüttgutdichte zu kennen.

Durch entsprechende Wahl des Öffnungsdurchmessers und Wahl einer ausreichenden Trichterneigung ist es möglich, im Silo Massenfluß oder Kernfluß herzustellen. Für beide Fließarten gibt die Norm für körnige und staubförmige Schüttgüter Rechenhilfen an.

Im Vergleich zu den kohäsiven Schüttgütern ist die Bestimmung zuverlässiger Schüttgutwerte bei körnigen Schüttgütern relativ einfach. Beeinflußt wird der innere Reibungswinkel der körnigen Schüttgüter von der Kornform, der Lagerungsdichte, der Verdichtungsfähigkeit, dem Wassergehalt, der Füllmethode und der Versuchsdurchführung.

Im Prinzip läßt sich die Fließfähigkeit der kohäsiven Schüttgüter ebenso bestimmen, wie die der körnigen Silogüter. Jedoch muß der Einfluß der Kohäsion berücksichtigt werden, deren Größe von dem Korndurchmesser, der Kornform, der Adhäsion der Kornoberfläche, der Auflast, der Schüttgutdichte, der Temperatur, der Feuchtigkeit, der Lagerungsdauer und der Art der Einbringung abhängen kann.

Wird bei kohäsiven Schüttgütern zu jedem Zeitpunkt während des Silobetriebes ein kontinuierlicher Schüttgutabzug erreicht, dann sind die Silolasten wahrscheinlich rechnerisch ebenso wie die Lasten der körnigen Schüttgüter zu ermitteln, jedoch mit modifizierten Rechenwerten.

Wie komplex jedoch die Erfassung der Kohäsion ist, mag die von Ogniwiek /9/ vorgenommene Gliederung der Bindungsmechanismen, in der er die Forschungsergebnisse von Rumpf /11, 13, 14/ ausgewertet, verdeutlichen. Danach können die Haftkräfte, die die Kohäsion bewirken, folgender Art sein:

1. Festkörperbrücken

- Sinterung, Rekristallisation, thermisches Kornwachstum
- Schmelzhaftung, Kaltschweißung
- chemische Reaktionen- erhärtende Bindemittel- Kristallisation gelöster Stoffe beim Trocknen

2. Adhäsion zwischen Feststoffteilchen

- Molekularkräfte, van der Waals - Kräfte
- Elektrostatische Kräfte
- magnetische Kräfte

3. Adhäsion und Kohäsion durch Flüssigkeiten, die nicht frei beweglich sind:

- zähflüssige Bindemittel, Klebstoffe
- Adsorptionsschichten

4. Adhäsion (Grenzflächenkräfte und Kapillardruck) durch frei bewegliche Flüssigkeitsoberflächen:

- Flüssigkeitsbrücken
- Hohlraum vollkommen oder teilweise mit Flüssigkeit gefüllt
- Teilchen in oder an einem Flüssigkeitstropfen

5. Formschlüssige Bindungen:

- mechanisches Verhaken faseriger Teilchen

Die Haftung der kohäsiven Schüttgüter kann sich aus mehreren Anteilen mit unterschiedlicher Wichtung ergeben. In den Veröffentlichungen von Rumpf /11/ Pietsch/Rumpf /10/, Schwedes /19/, Schubert/Tomas /15/ und Molerus /17/ werden Rechenansätze angegeben, mit denen sich die Kohäsion bestimmen läßt. Jedoch sind die Rechenansätze nur anwendbar bei ausreichend genau definierbaren Randbedingungen. Die Schwierigkeit dürfte darin liegen, geeignete Ausgangswerte, des im Silo lagernden Schüttgutes zu ermitteln, bzw. geeignete Annahmen zu treffen.

3. Theoretische Grundlagen

3.1 Klassische Haufwerkstheorie

Die Bruchbedingung (nach Mohr-Coulomb) der Haufwerksmechanik geht davon aus, daß die Scherspannung eines Materials linear abhängig ist von der Normalspannung σ , die senkrecht auf die Bruchebene wirkt.

$$\tau = a \cdot \sigma + c$$

und

$$a = \operatorname{tg} \varphi$$

Der Neigungswinkel φ der Geraden wird als Winkel der inneren Reibung bezeichnet. Der Wert c gibt die maximal übertragbare Schubspannung bei $\sigma = 0$ wieder und wird als Haftfestigkeit oder Kohäsion bezeichnet.

Die Kohäsion beruht unter anderem auf der Wirkung der Oberflächenkräfte, insbesondere die der feinen Materialteilchen. Sie ist abhängig von der Vorbelastung und von der Lagerungsdichte ρ des Schüttgutes. Bei den rolligen Schüttgütern, bei denen die Kohäsion $c = 0$ beträgt, entspricht die Beziehung die der Festkörperreibung $\tau = \sigma \cdot \tan\varphi$.

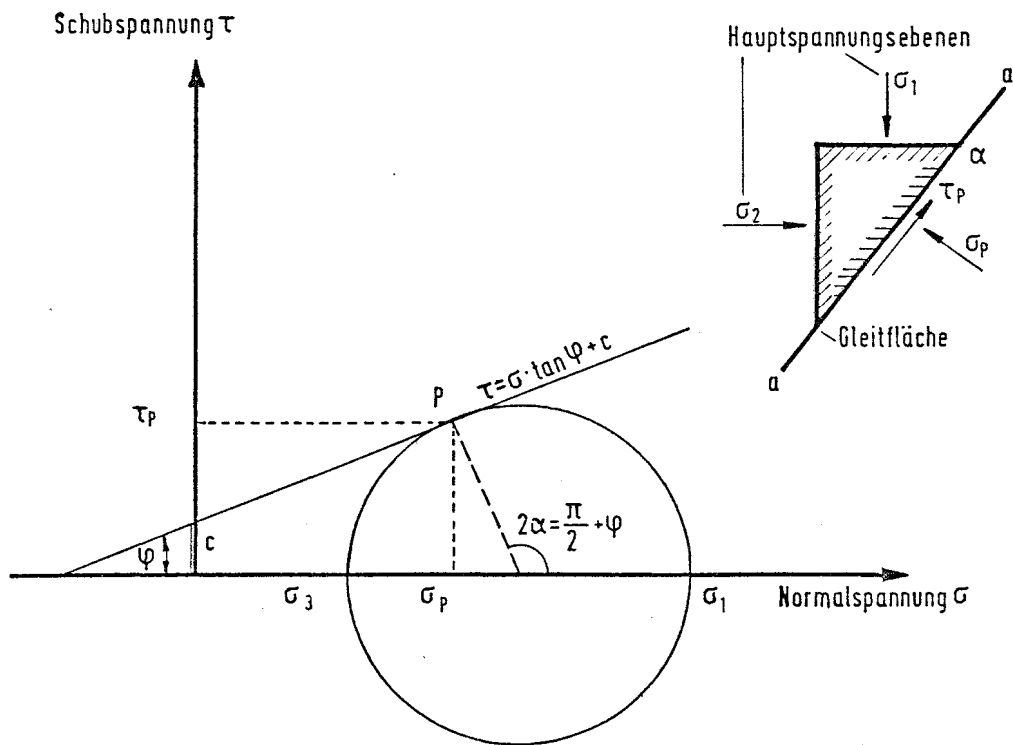


Bild 3.1: Bruchbedingung nach Mohr-Coulomb

Jede auf der Geraden liegende Kombination $\tau - \sigma$ führt zum Bruch oder zum Fließen im Schüttgut.

Alle Kombinationen $\tau - \sigma$ unterhalb der Geraden entsprechen den stabilen Spannungszuständen, Kombinationen oberhalb der Geraden sind physikalisch nicht möglich.

Die beiden Hauptspannungen σ_1, σ_2 beschreiben vollständig einen ebenen Spannungszustand in einem Haufwerk. Aus dem Mohrschen Spannungskreis (geometrische Darstellung der Gleichgewichtsbedingungen) kann man die Spannungen im Gutelement in beliebigen Schnittebenen ablesen. Die Coulombgerade berührt den Spannungskreis im Punkt P, in dem die Bruchspannungen σ_p, τ_p herrschen. Damit läßt sich die Schnittebene feststellen und die Lage der Gleitfläche durch den Winkel der inneren Reibung bestimmen.

$$\alpha = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$$

3.2 Neuere Grundlagen der Haufwerkstheorie

Das im Punkt 3.1 beschriebene Fließkriterium gilt angenähert nur für den Sonderfall der konstanten Schüttgutdichte. Von dieser konstanten Schüttgutdichte kann bei großen Drücken, wie sie in der Bodenmechanik herrschen, durchaus ausgegangen werden.

In der Schüttgutlagerung sind die Drücke dagegen durchweg niedrig. Sie liegen fast immer unter $100,0 \text{ kN/m}^2$. In diesem Druckbereich ist die Abhängigkeit von der Schüttgutdichte nicht vernachlässigbar. Damit wird die Schüttgutdichte ϱ eine weitere Einflußgröße neben der Kohäsion c und dem inneren Reibungswinkel. In drei Punkten weichen die Fließgrenzen (nach Jenike /3,4,21/ Fließorte genannt) realer Schüttgüter von der Coulombgeraden ab:

1. Der Fließort hat im Bereich kleiner Druckspannungen einen gekrümmten Verlauf.
2. Der Fließort hat einen Endpunkt in Richtung steigender Druckspannungen.
3. Die Lage des Fließortes ist von der Schüttgutdichte abhängig.

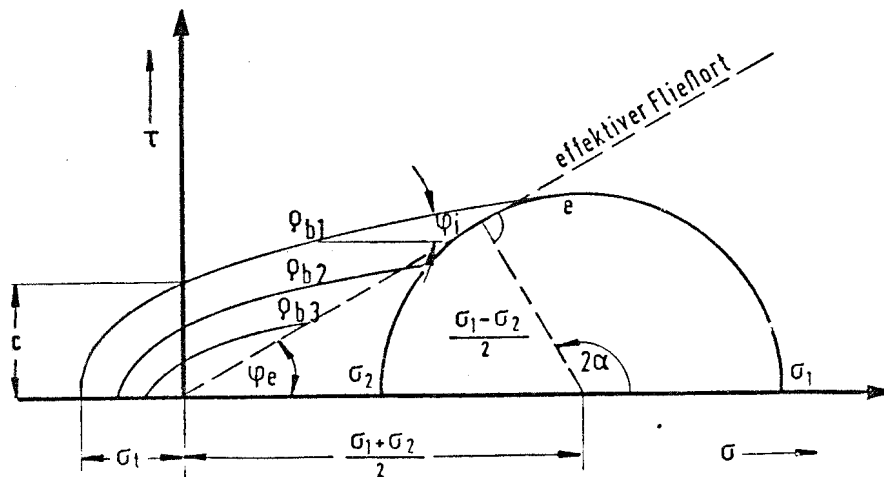


Bild 3.2: Fließorte und effektiver Fließort

Aus dem Bild 3.2 ist folgendes ablesbar:

1. Der Winkel der inneren Reibung φ_i zwischen dem Fließort und der σ -Achse ist nicht mehr wie bei der Coulombgeraden konstant, sondern von φ_b und σ abhängig.
2. Werte für die Kohäsion c und die Zugfestigkeit σ_t , die von der Schüttgutdichte abhängig sind, werden durch die Schnittpunkte der Fließorte mit den Koordinatenachsen erhalten.

3. Das stationäre Fließen unter jeweils konstanter Schüttgutedichte wird von den Endpunkten der Fließorte und damit von den Spannungskreisen, die die Fließorte im Endpunkt tangieren, gekennzeichnet. (Auf die physikalische Deutung dieses Problem es wird später eingegangen.)
4. Die Einhüllende an die jeweils größten Spannungskreise ist angenähert eine Gerade durch den Koordinatenursprung, die um den Winkel φ_e gegen die σ -Achse geneigt ist. Diese Gerade, effektiver Fließort genannt, braucht man bei der Bemessung von Schüttgutbehältern. φ_e ist der Winkel der inneren Reibung bei stationären Fließen.

Für den effektiven Fließort gilt die Gleichung:

$$\sin \varphi_e = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2}$$

Molerus /7/ entwickelt (1980) eine Theorie des Fließverhaltens kohäsiver Schüttgüter.

Aus dem Wissen, daß bei feinkörnigen kohäsiven Schüttgütern die Haftkräfte mit zunehmenden Preßkräften anwachsen, leitet er für die Haftkraft H die Gleichung ab:

$$H = H_0 + \alpha N$$

Darin ist H_0 die Haftkraft in einem Kontaktpunkt des unverfestigten Schüttgutes und α beschreibt den linearen Anstieg der übertragbaren Haftkraft, die durch die Schüttgut verfestigende

Normalkraft N hervorgerufen wird. Davon ausgehend, daß das stationäre Schüttgutfließen durch fortgesetztes Lösen der Partikelkontakte erfolgt, d.h., daß die momentanen Haftkräfte der momentanen äußeren Preßkräfte gerade versagen, läßt sich über die Beziehung

$$\Sigma_R = \sin \varphi_e \left(\Sigma_M + \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_e} \sigma_0 \right)$$

die einfache Gleichung des effektiven Fließortes ableiten, deren graphische Lösung in Bild 3.3 dargestellt ist.

$$\tan \varphi_e = (1 + \alpha) \tan \varphi$$

Hierin ist σ_0 die Haftkraft, die im unverfestigten Zustand übertragen werden kann, α der Anstieg der Haftkraft bei Verfestigung und φ der innere Reibungswinkel. Die ausführliche Herleitung der Beziehung erfolgte bei Molerus /6/.

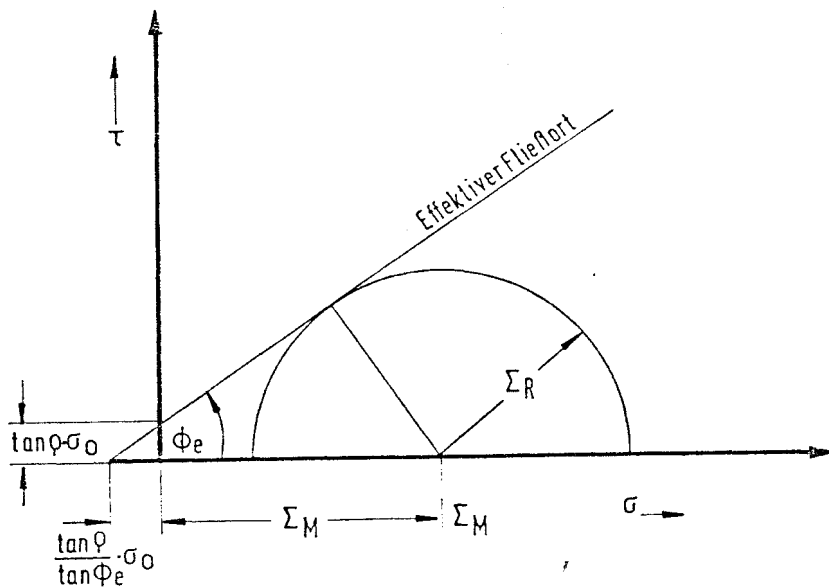


Bild 3.3 Effektiver Fließort nach Molerus [7]

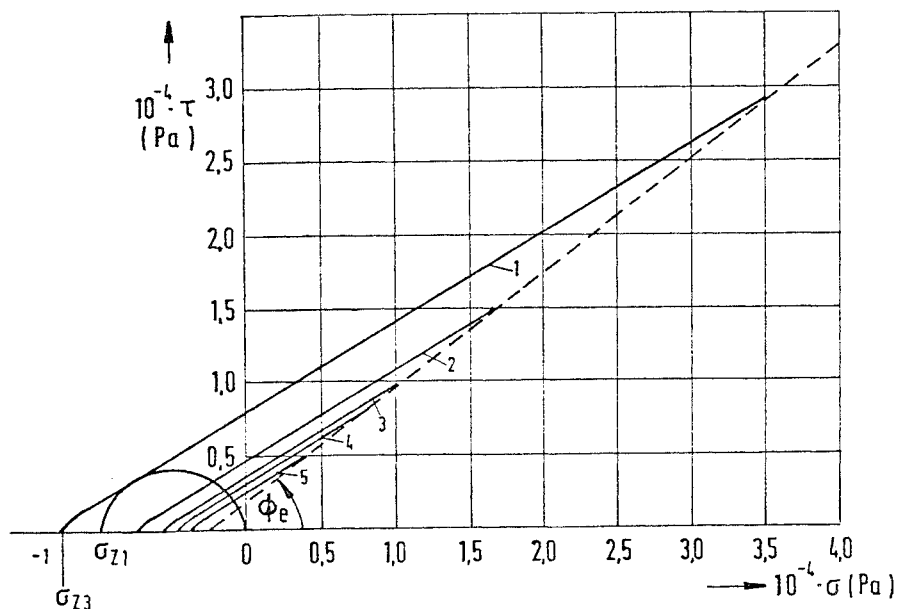


Bild 3.4 Errechneter Fließort nach Molerus [6]

Ein wesentlicher Unterschied im Verlauf des effektiven Fließortes zwischen den nichtkohäsiven und den kohäsiven Schüttgütern besteht darin, daß bei den nichtkohäsiven Schüttgütern der effektive Fließort durch den Koordinatennullpunkt geht, wohingegen bei kohäsiven Schüttgütern die τ -Achse bei $\sigma = 0$ in einem Abstand $\tau > 0$ geschnitten wird.

Unter der Voraussetzung, daß die beiden folgenden Bedingungen erfüllt sind, gibt Molerus [6,7] einen Rechenweg an, mit dem es möglich ist, die individuellen Fließorte für das beginnende Fließen zu ermitteln:

1. Übereinstimmung der Richtungen der größten Hauptspannungen beim Verfestigen und beim beginnenden Fließen.
2. Die Verfestigung ist durch vorangegangenes stationäres Fließen, d. h. durch den effektiven Fließort gekennzeichnet. Der Rechenansatz berücksichtigt die Kohäsionskräfte σ_0 im unverfestigten Schüttgut, die innere Reibung φ des Schüttgutes, sowie das Anwachsen der Haftkräfte mit der vorangegangenen Verfestigung.

3.3 Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung

Wenn ein Schüttgut zu fließen beginnt, kann sich die Schüttgutdichte φ_b bei der beginnenden plastischen Verformung verändern. Dabei sind drei Fälle möglich: Fließen bei Volumenvergrößerung, bei Volumenkonstanz oder bei Volumenverkleinerung. Im Bild 3.5 sind die jeweiligen Bereiche eingetragen. Der Endpunkt des Fließortes in Richtung steigender Druckspannung, in

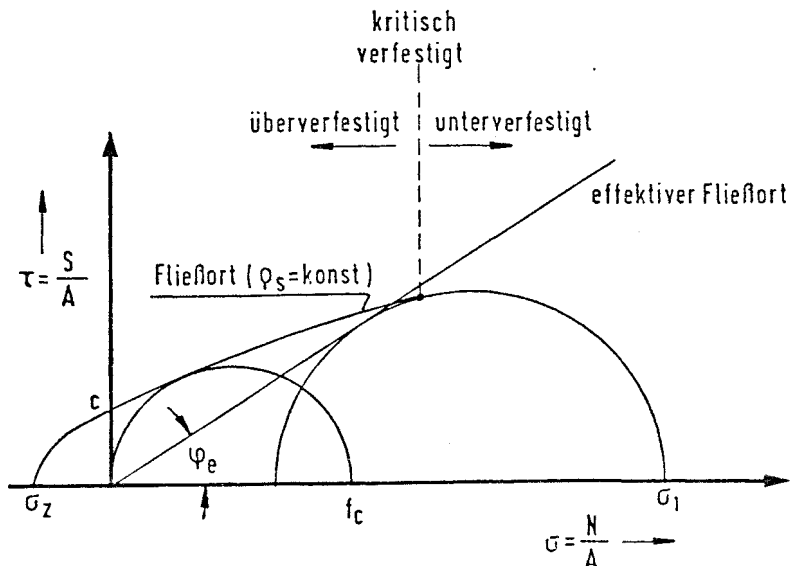


Bild 3.5 Fließort, effektiver Fließort

dem das Schüttgut bei Erreichen dieses Zustandes ohne Änderung der Spannung oder des Volumens zu fließen beginnt, wird als "kritisch verfestigt" bezeichnet. Scherproben mit Druckspannungen rechts vom Endpunkt erfahren eine Verdichtung ehe sie bei Erreichen eines höher liegenden Fließortes zu fließen beginnen. Sie sind "unterverfestigt". "Überverfestigt" sind Scherproben deren Druckspannungen links vom Endpunkt liegen, d. h. sie beginnen sich bei Erreichen des Fließortes auszu dehnen.

Das Spannungs-Verformungsverhalten für Bodenproben beschreibt Roscoe anhand eines dreidimensionalen Zustandsdiagrammes. Eine ausführliche Beschreibung ist bei Schwedes /18/ nachzulesen. Im Bild 3.6 ist das Zustandsdiagramm für Schüttgüter dargestellt. Die Koordinaten τ und σ werden auch bei Roscoe gebraucht. Jedoch wird anstelle der Porosität ϵ die für Schüttgüter gebräuchlichere Porenziffer e gewählt. Die in der σ - e -Ebene liegende Kurve $a_1 - a_2$ stellt die Erstbelastungskurve dar. Die Porenziffer e_1 gibt die lockerste Lagerung an; bei Erhöhung der Druckspannung verdichtet sich das Schüttgut und durchläuft die Zustände der Erstbelastungskurve. Auf der gegenüberliegenden Seite stellt die in der σ - e -Ebene liegende Kurve $b_1 - b_2$ den Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Porenziffer für ein kohäsives Schüttgut her. Bei einem kohäsionslosen Material - die Zugfestigkeit beträgt $\sigma_t = 0$ -

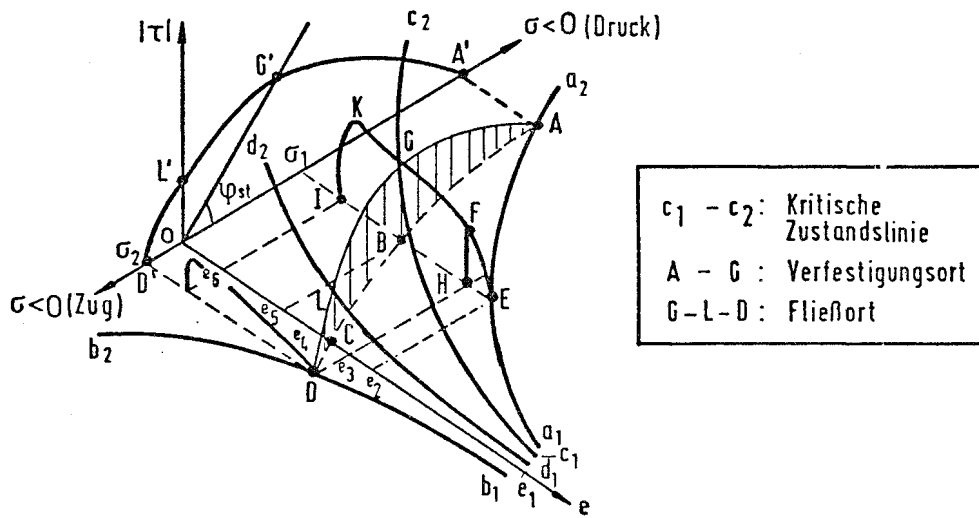


Bild 3.6 Zustandsdiagramm für Schüttgüter

fällt die Linie $b_1 - b_2$ mit der e -Achse zusammen. Die Kurve $A-B-C$ gibt den Verlauf bei Entlastung einer bis A auf der Erstbelastungskurve $a_1 - a_2$ belasteten Schüttgutprobe wieder. Erfolgt eine Wiederbelastung, so verläuft sie auf der Entlastungskurve bis die Erstbelastungskurve erreicht wird. Bei einer weiteren Laststeigerung folgt sie der Erstbelastungskurve. Eine auf der Kurve $a_1 - a_2$ bis E belastete Probe, die anschließend einer wachsenden Scherbeanspruchung τ ausgesetzt wird, durchläuft bei einer konstanten σ_1 -Spannung die Zustände der Kurve $E-F-G$. Im Punkt G beginnt das Schüttgut stationär zu fließen. Dieser Vorgang ist damit verbunden, daß sich die Porenziffer von e_2 auf e_5 verringert. Eine weitere Änderung von τ und e ist nicht mehr möglich. Die von Roscoe bezeichnete "kritische Zustandslinie" - Jenike bezeichnet sie als "stationären Fließort" - wird dadurch erhalten, daß in analogen Versuchen die Normalkraft variiert wird und sich daraus der Linienzug $c_1 - c_2$ ergibt.

Von den Kurven $a_1 - a_2$, $b_1 - b_2$ und $c_1 - c_2$ werden im dreidimensionalen Raum zwei Oberflächen aufgespannt. Zwischen $a_1 - a_2$ und $c_1 - c_2$ spannt sich die Verfestigungsoberfläche und zwischen $b_1 - b_2$ und $c_1 - c_2$ ergibt sich die Fließoberfläche.

Durch den Kurvenverlauf $d_1 - d_2$, der die Fließoberfläche in der Ebene $\sigma = 0$ schneidet, wird der Zusammenhang zwischen der Kohäsion und der Porenziffer e wiedergegeben. Die Kurve $d_1 - d_2$ fällt mit der e -Achse zusammen, wenn es sich um ein nicht kohäsives Schüttgut handelt.

Bei Spannungszuständen unterhalb der beschriebenen Oberflächen verhält sich das Schüttgut elastisch. Spannungszustände, die die Fließoberfläche durchstoßen, bewirken, daß das Material fließt. Spannungszustände oberhalb der Fließoberfläche sind nicht möglich.

Wird auf die im Punkt C entlastete Schüttgutprobe (e_4) eine Spannung $\sigma_1 = \text{konstant}$ aufgebracht, so tritt der Zustand B (e_5) ein. Bis zum Erreichen des kritischen Punktes G wächst τ an, die Porenziffer e_5 bleibt unverändert. Im Punkt G beginnt das Schüttgut mit konstanten Werten von e , σ und τ zu fließen.

Diese Schüttgutprobe wird, wie zuvor schon erläutert, als kritisch verfestigt bezeichnet (Fließen unter Volumenkonstanz). Wird ein Versuch mit gleicher Normalspannung σ_1 durchgeführt, bei der die vorgegebene Porenziffer e_3 aber größer ist (H), steigt die Schubspannung τ an, ohne daß eine Änderung von e_3 auftritt. Wird Punkt F erreicht, verringert sich bei weiteren

Anstieg von τ die Porenziffer e_3 bis im Punkt G e_5 erreicht wird und das stationäre Fließen einsetzt. Diese Probe wird als unterverfestigt bezeichnet. Als überverfestigte Probe wird e_6 unter der Normalspannung σ_1 bezeichnet. Im Punkt K (e_6) wird die Fließoberfläche erreicht. Nun erfolgt eine Abnahme der Scherkraft τ und eine Vergrößerung der Porenziffer von e_6 auf e_5 im Punkt G. Im Punkt G beginnt das Schüttgut stationär zu fließen.

Die Projektion der schraffierten "elastischen Wand" A-B-C-D-L-G-A in die $\sigma - \tau$ -Ebene ($A'-D'-L'-G'-A'$) ergibt den zuvor beschriebenen Fließort im zweidimensionalen Raum.

Im Bild 3.7 sind die Verläufe der Scherspannung - Scherweg - Diagramme für die zuvor im Zustandsdiagramm 3.6 beschriebenen Schüttgutproben dargestellt.

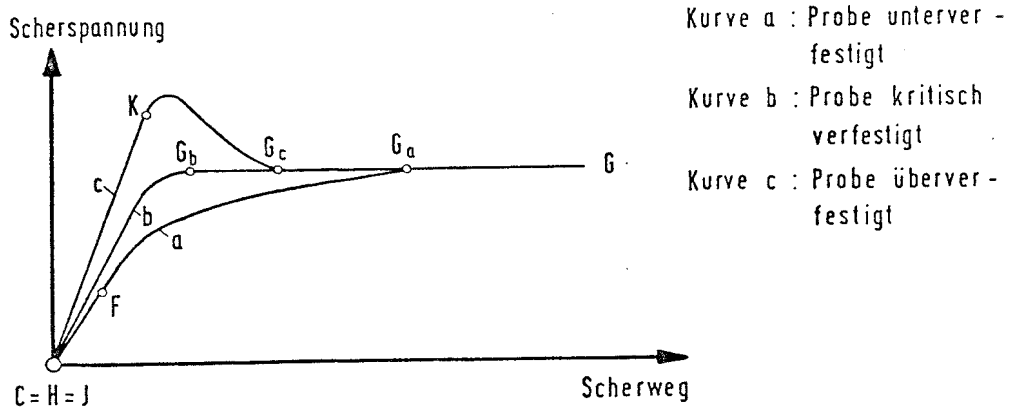


Bild 3.7
Scherspannung - Scherweg - Diagramme

4 Geräte zur Bestimmung der Kohäsion

Einen Überblick der wichtigsten Schergeräte, wie sie auch von Schwedes /20/ zusammengefaßt wurden, ermöglicht Bild 4.1. Als wesentliches Merkmal wird zwischen direkten und indirekten Schergeräten unterschieden.

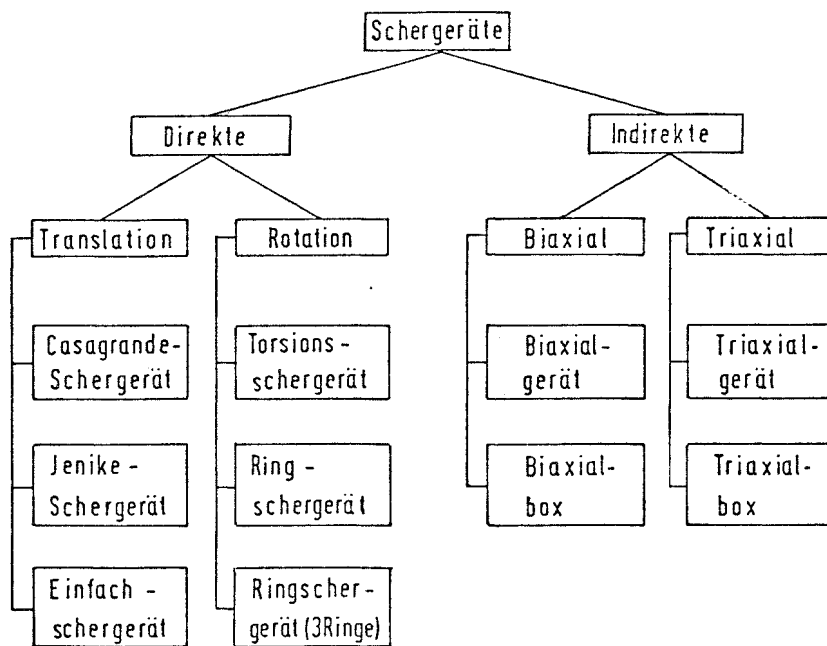
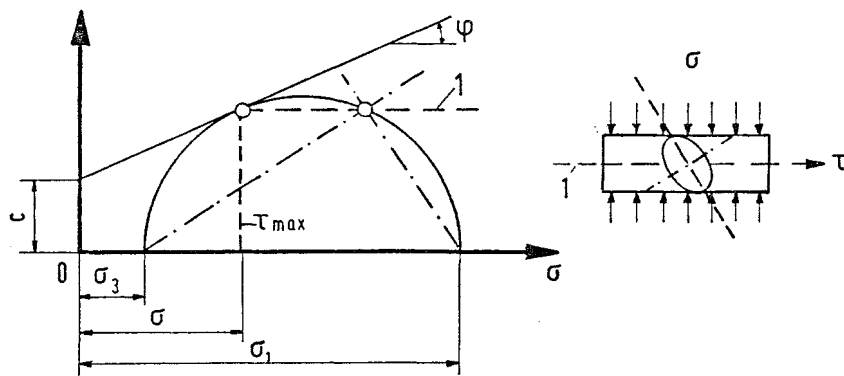


Bild 4.1

Unterteilung der wichtigsten Schergeräte

a) Scherversuche mit vorgegebener Scherfläche
(z.Bsp. Kastenschervergerät)



b) Scherversuche mit frei einstellbarer Scherfläche
(z. Bsp. Triaxialgerät)

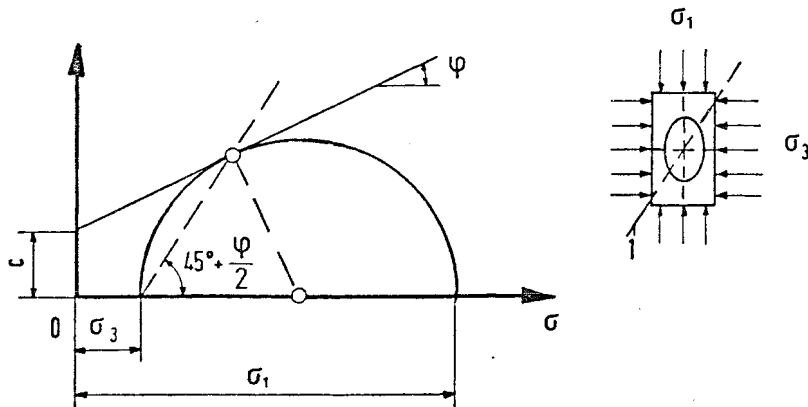


Bild 4.2
Scherversuche

Bei den direkten Schergeräten wird durch deren Konstruktion die Scherzone festgelegt, während sie sich bei den indirekten Geräten frei einstellen kann (Bild 4.2). Jedes Gerät hat Vor- und Nachteile. Schwedes versucht 1984 in /20/ eine Wertung vorzunehmen. Aus der Sicht des Verfahrenstechnikers schlägt er für die Lösung praktischer Ingenieuraufgaben vor, das Jenike-Gerät und Ringschergerät einzusetzen.

Eibl et al /1/ empfiehlt 1982 zur exakten Parameterstudie der Spannungs- Deformationsbeziehungen das Triaxialgerät zu verwenden, um daraus später Lasten auf Silowände ableiten zu können.

Schütz /16/ vergleicht 1981 die am Modellsilo erhaltenen Parameter mit den von Ogniwek an verschiedenen Schergeräten ermittelten inneren Reibungswinkeln und Wandreibungswinkeln. Untersucht wurden dort 12 Schüttgüter. Eine Übereinstimmung konnte nicht festgestellt werden. Er empfiehlt zur Ermittlung der Wandreibungswinkel das Kastenschergerät und zur Ermittlung der Spannungs-Deformationsbeziehungen das Triaxialgerät einzusetzen.

Selbst besonders exakte Untersuchungen, bei denen Höhne /2/ die Ergebnisse von Scherversuchen am Jenike-Schergerät und am Ringschergerät für Quarzmehl miteinander vergleicht, führen dazu, daß Korrekturfaktoren zu berücksichtigen sind.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß es zur Ermittlung der Schüttgutwerte kein Universalgerät gibt. Jedes Gerät hat Vor- und Nachteile. Der Einsatz des entsprechenden Schergerätes ist davon abhängig, welche Parameter untersucht werden sollen, mit welcher Genauigkeit sie ermittelt werden müssen und welche Randbedingungen bei der Versuchsdurchführung unbedingt eingehalten werden müssen, um die Ergebnisse auf die tatsächlichen Vorgänge übertragen zu können. Von Bedeutung ist hierbei der Korndurchmesser der Schüttgüter und im Hinblick auf die praktische Anwendung nicht zuletzt die Frage, welcher Zeitaufwand angesetzt werden darf.

5 Berücksichtigung der Kohäsion beim Silobetrieb

Allgemein wird davon ausgegangen, daß bei nicht zu feuchtem Schüttgut, dessen Korngröße oberhalb von 100 bis 200 μm (0,1 bis 0,2 mm) liegt, keine Kohäsion zu erwarten ist.

In einem Kornbereich unterhalb 100 μm ist der Einfluß der v. d. Waals Haftung nicht mehr zu vernachlässigen. Bei einem 5 μm Teilchen beträgt die reine Haftung das 10^5 fache des Teilchengewichtes.

Nach dem Mohr-Coulombschen Fließkriterium ergibt die um den Winkel φ gegen die σ -Achse geneigte Coulombgerade bei kohäsiven Schüttgütern einen Schnittpunkt auf der τ -Achse. Dieser bei $\sigma = 0$ erhaltene Wert wird als Kohäsion c bezeichnet und in der Dimension einer Flächenkraft angegeben (vgl. Bild 3.1).

Werden nicht die Fließgrenzen, sondern die Fließorte nach Jenike ermittelt, dann ergeben die Schnittpunkte mit dem Koordinatensystem auf der τ -Achse die Kohäsion c und auf der σ - Achse die Zugfestigkeit σ_t (vgl. Bild 3.2). Zusätzlich liefert die Versuchsdurchführung die von Jenike genannte Fließfunktion $ff_c = \frac{\sigma_1}{f_c}$.

Hierdrin ist σ_1 die größere Hauptspannung, durch die die Schüttgutdichte ρ_b verfestigt wurde, und f_c stellt die dadurch erhaltene Festigkeit des Schüttgutes dar. Danach ergibt sich für die Fließfähigkeit der Schüttgüter folgende Einteilung:

- $10 < ff_c$: frei fließend
- $4 < ff_c < 10$: leicht fließend
- $2 < ff_c < 4$: kohäsiv
- $1 < ff_c < 2$: sehr kohäsiv, nicht fließend
- $ff_c < 1$: verhärtet

Um bei kohäsionslosem Schüttgut Massenfluß zu erreichen, ist es im allgemeinen ausreichend, die erforderliche Trichterneigung vorzusehen und einen Durchmesser d eines kreisförmigen oder die Breite b einen schlitzförmigen Auslaufes zu wählen, wobei folgende Bedingungen erfüllt sein müssen:

$$d > 10 x_{\max}$$
$$b > 7 x_{\max}$$

Darin ist x_{\max} die Partikelgröße.

Bei kohäsiven Schüttgütern ist die Berechnung des erforderlichen Auslaufquerschnittes aufwendiger. Die Vorgehensweise läßt sich anhand von Bild 5.1 erläutern.

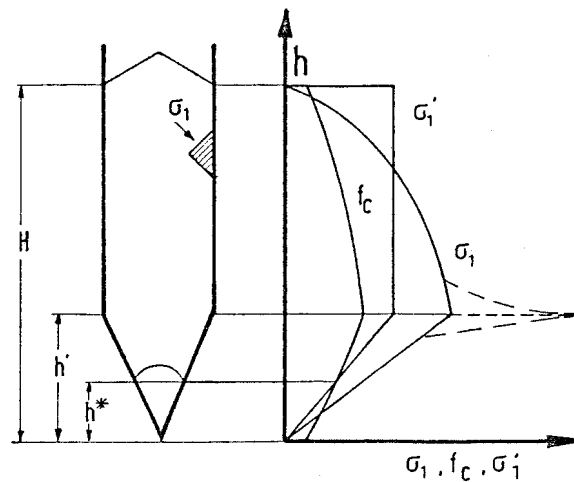


Bild 5.1
Verlauf der Druckspannungen σ_1 ,
der Schüttgutfestigkeit f_c und der
Auflagerpressung σ_1' über die Höhe

Darin ist σ_1 die größte Hauptspannung. An der Schüttgutoberfläche ist sie null, nimmt mit wachsender Schüttguttiefe zu, erreicht am Übergang zur Kegelspitze das Maximum und geht zum Auslauf wieder auf null zurück.

Der Verlauf von f_c stellt die Gutfestigkeit dar. Bei kohäsiven Schüttgütern kann schon an der Schüttgutoberfläche und ebenso am Auslauf eine Festigkeit gemessen werden. Die Festigkeit wird mit zunehmender Auflast größer.

Wie bereits unter Abs. 2 dargestellt, werden bei einem kohäsiven Schüttgut die Materialeigenschaften, wie z. B. der Wert für f_c , von vielen Parametern beeinflusst. Hierzu gehören insbesondere die Größe des Korndurchmessers, die Kornform, die Auflast, die Schüttgutdichte, die Temperatur, die Feuchtigkeit, die Lagerungsdauer.

σ_1' ist die Spannung, die sich im Auflager einer stabilen Gutbrücke einstellt. Die Größe der "Auflagerpressung" σ_1' wird durch folgende Parameter beeinflusst: von dem Schüttgutgewicht, dem Wandreibungswinkel, der Wandneigung und der Brückenspannweite.

Solange die Auflagerpressung σ_1' größer als die Schüttgutfestigkeit f_c ist, ist keine stabile Brückenbildung möglich und das Schüttgut fließt aus. Unterhalb des Schnittpunktes von σ_1' mit f_c fließt das Schüttgut nicht mehr aus. Die Gutfestigkeit reicht aus, um eine stabile Brücke zu bilden. Um einen störungsfreien Schüttgutfluß zu erreichen, muß im Schnittpunkt von σ_1' mit f_c die Auslauf-Öffnung angeordnet werden, deren Durchmesser oder Breite sich aus der geometrischen Beziehung der Abbildung oder auf genauem rechnerischen Wege ergibt.

Umfangreiche Untersuchungen über das Stoff- und Fließverhalten von kohäsiven Schüttgütern mit Bezug auf die Schüttgutlagerung wurden von Molerus /5, 6, 8/ und von Schütz/Schubert /17/ durchgeführt. Aus den Haftkraftmessungen von Schütz/Schubert ist bekannt, daß die Haftkraft mit zunehmender Preßkraft anwächst. Des weiteren ist bekannt, daß die Haftkraft mit abnehmender Partikelgröße zunimmt.

Für Kalkstein nimmt Molerus /7/ eine Auswertung des Verhältnisses Haftkraft zur Preßkraft vor. In Bild 5.2 sind die Ergebnisse für drei Silodurchmesser ($D = 10 \text{ m}$, $D = 1 \text{ m}$ und $D = 0,1 \text{ m}$) in Abhängigkeit von der Partikelgröße dargestellt. Bei Partikelgrößen $d_p \lesssim 10 \text{ } \mu\text{m}$ ist das Verhältnis H_p/F_p größer als 0,1 und für Partikelgrößen $d_p \gtrsim 100 \text{ } \mu\text{m}$ ist das Verhältnis in jedem Fall kleiner als 0,1.

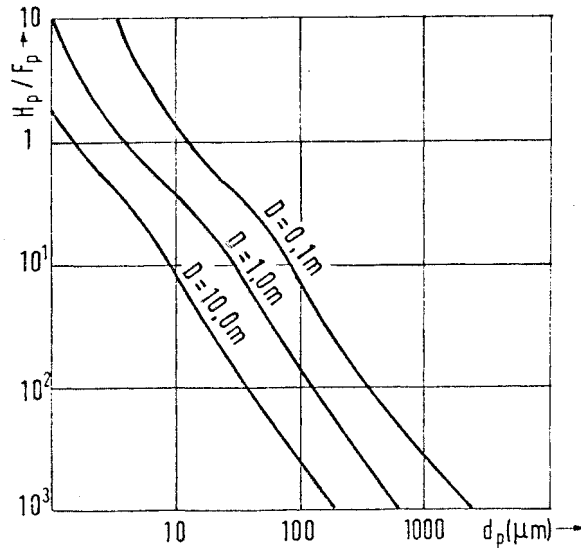


Bild 5.2

Verhältnis Haftkraft zu Presskraft in den Partikelkontakten als Funktion der Korngröße für Kalkstein in Gefäßen mit technischen Abmessungen.
(nach Molerus [7])

Des weiteren wird das Fließverhalten der kohäsiven Schüttgüter maßgeblich von der Beanspruchungsvorgeschichte beeinflusst. In einer Bunkerzentrifuge führten Molerus/Schöneborn [8] Messungen durch, um kritische Austrittsquerschnitte für einen sicheren Materialfluß zu ermitteln. Über eine Modellgleichung werden die Meßergebnisse auf Großsilos bezogen.

Für Schwerepatpulver $d_p \lesssim 15 \mu\text{m}$ ist z. B. ein Durchmesser der Auslauföffnung von $D_G = 1,2 \text{ m}$ erforderlich, wenn das Schüttgut durch die Zentrifuge verfestigt wird und danach ausfließen soll. Der Querschnitt verringert sich auf $D_G = 0,24 \text{ m}$, wenn das Schüttgut ebenso verfestigt wird (aktiver Spannungszustand) aber bereits am Ende des Zentrifugierens eine geringe Schüttgutmenge abgezogen wird (eingefrorener passiver Spannungszustand). In der Praxis wird deshalb häufig so verfahren, daß der Bunker nicht vollständig geleert wird oder daß beim erstmaligen Füllen etwas Schüttgut gleich wieder abgezogen wird.

6 Vorversuche

Als Grundmaterial wurde Quarzsand der Korngröße 3 - 5 mm gewählt. Mit diesem Material wurden in Braunschweig in den letzten 18 Jahren die wesentlichen, grundlegenden Versuche zur Ermittlung der Silolasten durchgeführt. Dem Quarzsand wurden folgende Zusätze hinzugegeben:

Wasser
Paraffinöl
Glyzerin
Bitumen (Rubol 7)
Mehrzweckfett
Sägekettenhaftöl

Auf jeweils 10 kg trockenen Quarzsand wurden jeweils die unten angegebenen Mengen der Additive hinzugegeben.

Versuchsserie	2	425 gr. Wasser
	3	200 gr. Paraffinöl
	4	270 gr. Paraffinöl
	5	250 gr. Glyzerin
	6	95 gr. Rubol
	7	150 gr. Rubol
	9	120 gr. Rubol
	9	67 gr. Mehrzweckfett
	10	100 gr. Mehrzweckfett
	11	167 gr. Mehrzweckfett
	12	334 gr. Mehrzweckfett
	13	25 gr. Sägekettenhaftöl
	14	50 gr. Sägekettenhaftöl
	15	100 gr. Sägekettenhaftöl
	16	150 gr. Sägekettenhaftöl

Die Kohäsion des Quarzsandes und der Winkel der inneren Reibung wurden anschließend in einem weggesteuerten Rahmenschergerät 10/10 cm mit etwa 250 Scherversuchen untersucht.

In den Anlagen 6.1 - 6.16 sind die Ergebnisse der Scherversuche aufgetragen. Eine Zusammenstellung aller Ergebnisse erfolgt in Tab. 6.1. In den Anlagen ist ebenfalls jeweils ein charakteristischer Verlauf eines Scherspannungs-Scherweg-Diagrammes dargestellt.

Schüttgut	Kohäsion [c kN/m ²]	Winkel der inneren Reibung	Anlage
1 Quarzsand	0	43,0°	6.1
2 Quarzsand/Wasser-10 kg/425 g	10,50	37,1°	6.1
3 Quarzsand/Paraffinöl-10 kg/200 g	2,00	40,2°	6.2
4 Quarzsand/Paraffinöl-10 kg/270 g	6,50	41,6°	6.2
5 Quarzsand/Glyzerin-10 kg/250 g	2,00	38,6°	6.3
6 Quarzsand/Rubol 7-10 kg/ 95 g	3,51	33,1°	6.4
7 Quarzsand/Rubol 7-10 kg/150 g	7,97	33,0°	6.4
8 Quarzsand/Rubol 7-10 kg/120 g (nach 10 Tagen)	0,90	32,3°	6.4
9 Quarzsand/Mehrzweckfett-10 kg/ 67 g	0,0	35,6°	6.5
10 Quarzsand/Mehrzweckfett-10 kg/100 g	0,0	35,8°	6.5
11 Quarzsand/Mehrzweckfett-10 kg/167 g	4,67	34,2°	6.5
12 Quarzsand/Mehrzweckfett-10 kg/334 g	3,40	34,9°	6.5
13 Quarzsand/Sägekettenhaftöl-10 kg/ 25 g	3,20	39,3°	6.6
14 Quarzsand/Sägekettenhaftöl-10 kg/ 50 g	2,47	38,9°	6.6
15 Quarzsand/Sägekettenhaftöl-10 kg/100 g	2,67	39,5°	6.6
16 Quarzsand/Sägekettenhaftöl-10 kg/150 g	2,27	39,6°	6.6

Tab. 6.1 Zusammenstellung der Ergebnisse
aus den Scherversuchen

Der Winkel der inneren Reibung und die Kohäsion wurden entsprechend dem Coulombschen Fließkriterium aus folgender Beziehung ermittelt:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi$$

Es fällt auf, daß durch Zusatz von Wasser eine höhere Kohäsion erzielt wurde als durch die übrigen zähflüssigen Stoffe. Durch Zugabe der Öle und Fette trat eine Schmierung der Kornoberflächen ein, die die anfänglich vorhandene Kohäsion herabsetzte.

Wasser ist als Zusatzmittel ungeeignet, da es in Abhängigkeit von der Zeit und Temperatur verdunstet. Bewirkt wird die Zunahme der Kohäsion durch das Entstehen von Flüssigkeitsbrückenbindungen. Der innere Reibungswinkel bei Sanden verringert sich, wenn der Wassergehalt erhöht wird.

Obwohl mit dem Bitumen "Rubol 7" eine zufriedenstellende Kohäsion erreicht wird, ist es als Additiv ungeeignet, da sich der Zeiteinfluß ungünstig auf die Kohäsion auswirkt. Wie der Versuch Nr. 8 zeigt, war schon nach 10 Tagen die gesamte Kohäsion verschwunden.

Es fällt zwar auf, daß der innere Reibungswinkel bei den kohäsiven Scherproben kleiner wird, jedoch ist aufgrund der vorliegenden Ergebnisse keine eindeutige Abhängigkeit erkennbar.

Aus den Ergebnissen, den Erkenntnissen und den Fehlern der Vorversuche wurden für die Hauptversuche Verbesserungen vorgenommen.

1. Bei den Vorversuchen wichen die Schüttgutdichten der Scherproben z. T. erheblich voneinander ab und verfälschten das Ergebnis, da ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen den Materialwerten und der Schüttgutdichte besteht. Um eine annähernd gleiche Dichte der Scherproben im Rahmenschergerät zu erzielen, ist es zweckmäßig, die Scherproben mit einer Verdichtungsspannung σ_v auf der Erstbelastungskurve zu verdichten und dann unter Aufbringung der Scherkraft anzuscheren. Unter Anscheren ist der Zustand zu verstehen, in dem sich die Scherprobe kurz vor dem beginnenden Fließen befindet. Danach werden die Normalkraft und die Scherkraft zurückgenommen. Unter einer Normalspannung $\sigma \leq \sigma_v$ wird die Probe dann abgesichert.
2. Die gewählten Laststufen der Normalspannungen für die Vorversuche erschienen zu hoch bis $\sigma = 300 \text{ kN/m}^2$. Im Silobetrieb werden die Spannungen in einem Bereich liegen, der in etwa $\sigma = 100 \text{ kN/m}^2$ beträgt oder geringer ist, wie das nachfolgende Beispiel verdeutlicht:

Quarzsand: Rechnerische Wichte $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$
Horizontallastbeiwert $\lambda = 0,5$
Wandreibungsbeiwert $\mu_2 = 0,5$

Siloabmessungen: Durchmesser $\varnothing = 8,0 \text{ m}$
Schüttguttiefe $h = 20,0 \text{ m}$

$$z_0 = \frac{A}{u \cdot \lambda \cdot \mu} = \frac{8}{4 \cdot 0,5 \cdot 0,5} = 8,0 \text{ m}$$

maximale Vertikallast

$$p_v = \frac{A}{\lambda \cdot \mu \cdot u} (1 - e^{-z/z_0})$$

$$p_v = \frac{16,0 \cdot 8}{4 \cdot 0,5 \cdot 0,5} (1 - e^{-20/8}) = 117 \text{ kN/m}^2$$

3. Als ungünstig erwies sich, solche Zusätze einzusetzen, die einem Zeiteinfluß und einem Temperatureinfluß unterworfen sind. Allerdings wurden hiermit dennoch Versuche durchgeführt, um zahlenmäßig den Einfluß der unter Punkt 1 beschriebenen Versuchsdurchführung zu erfassen.
4. Da der Einfluß der Kohäsion mit abnehmender Korngröße wächst, sollte Quarzsand mit einem geringeren Korndurchmesser untersucht werden.

7 Hauptversuche

7.1 Grundmaterial

Das Grundmaterial der Scherversuche bildete ebenfalls der bei den Vorversuchen eingesetzte Quarzsand der Körnung 3 - 5 mm. Zusätzlich wurde Quarzsand der Körnung 1,0 - 2,0 mm und Quarzsand 0,2 - 1,0 mm als Grundmaterial und als Additiv zum Quarzsand 3 - 5 mm eingesetzt.

Bei allen drei Korngruppen waren die Kanten des Einzelkornes stark abgewetzt und das Korn selbst besaß eine runde geschliffene Form mit einer stumpfen Kornoberfläche. Im Bild 7.0 sind die Kornverteilungskurven aufgetragen. Danach ergibt sich der in Tab. 7.1 ermittelte Korndurchmesser x_{50} , der sich dem Siebdurchgang bei 50 % Gewichtsanteil zuordnen läßt.

In einem Behälter mit 942 cm^3 Volumen wurde die Schüttgutwichte für die lockerste Lagerung γ_L und für die dichteste Lagerung γ_D ermittelt (Tab. 7.1).

	Korndurchmesser x 50 (mm)	lockerste Lagerung γ_L (kN/m ³)	dichteste Lagerung γ_D (kN/m ³)
Quarzsand 3 - 5 mm	3,45	14,9	16,0
Quarzsand 1 - 2 mm	1,35	15,3	17,0
Quarzsand 0,2 - 1,0 mm	0,55	15,5	17,6

Tab. 7.1 Materialwerte des Quarzsandes

Danach errechnet sich die Porenziffer e:

$$e = \frac{\rho_s}{\rho} - 1$$

Es ist ρ_s die reine Korndichte mit dem Erfahrungswert $\rho_s = 2,65 \text{ kg/cm}^3$. ρ ist die Lagerungsdichte des Schüttgutes.

Des weiteren wird der Porenanteil n für die lockerste und dichteste Lagerung ermittelt.

$$n = 1 - \frac{\rho}{\rho_s}$$

In Tab. 7.2 sind die Ergebnisse der Porenziffer e und die des Porenanteils n für die lockerste und dichteste Lagerung angegeben.

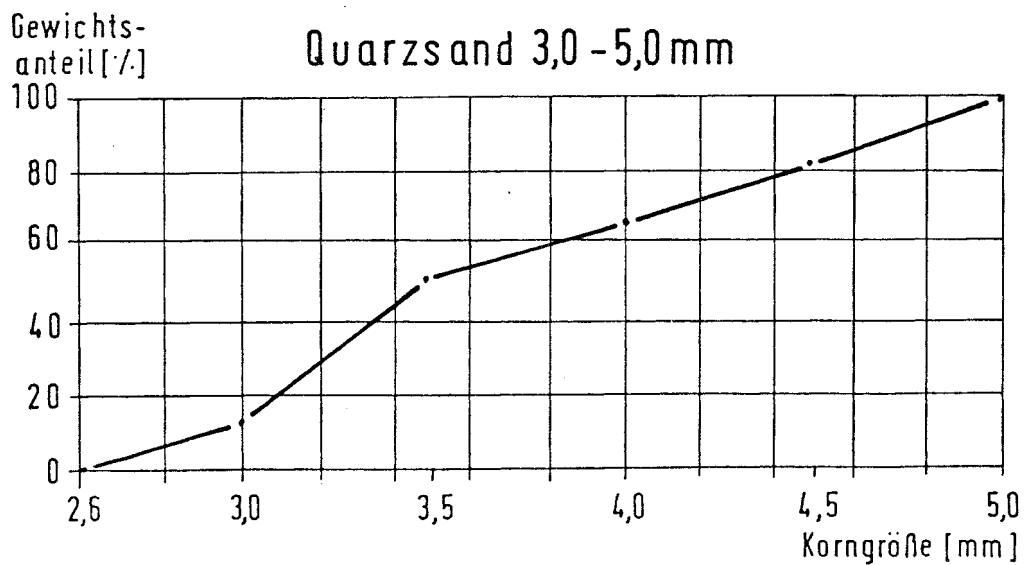
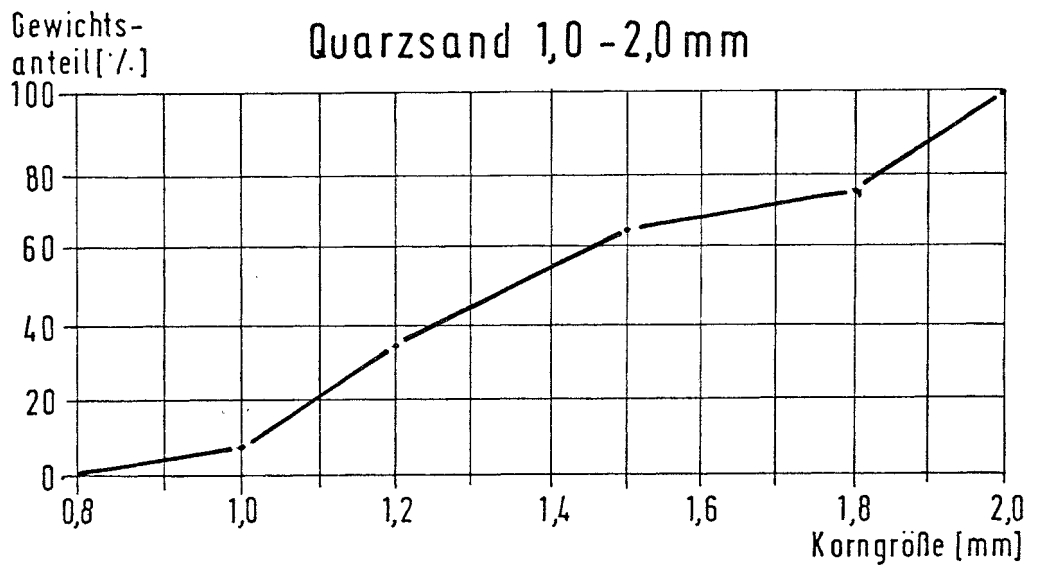
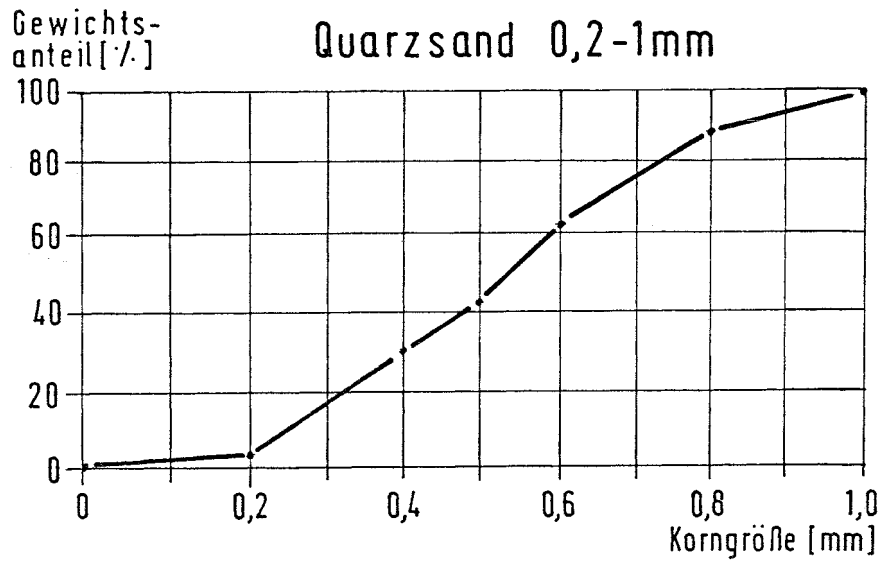


Bild 7.0

Korngrößenverteilung des Quarzsandes

	Porenziffer		Porenanteil	
	e_L	e_D	n_L	n_D
Quarzsand 3 - 5 mm	0,78	0,66	0,44	0,40
Quarzsand 1 - 2 mm	0,73	0,56	0,42	0,36
Quarzsand 0,2 - 1,0 mm	0,71	0,51	0,42	0,34

Tab. 7.2 Porenziffer e und Porenanteil n für lockerste (e_L, n_L) und dichteste Lagerung (e_D, n_D)

Überraschend war, daß der feinkörnige Quarzsand 0,2 bis 1,0 mm, entgegen dem erwarteten Ergebnis, die größte Wichte bei lockerster und dichtester Lagerung lieferte. Erklärt werden kann es dadurch, daß die Kornverteilung des feineren Quarzsandes ungleichförmiger ist und somit eine bessere Verdichtung der Proben zuläßt.

7.2 Zusätze

Folgende Zusätze wurden dem Quarzsand 3 - 5 mm, dem Quarzsand 1 - 2 mm und dem Quarzsand 0,2 - 1,0 mm hinzugefügt:

- Sand
- Mehrzweckfett
- Kalk
- Bitumen (Rubol 7)
- Sägekettenhaftöl

7.3 Zusammensetzung der Materialproben

An folgenden Materialproben wurden die verschiedenen Untersuchungen vorgenommen:

- 1 Quarzsand 3-5 mm
- 2 Quarzsand 1-2 mm
- 3 Quarzsand 0,2-1 mm
- 4.1 4 kg Quarzsand 3-5 mm und 6 kg Quarzsand 0,2-1 mm
- 4.2 3 kg Quarzsand 3-5 mm und 7 kg Quarzsand 0,2-1 mm
- 4.3 2 kg Quarzsand 3-5 mm und 8 kg Quarzsand 0,2-1 mm
- 4.4 1 kg Quarzsand 3-5 mm und 9 kg Quarzsand 0,2-1 mm
- 5.1 10 kg Quarzsand 3-5 mm und 33 g Mehrzweckfett
- 5.2 10 kg Quarzsand 3-5 mm und 67 g Mehrzweckfett
- 5.3 10 kg Quarzsand 3-5 mm und 100 g Mehrzweckfett
- 5.4 10 kg Quarzsand 3-5 mm und 133 g Mehrzweckfett
- 5.5 10 kg Quarzsand 3-5 mm und 167 g Mehrzweckfett
- 5.6 10 kg Quarzsand 3-5 mm und 200 g Mehrzweckfett
- 5.7 10 kg Quarzsand 3-5 mm und 600 g Mehrzweckfett
- 5.8 10 kg Quarzsand 3-5 mm und 1000 g Mehrzweckfett
- 6.1 10 kg Quarzsand 1-2 mm und 33 g Mehrzweckfett
- 6.2 10 kg Quarzsand 1-2 mm und 67 g Mehrzweckfett
- 6.3 10 kg Quarzsand 1-2 mm und 133 g Mehrzweckfett
- 6.4 10 kg Quarzsand 1-2 mm und 200 g Mehrzweckfett
- 7.1 10 kg Quarzsand 0,2-1 mm und 33 g Mehrzweckfett
- 7.2 10 kg Quarzsand 0,2-1 mm und 67 g Mehrzweckfett
- 7.3 10 kg Quarzsand 0,2-1 mm und 133 g Mehrzweckfett
- 7.4 10 kg Quarzsand 0,2-1 mm und 200 g Mehrzweckfett
- 8.1 10 kg Quarzsand 3-5 mm und 500 g Kalk ($\sigma_v = 100 \text{ kN/m}^2$)
- 8.2 10 kg Quarzsand 3-5 mm und 500 g Kalk ($\sigma_v = 80 \text{ kN/m}^2$)
- 9.1 10 kg Quarzsand 3-5 mm und 500 g Bitumen
- 9.2 10 kg Quarzsand 3-5 mm und 667 g Bitumen
- 10.1 10 kg Quarzsand 3-5 mm und 150 g Sägekettenthaftöl
- 10.2 10 kg Quarzsand 3-5 mm und 500 g Sägekettenthaftöl
- 11.0 Maschinenputz MP 75

7.4 Scherversuche

Die Scherversuche wurden mit dem Rahmenschergerät durchgeführt, das ausreichend genaue Ergebnisse für den inneren Reibungswinkel φ und die Kohäsion c liefert. Zumal es sich bei diesen Untersuchungen nicht um die Ermittlung von Materialwerten für die Silodimensionierung, sondern lediglich um die Ermittlung von Vergleichswerten handelte.

Begünstigt wurde die Entscheidung für das Rahmenschergerät noch dadurch, daß der zeitliche und apparative Aufwand gegenüber den übrigen Schergeräten als verhältnismäßig gering anzusehen ist. Außerdem eignet sich das Rahmenschergerät dafür, um die Scherwiderstände bei niedrigen Normalspannungen $\sigma < 10 \text{ kN/m}^2$ zu ermitteln. Weiterhin füllt der kleine Korndurchmesser des Quarzsandes 3 - 5 mm die Ecken des Rahmenschergerätes gut aus, so daß keine Dichtestörungen in den Scherproben zu erwarten sind. Im Bild 7.1 ist der Versuchsablauf der hier durchgeführten Scherversuche dargestellt.

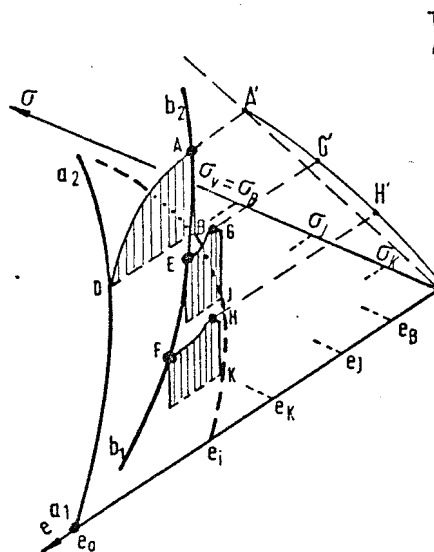


Bild 7.1

Zustandsdiagramm der Versuchsdurchführung am Rahmenschergerät

Die eingebaute Scherprobe (e_0) wurde auf der Erstbelastungskurve a_1 - a_2 mit der Verdichtungsspannung $\sigma_v = 100 \text{ kN/m}^2$ verdichtet (Punkt D). Anschließend wurde die Probe bis zur kritischen Zustandslinie b_1 - b_2 angeschert (von D nach A). Danach wurde die Scherkraft zurückgenommen (von A nach B) und die Scherprobe entlastet, indem die Normalspannung σ reduziert wurde. Dieser Vorgang wird idealisiert auf der Schwellkurve von B nach K beschrieben. Nun wurde die Scherprobe wieder belastet und bei den Laststufen 5, 10, 20, 40, 60, 80 kN/m^2 abgeschert. Hierbei handelte es sich, wie unter Abs. 3.3 beschrieben, um verdichtete Scherproben, wie sie z. B. durch die Flächen J-G-E oder K-H-F dargestellt wurden.

Die durchgeführten Scherversuche lieferten die im Bild 7.1 in die τ - σ -Ebene projizierten Scherfestigkeiten, deren Verbindung den Fließort zu der Verdichtungsspannung σ_v ergab. Der Mohrsche Endkreis wurde dadurch erhalten, indem ein Kreis gezeichnet wurde, der den Fließort tangiert und durch den Anscherpunkt A geht. Somit war es möglich, die Hauptspannungen σ_1 und σ_2 abzugreifen (vgl. Bild 7.2).

Aus der Neigung des Fließortes wurde ein linearisierter innerer Reibungswinkel ψ herausgemessen. Der Schnittpunkt des Fließortes mit der τ -Achse lieferte die Kohäsion c . Die Schüttgutfestigkeit f_c wurde dadurch erhalten, indem ein den Fließort tangierender Halbkreis gezeichnet wurde, dessen kleinste Hauptspannung $\sigma = 0$ durch den Koordinatenursprung ging und die dazugehörige Hauptspannung $\sigma > 0$ die Gutfestigkeit lieferte. Aus dem Verhältnis der größten Hauptspannung σ_1 zur Gutfestigkeit f_c wurde die Fließfunktion ff_c nach Jenike ermittelt.

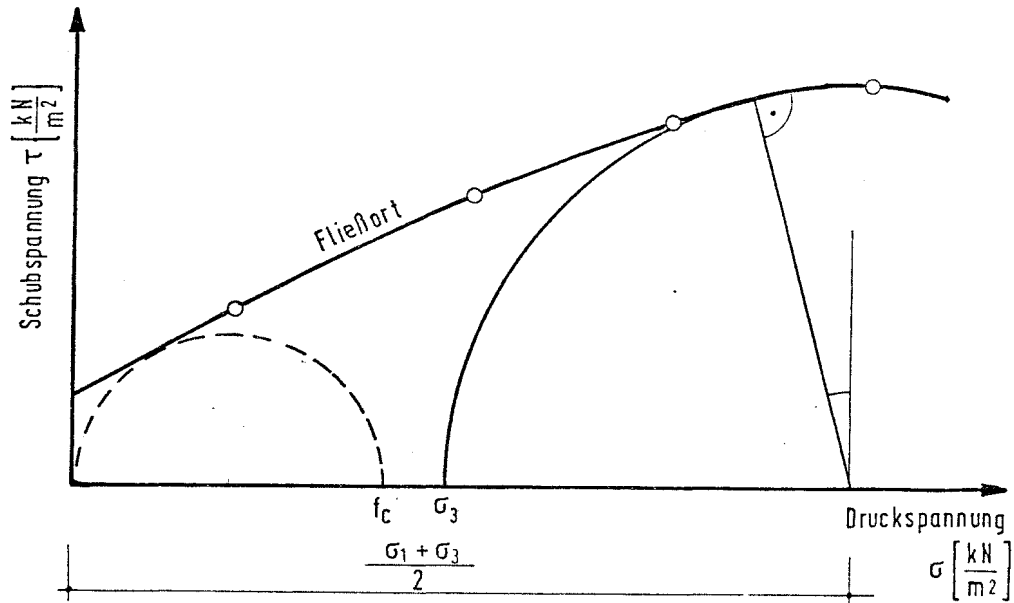


Bild 7.2
Auswertung der Scherversuche

In den Anlagen 7.1 bis 7.11 sind die Ergebnisse der Scherversuche dargestellt. Eine Zusammenfassung in tabellarischer Form erfolgt in Tab. 7.3.

Anlage	Materialzusammensetzung	Kohäsion c (kN/m ²)	Reibungswinkel (°)	Schüttgutfestigkeit f_c (kN/m ²)	Hauptspannung (kN/m ²)	Fließfunktion ff_c (-)	Anlage	Materialzusammensetzung	Kohäsion c (kN/m ²)	Reibungswinkel (°)	Schüttgutfestigkeit f_c (kN/m ²)	Hauptspannung (kN/m ²)	Fließfunktion ff_c (-)
7.1	Quarzsand 3-5 mm	0	43	5,5	246	45	7.6.2	10 kg Quarzsand 1-2 mm 67 g Mehrzweckfett	4,5	28	13,3	171	13
7.2	Quarzsand 1-2 mm	0,9	36	6,7	219	33	7.6.3	10 kg Quarzsand 1-2 mm 133 g Mehrzweckfett	3,8	26	12,0	165	14
7.3	Quarzsand 0,2-1 mm	1,7	31	7,3	192	26	7.6.4	10 kg Quarzsand 1-2 mm 200 g Mehrzweckfett	3,5	26	12,0	165	14
7.4.1	4 kg Quarzsand 3-5 mm 6 kg Quarzsand 0,2-1 mm	1,0	36	2,7	215	79	7.7.1	10 kg Quarzsand 0,2-1 mm 33 g Mehrzweckfett	3,4	27	12,0	170	14
7.4.2	3 kg Quarzsand 3-5 mm 7 kg Quarzsand 0,2-1 mm	1,2	34	8,0	209	26	7.7.2	10 kg Quarzsand 0,2-1 mm 67 g Mehrzweckfett	4,3	27	12,7	170	14
7.4.3	2 kg Quarzsand 3-5 mm 8 kg Quarzsand 0,2-1 mm	1,1	32	6,7	200	30	7.7.3	10 kg Quarzsand 0,2-1 mm 133 g Mehrzweckfett	4,2	26	12,0	167	14
7.4.4	1 kg Quarzsand 3-5 mm 9 kg Quarzsand 0,2-1 mm	2,0	32	6,7	200	30	7.7.4	10 kg Quarzsand 0,2-1 mm 200 g Mehrzweckfett	3,7	27	11,3	169	15
7.5.1	10 kg Quarzsand 3-5 mm 33 g Mehrzweckfett	4,5	31	14,7	193	13	7.8.1	10 kg Quarzsand 3-5 mm 500 g Kalk ($\sigma_v = 100 \text{ kN/m}^2$)	6,0	38	26,4	246	9
7.5.2	10 kg Quarzsand 3-5 mm 67 g Mehrzweckfett	3,0	33	21,5	184	14	7.8.2	10 kg Quarzsand 3-5 mm 500 g Kalk ($\sigma_v = 80 \text{ kN/m}^2$)	5,0	40	22,0	172	8
7.5.3	10 kg Quarzsand 3-5 mm 100 g Mehrzweckfett	5,0	32	21,3	175	8	7.9.1	10 kg Quarzsand 3-5 mm 500 g Bitumen (Rubol-7)	4,5	34	17,3	184	11
7.5.4	10 kg Quarzsand 3-5 mm 133 g Mehrzweckfett	5,5	29	21,5	184	8	7.9.2	10 kg Quarzsand 3-5 mm 667 g Bitumen (Rubol-7)	7,5	28	26,7	178	7
7.5.5	10 kg Quarzsand 3-5 mm 167 g Mehrzweckfett	6,0	36	23,3	190	8	7.10.1	10 kg Quarzsand 3-5 mm 150 g Sägekettentaftöl	3,0	42	16,7	245	15
7.5.6	10 kg Quarzsand 3-5 mm 200 g Mehrzweckfett	4,0	29	13,3	180	14	7.10.2	10 kg Quarzsand 3-5 mm 500 g Sägekettentaftöl	1,0	44	6,0	232	38
7.5.7	10 kg Quarzsand 3-5 mm 600 g Mehrzweckfett	5,0	28	16,7	183	10	7.11.	Maschinenputz MP 75	5,1	36	20,5	226	11
7.5.8	10 kg Quarzsand 3-5 mm 1000 g Mehrzweckfett	6,0	32	23,3	196	8							
7.6.1	10 kg Quarzsand 1-2 mm 33 g Mehrzweckfett	3,0	29	10,2	176	17							

Tabelle 7.3

Ergebnis der Scherversuche

7.5 Messung der Fließfähigkeit und des Schüttwinkels

Die Fließfähigkeit der in Abs. 7.3 aufgeführten Proben wurde auf zwei verschiedene Arten untersucht. Zum einen wurde der Öffnungsdurchmesser ermittelt, durch den eine locker eingebrachte Materialprobe gerade noch ausfloß. Die Untersuchungen wurden mit zylindrischen Blechbehältern $\varnothing 10\text{ cm}$, $h = 12\text{ cm}$ durchgeführt. Hierzu wurde in den ebenen Behälterboden mittig eine Öffnung gebohrt. Zur Eingrenzung des "Fließ-Durchmessers" wurden folgende Öffnungen gewählt: 5, 8, 10, 13, 15, 18, 20, 25, 35, 40 und 50 mm. In Tab. 7.4 sind die Ergebnisse zusammengetragen.

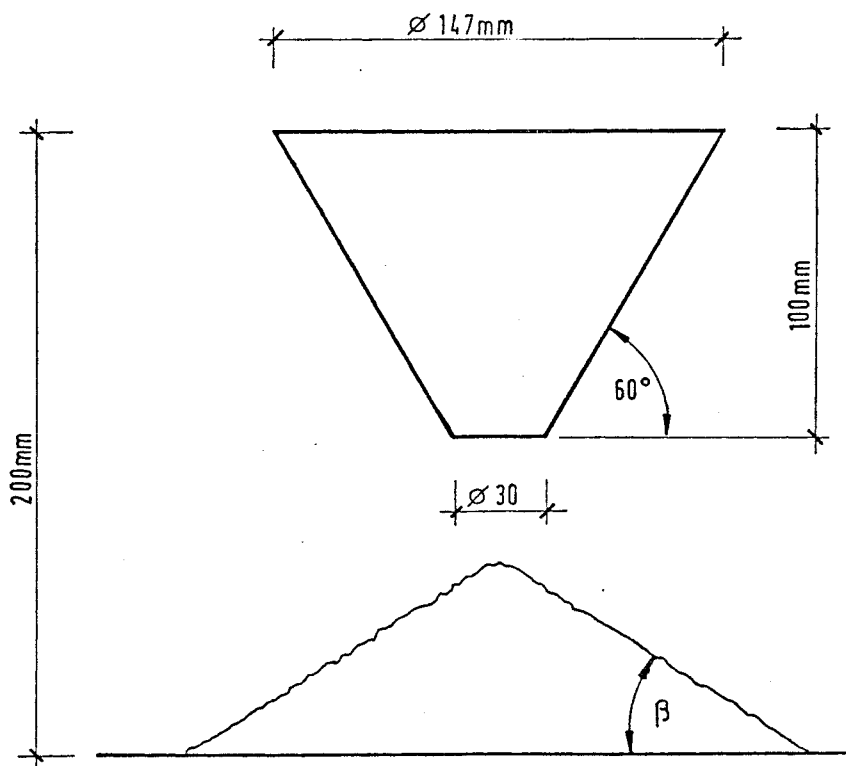


Bild.7.3

Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Auslaufzeit und des Schüttwinkels.

Anlage	Materialzusammensetzung	kleinster Loch- durchmesser	Auslaufzeit (s)	Schüttwinkel β (°)	Anlage	Materialzusammensetzung	kleinster Loch- durchmesser	Auslaufzeit (s)	Schüttwinkel β (°)
7.1	Quarzsand 3-5 mm	25	5,1	29,2	7.6.2	10 kg Quarzsand 1-2 mm 67 g Mehrzweckfett	25	7,2	34,8
7.2	Quarzsand 1-2 mm	8	3,4	26,6	7.6.3	10 kg Quarzsand 1-2 mm 133 g Mehrzweckfett	50	11,5	38,7
7.3	Quarzsand 0,2-1 mm	5	3,3	25,5	7.6.4	10 kg Quarzsand 1-2 mm 200 g Mehrzweckfett	50	32,5 (Rüttelhilfe)	41,3
7.4.1	4 kg Quarzsand 3-5 mm 6 kg Quarzsand 0,2-1 mm	15	3,4	27,1	7.7.1	10 kg Quarzsand 0,2-1 mm 33 g Mehrzweckfett	15	4,1	31,4
7.4.2	3 kg Quarzsand 3-5 mm 7 kg Quarzsand 0,2-1 mm	13	3,5	26,9	7.7.2	10 kg Quarzsand 0,2-1 mm 67 g Mehrzweckfett	25	5,5	34,1
7.4.3	2 kg Quarzsand 3-5 mm 8 kg Quarzsand 0,2-1 mm	13	3,0	25,1	7.7.3	10 kg Quarzsand 0,2-1 mm 133 g Mehrzweckfett	40	26,1 (Rüttelhilfe)	39,5
7.4.4	1 kg Quarzsand 3-5 mm 9 kg Quarzsand 0,2-1 mm	13	3,1	26,3	7.7.4	10 kg Quarzsand 0,2-1 mm 200 g Mehrzweckfett	50	28,9 (Rüttelhilfe)	42,0
7.5.1	10 kg Quarzsand 3-5 mm 33 g Mehrzweckfett	25	6,3	33,7	7.8.1	10 kg Quarzsand 3-5 mm 500 g Kalk ($\sigma_v = 100 \text{ kN/m}^2$)	20	5,9	35,0
7.5.2	10 kg Quarzsand 3-5 mm 67 g Mehrzweckfett	25	7,0	26,3	7.8.2	10 kg Quarzsand 3-5 mm 500 g Kalk ($\sigma_v = 80 \text{ kN/m}^2$)	20	5,9	35,0
7.5.3	10 kg Quarzsand 3-5 mm 100 g Mehrzweckfett	30	7,5	37,0	7.9.1	10 kg Quarzsand 3-5 mm 500 g Bitumen (Rubol 7)	30	30,3 (Rüttelhilfe)	36,9
7.5.4	10 kg Quarzsand 3-5 mm 133 g Mehrzweckfett	30	8,1	37,4	7.9.2	10 kg Quarzsand 3-5 mm 667 g Bitumen (Rubol 7)	30	32,8 (Rüttelhilfe)	39,1
7.5.5	10 kg Quarzsand 3-5 mm 167 g Mehrzweckfett	30	10,4	38,8	7.10.1	10 kg Quarzsand 3-5 mm 150 g Sägekettenhaftöl	18	7,3	36,5
7.5.6	10 kg Quarzsand 3-5 mm 200 g Mehrzweckfett	35	15,5	41,3	7.10.2	10 kg Quarzsand 3-5 mm 500 g Sägekettenhaftöl	25	11,0	39,1
7.5.7	10 kg Quarzsand 3-5 mm 600 g Mehrzweckfett	50	kein Fließen	55,0	7.11.	Maschinenputz MP 75	40	32,4	42,8
7.5.8	10 kg Quarzsand 3-5 mm 1000 g Mehrzweckfett	50	kein Fließen	57,0					
7.6.1	10 kg Quarzsand 1-2 mm 33 g Mehrzweckfett	10	4,5	31,9					

Tab. 7.4

Ergebnisse der Auslaufversuche

Zum anderen wurde die Zeit gemessen, die die Schüttgutproben benötigen, um aus einem Kunststofftrichter auszufließen (Bild 7.3). Der Öffnungsdurchmesser betrug für alle Proben 30 mm und führt dazu, daß die besonders zähflüssigen Mischungen nicht ausfließen, bzw. eine leichte Rüttelhilfe erforderlich ist. Das ausfließende Probenmaterial lagert sich unter einem natürlichen Schüttwinkel, dessen Neigung ebenfalls gemessen wurde. Die Ergebnisse sind in Tab. 7.4 dargestellt.

7.6 Ergebnisse der Scher- und Auslaufversuche

Die Ergebnisse und die Auswertung der Scherversuche sind in den Anlagen 7.1 bis 7.11 graphisch dargestellt, während in den vorstehenden Tabellen 7.3 und 7.4 alle Ergebnisse der Scherversuche und der Fließfähigkeitsversuche in tabellarischer Form zusammengetragen sind. Eine graphische Gegenüberstellung und eine vergleichende Betrachtung erfolgt in den Bildern 7.4 bis 7.10.

Im folgenden werden die Ergebnisse interpretiert: Besonders deutlich wird der Einfluß der Teilchengröße auf das Stoff- und Materialverhalten. Die untersuchten Korngruppen des Quarzsandes 3-5 mm, 1-2 mm und 0,2-1 mm weisen mit abnehmender Partikelgröße erwartungsgemäß eine zunehmende Kohäsion und Schüttgutfestigkeit auf, wohingegen der innere Reibungswinkel, der kleinste Lochdurchmesser (bei dem die Probe noch ausfließt), die Auslaufzeit und der Schüttwinkel geringer werden.

Wird dem feinen Quarzsand 0,2-1 mm grober Quarzsand 3-5 mm als Additiv hinzugegeben, so verringert sich mit zunehmenden groben Anteilen die Kohäsion und die Schüttgutfestigkeit. Der innere Reibungswinkel und der Schüttwinkel steigen geringfügig an. In der Auslaufzeit und für den kleinsten Lochdurchmesser wurden kaum Veränderungen gemessen (Bild 7.4).

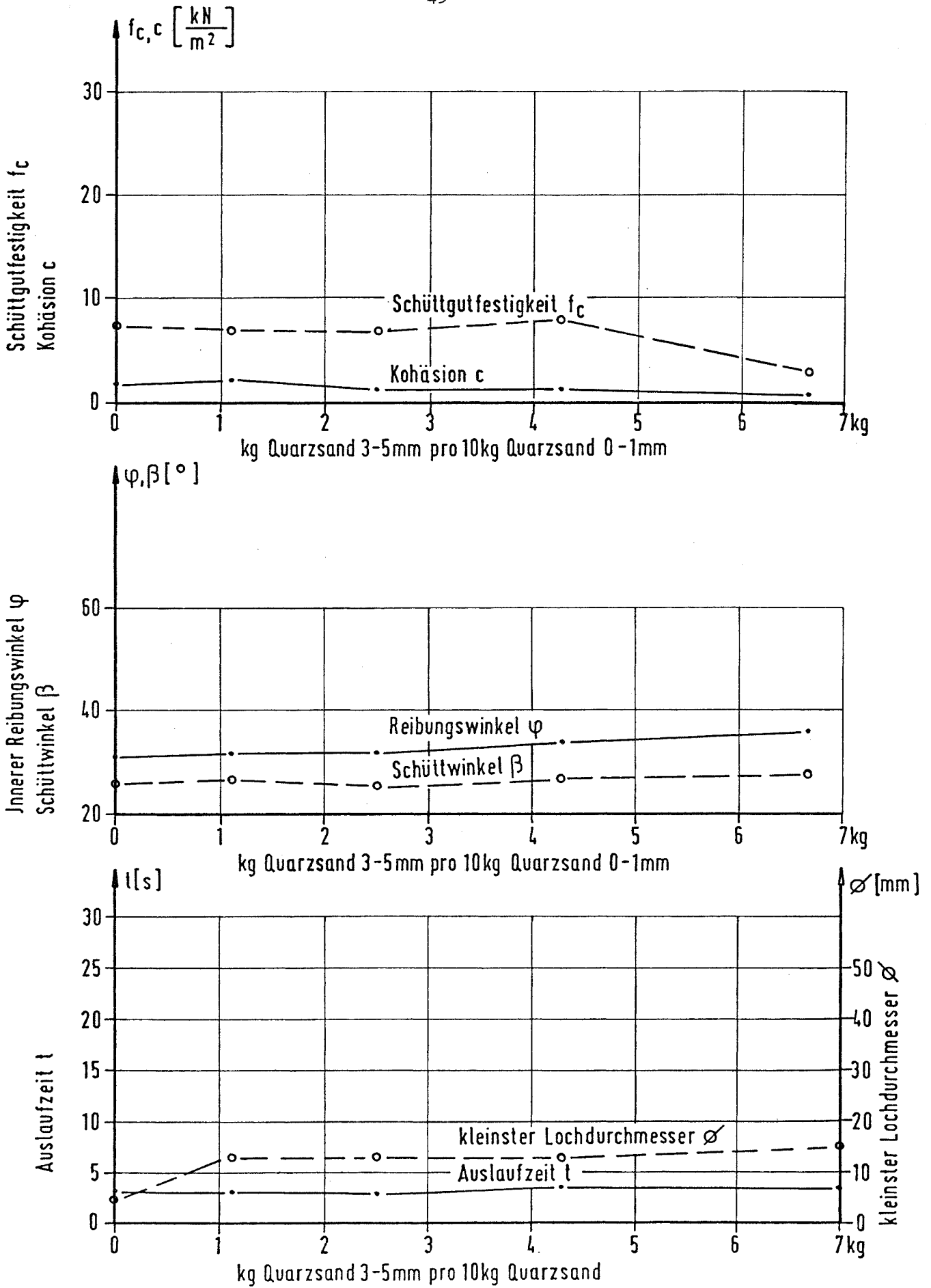


Bild.7.4

Einfluß des Quarzsandes 3-5mm auf die Material- und Fließeigenschaften des Quarzsandes 0,2-1mm.

Beim Quarzsand 3-5 mm, dem Mehrzweckfett als Additiv hinzugefügt wird, erreichen die Kohäsion und die Schüttgutfestigkeit die größten Werte, wenn die Zugabemenge des Fettes 100-180 g pro 10 kg Quarzsand beträgt. Danach nehmen die Kohäsion und Schüttgutfestigkeit nicht mehr zu. Die Unstetigkeiten im Linienverlauf ergeben sich, weil es bei dem relativ grobkörnigen Material nicht immer gelingt, das Fett gleichmäßig über die gesamte Probe zu verteilen. Der innere Reibungswinkel ist beim reinen Quarzsand größer als der Schüttwinkel, sonst ist er aber immer kleiner und weist eine geringfügig abnehmende Tendenz bei zunehmendem Fettgehalt auf. Der Schüttwinkel nimmt dagegen mit größer werdendem Fettanteil merklich zu. Auch für das Ausfließen werden bei zunehmendem Fettgehalt längere Zeiträume benötigt, und bei einem Fettanteil über 200 g ist bei der gewählten Versuchsanordnung kein Fließen mehr möglich (Bild 7.5).

Im Bild 7.6 sind die Ergebnisse für Quarzsand 1-2 mm als Grundmaterial und Mehrzweckfett als Additiv dargestellt. Im wesentlichen trifft auch das zu, was zu dem Quarzsand 3-5 mm gesagt wurde. Allerdings zeigen die Linienzüge einen stetigeren Verlauf, bedingt durch die gleichmäßigere Vermischung des Fettes.

Im Bild 7.7 sind die ermittelten Werte des feinen Quarzsandes 0,2-1 mm aufgetragen. Die Linienverläufe der gemessenen Materialwerte und die der Fließeigenschaften sind ähnlich denen des Quarzsandes 3-5 mm und denen des Quarzsandes 1-2 mm.

Der untersuchte reine Baukalk (Anlage 7.8) wies bei einer Verfestigungsspannung von $\sigma_v = 100 \text{ kN/m}^2$ eine relativ hohe Kohäsion von $c = 6,0 \text{ kN/m}^2$ auf. Bei einer Reduzierung der Verfestigungsspannung auf $\sigma_v = 80 \text{ kN/m}^2$ verringerte sich die Kohäsion auf $5,0 \text{ kN/m}^2$. Jedoch ist die erzielte Kohäsion zu gering, um ihn als Zusatzstoff für den Quarzsand einzusetzen. Ebenso verhält es sich mit dem Maschinenputz MP 75 (Anl. 7.11).

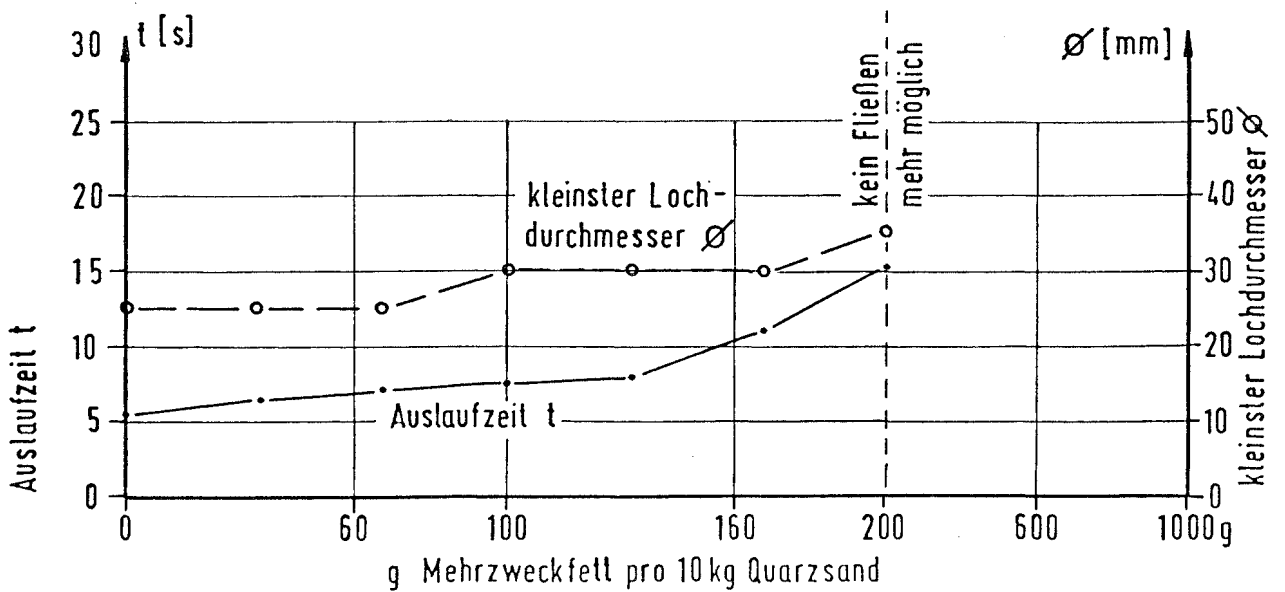
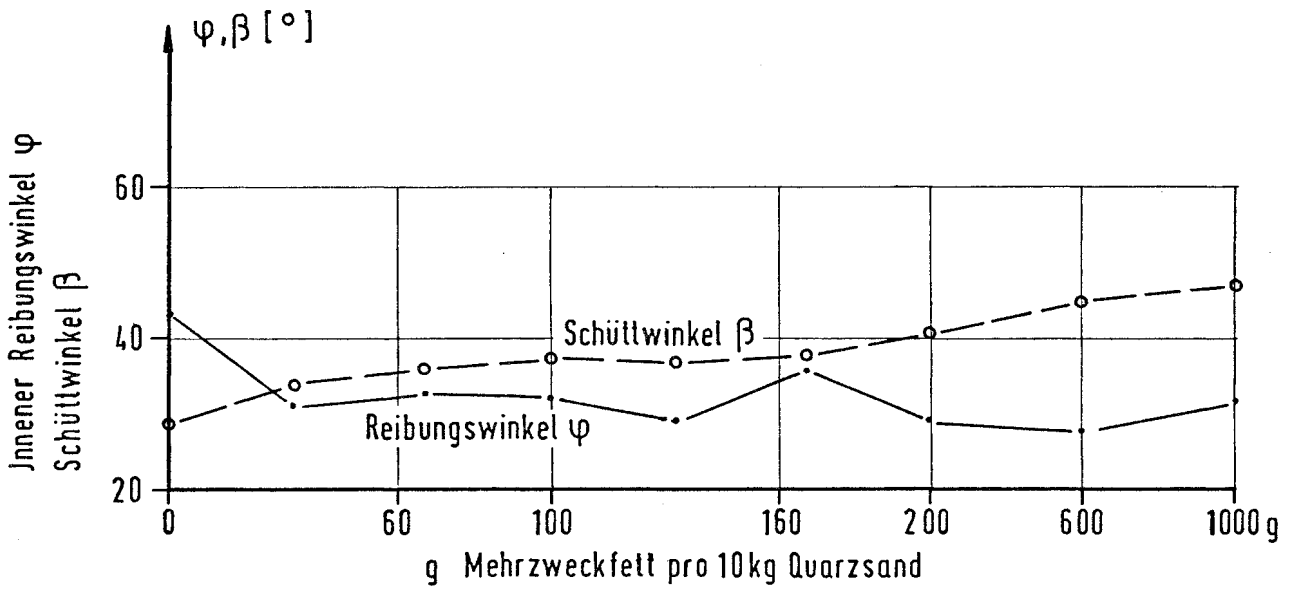
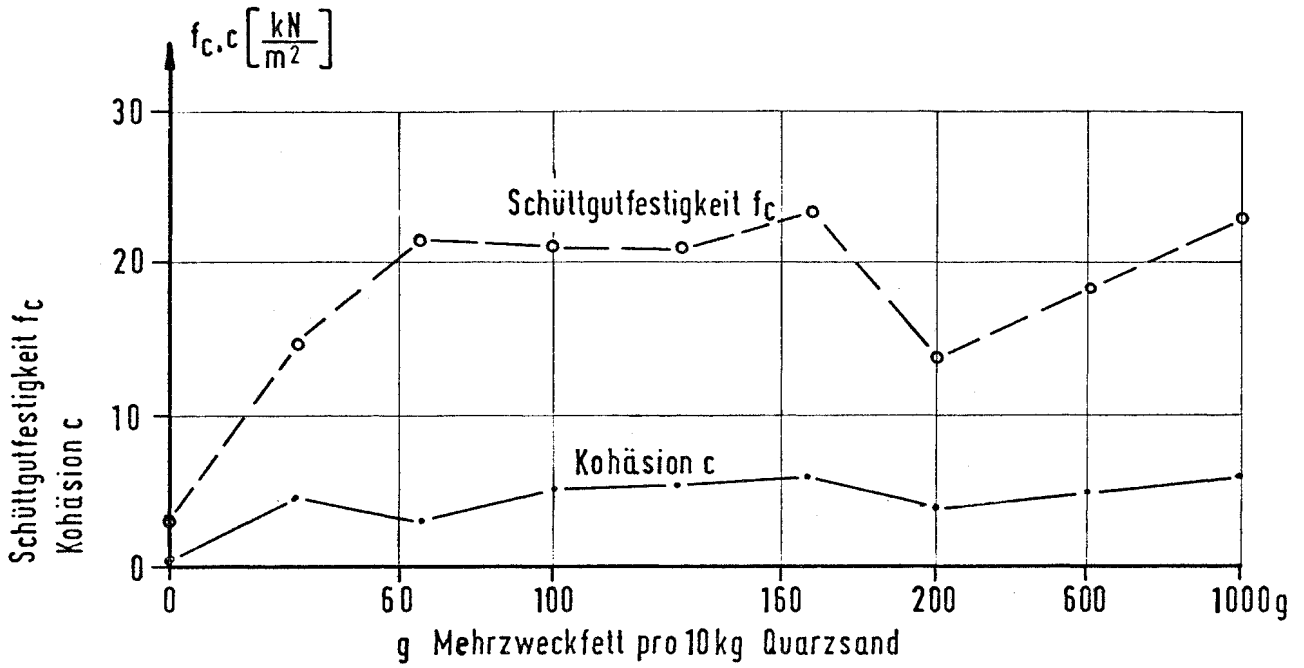


Bild. 7.5

Einfluß des Mehrzweckfettes auf die Material- und Fließ-eigenschaften des Quarzsandes 3-5mm.

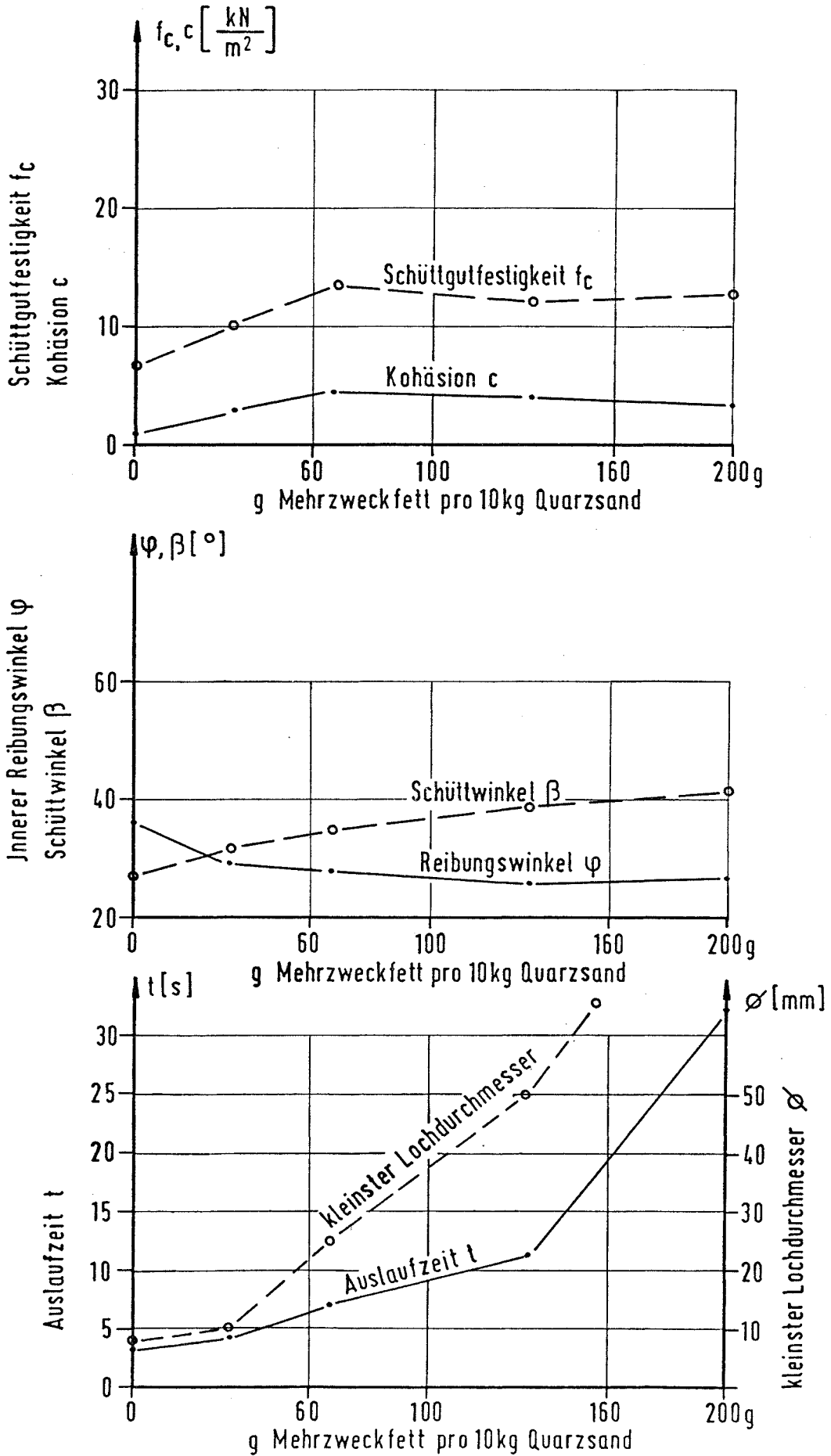


Bild.7.6

Einfluß des Mehrzweckfettes auf die Material- und Fließeigenschaften des Quarzsandes 1-2mm.

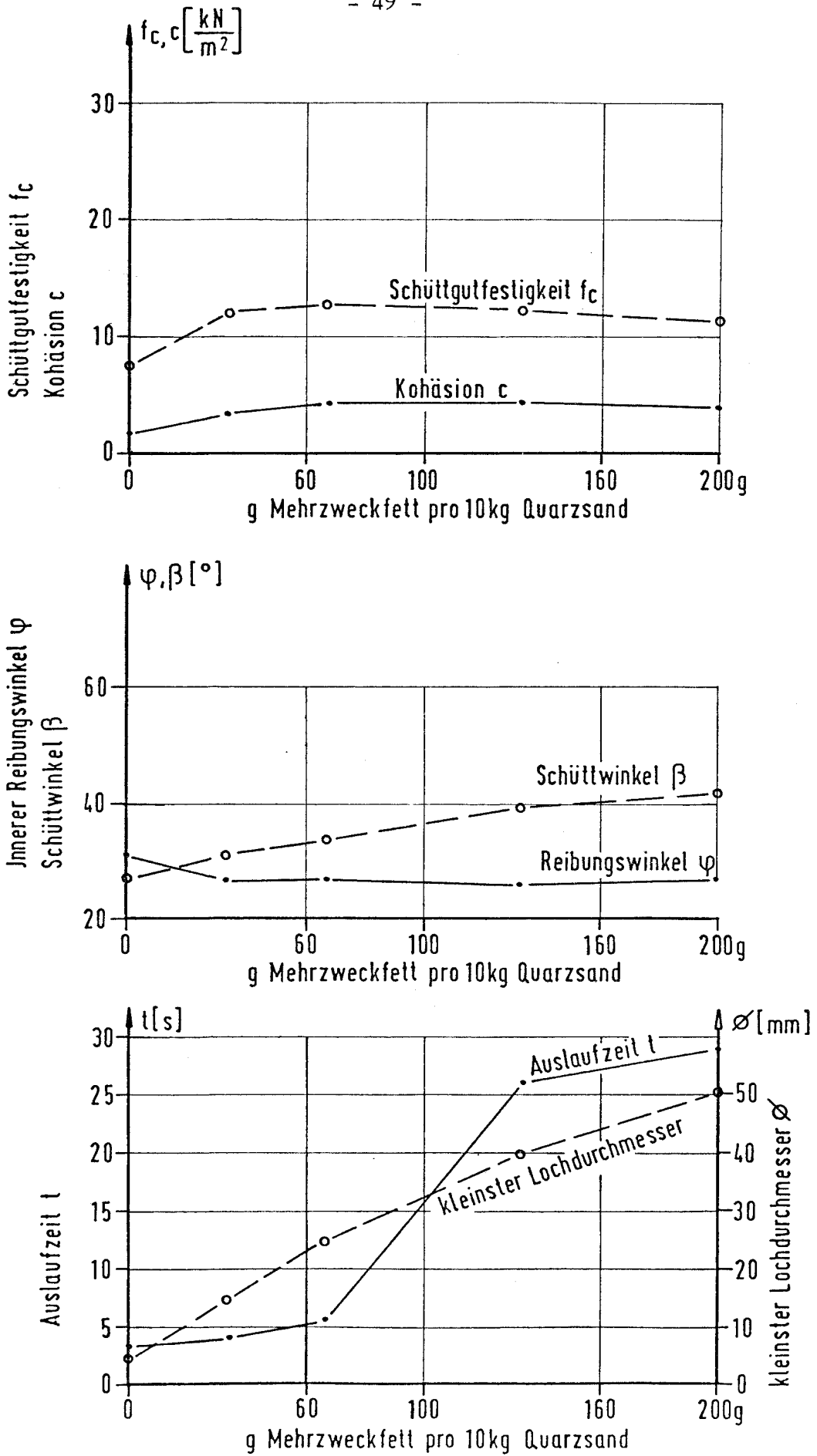


Bild.7.7

Einfluß des Mehrzweckfettes auf die Material- und Fließeigenschaften des Quarzsandes 0,2-1mm.

Das Bitumen (Rubol 7) erhöht die Kohäsion des Quarzsandes erheblich, so daß die gewünschte Wirkung erzielt wird (Anlage 7.9). Jedoch überwiegen die Nachteile. Zum einen ist es nicht möglich die Stoffwerte über einen längeren Zeitraum zu gewährleisten, da das Bitumen verdunstet und dieser Vorgang temperaturabhängig ist. Zum anderen ist es ein sehr unangenehmes Probenmaterial, das bei Berührung die Geräte verunreinigt und eine aufwendige Säuberung der Versuchseinrichtungen nach sich zieht.

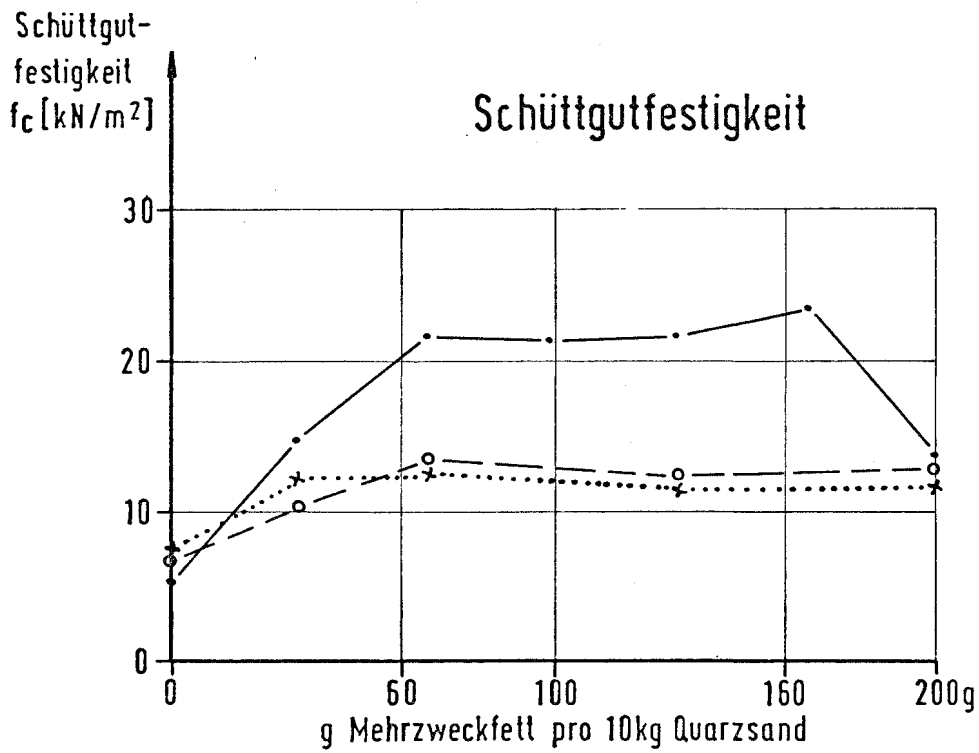
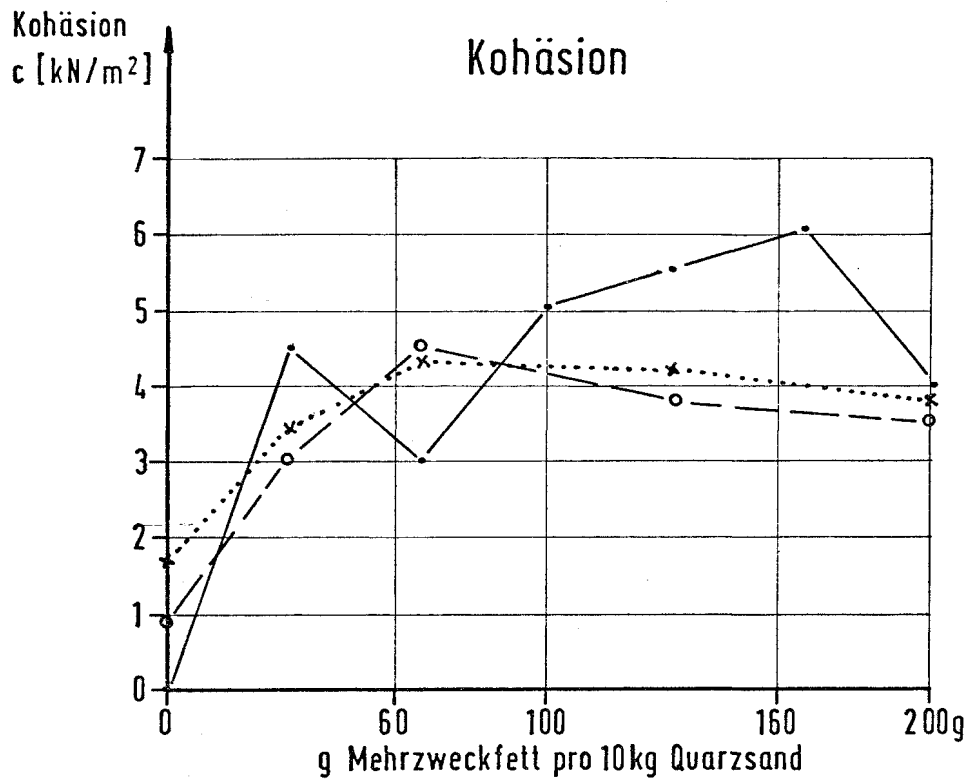
Insgesamt überraschend ist das Ergebnis der Scherversuche mit dem Rahmenschergerät; denn anstelle des erwarteten gekrümmten Fließortverlaufes bildet die Verbindung der Meßpunkte untereinander einen annähernd linearen Linienzug. War es bei den Vorversuchen aufgrund der großen Normaldrücke, ähnlich wie in der Bodenmechanik, noch erklärbar, daß sich ein Fließortverlauf entsprechend der Mohr-Coulombschen Bruchbedingung einstellte, so läßt sich das Ergebnis der Hauptversuche nur so erklären, daß das Rahmenschergerät eine besonders sorgfältige Versuchsdurchführung erfordert, die eine langjährige Erfahrung des versuchsdurchführenden Personals in der Schüttgutmechanik voraussetzen, um die zutreffenden Meßwerte zu halten. Aus diesen Gründen scheinen zur Ermittlung der Stoffwerte das Jenike- und das Ringschergerät geeigneter zu sein. Deren apparativer und zeitlicher Aufwand ist jedoch weitaus höher anzusetzen als der des Kastenschergerätes. Da es sich im vorliegenden Falle lediglich um erste Tastversuche handelt, um mit deren Hilfe Vergleichswerte zu erhalten, mag das Ergebnis als ausreichend anzusehen sein.

Die Fließfunktion $ff_c = \sigma_1 / f_c$ nach Jenike lieferte keine zutreffenden Ergebnisse für die Fließfähigkeit der untersuchten Proben. Demnach müßten die meisten Mischungen "frei fließen" ($10 < ff_c$) oder mindestens "leicht fließen" ($4 < ff_c \leq 10$). Dieser Umstand kann dadurch erklärt werden, daß die Schüttgutfestigkeit f_c wie auch die größte Hauptspannung σ_1 graphisch ermittelt werden und mit Zeichen- und Abgreiffehlern behaftet sind.

In den Bildern 7.8 bis 7.10 werden die Material- und Fließeigenschaften der drei Korngruppen des Quarzsandes unter Zugabe von Mehrzweckfett miteinander verglichen. Die größte Kohäsion $c = 6,0 \text{ kN/m}^2$ wurde beim groben Quarzsand 3-5 mm gemessen unter Zugabe von 167 g Mehrzweckfett pro 10 kg Sand. Die beiden feineren Korngruppen zeigen qualitativ und quantitativ einen annähernd gleichen Verlauf, und die Kohäsion erreicht mit $c = 4,5 \text{ kN/m}^2$ bei 67 g Mehrzweckfett den Größtwert und nimmt danach geringfügig ab (Bild 7.8).

Der Linienzug der Schüttgutfestigkeit des Quarzsandes 3-5 mm ist vom Betrag her annähernd um das doppelte größer als der der beiden feineren Korngruppen, die einen in etwa gleichen Verlauf aufweisen. Durch den Zusatz des Schmiermittels verringert sich der innere Reibungswinkel um ein Viertel und ist beim Quarzsand 3-5 mm am größten. Der Schüttwinkel ist bei allen drei Quarzsandgruppen in etwa gleich groß und wird mit zunehmendem Fettgehalt größer. Beim reinen Quarzsand beträgt $\beta \approx 27^\circ$ und steigt bei 200 g Fett pro 10 kg Sand auf $\beta \approx 42^\circ$ an. Beim reinen Quarzsand fließen die feineren Korngruppen schneller aus als die groben. Die benötigte Auslaufzeit des groben Materials verändert sich bei zunehmendem Fettzusatz bis 200 g nur geringfügig, wohingegen das Fett beim feineren Quarzsand bewirkt, daß es nur mit einer Rüttelhilfe zum Fließen gebracht werden kann.

Der kleinste Lochdurchmesser aus dem der reine Sand gerade noch ausfließt ist beim feinen Material am kleinsten. Beim Quarzsand 3-5 mm ist dagegen von Anfang an bereits ein relativ großer Lochdurchmesser $\phi = 25 \text{ mm}$ erforderlich, der allerdings selbst bei 200 g Fett nur auf $\phi = 35 \text{ mm}$ ansteigt. Anders der Quarzsand 0,2-1 und 1-2 mm, hier beträgt am Anfang der kleinste Durchmesser $\phi = 5$ bzw. $\phi = 8 \text{ mm}$, während bei 200 g Fettzusatz bereits Lochdurchmesser $\phi 50 \text{ mm}$ erforderlich werden.



- — • Quarzsand 3-5mm
- - - ○ Quarzsand 1-2mm
- × × Quarzsand 0,2-1mm

Bild. 7.8

Einfluß des Mehrzweckfettes auf die Kohäsion und Schüttgutfestigkeit der Quarzsand-Korngruppen 3-5mm, 1-2mm und 0,2-1mm.

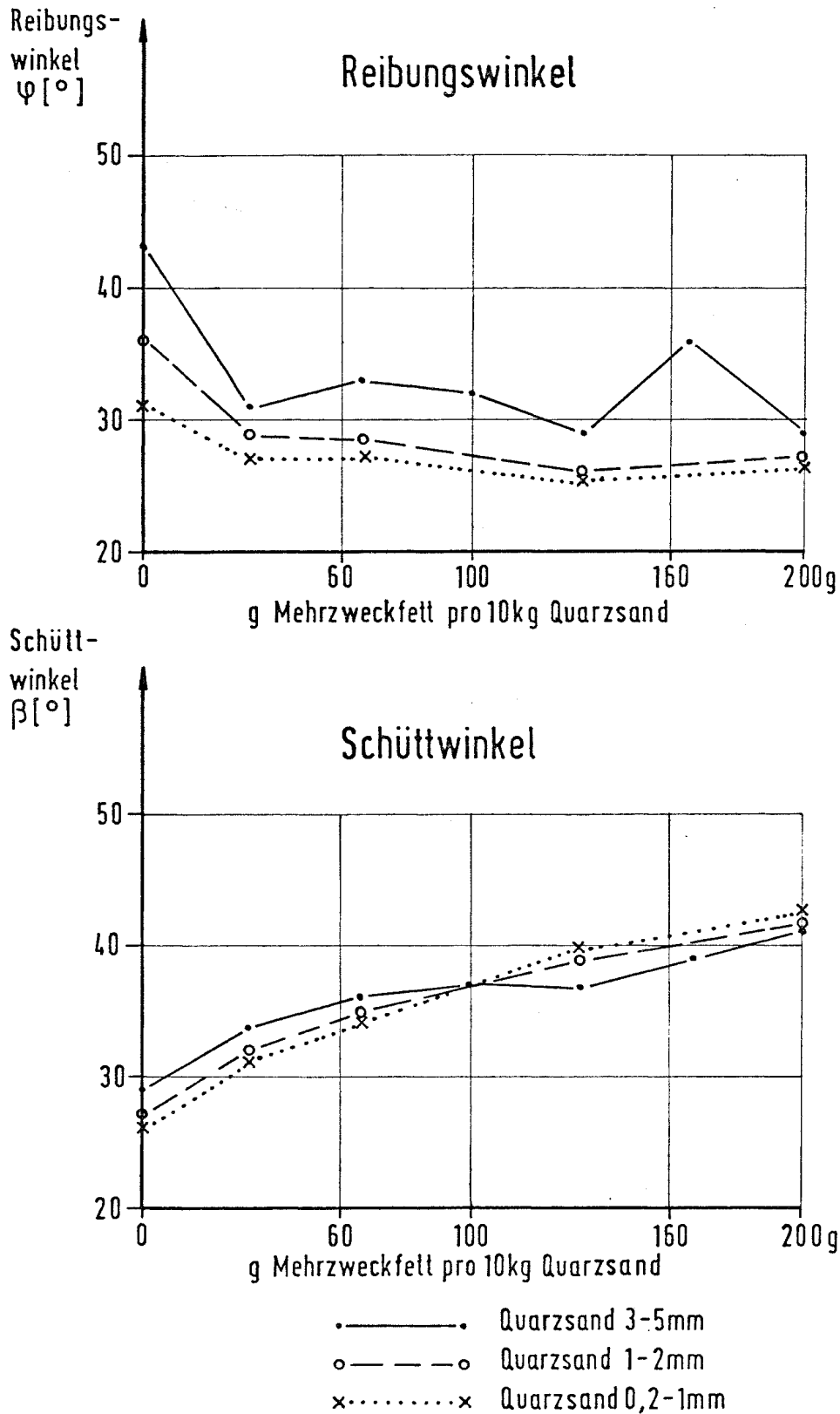


Bild.7.9

Einfluß des Mehrzweckfettes auf den inneren Reibungswinkel und den Schüttwinkel der Quarzsand-Korngruppen 3-5mm, 1-2mm und 0,2-1mm.

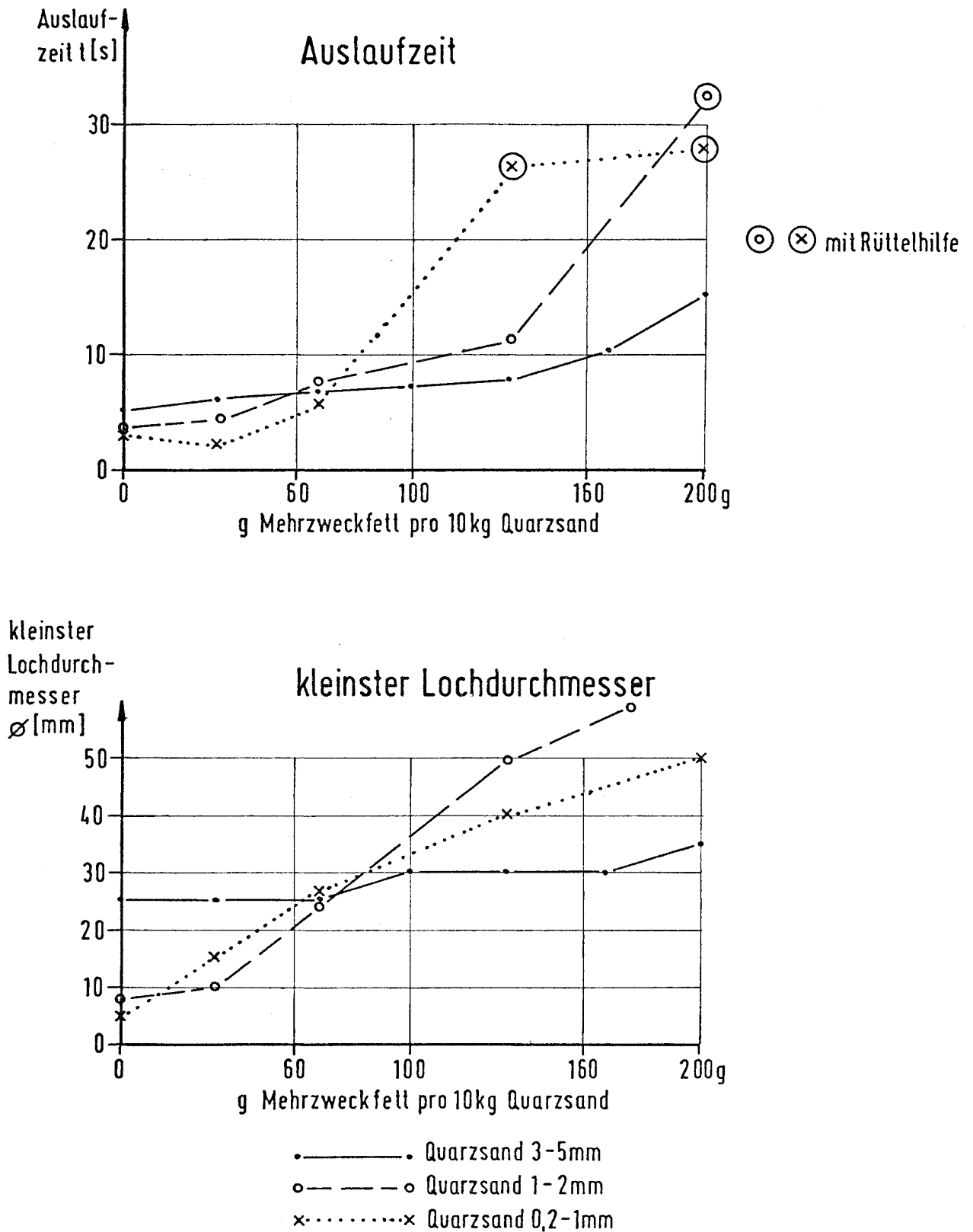


Bild.7.10

Einfluß des Mehrzweckfettes auf die Auslaufzeit und den kleinsten Lochdurchmesser (bei dem das Material noch ausfließt) der Quarzsand-Korngruppen 3-5mm, 1-2mm und 0,2-1mm.

Generell ergibt der Vergleich der drei Quarzsand-Korngruppen 3-5, 1-2 und 0,2-1 mm, daß die beiden letzten Korngruppen annähernd gleiche Stoff- und Fließeigenschaften aufweisen, während das grobe Korn 3-5 mm anders zu werten ist.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die hier durchgeführten Untersuchungen sind als erster Tastversuch zu werten, um aus nichtkohäsivem Quarzsand der Korngruppe 3-5 mm durch Zugabe entsprechender Zusätze ein homogenes Material herzustellen, das kohäsive Material- und Fließeigenschaften aufweist.

Der Versuch ein geeignetes Zugabenmaterial zu finden, mit dem es möglich ist eine jederzeit reproduzierbare Kohäsion zu erzielen, konnte leider nicht in allen Belangen zufriedenstellend gelöst werden. Es konnte kein Additiv gefunden werden, mit dem es gelingt die Kohäsion des relativ grobkörnigen Quarzsandes in Abhängigkeit von der Zugabemenge des Additivs erheblich zu erhöhen. Bei einer aufgetragenen Verfestigungsspannung von $\sigma_v = 100 \text{ kN/m}^2$ - in dieser Größenordnung tritt die Vertikal-last p_v in Großsilos auf - betragen die Haftfestigkeiten $c = 6,0 \text{ kN/m}^2$. Angestrebt wird jedoch eine Kohäsion von etwa $c = 10 \text{ kN/m}^2$. Additive mit denen diese Wirkung zu erzielen sind (z. B. Bitumen), weisen dagegen über einen längeren Zeitraum kein konstantes Materialverhalten auf, da sich die Flüssigkeit der Suspension verflüchtigt und dieser Vorgang maßgeblich von der Umgebungstemperatur beeinflusst wird.

Teilweise zufriedenstellende Ergebnisse konnten durch Zugabe von Mehrzweckfett erzielt werden, mit dem die zuvor genannten Festigkeiten von $c = 6,0 \text{ kN/m}^2$ erreicht wurden, einhergehend mit einer Verringerung des inneren Reibungswinkels von $\varphi = 43^\circ$ auf $\varphi = 30^\circ$. Jedoch bedarf es einer besonderen Sorgfalt, insbesondere bei groben Materialien, eine homogene Mischung herzustellen. Auch bei versuchstechnisch besonders sorgfältiger Durchführung besteht die Möglichkeit, daß das Mehrzweckfett nicht gleichmäßig im Sand und um die einzelnen Quarzsandkörner verteilt wird, wodurch Ausreißer bei den Meßergebnissen auftreten. Erstaunlicherweise läßt sich das Mehrzweckfett besser mit den feineren Quarzsandkörnungen 1-2 mm und 0,2-1 mm vermischen, als mit dem groben Korn 3-5 mm. Entgegen allen Erwartungen wurden beim feineren Quarzsand als Grundmaterial kleinere Haftfestigkeiten gemessen als beim groben Quarzsand 3-5 mm, bei gleicher Zugabe des Mehrzweckfettes. Allerdings zeigte der feine Sand ein wesentlich schlechteres Fließverhalten.

Aus den Versuchsergebnissen ergibt sich, daß es durchaus möglich ist, in einem geringen Umfang eine reproduzierbare Kohäsion für das Grundmaterial Quarzsand 3-5 mm zu erzielen. Es muß weiteren Untersuchungen vorbehalten bleiben festzustellen, wie sich die gefundene Kohäsion über lange Zeiträume verändert. Ebenso bedarf es weiterer Versuche mit anderen Versuchsmaterialien - wobei auch an aufgesprühte Kunststoffe gedacht wird -, um höhere Werte für die Kohäsion zu erreichen.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen ist es bereits heute möglich, den grobkörnigen Quarzsand mit schwachkohäsiven Eigenschaften zu versehen. Hierdurch können erste Modellversuche durchgeführt werden, um die daraus gewonnenen Meßergebnisse mit denen zu vergleichen, die in langjährigen Forschungsarbeiten im Braunschweiger Siloversuchsstand mit kohäsionslosem Material gewonnen wurden.

Literatur

- /1/ Eibl, J. Zur Frage des Silodrucks
Häußler, H. Beton- und Stahlbetonbau 4 (1982) 104 - 110
Landahl, U.
- /2/ Höhne, D. Fließverhalten feinkörniger Schüttungen
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie
Leipzig 1984
- /3/ Jenike, A. Storage and Flow of Solids
Bulletin No. 123 of the Engineering
Experiment Station, University of Utah,
Salt Lake City, Utah, 1964
- /4/ Jenike, A. Gravity Flow of Bulk Solids
Bulletin No. 108 of the Engineering
Experiment Station, University of Utah,
Salt Lake City, Utah, 1961
- /5/ Molerus, O. Theory of Yield of Cohesive Powders
Powder Technology, 12 (1975) 259 - 275
- /6/ Molerus, O. Effect of Interparticle Cohesive Forces on
the Flow Behaviour of Powders
Powder Technology, 20 (1978) 161 - 175
- /7/ Molerus, O. Das Verhalten Kohäsiver Schüttgüter
Powder Technology, 28 (1981) 135 -145
- /8/ Molerus, O. Auslegung von Schüttgutbunkern mittels
Schöneborn, P. Zentrifugenversuchen
Verfahrenstechnik 11 (1977) 232 - 236

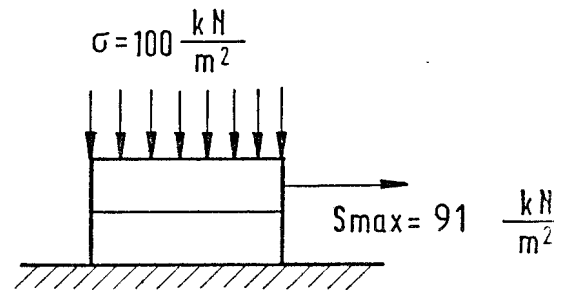
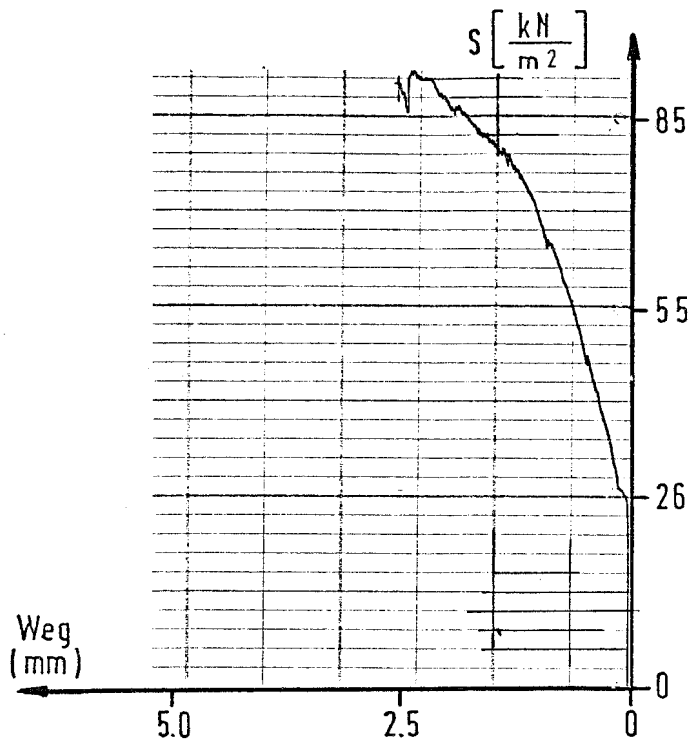
- /9/ Ogniwek, D. Die innere Reibung von Schüttgütern - Untersuchungen von Materialeigenschaften verschiedener Silo - Lagerstoffe - VDI-Verlag, Düsseldorf 1979
- /10/ Pietsch, W. Haftkraft, Kapillardruck, Flüssigkeitsvolumen
Rumpf, H. und Grenzwinkel einer Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei Kugeln
Chemie-Ing.-Technik 39 (1967) 885 - 893
- /11/ Rumpf, H. Grundlagen und Methoden des Granulierens
Chemie-Ing.-Technik 30 (1958) 144 - 158
- /12/ Rumpf, H. Mechanismen der Haftkraftverstärkung bei
Sommer, K. Partikelhaftung durch plastisches Verformen,
Steier, K. Sintern und viskoelastisches Fließen
Chemie-Ing.-Technik 48 (1976) 300 - 307
- /13/ Rumpf, H. Eigenschaften Bindungsmechanismen und Festigkeit von Agglomeraten
Herrmann, W. Aufbereitungs-Technik 3 (1970) 117-127
- /14/ Rumpf, H. Die Wissenschaft des Agglomerierens
Chemie-Ingenieur-Technik 1 (1974) 1-11
- /15/ Schubert, H. Modellierung der Festigkeit und des Fließverhaltens von feuchten und leichtlöslichen Schüttgütern
Tomas, J. Aufbereitungstechnik 9 (1982) 507 - 515
- /16/ Schütz, M. Erörterungen zur Frage der Berechnung von Silolasten mit Werten aus Messungen am Modellsilo und aus Scherversuchen
Dissertation 1981, TU Braunschweig

- /17/ Schütz, W. Der Einfluß von Anpreßkräften auf die
 Schubert, H. Partikelhaftung
 Chemie-Ing.-Technik 48 (1976) 567
- /18/ Schwedes, J. Scherverhalten leicht verdichteter kohäsiver
 Schüttgüter
 Dissertation 1971, TH Karlsruhe
- /19/ Schwedes, J. Fließverhalten von Schüttgütern in Bunkern
 Verlag Chemie, Weingarten 1968
- /20/ Schwedes, J. Lagern und Fließen von Schüttgütern,
 Hochschulkurs in Brauchweig, März 1984
- /21/ Wagner, K. Probleme des Silodruckes
 Dissertation 1971, TU Braunschweig
- /22/ DIN 1055, Teil 6 Lasten in Silozellen
 Ausgabe November 1964 und Ergänzende
 Bestimmungen vom Mai 1977
- /23/ Entwurf DIN 1055 Lasten in Silozellen
 T 6 und Beiblatt Stand Februar 1983

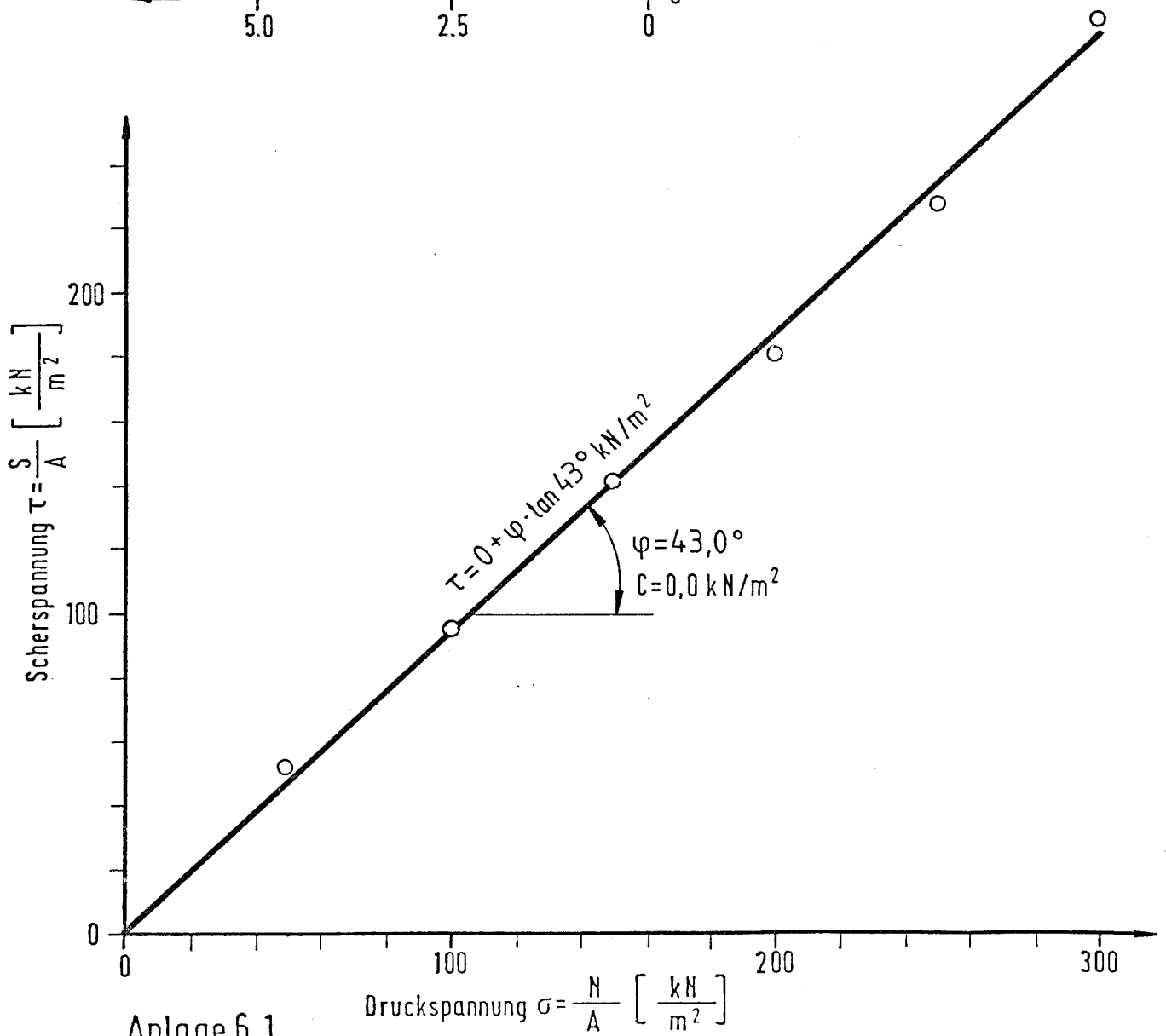
A n l a g e n

- a) Ergebnisse der Scherversuche aus den Untersuchungen
Anlage 6.1 bis 6.16 (16 Blatt)

- b) Ergebnisse der Scherversuche aus den Hauptuntersuchungen
Anlage 7.1 bis 7.11 (30 Blatt)



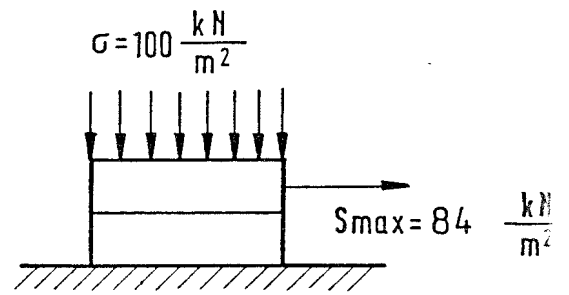
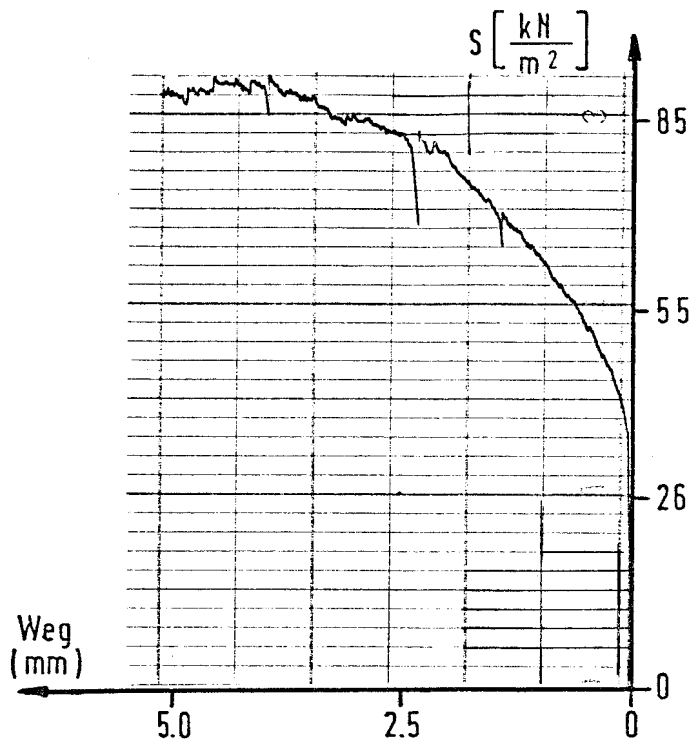
Charakteristischer Verlauf
eines Scherspannungs-
Scherweg-Diagrammes



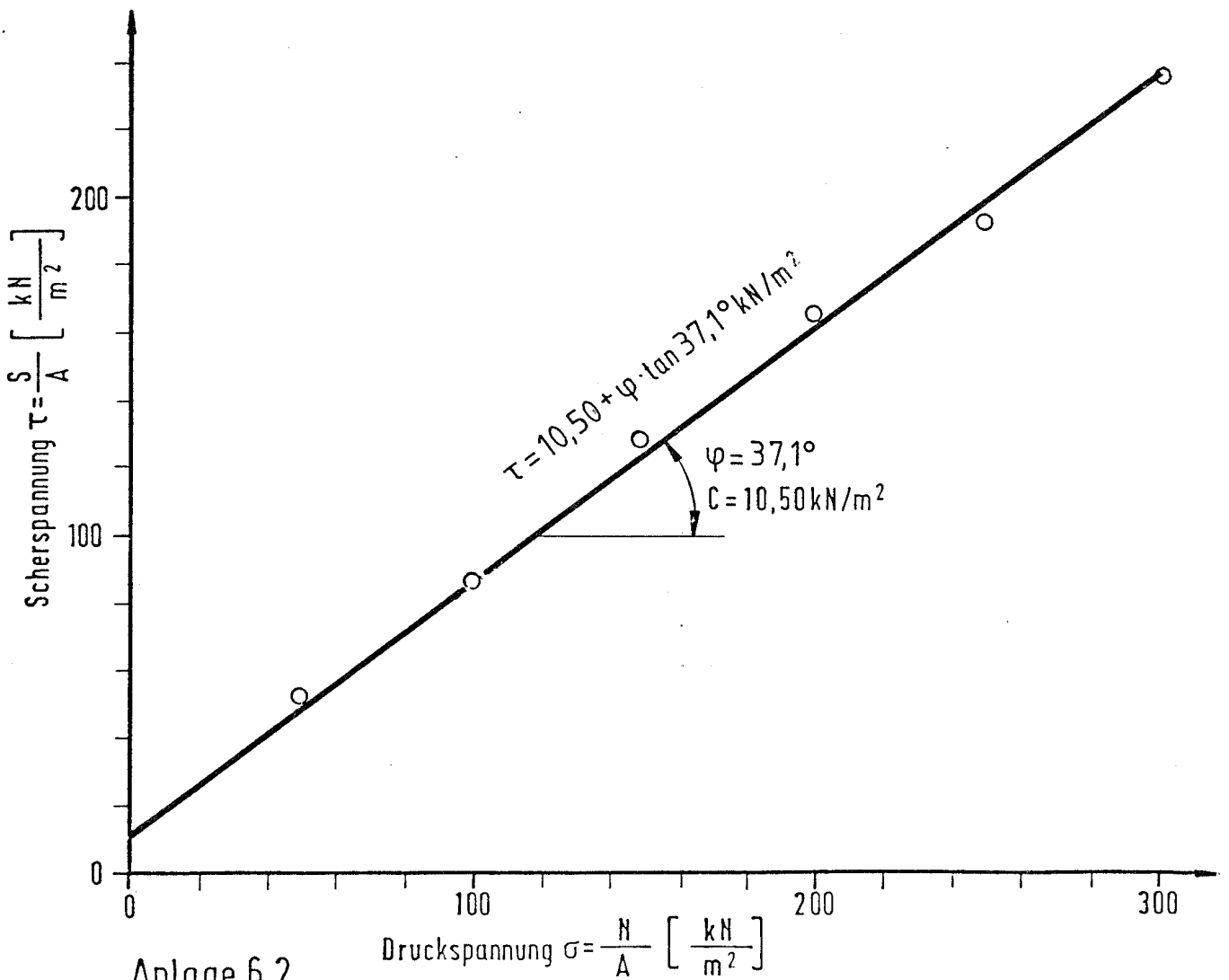
Anlage 6.1

Ergebnisse der Scherversuche

(10 kg Quarzsand 3-5mm)



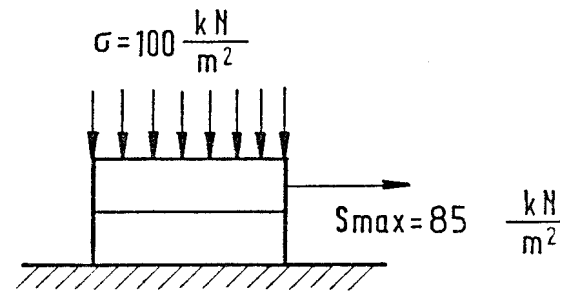
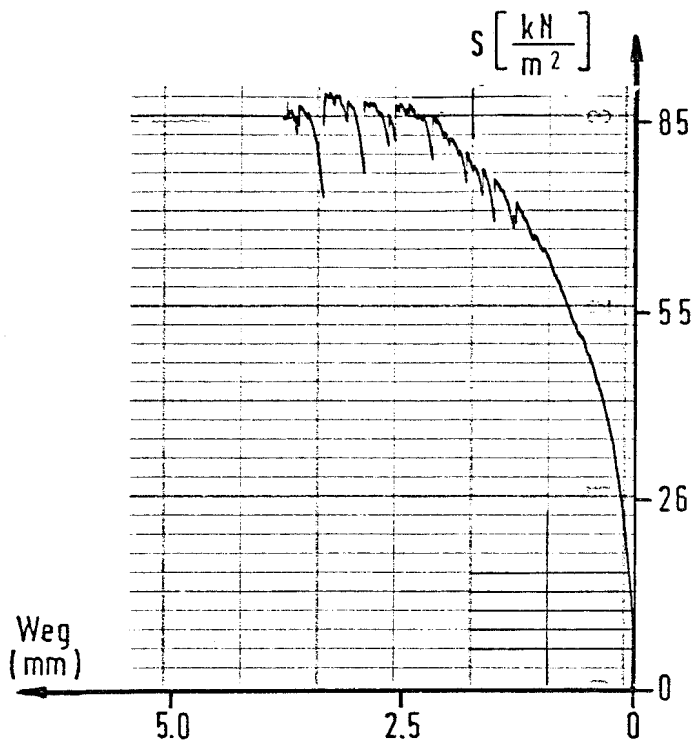
Charakteristischer Verlauf
eines Scherspannungs-
Scherweg-Diagrammes



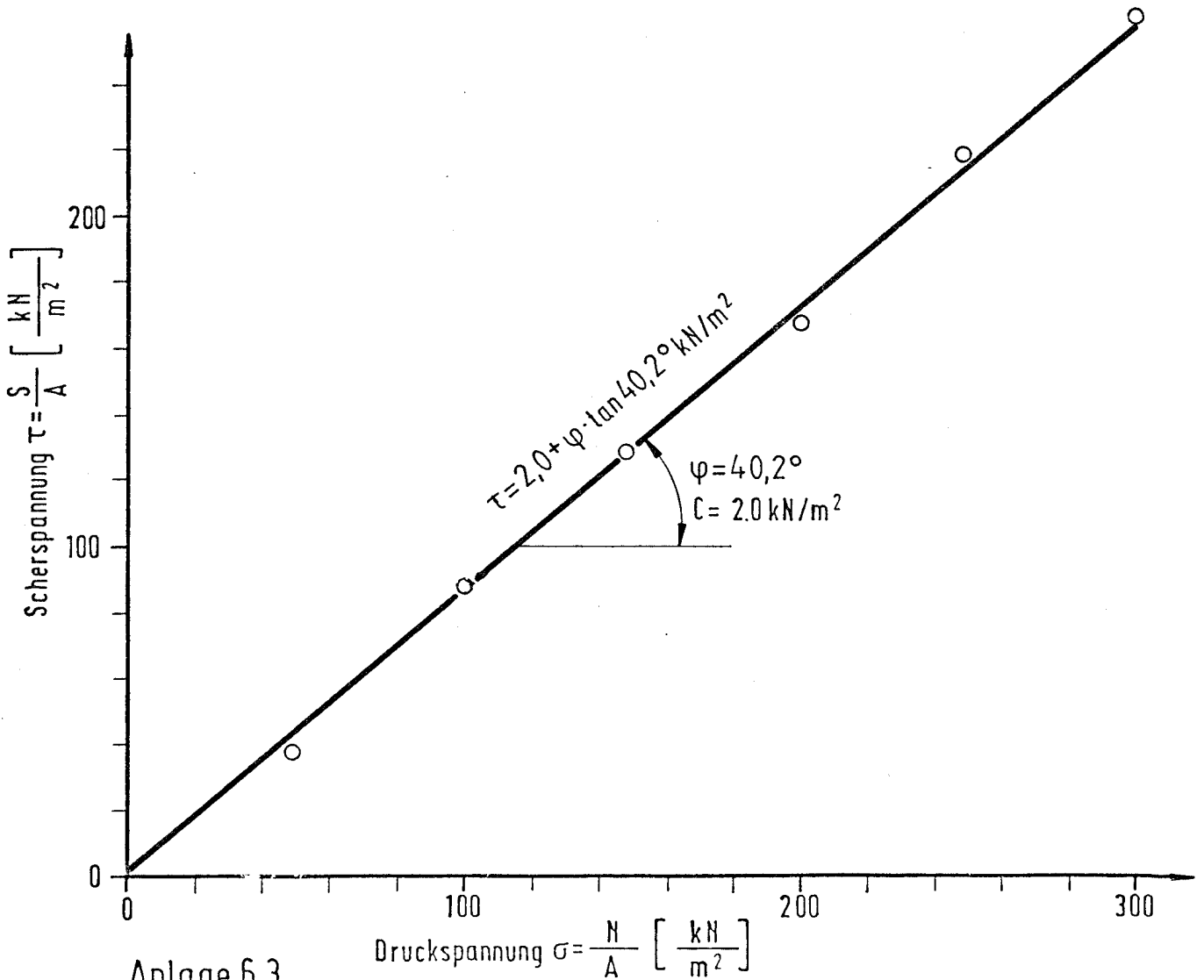
Anlage 6.2

Ergebnisse der Scherversuche

(10 kg Quarzsand 3-5mm und 0,425l Wasser)



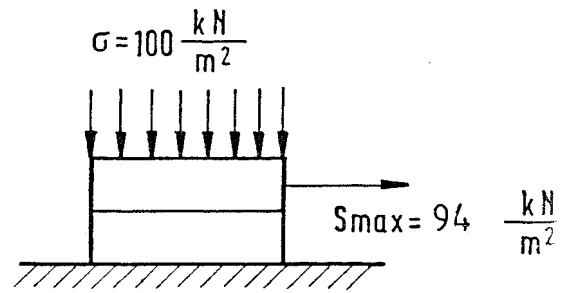
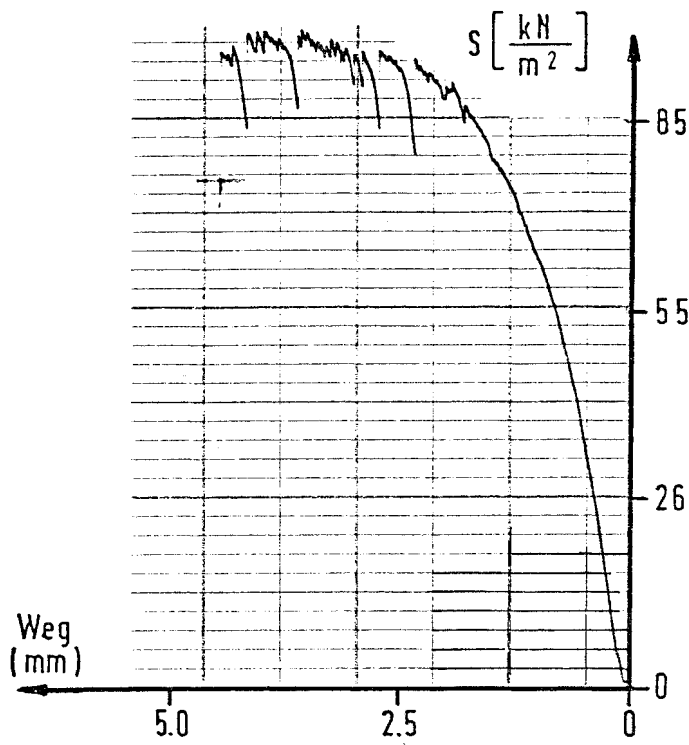
Charakteristischer Verlauf
eines Scherspannungs-
Scherweg-Diagrammes



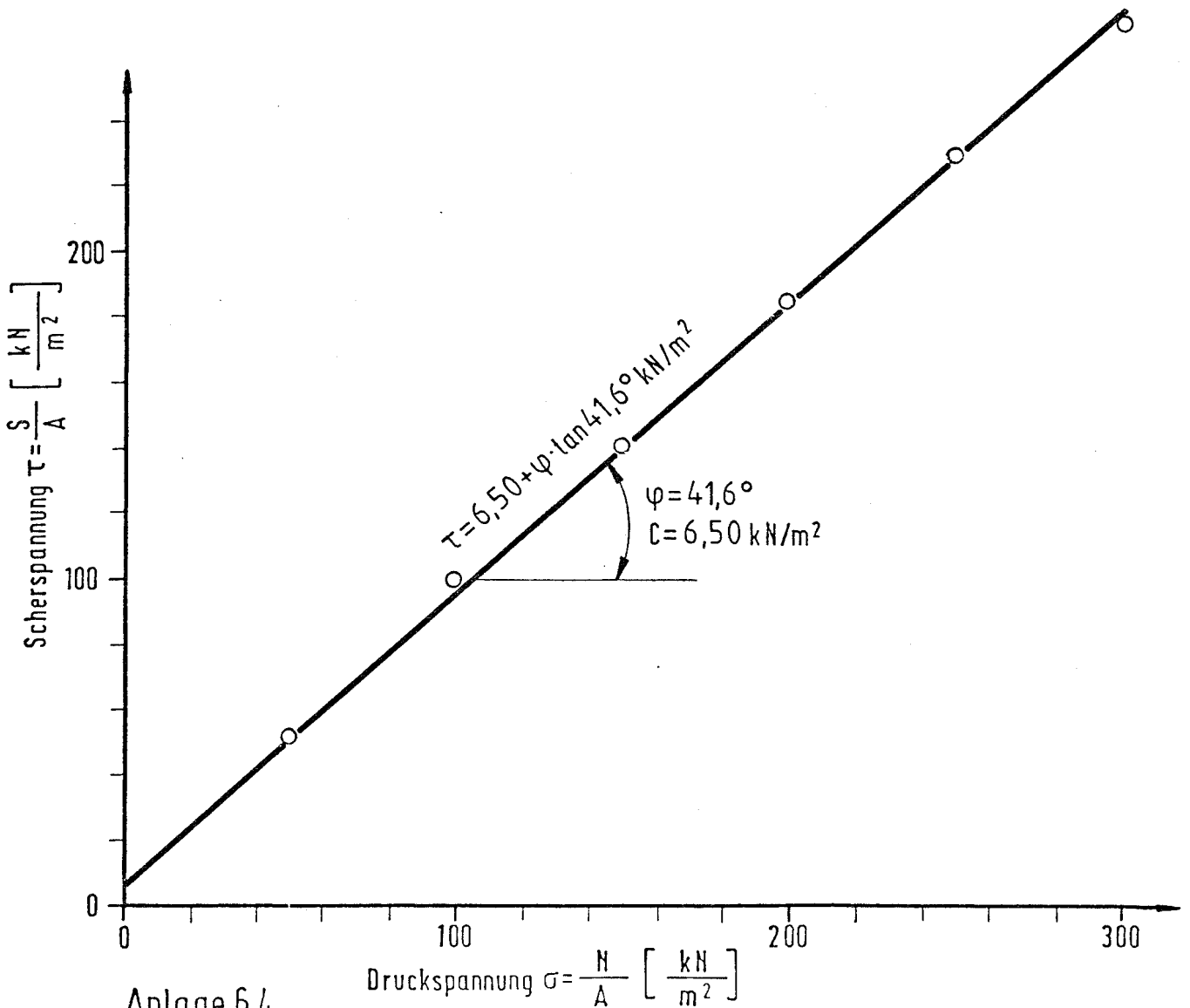
Anlage 6.3

Ergebnisse der Scherversuche

(10 kg Quarzsand 3-5mm und 200g Paraffinöl)



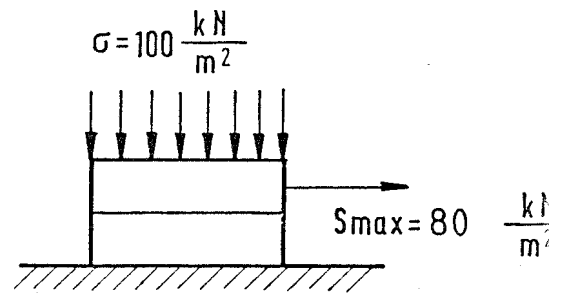
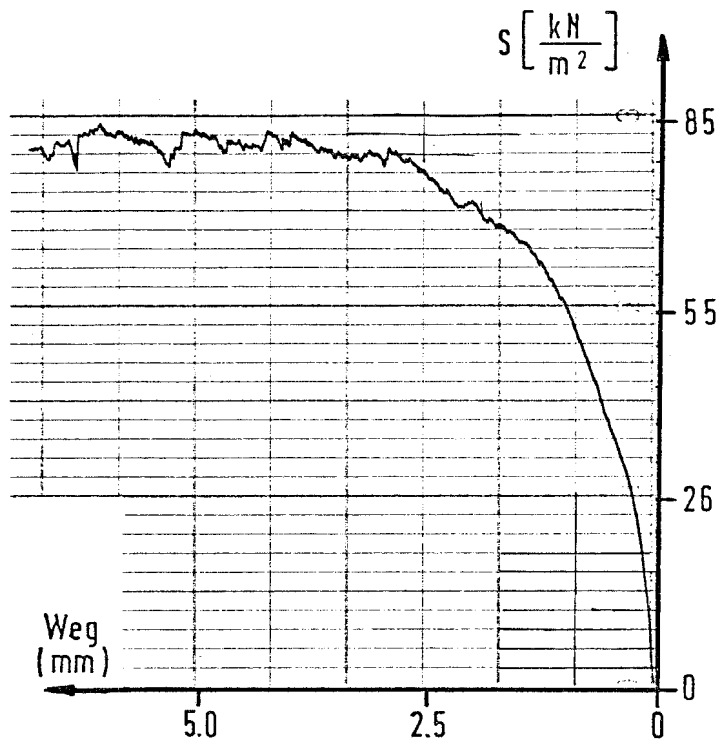
Charakteristischer Verlauf eines Scherspannungs-Scherweg-Diagrammes



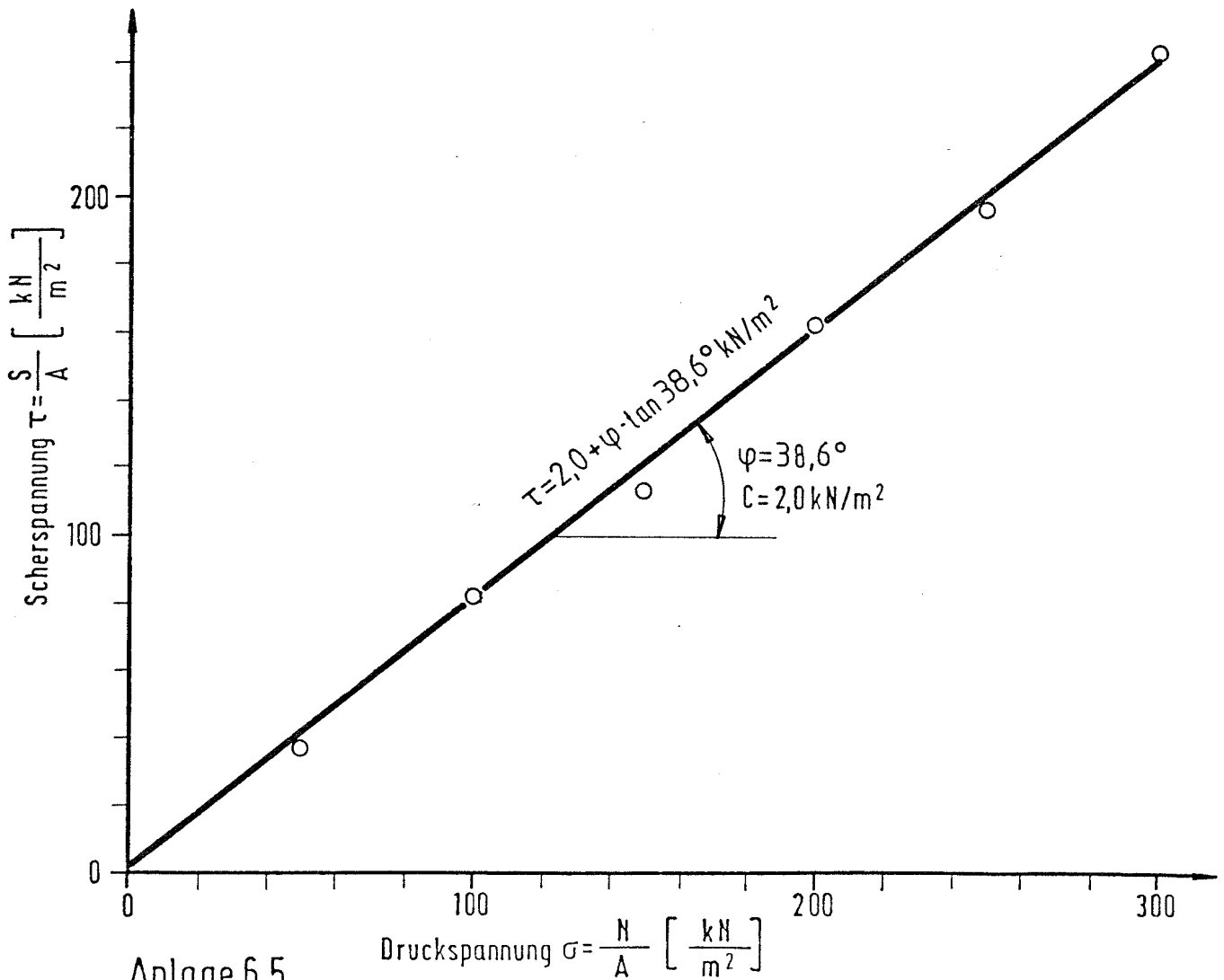
Anlage 6.4

Ergebnisse der Scherversuche

(10kg Quarzsand 3-5mm und 270g Paraffinöl)



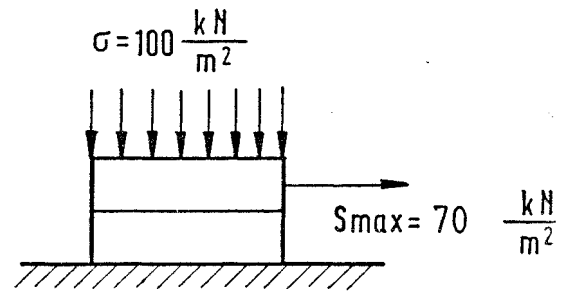
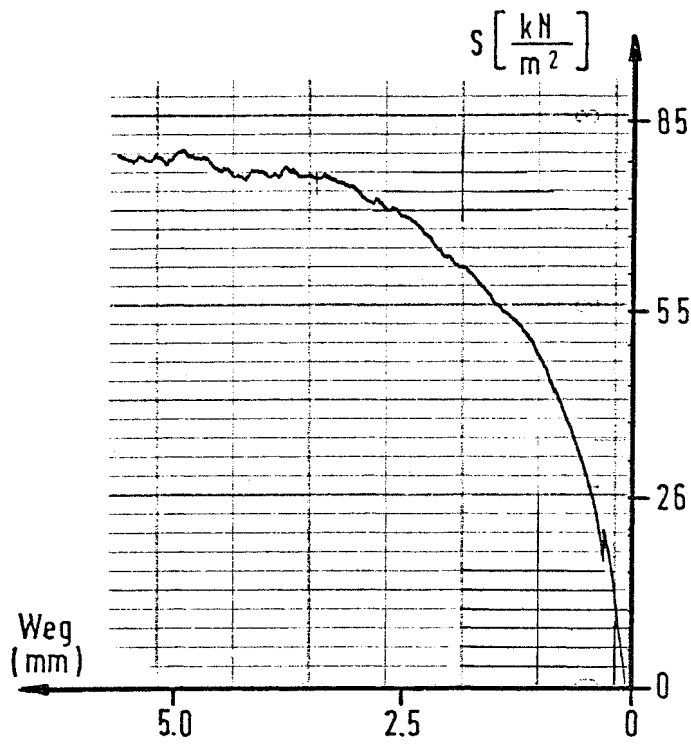
Charakteristischer Verlauf eines Scherspannungs-Scherweg-Diagrammes



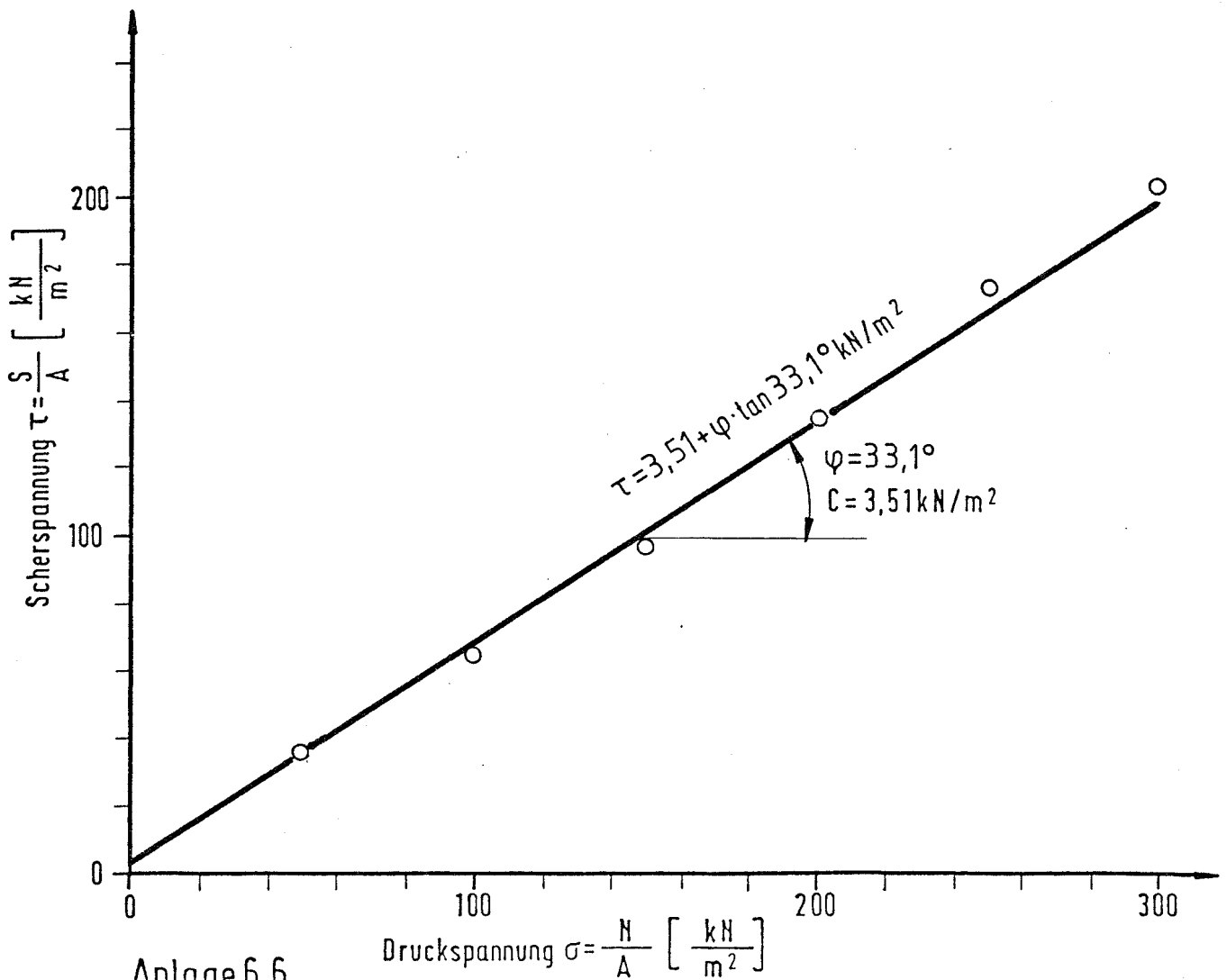
Anlage 6.5

Ergebnisse der Scherversuche

(10 kg Quarzsand 3-5mm und 250g Glycerin)



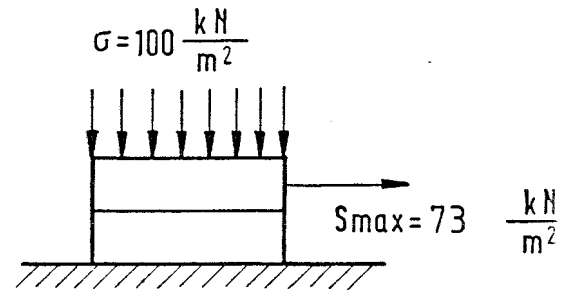
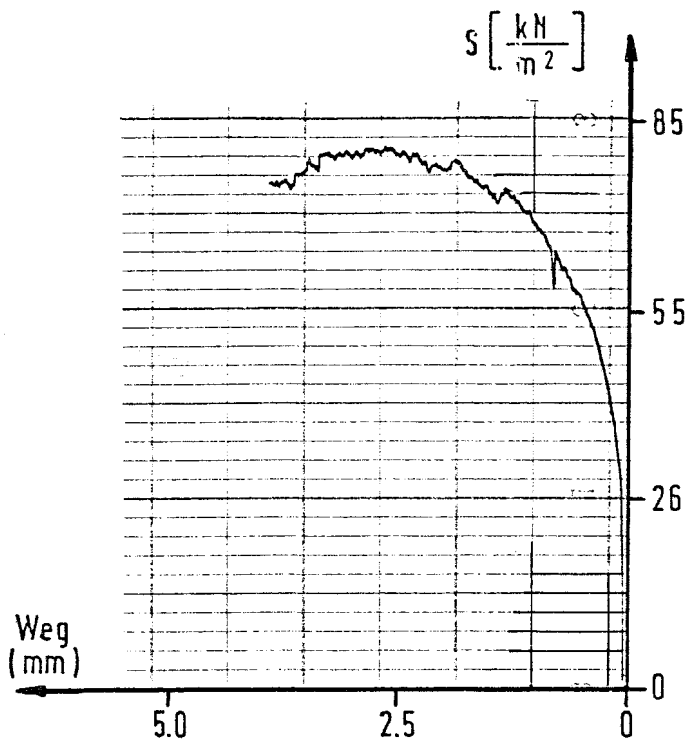
Charakteristischer Verlauf
eines Scherspannungs-
Scherweg-Diagrammes



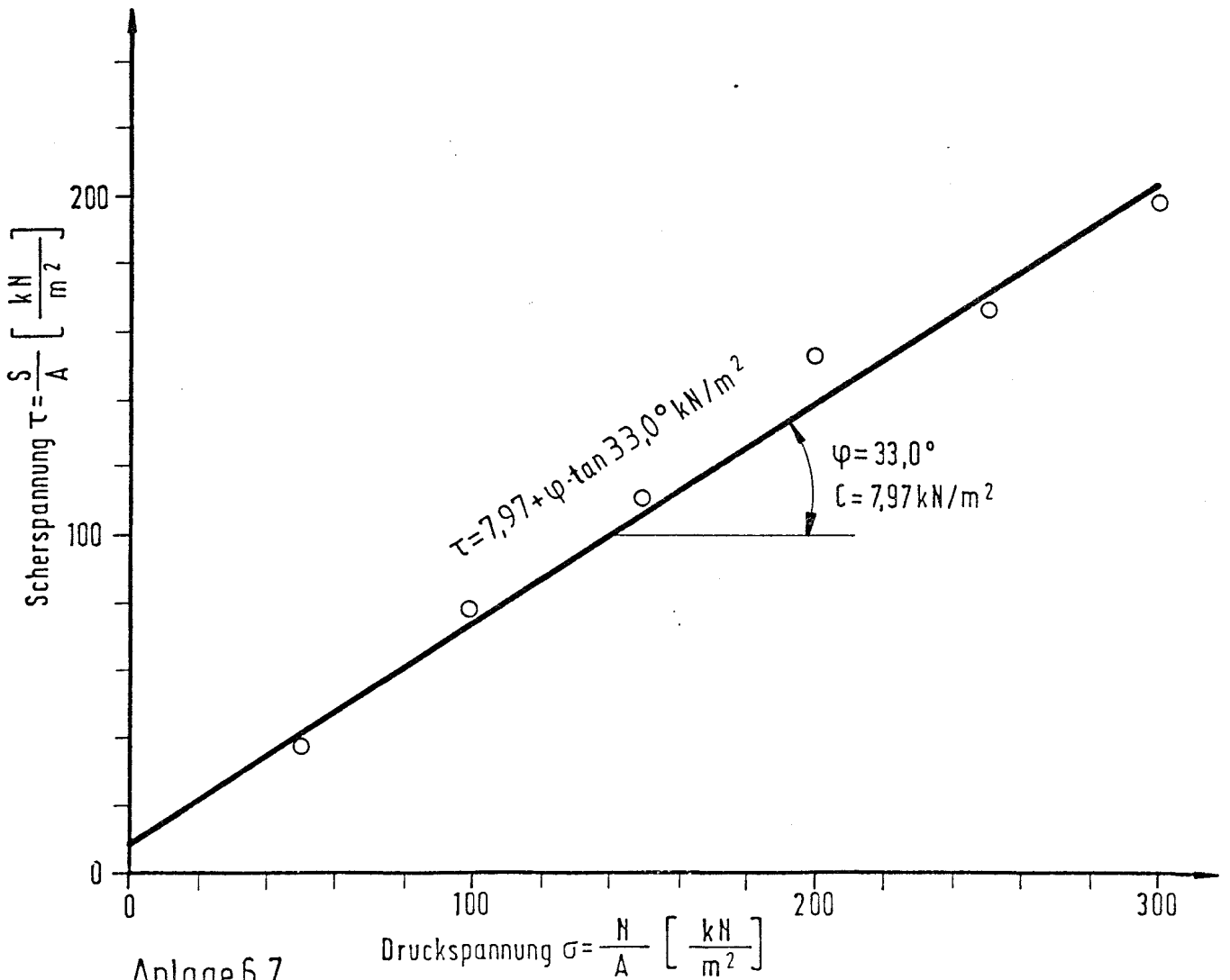
Anlage 6.6

Ergebnisse der Scherversuche

(10kg Quarzsand 3-5mm und 95g Rubol)



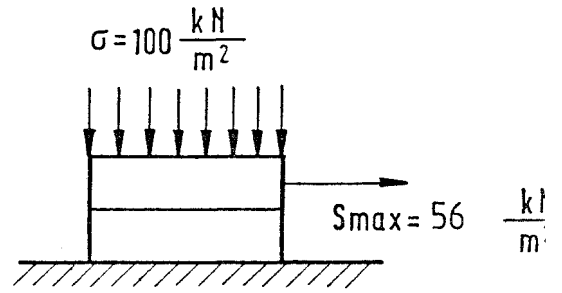
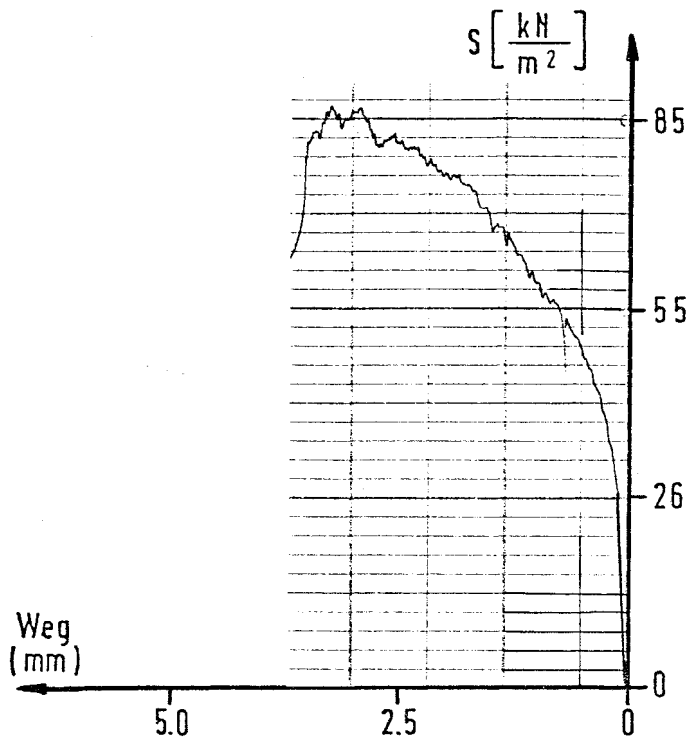
Charakteristischer Verlauf
eines Scherspannungs-
Scherweg-Diagrammes



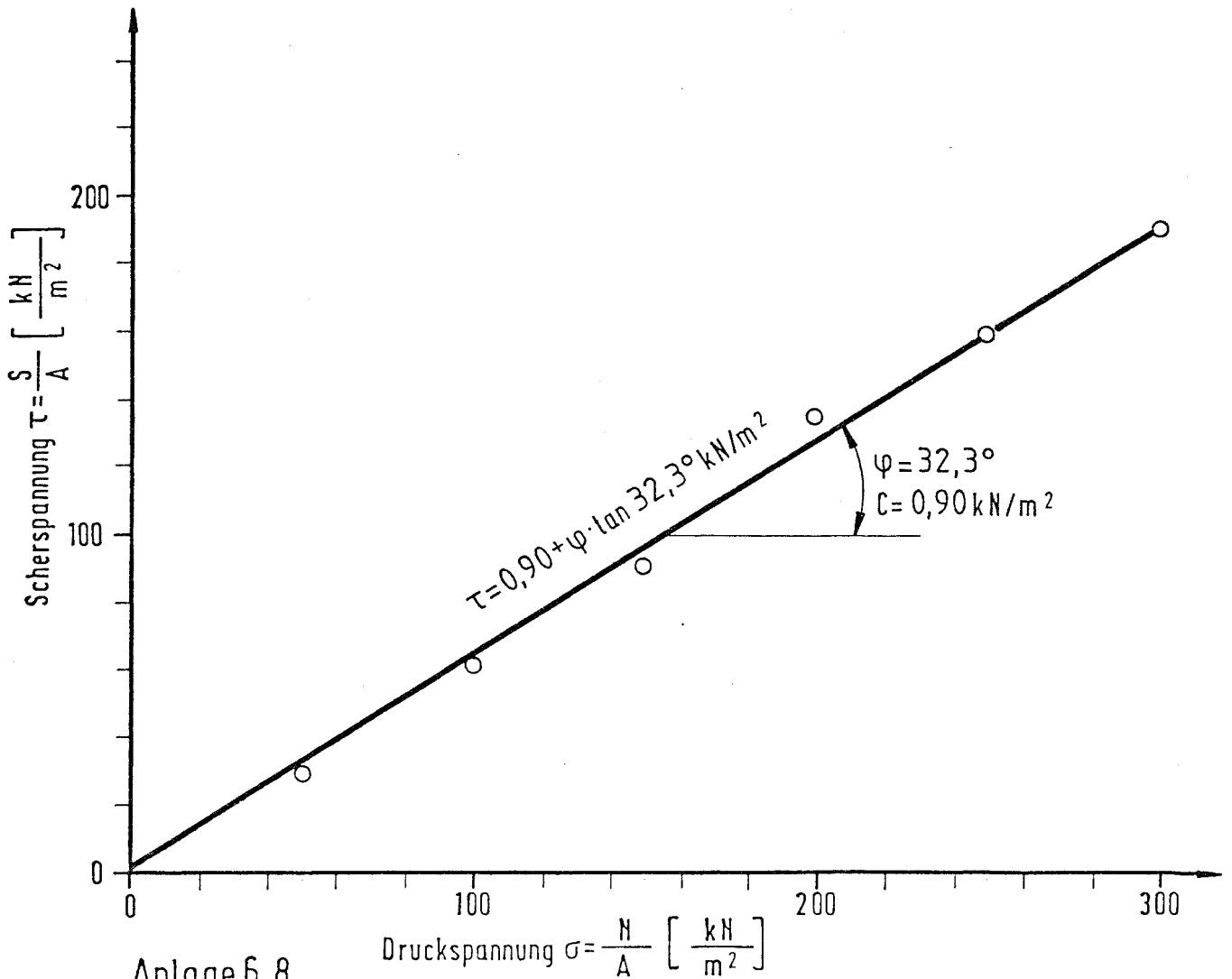
Anlage 6.7

Ergebnisse der Scherversuche

(10 kg Quarzsand 3-5mm und 150g Rubol)



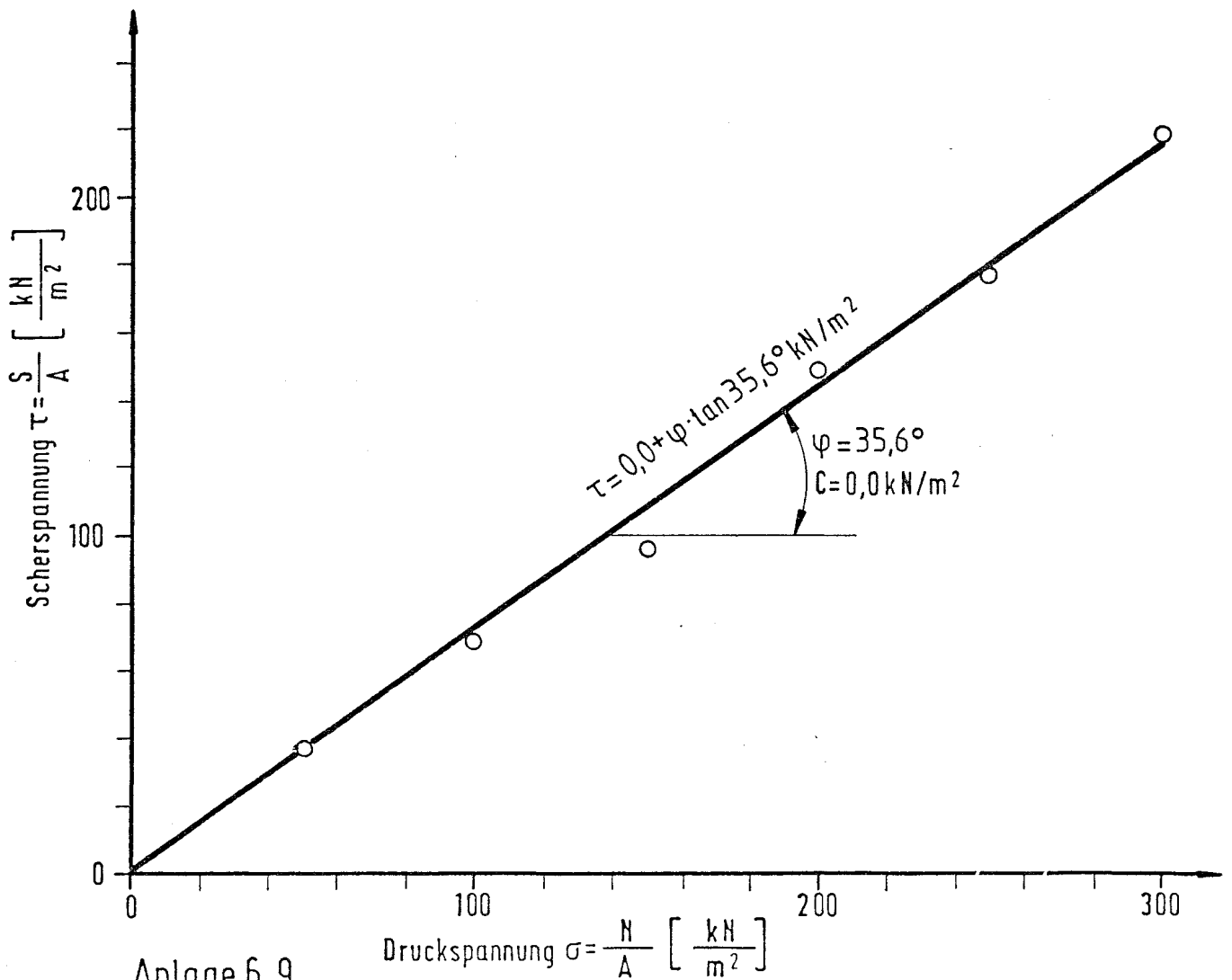
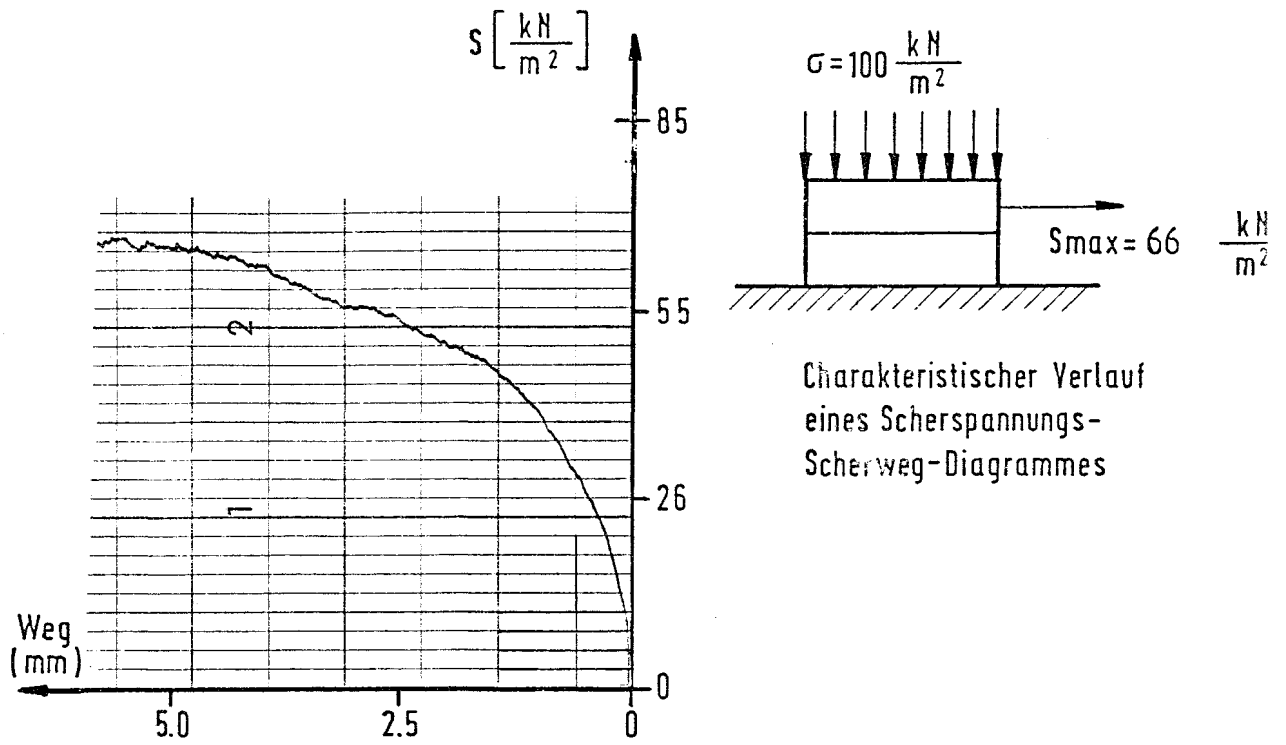
Charakteristischer Verlauf
eines Scherspannungs-
Scherweg-Diagrammes



Anlage 6.8

Ergebnisse der Scherversuche

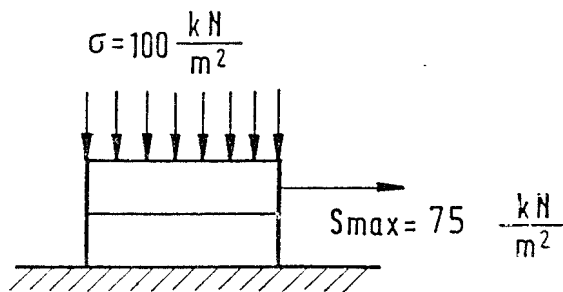
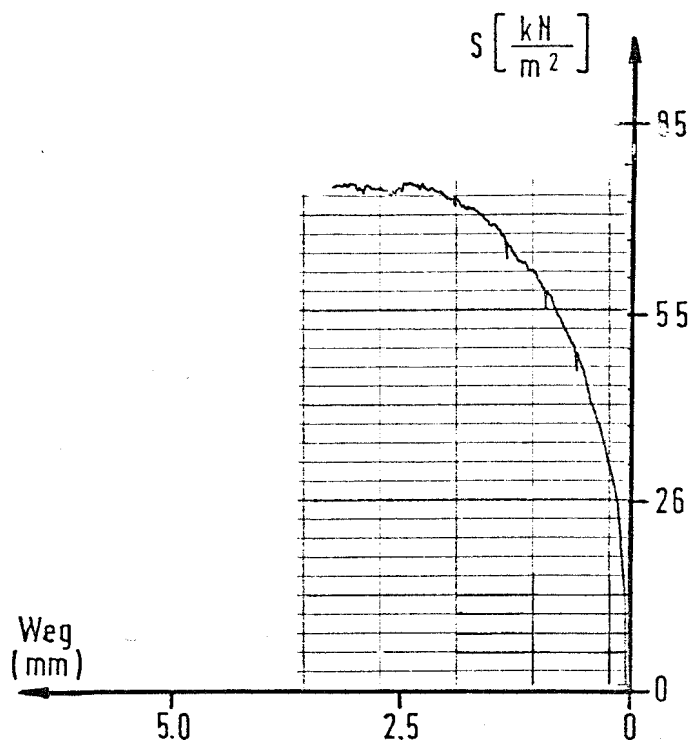
(10 kg Quarzsand 3-5mm und 120g Rubol)



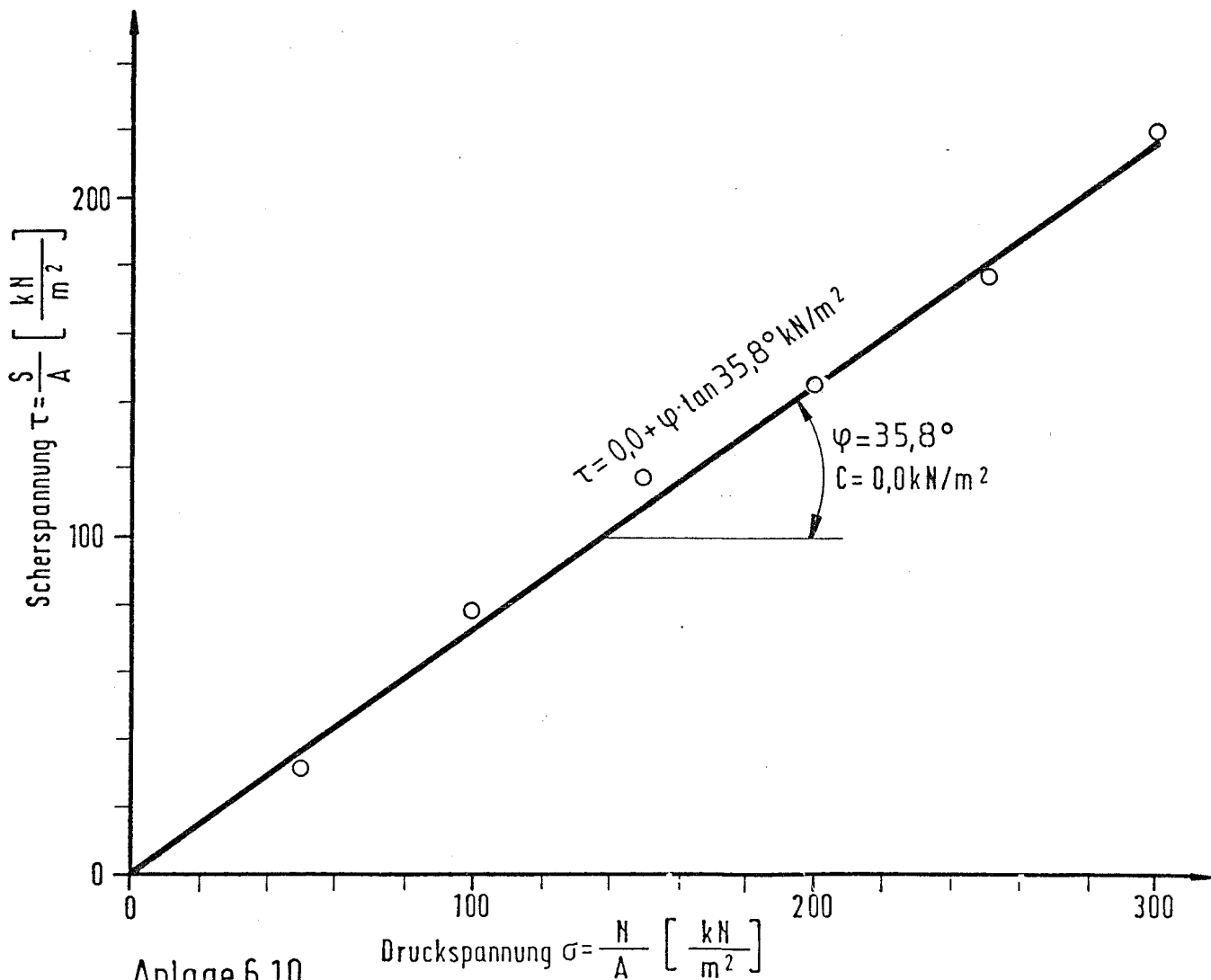
Anlage 6.9

Ergebnisse der Scherversuche

(10 kg Quarzsand 3-5mm und 67g Mehrzweckfett)



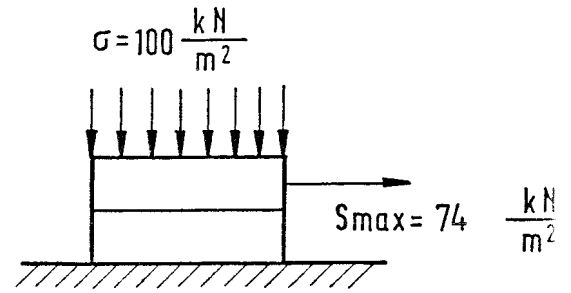
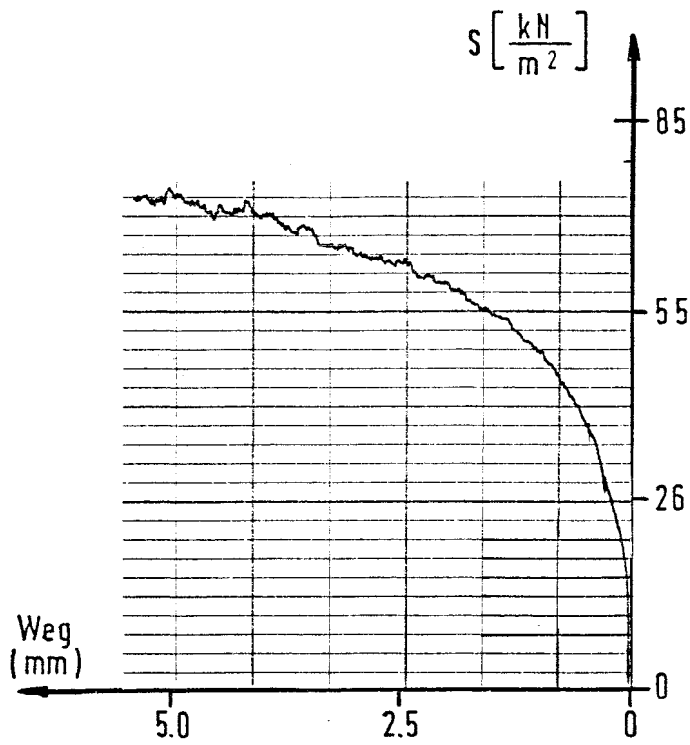
Charakteristischer Verlauf
eines Scherspannungs-
Scherweg-Diagrammes



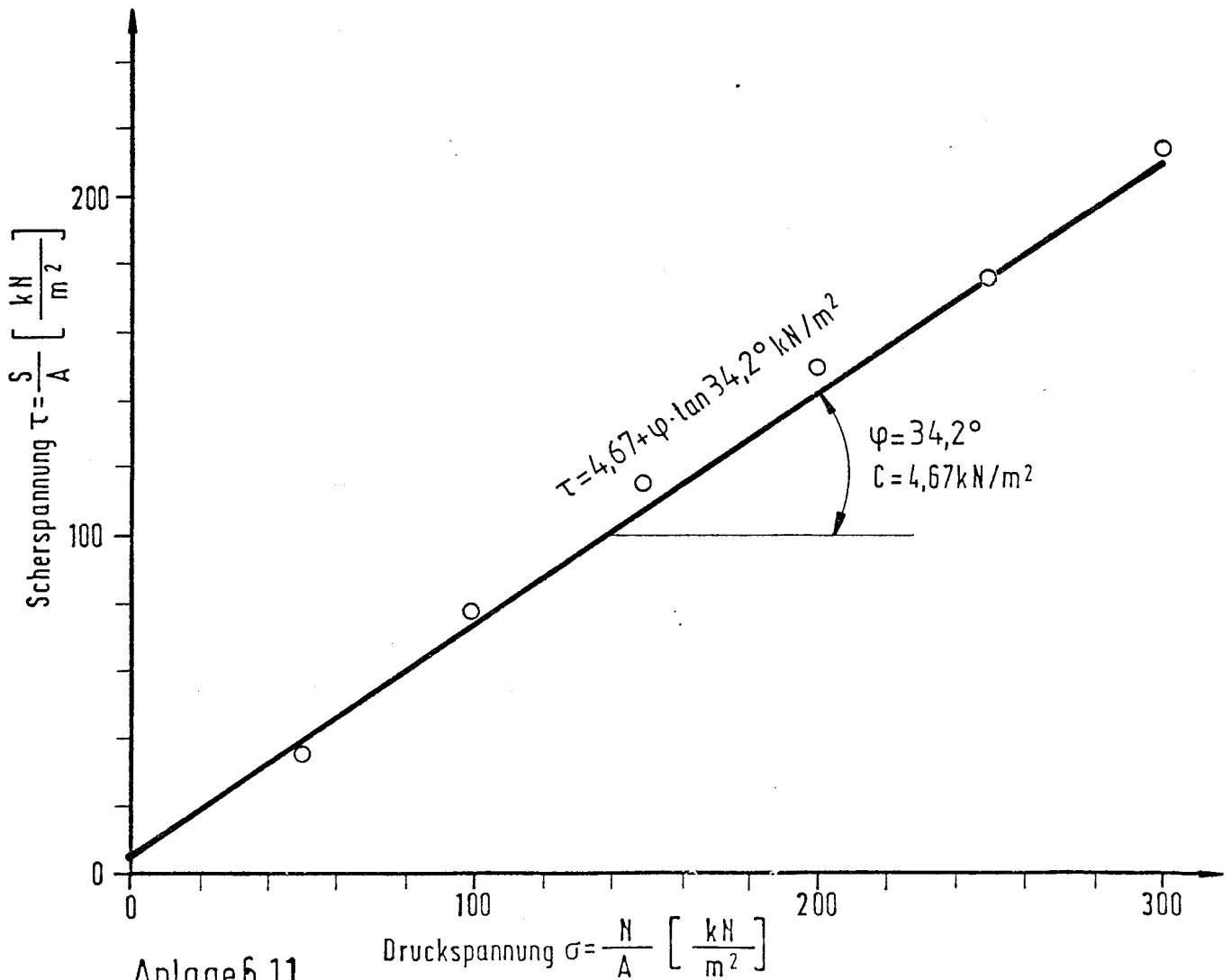
Anlage 6.10

Ergebnisse der Scherversuche

(10 kg Quarzsand 3-5mm und 100g Mehrzweckfett)



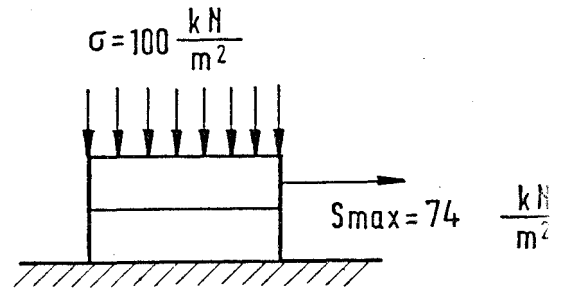
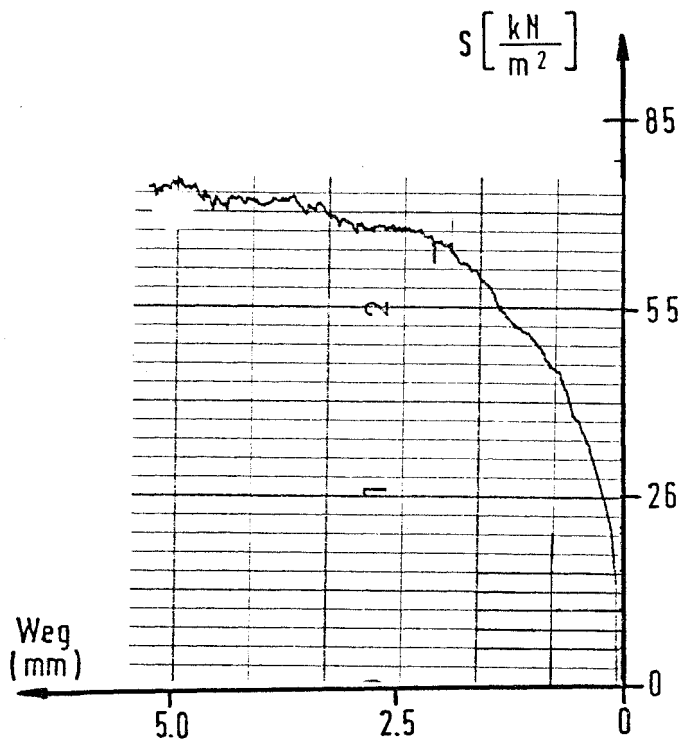
Charakteristischer Verlauf
eines Scherspannungs-
Scherweg-Diagrammes



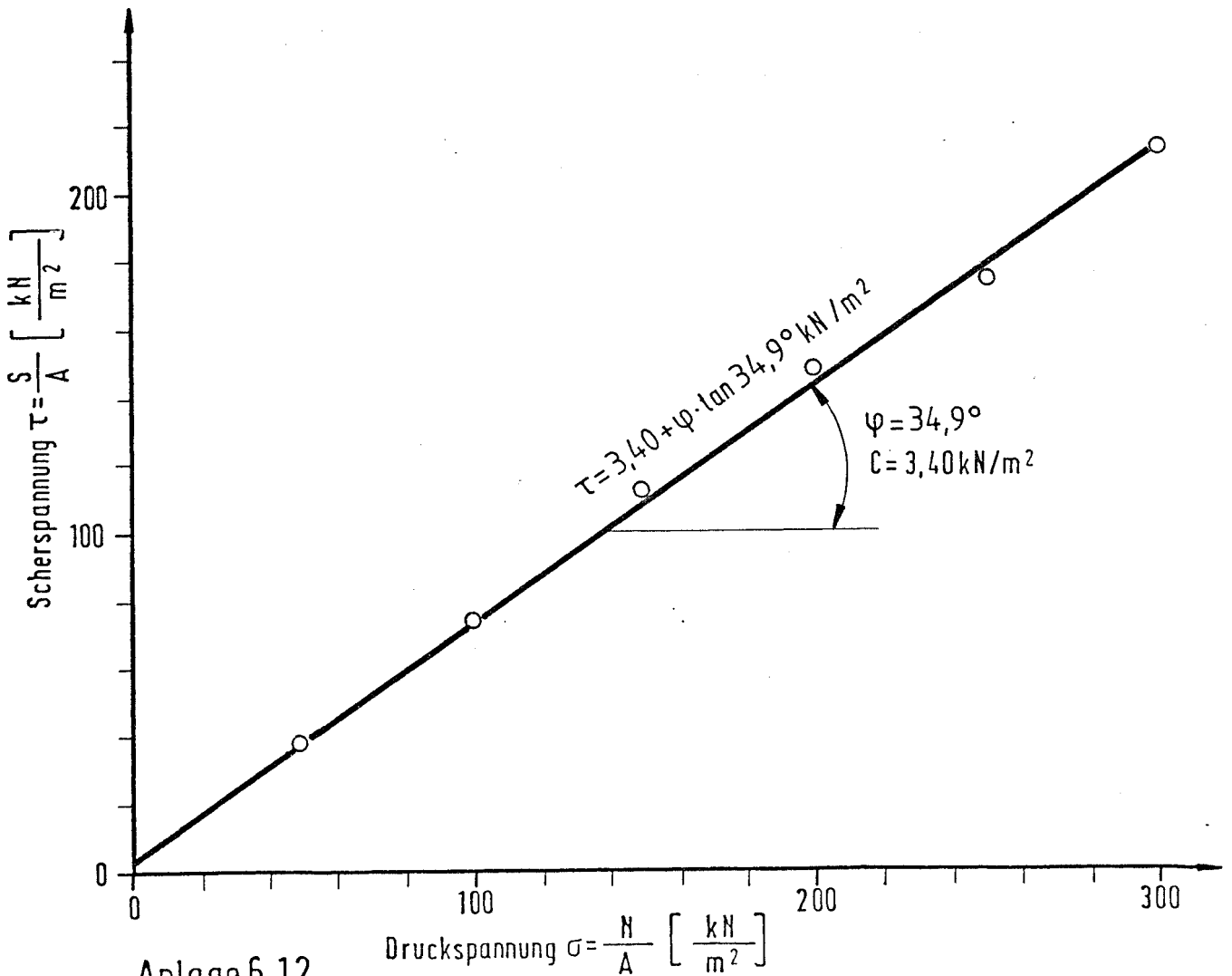
Anlage 6.11

Ergebnisse der Scherversuche

(10 kg Quarzsand 3-5mm und 167g Mehrzweckfett)



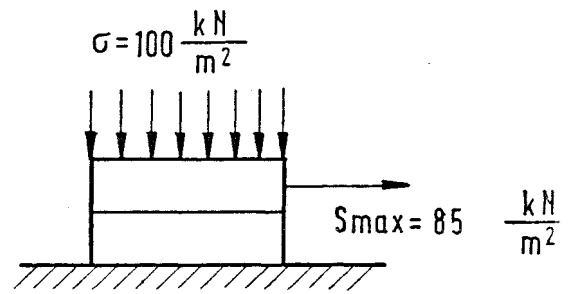
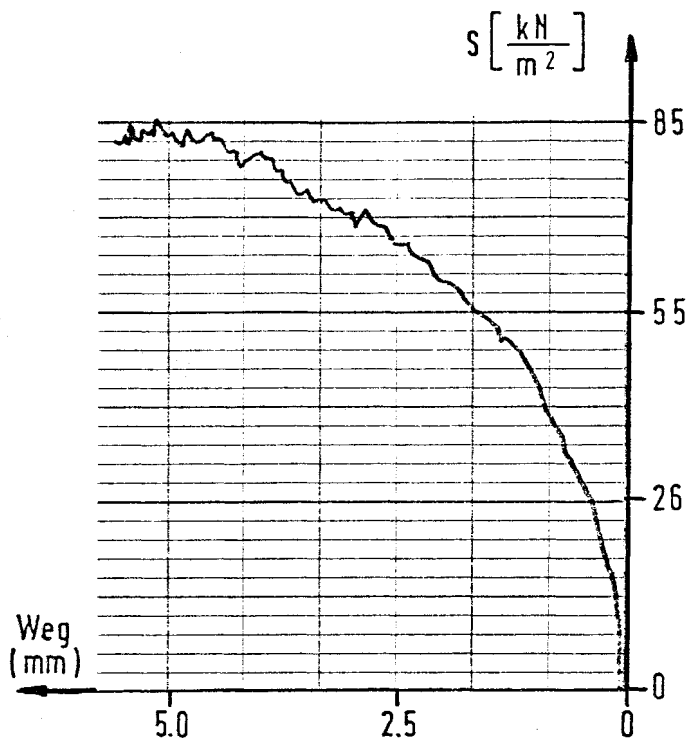
Charakteristischer Verlauf
eines Scherspannungs-
Scherweg-Diagrammes



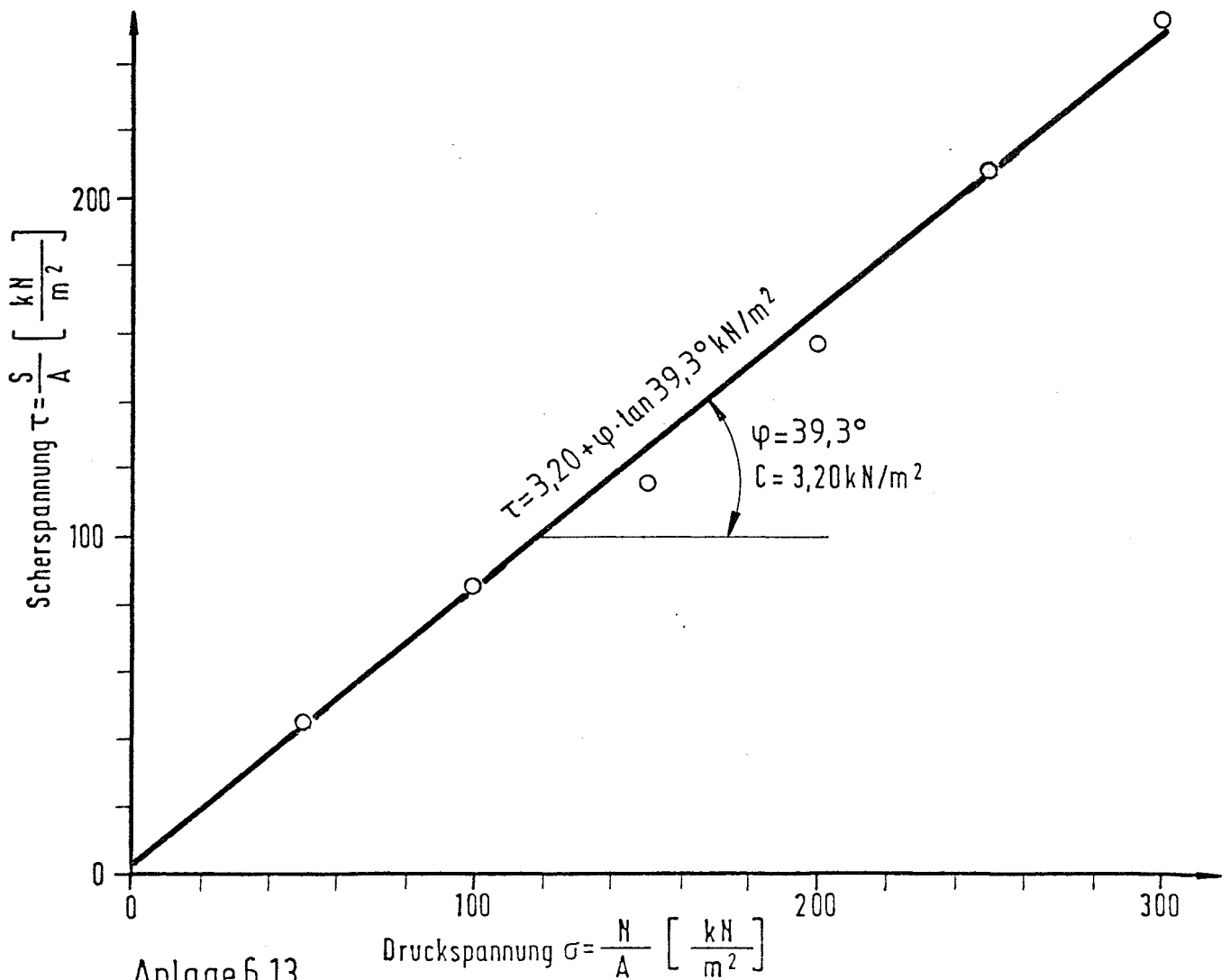
Anlage 6.12

Ergebnisse der Scherversuche

(10kg Quarzsand 3-5mm und 334g Mehrzweckfett)



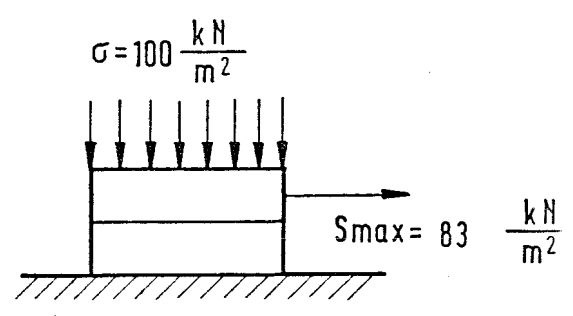
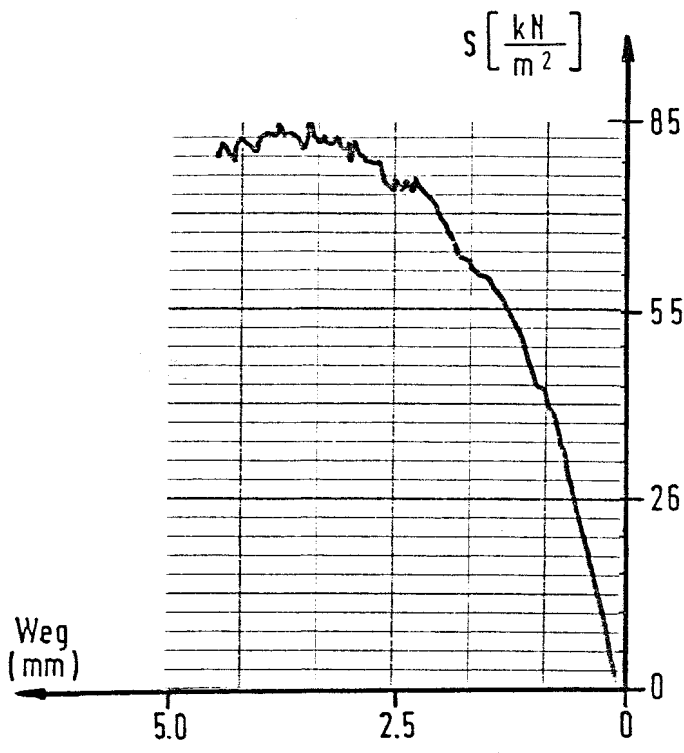
Charakteristischer Verlauf
eines Scherspannungs-
Scherweg-Diagrammes



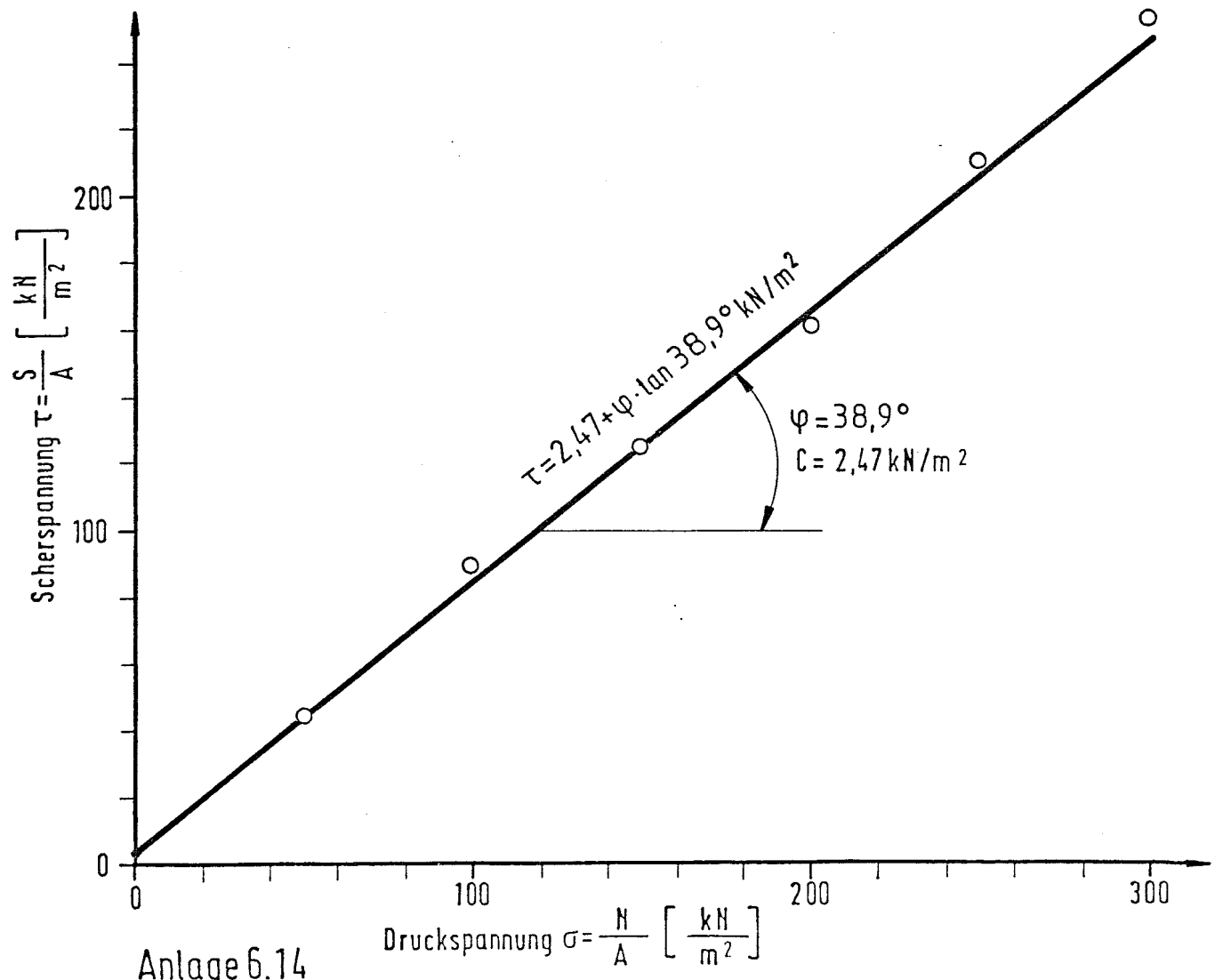
Anlage 6.13

Ergebnisse der Scherversuche

(10 kg Quarzsand 3-5mm und 25g Sägekettensaftöl)



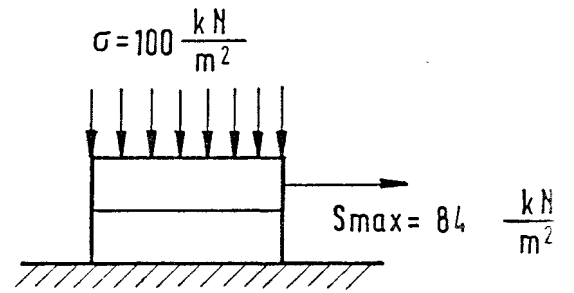
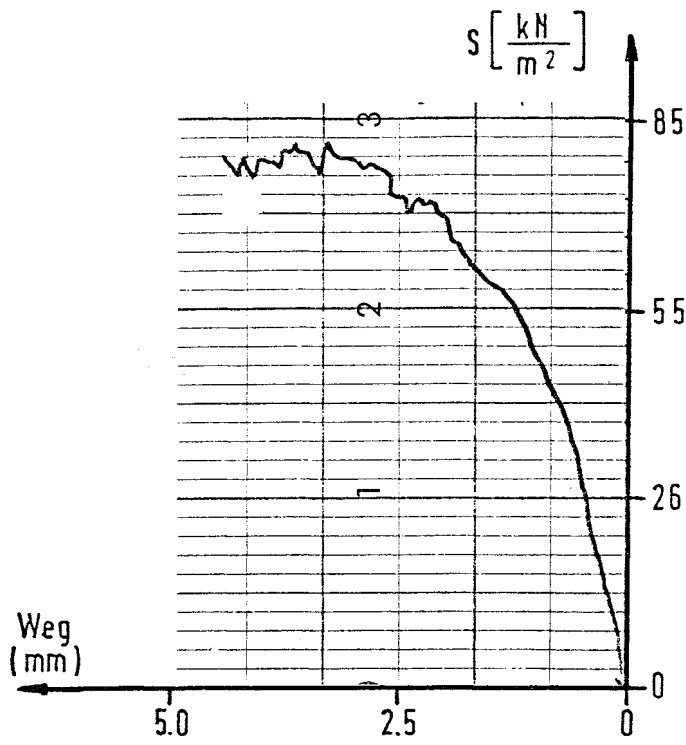
Charakteristischer Verlauf eines Scherspannungs-Scherweg-Diagrammes



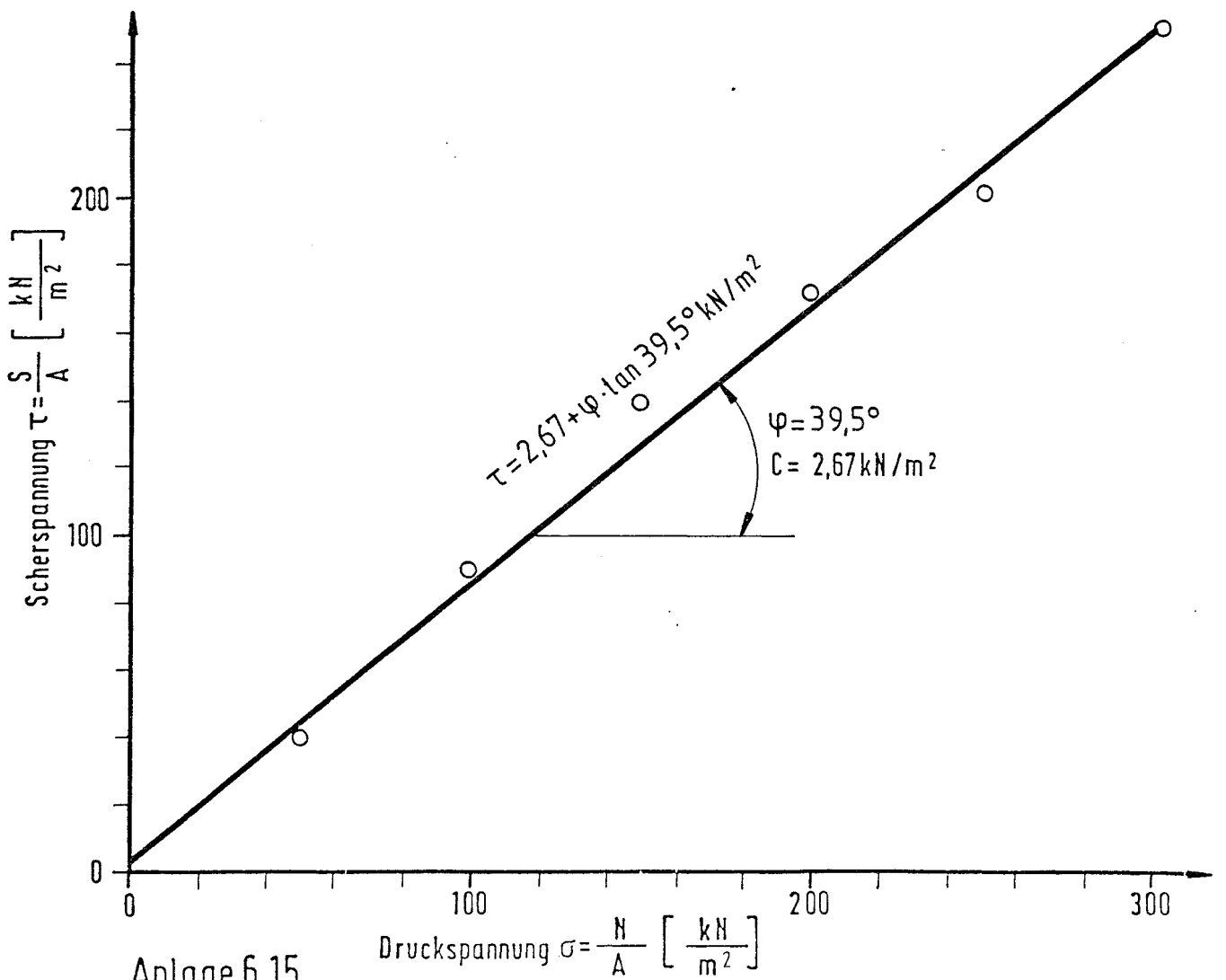
Anlage 6.14

Ergebnisse der Scherversuche

(10kg Quarzsand 3-5mm und 50g Sägekettentahlöl)



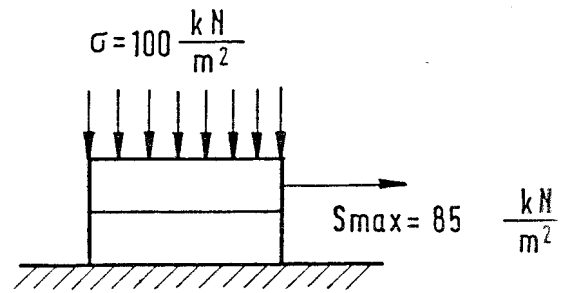
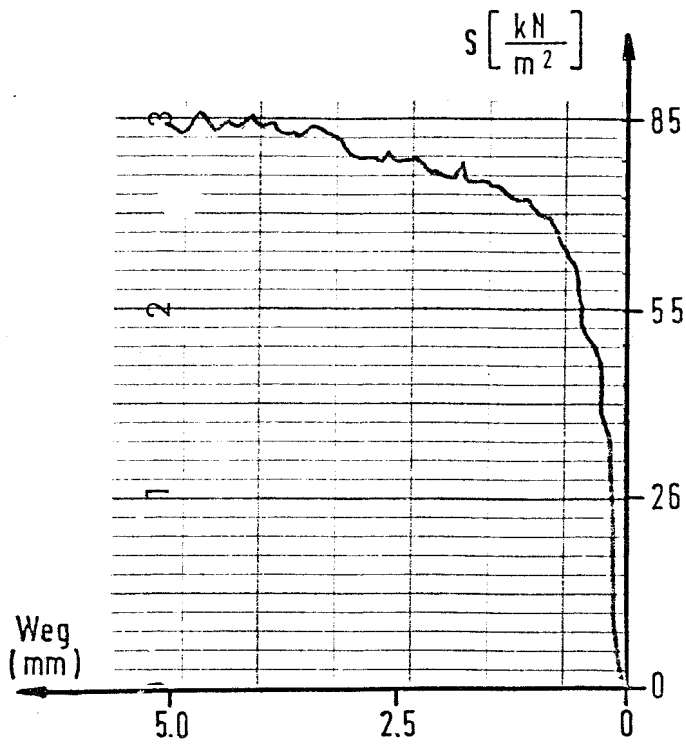
Charakteristischer Verlauf
eines Scherspannungs-
Scherweg-Diagrammes



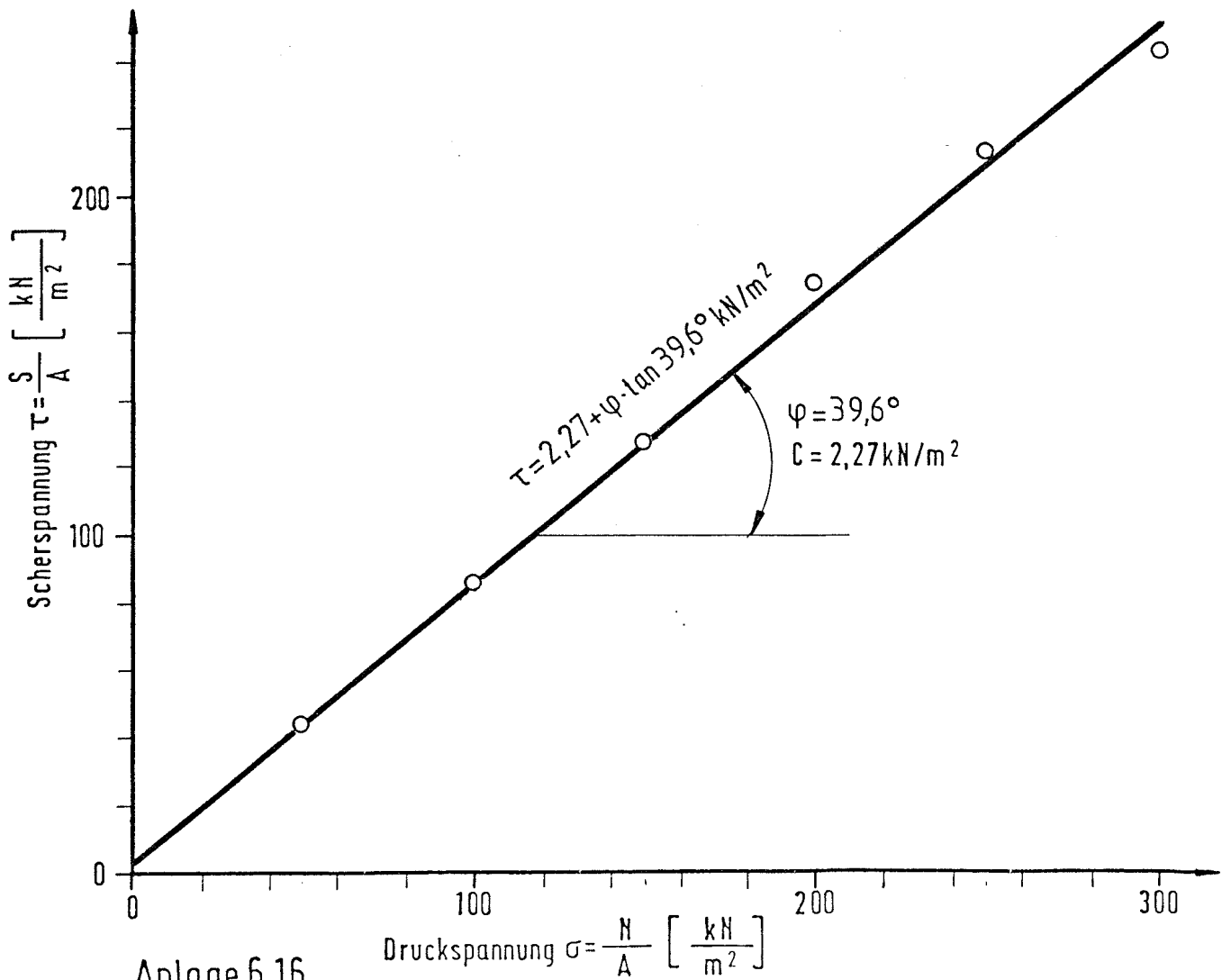
Anlage 6.15

Ergebnisse der Scherversuche

(10kg Quarzsand 3-5mm und 100g Sägekettensaftöl)



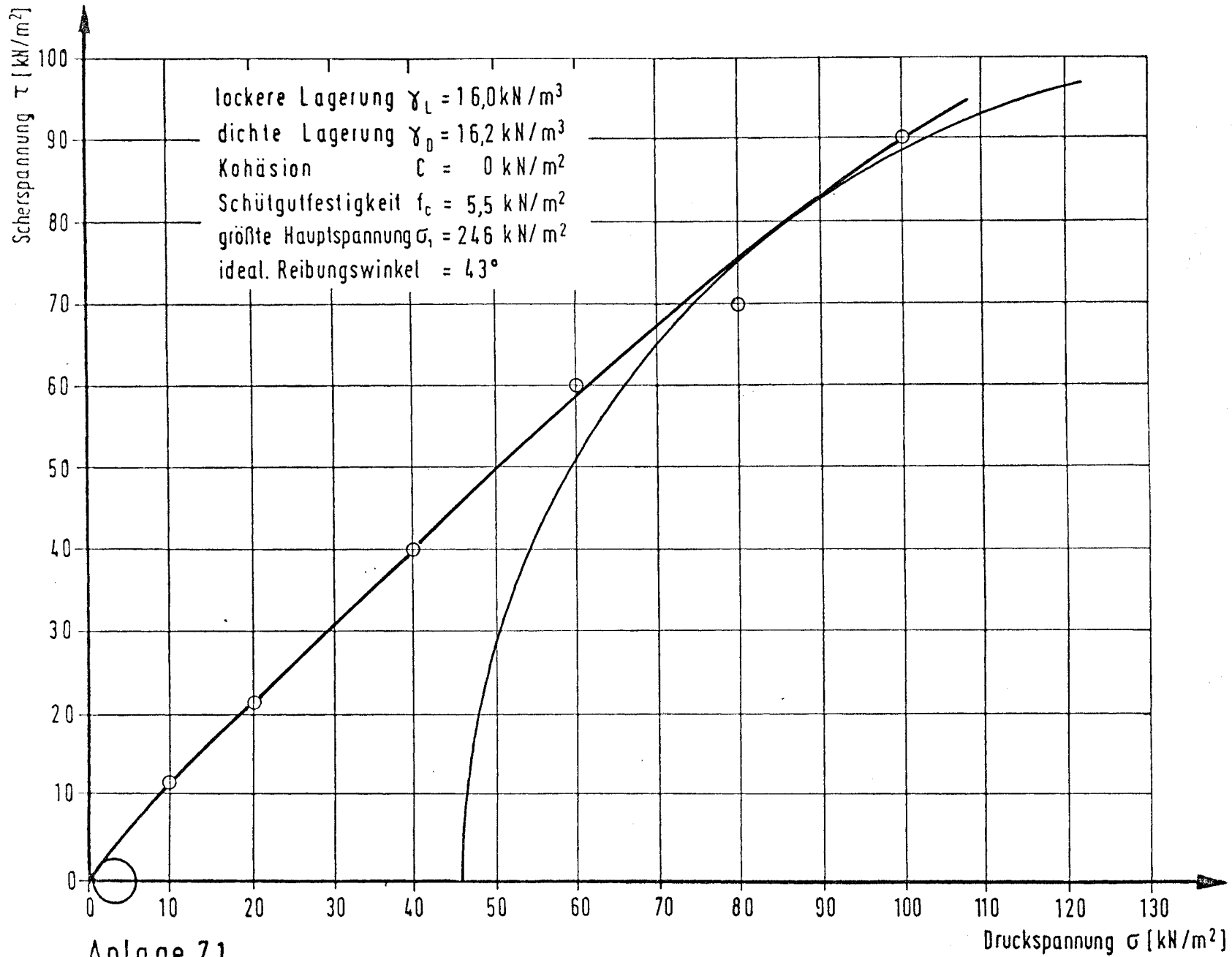
Charakteristischer Verlauf
eines Scherspannungs-
Scherweg-Diagrammes



Anlage 6.16

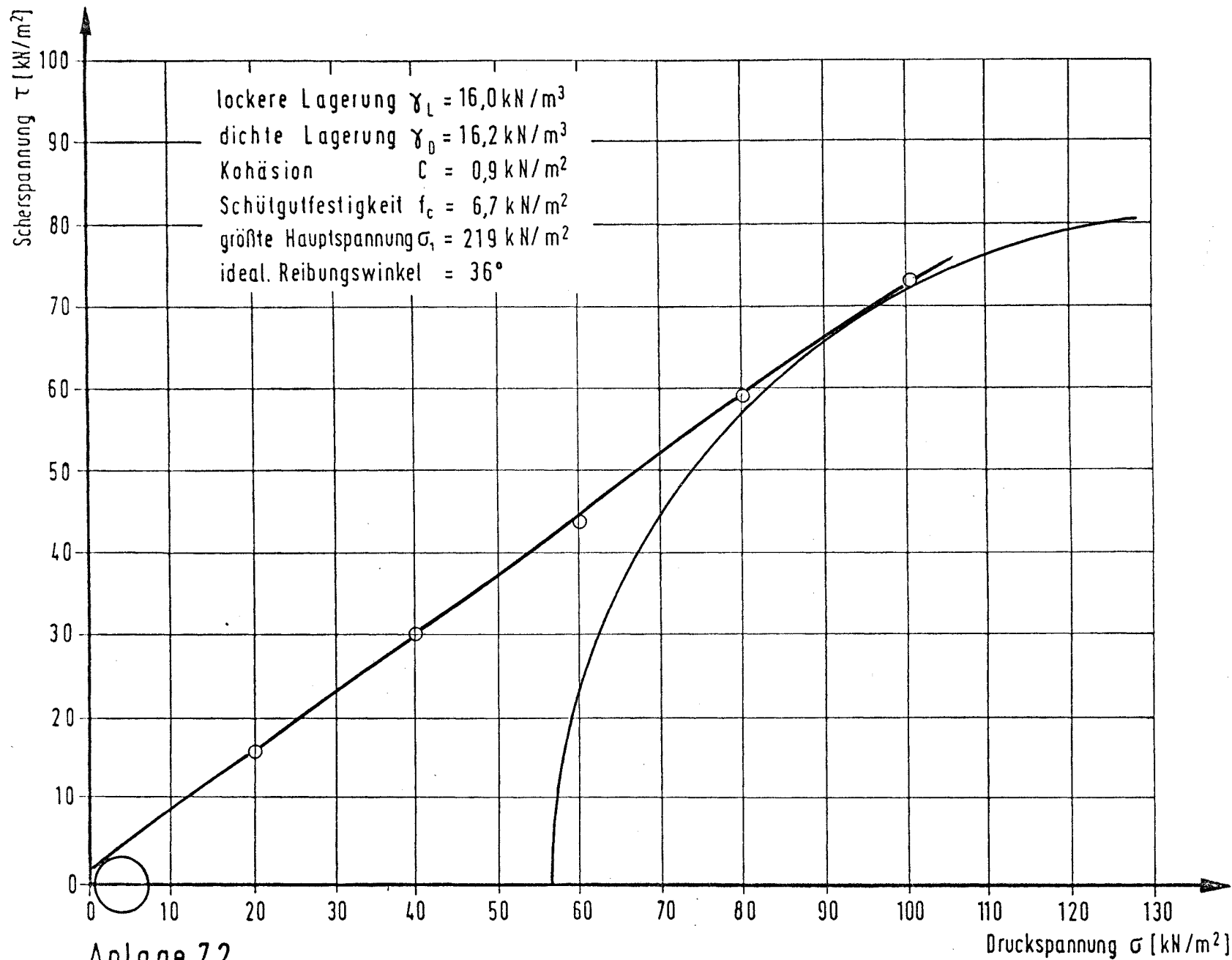
Ergebnisse der Scherversuche

(10kg Quarzsand 3-5mm und 150g Sägekettenthaftöl)



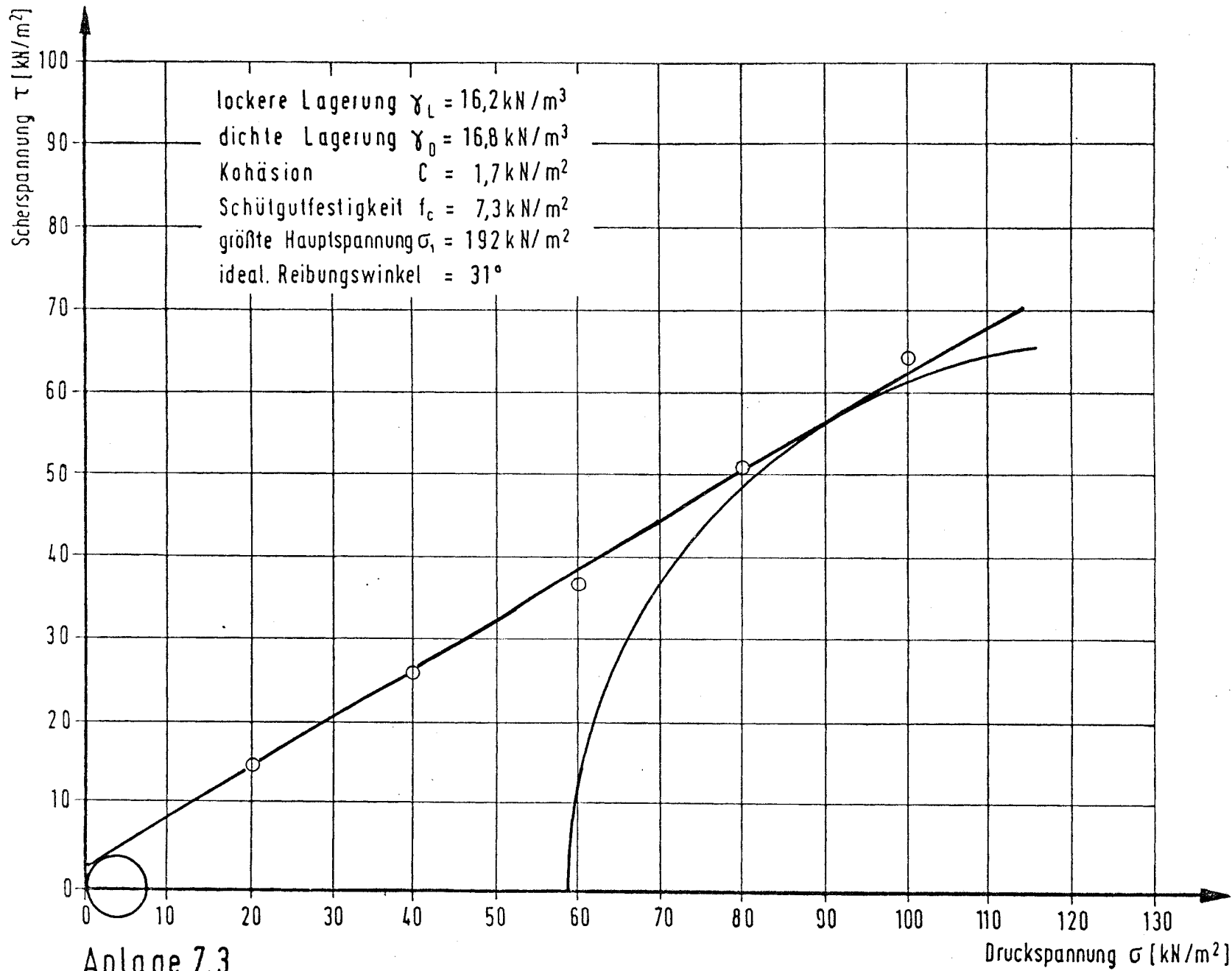
Anlage 7.1

Ergebnis der Scherversuche (Quarzsand 3-5 mm)



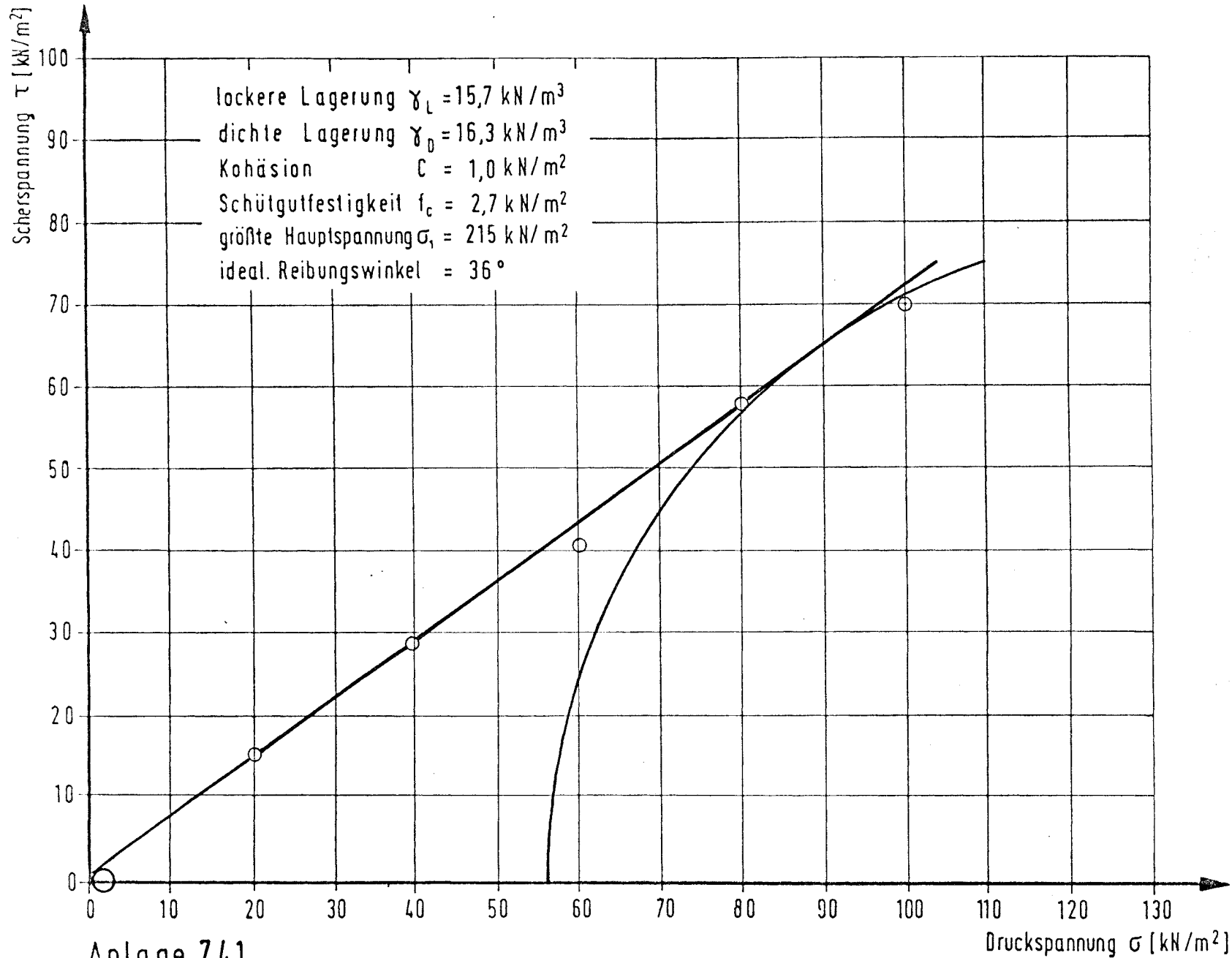
Anlage 7.2

Ergebnis der Scherversuche (Quarzsand 1-2 mm)



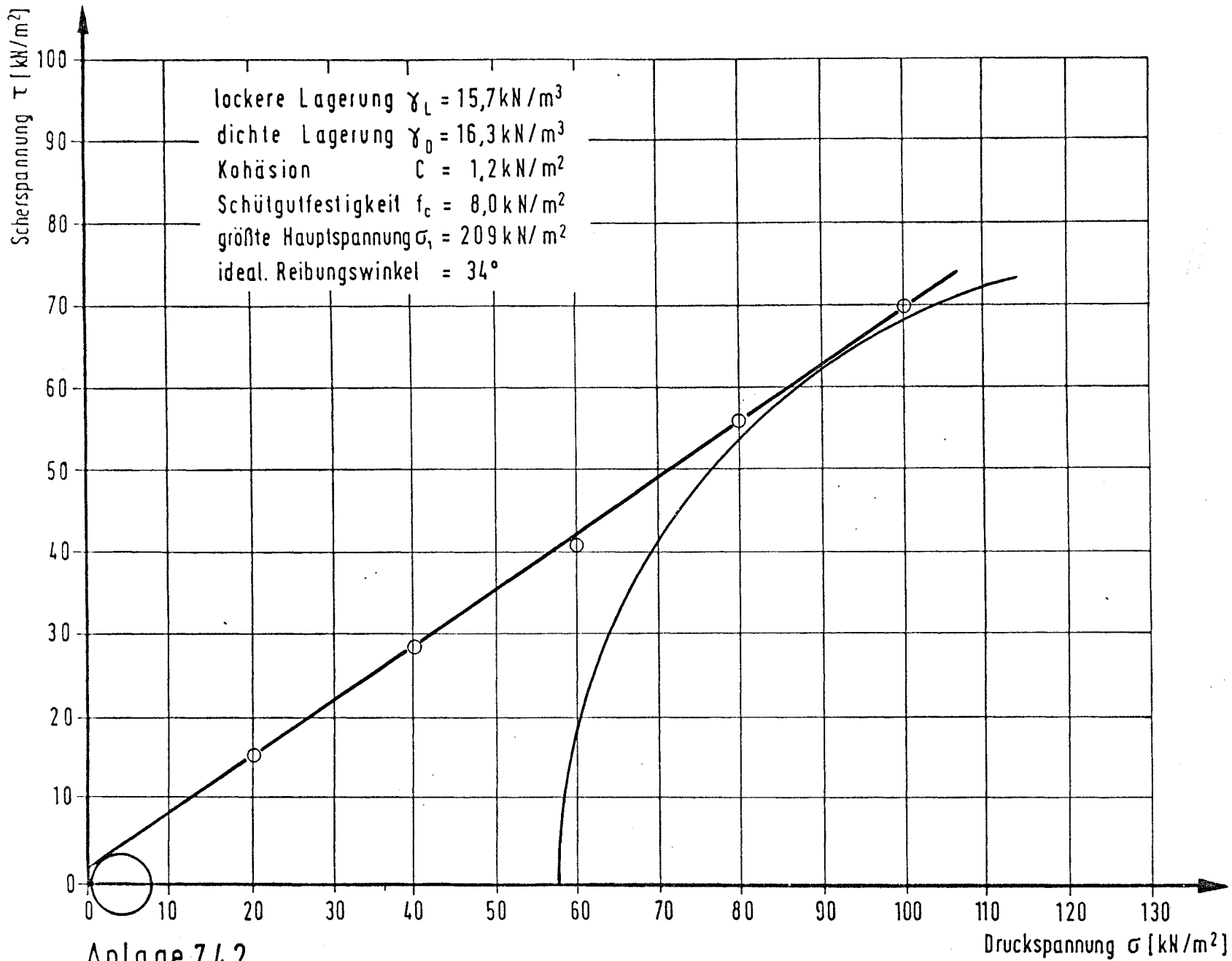
Anlage 7.3

Ergebnis der Scherversuche (Quarzsand 0,2-1)



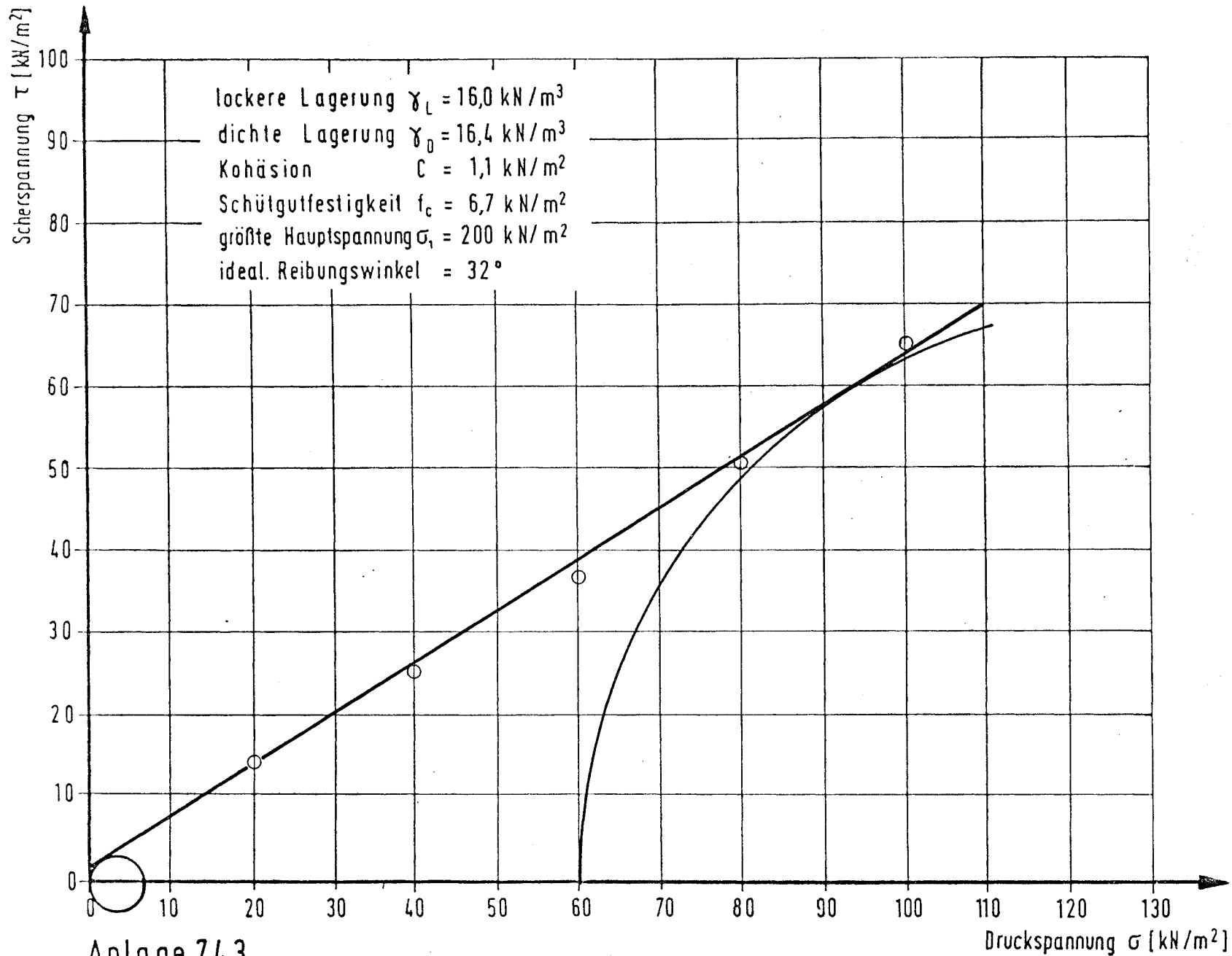
Anlage 7.4.1

Ergebnis der Scherversuche (4kg Quarzsand 3-5mm und 6kg Quarzsand 0,2-1mm)



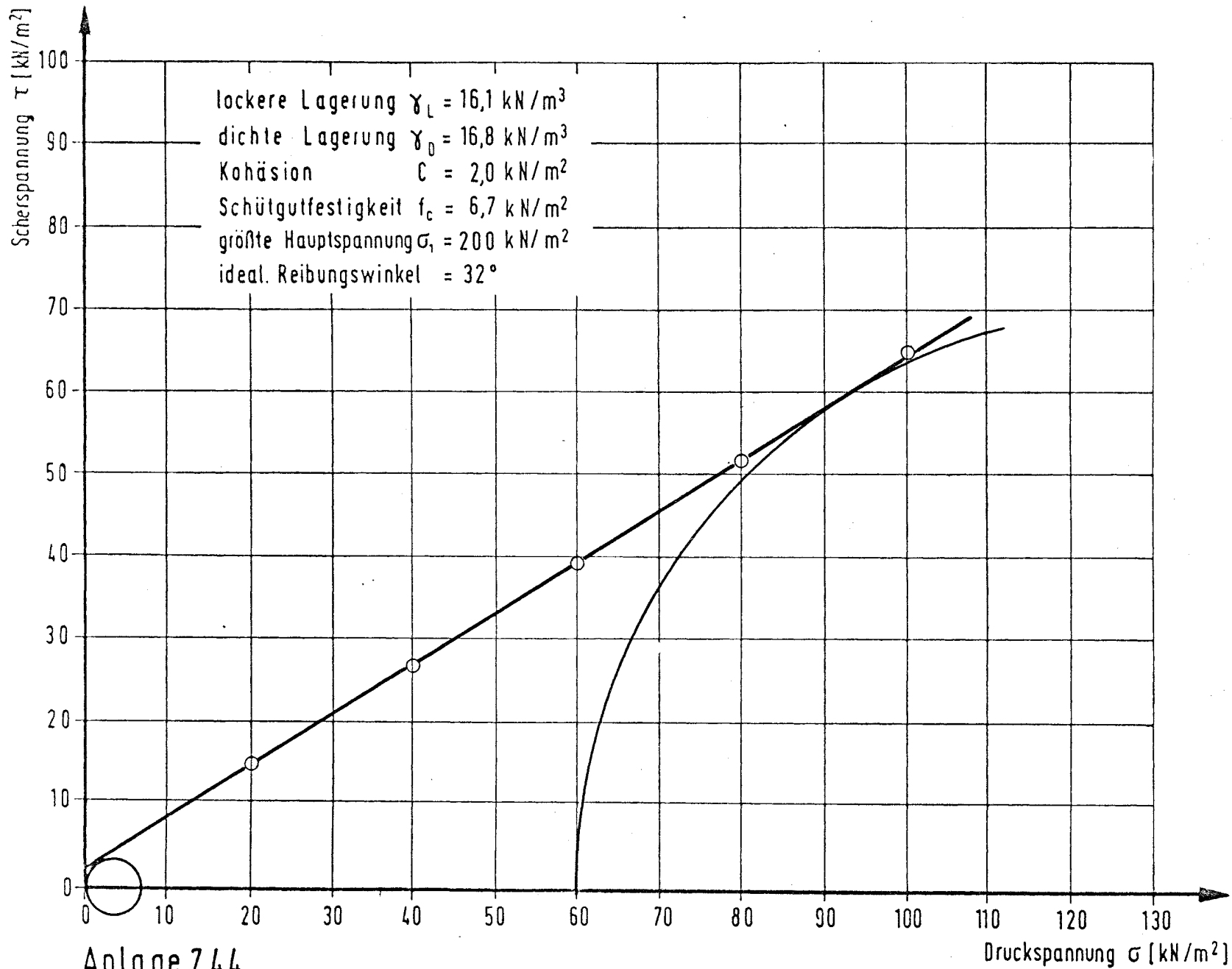
Anlage 7.4.2

Ergebnis der Scherversuche (3kg Quarzsand 3-5mm und 7kg Quarzsand 0,2-1mm)



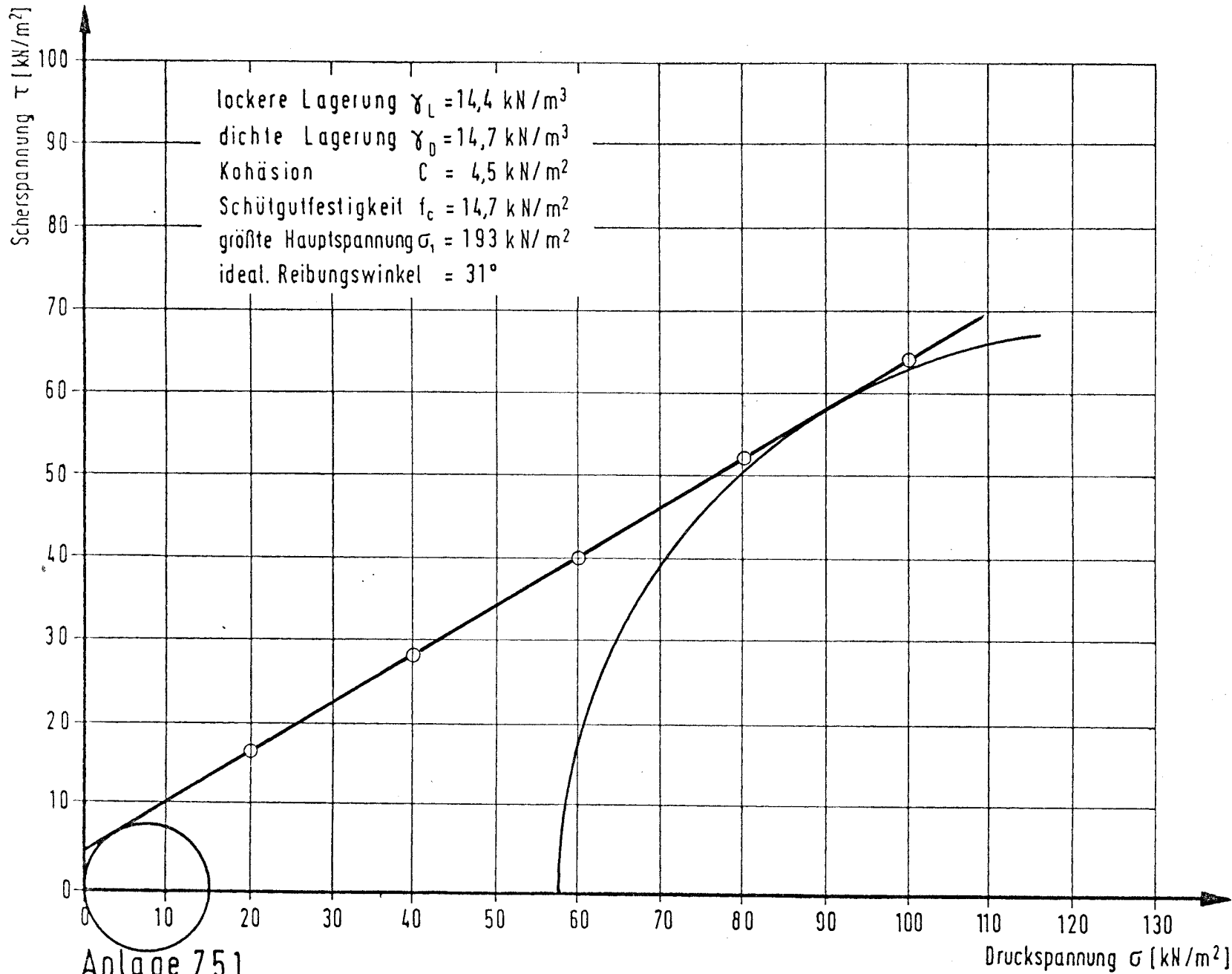
Anlage 7.4.3

Ergebnis der Scherversuche (2kg Quarzsand 3-5mm und 8 kg Quarzsand 0,2-1mm)



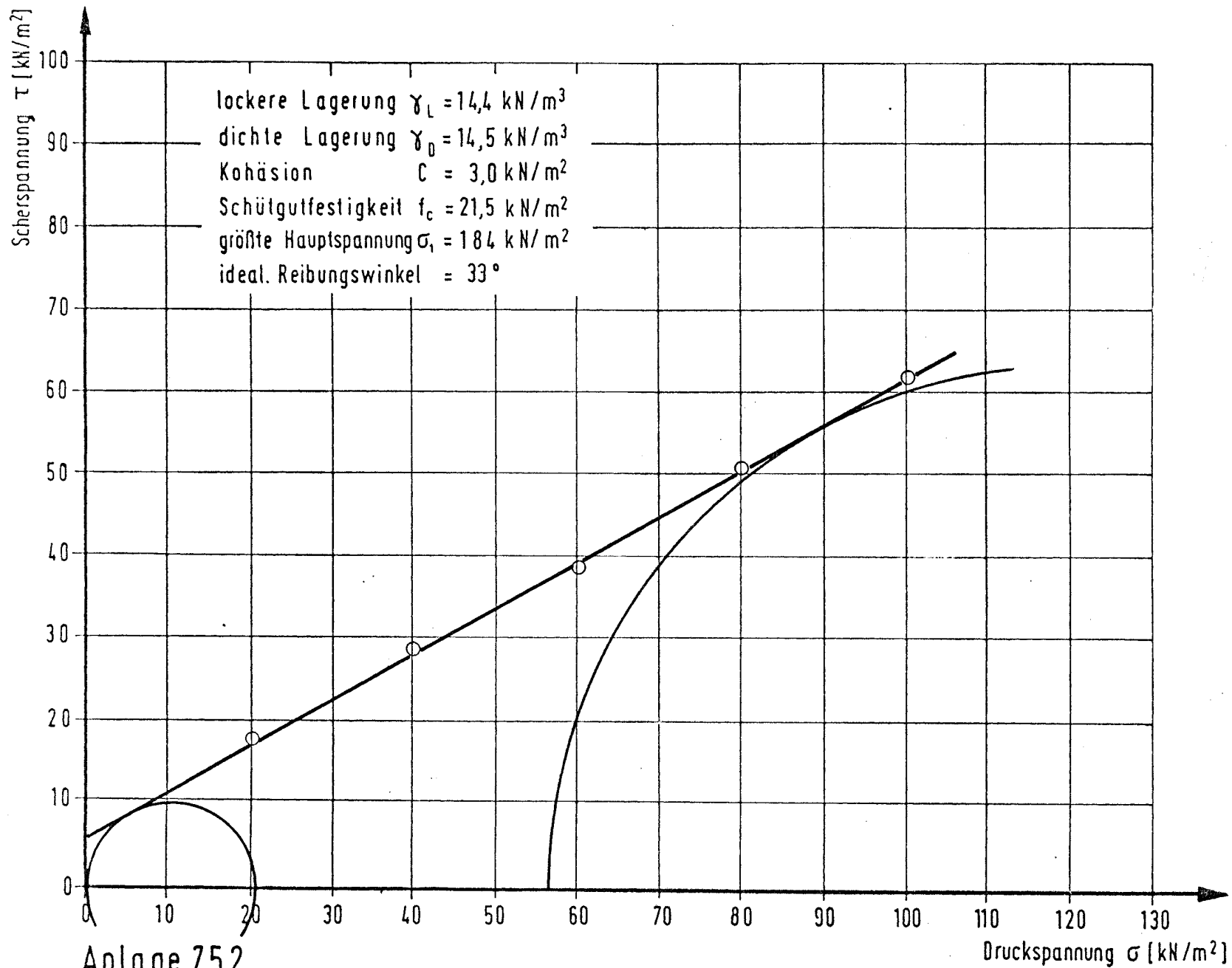
Anlage 7.4.4

Ergebnis der Scherversuche (1kg Quarzsand 3-5mm und 9kg Quarzsand 0,2-1mm)



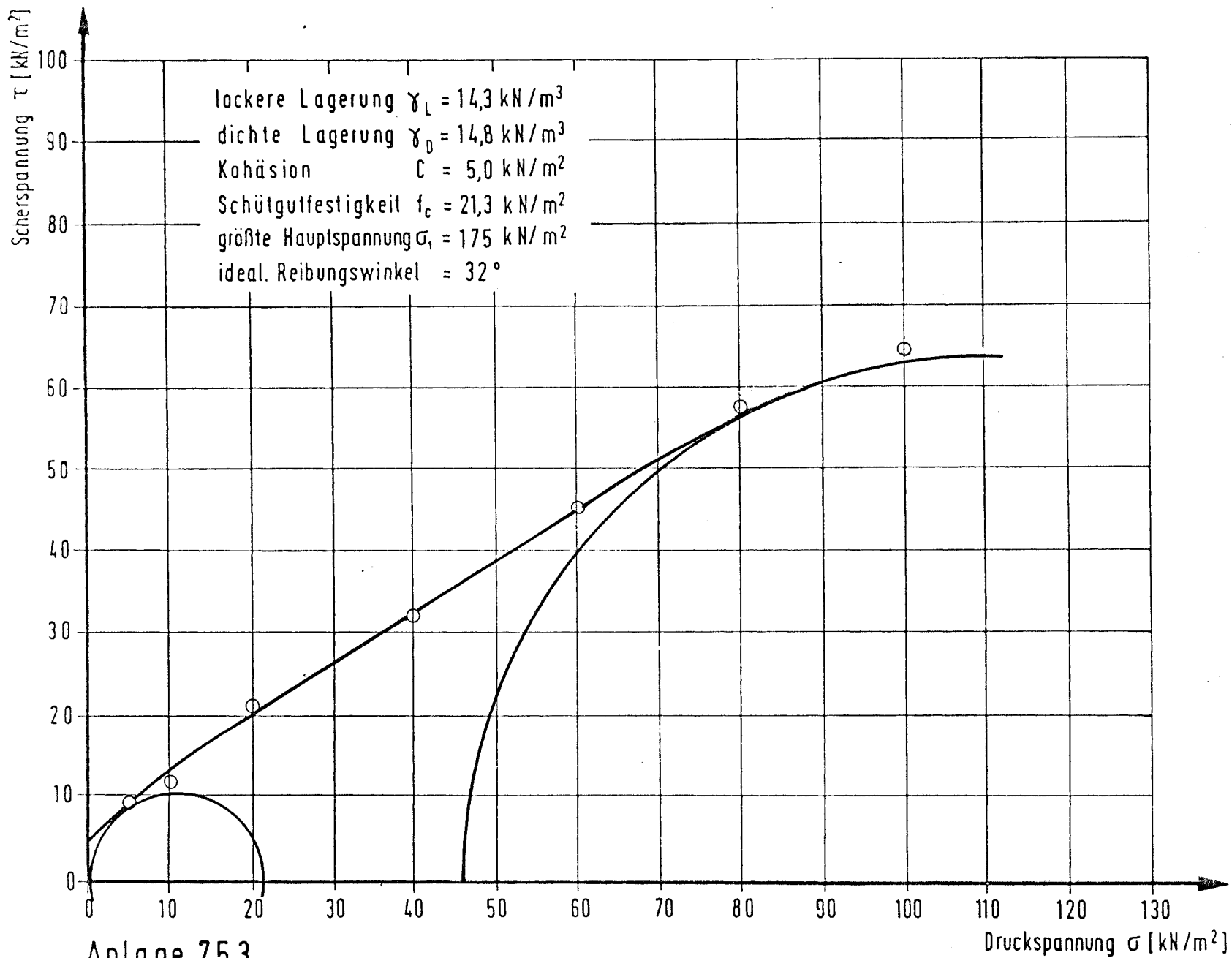
Anlage 7.5.1

Ergebnis der Scherversuche (10kg Quarzsand 3-5 mm und 33g Mehrzweckfett)



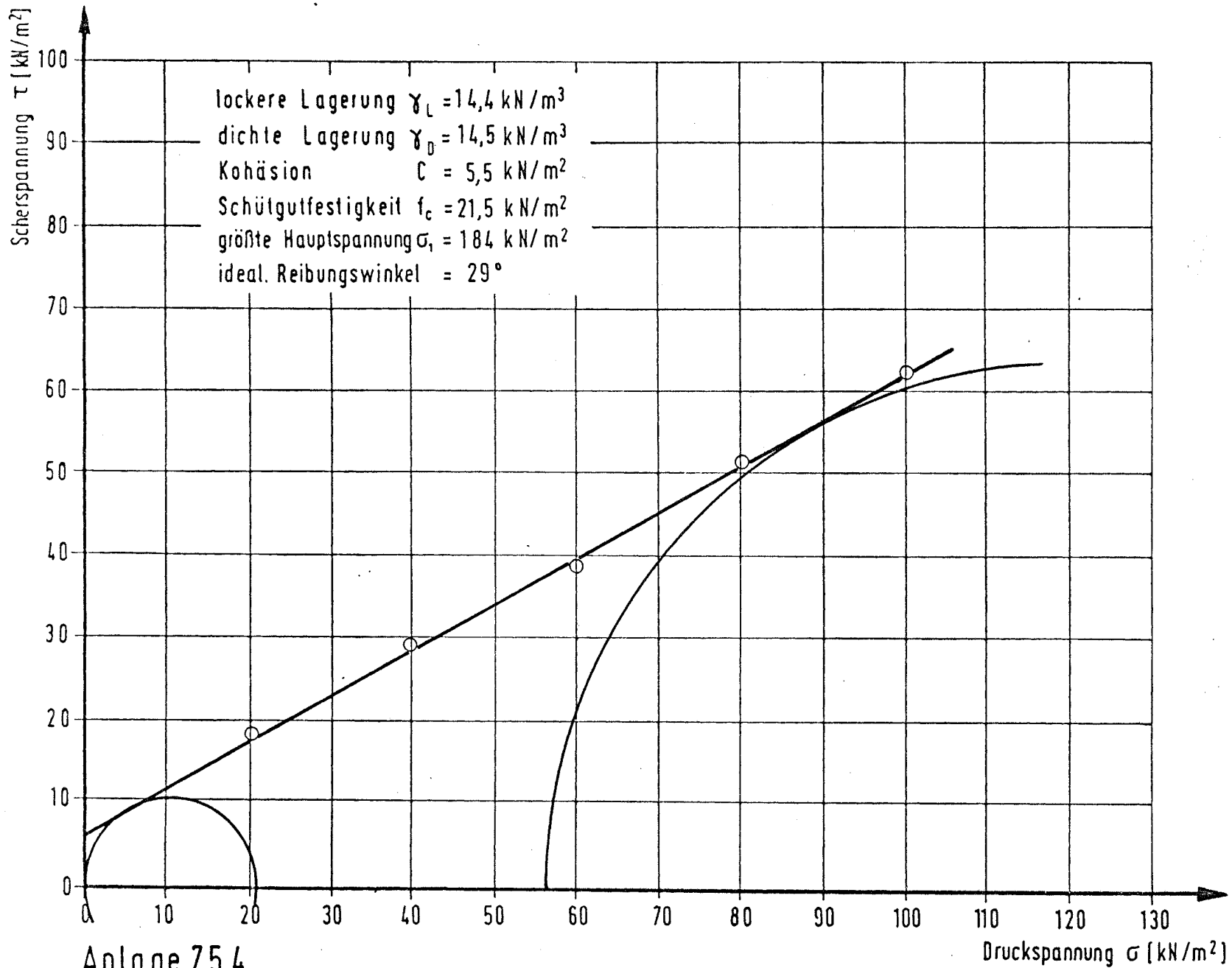
Anlage 7.5.2

Ergebnis der Scherversuche (10kg Quarzsand 3-5 mm und 67 g Mehrzweckfett)



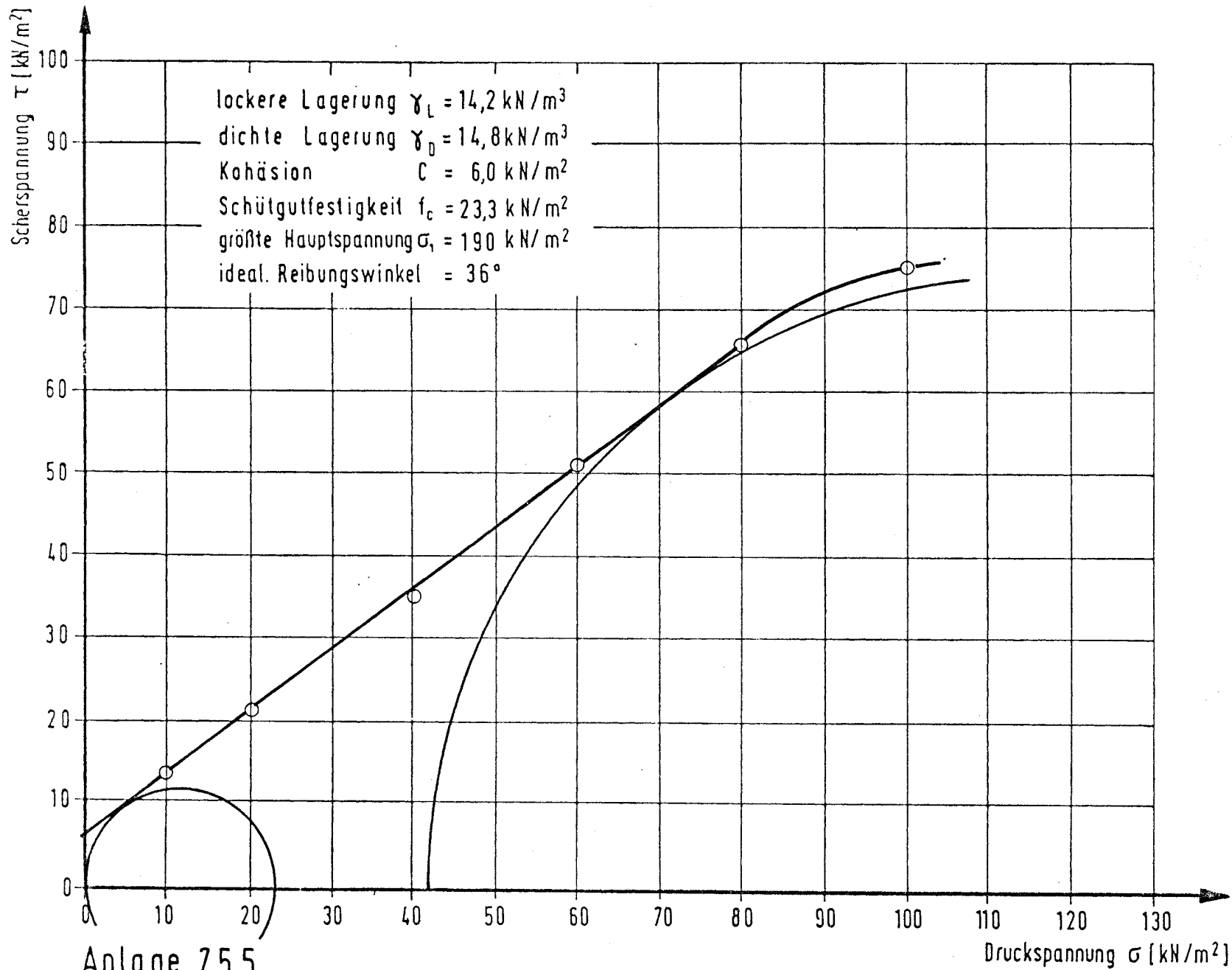
Anlage 7.5.3

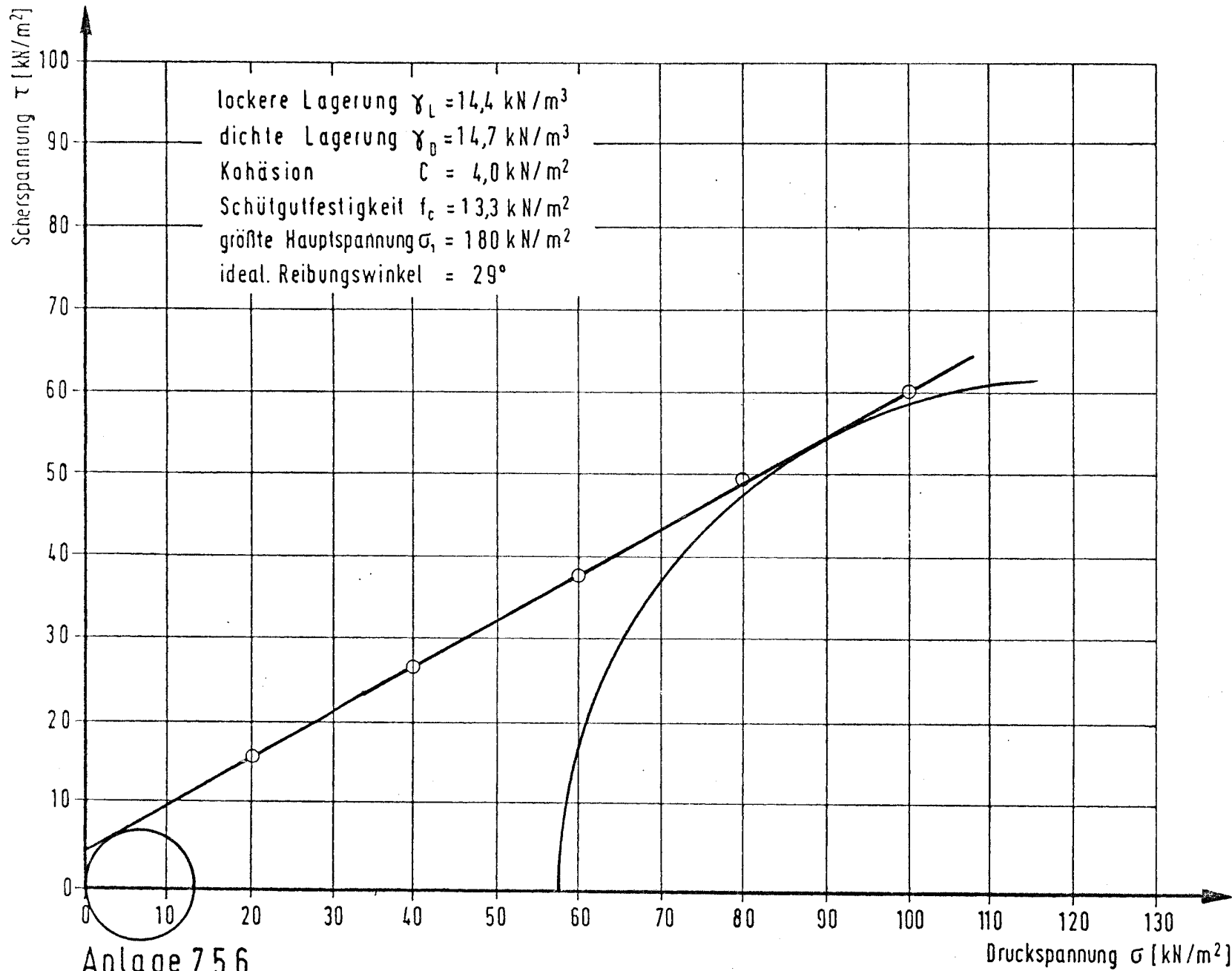
Ergebnis der Scherversuche (10kg Quarzsand 3-5mm und 100g Mehrzweckfett)



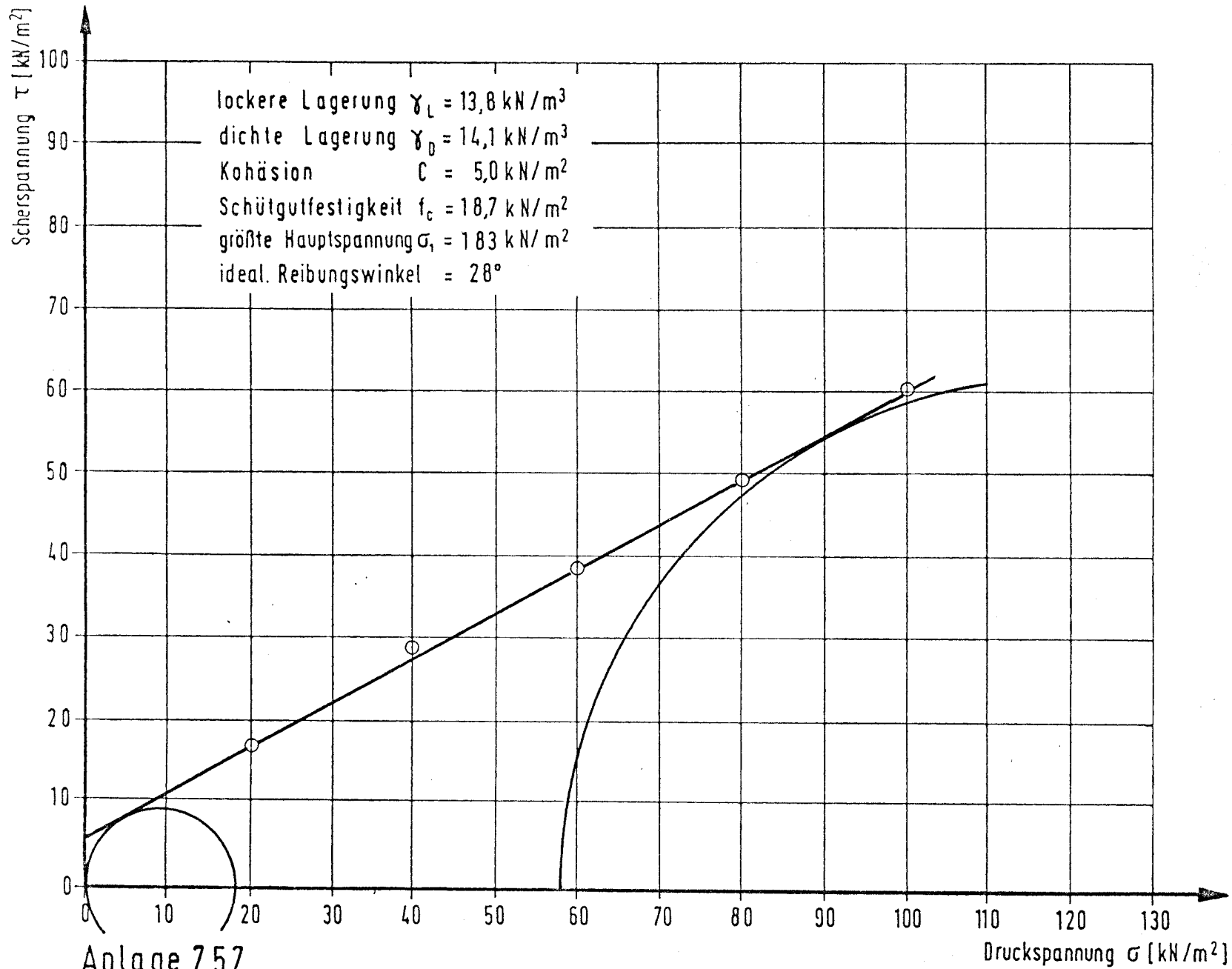
Anlage 7.5.4

Ergebnis der Scherversuche (10kg Quarzsand 3-5 mm und 133g Mehrzweckfett)



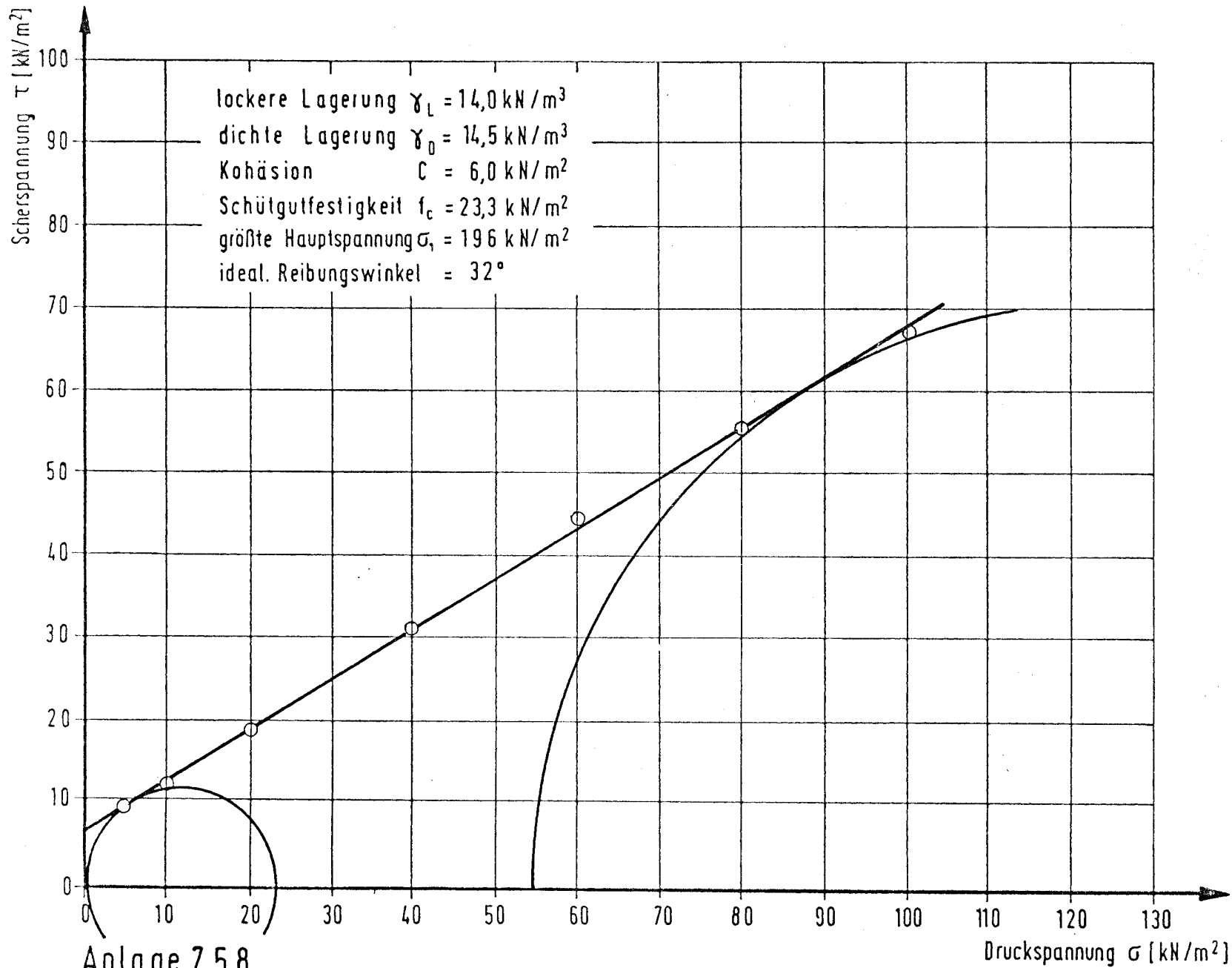


Ergebnis der Scherversuche (10 kg Quarzsand 3-5mm und 200 g Mehrzweckfett)



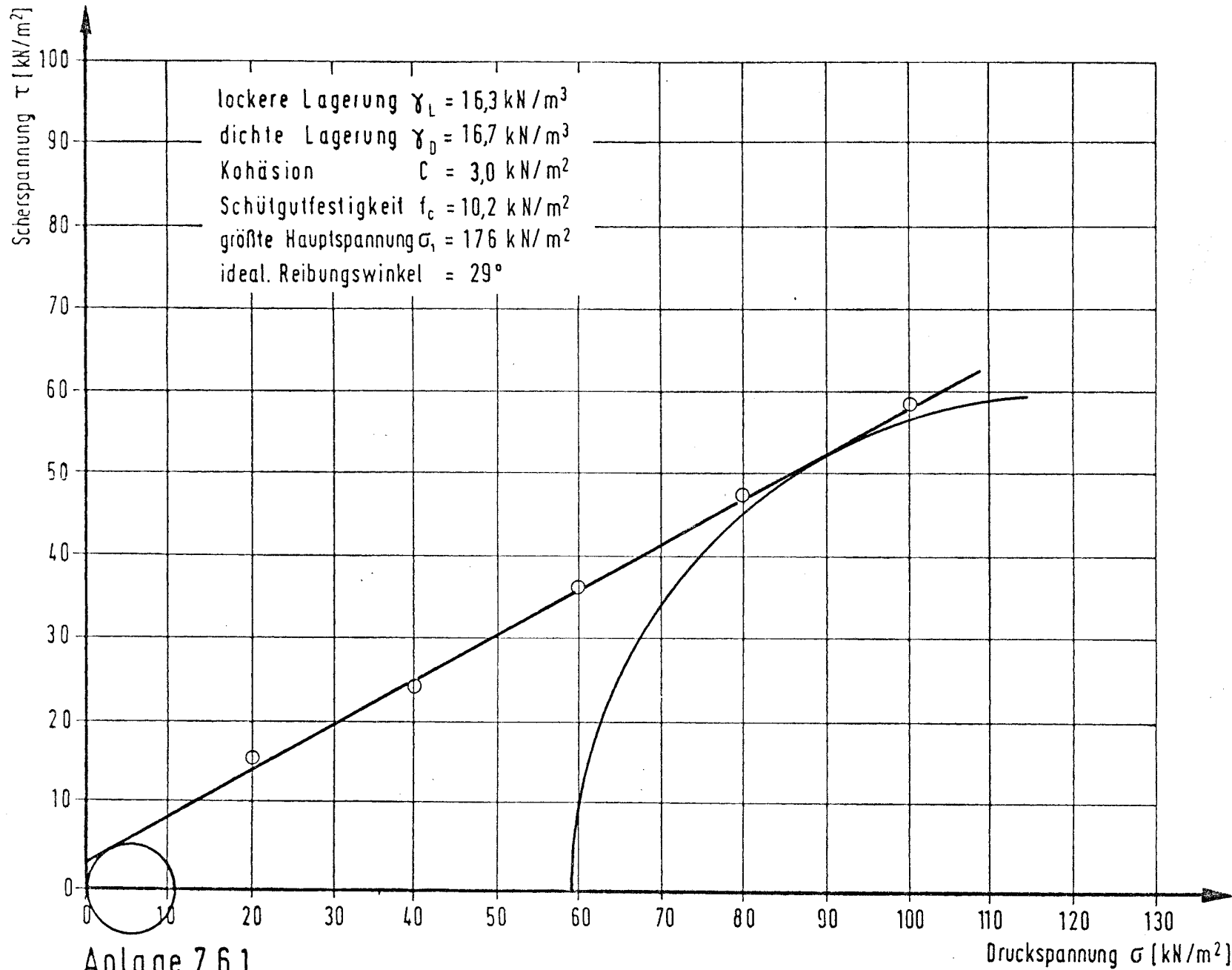
Anlage 7.5.7

Ergebnis der Scherversuche (10 kg Quarzsand 3 - 5 mm und 600g Mehrzweckfett)

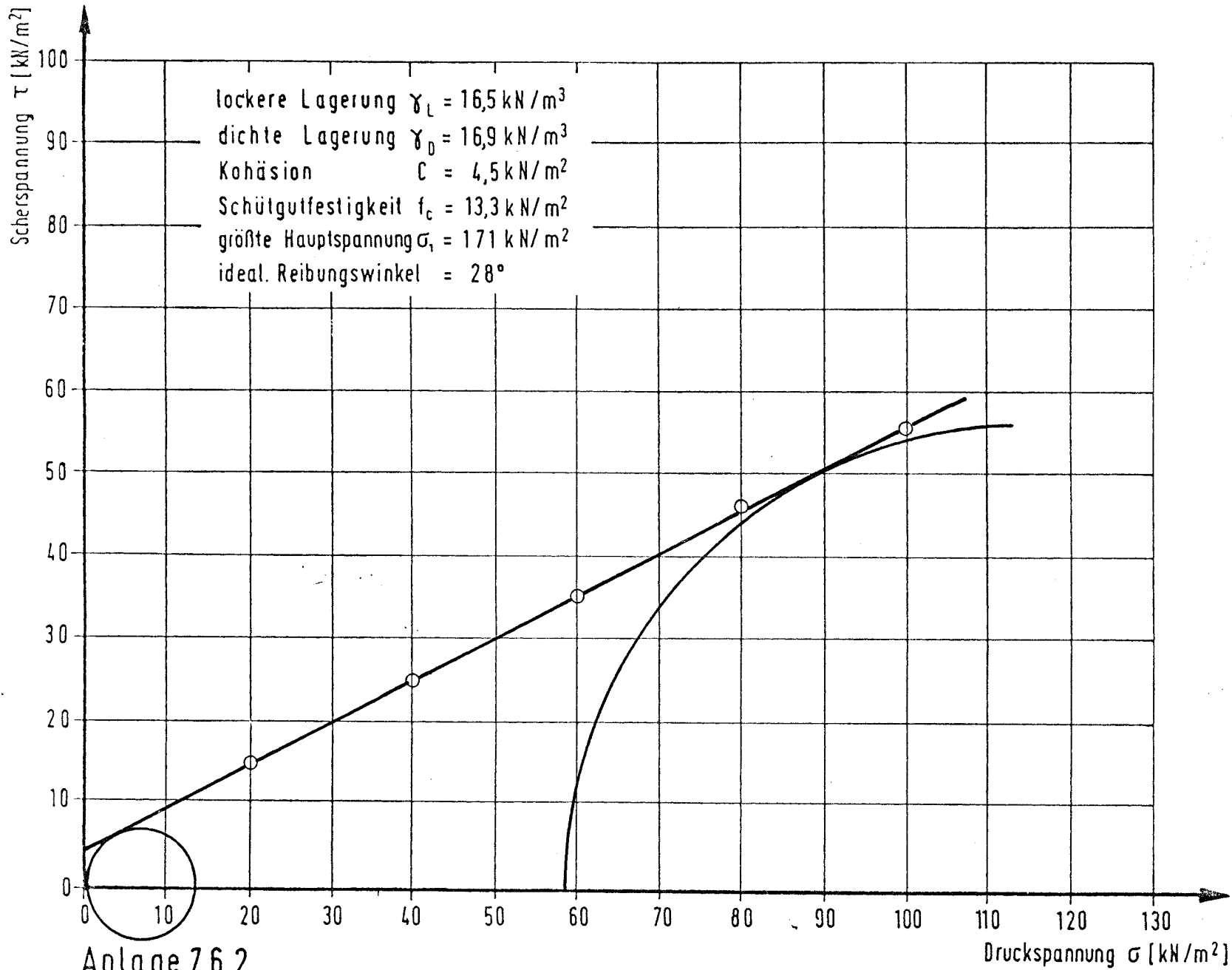


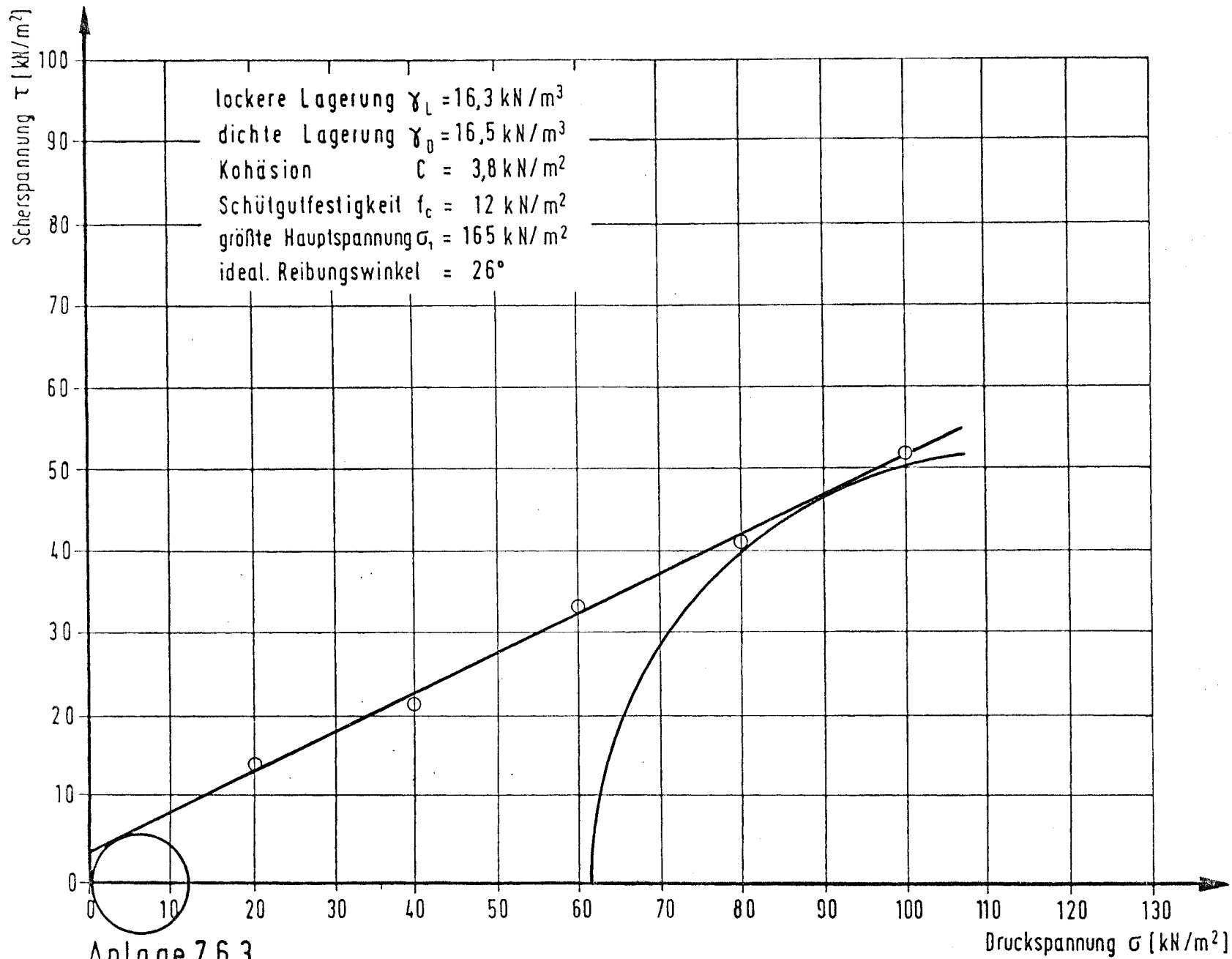
Anlage 7.5.8

Ergebnis der Scherversuche (10 kg Quarzsand 3-5 mm und 1000g Mehrzweckfett)



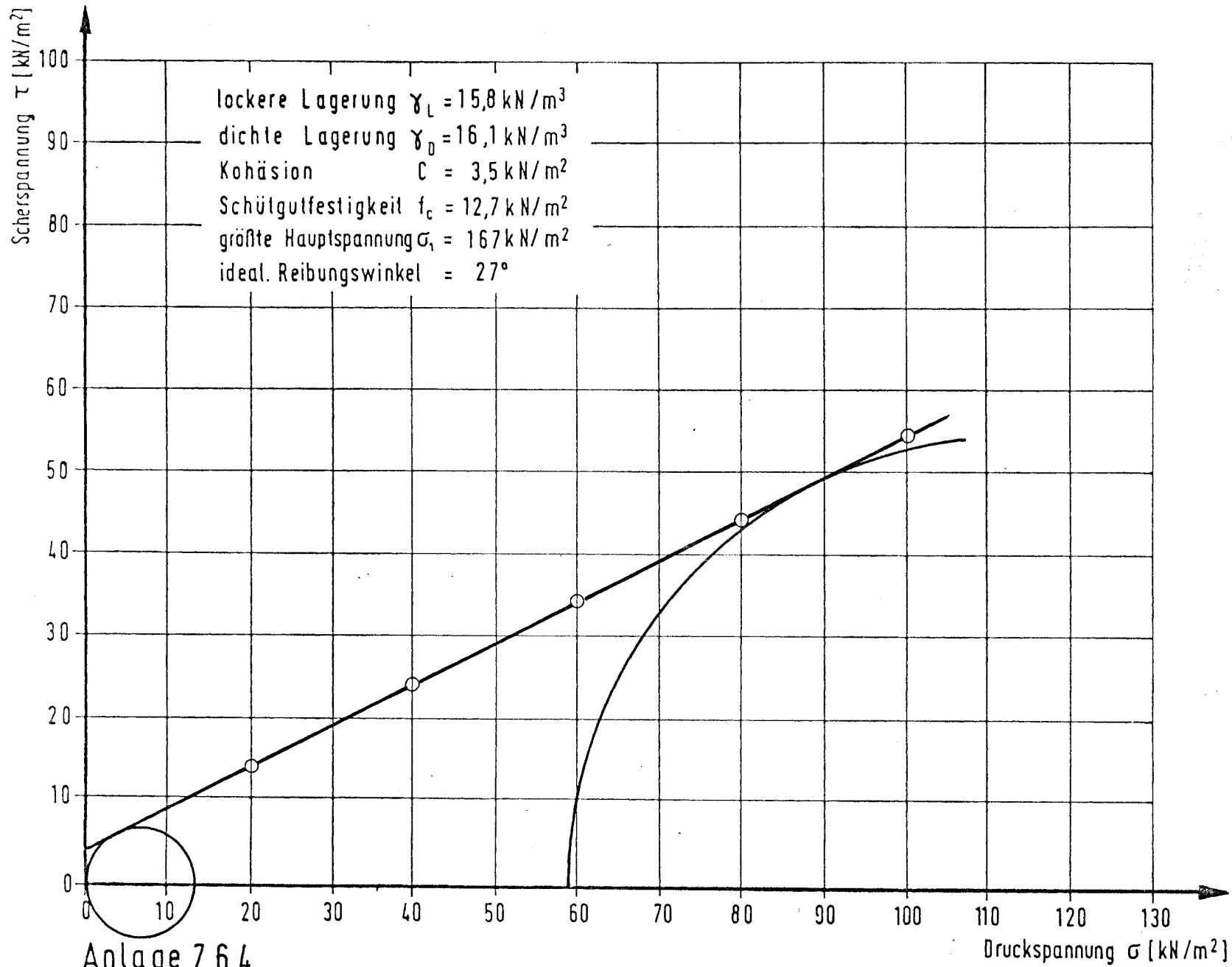
Ergebnis der Scherversuche (10kg Quarzsand 1-2 mm und 33g Mehrzwekfett)



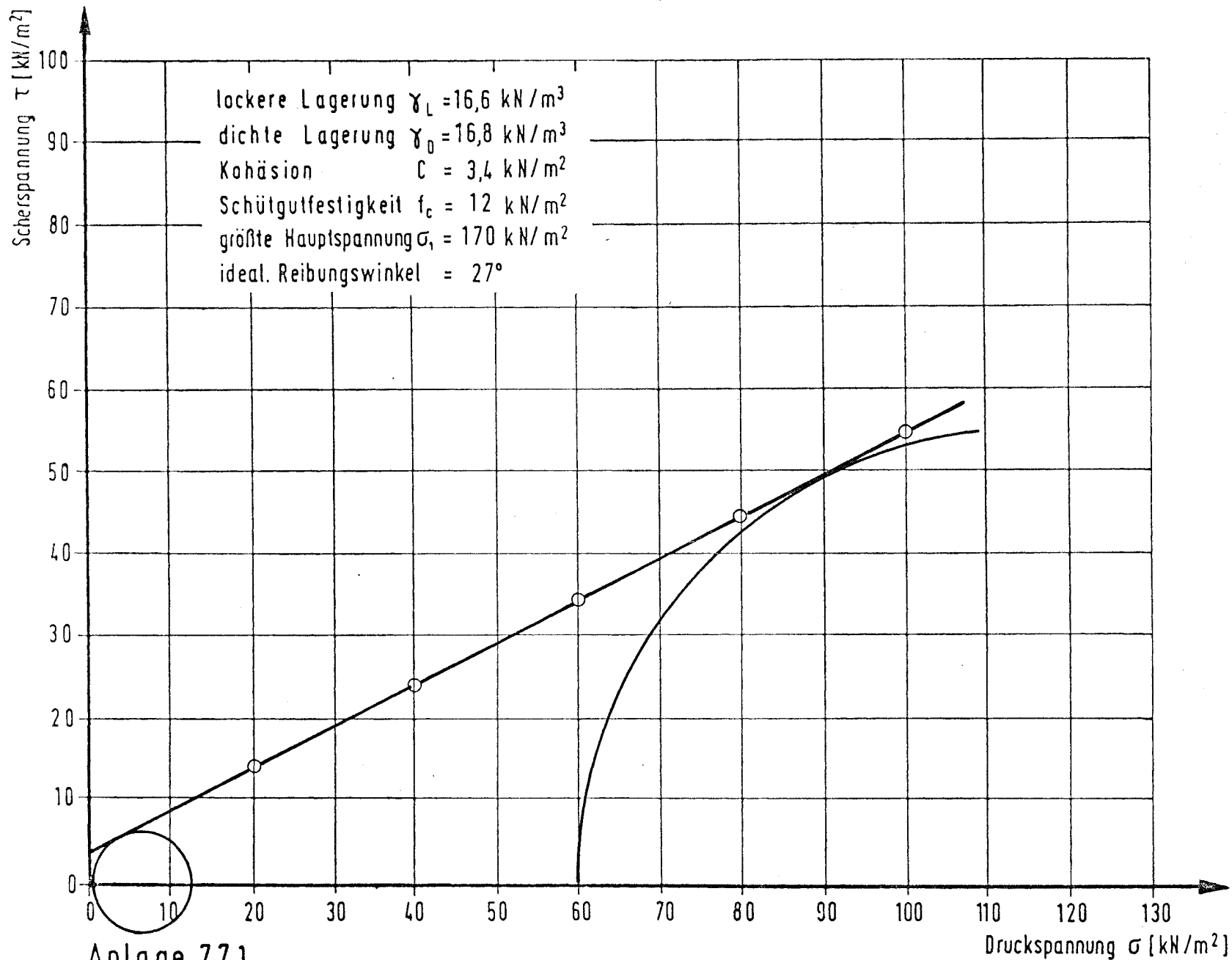


Anlage 7.6.3

Ergebnis der Scherversuche (10kg Quarzsand 1-2mm und 133g Mehrzweck fett)

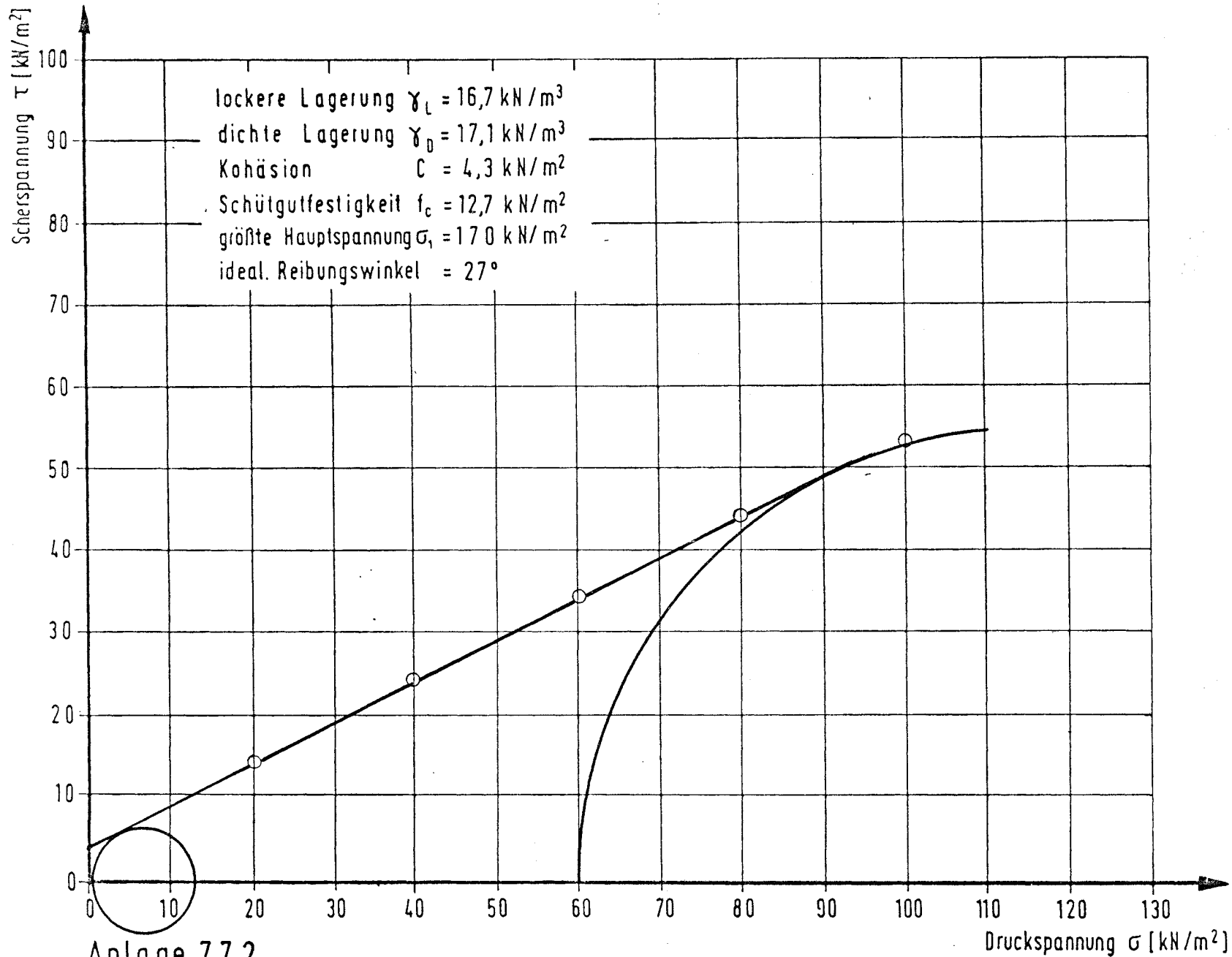


Ergebnis der Scherversuche (10kg Quarzsand 1-2 mm und 200g Mehrzweckfett)



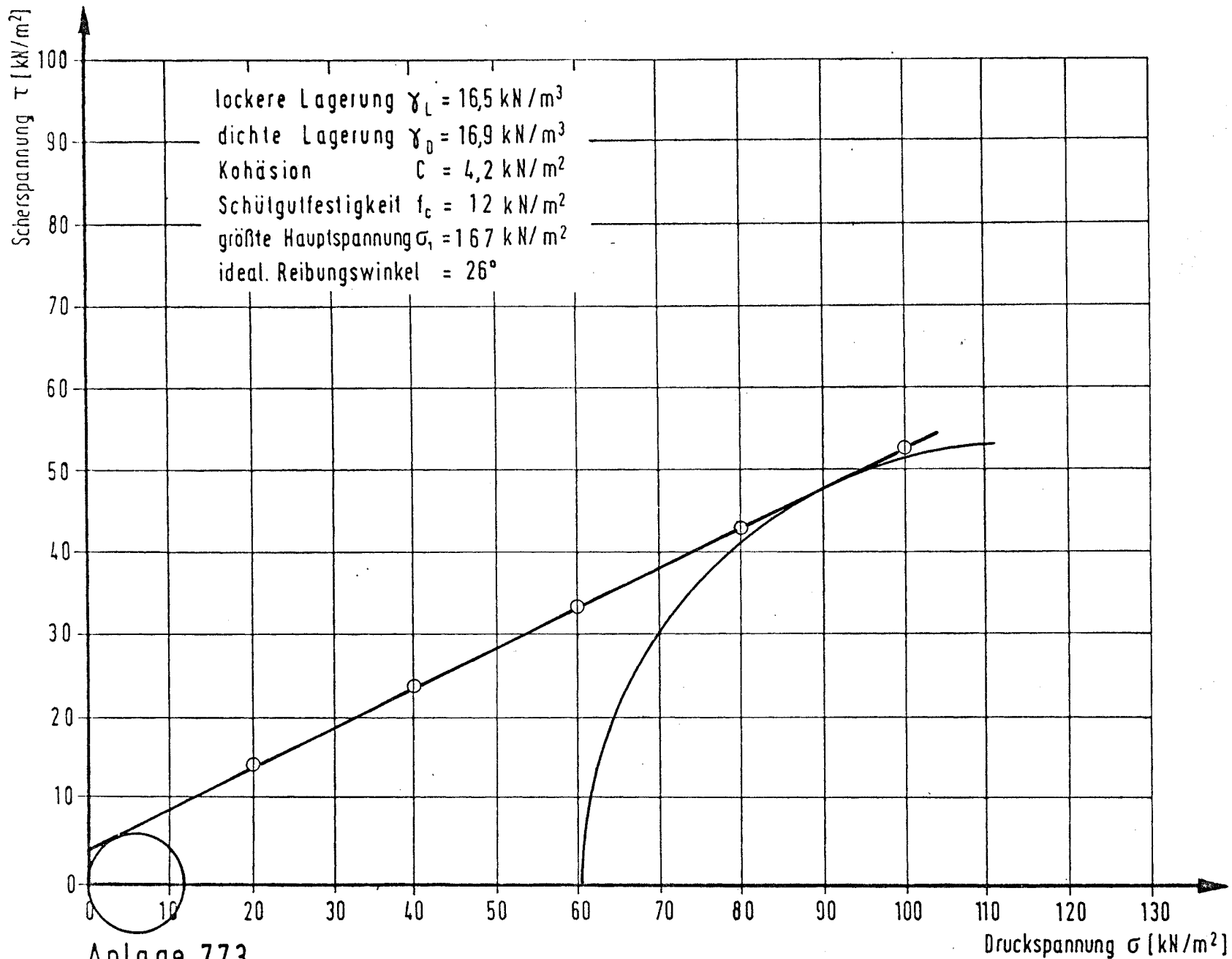
Anlage 7.7.1

Ergebnis der Scherversuche (10kg Quarzsand 0,2 -1 mm und 33g Mehrzweckfett)



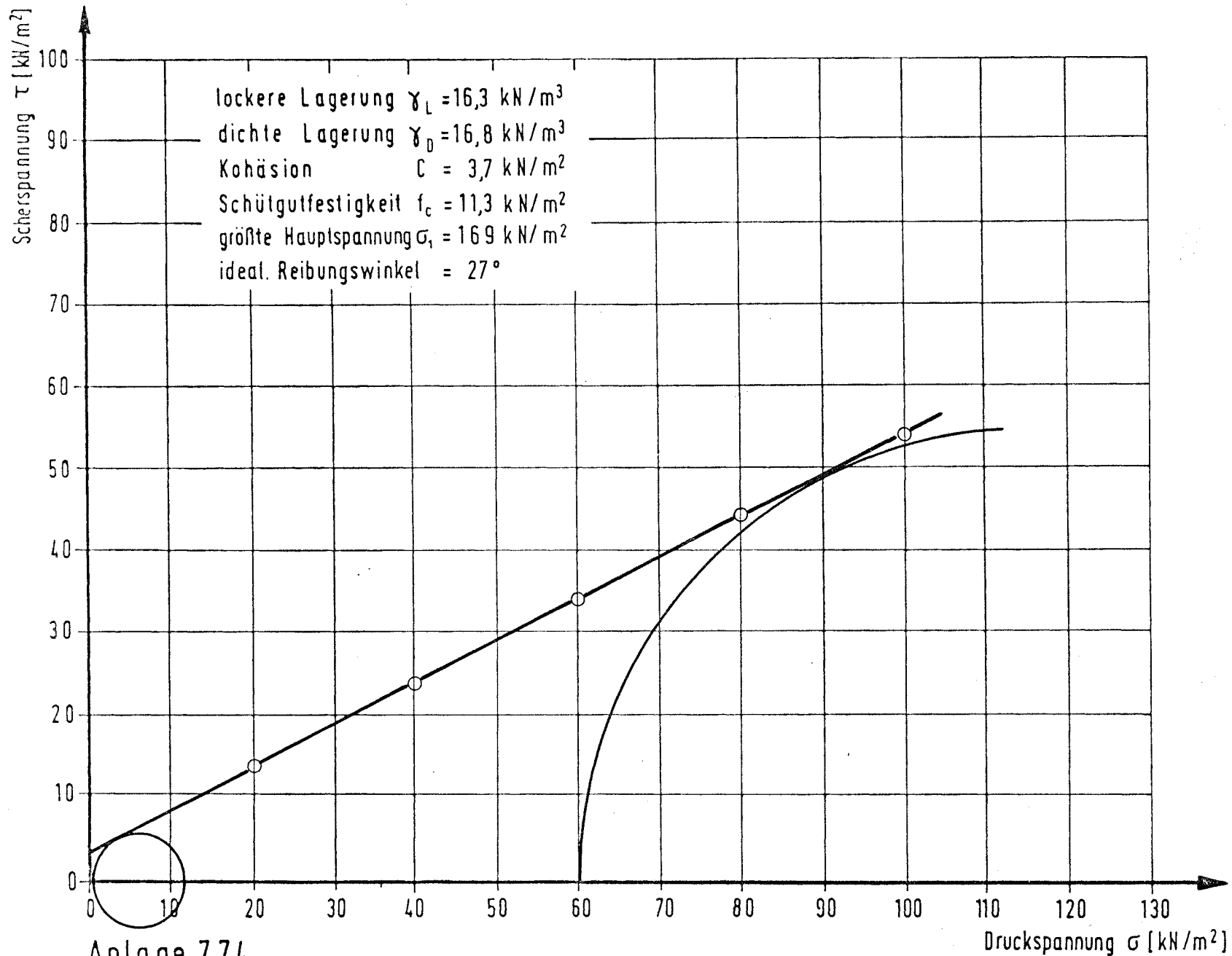
Anlage 7.7.2

Ergebnis der Scherversuche (10kg Quarzsand 0,2-1mm und 67g Mehrzweckfett)



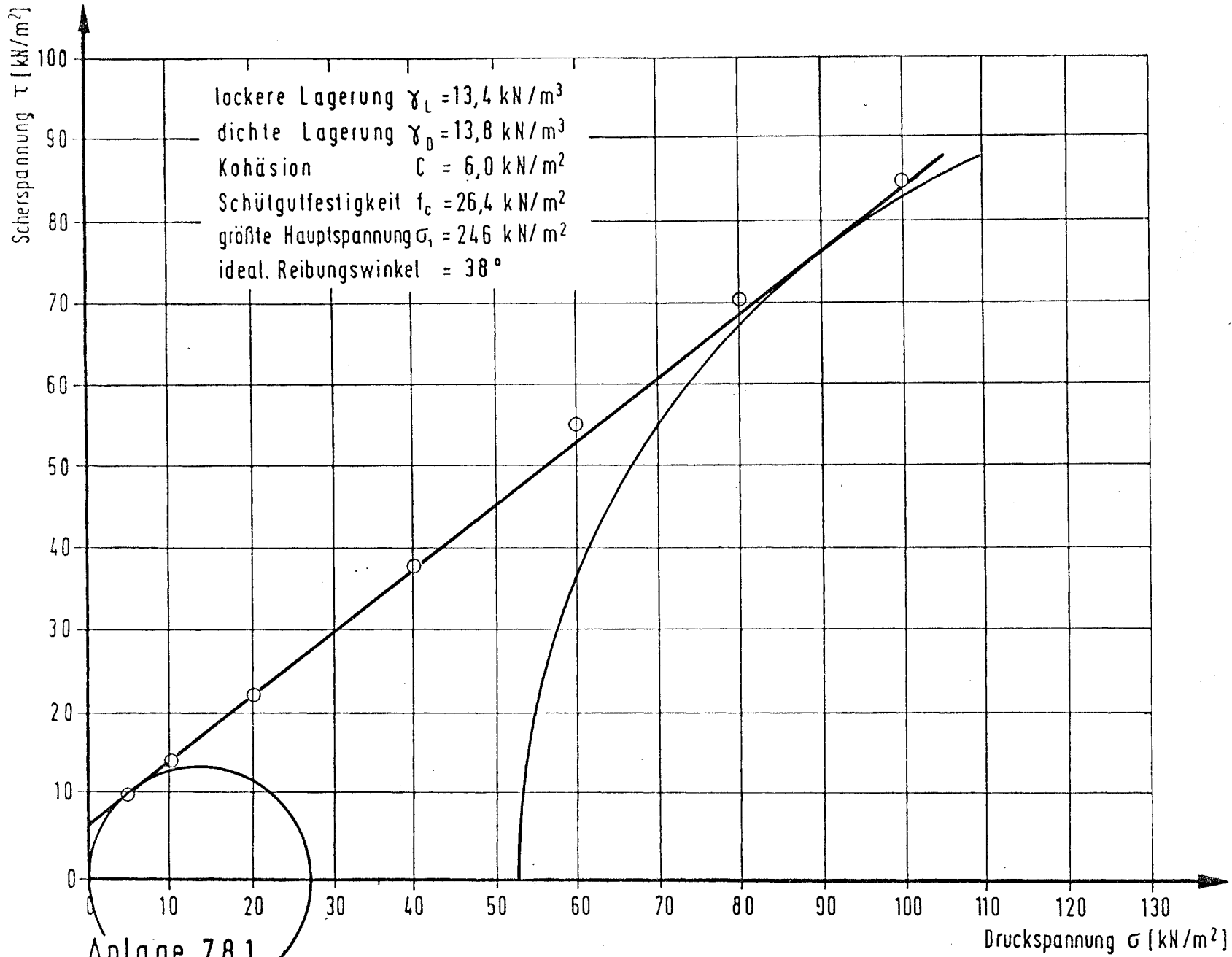
Anlage 7.7.3

Ergebnis der Scherversuche (10 kg Quarzsand 0,2-1mm und 133g Mehrzweckfett)

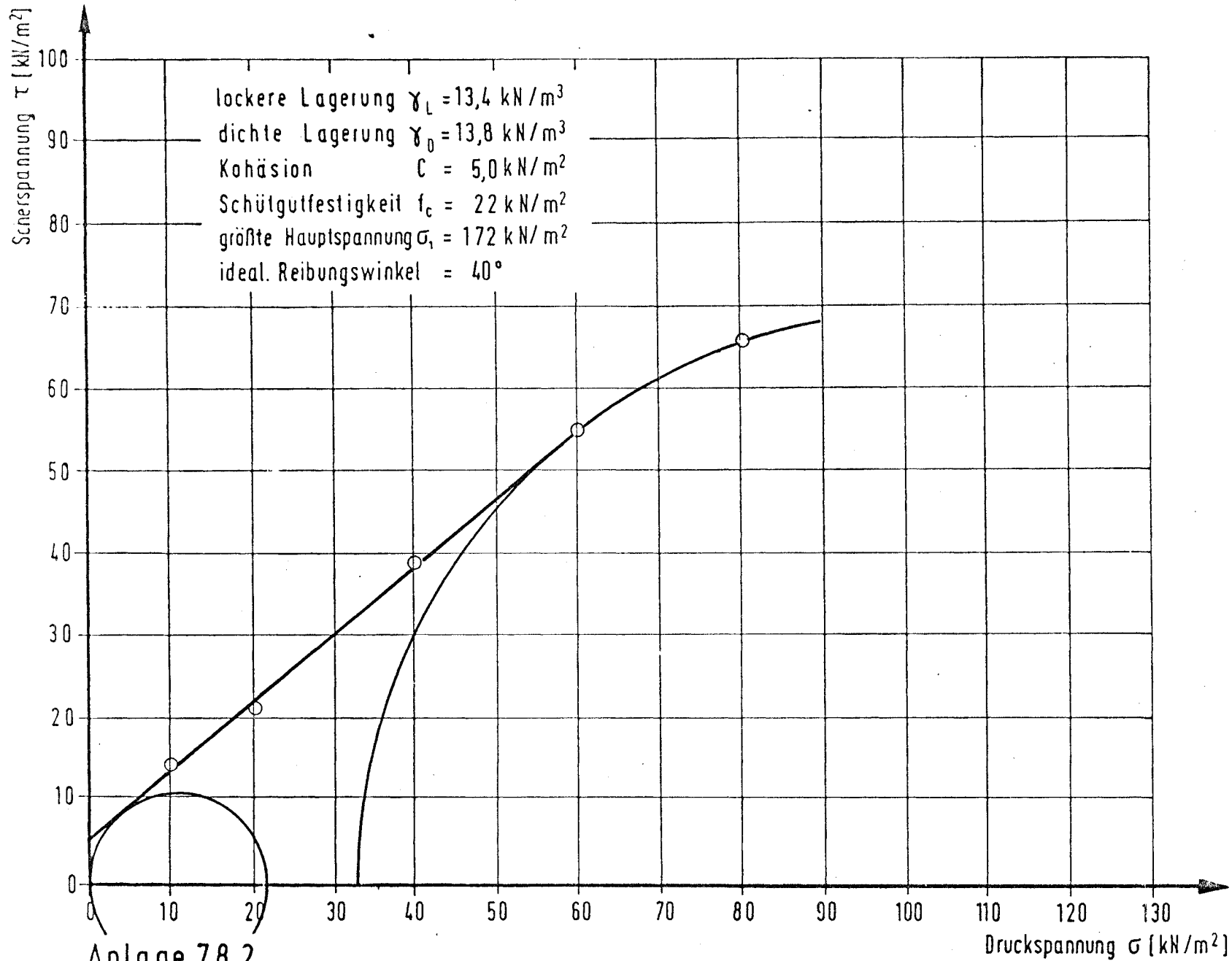


Anlage 7.7.4

Ergebnis der Scherversuche (10kg Quarzsand 0,2-1mm und 200g Mehrzweckfett)

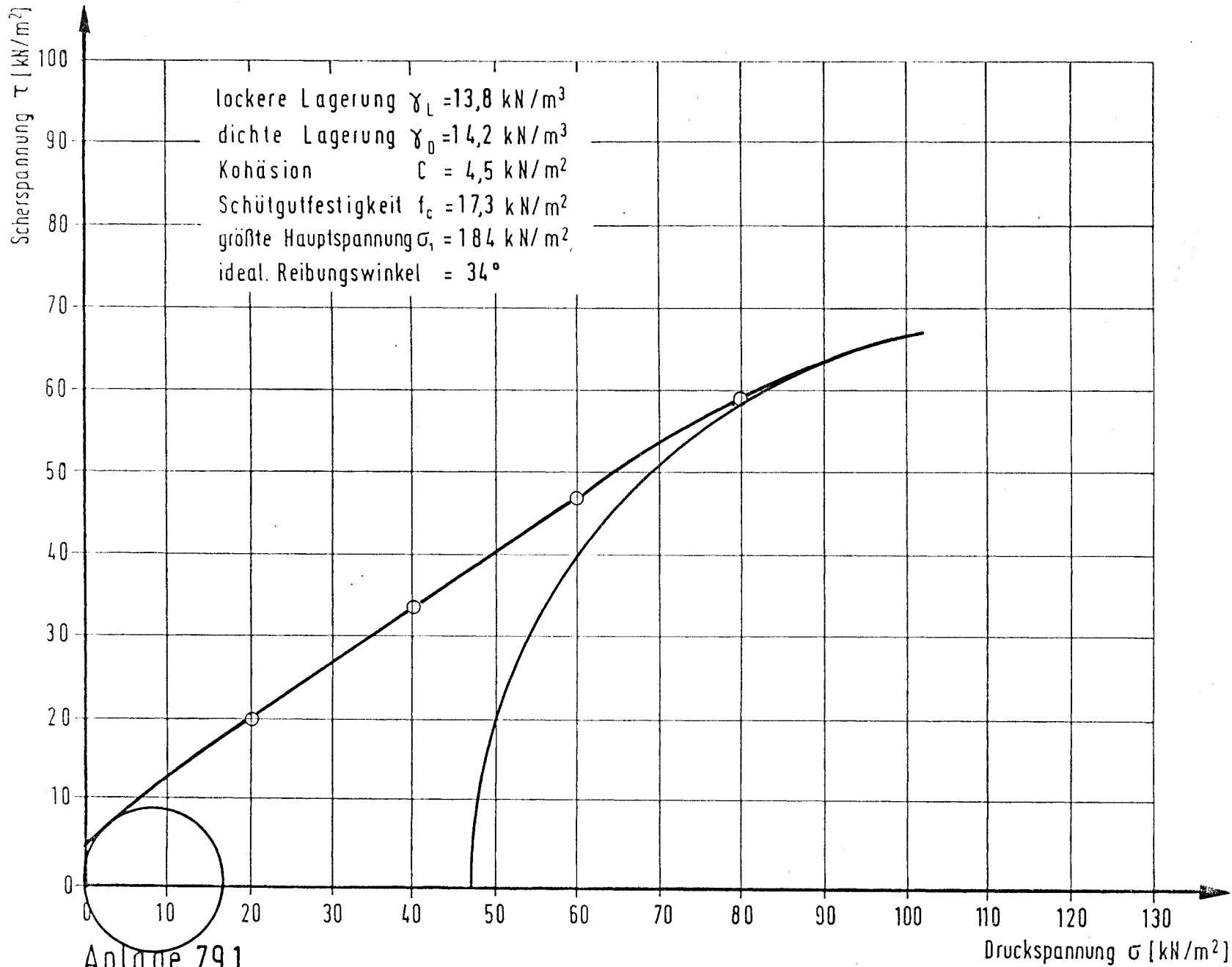


Ergebnis der Scherversuche (10kg Quarzsand 3-5mm und 500g Kalk ($\sigma_v = 100 \text{ kN/m}^2$))



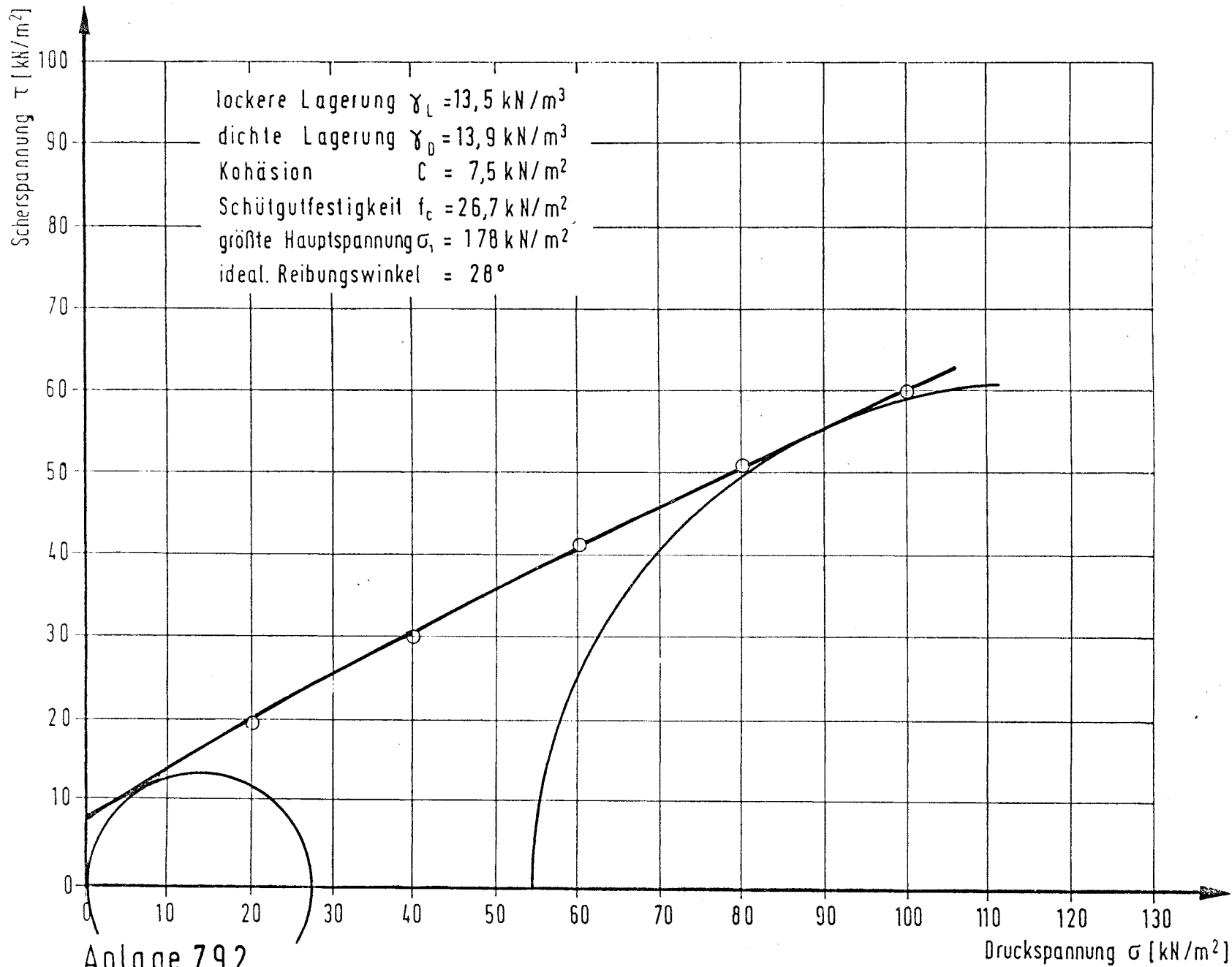
Anlage 7.8.2

Ergebnis der Scherversuche (10kg Quarzsand 3-5mm und 500g Kalk ($\sigma_v = 80 \text{ kN/m}^2$))



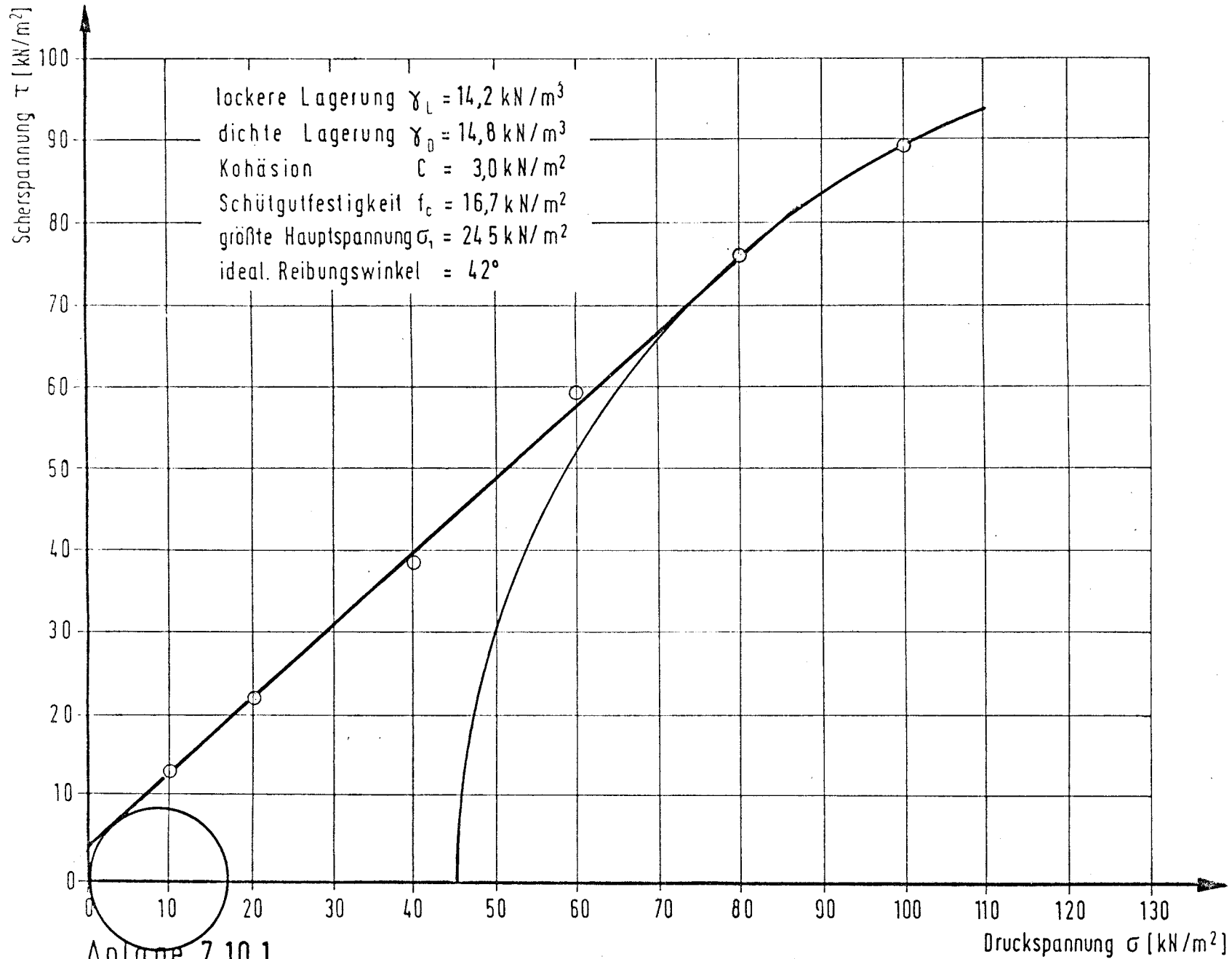
Anlage 7.9.1

Ergebnis der Scherversuche (10kg Quarzsand 3-5mm und 500g Bitumen (Rubol-7))



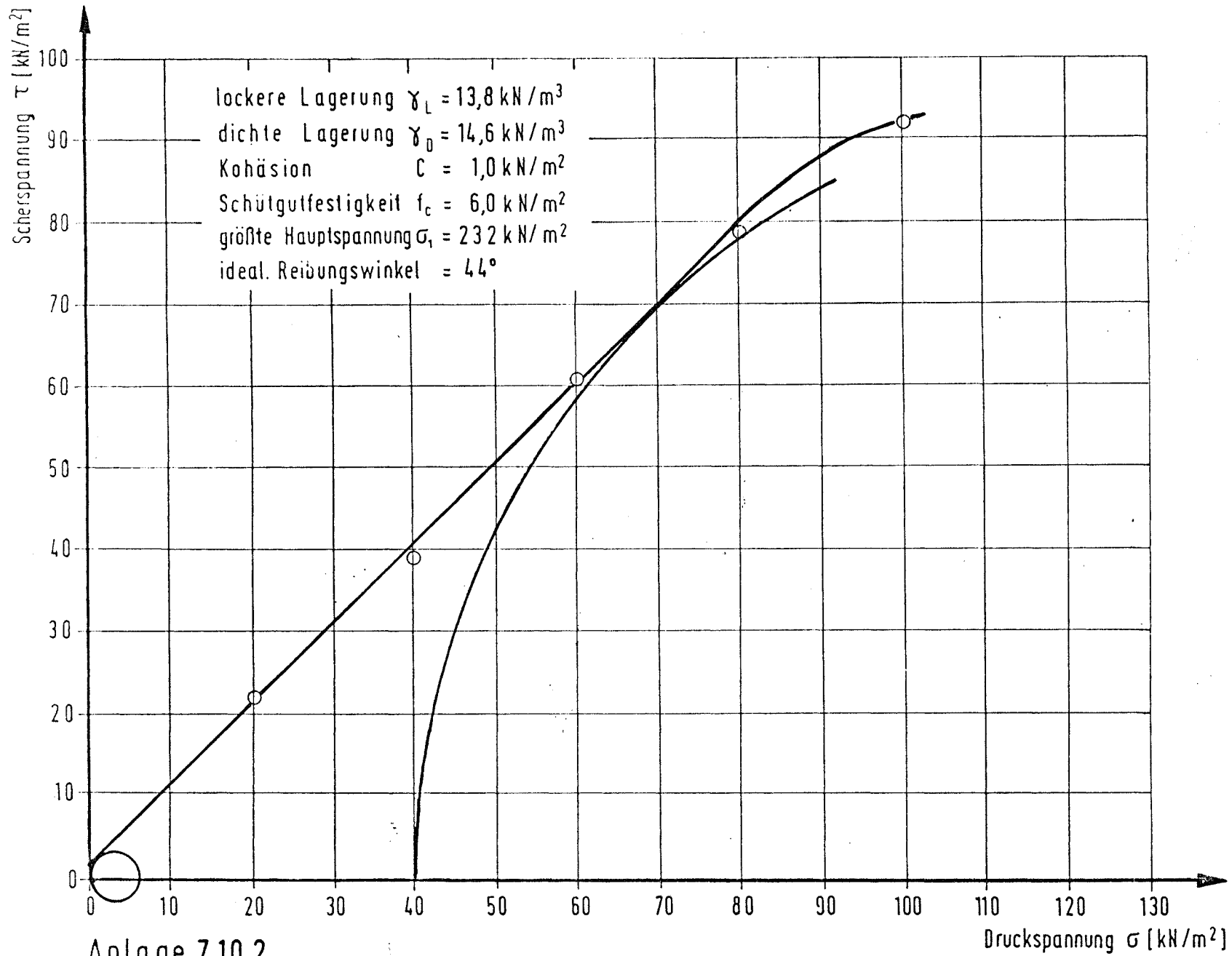
Anlage 7.9.2

Ergebnis der Scherversuche (10 kg Quarzsand 3-5 mm und 667g Bitumen (Rubol-7))



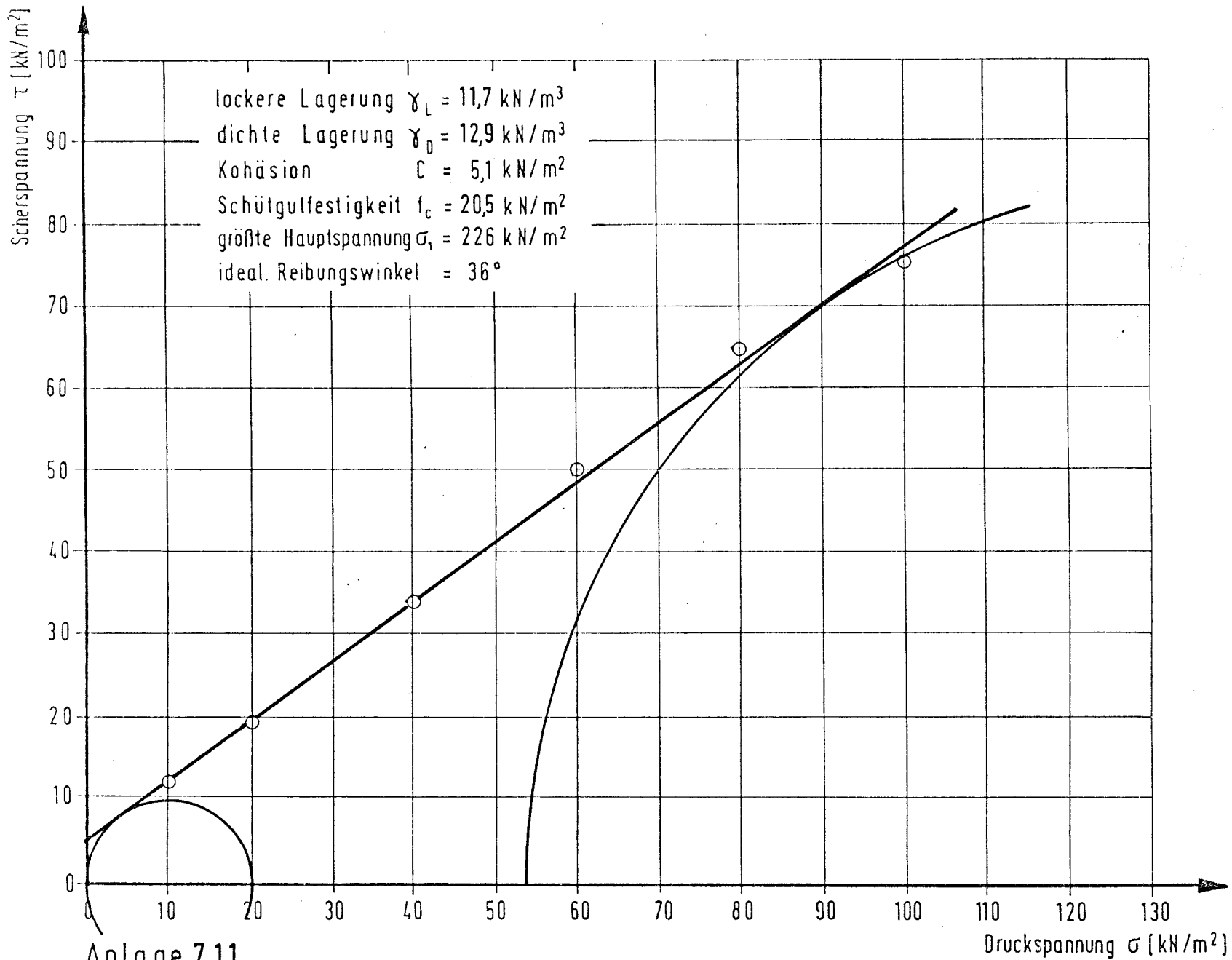
Anlage 7.10.1

Ergebnis der Scherversuche (10kg Quarzsand 3 - 5mm und 150g Sägekettenthaftöl)



Anlage 7.10.2

Ergebnis der Scherversuche (10kg Quarzsand 3-5mm und 500g Sägekettenthaftöl)



Anlage 7.11

Ergebnis der Scherversuche (Maschinenputz MP 75)