

Bauhaus - Universität Weimar
Fakultät Bauingenieurwesen
Professur Grundbau

Diplomarbeit

Thema:

Scherfestigkeit von stabilisiertem Geschiebemergel

eingereicht von Michael Köchler
geb. am 27.12.1975 in Bad Salzungen
Seminargruppe B/95/G

Reg.-Nr.: B/2001/201

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. K. J. Witt
Zweitprüfer: Dr.-Ing. R. Wendt

Ausgabedatum: 19.11.2001
Abgabedatum: 19.02.2002

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand an der Bauhaus-Universität Weimar in Zusammenarbeit mit der Firma Hermann Kirchner GmbH & Co. KG (Bad Hersfeld).

Der Dank gilt Prof. Dr.-Ing. K. J. Witt und Dr.-Ing. R. Wendt für die persönliche Beratung dieser Arbeit.

Der Firma Hermann Kirchner GmbH & Co. KG dankt der Verfasser für die gebotenen Möglichkeiten zur Durchführung der zahlreichen Versuche, welche für diese Arbeit notwendig waren. Besonders seien hier Herr Dipl.-Ing. Geologe T. Leister und die Mitarbeiter des Zentrallabors in Bad Hersfeld für ihre Unterstützung erwähnt.

Weimar, im Februar 2002

M. Köchler

Selbständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Weimar, den 12.02.2002

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	6
1.1 Einleitung	6
1.2 Problemstellung und Lösungsansätze	7
2 Grundlagen der Bodenstabilisierung	9
2.1 Allgemeines	9
2.2 Bodenmechanische Grundprinzipien	10
2.3 Einsatzgebiete	12
2.4 Anwendungshinweise	13
2.5 Herstellungsverfahren	15
3 Bodenstabilisierung mit verschiedenen Bindemitteln	17
3.1 Feinkalk	17
3.1.1 Zusammensetzung	17
3.1.2 Eigenschaften und Wirkungsweise	18
3.1.3 Verdichtungseigenschaften des Feinkalk-Boden-Gemenges	20
3.2 Zement	21
3.2.1 Zusammensetzung	21
3.2.2 Eigenschaften und Wirkungsweise	22
3.2.3 Verdichtungseigenschaften des Zement-Boden-Gemenges	23
3.3 Mischbinder	23
3.3.1 Zusammensetzung	23
3.3.2 Eigenschaften und Wirkungsweise	24
3.3.3 Verdichtungseigenschaften des Mischbinder-Boden-Gemenges	24
4 Untersuchung des zu stabilisierenden Bodens	25
4.1 Geologische Situation	25
4.2 Probenahme	25
4.3 Ermittlung der bodenmechanischen Kennwerte	26
4.3.1 Korngrößenverteilung	26
4.3.2 Organische Bestandteile	27
4.3.3 Kalkgehalt	27
4.3.4 Wassergehalt	28
4.3.5 Konsistenzgrenzen	28
4.3.6 Proctordichte ρ_{Pr} und optimaler Wassergehalt w_{Pr}	28
4.4 Zusammenfassung der Kennwerte	29

5 Versuchsdurchführung	31
5.1 Festlegung des Verdichtungsgrades	32
5.2 Entwurf der Versuchsmischungen	32
5.3 Rahmenscherversuche	33
5.3.1 Herstellung der Probekörper	33
5.3.2 Lagerung der Probekörper	35
5.3.3 Überprüfung der Probekörper	35
5.3.4 Ermittlung der Scherparameter φ' und c'	35
5.3.5 Beurteilung der Bruchbilder	38
5.4 Einaxiale Druckversuche	39
5.4.1 Herstellung der Probekörper	39
5.4.2 Lagerung der Probekörper	40
5.4.3 Überprüfung der Probekörper	40
5.4.4 Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeiten	40
5.4.5 Beurteilung der Bruchbilder	41
6 Versuchsergebnisse	43
6.1 Ergebnisse der Rahmenscherversuche	43
6.1.1 Auswertung der Scherspannungen	43
6.1.2 Auswertung der effektiven Scherparameter φ' und c'	44
6.1.3 Auswertung der Restscherfestigkeit	46
6.1.4 Vergleich Scherfestigkeit – Restscherfestigkeit	46
6.2 Ergebnisse der einaxialen Druckversuche	47
6.2.1 Statistische Betrachtungen der Ergebnisse	47
6.2.2 Auswertung der einaxialen Druckfestigkeiten	49
6.3 Ermittlung der Scherparameter aus dem einaxialen Druckversuch	50
7 Beurteilung der verwendeten Bindemittel	54
7.1 Stabilisierung mit Pectacrete	54
7.2 Stabilisierung mit DOROSOL C10	54
7.3 Stabilisierung mit Weißfeinkalk	55
7.4 Wirtschaftliche Aspekte	56
8 Zusammenfassung	57
 Literaturverzeichnis	 59
Tabellenverzeichnis	61
Abbildungsverzeichnis	62
Anlagenverzeichnis	63

1 Einführung

1.1 Einleitung

Das „Bauen mit und in der Erde“, sprich der Erdbau, gehört zu den ältesten Verfahren im Bauwesen und ermöglichte schon in der Antike das Bauen von Wegen und Dämmen. Der natürliche Boden wurde als Baustoff verwendet. Aber nicht immer war der verwendete Boden aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften für die geplante Baumaßnahme geeignet. Er ließ sich schlecht verarbeiten und verdichten. Tragfähigkeit, Stabilität und Widerstandsfähigkeit erfüllten nicht die gestellten Anforderungen. Ein Austausch des ungeeigneten Bodens durch einen Boden der die gewünschten Eigenschaften besaß, war meist zu aufwendig.

Daher wurden schon im Altertum Maßnahmen ergriffen, den natürlichen Boden in seinen physikalischen Eigenschaften dahingehend zu manipulieren, dass er die gestellten Anforderungen erfüllte. Die Bodenstabilisierung mit Kalk als Bindemittel wurde eingeführt.

Der großtechnische Einsatz der Bodenstabilisierung im Erdbau begann in den 40er Jahren des 20. Jahrhunderts. Im Zuge der fortschreitenden Verkehrsmobilisierung gewann der Wege- und Straßenbau immer mehr an Bedeutung. Die Widerstandsfähigkeit gegenüber Beanspruchungen aus Verkehr und Klima forderte dauerhaft tragfähige und stabile Verkehrswege. Dies konnte nur durch einen Straßenunterbau realisiert werden, welcher genügend tragfähig und dauerhaft witterungsbeständig war. Konnten natürliche Böden diesen Ansprüchen nicht gerecht werden, mussten sie mit Bindemitteln stabilisiert werden.

Eine Alternative zur Bodenstabilisierung ist der Bodenaustausch durch einen den gewünschten Anforderungen entsprechenden Ersatzboden. Da diese Verfahrensweise mit zusätzlichen Arbeitsschritten verbunden und damit gegebenenfalls unwirtschaftlich ist, wird ein Bodenaustausch nur angewendet, wenn der natürliche Boden für eine Bodenstabilisierung ungeeignet oder unwirtschaftlich ist.

Mit der stetigen technischen Entwicklung unserer Gesellschaft erhöhten sich die Anforderungen an die Verkehrswege Straße und Schiene. Sie veränderten sich sogar dahingehend, dass der Schwergüterverkehr immer mehr von der Schiene auf die Straße umgelagert wurde und analog dazu die Anforderungen an die Tragfähigkeit von Straßen stieg. Das Schienennetz wird mittlerweile von Hochgeschwindigkeitszügen befahren, welche extreme dynamische Beanspruchungen in den Schienenunterbau abgeben.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurden in den letzten Jahrzehnten Bodenstabilisierungen mit verschiedenen Bindemitteln durchgeführt. Es wurden Erfahrungen gesammelt, welches Bindemittel und welcher Bindemittelgehalt sich besonders gut für bestimmte Bodenarten eignen. Diese Erfahrungen lassen sich aber nicht standardmäßig katalogisieren. Anhand von Erfahrungswerten kann man für einen zu stabilisierenden Boden ein geeignetes Bindemittel und den richtigen Bindemittelgehalt abschätzen, aber eine entsprechende Eignungsprüfung des stabilisierten Bodens im Labor ist im allgemeinen unumgänglich.

1.2 Problemstellung und Lösungsansätze

Die Scherfestigkeit eines Bodens charakterisiert dessen Festigkeitseigenschaften. Sie wird für Stabilitätsnachweise in der Geotechnik benötigt. Wird die Scherfestigkeit überschritten, so verschiebt sich der Boden entlang einer oder mehrerer Flächen. Es kommt zum Bruch des Bodens. Das Verhältnis der wirkenden Spannungen im Bruchzustand ist in dem Bruchkriterium nach *Mohr-Coulomb* formuliert.

Die Gültigkeit des *Mohr-Coulomb*'schen Bruchkriteriums für einen mit Bindemittel stabilisierten Boden ist in dieser Arbeit zu untersuchen. Diese Untersuchung ist notwendig, um das Stoffverhalten eines solchen Bodens beurteilen zu können. Wenn das *Mohr-Coulomb*'sche Bruchkriterium gilt, kann die Scherfestigkeit eines mit Bindemittel stabilisierten Bodens analog zu einem natürlichen Boden experimentell ermittelt werden.

Die Scherparameter werden aus Großbrahmenscherversuchen an einem norddeutschen Geschiebemergel ermittelt. Es handelt sich hierbei um einen stark schluffigen Sand mit geringem Kieskornanteil. Die Bindemittelart, der Bindemittelgehalt sowie der Verdichtungsgrad des stabilisierten Bodens werden während der Versuche variiert. Der Einfluss dieser Eingangsparameter auf die Scherfestigkeit des Bodens soll untersucht werden.

Parallel zu den Großbrahmenscherversuchen werden einaxiale Druckversuche mit gleichen Randbedingungen durchgeführt. Die erhaltenen Ergebnisse sind mit denen der Großbrahmenscherversuche zu vergleichen. Es soll ein Zusammenhang der Versuchsergebnisse ermittelt werden. Dieser soll Aufschluss darüber geben, unter welchen Bedingungen die Kohäsion eines stabilisierten Bodens unter Annahme des Reibungswinkels aus einem einaxialen Druckversuch ermittelt werden kann. Der Vorteil daraus wäre die Verwendung des einaxialen Druckversuches um die Scherfestigkeit einer Bodenstabilisierung annähernd genau zu bestimmen.

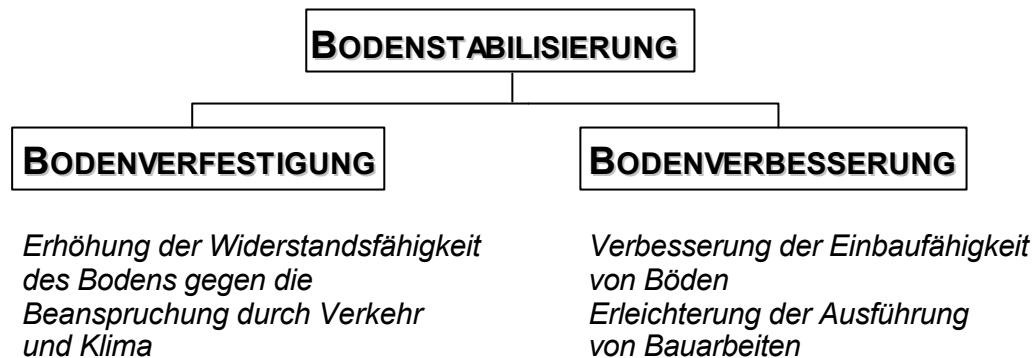
Zusammenfassend sollen in dieser Arbeit folgende Hypothesen bestätigt werden:

- (1) Die Scherfestigkeit eines stabilisierten Bodens ist von Bindemittelart, Bindemittelgehalt und Verdichtungsgrad abhängig. Sie wird mit zunehmenden Bindemittelgehalt und Verdichtungsgrad größer.
- (2) Die Scherfestigkeit vergrößert sich in Abhängigkeit der Kohäsion. Der Reibungswinkel bleibt gleich.
- (3) Das *Mohr-Coulomb*'sche Bruchkriterium ist für einen stabilisierten Boden gültig. Die Scherfestigkeit (Scherspannung beim Bruch des Bodens) vergrößert sich linear zur einwirkenden Belastung auf den Boden.
- (4) Aus einaxialen Druckversuchen kann bei bekannten Reibungswinkel des nichtkonditionierten Bodens die Kohäsion des stabilisierten Bodens abgeleitet werden.

2 Grundlagen der Bodenstabilisierung

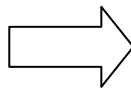
2.1 Allgemeines [1], [2], [3]

Die Stabilisierung von Böden hat seit Jahrzehnten als wirtschaftliche Bauweise einen festen Platz im Erdbau. Der Begriff der Bodenstabilisierung beinhaltet die Definitionen der Verfahren Bodenverfestigung und Bodenverbesserung nach ZTVE-StB 94.



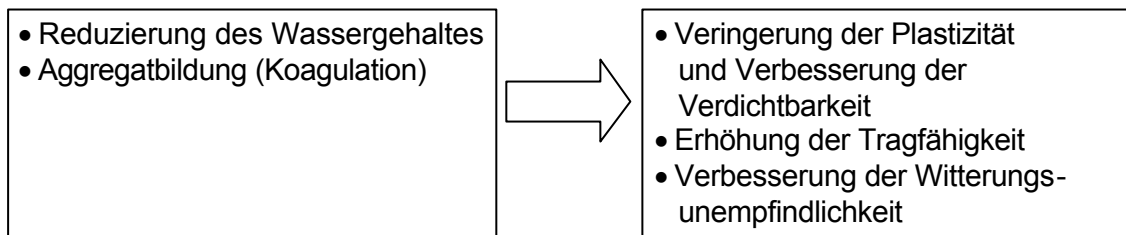
Bei einer **Bodenverfestigung** handelt es sich um eine Langzeitreaktion zwischen Boden und Bindemittel. Die Art der Reaktion der Verfestigung ist von dem angewendeten Bindemittel abhängig. Es wird unterschieden zwischen einer puzzolanischen Verfestigung (Feinkalk, Kalkhydrat) und einer hydraulischen Verfestigung (hochhydraulischer Kalk, Zement, hydraulische Mischbinder). Puzzolanische Verfestigungen laufen im Vergleich zu hydraulischen Verfestigungen wesentlich langsamer ab und weisen einen langsameren Festigkeitsanstieg, eine geringere Wärmeentwicklung und eine erhebliche Nacherhärtung auf. Eine hydraulische Verfestigung ist bereits nach 28 Tagen abgeschlossen, wobei keine wesentliche Nacherhärtung erfolgt. Die Bodenverfestigung führt im Vergleich zum unbehandelten Boden zu höheren mechanischen Festigkeiten, wie z.B.

- höhere Druckfestigkeiten
- höhere Scherfestigkeiten
- höhere Zugfestigkeiten



- Raumbeständigkeit
- dauerhafte Tragfähigkeit
- Wasser- und Frostbeständigkeit

Merkmal einer **Bodenverbesserung** ist eine Sofortreaktion zwischen Boden und Bindemittel (Feinkalk). Durch eine chemische Reaktion zwischen dem Calciumoxid (trocken) des Bindemittels und dem Wasser (flüssig) des Bodens entsteht Calciumhydroxid (trocken). Die hierbei auftretende starke Erwärmung des Bodens führt zu einem physikalischen Verdampfen von weiterem Wasser im Boden. Weiterhin entsteht durch die chemischen Reaktionen im Tonmineral und an den Grenzflächen des Tonminerals eine Aggregatbildung (Koagulation). Eine Bodenverbesserung führt somit zu folgenden bodenmechanischen Eigenschaften



2.2 Bodenmechanische Grundprinzipien [4], [5], [6]

Durch eine Bodenstabilisierung wird die Tragfestigkeit des Bodens erhöht, eine geringere Setzungsempfindlichkeit und eine bessere Einbau- und Verdichtungsfähigkeit erreicht.

Die Tragfähigkeit eines Bodens ist von der Scherfestigkeit τ_f abhängig. Die Scherfestigkeit ist der größte Scherwiderstand, der infolge einer dem Boden aufgezwungenen Schubbeanspruchung beim Bruch in Scherflächen oder Scherzonen überwunden werden muss. Sie ist von der Größe der Kohäsion (Haftfestigkeit) c und der inneren Reibung φ abhängig. Diese Abhängigkeit wird in der linearen Gleichung für die Darstellung der Scherfestigkeit nach *Coulomb*

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

mit

τ_f	Scherfestigkeit
c'	effektive Kohäsion
σ'	effektive Normalspannung (totale Spannung σ - Porenwasserdruck u)
φ'	effektiver Reibungswinkel

deutlich. Bei der Kohäsion unterscheidet man unter der „wahren“ und der „scheinbaren“ Kohäsion. Die „wahre“ Kohäsion hat ihre Ursache in bleibenden Kräften, die „scheinbare“ Kohäsion dagegen in nur zeitweilig wirkenden Kräften. Diese zeitweilig

wirkenden Kräfte sind Kapillarkräfte, welche unter Wassersättigung im Boden verschwinden. Sie wird auch als Kapillarkohäsion c_c bezeichnet und sollte beispielsweise bei der Beurteilung der Tragfähigkeit einer Straßenkonstruktion nicht angesetzt werden.

Da nichtbindige (rollige) Böden keine Kohäsion ($c = 0$) besitzen, entsteht deren Scherfestigkeit nur durch Reibung:

$$\tau_f = \sigma' \cdot \tan \varphi' \quad (2)$$

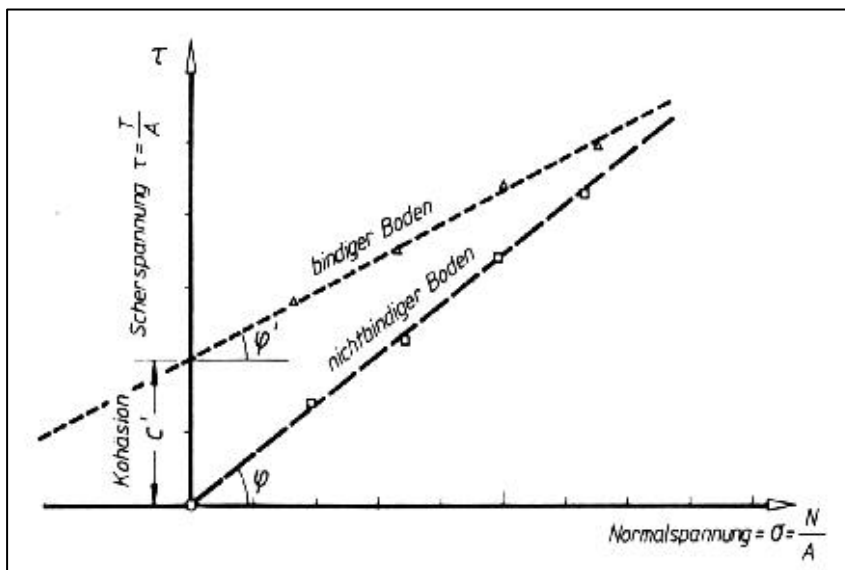


Bild 2.1:
Schergerade im
 τ - σ -Diagramm [5]

Um die Scherfestigkeit, und somit auch die Tragfähigkeit von nichtbindigen Böden zu erhöhen, wird eine künstliche Kohäsion durch Zugabe eines Bindemittels geschaffen. Das Bindemittel verkittet die einzelnen Bodenkörner untereinander punktförmig (s. Bild 2.2). Bei bindigen Böden kann durch diese Maßnahme ebenfalls die schon vorhandene Kohäsion und dementsprechend die Tragfähigkeit erhöht werden.

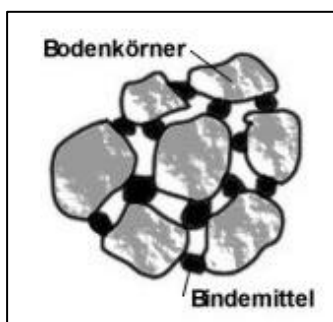


Bild 2.2: Durch Bindemittel verkittete Bodenkörner

Kohäsion und Reibungswinkel eines Bodens verringern sich mit zunehmendem Wassergehalt. Dies kann durch Bodenstabilisierungen verhindert werden, da ein Boden durch die Zugabe von Bindemitteln (s. Kap. 2.1) wasserbeständig wird.

2.3 Einsatzgebiete [4], [7]

Stabilisierungsmaßnahmen werden angewendet zur Verbesserung und Verfestigung von Böden des Untergrundes (anstehender Boden), Unterbaues (Dammschüttung) oder von Tragschichten, Wegen und weiteren Verkehrsflächen. Solche Verkehrsflächen können sein:

- Bundesautobahnen, Bundesstraßen, Landesstraßen, Kreisstraßen,
- Kommunale Straßen
- Land- und forstwirtschaftliche Wege
- Start-, Lande- und Rollbahnen auf Flugplätzen
- Gleisanlagen
- Parkplätze, Betriebshöfe
- Ausstellungsgelände, Sportplätze

Unter anderem werden Stabilisierungsmaßnahmen erfolgreich eingesetzt bei

- Erhöhung der Bodenpressung unter Bauwerken im Lastausbreitungsbereich
- Verlegung von Rohrleitungen
- Dämmen im Wasserbau
- Abdichtung von Industrieanlagen zum Schutz des Grundwassers
- Baustellentransportwegen
- Stabilisierung von Böschungen
- Schutzmaßnahmen für das Erdplanum
- Stabilisierung mit Kalkpfählen (z.B. bei schadhafte Straßen mit wasserhaltigem Unterbau oder Untergrund)

und im Bereich der Umweltgeotechnik um schädliche Stoffe mit Kalk zu binden bei gleichzeitiger

- Verbesserung der Tragfähigkeit von Mülldeponien
- Verfestigung von Klärschlamm.

2.4 Anwendungshinweise [4], [8]

Die geforderten Schichtdicken von Bodenstabilisierungen hängen von den Verkehrslasten und den Eigenlasten der darüber liegenden Schichten ab.

Die Mindestschichtdicken sind verfahrensabhängig. Sie betragen beim Baumischverfahren (mixed-in-place) 15 cm und beim Zentralmischverfahren (mixed-in-plant) 12 cm.

Die Höchstschichtdicken werden durch die Leistungsfähigkeit der Misch-, Einbau- und Verdichtungsgeräte begrenzt (i.A. 40 cm / Einbaulage).

Die Einsatzarten der verschiedenen Bindemittel für die einzelnen Bodenarten sind vereinfacht aus Bild 2.3 ersichtlich. Neben dem Verlauf der Körnungslinien haben auch die plastischen Eigenschaften sowie die Konsistenz bindiger Böden Einfluss auf die Anwendung des Bindemittels. So sind beispielsweise Böden mit $I_p \geq 15 \%$ und $w_L \geq 40 \%$ für eine Verfestigung im Sinne der ZTVT – StB 95 mit Zement ungeeignet.

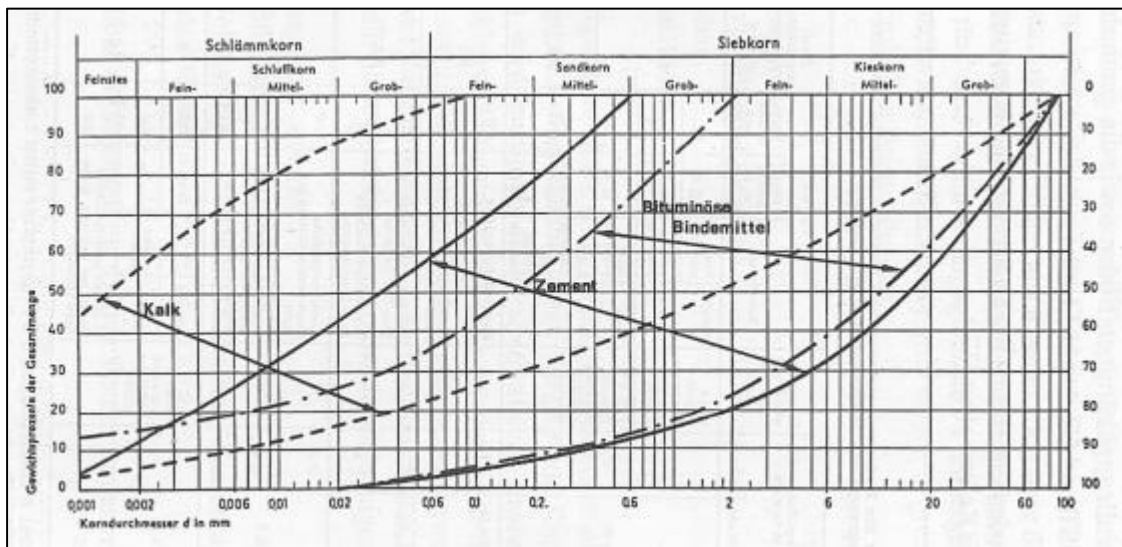


Bild 2.3: Körnungsbereiche für die Stabilisierung von Böden mit verschiedenen Bindemitteln [4]

Die erforderliche Bindemittelzugabe ist in Abhängigkeit von Bindemittelart, vom zu verbessernden Bodenmaterial und der gewünschten Qualität (Frostwiderstand, Druckfestigkeit) in Eignungsprüfungen zu bestimmen. Die für die Eignungsprüfungen erforderlichen Bindemittelgehalte sind aus den Tafeln 2.1 und 2.2 ersichtlich.

Tabelle 2.1: Richtwerte für den Bindemittelanteil von Bodenverfestigungen mit Zement [7]

Bodenart nach DIN 18 196	Zementmenge (Gew.-%) bezogen auf das Trockengewicht des Bodens
Boden (ZTVV), GW, GI, GE, SW, SI	4 bis 7
SE	8 bis 12
GU, GT, SU, ST	6 bis 10
GU*, GT*, SU*, ST*	7 bis 12
UL, TL	7 bis 12
UM, TM *), TA *)	10 bis 16

*) bedingt bearbeitbar

Tabelle 2.2: Kalkarten und Richtwerte für Kalkmengen bei der Bodenverbesserung und Bodenverfestigung [1]

Anwendungsart	Kalkmenge *) (Gew.-%) bezogen auf das Trockengewicht des Bodens		
	Feinkalk	Kalkhydrat	Hochhydraul. Kalk
Bodenverbesserung (Hauptziel: Sofortwirkung)	2 bis 4	2 bis 5	2 bis 8
Bodenverfestigung (Hauptziel: Langzeitwirkung)	4 bis 6	4 bis 8	4 bis 12

*) Unter- und Überschreitungen sind regional möglich

Bei Bodenverfestigungen mit bituminösen Bindemitteln sind etwa 3 bis 7 Gew.-% der trockenen Bodenmenge erforderlich.

Aus Tabelle 2.3 sind die Kriterien für die Bestimmung der Bindemittelmenge bei einer Eignungsprüfung ersichtlich.

Es sei angemerkt, dass hochhydraulischer Kalk und Kalkhydrat heute in der Praxis kaum noch zum Einsatz kommen.

Tabelle 2.3: Kriterien für die Bestimmung der Bindemittelmenge (Zement, Tragschichtbinder, hydraulischer Kalk) bei der Eignungsprüfung für eine frostbeständige Bodenverfestigung von groben, feinen und gemischtkörnig Böden [9]

Zeile	Bodengruppe	Frostwiderstand ²⁾	Druckfestigkeit ¹⁾
1	SW-SI-SE GW-DI-GE	-	Zement und Tragschichtbinder HT 35 4,0 N/mm ² im Alter von 7 Tagen oder 6,0 N/mm ² im Alter von 28 Tagen
2	SU-ST-GU-GT ³⁾ und die Böden der Zeile 1, die brüchiges, poröses oder angewittertes Korn enthalten	$\frac{\Delta l}{l} \leq 1 \text{ ‰}$	wie Zeile 1 oder Hydraulischer Kalk HL 5, Tragschichtbinder HT 15 6,0 N/mm ² im Alter von 28 Tagen
3	SU*-GU*-UL-UM ST*-GT*-TL-TM-TA	$\frac{\Delta l}{l} \leq 1 \text{ ‰}$	-
4	Industrielle Nebenprodukte	$\frac{\Delta l}{l} \leq 1 \text{ ‰} \text{ } ^{4)}$	6,0 N/mm ² im Alter von 28 Tagen

¹⁾ Diese Druckfestigkeiten dienen nur zur Festlegung des Bindemittelgehaltes und beziehen sich auf einen Probendurchmesser von 10 cm

²⁾ Hebung der Probe

³⁾ Anforderung an den Frostwiderstand nur, wenn nach Abschnitt 2.3.3.1 zu F2 gehörig. Sonst nur Prüfung der Druckfestigkeit

⁴⁾ Wenn die Frostbeständigkeit des industriellen Nebenproduktes nicht außer Zweifel steht

2.5 Herstellungsverfahren [4]

Grundsätzlich wird zwischen zwei Herstellungsverfahren bei der Bodenstabilisierung unterschieden.

Beim **Baumischverfahren (mixed-in-place)** wird der zu stabilisierende Boden gleichmäßig vorverdichtet und ein profilgerechtes Planum hergestellt. Steine mit einem Durchmesser von mehr als 63 mm sind z.B. mit Eggen zu entfernen, um ein geräteschonendes und unterbrechungsfreies Arbeiten zu gewährleisten. Der Boden muss frostfrei sein. Das Bindemittel wird mittels Streugeräten auf dem Planum verteilt. Bei starkem Wind ist das Verteilen einzustellen. Es ist vorteilhaft das Planum vor dem Verteilen aufzulockern.

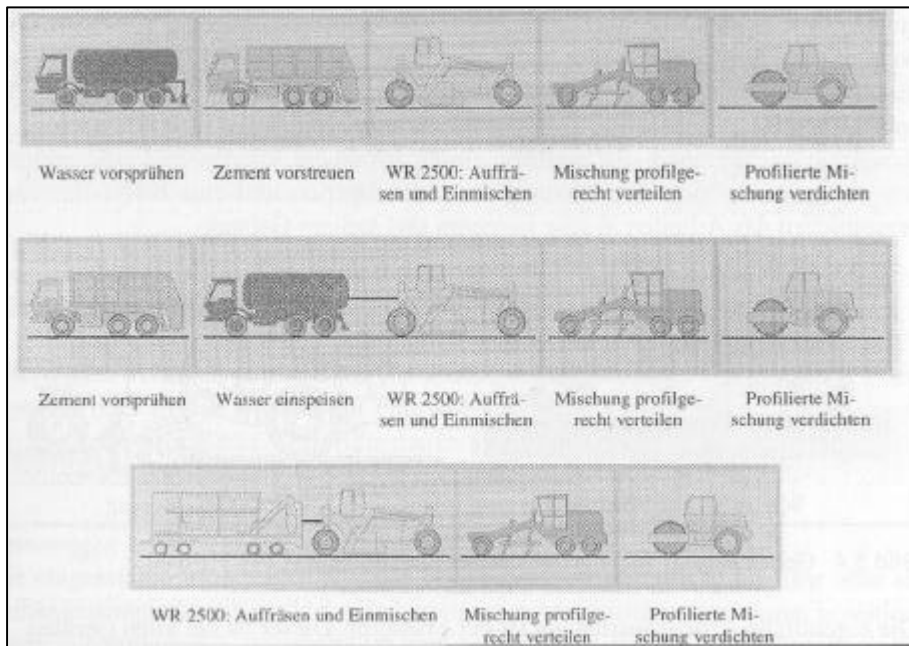


Bild 2.4:
Stabilisieren
von Böden mit
Zementen [4]

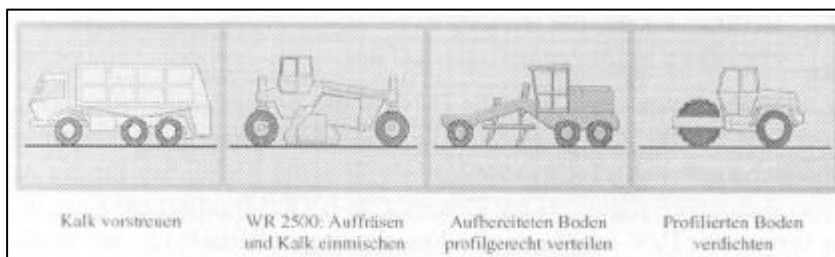


Bild 2.5:
Stabilisieren von
Böden mit Kalken [4]

Der folgende Arbeitsschritt ist das Einmischen bzw. Einfräsen des Bindemittels in den Boden. Dies soll grundsätzlich unmittelbar nach dem Verteilen erfolgen. Zur entsprechenden Verdichtung noch erforderliches Wasser muss während des Mischens oder unmittelbar vorher zugegeben werden. Anschließend erfolgt das Planieren und Verdichten des Boden-Bindemittel-Gemisches mittels Grader und Walzen.

Für das **Zentralmischverfahren (mixed-in-plant)** wird der Boden mit dem Bindemittel und dem noch erforderlichen Wasser in einer zentralen Mischanlage gemischt. Dies erfolgt sowohl in Chargen- als auch in Durchlaufmischern. Das fertige Boden-Bindemittel-Gemisch kann mit einem LKW transportiert werden, sollte aber mit Planen vor Austrocknung und Vernässung geschützt werden. Der Einbau des Materials erfolgt meist mit Gradern. Bei besonderen Anforderungen an profilgerechte Lage und Ebenheit kommen Straßenfertiger zum Einsatz. Die geforderte Verdichtung des stabilisierten Bodens erfolgt mit Walzen.

3 Bodenstabilisierung mit verschiedenen Bindemitteln

3.1 Feinkalk

3.1.1 Zusammensetzung [3], [10]

Aus dem Segment der Feinkalke wurde Weißfeinkalk der Kalk- und Zementwerke Otterbein verwendet. Nach der DIN 1060 wird der verwendete Weißfeinkalk als Weißkalk 80 (CL 80) bezeichnet. Dieser Kalk gehört zu den ungelöschten Kalken. Für die Herstellung wird Kalkstein in Ringschachtöfen gebrannt und anschließend in Kugelmøhlen auf die genormte Mahlfineinheit gebracht. Die Chemische Reaktion beim Brennen ist folgende



Eine genaue chemische Zusammensetzung des verwendeten Weißfeinkalkes ist der Anlage 72 zu entnehmen.

Nach DIN 1060 muss ein Weißfeinkalk folgenden Kriterien genügen:

- Gehalt an $\text{CaO} + \text{MgO} \geq 80,0$ Gew.-%
davon $\text{MgO} \leq 10,0$ Gew.-%
- Gehalt an $\text{CO}_2 \leq 0,5$ Gew.-%
- Kornfeinheit: 0 Gew.-% auf Prüfsiebgewebe 0,63 nach DIN 4188
 $\leq 10,0$ Gew.-% auf Prüfsiebgewebe 0,09 nach DIN 4188
- Ergiebigkeit je 10 kg Feinkalk: $\geq 26,0 \text{ dm}^3$

Weiterhin sind die Anforderungen an die Reaktionsfähigkeit des Feinkalks mit Wasser nach dem entsprechenden Arbeitsblatt der Deutschen Kalkindustrie nachzuweisen, die da wären

- Temperaturmaximum $T_{\text{max}} > 60^\circ\text{C}$
- Reaktionszeit für 80 %igen Umsatz des löschbaren Kalkes $t_u < 15 \text{ min}$

Der verwendete Weißfeinkalk erfüllt alle geforderten Kriterien.

3.1.2 Eigenschaften und Wirkungsweise [1], [3], [11], [12]

Wird Weißfeinkalk bei einer Bodenstabilisierung in den Boden eingefräßt und vermischt, so reagiert er mit dem Porenwasser des Bodens. Bei dieser Reaktion wird dem Boden Wasser entzogen und die Bodenstruktur und Tonmineraleigenschaften verändern sich. Durch die Reduzierung des Wassergehaltes und die Krümelbildung des Bodens (Koagulation) werden folgende Eigenschaften erreicht:

- Verringerung des Wasseraufnahmevermögens
- Verbesserung der Plastizitätseigenschaften
- Verbesserung der Verdichtbarkeit
- Erhöhung der Tragfähigkeit

Detailliert betrachtet laufen bei der Stabilisierung mit ungelöschem Feinkalk eine Sofort- und danach eine Langzeitreaktion ab.

Als Sofortreaktion bezeichnet man die Reduzierung des Porenwassers und die Krümelbildung des Bodens während der Feinkalk untergemischt wird. Die Ursache der Wasserreduzierung ist die chemische exotherme Reaktion des Porenwassers im Boden mit dem Calciumoxid des Feinkalkes. Als Reaktionsprodukt entsteht unter Wärmeabgabe Calciumhydroxid, welches einen festen Aggregatzustand besitzt.



Diese chemische Reaktion zieht eine physikalische Reaktion nach sich, bei der weiteres Porenwasser im Boden durch die erzeugte Wärme verdampft.

Grund für die Krümelbildung ist eine Zusammenballung der Tonteilchen im Boden-Feinkalk-Gemisch. Dies ist auf einen Ionenaustausch in den Tonmineralen zurückzuführen, bei dem sich Natriumionen aus den Tonmineralen gelöst und meist durch Calciumionen ersetzt werden. Voraussetzung ist ein Feinkornanteil $d \leq 0,063 \text{ mm}$ des Bodens von mindestens 15 Gew.-%.

Bei der oben genannten Langzeitreaktion, der langsamen Aushärtung des mit Feinkalk stabilisierten Bodens, handelt es sich um eine puzzolanische Reaktion. Das noch vorhandene Porenwasser reagiert mit dem bei der Sofortreaktion entstandenen Calciumhydroxid und den Tonsäuren im Boden (Silicat- und Aluminat-Mineralen), wobei sich der pH-Wert des Bodens erhöht. Dieser Vorgang im Boden lässt sich in vier Stadien beschreiben (Bild 3.1).

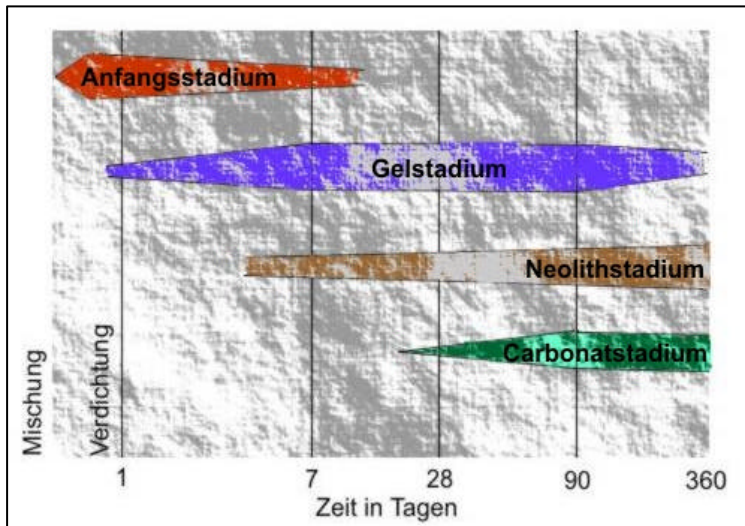


Bild 3.1: Reaktionsstadien der Langsamreaktion

- Anfangsstadium:

Kalkhydrat dissoziiert in Ca^{2+} - und OH^- -Ionen. Es kommt zu einem Kationenaustausch zwischen dem Kalkhydrat und den Tonmineralen, welcher eine Mineralumbildung des Kalkhydrats verursacht.

- Gelstadium:

Gelmaterial verkittet die Mineralkörner und verändert die Porenstruktur. Man vermutet, dass sich in diesem Stadium die geringere Wasseraufnahme und der höhere Wasserwiderstand herausbilden. Weiterhin vermutet man, dass man es bei der Substanz im Gelstadium mit tobermoritartigen Calcium-Silicat-Hydraten zu tun hat.

- Neolithstadium:

Das Gelmaterial kristallisiert nun langsam zu Neolith. Dieses Stadium wird als Festigkeitsbildend bezeichnet. Der Wasserwiderstand ist geringer als in den vorigen Stadien.

- Carbonatstadium:

Für das Entstehen von Calciumcarbonat wird Kohlendioxid aus der Luft benötigt. Der Kohlendioxidgehalt in der Erdatmosphäre beträgt 0,03 %. Da in den stabilisierten Boden keine Luft und somit auch kein CO_2 eindringen kann, hat dieses Stadium im Erbau keine weitere Bedeutung.

Brandt hat die beschriebenen Stadien an Dünnschliffen des verfestigten Kalkerdstoffes untersucht (Bild 3.2).

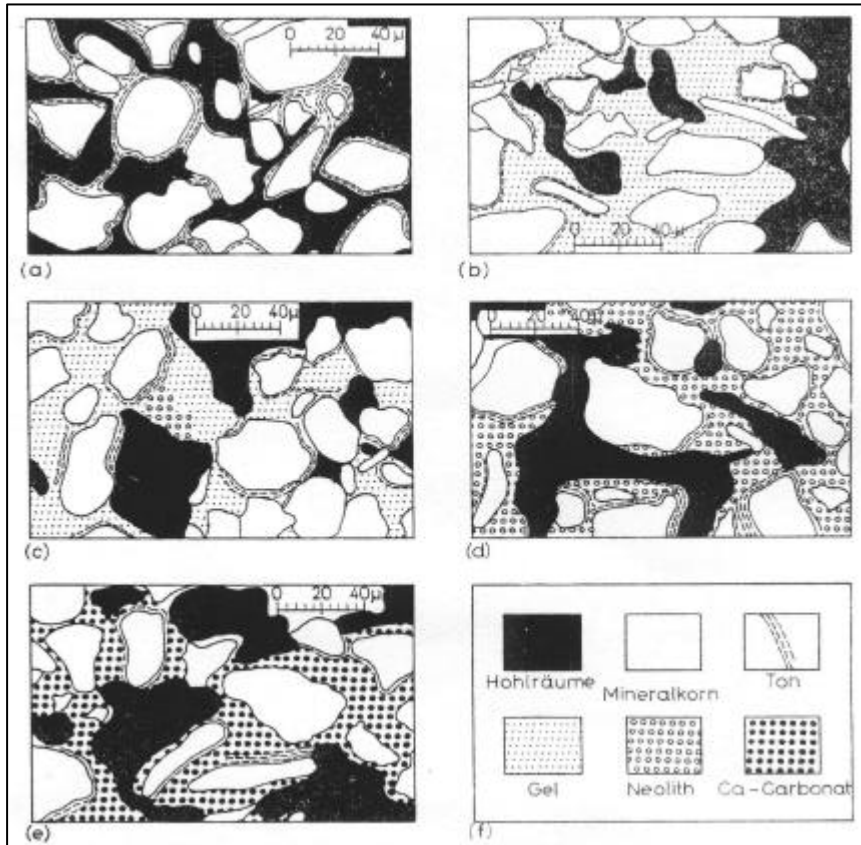


Bild 3.2: Mikroskopaufnahmen von Dünnschliffen des verfestigten Kalkerdstoffes
 (a) unbehandelter Erdstoff (b) Gelstadium (c) Beginn der Neolithbildung
 (d) ausgebildetes Neolithstadium (e) Carbonatstadium (f) Legende [12]

Der Kornaufbau des Bodens ändert sich so, dass das Wasseranlagerungsverhalten vermindert wird. Der stabilisierte Boden wird frostbeständiger.

3.1.3 Verdichtungseigenschaften des Feinkalk-Boden-Gemenges

Wie aus zahlreichen Eignungsprüfungen an kalkstabilisierten Böden bekannt, verändert sich die Proctorkurve mit zunehmendem CaO-Gehalt dahingehend, dass der optimale Wassergehalt w_{pr} größer und die Proctordichte ρ_{pr} kleiner wird. Diese Eigenschaft resultiert aus der Strukturänderung des stabilisierten Bodens, bei der das Wasser zur Hydratation benötigt wird und sich die Beweglichkeit der koagulierten Teilchen verringert.

Bei den durchgeführten Proctorversuchen des Weißfeinkalk-Boden-Gemenges mit Bindemittelgehalten von 2, 4 und 6 Gew.-% konnten die oben beschriebenen Veränderungen der Proctorwerte bestätigt werden. Die Proctorversuche wurden gemäß der TP BF-StB, Teil B 11.5 „Eignungsprüfung bei Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Feinkalk und Kalkhydrat“ Ausgabe 1991 durchgeführt.

Die Versuchsergebnisse sind den Anlagen 18 – 23 zu entnehmen.

3.2 Zement

3.2.1 Zusammensetzung [3], [13]

Der verwendete Zement „Pectacrete“ der Zementwerke Deuna ist ein hydrophober (wasserabstoßender) Portlandzement CEM I 32,5 R (DIN 1164-1). Dieser Spezialzement wird durch Brennen eines feingemahlenen Gemenges von Kalkstein und Ton bzw. Mergel bis zur Sinterung hergestellt. Dem gebrannten „Zementklinker“ wird beim Feinmahlen Gipsstein oder Anhydrit (bis 5 M.-%) zur Verzögerung der sehr kurzfristigen Erstarrungszeiten und ca. 0,2 % Stearinsäure als hydrophobe Substanz zugegeben.

Die wesentlichen Komponenten der Zementklinker sind:

- Tricalciumsilicat C_3S (45 – 80 M.-%)
- Dicalciumsilicat C_2S (0 – 32 M.-%)
- Tricalciumaluminat C_3A (7 – 15 M.-%)
- Calciumaluminatferrit $C_2(A, F)$ (4 – 14 M.-%)

mit $C = CaO$, $S = SiO_2$, $A = Al_2O_3$ und $F = Fe_2O_3$. Die genannten Komponenten werden aus Kalkstein (CaO -Träger), Bundsandstein/Quarzsand (SiO_2/Al_2O_3 -Träger) und Walzenzunder (Fe_2O_3 -Träger) gewonnen.

Eine detaillierte Zusammensetzung des hydrophoben Zements „Pectacrete“ ist der Anlage 73 zu entnehmen.

3.2.2 Eigenschaften und Wirkungsweise [3]

Der Spezialzement „Pectacrete“ erhält seine hydrophobe Eigenschaft durch die bei der Herstellung zugegebene Stearinsäure. Die Stearinsäure umhüllt die Zementpartikel, welche dadurch eine wasserabstoßende Wirkungsweise erhalten. Durch diese Eigenschaft ist der Zement gegen Feuchtigkeit (Luft, Niederschläge) unempfindlich und praktisch unbegrenzt lagerfähig. Erst beim Mischvorgang (Einarbeiten in den Boden) werden die wasserabstoßenden Hüllen aus Stearin zerstört und die Zementkörner können mit dem Porenwasser im Boden reagieren (Hydratation).

Berührt das Porenwasser des Bodens ein Zementkorn, beginnen sogleich aus dessen Kornoberfläche faserförmige und aus gerollten Folien bestehende Kristalle mit filzartiger Struktur in den wassergefüllten Porenraum zu wachsen. Diese Kristalle bilden unter gleichzeitiger Abscheidung von größeren Kalkhydratkristallen eine „gelartige“ Substanz, das Zementgel. Dieser Vorgang wird „Erstarren des Zementleims“ genannt. Durch die neugebildeten Hydratphasen (CSH-Phasen) der äußeren Gelschicht, den Gelporen, diffundiert weiteres Wasser bis zu dem noch nicht hydratisierten Kern des Zementkorns. Dadurch wird das gesamte Zementkorn in weitere Hydratphasen umgewandelt. Dieser Vorgang ist das Erhärten. Das Erhärten kann sich je nach Größe des Zementkorns und dem Feuchtigkeitsangebot über Tage, Monate bis zu mehreren Jahren erstrecken.

Die Wirkungsweise von Zement ist für feinkörnige Böden (Schluffe und Tone) und grobkörnige Böden (Fein- bis Mittelsande) verschieden.

In feinkörnigen Böden entstehen durch die Hydratation des Zements starke Bindungen zwischen den Mineralkörnern. Diese bilden eine verkittete Masse (Matrix), die die ungebundenen Bodenkörner einschließt. Die zellenförmige Struktur dieser Matrix bestimmt die Festigkeit des stabilisierten Bodens, da die Festigkeit der Tonteilchen innerhalb der Matrix gering ist. Die Matrix fixiert die Bodenkörner, wodurch die Plastizität kleiner und die Scherfestigkeit größer wird.

In grobkörnigen Böden verhält sich die zementierende Wirkung ähnlich wie bei Beton mit dem Unterschied, dass die Porenräume des Bodens nicht vollständig mit Zementleim ausgefüllt werden. Die Körner werden nur punktförmig verkittet. Dadurch entsteht keine kontinuierliche Matrix im Korngefüge. Die zementierende Wirkung ist bei einer ungleichförmigen Körnungslinie besonders groß. Da die Porenräume durch viele verschiedenen Korngrößen kleiner sind und mehr Körner im Gefüge Platz haben, sind auch mehr Berührungspunkte und damit auch Verkittungspunkte vorhanden.

3.2.3 Verdichtungseigenschaften des Zement-Boden-Gemenges

Für den mit „Pectacrete“ verbesserten Boden wurde ein Proctorversuch mit einem Bindemittelgehalt von 6 Gew.-% durchgeführt. Diese Untersuchung sollte Aufschluss darüber geben, ob die Zementmengen den optimalen Wassergehalt sowie die Proctordichte beeinflusst.

Der Proctorversuch an dem Boden-Zement-Gemisch mit jeweils 6 Gew.-% „Pectacrete“ wurden gemäß den „Technischen Prüfvorschriften für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln“ (TP HGT-StB 94) durchgeführt.

Die Versuchsergebnisse sind aus den Anlagen 16 und 17 ersichtlich.

Es konnte keine wesentliche Veränderung der Proctorwerte im Vergleich zum unbehandelten Boden festgestellt werden.

3.3 Mischbinder

3.3.1 Zusammensetzung [14]

Unter Mischbinder versteht man ein Spezialbindemittel, welches aus Branntkalk, Zement und weiteren Zusatzstoffen besteht. In diesen Spezialbindemitteln sollen die Vorteile von Branntkalk und Zement vereint werden.

Bei dem verwendeten Mischbinder handelt es sich um das Produkt DOROSOL C10 der Firma Dornburger Zement. DOROSOL C10 setzt sich aus gebranntem Ölschiefer (DIN 1060), Weißfeinkalk (DIN 1060), Portlandzementklinker (DIN 1164) und unterschiedlichen Kalksteinmehlen zusammen. Dieser Mischbinder besitzt bei einer abgestuften Kornverteilung eine hohe Mahlfeinheit. Die optimale Zusammensetzung der verschiedenen Ausgangsprodukte kann werksmäßig auf den zu stabilisierenden Boden abgestimmt werden.

Eine Beschreibung der genauen chemische Zusammensetzung von DOROSOL C10 ist aufgrund der Geheimhaltung seitens des Herstellers leider nicht möglich. Nur die Ziffer in der Produktbezeichnung (in diesem Fall 10) steht für den prozentualen Anteil des Weißfeinkalks.

3.3.2 Eigenschaften und Wirkungsweise

Der Mischbinder DOROSOL C vereint die Eigenschaften von ungelöshtem Kalk und Portlandzement. Er besitzt aufgrund des Portlandzementes hydraulische Eigenschaften. Eine Anwendung ist bei fast allen Bodenverhältnissen möglich. Wird der Mischbinder DOROSOL C in den Boden eingearbeitet, ist eine Koagulation der Bodenkörner zu erkennen. Diese Eigenschaft resultiert aus dem anteiligen Weißfeinkalk. Durch diesen Effekt ist eine gute Verdichtbarkeit und eine relativ frühzeitige Verfestigung der stabilisierten Fläche gewährleistet. Weiterhin wird die Tragfähigkeit des stabilisierten Bodens durch die hydraulischen Anteile des Mischbinders erhöht. Diese „Verfestigung“ ist wie bei Zement nach 28 Tagen abgeschlossen. Danach führt die puzzolanische Langsamreaktion (s. Kap. 3.1.2) zu einer geringfügigen Nacherhärtung, welche erst nach Jahren abgeschlossen ist. Weiterhin ist durch die Verfestigung des Bodens mit dem Mischbinder eine höhere Raum- und Frostbeständigkeit gegenüber dem unbehandelten Boden zu verzeichnen.

Detailliert betrachtet, verkitten die Bodenkörner durch den Zementleim wie bei der Stabilisierung mit Zement punktförmig. Es entsteht eine Matrix, welche die ungebundenen Mineralkörner im Inneren zusammenhält.

Das Erstarren des Zementleimes verläuft wie bei Portlandzement (s. Kap. 3.2.2)

3.3.3 Verdichtungseigenschaften des Mischbinder-Boden-Gemenges

Auch bei dem mit dem Mischbinder DOROSOL C10 stabilisiertem Boden wurde eine Untersuchung der Proctorwerte bei einem Bindemittelgehalt von 6 Gew.-% durchgeführt.

Der Proctorversuch wurde nach den „Technischen Prüfvorschriften für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln“ (TP HGT-StB 94) durchgeführt, da der Mischbinder DOROSOL C10 in erster Linie ein hydraulisches Bindemittel ist.

Aus den erhaltenen Versuchsergebnissen (s. Anlagen 14 und 15) ist eine nur geringfügige Änderung der Proctorwerte im Vergleich zum unbehandelten Boden erkennbar.

4 Untersuchung des zu stabilisierenden Bodens

4.1 *Geologische Situation* [15], [16]

Die Lagerstätte des zu untersuchenden Bodens befindet sich an einem Bauabschnitt der sich im Bau befindlichen Bundesautobahn A20 Hamburg – Stettin, ca. 10 km östlich von Neubrandenburg in Mecklenburg-Vorpommern.

Das Flachland in Mecklenburg-Vorpommern ist durch Ablagerungen der letzten beiden Eiszeiten (Saale-Glazial und Weichsel-Glazial) geprägt. Die Lagerstätte befindet sich in einer flachwelligen Landschaft, welche typisch für eine Grundmoränenlandschaft des Pleistozäns ist. Ebenfalls wurde der Ackerbau als typische Bodenbewirtschaftung der Grundmoränenlandschaft angetroffen. Die aus Geschiebelehm und Geschiebemergel bestehende Grundmoräne erreicht Mächtigkeiten von wenigen Zentimetern bis über 100 m.

Bei dem Geschiebemergel handelt es sich um ein glaziales, klastisches, unverfestigtes Sediment (Lockergestein). Da diese Bodenart durch Eis verfrachtet und abgelagert wurde, spricht man von einem Kondensationsrückstand. Kennzeichnend für den Geschiebemergel ist ein Gemisch aller Korngrößen von haushohen Blöcken bis zur Korngröße des Tons.

4.2 *Probenahme*

Die Prüfung des zu stabilisierenden Bodens (norddeutscher Geschiebemergel) machte eine Entnahme von Bodenmaterial notwendig. Für die Probekörper der Einaxial- und Rahmenscherversuche wurden ca. 750 kg Bodenmaterial benötigt. Für die Klassifizierung des Bodens wurde die Güteklasse 3 für Bodenproben nach DIN 4021 festgelegt, da auch der natürliche Wassergehalt bestimmt werden sollte. Die Probenahme konnte somit „gestört“ erfolgen.



Bild 4.1: Probenahme an der Trasse der zukünftigen BAB A20

An der geplanten Entnahmestelle bei Neubrandenburg in Mecklenburg-Vorpommern wurde das Bodenmaterial durch einen Baggerschurf entnommen. Zuerst wurden der obere Bodenhorizont (Mutterboden) und der Übergangsboden entfernt. Dann konnte das gewünschte Bodenmaterial aus einer Tiefe von 1,5 m unter Geländeoberkante entnommen werden. Der Boden wurde in Mörtelkübel verladen, welche anschließend mit Folie luftdicht verschlossen wurden. So konnte ein Austrocknen des Bodens und somit eine Veränderung des natürlichen Wassergehaltes weitgehend verhindert werden. Die Mörtelkübel wurden dann in das Bodenlabor transportiert und frost- und hitzesicher gelagert.

4.3 Ermittlung der Bodenmechanischen Kennwerte [17], [18]

4.3.1 Korngrößenverteilung

Für die Bestimmung der Korngrößenverteilung wurde eine kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse nach DIN 18123 durchgeführt, da der Boden augenscheinlich einen leicht bindigen Zustand aufwies und ebenfalls die Kornfraktionen des Sand- und Kieskorn enthalten waren.

Die Bodenprobe (ca. 100 g) wurde mit destilliertem Wasser zu einer Suspension aufgerührt (ca. 24 h Rührzeit) nachdem vorab der Wassergehalt bestimmt wurde. Dann wurden die Feinbestandteile $d < 0,063$ mm durch eine Nasssiebung von dem restlichen Material getrennt. Der Siebrückstand wurde bis zur Massenkonstanz im Trockenofen rückgetrocknet und anschließend gesiebt. Die Suspension der abgeschlämmten Feinbestandteile wurde für die Schlämmanalyse verwendet.

Die Ergebnisse der kombinierten Sieb- und Schlämmanalyse sind aus den Anlagen 1 – 4 ersichtlich.

Aus der Kornverteilungslinie ist zu lesen, dass es sich um einen schwach kiesigen Fein- bis Mittelsand mit stark schluffigen und tonigen Kornanteilen handelt. Dieser Boden wird nach DIN 18196 als SU* klassifiziert.

Der sehr ungleichförmige Verlauf ($U = 130 > 15$) der Kornverteilungslinie ist typisch für glaziale Ablagerungen wie Geschiebemergel.

4.3.2 Organische Bestandteile

Für die Bestimmung pflanzlicher und tierischer Bestandteile im Boden wurde ein Glühverlust nach DIN 18128 durchgeführt. Hierbei wurde bis zur Massenkonzanz rückgetrocknetes Bodenmaterial im Mörtel zerkleinert und in feuerfesten Tiegeln bei ca. 550 °C zwei Stunden geglüht.

Die Versuchsergebnisse sind aus der Anlage 8 ersichtlich. Da der Glühverlust V_{gl} unter 5 % liegt, handelt es sich hier um einen anorganischen Boden. Daraus ist zu schließen, dass das entnommene Probenmaterial nicht mehr dem organogenen Übergang zum humösen Mutterboden angehört.

4.3.3 Kalkgehalt

Die Bestimmung des Kalkgehaltes V_{ca} des Bodens wurde mit dem CO₂-Gasometer nach DIN 18129 durchgeführt. Mit diesem Gerät wird das bei der chemischen Reaktion von Salzsäure und dem Karbonat des Bodens entstehende Kohlendioxid volumetrisch gemessen.

Die Ergebnisse aus diesem Versuch sind in der Anlage 9 enthalten. Mit dem errechneten Kalkgehalt von ca. 10 % lässt sich dieser Boden als stark kalkhaltig einstufen. Pleistozäne Ablagerungen wie z.B. Geschiebemergel sind meist kalkhaltig.

4.3.4 Wassergehalt

An dem zu untersuchenden Bodenmaterial wurde eine Wassergehaltsbestimmung durch Ofentrocknung nach DIN 18121 T.1 durchgeführt.

Die dazugehörigen Ergebnisse sind aus der Anlage 7 ersichtlich. Der natürliche Wassergehalt, sprich das Porenwasser des Bodens, beträgt im Schnitt $w = 16,8 \%$. Der prozentuale Wert für den Wassergehalt bezieht sich auf das Trockenraumgewicht des Bodens.

4.3.5 Konsistenzgrenzen

Bindige und gemischtkörnige Böden ändern mit dem Wassergehalt ihre Zustandsform. Je höher der Wassergehalt, umso flüssiger bzw. breiiger ist ihre Zustandsform. Nimmt der Wassergehalt ab, so ändert sich auch die Zustandsform über einen plastischen bis hin zu einem steifen Zustand. Die Übergänge zwischen den verschiedenen Zuständen sind von *Atterberg* festgelegt worden. Es handelt sich hierbei um die Atterbergschen Grenzen (Zustandsgrenzen) oder auch Konsistenzgrenzen. Der Übergang vom flüssigen in den plastischen Zustand wird als Fliesgrenze mit dem Wassergehalt w_L , der Übergang vom plastischen zum halbfesten Zustand als Ausrollgrenze mit dem Wassergehalt w_P , und der Übergang vom halbfesten zum festen Zustand als Schrumpfgrenze mit dem Wassergehalt w_S bezeichnet.

Die Bestimmung der Atterbergschen Grenzen erfolgt nach DIN 18122. Die dazugehörigen Ergebnisse sind aus den Anlagen 10 und 11 ersichtlich.

Der Boden liegt im Plastizitätsdiagramm im Übergangsbereich vom leichtplastischen Ton TL zum starktonigen Sand ST* (s. Anl. 10). Dieser Bereich ist charakteristisch für Geschiebemergel.

4.3.6 Proctordichte ρ_{Pr} und optimaler Wassergehalt w_{Pr}

Durch den Proctorversuch wird die Proctordichte ρ_{Pr} und der optimale Wassergehalt w_{Pr} eines Bodens bei einer vorgegebenen Verdichtungsarbeit W ($0,6 \text{ MNm/m}^3$) ermittelt. Die Proctordichte ist die maximal mögliche Lagerungsdichte des durch die vorgegebene Arbeit verdichteten Bodens. Sie ist nur bei optimalem Wassergehalt w_{Pr} erreichbar.

Der Proctorversuch wird nach DIN 18127 durchgeführt. Die dazugehörigen Ergebnisse sind aus den Anlagen 12 und 13 ersichtlich.

Die ermittelten Proctorwerte von $\rho_{pr} = 1,98 \text{ g/cm}^3$ und $w_{pr} = 10,9 \%$ liegen im Bereich eines tonigen Sandes und charakterisieren somit einen Geschiebemergel.

4.4 Zusammenfassung der Kennwerte

Die experimentell ermittelten bodenmechanischen Kennwerte wurden für eine Klassifizierung des zu stabilisierenden Bodens mit Grenzwerten aus der Literatur verglichen (Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1: Vergleich mit den Kennwerten nach von Soos

		Kennwerte nach v. Soos	Ermittelte Kennwerte
Korngrößenverteilung			
< 0,06 mm	%	20 - 40	53
< 2,0 mm	%	> 70	96
Ungleichförmigkeitszahl			
U		30 - 500	130
Plastizitätsgrenzen des Kornanteils < 0,04 mm			
w_L	%	20 - 50	24,8
w_p	%	16 - 30	14,2
I_p	%	4 - 30	10,5
natürlicher Wassergehalt w	%	8 - 20	16,8
Proctorwerte			
ρ_{pr}	t/m ³	1,70 – 2,00	1,96
w_{pr}	%	12 - 19	10,9

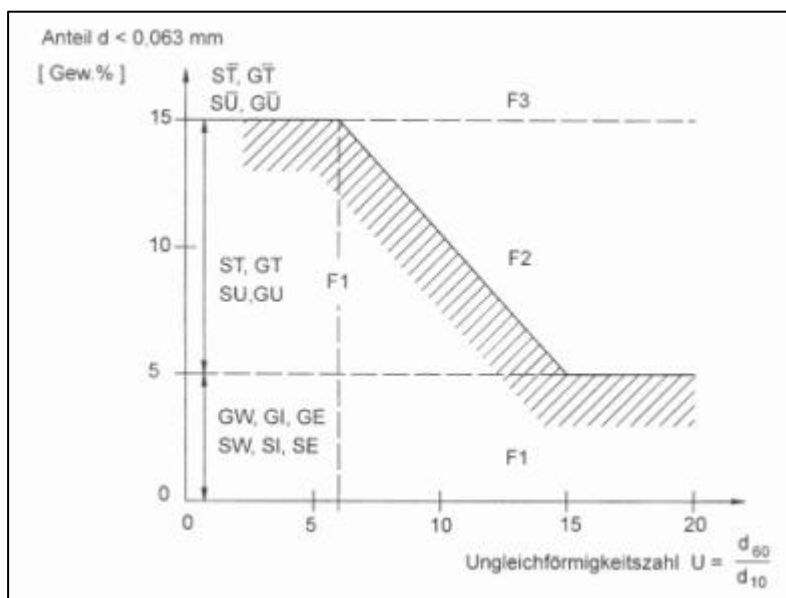
Bis auf leichte Abweichungen liegen die ermittelten Werte in den nach von Soos ermittelten Grenzwerten eines SU* bzw. ST*. Daraus lassen sich weitere nicht experimentell ermittelte Kennwerte ableiten (Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2: Weitere Kennwerte nach von Soos und Pörschmann¹

Wichte γ [kN/m ³]	18,0 – 21,5
Wichte unter Auftrieb γ' [kN/m ³]	9,0 – 11,0
Reibungswinkel (effektiv) φ' [°]	25 – 32
Kohäsion (effektiv) c' [kN/m ²]	7 – 25
Durchlässigkeitskoeffizient k [m/s]	$2 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-9}$
Steifemodul E_S [MN/m ²]	$6 - 50$) ¹

Der zu stabilisierende Boden wird nach DIN 18300 in die Boden- und Felsklasse 4 ($I_C = 0,76 > 0,5$; $w_L = 24,8 \% \leq 50 \%$; $d > 63\text{mm} = 0 \% < 30 \%$) eingestuft. Er zählt somit zu den mittelschwer lösbaeren Bodenarten.

Mit einem Feinkornanteil von $d = 0,063 \text{ mm} > 15 \%$ wird der Boden nach ZTVE-StB 94, Tab. 1 in die Frostempfindlichkeitsklasse F3 (sehr frostempfindlich) eingestuft.

**Bild 4.2:** ZTVE-Klassifizierung nach der Frostempfindlichkeit [18]

5 Versuchsdurchführung [17], [19], [20]

Im Rahmen der Versuchsdurchführung sollten die Scherparameter φ und c sowie die einaxialen Druckfestigkeiten σ des mit verschiedenen Bindemitteln, Bindemittelgehalten und Proctordichten stabilisierten Geschiebemergels ermittelt werden. Die ermittelten Kennwerte dienen später bei der Versuchsauswertung für die Beschreibung des Stoffverhaltens eines stabilisierten Bodens.

Die Scherparameter wurden durch Direktscherversuche im Großrahmenschergerät nach dem Entwurf der DIN 18137-3, die einaxialen Druckfestigkeiten aus einaxialen Druckversuchen nach DIN 18136 ermittelt. Weiterhin wurden die verschiedenen Versuchsparameter der entsprechenden technischen Prüfvorschriften für stabilisierte Böden berücksichtigt.

Um die erforderliche Bodenmenge für die Prüfkörper zu ermitteln, wurde die Anzahl der benötigten Prüfkörper festgelegt. Für die einaxialen Druckversuche wurden von jeder Bodenrezeptur (gleiches Bindemittel, gleicher Bindemittelgehalt und gleiche Proctordichte) jeweils drei gleiche Prüfkörper benötigt. Die einaxiale Druckfestigkeit ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel der gemessenen Werte der Teilversuche. Für die Rahmenscherversuche wurden ebenfalls je Versuch drei gleichartige Probekörper benötigt. Es wurde allerdings nur ein Versuch mit den jeweils verschiedenen Herstellungsparametern (Bindemittelart, Bindemittelgehalt und Proctordichte) durchgeführt, da der sonst erforderliche Versuchsaufwand den Rahmen dieser Arbeit gesprengt hätte. Dementsprechend war bei der Herstellung der Probekörper für die Rahmenscherversuche und bei der Durchführung der Rahmenscherversuche auf äußerste Genauigkeit zu achten, da nicht genügend Versuchsergebnisse zur Bildung eines arithmetischen Mittelwertes verfügbar waren. Die Anzahl der benötigten Probekörper mit der sich daraus ergebenden Bodenmenge ist von verschiedenen Herstellungskriterien abhängig.

Tabelle 5.1: Ausgangsparameter für die Herstellung der Probekörper

[illegible]

Bei der Gegenüberstellung der verschiedenen Ausgangsparameter in Tabelle 5.1 ergeben sich 20 verschiedene Herstellungskriterien. Daraus ergeben sich jeweils 60 Versuchskörper für die Rahmenscherversuche und die einaxialen Druckversuche.

Um die erforderliche Bodenmenge für die Versuchsdurchführung zu ermitteln, wurden die Gewichtsmassen für die Probekörper der Rahmenscherversuche mit 11 kg (mit den Abmessungen in mm: 300/300/50) und der einaxialen Druckversuche mit 2,2 kg (mit den Abmessungen in mm: 120/Ø100) je Probekörper großzügig abgeschätzt. Daraus ergab sich eine Gesamtmasse von 792 kg. Da weiteres Material für die Klassifizierung des Bodens und seine Verdichtungseigenschaften benötigt wurde, wurden ca. 850 kg Bodenmaterial beschafft.

5.1 Festlegung des Verdichtungsgrades

Für die Untersuchungen an dem stabilisiertem Geschiebemergel wurden in Absprache mit dem Laborleiter der Hermann Kirchner GmbH & Co. KG die Verdichtungsgrade mit $D_{pr} = 0,95$ und $D_{pr} = 0,98$ festgelegt. Im Erdbau wird nach ZTVE StB 94 im allgemeinen ein Verdichtungsgrad von $D_{pr} \geq 0,95$ bis 1,0 m unter Planum gefordert.

5.2 Entwurf der Versuchsmischungen

Für die Herstellung der Probekörper konnten die im Vorfeld zur Untersuchung der Verdichtungseigenschaften des Bindemittel-Boden-Gemenges ermittelten Proctorwerte (s. Kap. 3) herangezogen werden. Daraus wurden die für die verschiedenen Bindemittel erforderlichen Wassergehalte bei den Verdichtungsgraden von $D_{pr} = 0,95$ und $D_{pr} = 0,98$ entnommen.

Da sich bei der Anwendung von Zement und Mischbinder mit zunehmenden Bindemittelgehalt die Proctorwerte nur unwesentlich ändern, wurden zur Vereinfachung des Versuchsablaufes die arithmetischen Mittel der entsprechenden Proctorwerte verwendet.

Die Bindemittelgehalte sind in Anlehnung an die empfohlenen Richtwerte für Bodenstabilisierungen (s. Kap. 2.4) mit dem Laborleiter der Hermann Kirchner GmbH & Co. KG mit 2, 4 und 6 Gew.-% festgelegt worden.

5.3 Rahmenscherversuche

5.3.1 Herstellung der Probekörper

Für die Scherversuche im Großrahmenschergerät mussten für die Teilversuche am stabilisierten Boden 54 Probekörper hergestellt werden, welche anschließend 28 Tage in der Klimabox aushärten mussten. Bei den restlichen 6 Teilversuche am unbehandelten Boden konnte das Bodenmaterial direkt in den Scherkasten des Großrahmenschergerätes eingebaut werden, so dass die Versuche unmittelbar danach durchgeführt werden konnten.

Der Scherkasten des verwendeten Großrahmenschergerätes besitzt eine Grundfläche von 300 x 300 mm. Dementsprechend mussten die Probekörper mit der gleichen Grundfläche hergestellt werden. Für die Höhe der Probekörper wurden 50 mm gewählt. Hierbei wurden nach der E DIN 18137-3 folgende Kriterien beachtet:

Seitenlänge des quadratischen Grundrisses $60 \text{ mm} < a < 400 \text{ mm}$

Probenhöhe $H = 5\text{fache des größten Korndurchmessers}$
 $< 10 \text{ mm}$

Verhältnis $H / a < 1/3$

Für die Probekörper wurden Schalformen aus Stahl mit den entsprechenden Abmessungen hergestellt.

Für die Aufbereitung des Bodens wurde ca. 33 kg Boden (für einen Scherversuch mit 3 Probekörpern) durch Darren langsam bis unterhalb des für die Proben benötigten Wassergehaltes rückgetrocknet, da der natürliche Wassergehalt zu hoch war. Dabei wurde der Boden immer wieder mit einem Spachtel vorsichtig aufgelockert, damit die Bodenfeuchte relativ gleichmäßig entweichen konnte. Nachdem der durch den Trockenvorgang erwärmte Boden abgekühlt war, wurde der Wassergehalt bestimmt. Mit dem erhaltenen Wassergehalt und der vorher bestimmten Feuchtmasse wurde die Trockenmasse des Bodens berechnet

$$m_d = m / (1+w) \quad (5)$$

Nachdem die fehlende Differenz Δw auf den gewünschten Wassergehalt des Bodens errechnet wurde, konnte mit diesem Betrag die erforderliche Zugabemenge des fehlenden Wassers bestimmt werden

$$m_w = \Delta w * m_d \quad (6)$$

Das fehlende Wasser wurde anschließend dem Boden während des Mischvorganges (Dauer 30 s) im Zwangsmischer zugegeben. Nach dem Mischen wurde der Boden mit feuchten Tüchern abgedeckt und bis zum nächsten Tag abgestellt. So konnte sich der Wassergehalt im Boden gleichmäßig einstellen.

Nachdem der Boden den gewünschten Wassergehalt erreicht hatte, konnte er mit dem entsprechenden Bindemittel vermischt werden. Dazu wurde mit dem gewünschten Bindemittelgehalt bezogen auf die Trockenmasse des Bodens die entsprechende Bindemittelmenge berechnet

$$\text{Bindemittelgehalt} * m_d = m_{\text{Bindemittel}} \quad (7)$$

und dem Boden zugegeben. Das Gemisch wurde dann mit dem Zwangsmischer bei einer Mischzeit von 90 Sekunden hergestellt. Zwischendurch wurde der Zwangsmischer angehalten, um verfestigte Klumpen von Hand zu zerkleinern.

Für die Probekörperherstellung wurde das aufbereitete Bodengemisch in zwei Lagen in die Schalformen eingebaut und mit Proctorenergie verdichtet. Die Schalformen waren mit Folie ausgelegt, um später ein problemloses Ausschalen des Probekörpers zu gewährleisten. Da es keine vorgegebene Schlagzahl für den verwendeten Proctorhammer mit quadratischer Grundplatte gab, wurde diese aus dem Proctorversuch abgeleitet.

Für den Proctorversuch mit dem Proctortopf Typ A ($h/d = 120/100$ [mm]) sind mit dem entsprechenden Proctorhammer (runde Grundplatte $d = 50$ mm) 25 Schläge je Lage nötig. Die Grundplatte des Proctorhammers deckt die zu verdichtende Fläche genau 4mal ab. Da die Maße und das Fallgewicht des verwendeten Proctorhammers identisch sind, kann mittels der Flächenverhältnisse korreliert werden. Der verwendete Proctorhammer mit quadratischer Grundplatte (65×65 [mm]) deckt die zu verdichtende Fläche (300×300 [mm]) genau 21,3mal ab. Aus dieser Beziehung wurden rund 134 Schläge je Lage ermittelt.

Im Anschluss an die Verdichtung der ersten Lage wurde diese aufgeraut, um eine kraftschlüssige Verbindung mit der zweiten Lage zu gewährleisten.

Nach Fertigstellung eines Probekörpers wurde dieser mit der Schalform in der Klimabox für eine Dauer von 3 Tagen gelagert. Nach Ablauf der 3tägigen Verfestigung des Probekörpers wurde dieser ausgeschalt und in einen 50 mm hohen Stahlrahmen gelegt. Anschließend wurde das überstehende Material bis auf die Höhe von 50 mm vorsichtig abgeschabt, um eine plane Oberfläche des Probekörper zu erhalten. Durch die

plane Oberfläche soll eine Beschädigung des Probekörpers während der späteren Lastaufbringung verhindert werden. Der so bearbeitete Probekörper wurde dann wieder für die restlichen 25 Tage in der Klimabox eingelagert.

Nach dem beschriebenen Herstellungsablauf wurden alle Probekörper hergestellt, wobei nur die Bindemittelgehalte, die Bindemittelarten und die Wassergehalte variiert wurden.

5.3.2 Lagerung der Probekörper

Die fertiggestellten Probekörper wurden in einer Klimabox die ersten 3 Tage in der Schalform und anschließend nach dem Ausschalen für weitere 25 Tage gelagert. Somit betrug die Aushärtungszeit insgesamt 28 Tage bei 98 % relativer Luftfeuchtigkeit und einer Temperatur von $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$.

5.3.3 Überprüfung der Probekörper

Die Probekörper wurden vor dem Einbau in das Schergerät augenscheinlich auf Risse und Beschädigungen überprüft. Wenn kleinere Fehlstellen am Probekörper auftraten, konnten diese mit Gips ausgebessert werden.

5.3.4 Ermittlung der Scherparameter φ' und c'

Die Scherparameter φ' und c' wurden experimentell aus Rahmenscherversuchen (Direkte Scherversuche) mit dem Großrahmenschergerät SP-303-E der Firma Wille Geotechnik (s. Bild 5.1) ermittelt.



Bild 5.1: Großrahmenschergerät SP-303-E von Wille Geotechnik

Die Versuchsdurchführung erfolgte in Anlehnung an die E DIN 18137-3. Es wurden 3 Einzelversuche mit unterschiedlichen Auflasten durchgeführt. Die Auflasten wurden in Absprache mit dem Laborleiter der Hermann Kirchner GmbH & Co. KG festgelegt. Da für die Untersuchungen keine konkrete Baumaßnahme vorlag, wurde sich für Auflasten von 100, 200 und 300 kN/m² entschieden. Ähnlich dem Kompressionsversuch wirken die Auflasten vertikal auf die Probe, welche seitlich durch den Scherkasten in einer seitlichen Ausdehnung behindert wird. Am Boden des unteren Scherkastens befindet sich ein Filterstein, so dass sich Porenwasserdrücke in der Probe ausgleichen können.

Der Scherkasten des Schergerätes ist in einen unteren und einen oberen Scherkasten geteilt, welche von dem Scherspalt getrennt sind. Die Gesamthöhe beider Scherkästen beträgt 200 mm. Da die verwendeten Probekörper nur 50 mm hoch sind, musste mit Füllplatten aus PVC gearbeitet werden. Für den Einbau des Probekörpers wurde der obere Scherkasten mit Hilfe eines Kleinkranes (Laufkatze) abgebaut. Dann wurde der untere Scherkasten soweit mit den Füllplatten aus PVC bestückt, dass der untere Scherkasten nur noch eine Tiefe von 24 mm besaß. Jetzt konnte der Probekörper in den Scherkasten eingebaut werden, so dass er die restlichen 26 mm nach oben frei stand. Daraufhin wurde der obere Scherkasten vorsichtig auf den herausstehenden Probekörper aufgesetzt. Der Scherspalt zwischen den oberen und untern Scherkasten ist variabel. Er wurde auf 1 mm eingestellt. Die Gesamthöhe des Probekörpers unterteilte sich nun so, dass sich 24 mm im unteren Scherkasten und 24 mm im oberen Scherkasten befanden. Der Scherspalt und die spätere Scherfuge konnten sich genau in halber Höhe des Probekörpers einstellen. Der obere Scherkasten wurde dann soweit mit Füllplatten aus PVC bestückt, bis die Auflastvorrichtung ordnungsgemäß aufgebaut werden konnte.

Die Auflast wurde dann mit einer Belastungsänderung von 20 kN/m² aufgebracht. Mit dem Aufbringen der Last begann gleichzeitig die Konsolidierung des Probekörpers. Bei den stabilisierten, mit Proctorenergie verdichteten und erhärteten Probekörpern wurde eine Setzung von Null angenommen. Dies bestätigte sich dann auch bei den Messungen während der Lastaufbringung. Die gemessenen Setzungen bewegten sich im Bereich eines hundertstel Millimeters. Die Konsolidierungsdauer in dem Messprogramm des Schergerätes wurde mit einem Abbruchkriterium begrenzt. Die Konsolidation wurde abgebrochen, wenn innerhalb von 5 min keine Setzungsänderung von $\Delta s = 0,1$ mm erfolgte. Die Konsolidation war damit spätestens 5 min nach Erreichen der Endbelastung abgeschlossen.

Anschließend wurde der Abschervorgang des Probekörpers gestartet. Der untere Scherkasten wurde dabei mit konstanter Geschwindigkeit gegenüber dem oberen gezogen. Die Schergeschwindigkeit war dabei so zu wählen, dass im Probekörper kein

Porenwasserüberdruck entsteht. Da die Probekörper keine Setzungen aufwiesen, konnte somit auch kein Porenwasserüberdruck entstehen.

Der Erfahrungswert der Schergeschwindigkeit für nichtbindige Böden, welche ebenfalls eine sehr geringe bis vernachlässigbar kleine Zusammendrückbarkeit besitzen, beträgt $v = 10 \text{ mm/h} = 0,17 \text{ mm/min}$. Dementsprechend wurde sich für eine Schergeschwindigkeit von $v = 0,2 \text{ mm/min}$ entschieden. Dabei war es wichtig, dass alle Einzelversuche eines Versuchs mit der gleichen Schergeschwindigkeit durchgeführt wurden, da die Scherfestigkeit einiger Böden von der Spannungsänderungsgeschwindigkeit abhängig ist.

Während des Abschervorganges wurden die Scherspannung τ kontinuierlich vom Versuchsprogramm berechnet und über den gemessenen Scherweg s aufgetragen. Die Scherspannung τ errechnet sich dabei aus folgender Gleichung

$$\tau = \frac{T}{b \cdot (b - s)} \quad (8)$$

mit T = Scherkraft
 b = Kantenlänge des Probekörpers
 s = Scherweg

Die maximal gemessene Scherspannung τ wird als die Scherfestigkeit τ_f bezeichnet.

Zeichnet man die aus den 3 Teilversuchen ermittelten Bruchfestigkeiten mit den dazugehörigen Normalspannungen aus den Auflasten in einem $\tau - \sigma$ - Diagramm ein, so müssen die 3 Versuchspunkte nach der *Mohr-Coulomb*'schen Bruchbedingung ziemlich genau auf einer Geraden liegen (s. Bild 5.2).

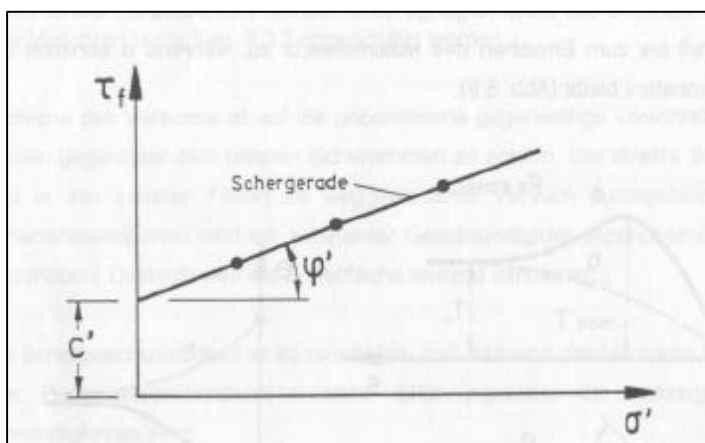


Bild 5.2: Scherfestigkeit bei verschiedenen Normalspannungen [17]

Die Gleichung dieser Geraden ist in Kapitel 2.2 näher erläutert. Aus dieser Gleichung können die wirksamen Scherparameter c' und φ' ermittelt werden.

Die Versuchsprotokolle der Rahmenscherversuche sind in den Anlagen 24 – 43 zusammengestellt.

5.3.5 Beurteilung der Bruchbilder

Nach Beendigung eines Scherversuches wurde der obere Scherkasten wieder abgebaut, um den abgesicherten Probekörper wieder zu entfernen. Dabei wurde das Bruchbild, welches sich beim Abscheren einstellte beurteilt.

Bei Probekörpern mit geringeren Festigkeiten stellte sich eine fast ebene Bruchfläche ein (s.Bild 5.3). Daraus konnten auch die geringen Setzungsunterschiede während des Abscherens erklärt werden.

Die Probekörper mit den höheren Festigkeiten wurden dagegen nicht auf der gesamten Fläche zerstört. Hier bildete sich eine relativ kleine Bruchfläche, welche vom Scherspalt aus schräg nach oben zur Oberfläche des Probekörpers verlief. Die Scherfuge wählte sich hier den „kürzesten Widerstandsweg“. Deshalb war hier nach dem Bruch des Probekörpers meist ein erneuter Anstieg der Scherspannung zu verzeichnen, da der Scherkasten wieder den vollen Querschnitt des Probekörpers als Angriffsfläche besaß.

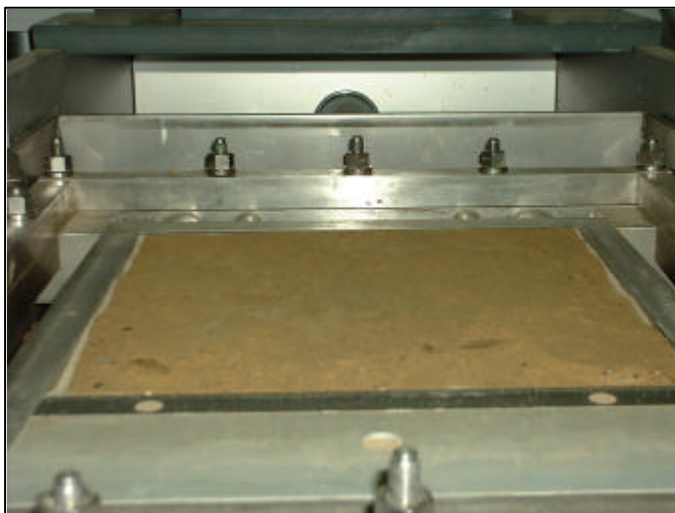


Bild 5.3: Scherfläche eines abgesicherten Probekörpers

5.4 Einaxiale Druckversuche

5.4.1 Herstellung der Probekörper

Für die Herstellung von 3 Probekörpern mit den gleichen Ausgangsparametern (Verdichtungsgrad, Bindemittelart und -gehalt) wurden ca. 6,6 kg Boden analog der Bodenaufbereitung bei der Herstellung der Probekörper für die Rahmenscherversuche (s. Kap. 5.3.1) mit dem erforderlichen Wassergehalt und dem erforderlichen Bindemittelgehalt zu dem einbaufertigen Boden-Bindemittel-Gemisch hergestellt.

Als Schalform für die Probekörper wurde der Proctortopf Typ A ($h/d = 120/100$ [mm]) verwendet. Vor jedem Einbau des Boden-Bindemittel-Gemischs wurde die Innenseite des Proctortopfes mit Silikonspray behandelt, um beim späteren Entschalen eine Beschädigung des Probekörpers zu verhindern.

Die für jeden Probekörper benötigte Einwaage wurde nach folgender Formel berechnet

$$\text{Einwaage} = V_{pk} \cdot \rho_D \cdot \left(1 + \frac{w_D}{100}\right) [\text{g}] \quad (9)$$

mit ρ_D = Proctordichte des Boden-Bindemittel-Gemisches bei dem gewünschten Verdichtungsgrad D_{Pr}
 w_D = Wassergehalt des Boden-Bindemittel-Gemisches bei dem gewünschten Verdichtungsgrad D_{Pr}
 V_{Pk} = Volumen der Probekörperform in cm^3

Die erforderliche Einwaagemenge für einen Probekörper wurde durch Wiegen in drei gleiche Teilmengen geteilt. Die Teilmengen wurden analog zum Proctorversuch nacheinander eingefüllt und mit 25 Schlägen je Einbaulage mit dem kleinen Proctorhammer (Fallgewicht = 2,5 kg, Fallhöhe = 30 cm, Verdichtungsfläche $\varnothing = 5$ cm) verdichtet. Die fertig verdichteten Lagen wurden sorgfältig aufgeraut, bevor die nächste Lage eingebaut wurde. Dadurch konnte eine kraftschlüssige Verbindung der Einbaulagen untereinander gewährleistet werden. Die letzte Schicht wurde mit einer aufgelegten Stahlplatte verdichtet, um eine plane Oberfläche des Probekörpers zu erreichen. Anschließend wurde der Probekörper vorsichtig ausgeschalt und der Klimabox eingelagert. Der Umgang mit den ausgeschalteten Probekörper musste mit äußerster Vorsicht erfolgen, um Beschädigungen zu vermeiden.

Alle Probekörper für die einaxialen Druckversuche wurden nach den oben beschriebenen Prozess hergestellt, wobei der Wassergehalt, die Bindemittelart und -menge variiert wurden.

5.4.2 Lagerung der Probekörper

Die Probekörper wurden in einer Klimabox auf Gitterrosten für 28 Tage gelagert. Die relative Luftfeuchtigkeit betrug 98 % bei einer Temperatur von $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$.

5.4.3 Überprüfung der Probekörper

Die Probekörper wurden nach der Lagerung augenscheinlich auf Risse und Fehlstellen überprüft. Weiterhin mussten die Stirnflächen der Probekörper ausreichend parallel sein und eine Ebenheit von $\pm 0,1\text{ mm}$ aufweisen. Dazu wurde die Höhe an drei gegenseitig um 120 Grad versetzten Stellen des Probekörperumfanges mit einer Schieblehre gemessen.

5.4.4 Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeiten

Die einaxialen Druckfestigkeiten wurden experimentell mit dem einaxialen Druckversuch (Zylinderdruckversuch) nach DIN 18136 ermittelt. Dafür wurde der zu untersuchende Probekörper in eine Prüfpresse gestellt, und bei unbehinderter Seitendehnung über einen Stempel mit einer axialen Prüfkraft belastet. Die konstante Vorschubgeschwindigkeit der Prüfpresse wurde mit

$$v = 0,01 \cdot h_a / \text{min} \quad (\text{unbehandelter Boden}) \quad (10)$$

und

$$v = 0,002 \cdot h_a / \text{min} \quad (\text{stabilisierter Boden}) \quad (11)$$

mit v = Vorschubgeschwindigkeit der Prüfpresse
 h_a = Anfangshöhe des Probekörpers

eingestellt. Weiterhin wurden vor Versuchsbeginn folgende Eingangsparameter des Probekörpers benötigt

Anfangsvolumen V_a

Anfangshöhe h_a

Anfangsquerschnitt A_a

Während des Versuches wurde die Entwicklung von der Druckspannung

$$\sigma = F / A \quad (12)$$

mit F = Prüfkraft der Presse

$$A = V_a / h \quad h = h_a - \Delta h \quad \Delta h = \text{Höhenänderung des Probekörpers}$$

kontinuierlich gemessen und über die axiale Stauchung

$$\varepsilon = \Delta h / h_a \quad (13)$$

dargestellt (Bild 5.4). Das Maximum der einaxialen Druckspannung $\sigma_{\max}$ wird als einaxiale Druckfestigkeit q_u bezeichnet. Ist bei einer axialen Stauchung des Probekörpers von 20 % noch keine maximale Druckspannung erreicht, wird der dazugehörige Wert der Druckspannung als einaxiale Druckfestigkeit verwendet.

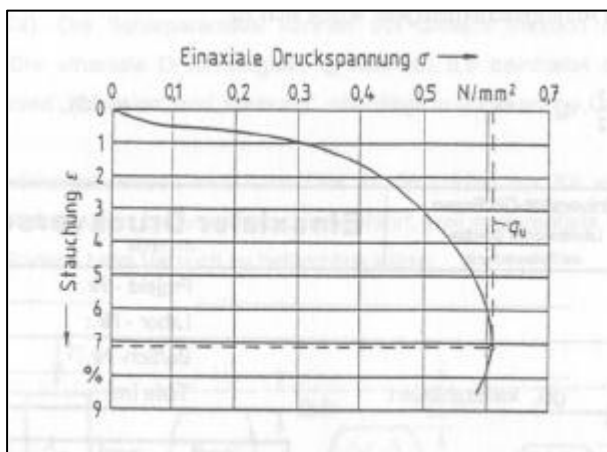


Bild 5.4: Druck - Stauchungs - Diagramm [17]

Die ermittelten Druckfestigkeiten sind aus den Anlagen 44, 46 und 48 ersichtlich.

5.4.5 Beurteilung der Bruchbilder

Bei den einaxialen Druckversuchen konnten verschiedene Bruchbilder an den Probekörpern beobachtet werden. Bei Probekörpern mit höheren Bindemittelgehalten wurde ein spröder Bruch, d.h. eine geringe Bruchstauchung bei nur einer Bruchfläche, bei Probekörpern mit niedrigen Bindemittelgehalten und ohne Bindemittel wurde ein plastischer Bruch, d.h. größere Bruchstauchung bei mehreren Bruchflächen, beobachtet (s. Bild 5.5).

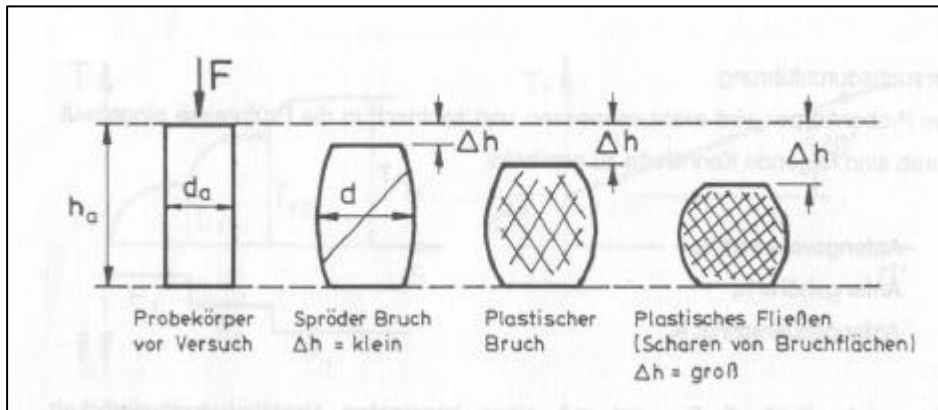


Bild 5.5: Versuchsanordnung und Deformationsbilder des Grenzzustands beim einaxialen Druckversuch [17]

Von dem Verlauf der Bruchflächen lassen sich nach der Formel

$$\varphi = 2 \cdot \tau - 90^\circ \quad [^\circ] \quad (14)$$

mit φ = Reibungswinkel

τ = Bruchwinkel

Aussagen über den Reibungswinkel treffen. Da die sichtbaren Bruchlinien einen recht ungleichförmigen und für eine Messung des Bruchwinkels zu ungenauen Verlauf zeigten (s. Bild 5.6) wurden keine weiteren Aussagen über die Reibungswinkel gemacht.



Bild 5.6: Bruchlinie eines stabilisierten Probekörpers

6 Versuchsergebnisse

6.1 Ergebnisse der Rahmenscherversuche

Bei den Rahmenscherversuchen wurden die Scherspannungen über den Scherweg gemessen. Aus den maximalen Scherspannungen mit den dazugehörigen Normalspannungen wurden unter den *Mohr-Coulomb*'schen Bruchbedingungen die Reibungswinkel und die Kohäsion der Probekörper bestimmt.

6.1.1 Auswertung der Scherspannungen

Die Scherspannungen wurden über den Verlauf des Scherversuches kontinuierlich gemessen und über den Scherweg als Scherspannungsverlauf in einem Scherspannungsdiagramm festgehalten.

Die Scherspannungsverläufe für die einzelnen Versuche sind aus den Anlagen 24 – 43 ersichtlich.

Über den Verlauf der Scherspannungen konnten folgende Aussagen getroffen werden:

1. In allen Scherspannungsverläufen ist zu beobachten, dass der Betrag der Scherspannungskurve von dem Betrag der auf den Probekörper einwirkenden Normalspannung abhängig ist. Je höher die einwirkende Normalspannung, umso höher sind erwartungsgemäß die Werte der Scherspannungen.

Diese Beobachtungen sind auf die *Mohr-Coulomb*'schen Bruchbedingungen zurückzuführen, in der die Scherspannung von der Normalspannung abhängig ist (s. Kap. 2.2).

2. Bei allen stabilisierten Probekörpern konnte ein unterschiedlich steiler Anstieg der Scherspannung bis zu einem Maximalwert beobachtet werden.

Der Anstieg der Scherspannung ist abhängig von dem zurückgelegten Scherweg. Manche Probekörper zeigen vor dem Bruch ein plastisches Verhalten. Dadurch besitzen sie einen größeren Scherweg bis zum Bruch gegenüber Probekörpern die keine plastischen Verformungen aufweisen. Diese brechen dann ohne „Vorankündigung“. So kann man den Abschervorgang in ein sprödes und ein plastisches Verhalten unterteilen. Daraus folgt, je steiler der Anstieg der Scherspannung, desto spröder ist das Bruchverhalten des Probekörpers.

3. Nach Erreichen des Maximalwertes fiel die Scherspannung unterschiedlich stark ab. Teilweise war ein Abfall fast überhaupt nicht festzustellen.

Die Erklärung hierfür ist ähnlich wie in Punkt 2. Wenn ein Abfall der Scherspannung nach dem Bruch des Probekörpers zu verzeichnen war, so war der Abfall gleich dem Anstieg der Scherspannung. Das bedeutet, dass der Abfall der Scherspannung ebenfalls von dem Bruchverhalten (plastisch oder spröde) des Probekörpers abhängig ist. Ein sehr geringer Abfall der Scherspannung nach dem Bruch des Probekörpers war vor allem bei hoher Normalspannung zu verzeichnen. Die Ursache dafür ist, dass mit der Normalspannung der Reibungsanteil ($\sigma' \cdot \tan\varphi'$) der Scherspannung steigt. Die Scherspannung nach dem Bruch kommt nur noch durch Reibung in der Scherfuge zustande, da die kohäsiven Kräfte im Bereich der Scherfuge bzw. der Bruchfläche aufgehoben sind.

4. Der weitere Verlauf der Scherspannung konnte als fast konstante, teilweise leicht abfallende Linie beschrieben werden. Stellenweise war auch ein späterer leichter Anstieg der Scherspannung zu verzeichnen.

Dieser relativ konstante Verlauf der Scherspannungslinie zeigt, dass die Scherspannung nur noch aus Reibung besteht, welche von der Normalspannung auf die Scherfuge abhängig ist. Diese Spannung wird auch als Restscherfestigkeit bezeichnet. Für die Restscherfestigkeit lassen sich ebenfalls Scherparameter bestimmen. Theoretisch müsste die Kohäsion hierfür Null sein und dementsprechend der Reibungswinkel höher. Die Scherparameter der Gleitfestigkeit sind ebenfalls aus den Anlagen 24 – 43 und tabellarisch geordnet aus den Anlagen 50 – 52 ersichtlich.

6.1.2 Auswertung der effektiven Scherparameter φ' und c'

Die effektiven Scherparameter φ' und c' , welche aus den Rahmenscherversuchen ermittelt wurden, sind in den Anlagen 45, 47 und 49 tabellarisch festgehalten.

Es ist bei allen stabilisierten Probekörpern zu erkennen, dass sich der Reibungswinkel φ' nicht bemerkenswert mit dem Bindemittelgehalt und dem Verdichtungsgrad ändert. Der Wert des Reibungswinkel vergrößert sich, wenn ein Boden stabilisiert wird. Wie stark sich der Reibungswinkel vergrößert ist von der Bindemittelart abhängig.

Die Größe des Reibungswinkel ist vom Korndurchmesser des Bodens abhängig. Nichtbindige Böden mit hohem Kies- und Sandkornanteil besitzen größere Reibungswinkel als bindige Böden mit hohem Feinkornanteil. Daraus ist zu schließen, dass sich bei einem stabilisierten Boden mit einem hohen Reibungswinkel mehr Bodenkörner zu einem großen „Gesamtkorn“ verkitten, als beim stabilisiertem Boden mit geringerem Reibungswinkel. Demzufolge werden die Bodenkörner besser mit Bindemittel benetzt und das verwendete Bindemittel besitzt stärkere Bindungskräfte.

Aus den Versuchen konnten folgende durchschnittlichen Reibungswinkel für die jeweiligen Bindemittel und den unbehandelten Boden ermittelt werden:

unbehandelter Boden	$\varphi' = 20,2^\circ$
Weißfeinkalk	$\varphi' = 29,8^\circ$
DOROSOL C10	$\varphi' = 32,3^\circ$
Pectacrete	$\varphi' = 40,9^\circ$

Somit ist mit dem ermittelten Reibungswinkel eine Klassifizierung der Festigkeit eines stabilisierten Bodens möglich.

Bei der Kohäsion c' des stabilisierten Bodens ist eine deutliche Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt, der Bindemittelart und dem Verdichtungsgrad zu erkennen. Die Kohäsion des stabilisierten Bodens wird mit zunehmenden Bindemittelgehalt und Verdichtungsgrad größer.

Bei der Verwendung von Weißfeinkalk als Bindemittel war eine Erhöhung (47 – 82 %) der Kohäsion mit steigendem Bindemittelgehalt im Bereich von 2 – 4 Gew.-% Bindemittelmenge zu verzeichnen. Bei weiterer Steigerung des Bindemittelgehaltes auf 6 Gew.-% war die Erhöhung (14 – 24 %) der Kohäsion relativ geringer. Mit einer Verbesserung des Verdichtungsgrades von 95 auf 98 % wurde nur bei einem Bindemittelgehalt von 2 Gew.-% eine nennenswerte Erhöhung der Kohäsion um 23 % erreicht.

Durch Zugabe des Mischbinders DOROSOL C10 konnten etwas bessere Werte für die Kohäsion gegenüber Weißfeinkalk erreicht werden. Hier wurde ebenfalls wie beim Weißfeinkalk eine besonders hohe Steigerung (98 – 110 %) der Kohäsion bei Erhöhung des Bindemittelgehaltes von 2 auf 4 Gew.-% deutlich, wobei die Werte der Kohäsion bei einer weiteren Erhöhung des Bindemittelgehaltes auf 6 Gew.-% vergleichsweise gering stiegen (18 – 23 %).

Mit dem Spezialzement Pectacrete wurden die besten Werte für die Kohäsion in diesem Vergleich erhalten. Vor allem konnte bei einer Steigerung des Bindemittelgehaltes von 4 auf 6 Gew.-% noch eine erhebliche Erhöhung der Kohäsion erreicht werden.

6.1.3 Auswertung der Restscherfestigkeit

Nach dem Bruch des Probekörpers ist in der Scherfläche keine Kohäsion mehr vorhanden. Die Scherspannung fällt mit fortschreitenden Scherweg auf einen Minimalwert, der Gleitfestigkeit oder auch Restscherfestigkeit τ_R . Die gemessenen Scherspannungen entstehen nur noch aus Reibung ($\sigma \cdot \tan\varphi$).

Die ermittelten Gleitfestigkeitsparameter sind in den Anlagen 50 – 52 tabellarisch zusammengefasst.

6.1.4 Vergleich Scherfestigkeit - Restscherfestigkeit

Um welchen Betrag sich die Scherspannung nach dem Bruch verringert, ist in der Tabelle 6.1 prozentual angegeben.

Tabelle 6.1: Verringerung der Scherspannung nach dem Bruch

Bindemittel	Normalspannung σ' [kN/m ²]	Verringerung der Scherfestigkeit auf die Restscherfestigkeit [%]
Weißfeinkalk	100	35,29
	200	24,29
	300	12,55
DOROSOL C10	100	43,86
	200	31,96
	300	15,58
Pectacrete	100	52,11
	200	25,24
	300	27,70

Bei der Auswertung der Restscherfestigkeit wurde festgestellt, dass die Verringerung der Scherspannungen vom Maximalwert (Scherfestigkeit) zum Minimalwert (Restscherfestigkeit) nur von der Art des Bindemittels und der wirkenden Normalspannung abhängig ist. Da im Gleitzustand keine Kohäsion vorhanden ist, wird der Gleitreibungswinkel nur von den Parametern Normalspannung und Bindemittelart bestimmt.

Wie aus Tabelle 6.1 hervorgeht, besitzt der Weißfeinkalk die zur Scherfestigkeit verhältnismäßig höchste Restscherfestigkeit. Weiterhin ist zu beobachten, dass die Restscherfestigkeit mit der Normalspannung steigt.

6.2 Ergebnisse der einaxialen Druckversuche

Die einaxialen Druckversuche wurden durchgeführt, um die Zusammenhänge zwischen Scherfestigkeit und Druckfestigkeit bei verschiedenen Bindemittelarten, Bindemittelgehalten und Verdichtungsgraden zu untersuchen.

Die Ergebnisse für die verschiedenen Eingangsparameter sind in den Anlagen 44, 46 und 48 tabellarisch festgehalten.

6.2.1 Statistische Betrachtungen der Ergebnisse

Die ermittelten Ergebnisse wurden statistisch ausgewertet, um eine Beurteilung über die Versuchsqualität zu ermöglichen. Die Beurteilung erfolgte mittels des Varianzkoeffizienten V (s. Tab. 6.2) der jeweiligen Prüfsreihe. Jede Prüfsreihe bestand aus 3 Einzelversuchen. Der Varianzkoeffizient V berechnet sich aus folgender Gleichung

$$V = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (15)$$

mit s = Standardabweichung
 $\bar{x}$ = Arithmetisches Mittel

und stellt die auf den Mittelwert bezogene Standardabweichung dar.

Das arithmetische Mittel $\bar{x}$ ist der wahrscheinlichste Wert, der dem Sollwert am nächsten kommt und berechnet sich nach der Gleichung

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (16)$$

mit n = Anzahl der Einzelversuche in einer Versuchsserie
 x = Versuchsergebnis

Die Standardabweichung s als Streumaß der Messwerte berechnet sich folgendermaßen

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (17)$$

mit n = Anzahl der Einzelversuche in einer Versuchsserie
 x = Versuchsergebnis
 $\bar{x}$ = Arithmetisches Mittel

Tabelle 6.2: Richtwerte des Variationskoeffizienten bei der Herstellung im Labor [21]

Variationskoeffizient V [%]	Beurteilung
< 5	sehr gut
5 – 7	gut
7 – 10	befriedigend
> 10	schlecht

Die statistischen Beurteilungen der einaxialen Versuchsergebnisse sind aus den Anlagen 44, 46 und 48 ersichtlich.

Es ist festzustellen, dass sich die Genauigkeit der Messergebnisse mit steigendem Bindemittelanteil erhöht. Eine Erklärung für dieses Verhalten könnte eine schlechtere Durchmischung bei geringerem Bindemittelgehalt sein. Die Wahrscheinlichkeit, dass jedes Bodenkorn mit Bindemittel benetzt wird, fällt mit geringeren Bindemittelgehalten.

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die Genauigkeit mit dem Verdichtungsgrad zunimmt. Es wird angenommen, dass die Homogenität mit Verdichtung des Bodens zunimmt.

6.2.2 Auswertung der einaxialen Druckfestigkeiten

Aus den Anlagen 63, 65 und 67 ist die Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit vom Bindemittelgehalt und vom Verdichtungsgrad bei Anwendung der verschiedenen Bindemittel Weißfeinkalk, DOROSOL C10 und Pectacrete ersichtlich. Es ist allgemein erkennbar, dass die einaxiale Druckfestigkeit mit zunehmendem Bindemittelgehalt und mit höherem Verdichtungsgrad zunimmt.

Die durchschnittlichen Festigkeitsanstiege bei einer Steigerung des Bindemittelgehaltes unter der Verwendung von Weißfeinkalk im Vergleich zum unbehandelten Boden sind in Tabelle 6.3 erkennbar. Bei einer Steigerung des Bindemittelgehaltes von 4 auf 6 Gew.-% sind keine merklichen Verbesserungen der einaxialen Druckfestigkeit mehr zu erkennen. Eine Verbesserung der einaxialen Druckfestigkeit durch eine Erhöhung des Verdichtungsgrades zeichnet sich nur bei einem Bindemittelgehalt von 2 Gew.-% deutlich ab (s. Tab. 6.3).

Tabelle 6.3: Festigkeitsanstieg bei Weißfeinkalk als Bindemittel

Bindemittelgehalt [Gew.-%]	Erhöhung von σ im Vergleich zum unbehandelten Boden [%]	Erhöhung von σ bei $D_{Pr} = 0,95 \rightarrow D_{Pr} = 0,98$ [%]
2	42	22
4	182	5
6	202	0,1

Die bei einer Anwendung von Weißfeinkalk als Bindemittel erreichten einaxialen Druckfestigkeiten sind im Vergleich zu den Bindemitteln DOROSOL C10 und Pectacrete geringer, vor allem bei Bindemittelgehalten von 6 Gew.-%.

Eine Stabilisierung des Bodens mit dem Mischbinder DOROSOL C10 als Bindemittel wirkt sich ähnlich wie der Einsatz von Weißfeinkalk auf die einaxialen Druckfestigkeiten aus. Auch hier ist eine Steigerung der Druckfestigkeit bei zunehmendem Bindemittelgehalt von 4 auf 6 Gew.-% relativ niedrig (s. Tab. 6.4). Allerdings ist durch eine höhere Verdichtungsarbeit auch eine sichtbar bessere Druckfestigkeit zu erreichen.

Tabelle 6.4: Festigkeitsanstieg bei DOROSOL C10 als Bindemittel

Bindemittelgehalt [Gew.-%]	Erhöhung von σ im Vergleich zum unbehandelten Boden [%]	Erhöhung von σ bei $D_{Pr} = 0,95 \rightarrow D_{Pr} = 0,98$ [%]
2	109	47
4	294	18
6	368	19

Die besten Prüfergebnisse bei Bewertung der einaxialen Druckfestigkeiten lieferten die mit Pectacrete stabilisierten Probekörper. Hier wurden erhebliche Steigerungen der einaxialen Druckfestigkeit mit Erhöhung des Bindemittelgehaltes und besserem Verdichtungsgrad erreicht (s. Tab. 6.5).

Tabelle 6.5: Festigkeitsanstieg bei Pectacrete

Bindemittelgehalt [Gew.-%]	Erhöhung von σ im Vergleich zum unbehandelten Boden [%]	Erhöhung von σ bei $D_{Pr} = 0,95 \rightarrow D_{Pr} = 0,98$ [%]
2	339	17
4	516	20
6	842	20

6.3 Ermittlung der Scherparameter aus dem einaxialen Druckversuch

Da die einaxiale Druckfestigkeit die Scherparameter c' und φ' in unbekannter Größenordnung besitzt, können diese nicht ohne weiteres aus dem einaxialen Druckversuch ermittelt werden. Nimmt man allerdings einen Reibungswinkel φ' des unkonditionierten Bodens z.B. aus Erfahrungswerten oder aus Scherversuchen, so lässt sich daraus die zugehörige Kohäsion berechnen.

Um diesen Zusammenhang herzuleiten, wurde das Problem zuerst grafisch am *Mohr*'schen Spannungskreis betrachtet (s. Bild 6.1).

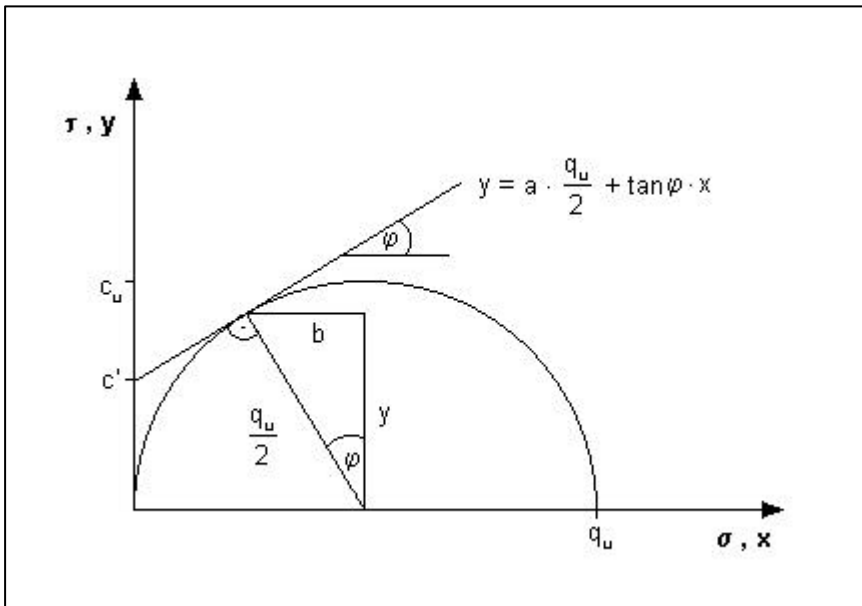


Bild 6.1: Mohr'scher Spannungskreis beim einaxialen Druckversuch

Beim einaxialen Druckversuch ist das Maximum der gemessenen Druckspannung σ gleich dem Wert der einaxialen Druckfestigkeit q_u . Die undrainierte Anfangsscherfestigkeit ergibt sich zu:

$$c_u = \frac{1}{2} \cdot q_u \quad (18)$$

Der unbekannte Anteil der Kohäsion c' an der undrainierten Scherfestigkeit c_u wird als a bezeichnet. Somit ergibt sich die Kohäsion zu:

$$c' = a \cdot \frac{1}{2} \cdot q_u \quad (19)$$

Die lineare Gleichung der Schergeraden erhält man in Abhängigkeit des Reibungswinkels φ zu:

$$y = a \cdot \frac{1}{2} \cdot q_u + \tan \varphi \cdot x \quad (20)$$

Für die Berechnung des Kohäsionsanteils a müssen die Koordinaten des Berührungspunktes der Schergeraden mit dem Mohr'schen Spannungskreis bestimmt werden und in die lineare Gleichung der Schergeraden eingesetzt werden.

Die gesuchten Koordinaten können aus dem in Bild 6.1 dargestellten geometrischen Zusammenhang wie folgt berechnet werden:

$$x = \frac{q_u}{2} - \frac{q_u}{2} \cdot \sin \varphi \quad (21)$$

$$y = \frac{q_u}{2} \cdot \cos \varphi \quad (22)$$

Setzt man dann die berechneten Koordinaten in die lineare Gleichung der Schergeraden ein und stellt diese nach dem gesuchten Kohäsionsanteil a um, so erhält man folgende Gleichung:

$$a = \cos \varphi - \tan \varphi + \tan \varphi \cdot \sin \varphi \quad (23)$$

Mit dem berechneten Kohäsionsanteil a kann man jetzt unter Annahme eines Reibungswinkels φ' mit der gemessenen einaxialen Druckfestigkeit q_u die Kohäsion c' nach folgender Gleichung berechnen:

$$c' = \frac{1}{2} \cdot q_u \cdot (\cos \varphi' - \tan \varphi' + \tan \varphi' \cdot \sin \varphi') \quad (24)$$

Ob man die Kohäsion unter der Annahme des Reibungswinkels aus dem im Gegensatz zum Rahmenscherversuch einfacher durchzuführenden einaxialen Druckversuch mit ausreichender Sicherheit ermitteln kann, wird nun anhand der aus dem Rahmenscherversuch gewonnenen Scherparameter untersucht.

Mit dem Reibungswinkel φ' aus dem Rahmenscherversuch und der einaxialen Druckfestigkeit q_u wird nach der hergeleiteten Formel die Kohäsion c' berechnet. Diese wird dann mit der aus dem Rahmenscherversuch ermittelten Kohäsion c' verglichen.

Die entsprechenden Ergebnisse sind in den Anlagen 53 – 55 zusammengefasst.

Weshalb die Werte so unterschiedlich sind ist nicht bekannt. Man könnte aber tendenziell die Aussage treffen, dass die „reale“ Scherfestigkeit aus den Rahmenscherversuchen mittels eines Sicherheitsbeiwertes unter Annahme des Reibungswinkels aus den einaxialen Druckversuchen berechnet werden kann.

Für eine endgültige Festlegung eines solchen Sicherheitsbeiwertes müssten allerdings noch mehrere Rahmenscherversuche mit parallel laufenden einaxialen Druckversuchen an verschiedenen Bodenarten durchgeführt werden.

7 Beurteilung der verwendeten Bindemittel

Wie die Untersuchungen ergaben, war die Scherfestigkeit des stabilisierten Geschiebemergels in erster Linie vom verwendeten Bindemittel abhängig.

7.1 Stabilisierung mit Pectacrete

Mit dem Spezialzement Pectacrete wurden die höchsten Scherspannungswerte erhalten. Allerdings wurde eine vergleichsweise geringe Restscherfestigkeit gemessen. Es wurde ein sprödes Bruchverhalten beobachtet. Die Folge bei einem Erdbauwerk wäre ein unangekündigtes Versagen beim Bruch. Der mit Pectacrete stabilisierte Boden besitzt keine bzw. sehr geringe Kriecheigenschaften. Schon bei einem vergleichsweise kurzem Scherweg wurde die maximale Scherspannung erreicht, welche zum Bruch führte.

Bei der Anwendung von Pectacrete ist zu beachten, dass nicht die Verarbeitbarkeit eines Bodens verbessert wird. Pectacrete wird ausschließlich für eine Verbesserung der Trag- und Scherfestigkeit des Bodens verwendet. Ist der natürliche Wassergehalt des zu stabilisierenden Bodens nicht für die erforderliche Verdichtung geeignet, so muss der Wassergehalt durch Wasserzugabe oder durch Wasserentzug mittels Feinkalkzugabe eingestellt werden. Da in den seltensten Fällen ein Boden den optimalen Wassergehalt im natürlichen Zustand besitzt, ist dieser zusätzliche Arbeitsschritt in der Regel einzuplanen.

Wie die einaxialen Druckversuche und die Großrahmenscherversuche an den mit Pectacrete stabilisierten Probekörpern zeigten, wurden verhältnismäßig gute Festigkeitswerte erreicht. Der maximal erreichte Druckfestigkeitswert bei einem Bindemittelgehalt von 6 Gew.-% und einem Verdichtungsgrad von 98 % erreichte allerdings nur ein Drittel der nach ZTVE-Stb 94 geforderten Druckfestigkeit von 6 N/mm² für eine Bodenverfestigung.

7.2 Stabilisierung mit DOROSOL C10

Die erreichten Scherfestigkeiten bei einer Stabilisierung mit dem Mischbinder DOROSOL C10 liegen durchschnittlich 26,4 % unter denen des mit Pectacrete stabilisierten Bodens. Die Restscherfestigkeit ist wie beim mit Pectacrete stabilisierten Boden verhältnismäßig gering.

Die Besonderheit des DOROSOL C10 ist, dass in dem Mischbinder 10 Gew.-% Weißfeinkalk enthalten sind. Der Weißfeinkalkanteil ist bei der Herstellung des DOROSOL C variabel, wodurch auch andere Gewichtsanteile (zwischen 0 und 50 Gew.-%) möglich sind. Der Vorteil des enthaltenen Weißfeinkalks ist die Sofortreaktion mit dem Porenwasser im Boden. Der Wassergehalt des Bodens kann bis zum optimalen Einbauwassergehalt reduziert werden. Die dafür erforderliche Weißfeinkalkmenge kann im Labor ermittelt und an den Hersteller übergeben werden. Dieser berücksichtigt bei der Herstellung des Mischbinders den geforderten Weißfeinkalkanteil. Beim Einmischen des Mischbinders in den natürlichen Boden kann durch die stattfindenden Reaktionen für das Boden-Bindemittel-Gemisches der gewünschte Verdichtungsgrad erzielt werden. Beim Ablöschen von 1 kg Weißfeinkalk werden 322 g Wasser gebunden. Im Anschluss erfolgt die durch den Zementanteil des Mischbinders ausgelöste Aushärtung des stabilisierten Bodens. Während der Hydratation von Zement werden je nach Zementsorte zwischen 300 g und 400 g Wasser je kg Zement gebunden.

Die erreichten Druckfestigkeiten lagen ebenfalls unter denen des Pectacrete, was auf den geringeren Zementanteil zurückzuführen ist.

7.3 Stabilisierung mit Weißfeinkalk

Die erzielten Scherfestigkeiten des mit Weißfeinkalk stabilisierten Bodens, waren im Vergleich zu den anderen Bindemitteln die geringsten. Im Gegensatz zum unbehandelten Boden machte sich jedoch eine Verbesserung durchaus bemerkbar. Hier konnte bei einer Zugabe von 2 Gew.-% Weißfeinkalk eine durchschnittliche Erhöhung der Scherfestigkeit von 37 % verzeichnet werden. Die erreichten Scherfestigkeiten lagen durchschnittlich 43,6 % unter denen des mit Pectacrete stabilisierten Bodens und 23,6 % unter denen des mit DOROSOL C10 stabilisierten Bodens. Nach dem Bruch des Probekörpers war noch eine verhältnismäßig hohe Restscherfestigkeit vorhanden.

Der Weißfeinkalk bewirkt bei einer Bodenstabilisierung durch seine Sofortreaktion mit dem Porenwasser des Bodens eine gewisse Anfangsfestigkeit, welche sich mit der Zeit nur sehr gering erhöht.

Die ermittelten Druckfestigkeiten waren im Vergleich zu den anderen Bindemittelarten die geringsten, aber im Gegensatz zum natürlichen Boden war doch eine erhebliche Verbesserung der Festigkeit zu beobachten.

7.4 Wirtschaftliche Aspekte

Steht man vor der Wahl, welches Bindemittel für welchen Boden am geeignetsten erscheint, so muss man zuerst die geforderten Festigkeiten des geplanten Erdbauwerks betrachten. Diese müssen dann durch Eignungsprüfungen unter Verwendung verschiedener für den vorliegenden Boden geeigneter Bindemittel erreicht werden. Mit dem ermittelten Bindemittelanteil kann dann die für die Baumaßnahme benötigte Bindemittelmenge bestimmt werden. Die Preise für die verwendeten Bindemittel sind aus Tabelle 7.1 ersichtlich. Es handelt sich hier allerdings um Werkspreise. Die Kosten für den Transport auf die Baustelle werden extra berechnet und haben folglich einen großen Einfluss auf den Gesamtpreis.

Tabelle 7.1: Werkspreise für verschiedene Bindemittel

Bindemittelart	Preis [€/t]
Weißfeinkalk	45,00
DOROSOL C10	51,50
Pectacrete	70,00

Welches Bindemittel die geringsten Kosten je m³ stabilisierter Kubatur verursacht, hängt demnach vom Bindemittelgehalt und somit auch von der Bodenart, dem Werkspreis des Bindemittels und den Kosten für den Transport vom Werk auf die Baustelle ab.

8 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Untersuchungen haben gezeigt, dass die Scherfestigkeit eines stabilisierten Bodens von der Bindemittelart, dem Bindemittelgehalt und dem Verdichtungsgrad abhängig ist. Je höher der Bindemittelgehalt und je höher der Verdichtungsgrad, um so größer ist die Scherfestigkeit eines stabilisierten Bodens.

Bei den unterschiedlichen Bindemitteln war zu beobachten, dass die Scherfestigkeit von einer hydraulischen Aushärtung des Boden-Bindemittel-Gemischs besonders beeinflusst wird. Die Anwendung von Pectacrete und DOROSOL C10 führte zu den höchsten Scherfestigkeiten.

Die Scherfestigkeit vergrößerte sich bei einer Erhöhung der wirksamen Normalspannung in Abhängigkeit der Kohäsion. Der Reibungswinkel veränderte sich nur unwesentlich.

Die Größe des Reibungswinkels ist nur von der Bindemittelart abhängig. Wirksame Normalspannung, Verdichtungsgrad und Bindemittelgehalt besitzen keinen wesentlichen Einfluss.

Die Kohäsion eines stabilisierten Bodens ist von Bindemittelart, Bindemittelgehalt und Verdichtungsgrad (Wassergehalt) abhängig.

Aus den Großrahmenscherversuchen geht hervor, dass sich die Scherfestigkeit linear zur wirkenden Normalspannung vergrößert. Das bedeutet, dass sich der stabilisierte Boden nach dem *Mohr-Coulomb*'schen Bruchkriterium verhält. Die Scherparameter, welche aus den Großrahmenscherversuchen gewonnen wurden, sind für weitere geotechnische Nachweise anwendbar. Eine zukünftige Ermittlung der Scherparameter von stabilisierten Böden aus Großrahmenscherversuchen ist machbar.

Für den einaxialen Druckversuch konnte eine Formel hergeleitet werden, mit der sich die Kohäsion unter Annahme des vorhandenen Reibungswinkels aus der einaxialen Druckfestigkeit abschätzen lässt. Überträgt man die aus den Großrahmenscherversuchen ermittelten Reibungswinkel in diese Gleichung, lässt sich ein Zusammenhang zwischen der aus dem einaxialen Druckversuch berechneten Kohäsion und der aus dem Großrahmenscherversuch ermittelten Kohäsion erkennen. Aus diesem Zusammenhang heraus ist es möglich die Kohäsion eines stabilisierten Bodens unter Annahme des Reibungswinkels zu berechnen. Um diesen Zusammenhang durch eine Gleichung ausdrücken zu können, sind allerdings noch mehrere derartige Versuche an anderen Bodenarten durchzuführen.

Eine genormte Ermittlung der Scherparameter für stabilisierte Böden aus einaxialen Druckversuchen ist für die Zukunft anzustreben, da der einaxiale Druckversuch hinsichtlich der Versuchsdurchführung kostengünstiger und somit wirtschaftlicher als ein Großrahmenscherversuch ist. Ein Nachteil gegenüber dem Großrahmenscherversuch ist, dass keine Restscherspannungen ermittelt werden können. Dafür ist die Kenntnis der Scherparameter beim Bruch für die geotechnischen Stabilitätsnachweise wie Tragfähigkeit, Erddruck und Böschungstabilität ausreichend.

Literaturverzeichnis

- [1] **Merkblatt:** *Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Kalken*, FGSV-Verlag, Köln, 1979
- [2] **Informationsblatt:** *Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Feinkalk*, Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e.V., Köln
- [3] **Härig, S.; Günther, K.; Klausen, D. (1994):** *Technologie der Baustoffe – Handbuch für Studium und Praxis*, 12. Auflage, C.F. Müller Verlag, Heidelberg, 1994
- [4] **Schnell, W.; Vahland, R. (1997):** *Verfahrenstechnik der Baugrundverbesserungen*, Teubner-Verlag, Stuttgart, 1997
- [5] **Witt, K.J. (2001):** *Bodenstabilisierung - Grundlagen und Auswahl der Bindemittel*, Vortrag der Dornburger Baustoffthemen, Weimar, 2001
- [6] **Simmer, K. (1994):** *Grundbau I – Bodenmechanik und erdstatische Berechnungen*, Teubner-Verlag, Stuttgart, 1994
- [7] **Arbeitsblatt:** *Bodenverfestigung mit Zement für den Erd- und Straßenbau*, Arbeitsblätter Straßenbau Bauberatung Zement
- [8] **Ringlein (1984):** *Erfahrungen mit Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen in Nordbayern*, 24. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau, S. 25-48, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 1984
- [9] **Technisches Regelwerk:** *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten und Straßenbau (ZTVE-StB 94)*, FGSV-Verlag, Köln, 1994
- [10] **Karsten, R. (1996):** *Bauchemie – Handbuch für Studium und Praxis*, 10. Auflage, C.F. Müller Verlag, Heidelberg, 1997
- [11] **Kézdi, Á. (1969):** *Handbuch der Bodenmechanik – Band II, Bodenmechanik im Erd-, Grund- und Straßenbau*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1970

-
- [12] **Weber, A. (2001):** *Diplomarbeit B/2001/13*, Institut für Geotechnik, Bauhaus-Universität Weimar, 2001
- [13] **Deuna Zement:** Produktbeschreibung Pectacrete
- [14] **Dornburger Zement:** Produktbeschreibung DOROSOL C
- [15] **Klengel, K.J.; Wagenbreth, O. (1984):** *Ingenieurgeologie für Bauingenieure*, 2. Auflage, Verlag für Bauwesen, Berlin, 1984
- [16] **Prinz, H. (1997):** *Abriß der Ingenieurgeologie*, 3. Auflage, F. Enke Verlag, Stuttgart, 1997
- [17] **Richwien, W.; Golücke, K. (1996):** *Bodenmechanisches Praktikum – Auswahl und Anwendung von bodenmechanischen Laborversuchen*, 9. Auflage, Verlag Glückauf, Essen, 1997
- [18] **Witt, K.J.; Rütz, D.; Schmidt, H.G.; Wendt, R. (1999):** *Wissenspeicher Geotechnik*, 11. Auflage, Bauhaus-Universität Weimar, 1999
- [19] **FGSV, Arbeitsgruppe „Erd- und Grundbau“ (1991):** *TP BF-StB Teil B 11.5 - Eignungsprüfung bei Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Feinkalk und Kalkhydrat*, FGSV-Verlag, Köln, 1992
- [20] **FGSV, Arbeitsgruppe „Betonstraßen“ (1994):** *TP HGT-StB 94 - Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln*, FGSV-Verlag, Köln, 1994
- [21] **Stark, J.; Wicht, B. (1995):** *Dauerhaftigkeit von Beton*, FIB, Bauhaus-Universität Weimar, 1995

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Richtwerte für den Bindemittelanteil von Bodenverfestigungen mit Zement [7]	14
Tabelle 2.2:	Kalkarten und Richtwerte für Kalkmengen bei der Bodenverbesserung und Bodenverfestigung [1]	14
Tabelle 2.3:	Kriterien für die Bestimmung der Bindemittelmenge (Zement, Tragschichtbinder, hydraulischer Kalk) bei der Eignungsprüfung für eine frostbeständige Bodenverfestigung von groben, feinen und gemischtkörnig Böden [9]	15
Tabelle 4.1:	Vergleich mit den Kennwerten nach <i>von Soos</i>	29
Tabelle 4.2:	Weitere Kennwerte nach <i>von Soos</i> und <i>Pörschmann</i>	30
Tabelle 5.1:	Ausgangsparameter für die Herstellung der Probekörper	31
Tabelle 6.1:	Verringerung der Scherspannung nach dem Bruch	46
Tabelle 6.2:	Richtwerte des Variationskoeffizienten bei der Herstellung im Labor [21]	48
Tabelle 6.3:	Festigkeitsanstieg bei Weißfeinkalk als Bindemittel	49
Tabelle 6.4:	Festigkeitsanstieg bei DOROSOL C10 als Bindemittel	50
Tabelle 6.5:	Festigkeitsanstieg bei Pectacrete	50
Tabelle 7.1:	Werkspreise für verschiedene Bindemittel	56

Abbildungsverzeichnis

Bild 2.1:	Schergerade im τ - σ -Diagramm [5]	11
Bild 2.2:	Durch Bindemittel verkittete Bodenkörner	11
Bild 2.3:	Körnungsbereiche für die Stabilisierung von Böden mit verschiedenen Bindemitteln [4]	13
Bild 2.4:	Stabilisieren von Böden mit Zementen [4]	16
Bild 2.5:	Stabilisieren von Böden mit Kalken [4]	16
Bild 3.1:	Reaktionsstadien der Langsamreaktion	19
Bild 3.2:	Mikroskopaufnahmen von Dünnschliffen des verfestigten Kalkerdstoffes [12]	20
Bild 4.1:	Probenahme an der Trasse der zukünftigen BAB A20	26
Bild 4.2:	ZTVE-Klassifizierung nach der Frostepfindlichkeit [18]	30
Bild 5.1:	Großrahmenschergerät SP-303-E von Wille Geotechnik	35
Bild 5.2:	Scherfestigkeit bei verschiedenen Normalspannungen [17]	37
Bild 5.3:	Scherfläche eines abgesicherten Probekörpers	38
Bild 5.4:	Druck - Stauchungs - Diagramm [17]	41
Bild 5.5:	Versuchsanordnung und Deformationsbilder des Grenzzustands beim einaxialen Druckversuch [17]	42
Bild 5.6:	Bruchlinie eines stabilisierten Probekörpers	42
Bild 6.1:	<i>Mohr</i> 'scher Spannungskreis beim einaxialen Druckversuch	51

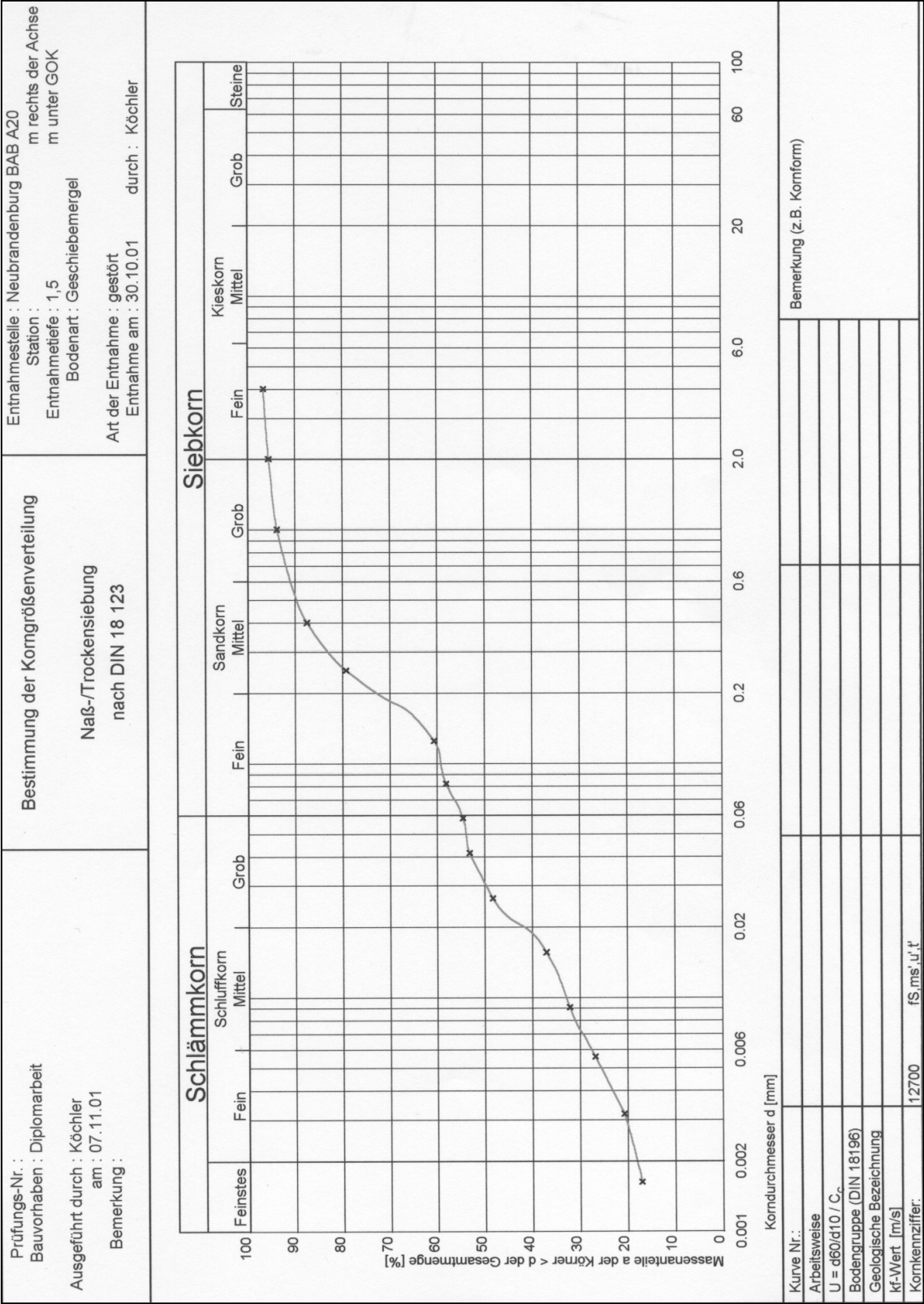
Anlagenverzeichnis

Anlage 1:	Kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse	I
Anlage 2:	Kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse 1-2	II
Anlage 3:	Kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse 1-3	III
Anlage 4:	Kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse 2-1	IV
Anlage 5:	Kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse 2-2	V
Anlage 6:	Kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse 2-3	VI
Anlage 7:	Wassergehaltsbestimmung	VII
Anlage 8:	Gewichtsanteil an organischen Bestandteilen im Boden	VIII
Anlage 9:	Kalkgehaltsbestimmung nach <i>Scheibler</i>	IX
Anlage 10:	Bestimmung der Konsistenzgrenzen nach <i>Atterberg</i> 1-1	X
Anlage 11:	Bestimmung der Konsistenzgrenzen nach <i>Atterberg</i> 2-2	XI
Anlage 12:	Proctorversuch am unkonditionierten Boden 1-2	XII
Anlage 13:	Proctorversuch am unkonditionierten Boden 2-2	XIII
Anlage 14:	Proctorversuch am mit 6 Gew.-% DOROSOL C10 stabilisiertem Boden 1-2	XIV
Anlage 15:	Proctorversuch am mit 6 Gew.-% DOROSOL C10 stabilisiertem Boden 2-2	XV
Anlage 16:	Proctorversuch am mit 6 Gew.-% Pectacrete stabilisiertem Boden 1-2	XVI
Anlage 17:	Proctorversuch am mit 6 Gew.-% Pectacrete stabilisiertem Boden 2-2	XVII
Anlage 18:	Proctorversuch am mit 2 Gew.-% Weißfeinkalk stabilisiertem Boden 1-2	XVIII
Anlage 19:	Proctorversuch am mit 2 Gew.-% Weißfeinkalk stabilisiertem Boden 2-2	XIX
Anlage 20:	Proctorversuch am mit 4 Gew.-% Weißfeinkalk stabilisiertem Boden 1-2	XX
Anlage 21:	Proctorversuch am mit 4 Gew.-% Weißfeinkalk stabilisiertem Boden 2-2	XXI
Anlage 22:	Proctorversuch am mit 6 Gew.-% Weißfeinkalk stabilisiertem Boden 1-2	XXII
Anlage 23:	Proctorversuch am mit 6 Gew.-% Weißfeinkalk stabilisiertem Boden 2-2	XXIII
Anlage 24:	Rahmenscherversuch 1/20	XXIV
Anlage 25:	Rahmenscherversuch 2/20	XXV
Anlage 26:	Rahmenscherversuch 3/20	XXVI
Anlage 27:	Rahmenscherversuch 4/20	XXVII
Anlage 28:	Rahmenscherversuch 5/20	XXVIII
Anlage 29:	Rahmenscherversuch 6/20	XXIX
Anlage 30:	Rahmenscherversuch 7/20	XXX
Anlage 31:	Rahmenscherversuch 8/20	XXXI
Anlage 32:	Rahmenscherversuch 9/20	XXXII
Anlage 33:	Rahmenscherversuch 10/20	XXXIII
Anlage 34:	Rahmenscherversuch 11/20	XXXIV
Anlage 35:	Rahmenscherversuch 12/20	XXXV
Anlage 36:	Rahmenscherversuch 13/20	XXXVI
Anlage 37:	Rahmenscherversuch 14/20	XXXVII
Anlage 38:	Rahmenscherversuch 15/20	XXXVIII
Anlage 39:	Rahmenscherversuch 16/20	XXXIX
Anlage 40:	Rahmenscherversuch 17/20	XL
Anlage 41:	Rahmenscherversuch 18/20	XLI
Anlage 42:	Rahmenscherversuch 19/20	XLII
Anlage 43:	Rahmenscherversuch 20/20	XLIII
Anlage 44:	Ergebnisse der einaxialen Druckversuche bei Zugabe von Weißfeinkalk	XLIV
Anlage 45:	Ergebnisse der Rahmenscherversuche bei Zugabe von Weißfeinkalk	XLIV
Anlage 46:	Ergebnisse der einaxialen Druckversuche bei Zugabe von DOROSOL C10	XLV
Anlage 47:	Ergebnisse der Rahmenscherversuche bei Zugabe von DOROSOL C10	XLV
Anlage 48:	Ergebnisse der einaxialen Druckversuche bei Zugabe von Pectacrete	XLVI
Anlage 49:	Ergebnisse der Rahmenscherversuche bei Zugabe von Pectacrete	XLVI
Anlage 50:	Restscherfestigkeitsparameter bei Weißfeinkalk als Bindemittel	XLVII

Anlage 51:	Restscherfestigkeitsparameter bei DOROSOL C10 als Bindemittel	XLVII
Anlage 52:	Restscherfestigkeitsparameter bei Pectacrete als Bindemittel	XLVIII
Anlage 53:	Vergleich der Scherparameter aus Rahmenscherversuch und einaxialen Druckversuch bei der Verwendung von Weißfeinkalk	XLIX
Anlage 54:	Vergleich der Scherparameter aus Rahmenscherversuch und einaxialen Druckversuch bei der Verwendung von DOROSOL C10	XLIX
Anlage 55:	Vergleich der Scherparameter aus Rahmenscherversuch und einaxialen Druckversuch bei der Verwendung von Pectacrete	XLIX
Anlage 56:	Grafische Ermittlung des Anteiles der Kohäsion c' an der halben einaxialen Druckfestigkeit $q_u / 2$ mit einem gewählten Reibungswinkel ϕ'	L
Anlage 57:	Abhängigkeit der Scherparameter c' , ϕ' von der Einaxialen Druckfestigkeit σ' bei steigendem Bindemittelgehalt mit Weißfeinkalk und einer Proctordichte von 95 %	LI
Anlage 58:	Abhängigkeit der Scherparameter c' , ϕ' von der Einaxialen Druckfestigkeit σ' bei steigendem Bindemittelgehalt mit Weißfeinkalk und einer Proctordichte von 98 %	LI
Anlage 59:	Abhängigkeit der Scherparameter c' , ϕ' von der Einaxialen Druckfestigkeit σ' bei steigendem Bindemittelgehalt mit DOROSOL C10 und einer Proctordichte von 95 %	LII
Anlage 60:	Abhängigkeit der Scherparameter c' , ϕ' von der Einaxialen Druckfestigkeit σ' bei steigendem Bindemittelgehalt mit DOROSOL C10 und einer Proctordichte von 98 %	LII
Anlage 61:	Abhängigkeit der Scherparameter c' , ϕ' von der Einaxialen Druckfestigkeit σ' bei steigendem Bindemittelgehalt mit Pectacrete und einer Proctordichte von 95 %	LIII
Anlage 62:	Abhängigkeit der Scherparameter c' , ϕ' von der Einaxialen Druckfestigkeit σ' bei steigendem Bindemittelgehalt mit Pectacrete und einer Proctordichte von 98 %	LIII
Anlage 63:	Druckfestigkeitsentwicklung in Abhängigkeit des Verdichtungsgrades nach 28 Tagen Feuchtraumlagerung bei Zugabe von Weißfeinkalk	LIV
Anlage 64:	Abhängigkeit der Scherparameter c' und ϕ' vom Bindemittelgehalt und dem Verdichtungsgrad bei Zugabe von Weißfeinkalk	LIV
Anlage 65:	Druckfestigkeitsentwicklung in Abhängigkeit des Verdichtungsgrades nach 28 Tagen Feuchtraumlagerung bei Zugabe von DOROSOL C10	LV
Anlage 66:	Abhängigkeit der Scherparameter c' und ϕ' vom Bindemittelgehalt und dem Verdichtungsgrad bei Zugabe von DOROSOL C10	LV
Anlage 67:	Druckfestigkeitsentwicklung in Abhängigkeit des Verdichtungsgrades nach 28 Tagen Feuchtraumlagerung bei Zugabe von Pectacrete	LVI
Anlage 68:	Abhängigkeit der Scherparameter c' und ϕ' vom Bindemittelgehalt und dem Verdichtungsgrad bei Zugabe von Pectacrete	LVI
Anlage 69:	Druckfestigkeitsentwicklung bei 2 % Bindemittelgehalt im Vergleich zum unbehandelten Boden in Abhängigkeit des Verdichtungsgrades	LVII
Anlage 70:	Druckfestigkeitsentwicklung bei 4 % Bindemittelgehalt im Vergleich zum unbehandelten Boden in Abhängigkeit des Verdichtungsgrades	LVII
Anlage 71:	Druckfestigkeitsentwicklung bei 6 % Bindemittelgehalt im Vergleich zum unbehandelten Boden in Abhängigkeit des Verdichtungsgrades	LVIII
Anlage 72:	Chemische Zusammensetzung und Überwachungsdaten des verwendeten Weißfeinkalks	LIX
Anlage 73:	Chemische Zusammensetzung und Überwachungsdaten des verwendeten Pectacrete	LX

Bestimmung der Korngrößenverteilung Naß-/Trockensiebung nach DIN 18 123									
Prüfungs-Nr. : Bauvorhaben : Diplomarbeit Ausgeführt durch : Köchler am : 07.11.01 Bemerkung :					Entnahmestelle : Neubrandenburg BAB A20 Station : m rechts der Achse Entnahmetiefe : 1,5 m unter GOK Bodenart : Geschiebemergel Art der Entnahme : gestört Entnahme am : 30.10.01 durch : Köchler				
Aräometer Nr.: 5 Meniskuskorrektur mit Dispergierungsmittel: Cm = 0,7000 Tetranatriumdiphosphat									
Gewicht der Trockenmasse Durch Trocknen (nach der Schlämmanalyse)									
Behälter Nr.:					Trockene Probe + Behälter md + mB				
					137,39 g				
					Behälter mB 122,21 g				
Korndichte ρ_s 2,670 g/cm ³					Trockene Probe md				
					15,18 g				
					mu = md * ($\rho_s - 1$) / ρ_s = 100% der Lesung 9,49 g				
ad = 100 / mu * (R + C _o) = 10,53 * (R + C _o) % von md									
Uhrzeit Vorgabe:	Abgelaufene Zeit s/m/h/d	Aräometer- lesung R'=($\rho'-1$)*10 ³	Lesung + Meniskuskorr. R=R'+Cm	Korndurch- messer d [mm]	Temperatur θ [°C]	Temp.korr. C _o	Korr.Lesung R+C _o	Schlämm- probe ad [%]	Gesamt- probe * ad ges [%]
07:40:00	30 s	7,90	8,60	0,0820	17,8	-0,37	8,23	86,71	53,03
07:41:00	1 m	7,60	8,30	0,0582	17,8	-0,37	7,93	83,55	51,09
07:42:00	2 m	7,10	7,80	0,0414	17,8	-0,37	7,43	78,29	47,87
07:45:00	5 m	6,80	7,50	0,0263	17,8	-0,37	7,13	75,13	45,94
07:55:00	15 m	5,20	5,90	0,0155	17,5	-0,41	5,49	57,79	35,34
08:25:00	45 m	4,20	4,90	0,0091	17,5	-0,41	4,49	47,26	28,90
09:40:00	2 h	3,60	4,30	0,0056	17,5	-0,41	3,89	40,94	25,03
13:40:00	6 h	2,50	3,20	0,0033	17,5	-0,41	2,79	29,35	17,95
07:40:00	1 d	1,80	2,50	0,0016	18,0	-0,34	2,16	22,79	13,94
*: 100% < 0.125 / < 0.06 Gew. -% der Gesamttrockenmasse ad ges = % / 100 * ad									

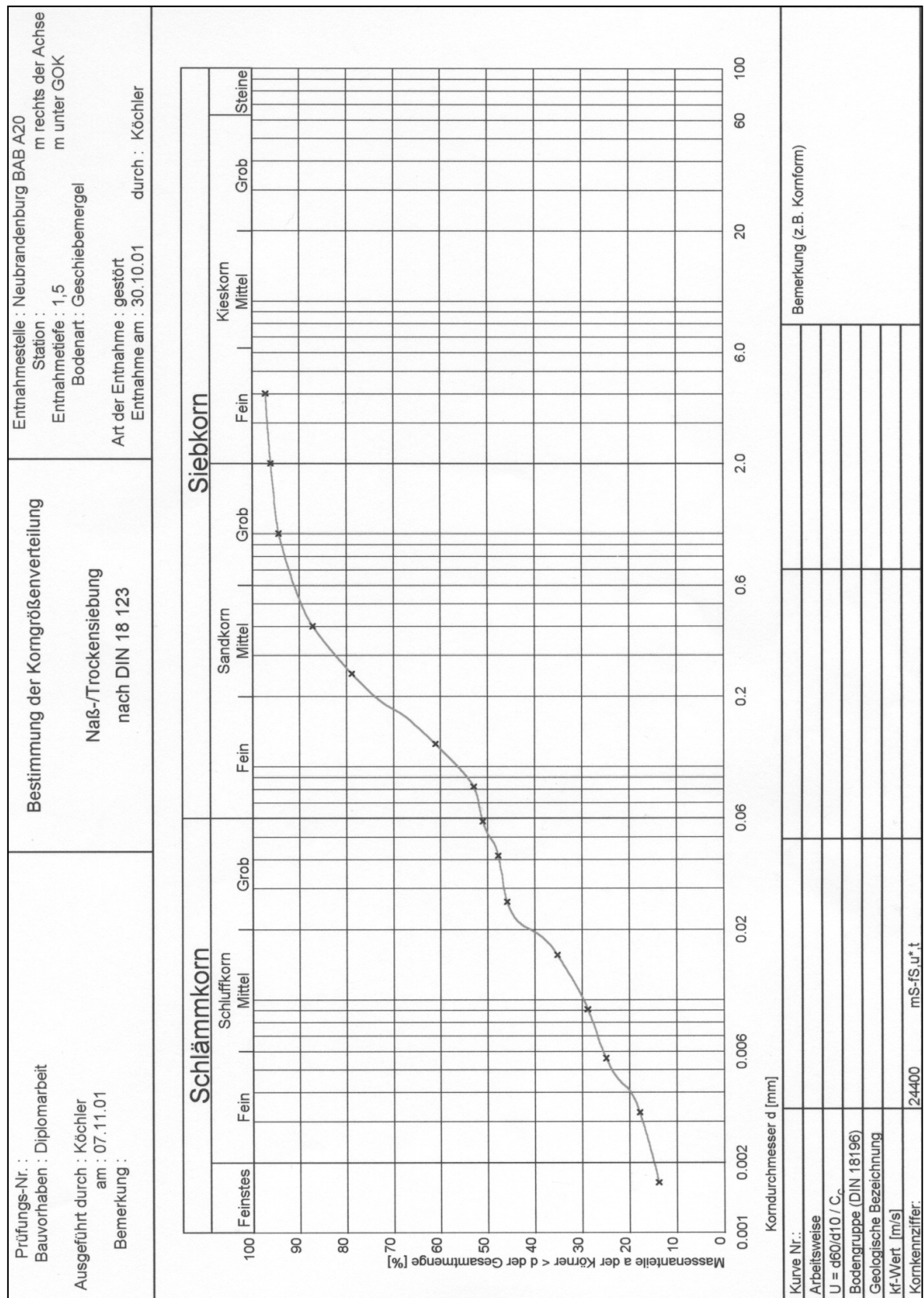
Anlage 2: Kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse 1-2



Anlage 3: Kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse 1-3

Bestimmung der Korngrößenverteilung Naß-/Trockensiebung nach DIN 18 123									
Prüfungs-Nr. : Bauvorhaben : Diplomarbeit Ausgeführt durch : Köchler am : 07.11.01 Bemerkung :					Entnahmestelle : Neubrandenburg BAB A20 Station : m rechts der Achse Entnahmetiefe : 1,5 m unter GOK Bodenart : Geschiebemergel Art der Entnahme : gestört Entnahme am : 30.10.01 durch : Köchler				
Aräometer Nr.: 5 Meniskuskorrektur mit Dispergierungsmittel: Cm = 0,7000 Tetranatriumdiphosphat									
Gewicht der Trockenmasse Durch Trocknen (nach der Schlämmanalyse)									
Behälter Nr.:					Trockene Probe + Behälter md + mB 129,82 g Behälter mB 116,00 g				
Korndichte ρ_s 2,670 g/cm ³					Trockene Probe md 13,82 g $\mu = md * (\rho_s - 1) / \rho_s = 100\%$ der Lesung 8,64 g				
$ad = 100 / \mu * (R + C_\theta) = 11,57 * (R + C_\theta) \% \text{ von } md$									
Uhrzeit Vorgabe:	Abgelaufene Zeit s/m/h/d	Aräometer- lesung $R' = (\rho' - 1) * 10^3$	Lesung + Meniskuskorr. $R = R' + C_m$	Korndurch- messer d [mm]	Temperatur θ [°C]	Temp.korr. C_θ	Korr.Lesung $R + C_\theta$	Schlämm- probe ad [%]	Gesamt- probe * ad ges [%]
08:00:00									
08:00:30	30 s	8,00	8,70	0,0822	17,5	-0,41	8,29	95,87	58,21
08:01:00	1 m	7,50	8,20	0,0585	17,5	-0,41	7,79	90,08	54,70
08:02:00	2 m	7,30	8,00	0,0414	17,5	-0,41	7,59	87,77	53,29
08:05:00	5 m	6,60	7,30	0,0264	17,5	-0,41	6,89	79,67	48,37
08:15:00	15 m	5,00	5,70	0,0156	17,5	-0,41	5,29	61,16	37,14
08:45:00	45 m	4,30	5,00	0,0091	17,5	-0,41	4,59	53,06	32,22
10:00:00	2 h	3,50	4,20	0,0056	17,8	-0,37	3,83	44,34	26,92
14:15:00	6 h 15 m	2,60	3,30	0,0032	18,0	-0,34	2,96	34,29	20,82
08:00:00	1 d	2,00	2,70	0,0016	18,5	-0,26	2,44	28,28	17,17
* : 100% < 0.125 / < 0.06 Gew. -% der Gesamttrockenmasse ad ges = % / 100 * ad									

Anlage 5: Kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse 2-2



Anlage 6: Kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse 2-3

Wassergehaltsbestimmung durch Ofentrocknung (DIN 18121, T.1)

Prüfungsnummer: Entnahmestelle: Neubrandenburg BAB A20
 Bauvorhaben: Diplomarbeit Entnahmetiefe: 1,5 m unter GOK
 Ausgeführt durch / am: Köchler / 31.10.01 Bodenart: Geschiebemergel
 Bemerkung: Art der Entnahme: gestört
 Entnahme durch / am: Köchler / 30.10.01

Versuchsnummer		1	2	3
Feuchte Probe + Behälter G_1	g	476,93	465,59	430,95
Trockene Probe + Behälter G_2	g	423,74	412,34	385,20
Masse des Behälters G_B	g	104,27	106,19	104,01
Wasser $G_W = G_1 - G_2$	g	53,19	53,25	45,75
Trockene Probe $G_t = G_2 - G_B$	g	319,47	306,15	281,19
Wassergehalt $w = G_W / G_t$	1	0,1665	0,1739	0,1627
Wassergehalt: Mittelwert w	%	16,77		

Anlage 7: Wassergehaltsbestimmung

Glühverlust (DIN 18128)

Prüfungsnummer: Entnahmestelle: Neubrandenburg BAB A20
 Bauvorhaben: Diplomarbeit Entnahmetiefe: 1,5 m unter GOK
 Ausgeführt durch / am: Köchler / 31.10.01 Bodenart: Geschiebemergel
 Bemerkung: Art der Entnahme: gestört
 Entnahme durch / am: Köchler / 30.10.01

Versuchsnummer		1	2	3
Masse der ungeglühten Probe mit Behälter $m_d + m_B$	g	49,04	53,08	52,47
Masse der geglühten Probe mit Behälter $m_{gl} + m_B$	g	48,56	52,60	52,00
Masse des Behälters m_B	g	22,66	26,79	25,87
Massenverlust $m_v = (m_d + m_B) - (m_{gl} + m_B)$	g	0,48	0,48	0,47
Trockenmasse des ungeglühten Bodens $m_d = (m_d + m_B) - m_B$	g	26,38	26,29	26,60
Glühverlust $V_{gl} = m_v / m_d$	1	0,0182	0,0183	0,0177
Glühverlust: Mittelwert V_{gl}	%	1,81		

Anlage 8: Gewichtsanteil an organischen Bestandteilen im Boden

Kalkgehalt (DIN 18129)

Prüfungsnummer: Entnahmestelle: Neubrandenburg BAB A20
 Bauvorhaben: Diplomarbeit Entnahmetiefe: 1,5 m unter GOK
 Ausgeführt durch / am: Köchler / 31.10.01 Bodenart: Geschiebemergel
 Bemerkung: Art der Entnahme: gestört
 Entnahme durch / am: Köchler / 30.10.01

Probe-Nr.	Einwaage [g]	Temperatur [°C]	Luftdruck [kPa]	Volumen [cm ³]	Kalkgehalt V_a [%]
1	1,29	21	102,3	30,5	9,93
2	1,08	21	102,3	26,4	10,27
3	0,54	21	102,3	13,6	10,58
Kalkgehalt: Mittelwert [%]					10,26

$$V_a = \frac{kPa \cdot cm^3 \cdot 268,4}{100 \cdot (273 + ^\circ C)} \cdot \frac{0,0044976}{Einwaage}$$

Anlage 9: Kalkgehaltsbestimmung nach *Scheibler*

Bestimmung der Atterberg'schen Grenzen

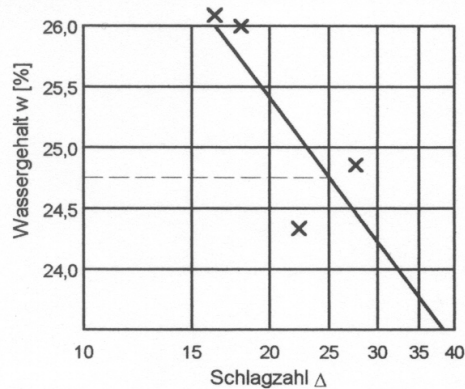
nach DIN 18122

Prüfungs-Nr. :
Bauvorhaben : Diplomarbeit

Ausgeführt durch : Köchler
am : 28.11.01
Bemerkung :

Entnahmestelle : Neubrandenburg BAB 20	
Station :	m rechts der Achse
Entnahmetiefe : 1,5	m unter GOK
Bodenart : Geschiebemergel	

Art der Entnahme : gestört
Entnahme am : 30.10.01 durch : Köchler



Natürlicher Wassergehalt : $w = 16,77 \%$

Masse des Überkorns :

Trockenmasse der Probe :

Überkornanteil : $\ddot{u}$ = 0,00 %

Wassergehalt (Überkorn) w_0 = 0,00 %

$$\text{korr. Wassergehalt : } w_K = \frac{w - w_0 \cdot \ddot{u}}{1.0 - \ddot{u}} = 16,77 \%$$

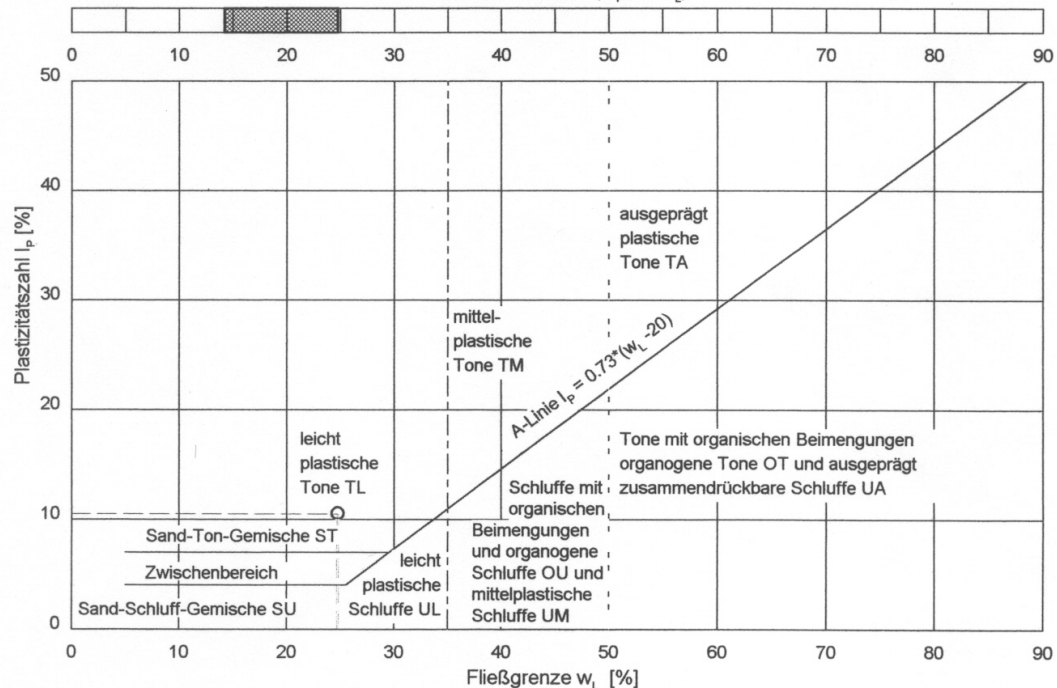
Fließgrenze $w_L = 24,76 \%$

Ausrollgrenze $w_p = 14,22 \%$

$$\text{Plastizitätszahl} \quad I_p = w_L - w_p = 10,54 \%$$
$$\text{Konsistenzzahl} \quad \frac{w_L - w_K}{w_L - w_P} = 0,76$$

Zustandsform

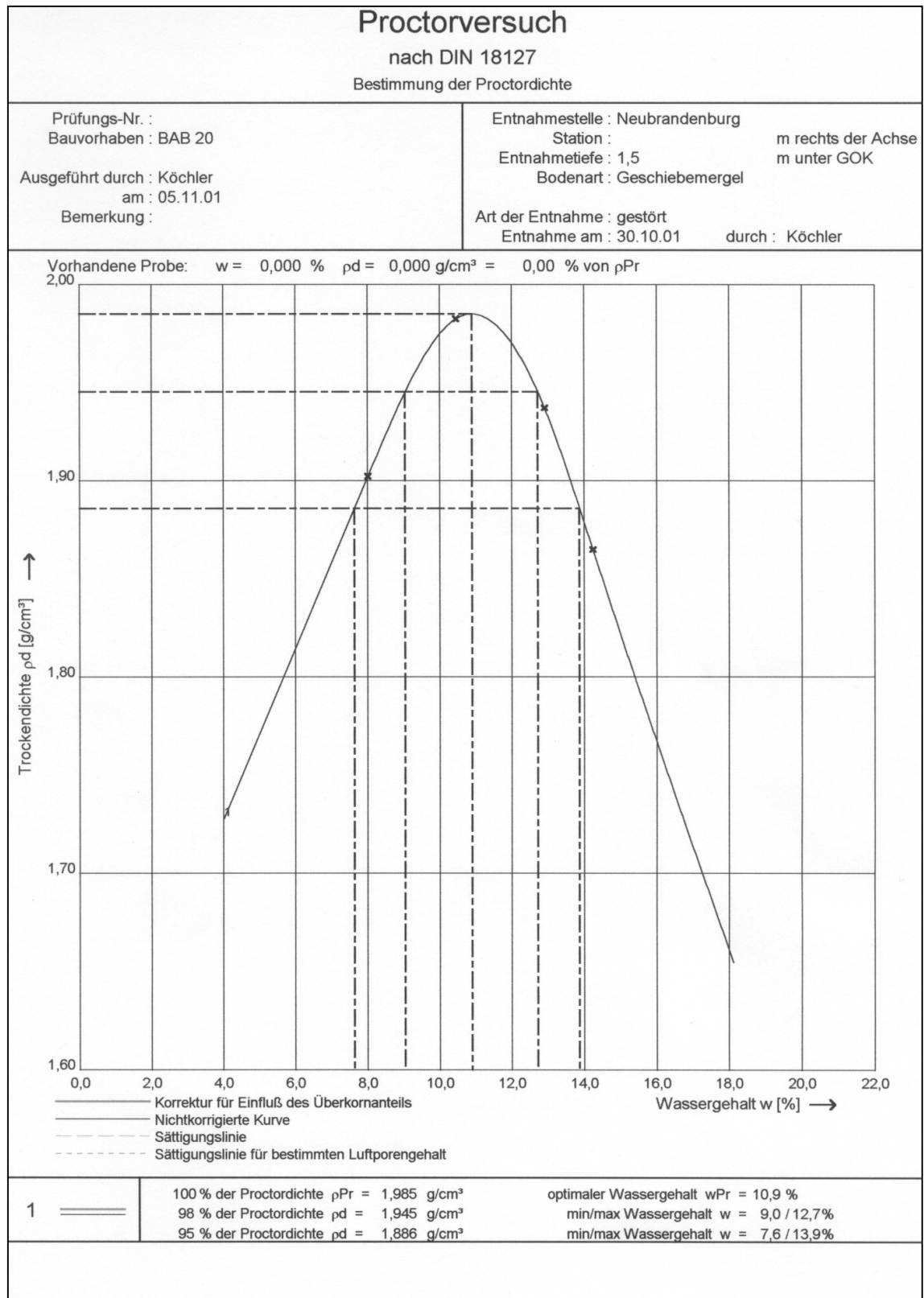
Bildsamkeitsbereich (w_p bis w_L)



Anlage 10: Bestimmung der Konsistenzgrenzen nach Atterberg 1-1

Bestimmung der Atterberg'schen Grenzen nach DIN 18122															
Prüfungs-Nr. : Bauvorhaben : Diplomarbeit Ausgeführt durch : Köchler am : 28.11.01 Bemerkung :										Entnahmestelle : Neubrandenburg BAB 20 Station : m rechts der Achse Entnahmetiefe : 1,5 m unter GOK Bodenart : Geschiebemergel Art der Entnahme : gestört Entnahme am : 30.10.01 durch : Köchler					
Fließgrenze															
Behälter Nr. :	1			U			2			7					
Zahl der Schläge :	28	27	28	17	16	16	22	23	22	19	17	18			
Feuchte Probe + Behälter $m+m_B$ [g] :	83,00			78,71			93,22			90,25					
Trockene Probe + Behälter m_d+m_B [g] :	81,69			77,03			90,02			86,73					
Behälter m_B [g] :	76,42			70,59			76,87			73,19					
Wasser $m - m_d = m_w$ [g] :	1,31			1,68			3,20			3,52					
Trockene Probe m_d [g] :	5,27			6,44			13,15			13,54					
Wassergehalt $m_w / m_d \cdot 100[\%]$:	24,86			26,09			24,33			26,00					
Wert übernehmen	☒			☒			☒			☒					
Ausrollgrenze															
Behälter Nr. :	19			14			17								
Feuchte Probe + Behälter $m+m_B$ [g] :	127,03			132,02			130,01								
Trockene Probe + Behälter m_d+m_B [g] :	126,53			131,41			129,50								
Behälter m_B [g] :	123,08			127,03			125,92								
Wasser $m - m_d = m_w$ [g] :	0,50			0,61			0,51								
Trockene Probe m_d [g] :	3,45			4,38			3,58								
Wassergehalt $m_w / m_d \cdot 100[\%]$:	14,49			13,93			14,25								

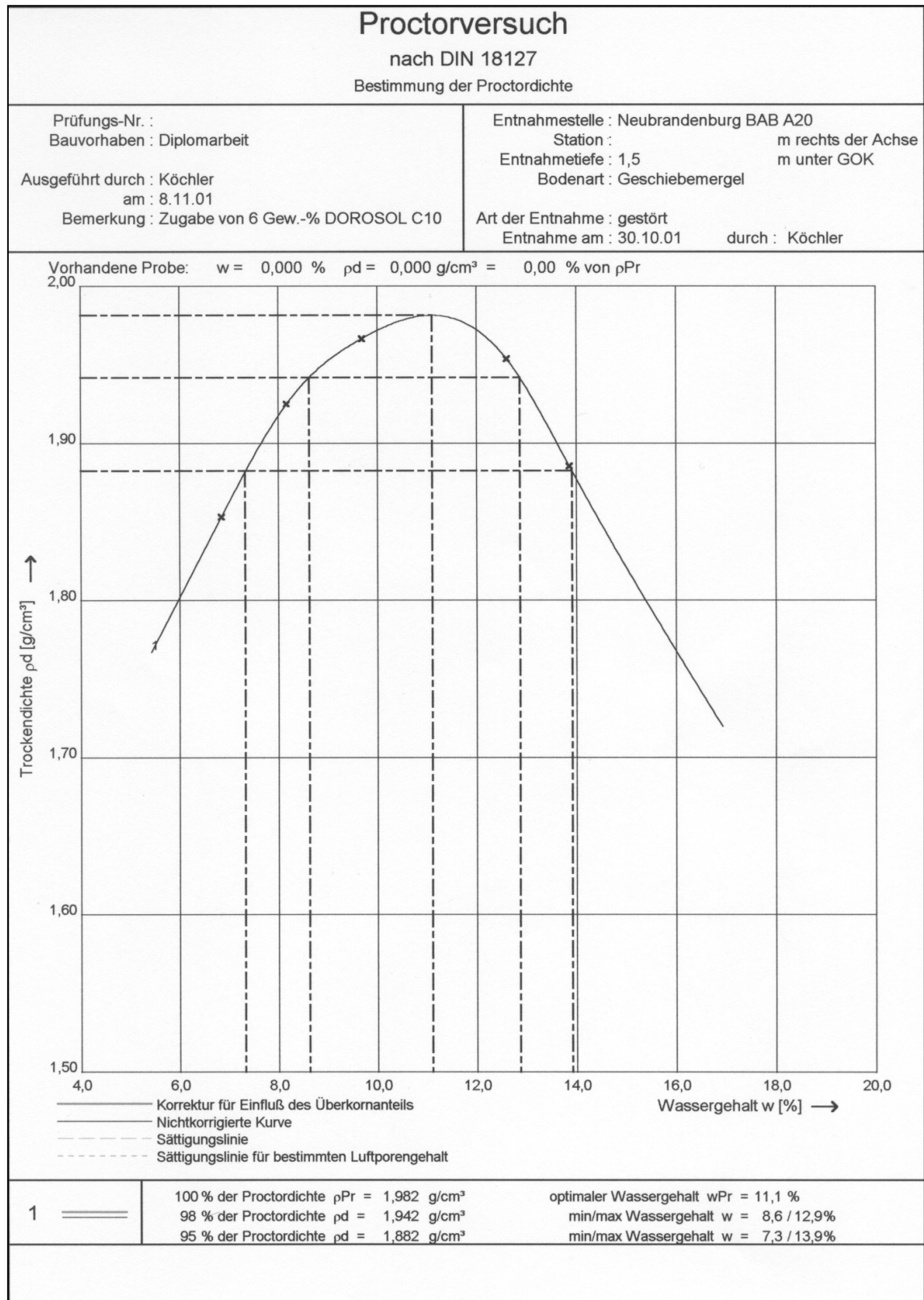
Anlage 11: Bestimmung der Konsistenzgrenzen nach Atterberg 2-2



Anlage 12: Proctorversuch am unkonditionierten Boden 1-2

Proctorversuch nach DIN 18127 Bestimmung der Proctordichte										
Prüfungs-Nr. : Bauvorhaben : BAB 20 Ausgeführt durch : Köchler am : 05.11.01 Bemerkung :					Entnahmestelle : Neubrandenburg Station : m rechts der Achse Entnahmetiefe : 1,5 m unter GOK Bodenart : Geschiebemergel Art der Entnahme : gestört Entnahme am : 30.10.01 durch : Köchler					
Versuchszylinder d1 = 100,00 mm Zylinderhöhe h1 = 120,00 mm a = 7,50 mm s1 = 11,00 mm Fallgewicht = 2,50 kg Fallhöhe h2 = 300,00 mm Durchmesser d2 = 50,00 mm					zulässiges Größtkorn 20,00 mm Anzahl der Schichten 3 Anzahl der Schläge je Schicht 25 Korndichte der Probe $\rho_s =$ 0,000 g/cm ³ Überkornanteil $\bar{u} =$ 0,00 % Wassergehalt des Überkorns $w_{\bar{u}} =$ 0,00 % Korndichte des Überkorns $\rho_{s\bar{u}} =$ 0,000 g/cm ³					
Nr. des Versuchs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bestimmung der Feuchtdichte ρ										
Masse der Feuchtprobe mit Zylinder m + mz [g]	12863,5	12991,0	12988,5	12935,0						
Masse des Zylinders mz [g]	10927,0	10927,0	10927,0	10927,0						
Masse der feuchten Probe mw [g]	1936,5	2064,0	2061,5	2008,0						
Abstand von Zylinder- rand bis Probe [mm]	0,00	0,00	0,00	0,00						
Volumen der Probe V [cm ³]	942,48	942,48	942,48	942,48						
Feuchtdichte $m/V = \rho$ [g/cm ³]	2,055	2,190	2,187	2,131						
Trockendichte $\rho / (1 + w) = \rho_d$ [g/cm ³]	1,902	1,983	1,937	1,865						
Bestimmung des Wassergehaltes w										
Masse der Feuchtprobe mit Behälter m + mB [g]	101,3	107,3	114,9	149,5						
Masse der trock. Probe mit Behälter md + mB [g]	99,0	103,9	109,8	139,9						
Masse des Behälters mB [g]	70,3	71,4	70,3	72,5						
Masse des Porenwassers mw [g]	2,3	3,4	5,1	9,6						
Masse der trockenen Probe md [g]	28,7	32,5	39,5	67,4						
Wassergehalt $m_w/m_d = w$ [%]	8,01	10,46	12,91	14,24						
Korrektur für den Einfluss des Überkornanteiles $\bar{u}$										
Korr. Wassergehalt $w' = w \cdot (1 - \bar{u}) + w_{\bar{u}} \cdot \bar{u}$ [%]										
Korr. Trockendichte $\rho_d' = \rho_d \cdot (1 - \bar{u}) + 0,9 \cdot \bar{u} \cdot \rho_{s\bar{u}}$										
Wert in Kurve darstellen ?	☒	☒	☒	☒						
Bemerkungen :										

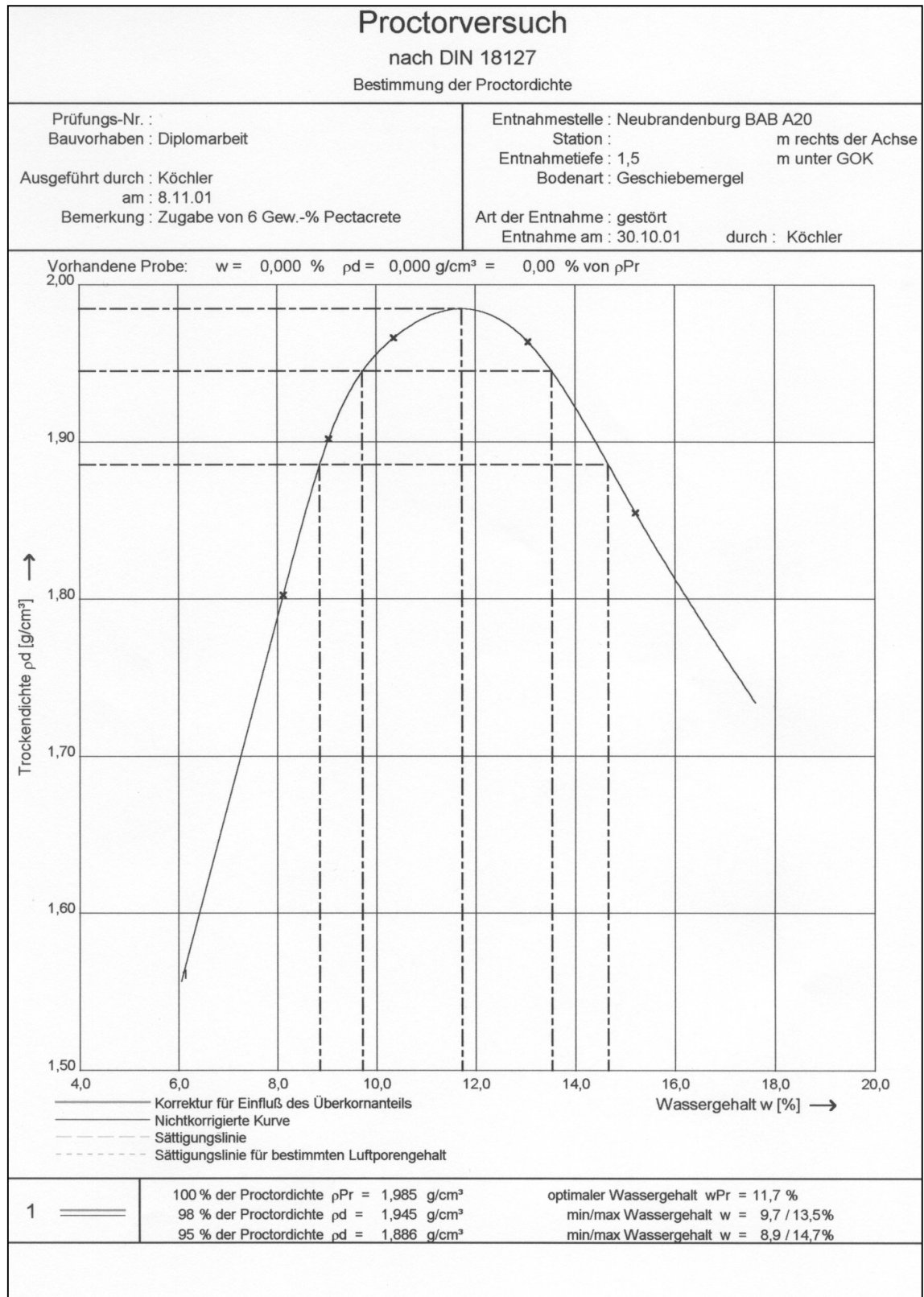
Anlage 13: Proctorversuch am unkonditionierten Boden 2-2



Anlage 14: Proctorversuch am mit 6 Gew.-% DOROSOL C10 stabilisiertem Boden 1-2

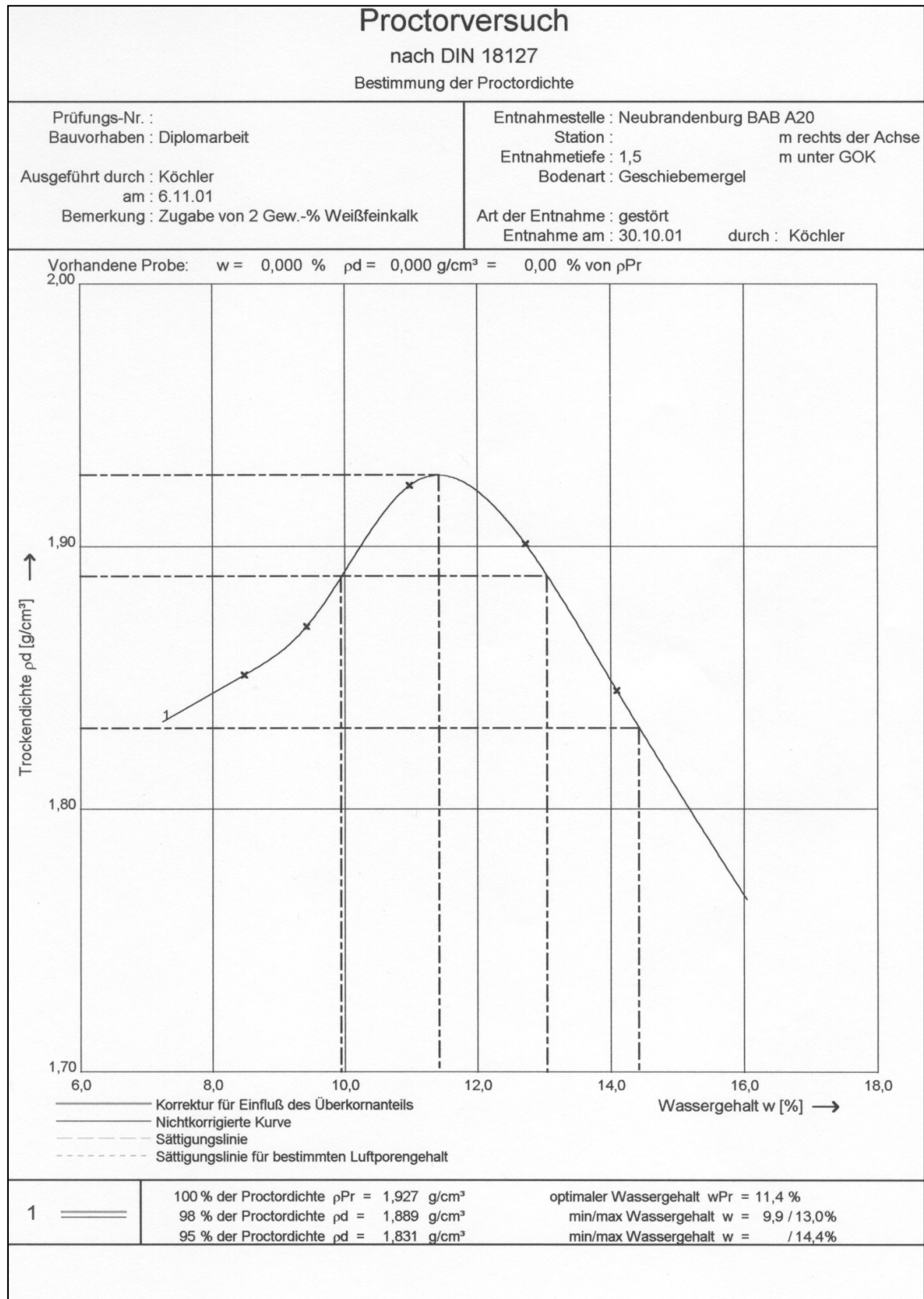
Proctorversuch nach DIN 18127 Bestimmung der Proctordichte										
Prüfungs-Nr. : Bauvorhaben : Diplomarbeit Ausgeführt durch : Köchler am : 8.11.01 Bemerkung : Zugabe von 6 Gew.-% DOROSOL C10					Entnahmestelle : Neubrandenburg BAB A20 Station : m rechts der Achse Entnahmetiefe : 1,5 m unter GOK Bodenart : Geschiebemergel Art der Entnahme : gestört Entnahme am : 30.10.01 durch : Köchler					
Versuchszylinder d1 = 100,00 mm Zylinderhöhe h1 = 120,00 mm a = 7,50 mm s1 = 11,00 mm Fallgewicht = 2,50 kg Fallhöhe h2 = 300,00 mm Durchmesser d2 = 50,00 mm					zulässiges Größtkorn 20,00 mm Anzahl der Schichten 3 Anzahl der Schläge je Schicht 25 Korndichte der Probe $\rho_s = 0,000 \text{ g/cm}^3$ Überkornanteil $\bar{u} = 0,00 \%$ Wassergehalt des Überkorns $w_{\bar{u}} = 0,00 \%$ Korndichte des Überkorns $\rho_{s\bar{u}} = 0,000 \text{ g/cm}^3$					
Nr. des Versuchs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bestimmung der Feuchtdichte ρ										
Masse der Feuchtprobe mit Zylinder m + mz [g]	12797,0	12893,5	12964,0	13004,5	12954,5					
Masse des Zylinders mz [g]	10931,0	10931,0	10931,0	10931,0	10931,0					
Masse der feuchten Probe mw [g]	1866,0	1962,5	2033,0	2073,5	2023,5					
Abstand von Zylinder- rand bis Probe [mm]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
Volumen der Probe V [cm ³]	942,48	942,48	942,48	942,48	942,48					
Feuchtdichte $m/V = \rho$ [g/cm ³]	1,980	2,082	2,157	2,200	2,147					
Trockendichte $\rho / (1 + w) = \rho_d$ [g/cm ³]	1,853	1,925	1,967	1,954	1,886					
Bestimmung des Wassergehaltes w										
Masse der Feuchtprobe mit Behälter m + mB [g]	144,9	140,3	136,6	140,0	158,0					
Masse der trock. Probe mit Behälter md + mB [g]	140,5	135,1	131,1	132,2	147,7					
Masse des Behälters mB [g]	76,2	71,4	74,3	70,3	73,4					
Masse des Porenwassers mw [g]	4,4	5,2	5,5	7,8	10,3					
Masse der trockenen Probe md [g]	64,3	63,7	56,8	61,9	74,3					
Wassergehalt $mw/md = w$ [%]	6,84	8,16	9,68	12,60	13,86					
Korrektur für den Einfluss des Überkornanteiles $\bar{u}$										
Korr. Wassergehalt $w' = w \cdot (1 - \bar{u}) + w_{\bar{u}} \cdot \bar{u}$ [%]										
Korr. Trockendichte $\rho_d' = \rho_d \cdot (1 - \bar{u}) + 0,9 \cdot \bar{u} \cdot \rho_{s\bar{u}}$										
Wert in Kurve darstellen ?	☒	☒	☒	☒	☒					
Bemerkungen :										

Anlage 15: Proctorversuch am mit 6 Gew.-% DOROSOL C10 stabilisiertem Boden 2-2


Anlage 16: Proctorversuch am mit 6 Gew.-% Pectacrete stabilisiertem Boden 1-2

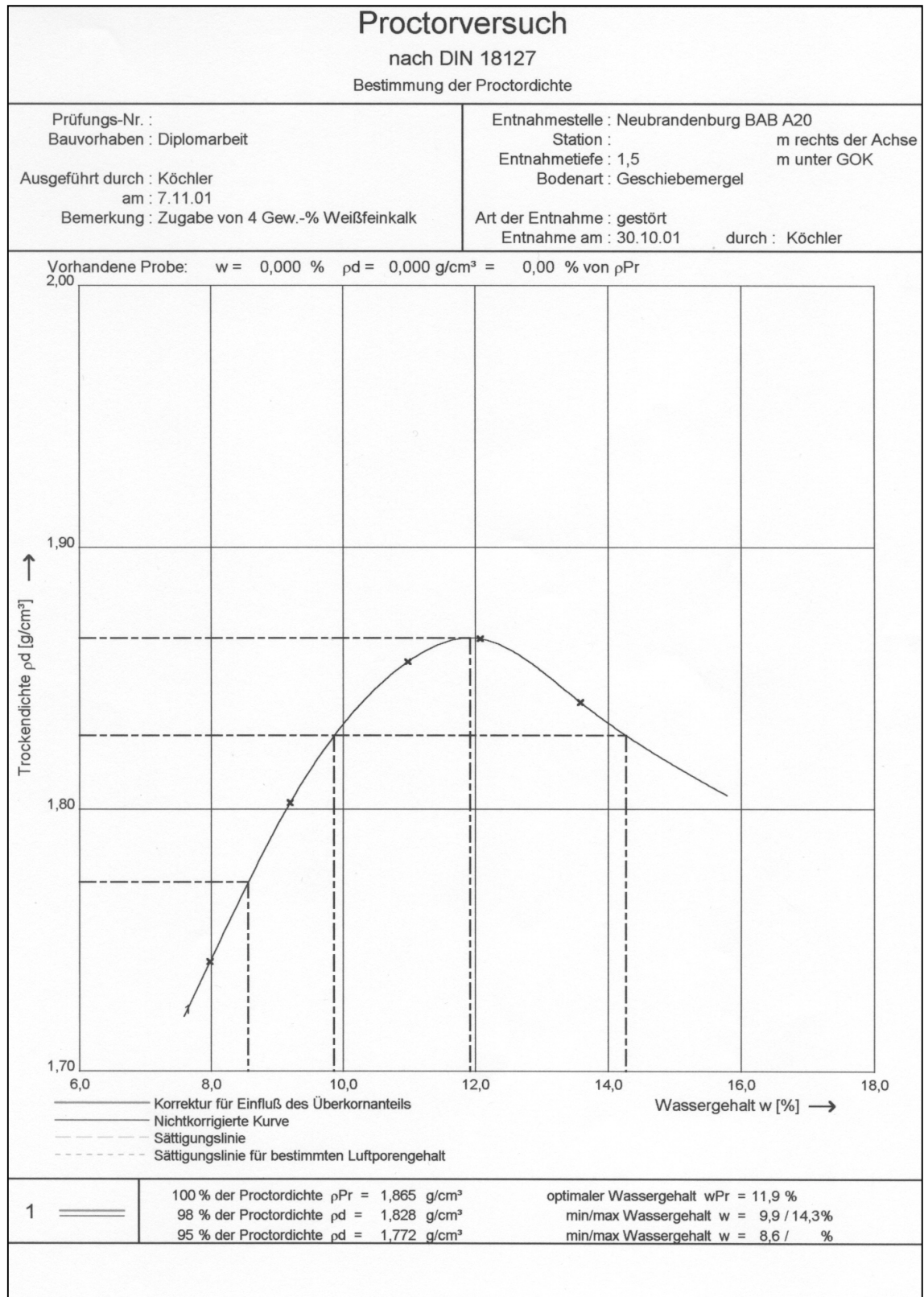
Proctorversuch nach DIN 18127 Bestimmung der Proctordichte										
Prüfungs-Nr. : Bauvorhaben : Diplomarbeit Ausgeführt durch : Köchler am : 8.11.01 Bemerkung : Zugabe von 6 Gew.-% Pectacrete					Entnahmestelle : Neubrandenburg BAB A20 Station : m rechts der Achse Entnahmetiefe : 1,5 m unter GOK Bodenart : Geschiebemergel Art der Entnahme : gestört Entnahme am : 30.10.01 durch : Köchler					
Versuchszylinder d1 = 100,00 mm Zylinderhöhe h1 = 120,00 mm a = 7,50 mm s1 = 11,00 mm Fallgewicht = 2,50 kg Fallhöhe h2 = 300,00 mm Durchmesser d2 = 50,00 mm					zulässiges Größtkorn 20,00 mm Anzahl der Schichten 3 Anzahl der Schläge je Schicht 25 Korndichte der Probe $\rho_s = 0,000 \text{ g/cm}^3$ Überkornanteil $\bar{u} = 0,00 \%$ Wassergehalt des Überkorns $w\bar{u} = 0,00 \%$ Korndichte des Überkorns $\rho_{s\bar{u}} = 0,000 \text{ g/cm}^3$					
Nr. des Versuchs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bestimmung der Feuchtdichte ρ										
Masse der Feuchtprobe mit Zylinder m + mz [g]	12767,5	12885,5	12976,0	13023,5	12945,0					
Masse des Zylinders mz [g]	10931,0	10931,0	10931,0	10931,0	10931,0					
Masse der feuchten Probe mw [g]	1836,5	1954,5	2045,0	2092,5	2014,0					
Abstand von Zylinder- rand bis Probe [mm]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
Volumen der Probe V [cm³]	942,48	942,48	942,48	942,48	942,48					
Feuchtdichte $m/V = \rho$ [g/cm³]	1,949	2,074	2,170	2,220	2,137					
Trockendichte $\rho / (1 + w) = \rho_d$ [g/cm³]	1,802	1,902	1,966	1,964	1,855					
Bestimmung des Wassergehaltes w										
Masse der Feuchtprobe mit Behälter m + mB [g]	145,5	142,3	138,3	141,3	157,3					
Masse der trock. Probe mit Behälter md + mB [g]	140,3	136,5	132,4	133,1	146,3					
Masse des Behälters mB [g]	76,2	72,3	75,4	70,3	74,0					
Masse des Porenwassers mw [g]	5,2	5,8	5,9	8,2	11,0					
Masse der trockenen Probe md [g]	64,1	64,2	57,0	62,8	72,3					
Wassergehalt $m_w/m_d = w$ [%]	8,11	9,03	10,35	13,06	15,21					
Korrektur für den Einfluss des Überkornanteiles $\bar{u}$										
Korr. Wassergehalt $w' = w \cdot (1 - \bar{u}) + w\bar{u} \cdot \bar{u}$ [%]										
Korr. Trockendichte $\rho_d' = \rho_d \cdot (1 - \bar{u}) + 0,9 \cdot \bar{u} \cdot \rho_{s\bar{u}}$										
Wert in Kurve darstellen ?	☒	☒	☒	☒	☒					
Bemerkungen :										

Anlage 17: Proctorversuch am mit 6 Gew.-% Pectacrete stabilisiertem Boden 2-2


Anlage 18: Proctorversuch am mit 2 Gew.-% Weißfeinkalk stabilisiertem Boden 1-2

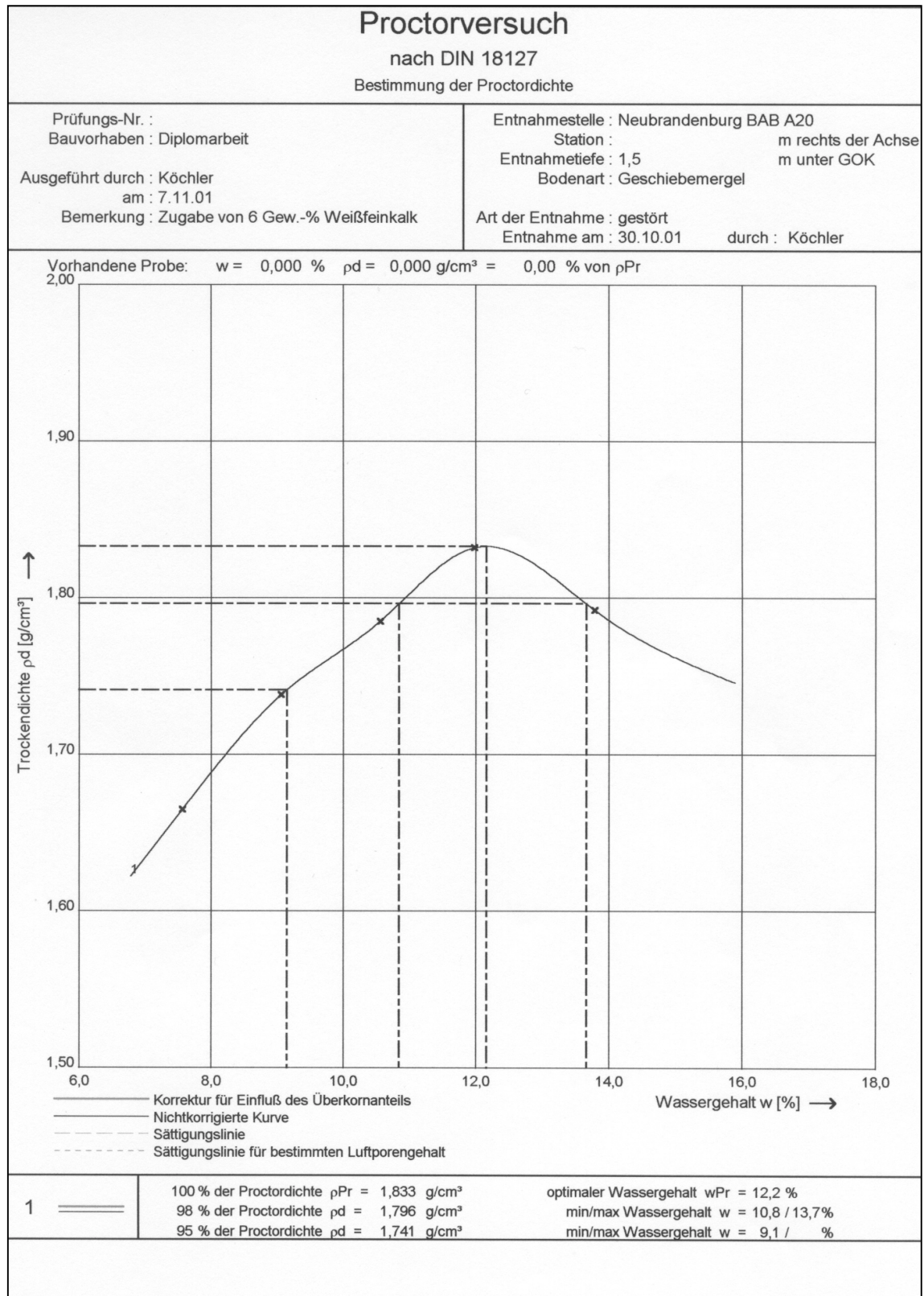
Proctorversuch nach DIN 18127 Bestimmung der Proctordichte										
Prüfungs-Nr. : Bauvorhaben : Diplomarbeit Ausgeführt durch : Köchler am : 6.11.01 Bemerkung : Zugabe von 2 Gew.-% Weißfeinkalk					Entnahmestelle : Neubrandenburg BAB A20 Station : m rechts der Achse Entnahmetiefe : 1,5 m unter GOK Bodenart : Geschiebemergel Art der Entnahme : gestört Entnahme am : 30.10.01 durch : Köchler					
Versuchszylinder d1 = 100,00 mm Zylinderhöhe h1 = 120,00 mm a = 7,50 mm s1 = 11,00 mm Fallgewicht = 2,50 kg Fallhöhe h2 = 300,00 mm Durchmesser d2 = 50,00 mm					zulässiges Größtkorn 20,00 mm Anzahl der Schichten 3 Anzahl der Schläge je Schicht 25 Korndichte der Probe $\rho_s = 0,000 \text{ g/cm}^3$ Überkornanteil $\bar{u} = 0,00 \%$ Wassergehalt des Überkorns $w_{\bar{u}} = 0,00 \%$ Korndichte des Überkorns $\rho_{s\bar{u}} = 0,000 \text{ g/cm}^3$					
Nr. des Versuchs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bestimmung der Feuchtdichte ρ										
Masse der Feuchtprobe mit Zylinder m + mz [g]	12823,5	12859,0	12942,5	12950,5	12915,0					
Masse des Zylinders mz [g]	10931,0	10931,0	10931,0	10931,0	10931,0					
Masse der feuchten Probe mw [g]	1892,5	1928,0	2011,5	2019,5	1984,0					
Abstand von Zylinder- rand bis Probe [mm]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
Volumen der Probe V [cm ³]	942,48	942,48	942,48	942,48	942,48					
Feuchtdichte m/V = ρ [g/cm ³]	2,008	2,046	2,134	2,143	2,105					
Trockendichte $\rho / (1 + w) = \rho_d$ [g/cm ³]	1,851	1,870	1,923	1,901	1,845					
Bestimmung des Wassergehaltes w										
Masse der Feuchtprobe mit Behälter m + mB [g]	137,0	142,4	137,1	141,4	163,4					
Masse der trock. Probe mit Behälter md + mB [g]	132,1	136,7	130,8	133,5	151,9					
Masse des Behälters mB [g]	74,3	76,2	73,4	71,4	70,3					
Masse des Porenwassers mw [g]	4,9	5,7	6,3	7,9	11,5					
Masse der trockenen Probe md [g]	57,8	60,5	57,4	62,1	81,6					
Wassergehalt mw/md = w [%]	8,48	9,42	10,98	12,72	14,09					
Korrektur für den Einfluss des Überkornanteiles $\bar{u}$										
Korr. Wassergehalt $w' = w \cdot (1 - \bar{u}) + w_{\bar{u}} \cdot \bar{u}$ [%]										
Korr. Trockendichte $\rho_d' = \rho_d \cdot (1 - \bar{u}) + 0,9 \cdot \bar{u} \cdot \rho_{s\bar{u}}$										
Wert in Kurve darstellen ?	☒	☒	☒	☒	☒					
Bemerkungen :										

Anlage 19: Proctorversuch am mit 2 Gew.-% Weißfeinkalk stabilisiertem Boden 2-2


Anlage 20: Proctorversuch am mit 4 Gew.-% Weißfeinkalk stabilisiertem Boden 1-2

Proctorversuch nach DIN 18127 Bestimmung der Proctordichte										
Prüfungs-Nr. : Bauvorhaben : Diplomarbeit Ausgeführt durch : Köchler am : 7.11.01 Bemerkung : Zugabe von 4 Gew.-% Weißfeinkalk					Entnahmestelle : Neubrandenburg BAB A20 Station : m rechts der Achse Entnahmetiefe : 1,5 m unter GOK Bodenart : Geschiebemergel Art der Entnahme : gestört Entnahme am : 30.10.01 durch : Köchler					
Versuchszylinder d1 = 100,00 mm Zylinderhöhe h1 = 120,00 mm a = 7,50 mm s1 = 11,00 mm Fallgewicht = 2,50 kg Fallhöhe h2 = 300,00 mm Durchmesser d2 = 50,00 mm					zulässiges Größtkorn 20,00 mm Anzahl der Schichten 3 Anzahl der Schläge je Schicht 25 Korndichte der Probe $\rho_s = 0,000 \text{ g/cm}^3$ Überkornanteil $\bar{u} = 0,00 \%$ Wassergehalt des Überkorns $w\bar{u} = 0,00 \%$ Korndichte des Überkorns $\rho_{s\bar{u}} = 0,000 \text{ g/cm}^3$					
Nr. des Versuchs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bestimmung der Feuchtdichte ρ										
Masse der Feuchtprobe mit Zylinder m + mz [g]	12703,5	12786,0	12872,5	12901,0	12901,5					
Masse des Zylinders mz [g]	10931,0	10931,0	10931,0	10931,0	10931,0					
Masse der feuchten Probe mw [g]	1772,5	1855,0	1941,5	1970,0	1970,5					
Abstand von Zylinder- rand bis Probe [mm]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
Volumen der Probe V [cm³]	942,48	942,48	942,48	942,48	942,48					
Feuchtdichte $m/V = \rho$ [g/cm³]	1,881	1,968	2,060	2,090	2,091					
Trockendichte $\rho / (1 + w) = \rho_d$ [g/cm³]	1,742	1,802	1,856	1,865	1,841					
Bestimmung des Wassergehaltes w										
Masse der Feuchtprobe mit Behälter m + mB [g]	137,9	142,7	137,1	140,1	158,1					
Masse der trock. Probe mit Behälter md + mB [g]	133,2	137,1	130,8	132,7	147,6					
Masse des Behälters mB [g]	74,3	76,2	73,4	71,4	70,3					
Masse des Porenwassers mw [g]	4,7	5,6	6,3	7,4	10,5					
Masse der trockenen Probe md [g]	58,9	60,9	57,4	61,3	77,3					
Wassergehalt $mw/md = w$ [%]	7,98	9,20	10,98	12,07	13,58					
Korrektur für den Einfluss des Überkornanteiles $\bar{u}$										
Korr. Wassergehalt $w' = w \cdot (1 - \bar{u}) + w\bar{u} \cdot \bar{u}$ [%]										
Korr. Trockendichte $\rho_d' = \rho_d \cdot (1 - \bar{u}) + 0,9 \cdot \bar{u} \cdot \rho_{s\bar{u}}$										
Wert in Kurve darstellen ?	☒	☒	☒	☒	☒					
Bemerkungen :										

Anlage 21: Proctorversuch am mit 4 Gew.-% Weißfeinkalk stabilisiertem Boden 2-2



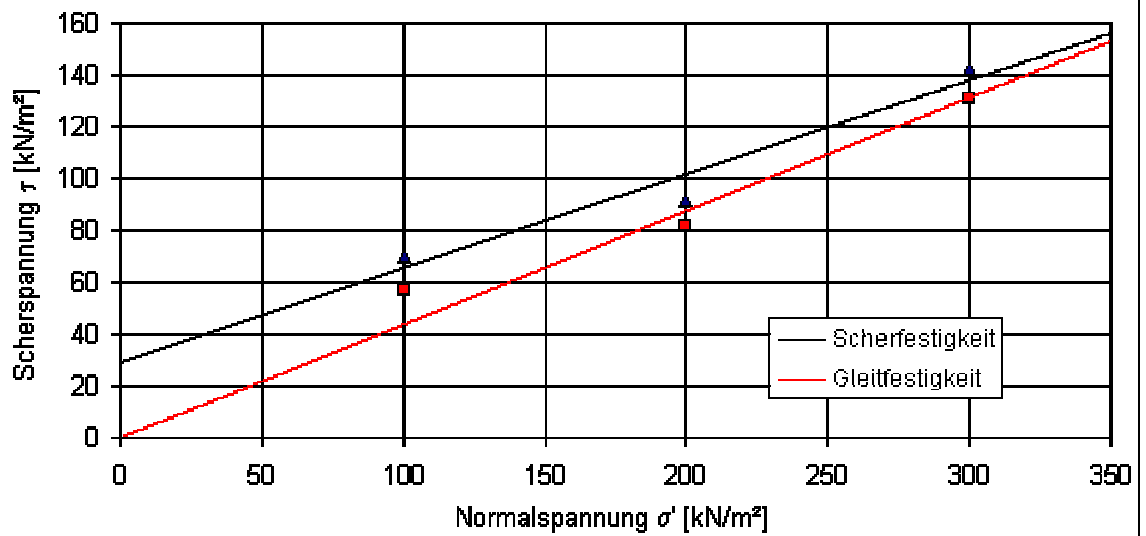
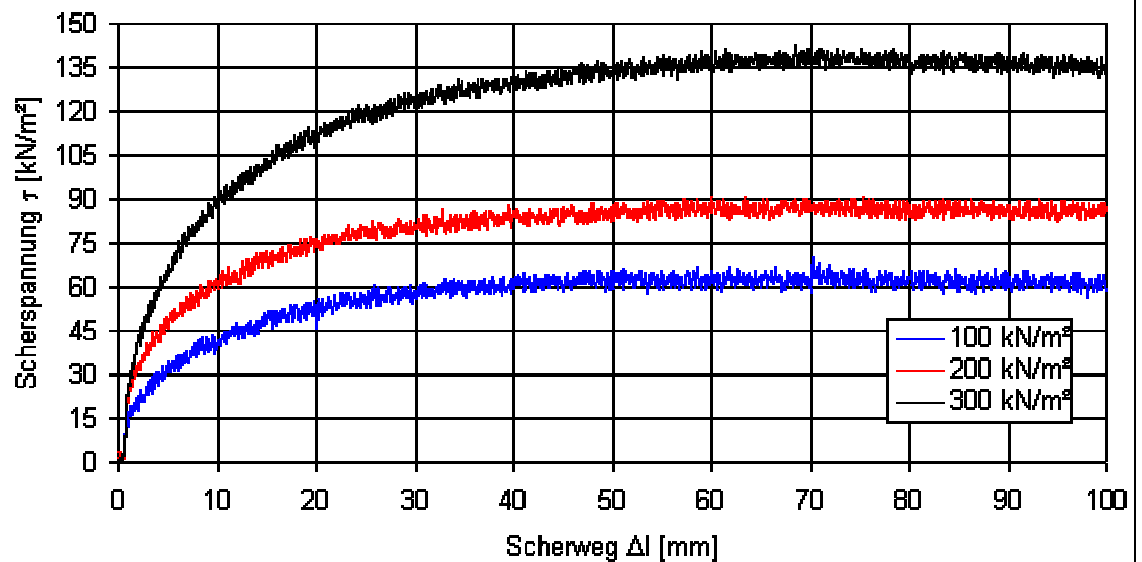
Anlage 22: Proctorversuch am mit 6 Gew.-% Weißfeinkalk stabilisiertem Boden 1-2

Proctorversuch nach DIN 18127 Bestimmung der Proctordichte										
Prüfungs-Nr. : Bauvorhaben : Diplomarbeit Ausgeführt durch : Köchler am : 7.11.01 Bemerkung : Zugabe von 6 Gew.-% Weißfeinkalk					Entnahmestelle : Neubrandenburg BAB A20 Station : m rechts der Achse Entnahmetiefe : 1,5 m unter GOK Bodenart : Geschiebemergel Art der Entnahme : gestört Entnahme am : 30.10.01 durch : Köchler					
Versuchszylinder d1 = 100,00 mm Zylinderhöhe h1 = 120,00 mm a = 7,50 mm s1 = 11,00 mm Fallgewicht = 2,50 kg Fallhöhe h2 = 300,00 mm Durchmesser d2 = 50,00 mm					zulässiges Größtkorn 20,00 mm Anzahl der Schichten 3 Anzahl der Schläge je Schicht 25 Korndichte der Probe $\rho_s = 0,000 \text{ g/cm}^3$ Überkornanteil $\bar{u} = 0,00 \%$ Wassergehalt des Überkorns $w\bar{u} = 0,00 \%$ Korndichte des Überkorns $\rho_{s\bar{u}} = 0,000 \text{ g/cm}^3$					
Nr. des Versuchs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bestimmung der Feuchtdichte ρ										
Masse der Feuchtprobe mit Zylinder m + mz [g]	12615,0	12713,5	12787,0	12860,5	12849,0					
Masse des Zylinders mz [g]	10927,0	10927,0	10927,0	10927,0	10927,0					
Masse der feuchten Probe mw [g]	1688,0	1786,5	1860,0	1933,5	1922,0					
Abstand von Zylinder- rand bis Probe [mm]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
Volumen der Probe V [cm ³]	942,48	942,48	942,48	942,48	942,48					
Feuchtdichte m/V = ρ [g/cm ³]	1,791	1,896	1,974	2,052	2,039					
Trockendichte $\rho / (1 + w) = \rho_d$ [g/cm ³]	1,665	1,738	1,785	1,832	1,792					
Bestimmung des Wassergehaltes w										
Masse der Feuchtprobe mit Behälter m + mB [g]	135,7	172,2	152,8	166,8	166,3					
Masse der trock. Probe mit Behälter md + mB [g]	131,1	164,3	145,4	156,5	154,8					
Masse des Behälters mB [g]	70,3	77,1	75,3	70,5	71,4					
Masse des Porenwassers mw [g]	4,6	7,9	7,4	10,3	11,5					
Masse der trockenen Probe md [g]	60,8	87,2	70,1	86,0	83,4					
Wassergehalt mw/md = w [%]	7,57	9,06	10,56	11,98	13,79					
Korrektur für den Einfluss des Überkornanteiles $\bar{u}$										
Korr. Wassergehalt $w' = w \cdot (1 - \bar{u}) + w\bar{u} \cdot \bar{u}$ [%]										
Korr. Trockendichte $\rho_d' = \rho_d \cdot (1 - \bar{u}) + 0,9 \cdot \bar{u} \cdot \rho_{s\bar{u}}$										
Wert in Kurve darstellen ?	☒	☒	☒	☒	☒					
Bemerkungen :										

Anlage 23: Proctorversuch am mit 6 Gew.-% Weißfeinkalk stabilisiertem Boden 2-2

Prüfungs-Nr.: H	Entnahmestelle: Neubrandenburg
Bauvorhaben: Diplomarbeit	Station: m rechts der Achse
BAB A 20	Entnahmetiefe: 1,5 m unter GOK
Ausgeführt durch: Köchler	Bodenart: Geschiebemergel
am: 29.09.01	Art der Entnahme: gestört
Bemerkung: ohne Bindemittel	Entnahme am: 27.09.01 durch: Köchler
$D_{pr} = 0,95$	

Auswertung des Scherversuchs

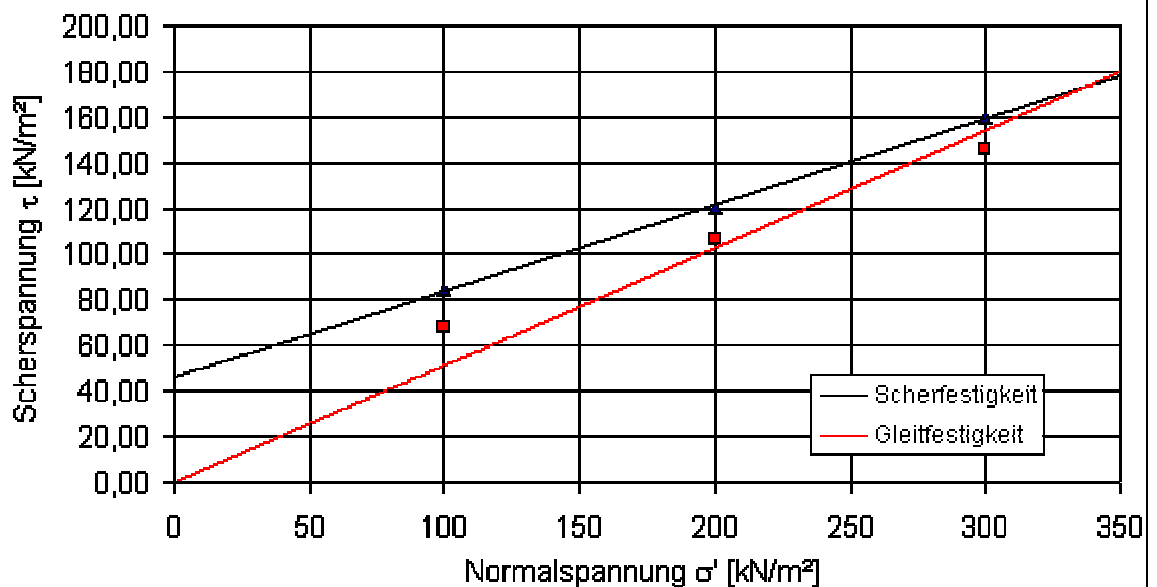
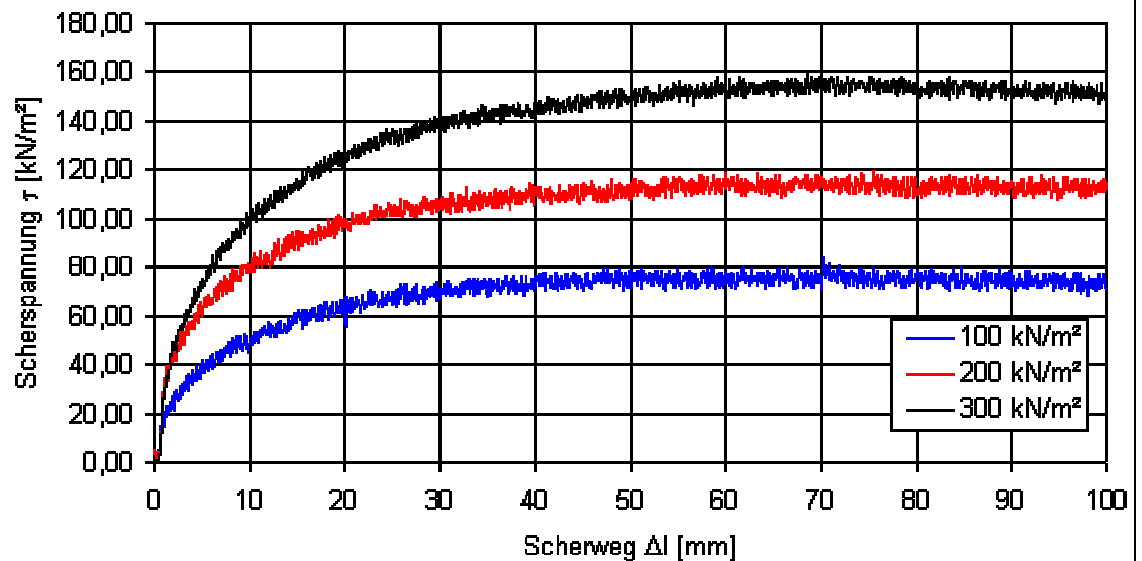


Scherfestigkeit: $c' = 29,33 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 19,88^\circ$

Gleitfestigkeit: $c' = 0,00 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 23,60^\circ$

Prüfungs-Nr.: G	Entnahmestelle: Neubrandenburg
Bauvorhaben: Diplomarbeit	Station: m rechts der Achse
BAB A 20	Entnahmetiefe: 1,5 m unter GOK
Ausgeführt durch: Köchler	Bodenart: Geschiebemergel
am: 30.09.01	Art der Entnahme: gestört
Bemerkung: ohne Bindemittel	Entnahme am: 27.09.01 durch: Köchler
$D_{pr} = 0,98$	

Auswertung des Scherversuchs

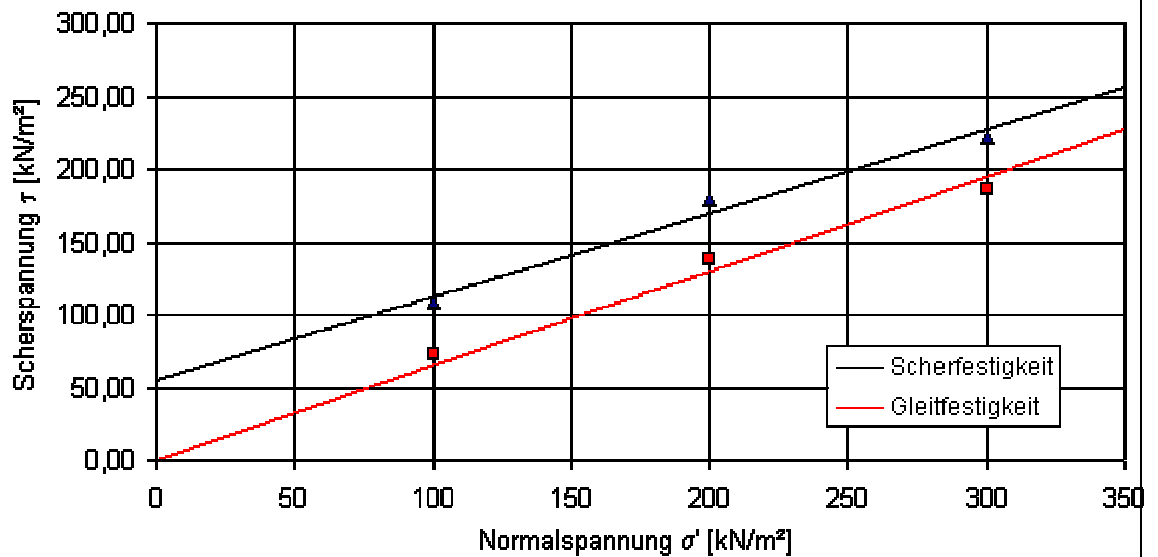
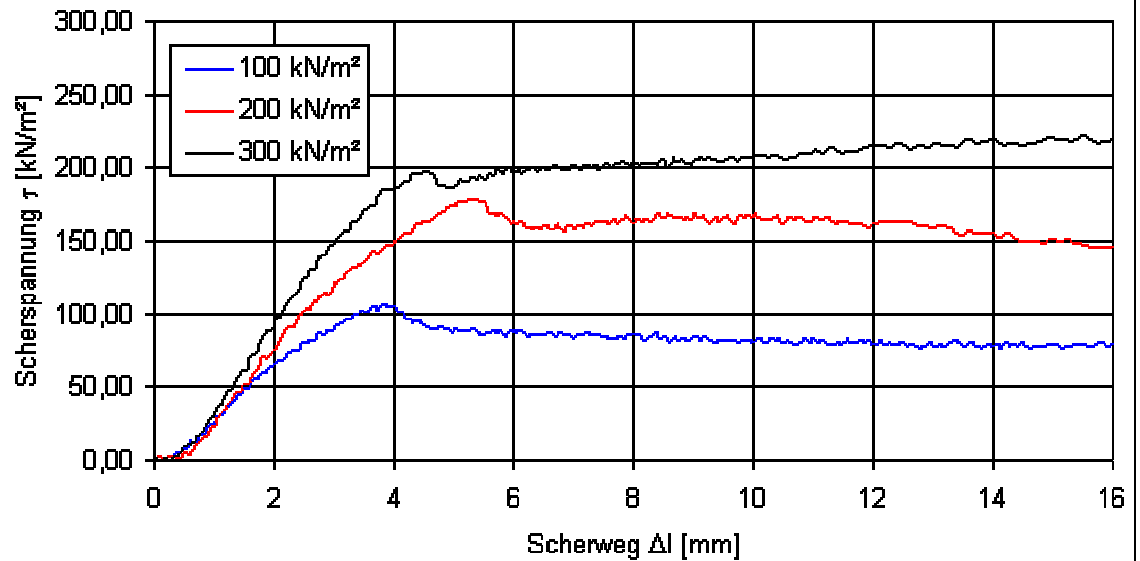


Scherfestigkeit: $c' = 46,63 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 20,56^\circ$

Gleitfestigkeit: $c' = 0,00 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 27,24^\circ$

Prüfungs-Nr.: VI Bauvorhaben: Diplomarbeit BAB A 20 Ausgeführt durch: Köchler am: 26.11.01 Bemerkung: 2% Weißfeinkalk $D_{pr} = 0,95$	Entnahmestelle: Neubrandenburg Station: m rechts der Achse Entnahmetiefe: 1,5 m unter GOK Bodenart: Geschiebemergel Art der Entnahme: gestört Entnahme am: 27.09.01 durch: Köchler
---	---

Auswertung des Scherversuchs

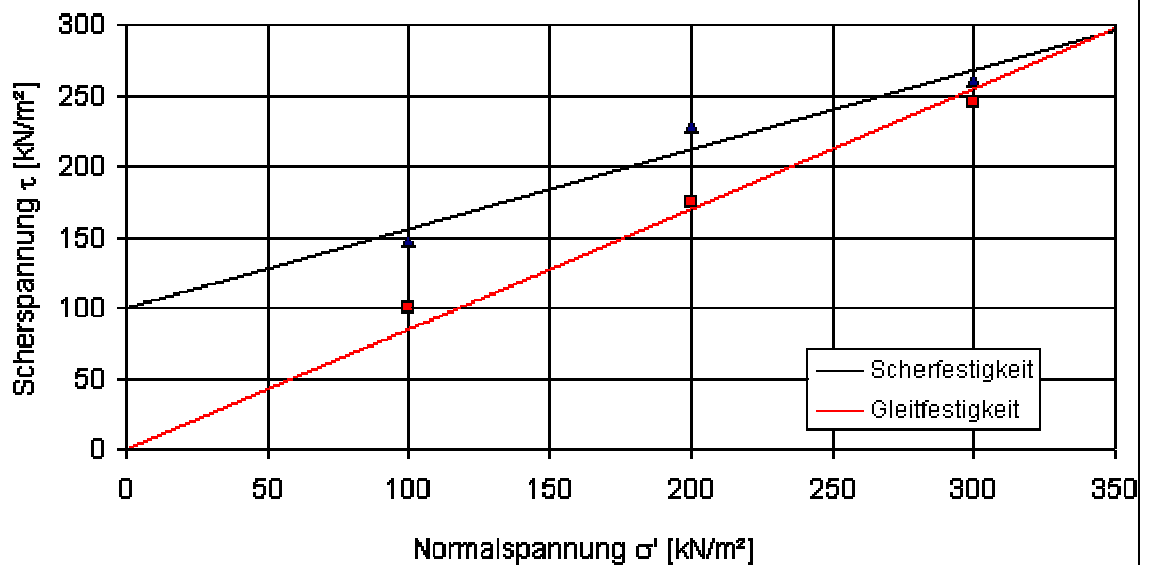
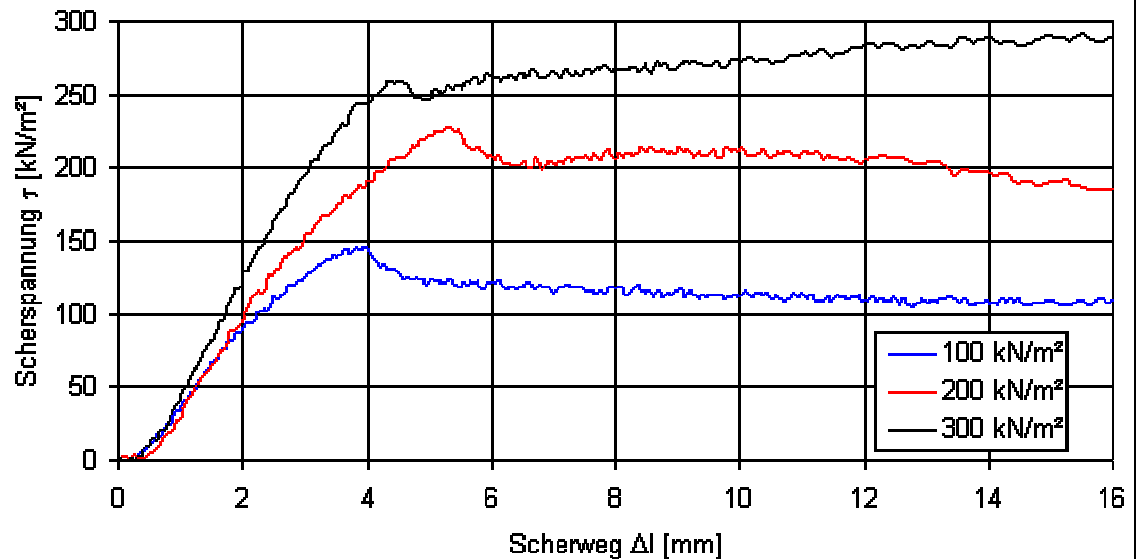


Scherfestigkeit: $c' = 55,16 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 29,79^\circ$

Gleitfestigkeit: $c' = 0,00 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 32,98^\circ$

Prüfungs-Nr.: E	Entnahmestelle: Neubrandenburg
Bauvorhaben: Diplomarbeit	Station: m rechts der Achse
BAB A 20	Entnahmetiefe: 1,5 m unter GOK
Ausgeführt durch: Köchler	Bodenart: Geschiebemergel
am: 20.12.01	Art der Entnahme: gestört
Bemerkung: 4% Weißfeinkalk	Entnahme am: 27.09.01 durch: Köchler
$D_{pr} = 0,95$	

Auswertung des Scherversuchs

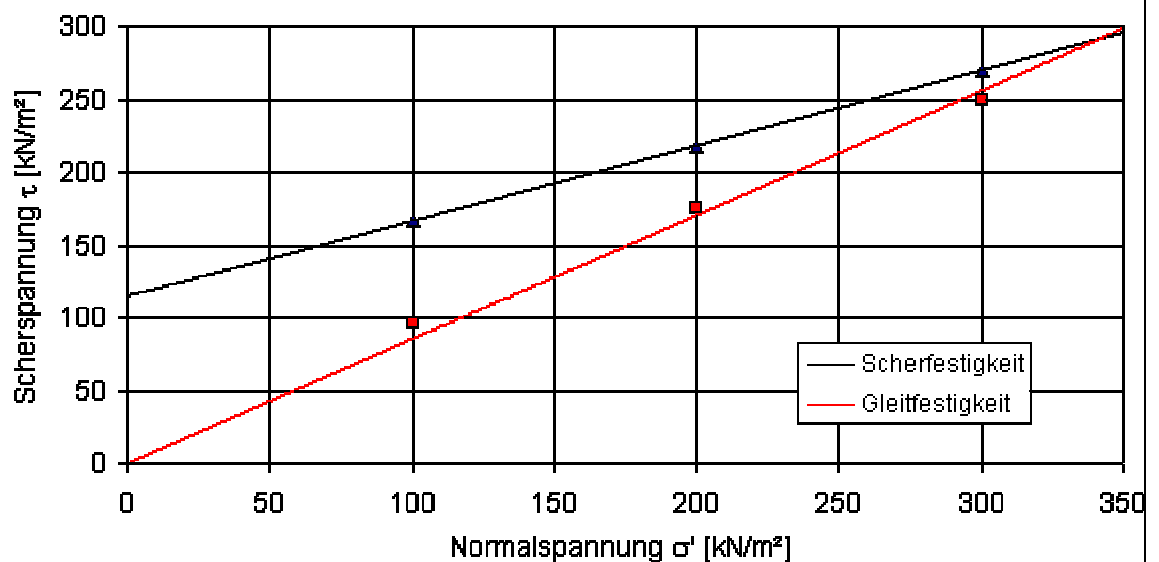
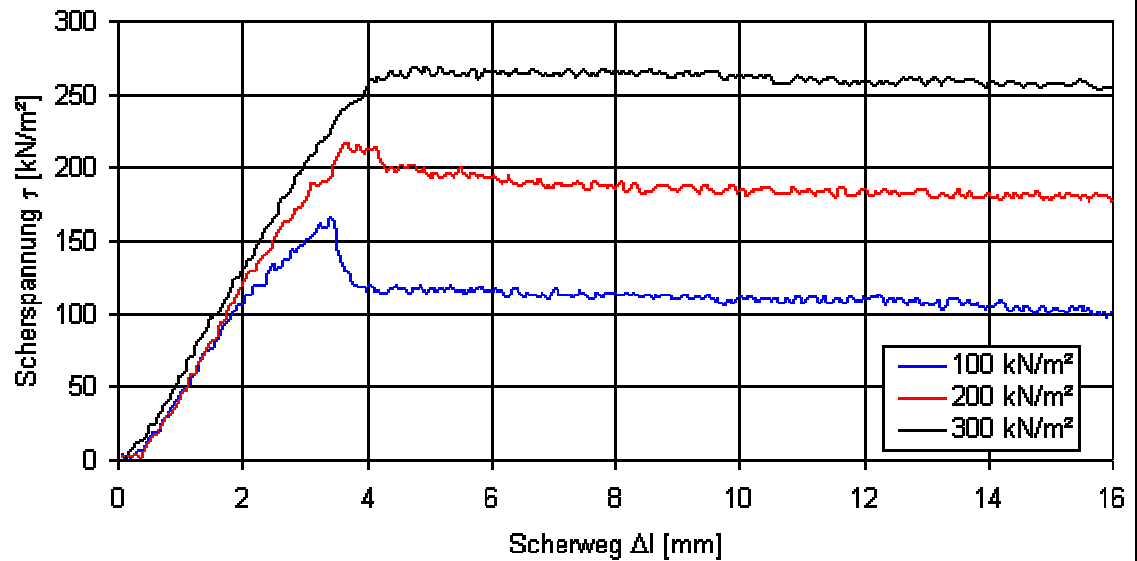


Scherfestigkeit: $c' = 100,38 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 29,19^\circ$

Gleitfestigkeit: $c' = 0,00 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 40,32^\circ$

Prüfungs-Nr.: F	Entnahmestelle: Neubrandenburg
Bauvorhaben: Diplomarbeit	Station: m rechts der Achse
BAB A 20	Entnahmetiefe: 1,5 m unter GOK
Ausgeführt durch: Köchler	Bodenart: Geschiebemergel
am: 20.12.01	Art der Entnahme: gestört
Bemerkung: 6% Weißfeinkalk	Entnahme am: 27.09.01 durch: Köchler
$D_{pr} = 0,95$	

Auswertung des Scherversuchs

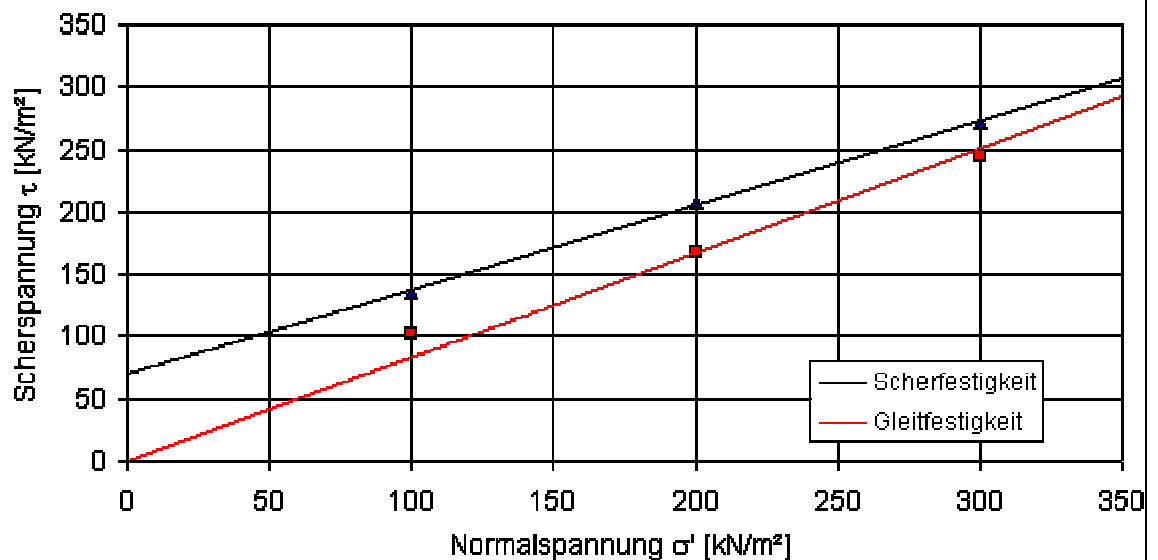
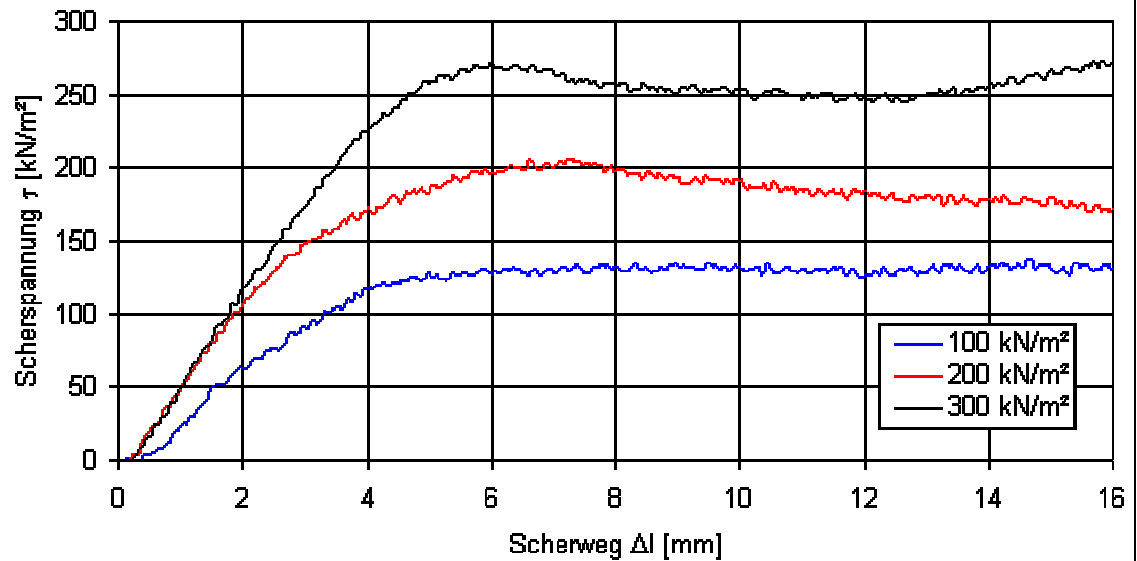


Scherfestigkeit: $c' = 114,76 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 27,38^\circ$

Gleitfestigkeit: $c' = 0,00 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 40,45^\circ$

Prüfungs-Nr.: IV Bauvorhaben: Diplomarbeit BAB A 20 Ausgeführt durch: Köchler am: 22.11.01 Bemerkung: 2% Dorosol C10 $D_{pr} = 0,95$	Entnahmestelle: Neubrandenburg Station: m rechts der Achse Entnahmetiefe: 1,5 m unter GOK Bodenart: Geschiebemergel Art der Entnahme: gestört Entnahme am: 27.09.01 durch: Köchler
--	---

Auswertung des Scherversuchs

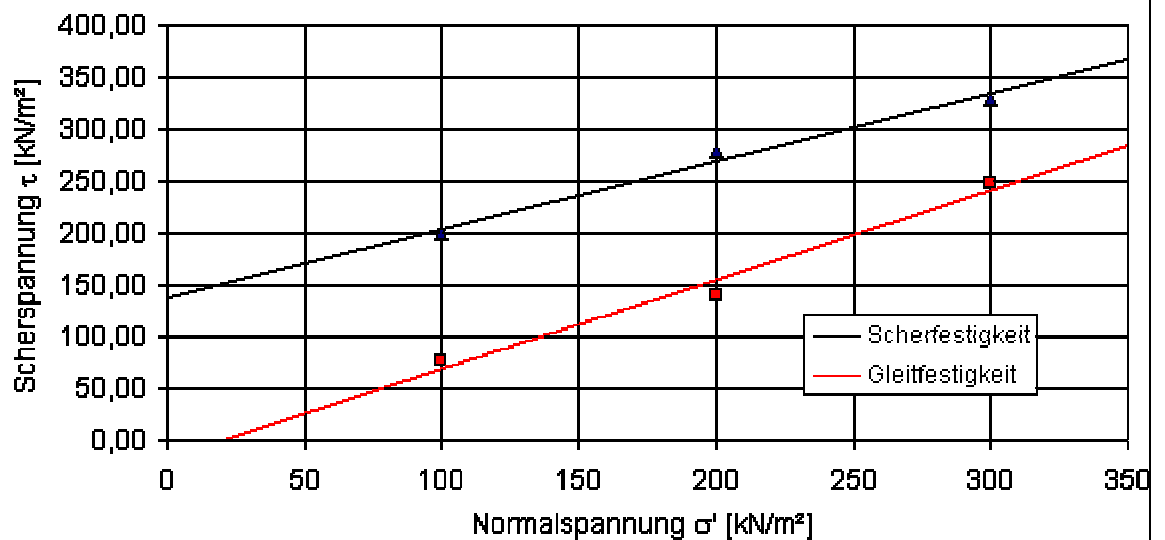
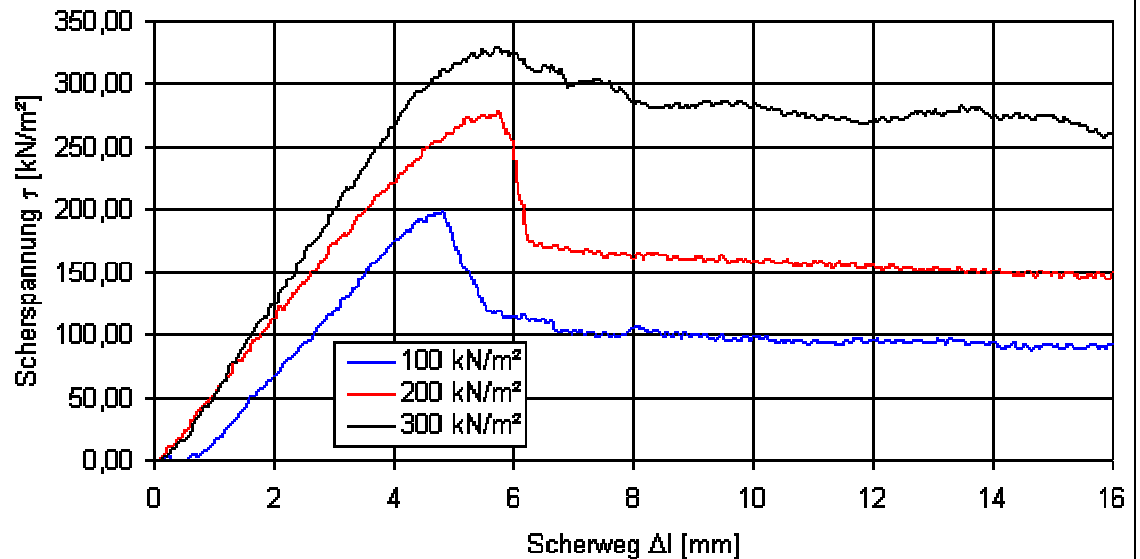


Scherfestigkeit: $c' = 69,61 \text{ kN/m}^2$, $\phi' = 34,10^\circ$

Gleitfestigkeit: $c' = 0,00 \text{ kN/m}^2$, $\phi' = 39,88^\circ$

Prüfungs-Nr.: III Bauvorhaben: Diplomarbeit BAB A 20 Ausgeführt durch: Köchler am: 22.11.01 Bemerkung: 4% Dorosol C10 $D_{pr} = 0,95$	Entnahmestelle: Neubrandenburg Station: m rechts der Achse Entnahmetiefe: 1,5 m unter GOK Bodenart: Geschiebemergel Art der Entnahme: gestört Entnahme am: 27.09.01 durch: Köchler
---	---

Auswertung des Scherversuchs

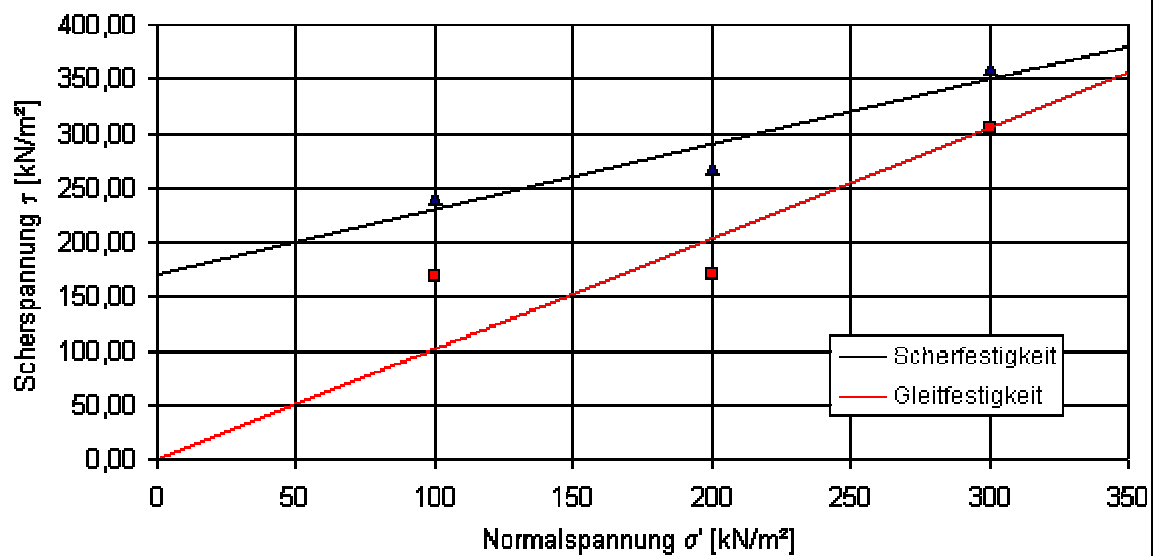
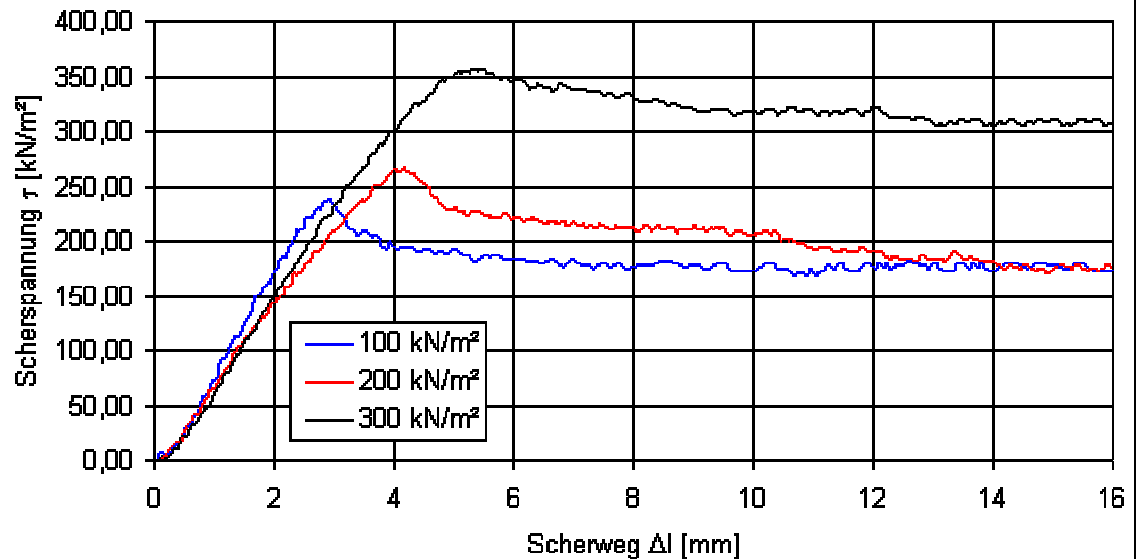


Scherfestigkeit: $c' = 138,54 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 33,17^\circ$

Gleitfestigkeit: $c' = 0,00 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 40,71^\circ$

Prüfungs-Nr.: V Bauvorhaben: Diplomarbeit BAB A 20 Ausgeführt durch: Köchler am: 26.11.01 Bemerkung: 6% Dorosol C10 $D_{pr} = 0,95$	Entnahmestelle: Neubrandenburg Station: m rechts der Achse Entnahmetiefe: 1,5 m unter GOK Bodenart: Geschiebemergel Art der Entnahme: gestört Entnahme am: 27.09.01 durch: Köchler
---	---

Auswertung des Scherversuchs

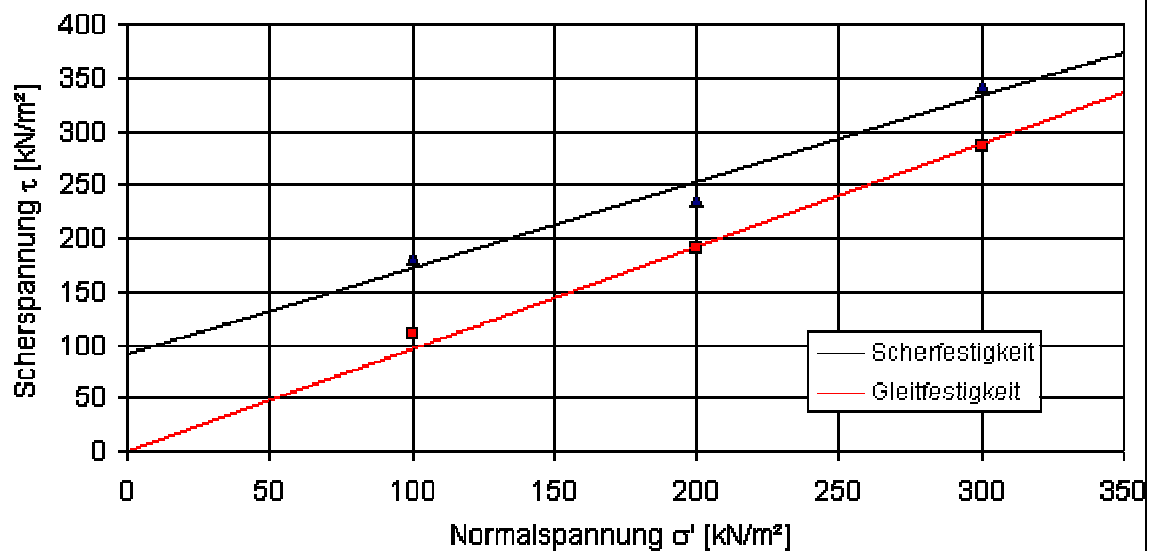
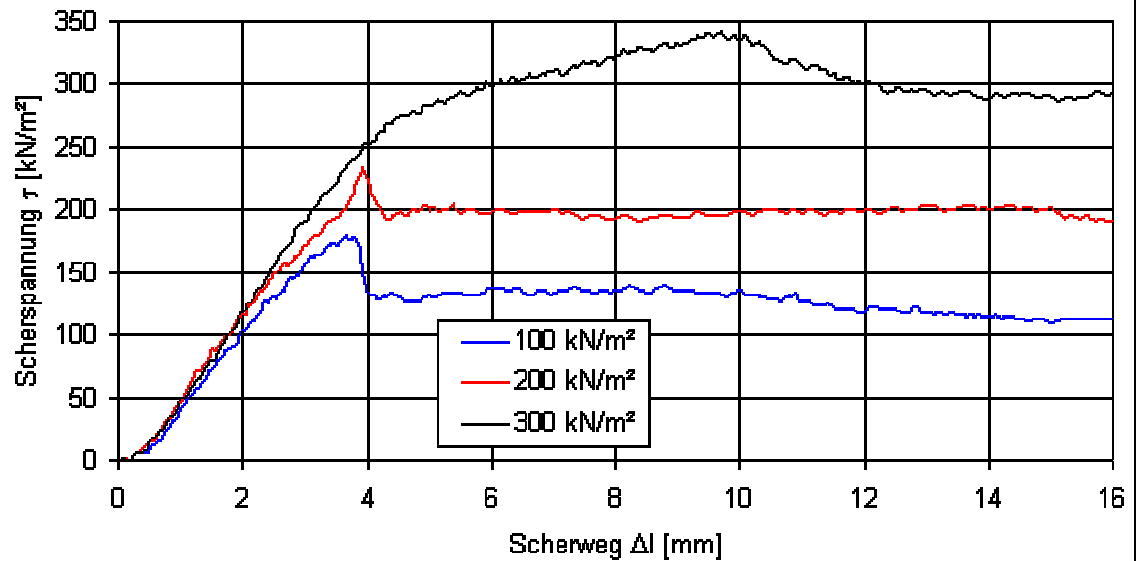


Scherfestigkeit: $c' = 171,15 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 30,72^\circ$

Gleitfestigkeit: $c' = 0,00 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 45,54^\circ$

Prüfungs-Nr.: C	Entnahmestelle: Neubrandenburg
Bauvorhaben: Diplomarbeit	Station: m rechts der Achse
BAB A 20	Entnahmetiefe: 1,5 m unter GOK
Ausgeführt durch: Köchler	Bodenart: Geschiebemergel
am: 18.12.01	Art der Entnahme: gestört
Bemerkung: 2% Pectacrete	Entnahme am: 27.09.01 durch: Köchler
$D_{pr} = 0,95$	

Auswertung des Scherversuchs

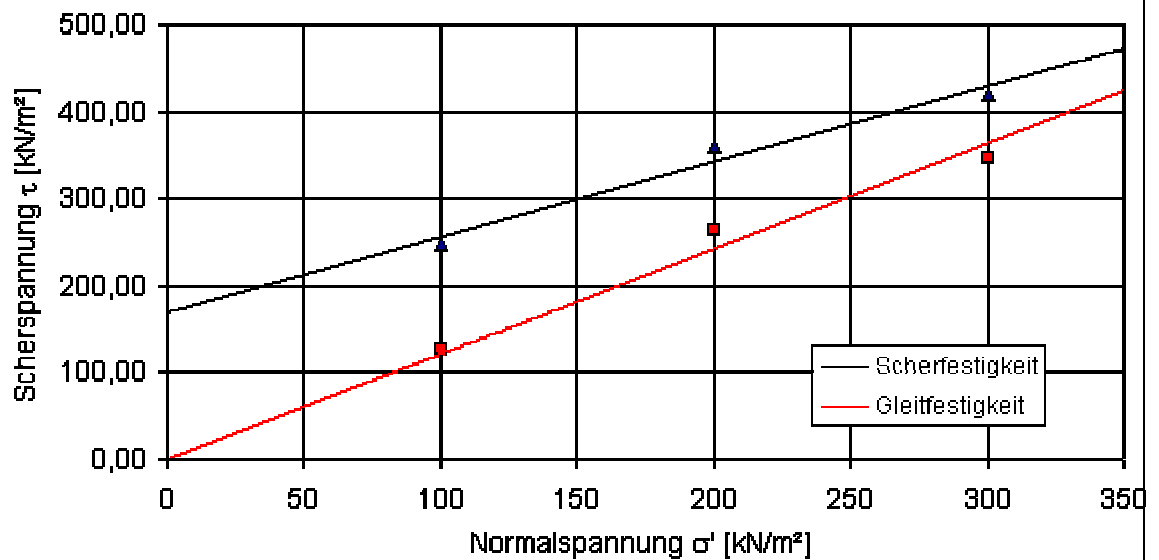
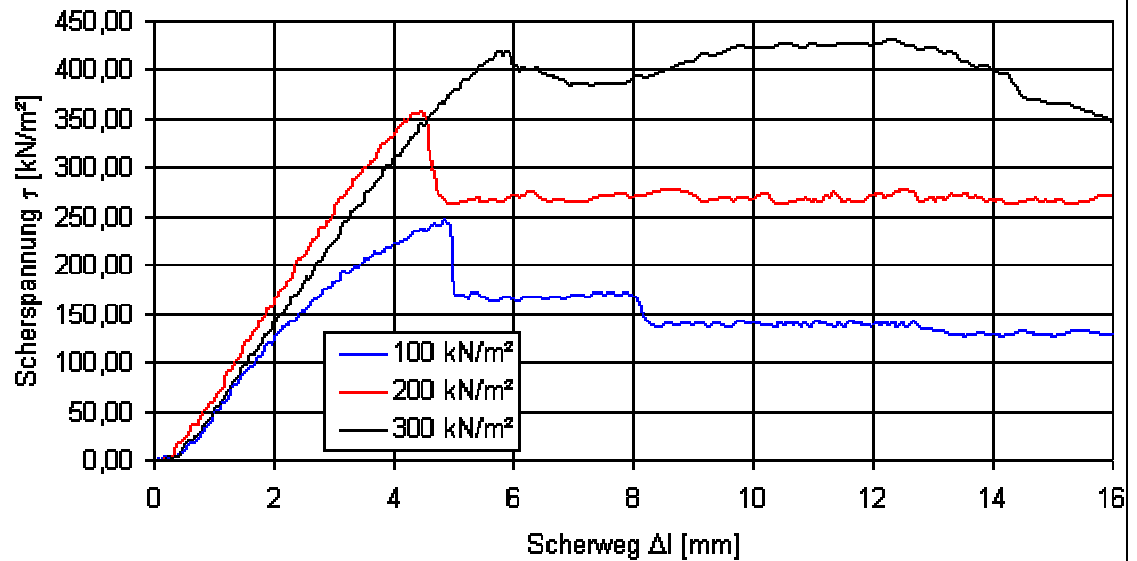


Scherfestigkeit: $c' = 90,66 \text{ kN/m}^2$, $\phi' = 39,04^\circ$

Gleitfestigkeit: $c' = 0,00 \text{ kN/m}^2$, $\phi' = 43,90^\circ$

Prüfungs-Nr.: D Bauvorhaben: Diplomarbeit BAB A 20 Ausgeführt durch: Köchler am: 18.12.01 Bemerkung: 4% Pectacrete $D_{pr} = 0,95$	Entnahmestelle: Neubrandenburg Station: m rechts der Achse Entnahmetiefe: 1,5 m unter GOK Bodenart: Geschiebemergel Art der Entnahme: gestört Entnahme am: 27.09.01 durch: Köchler
--	---

Auswertung des Scherversuchs

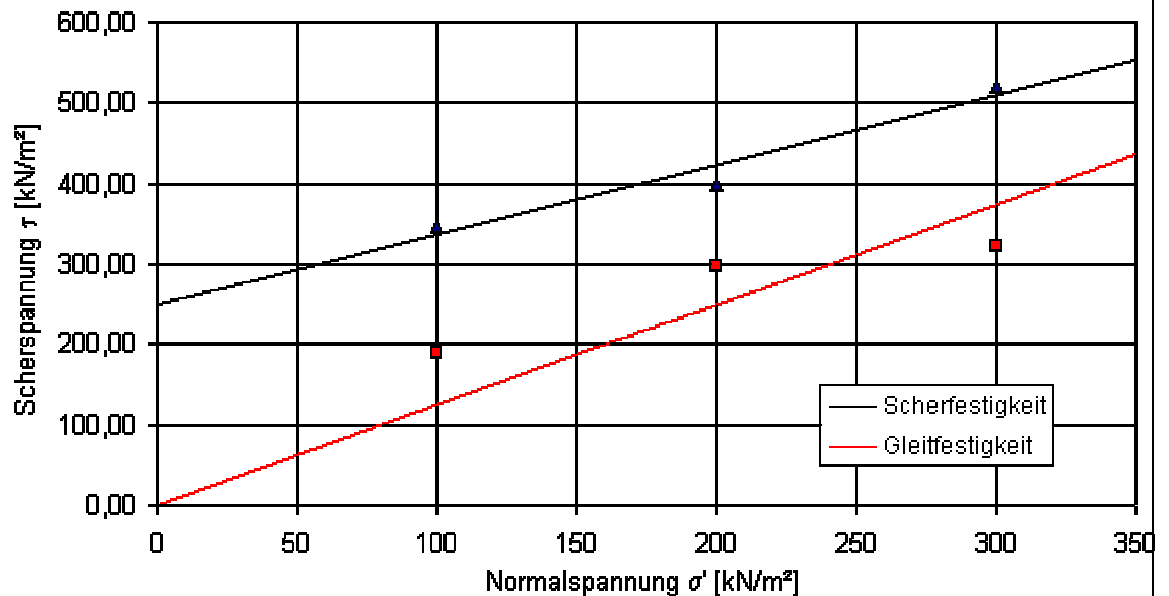
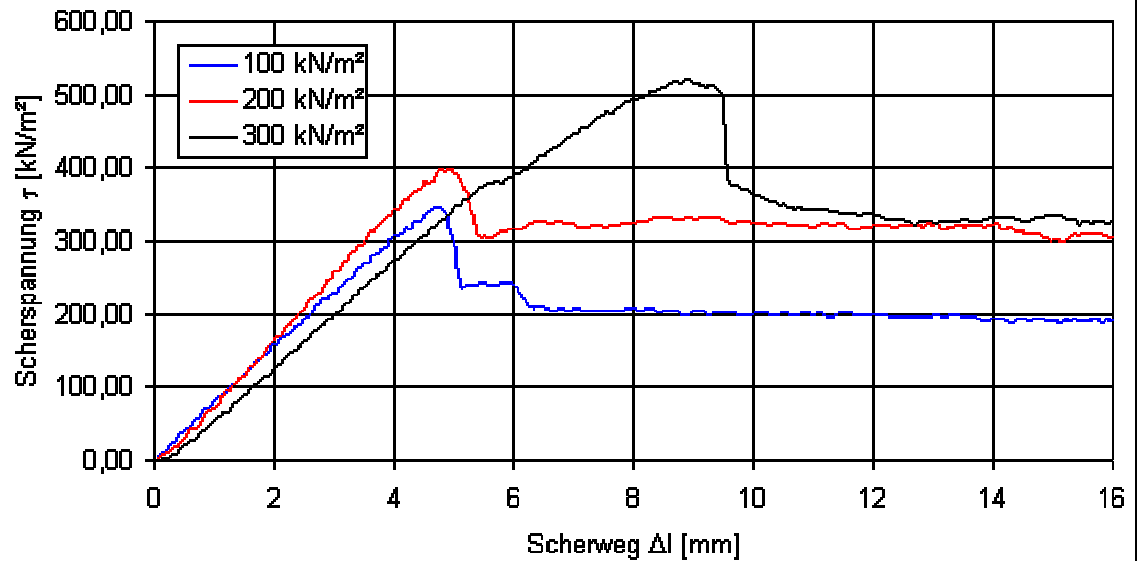


Scherfestigkeit: $c' = 170,61 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 40,72^\circ$

Gleitfestigkeit: $c' = 0,00 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 50,43^\circ$

Prüfungs-Nr.: L	Entnahmestelle: Neubrandenburg
Bauvorhaben: Diplomarbeit	Station: m rechts der Achse
BAB A 20	Entnahmetiefe: 1,5 m unter GOK
Ausgeführt durch: Köchler	Bodenart: Geschiebemergel
am: 03.12.01	Art der Entnahme: gestört
Bemerkung: 6% Pectacrete	Entnahme am: 27.09.01 durch: Köchler
$D_{pr} = 0,95$	

Auswertung des Scherversuchs

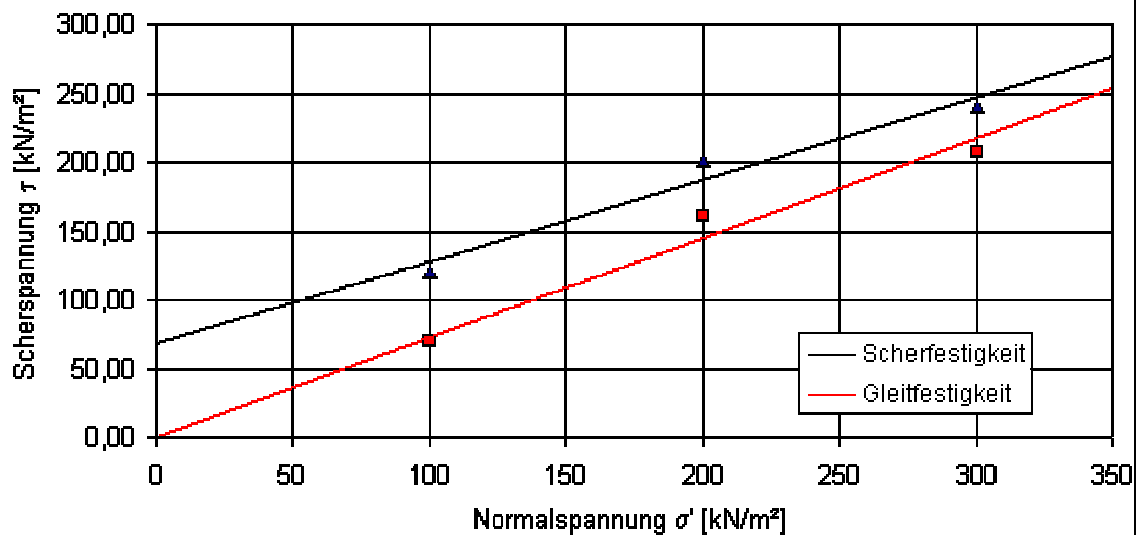
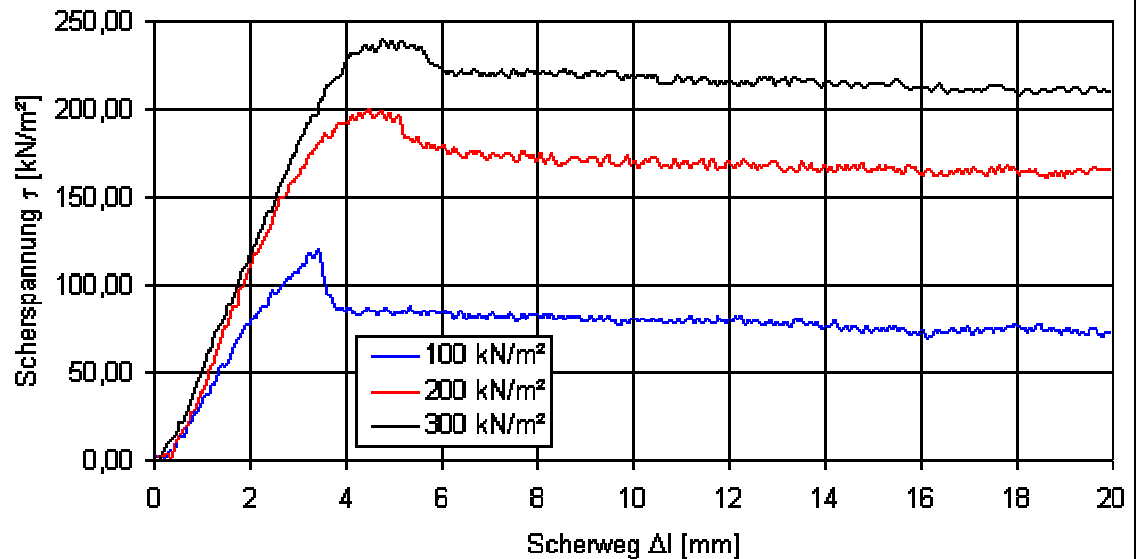


Scherfestigkeit: $c' = 249,73 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 40,85^\circ$

Gleitfestigkeit: $c' = 0,00 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 51,34^\circ$

Prüfungs-Nr.: A	Entnahmestelle: Neubrandenburg
Bauvorhaben: Diplomarbeit	Station: m rechts der Achse
BAB A 20	Entnahmetiefe: 1,5 m unter GOK
Ausgeführt durch: Köchler	Bodenart: Geschiebemergel
am: 14.12.01	Art der Entnahme: gestört
Bemerkung: 2% Weißfeinkalk	Entnahme am: 27.09.01 durch: Köchler
$D_{pr} = 0,98$	

Auswertung des Scherversuchs

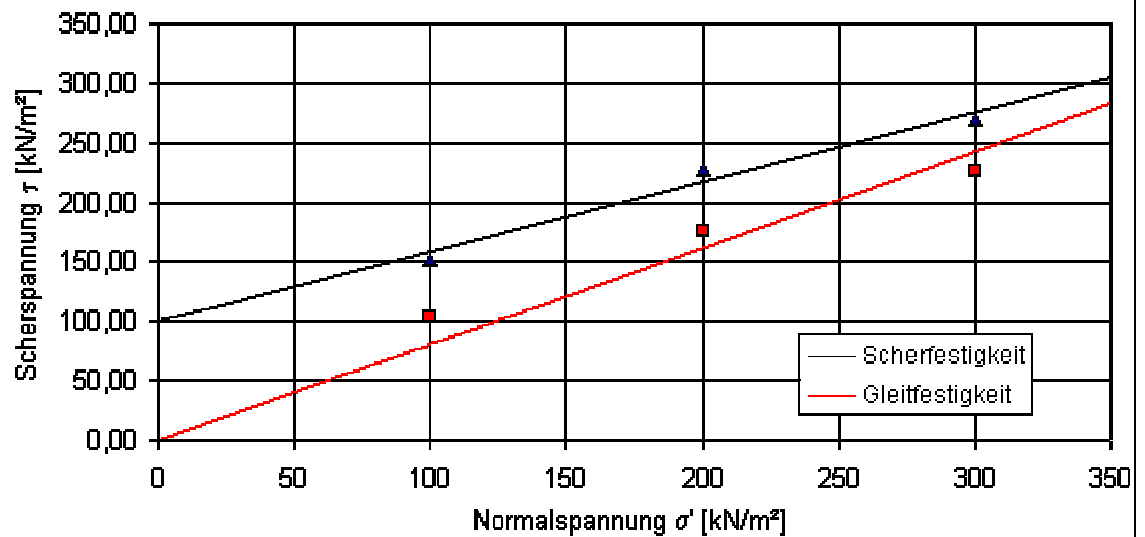
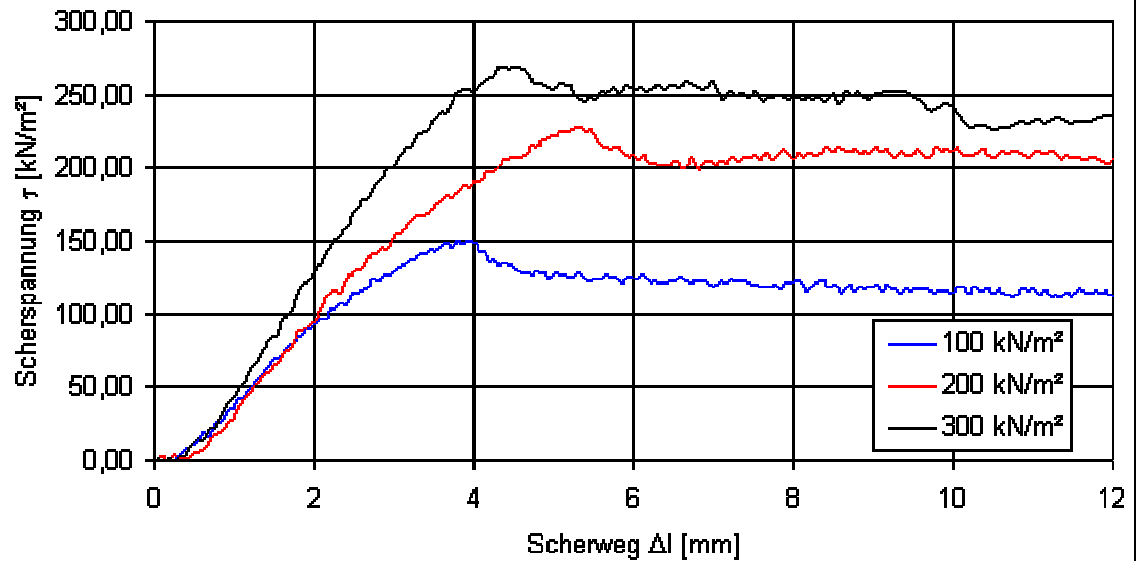


Scherfestigkeit: $c' = 67,81 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 30,84^\circ$

Gleitfestigkeit: $c' = 0,00 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 35,93^\circ$

Prüfungs-Nr.: B	Entnahmestelle: Neubrandenburg
Bauvorhaben: Diplomarbeit	Station: m rechts der Achse
BAB A 20	Entnahmetiefe: 1,5 m unter GOK
Ausgeführt durch: Köchler	Bodenart: Geschiebemergel
am: 14.12.01	Art der Entnahme: gestört
Bemerkung: 4% Weißfeinkalk	Entnahme am: 27.09.01 durch: Köchler
$D_{pr} = 0,98$	

Auswertung des Scherversuchs

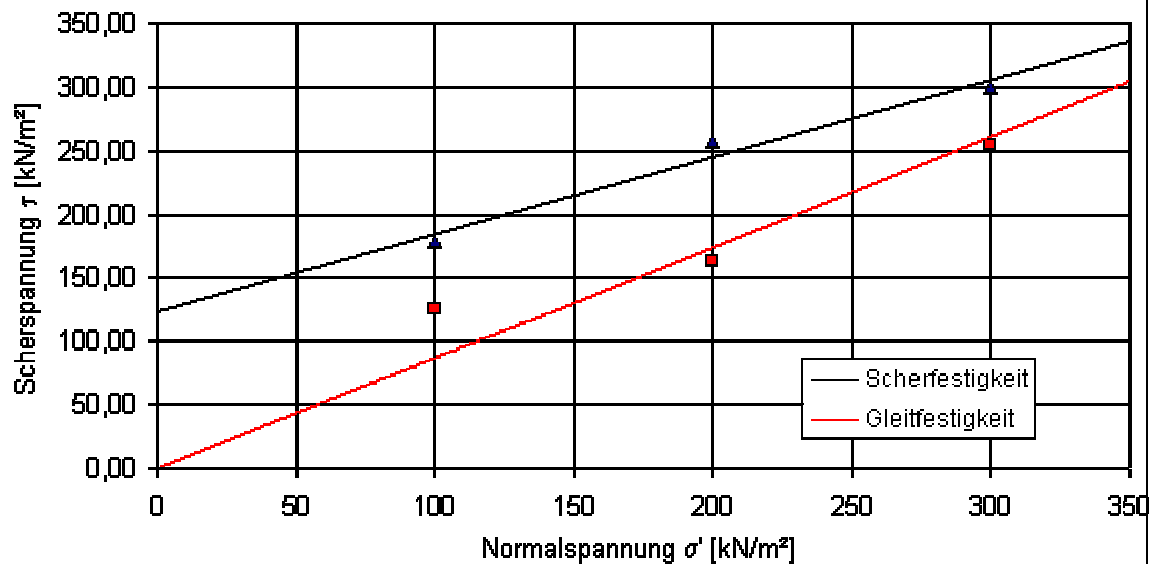
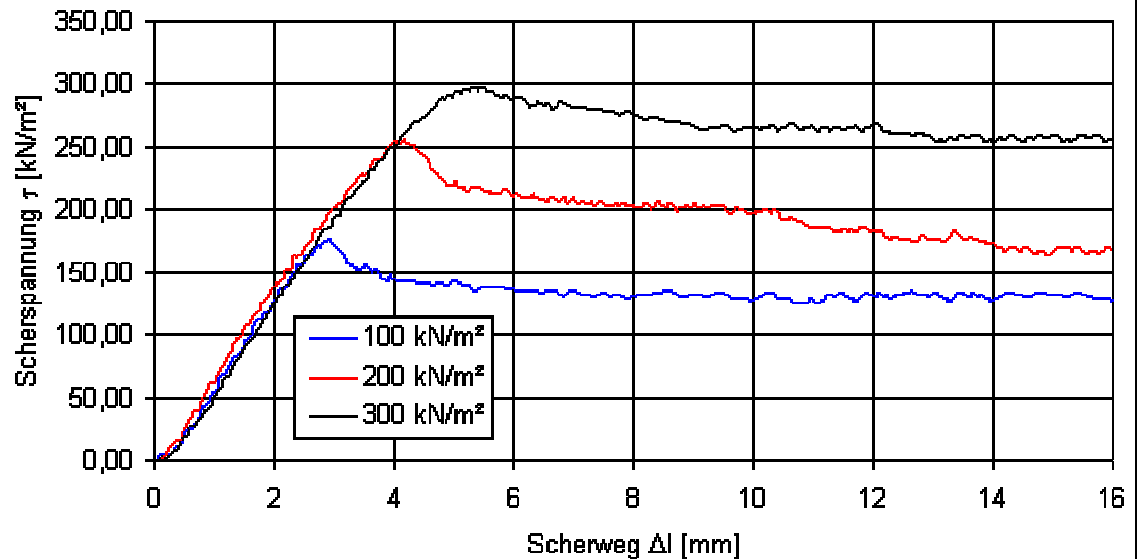


Scherfestigkeit: $c' = 99,90 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 30,31^\circ$

Gleitfestigkeit: $c' = 0,00 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 38,96^\circ$

Prüfungs-Nr.: K	Entnahmestelle: Neubrandenburg
Bauvorhaben: Diplomarbeit	Station: m rechts der Achse
BAB A 20	Entnahmetiefe: 1,5 m unter GOK
Ausgeführt durch: Köchler	Bodenart: Geschiebemergel
am: 03.12.01	Art der Entnahme: gestört
Bemerkung: 6% Weißfeinkalk	Entnahme am: 27.09.01 durch: Köchler
$D_{pr} = 0,98$	

Auswertung des Scherversuchs

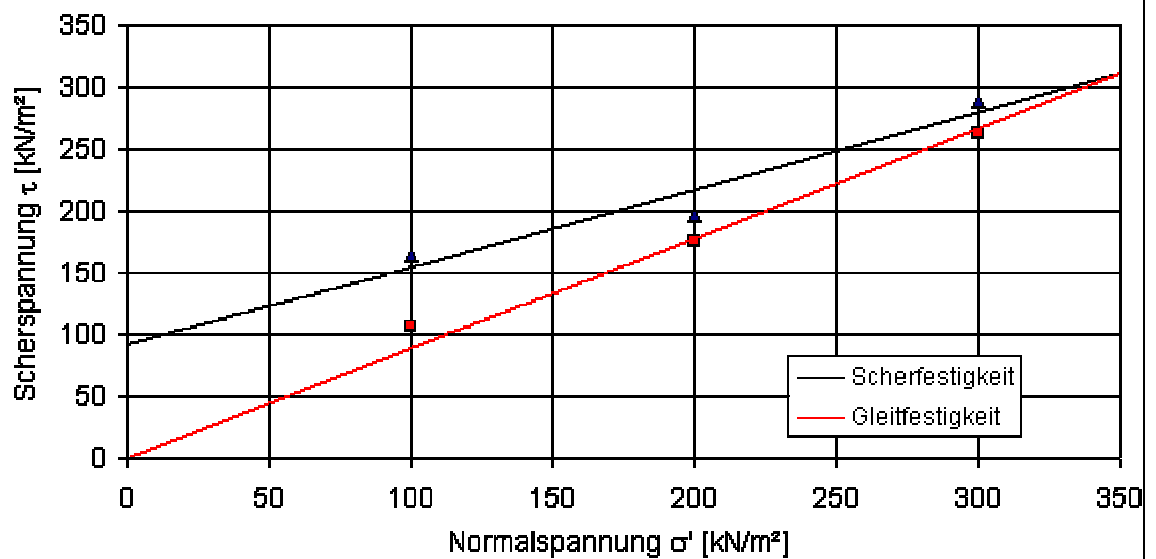
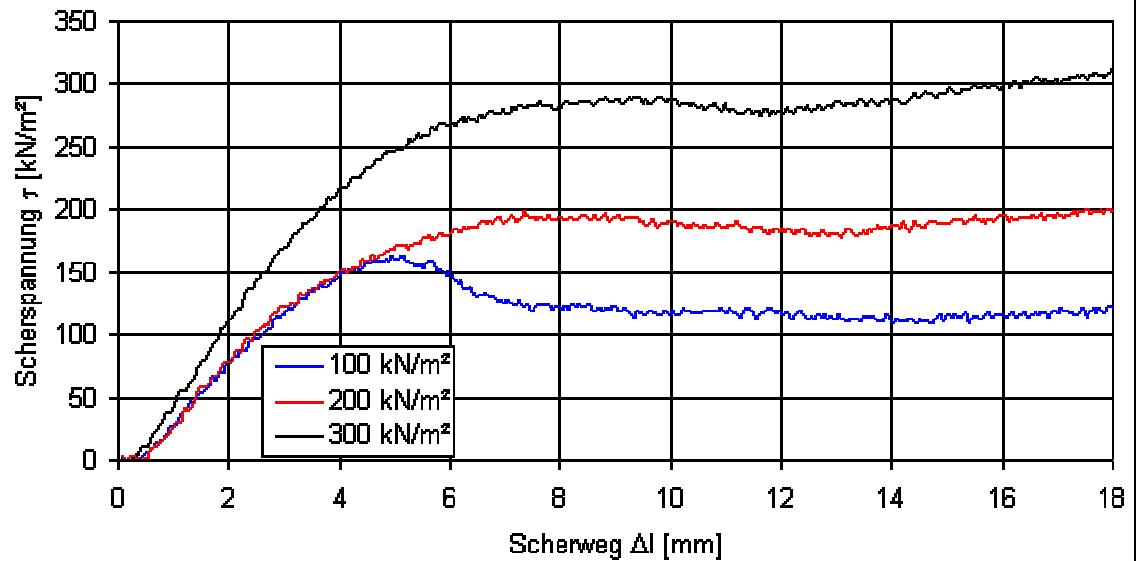


Scherfestigkeit: $c' = 124,19 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 31,26^\circ$

Gleitfestigkeit: $c' = 0,00 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 40,99^\circ$

Prüfungs-Nr.: II	Entnahmestelle: Neubrandenburg
Bauvorhaben: Diplomarbeit	Station: m rechts der Achse
BAB A 20	Entnahmetiefe: 1,5 m unter GOK
Ausgeführt durch: Köchler	Bodenart: Geschiebemergel
am: 19.11.01	Art der Entnahme: gestört
Bemerkung: 2% Dorosol C10	Entnahme am: 27.09.01 durch: Köchler
$D_{pr} = 0,98$	

Auswertung des Scherversuchs

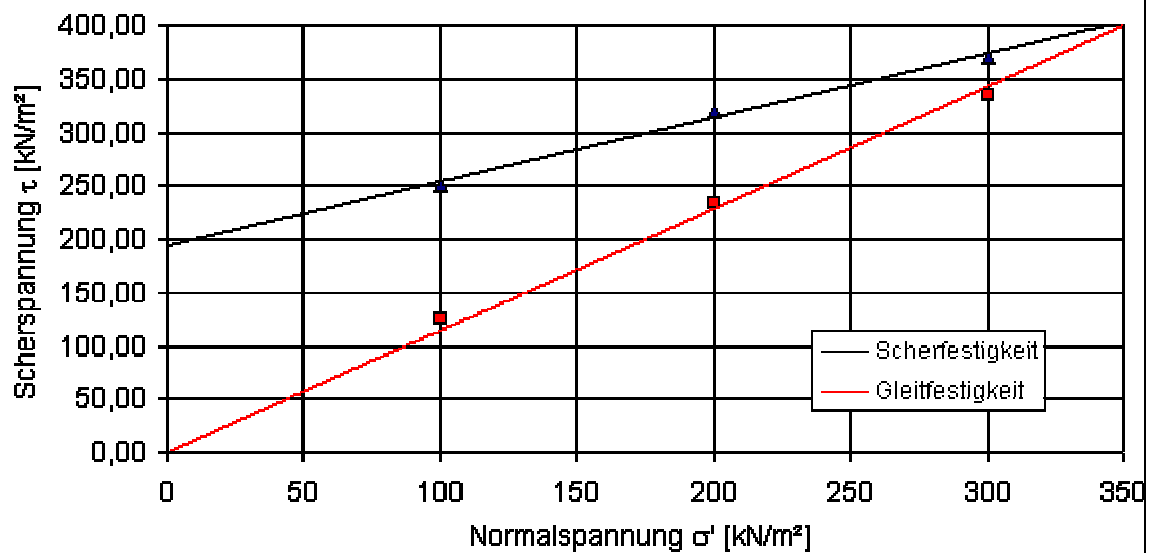
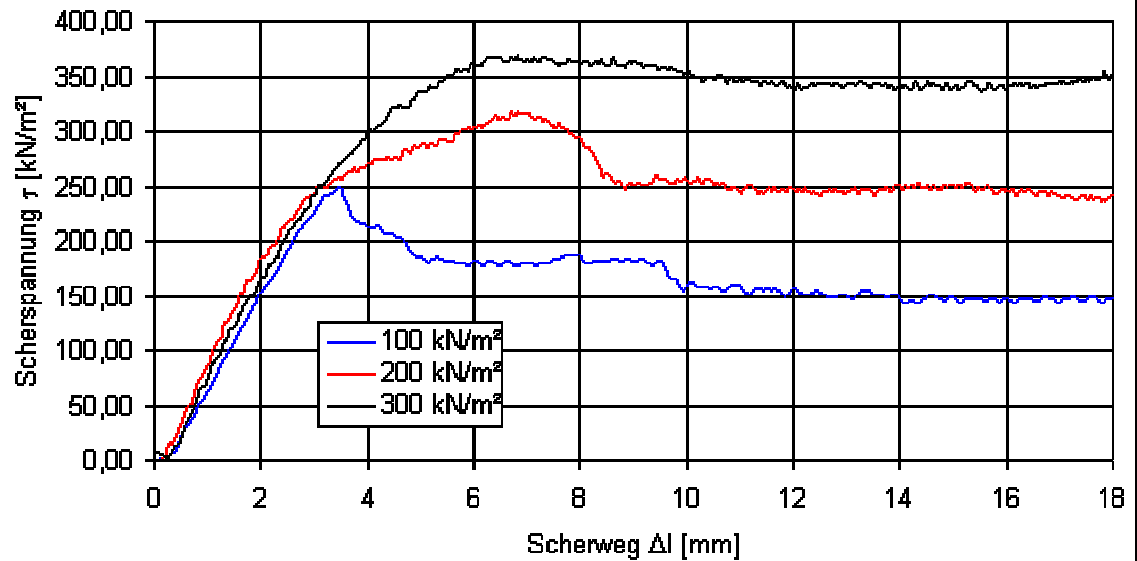


Scherfestigkeit: $c' = 92,02 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 32,00^\circ$

Gleitfestigkeit: $c' = 0,00 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 41,71^\circ$

Prüfungs-Nr.: I	Entnahmestelle: Neubrandenburg
Bauvorhaben: Diplomarbeit	Station: m rechts der Achse
BAB A 20	Entnahmetiefe: 1,5 m unter GOK
Ausgeführt durch: Köchler	Bodenart: Geschiebemergel
am: 19.11.01	Art der Entnahme: gestört
Bemerkung: 4% Dorosol C10	Entnahme am: 27.09.01 durch: Köchler
$D_{pr} = 0,98$	

Auswertung des Scherversuchs

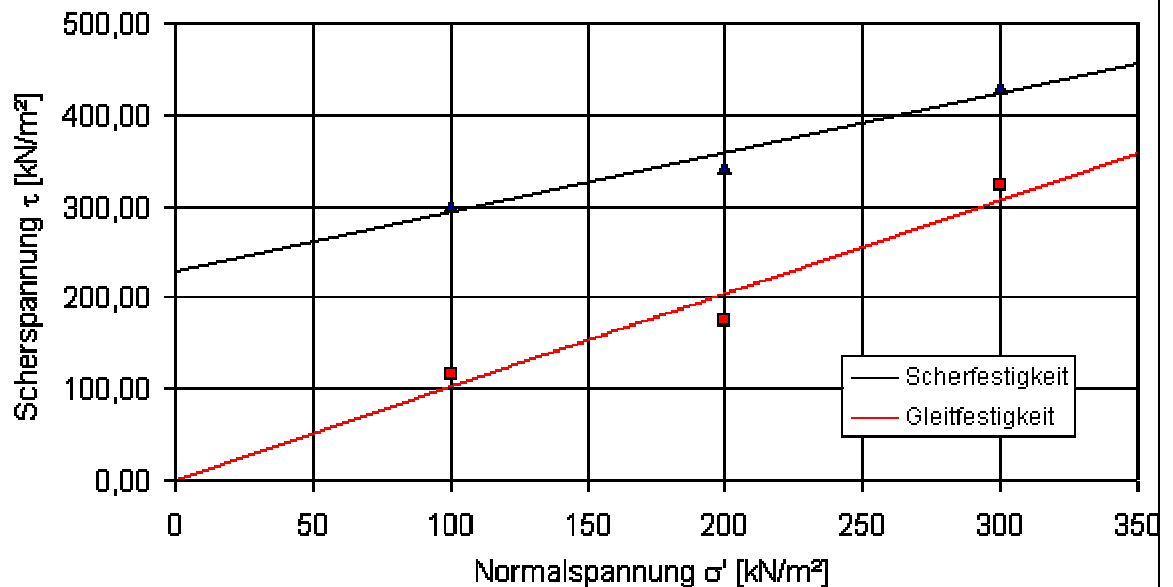
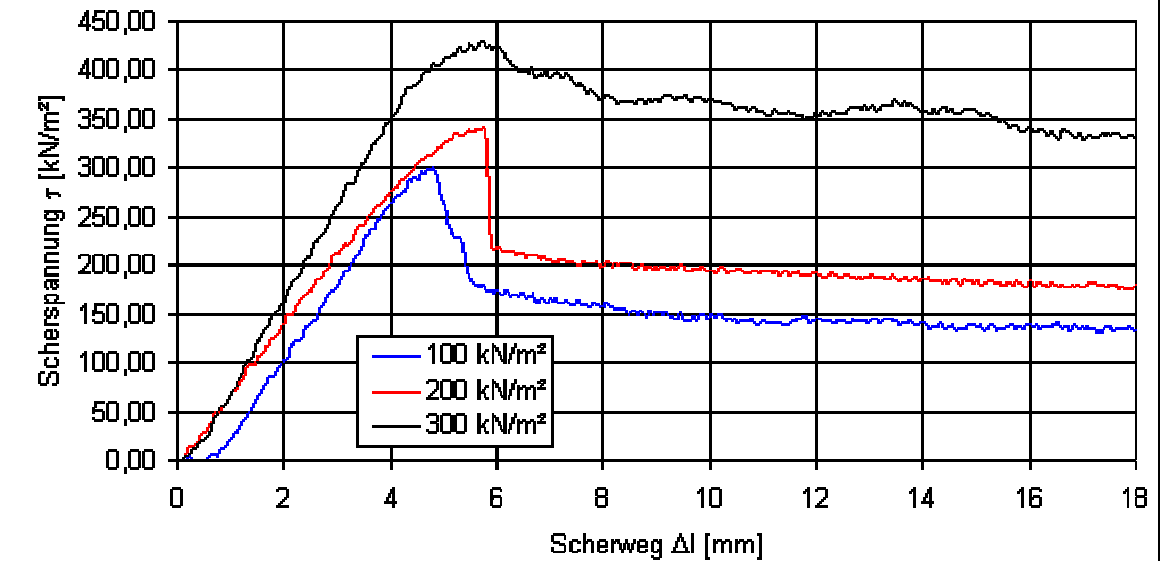


Scherfestigkeit: $c' = 193,66 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 30,87^\circ$

Gleitfestigkeit: $c' = 0,00 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 48,80^\circ$

Prüfungs-Nr.: IX Bauvorhaben: Diplomarbeit BAB A 20 Ausgeführt durch: Köchler am: 11.12.01 Bemerkung: 6% Dorosol C10 $D_{pr} = 0,98$	Entnahmestelle: Neubrandenburg Station: m rechts der Achse Entnahmetiefe: 1,5 m unter GOK Bodenart: Geschiebemergel Art der Entnahme: gestört Entnahme am: 27.09.01 durch: Köchler
--	---

Auswertung des Scherversuchs

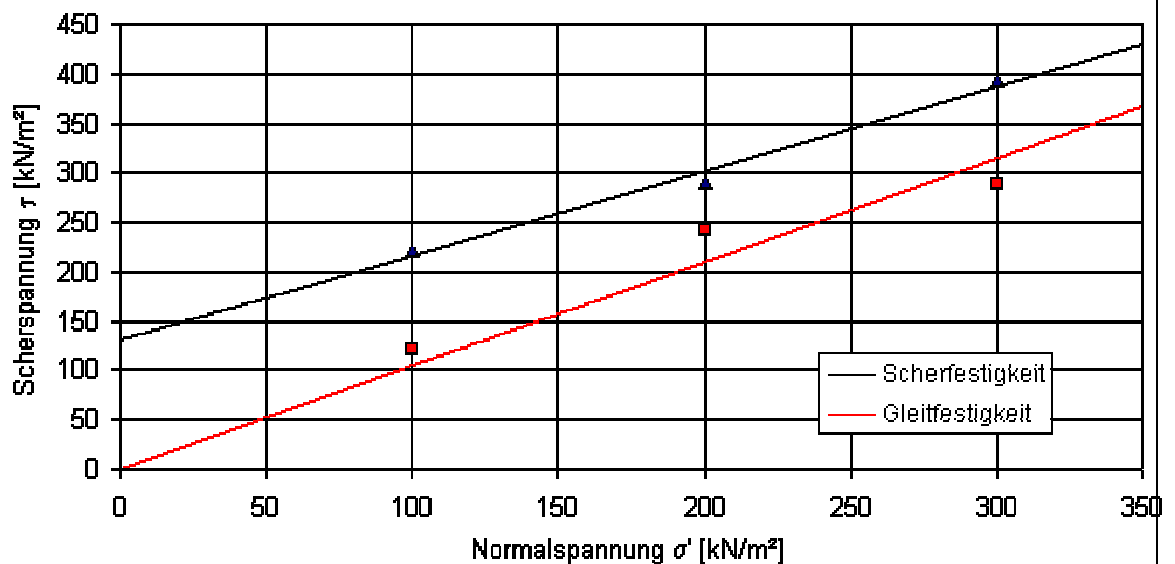
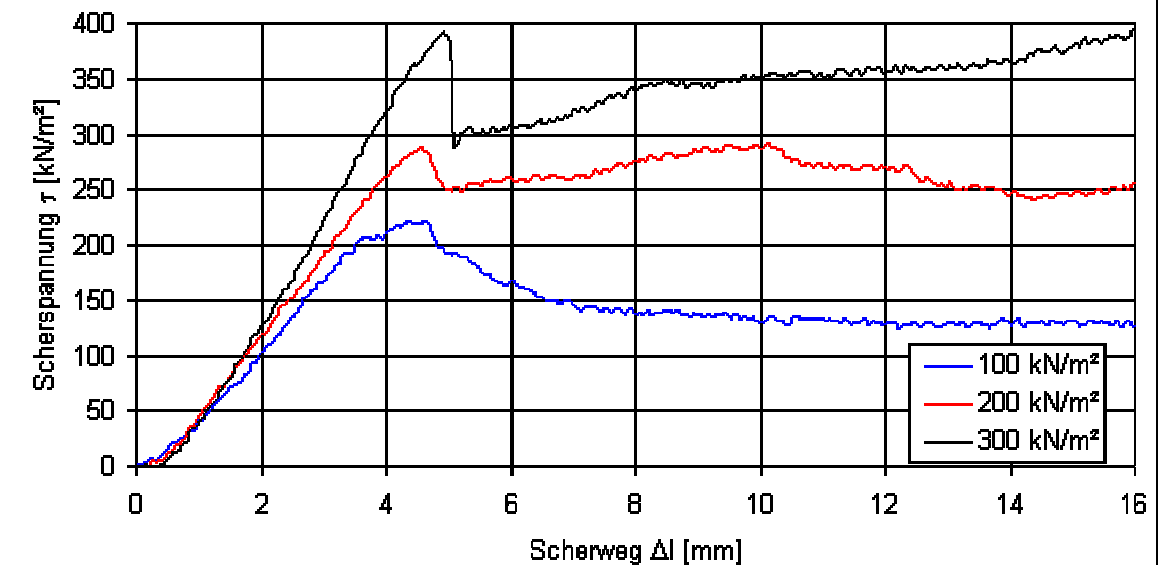


Scherfestigkeit: $c' = 228,28 \text{ kN/m}^2$, $\phi' = 32,98^\circ$

Gleitfestigkeit: $c' = 0,00 \text{ kN/m}^2$, $\phi' = 45,68^\circ$

Prüfungs-Nr.: VII	Entnahmestelle: Neubrandenburg
Bauvorhaben: Diplomarbeit	Station: m rechts der Achse
BAB A 20	Entnahmetiefe: 1,5 m unter GOK
Ausgeführt durch: Köchler	Bodenart: Geschiebemergel
am: 29.11.01	Art der Entnahme: gestört
Bemerkung: 2% Pectacrete	Entnahme am: 27.09.01 durch: Köchler
$D_{pr} = 0,98$	

Auswertung des Scherversuchs

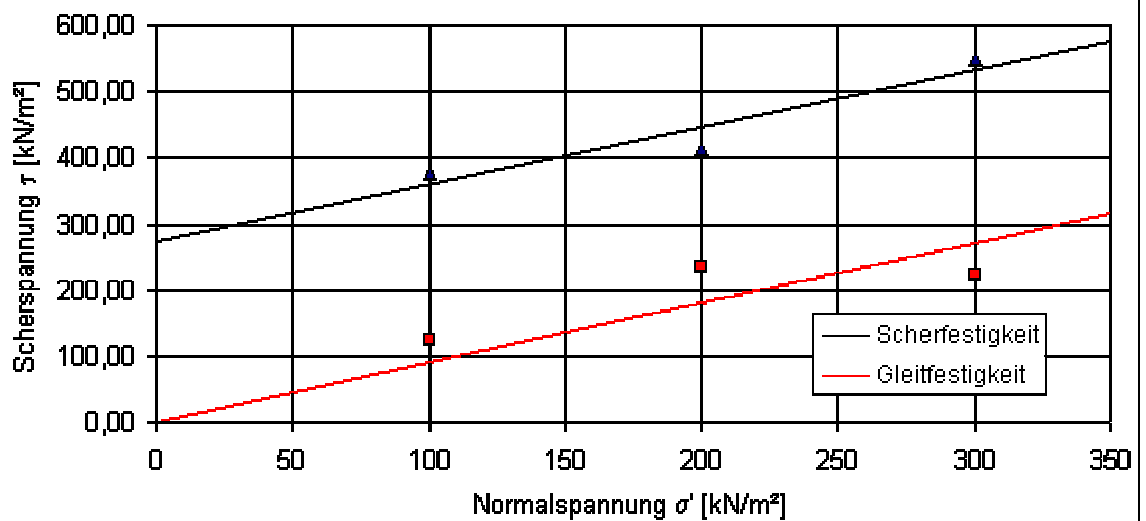
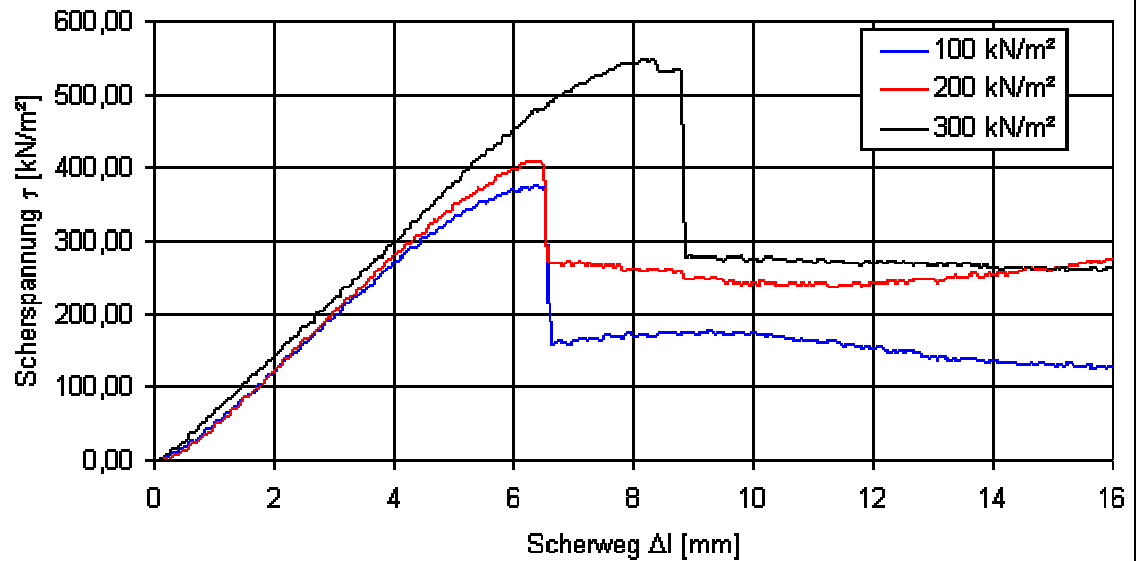


Scherfestigkeit: $c' = 131,82 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 40,42^\circ$

Gleitfestigkeit: $c' = 0,00 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 46,38^\circ$

Prüfungs-Nr.: VIII Bauvorhaben: Diplomarbeit BAB A 20 Ausgeführt durch: Köchler am: 29.11.01 Bemerkung: 4% Pectacrete $D_{pr} = 0,98$	Entnahmestelle: Neubrandenburg Station: m rechts der Achse Entnahmetiefe: 1,5 m unter GOK Bodenart: Geschiebemergel Art der Entnahme: gestört Entnahme am: 27.09.01 durch: Köchler
---	---

Auswertung des Scherversuchs

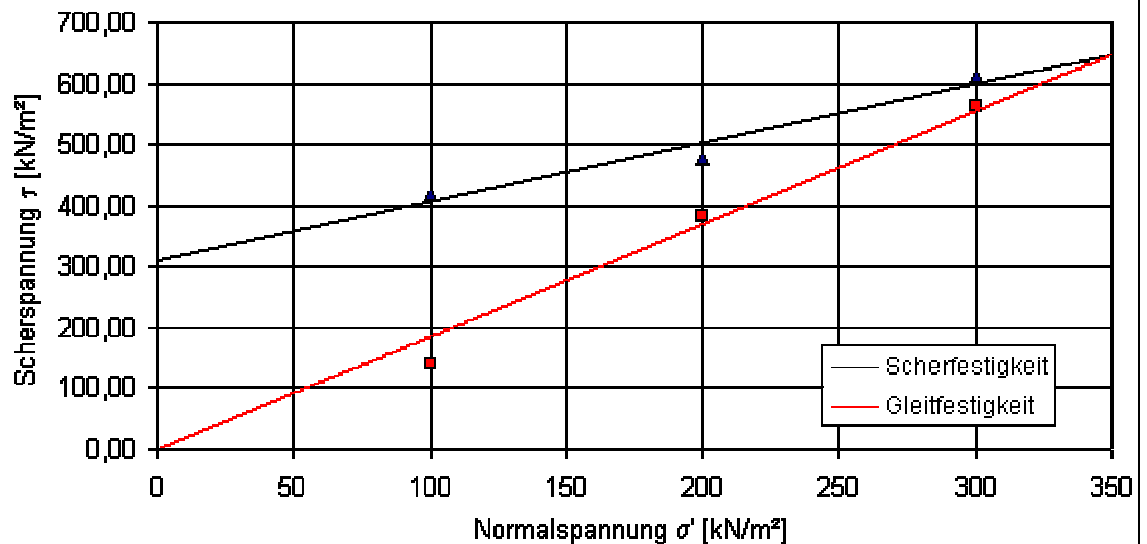
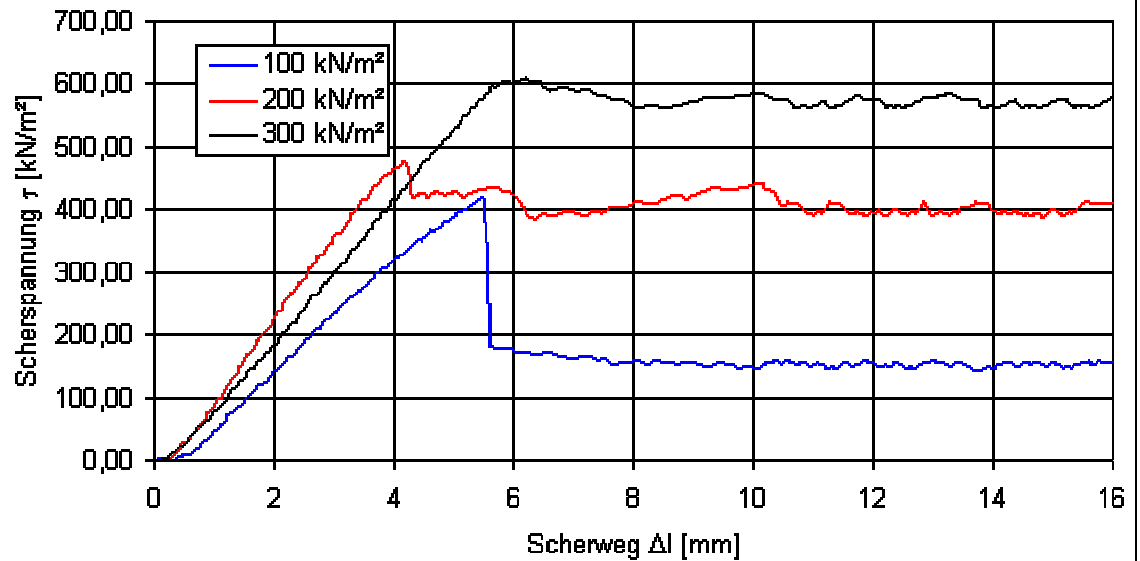


Scherfestigkeit: $c' = 273,31 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 40,77^\circ$

Gleitfestigkeit: $c' = 0,00 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 42,20^\circ$

Prüfungs-Nr.: X	Entnahmestelle: Neubrandenburg
Bauvorhaben: Diplomarbeit	Station: m rechts der Achse
BAB A 20	Entnahmetiefe: 1,5 m unter GOK
Ausgeführt durch: Köchler	Bodenart: Geschiebemergel
am: 11.12.01	
Bemerkung: 6% Pectacrete	Art der Entnahme: gestört
$D_{pr} = 0,98$	Entnahme am: 27.09.01 durch: Köchler

Auswertung des Scherversuchs



Scherfestigkeit: $c' = 311,28 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 43,81^\circ$

Gleitfestigkeit: $c' = 0,00 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 61,58^\circ$

Proctordichte D_{pr} [%]	BMG [Gew.-%]	Druck- spannung σ [N/mm ²]	Mittelwert $\bar{x}(\sigma)$ [N/mm ²]	Standard- abweichung $s(\sigma)$ [N/mm ²]	Varianz- koeffizient V [%]	Beurteilung
95	2	0,632	0,637	0,039	6,2	gut
		0,688				
		0,592				
	4	1,121	1,094	0,128	11,7	schlecht
		1,235				
		0,926				
	6	1,083	1,171	0,109	9,3	befriedigend
		1,325				
		1,105				
98	2	0,735	0,779	0,037	4,7	sehr gut
		0,777				
		0,825				
	4	1,156	1,146	0,088	7,6	befriedigend
		1,248				
		1,034				
	6	1,264	1,182	0,068	5,7	gut
		1,185				
		1,098				

Anlage 44: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche bei Zugabe von Weißfeinkalk

Proctordichte D_{pr} [%]	BMG [Gew.-%]	Normal- spannung σ' [kN/m ²]	Scher- spannung τ [kN/m ²]	Kohäsion c' [kN/m ²]	Reibungswinkel ϕ' [°]
95	2	100	107,56	55,16	29,79
		200	179,31		
		300	222,03		
	4	100	148,43	100,38	29,19
		200	227,73		
		300	260,15		
	6	100	166,49	114,76	27,38
		200	218,42		
		300	270,05		
98	2	100	120,64	67,81	30,84
		200	200,95		
		300	240,04		
	4	100	152,88	99,90	30,31
		200	227,73		
		300	269,79		
	6	100	178,72	124,19	31,26
		200	257,90		
		300	300,11		

Anlage 45: Ergebnisse der Rahmenscherversuche bei Zugabe von Weißfeinkalk

Proctordichte D_{pr} [%]	BMG [Gew.-%]	Druck- spannung σ [N/mm ²]	Mittelwert $\bar{x}(\sigma)$ [N/mm ²]	Standard- abweichung $s(\sigma)$ [N/mm ²]	Varianz- koeffizient v [%]	Beurteilung
95	2	0,698	0,733	0,097	13,3	schlecht
		0,866				
		0,635				
	4	1,308	1,326	0,066	5,0	gut
		1,414				
		1,256				
	6	1,543	1,519	0,098	6,5	gut
		1,388				
		1,625				
98	2	1,061	1,076	0,162	15,1	schlecht
		1,282				
		0,886				
	4	1,635	1,567	0,060	3,8	sehr gut
		1,578				
		1,489				
	6	1,929	1,807	0,087	4,8	sehr gut
		1,736				
		1,756				

Anlage 46: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche bei Zugabe von DOROSOL C10

Proctordichte D_{pr} [%]	BMG [Gew.-%]	Normal- spannung σ' [kN/m ²]	Scher- spannung τ [kN/m ²]	Kohäsion c' [kN/m ²]	Reibungswinkel φ' [°]
95	2	100	136,32	69,61	34,10
		200	206,99		
		300	271,73		
	4	100	199,05	138,54	33,17
		200	278,94		
		300	329,76		
	6	100	241,27	171,15	30,72
		200	268,65		
		300	360,13		
98	2	100	164,30	92,02	32,00
		200	197,41		
		300	289,28		
	4	100	250,50	193,66	30,87
		200	319,09		
		300	370,06		
	6	100	300,65	228,28	32,98
		200	343,10		
		300	430,43		

Anlage 47: Ergebnisse der Rahmenscherversuche bei Zugabe von DOROSOL C10

Proctordichte D_{pr} [%]	BMG [Gew.-%]	Druck- spannung σ [N/mm ²]	Mittelwert $\bar{x}(\sigma)$ [N/mm ²]	Standard- abweichung $s(\sigma)$ [N/mm ²]	Varianz- koeffizient V [%]	Beurteilung
95	2	0,839	0,825	0,069	8,3	befriedigend
		0,735				
		0,902				
	4	1,136	1,146	0,105	9,2	befriedigend
		1,279				
		1,022				
	6	1,652	1,750	0,070	4,0	sehr gut
		1,809				
		1,789				
98	2	1,057	0,968	0,079	8,1	befriedigend
		0,981				
		0,866				
	4	1,279	1,369	0,067	4,9	sehr gut
		1,439				
		1,388				
	6	1,967	2,093	0,110	5,3	gut
		2,076				
		2,235				

Anlage 48: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche bei Zugabe von Pectacrete

Proctordichte D_{pr} [%]	BMG [Gew.-%]	Normal- spannung σ' [kN/m ²]	Scher- spannung τ [kN/m ²]	Kohäsion c' [kN/m ²]	Reibungswinkel ϕ' [°]
95	2	100	180,42	90,66	39,04
		200	235,53		
		300	342,62		
	4	100	248,12	170,61	40,72
		200	359,94		
		300	420,29		
	6	100	347,68	249,73	40,85
		200	399,67		
		300	520,59		
98	2	100	222,71	131,82	40,42
		200	290,65		
		300	393,02		
	4	100	376,31	273,31	40,77
		200	412,23		
		300	548,78		
	6	100	419,45	311,28	43,81
		200	478,68		
		300	611,34		

Anlage 49: Ergebnisse der Rahmenscherversuche bei Zugabe von Pectacrete

Proctordichte D_{pr} [%]	BMG [Gew.-%]	Normal- spannung σ' [kN/m ²]	Scherspannung τ [kN/m ²]	Reibungswinkel φ' [°]
95	2	100	72,97	32,98
		200	137,85	
		300	186,57	
	4	100	100,70	40,32
		200	175,07	
		300	245,72	
	6	100	95,59	40,45
		200	174,79	
		300	245,72	
98	2	100	69,27	35,93
		200	160,81	
		300	207,93	
	4	100	103,72	38,96
		200	175,07	
		300	226,03	
	6	100	124,97	40,99
		200	164,00	
		300	254,54	

Anlage 50: Restscherfestigkeitsparameter bei Weißfeinkalk als Bindemittel

Proctordichte D_{pr} [%]	BMG [Gew.-%]	Normal- spannung σ' [kN/m ²]	Scherspannung τ [kN/m ²]	Reibungswinkel φ' [°]
95	2	100	102,45	39,88
		200	167,36	
		300	244,16	
	4	100	76,00	40,71
		200	141,19	
		300	248,07	
	6	100	168,71	45,54
		200	170,83	
		300	305,45	
98	2	100	107,22	41,71
		200	176,46	
		300	262,52	
	4	100	125,61	48,80
		200	233,50	
		300	335,48	
	6	100	114,79	45,68
		200	173,66	
		300	323,80	

Anlage 51: Restscherfestigkeitsparameter bei DOROSOL C10 als Bindemittel

Proctordichte D_{pr} [%]	BMG [Gew.-%]	Normal- spannung σ' [kN/m ²]	Scherspannung τ [kN/m ²]	Reibungswinkel φ' [°]
95	2	100	110,00	43,90
		200	190,29	
		300	285,54	
	4	100	126,44	50,43
		200	262,88	
		300	347,30	
	6	100	188,57	51,34
		200	298,32	
		300	321,70	
98	2	100	122,01	46,38
		200	241,61	
		300	288,04	
	4	100	123,83	42,20
		200	236,10	
		300	224,51	
	6	100	140,34	61,58
		200	381,58	
		300	561,25	

Anlage 52: Restscherfestigkeitsparameter bei Pectacrete als Bindemittel

Proctordichte D_{Pr} [%]	BMG [Gew.-%]	Reibungswinkel ϕ' [°]	Druckfestigkeit q_u [kN/m ²]	Kohäsion c' [kN/m ²] rechnerisch	Kohäsion c' [kN/m ²] experimentell	Anteil von c' experimentell an c' rechnerisch [%]
95	2	19,88	637	223,51	55,16	24,68
	4		1094	382,63	100,38	26,23
	6		1171	409,56	114,76	28,02
98	2	20,56	779	269,90	67,81	25,12
	4		1146	396,57	99,90	25,19
	6		1182	409,03	124,19	30,36

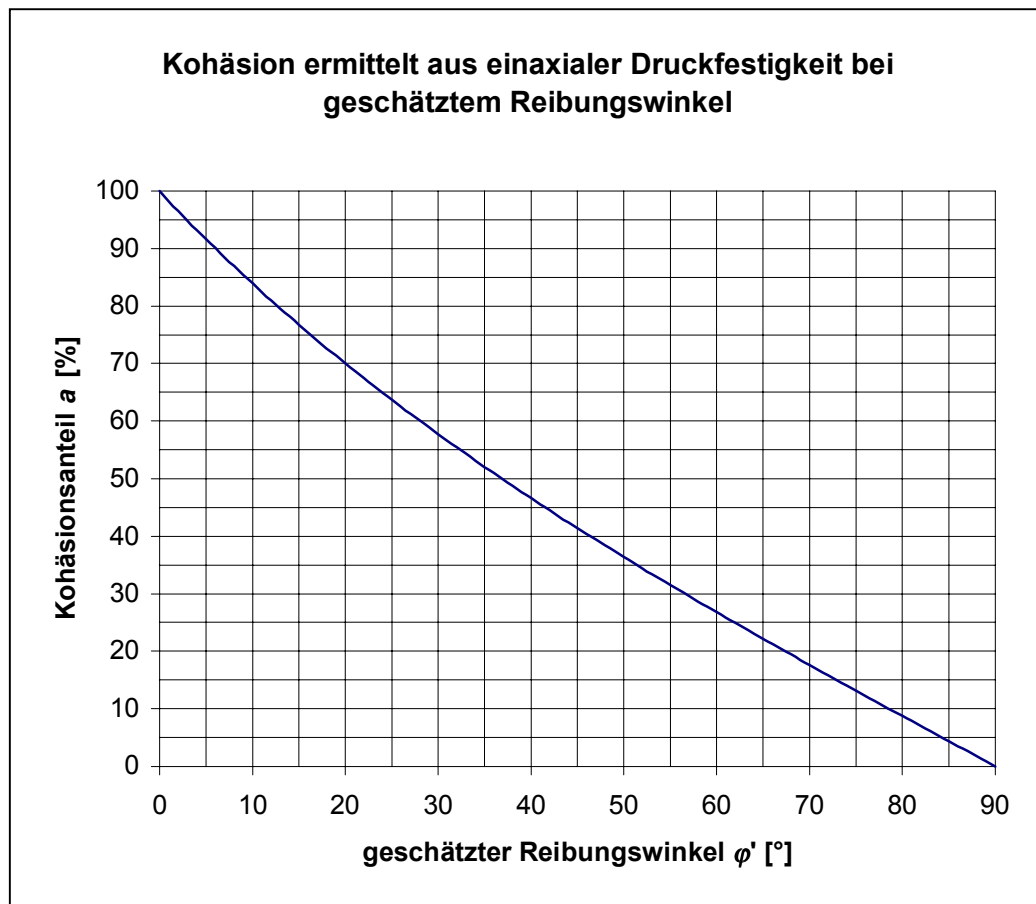
Anlage 53: Vergleich der Scherparameter aus Rahmenscherversuch und einaxialen Druckversuch bei der Verwendung von Weißfeinkalk

Proctordichte D_{Pr} [%]	BMG [Gew.-%]	Reibungswinkel ϕ' [°]	Druckfestigkeit q_u [kN/m ²]	Kohäsion c' [kN/m ²] rechnerisch	Kohäsion c' [kN/m ²] experimentell	Anteil von c' experimentell an c' rechnerisch [%]
95	2	19,88	733	257,20	69,61	27,06
	4		1326	463,78	138,54	29,87
	6		1519	531,28	171,15	32,21
98	2	20,56	1076	372,81	92,02	24,68
	4		1567	542,25	193,66	35,71
	6		1807	625,30	228,28	36,51

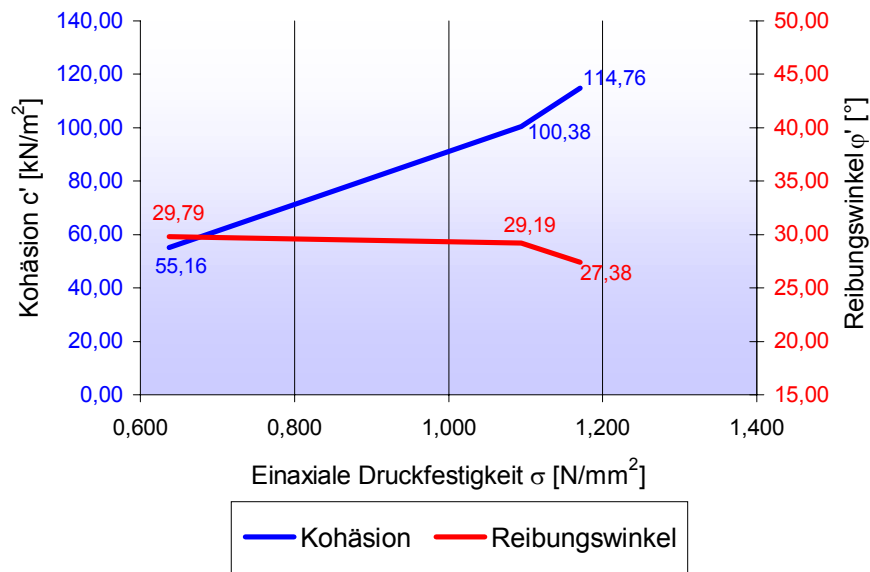
Anlage 54: Vergleich der Scherparameter aus Rahmenscherversuch und einaxialen Druckversuch bei der Verwendung von DOROSOL C10

Proctordichte D_{Pr} [%]	BMG [Gew.-%]	Reibungswinkel ϕ' [°]	Druckfestigkeit q_u [kN/m ²]	Kohäsion c' [kN/m ²] rechnerisch	Kohäsion c' [kN/m ²] experimentell	Anteil von c' experimentell an c' rechnerisch [%]
95	2	19,88	825	289,48	90,66	31,32
	4		1146	400,82	170,61	42,57
	6		1750	612,07	249,73	40,80
98	2	20,56	968	335,39	131,82	39,30
	4		1369	473,74	273,31	57,69
	6		2093	724,27	311,28	42,98

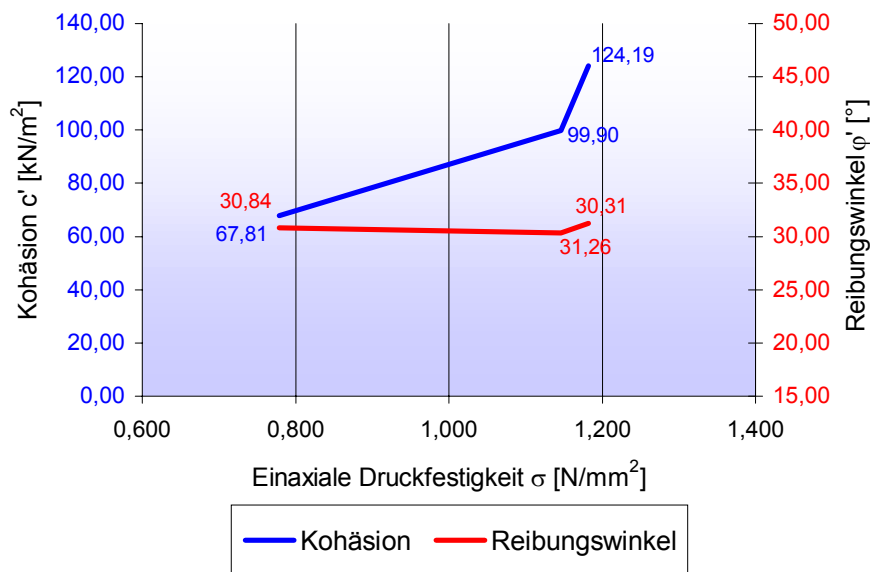
Anlage 55: Vergleich der Scherparameter aus Rahmenscherversuch und einaxialen Druckversuch bei der Verwendung von Pectacrete



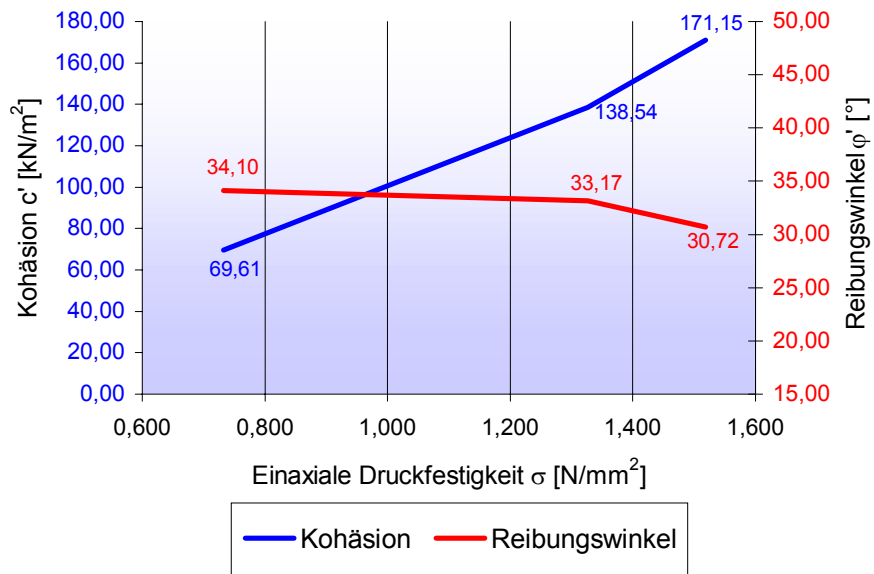
Anlage 56: Grafische Ermittlung des Anteiles der Kohäsion c' an der halben einaxialen Druckfestigkeit $q_u / 2$ mit einem gewählten Reibungswinkel ϕ'



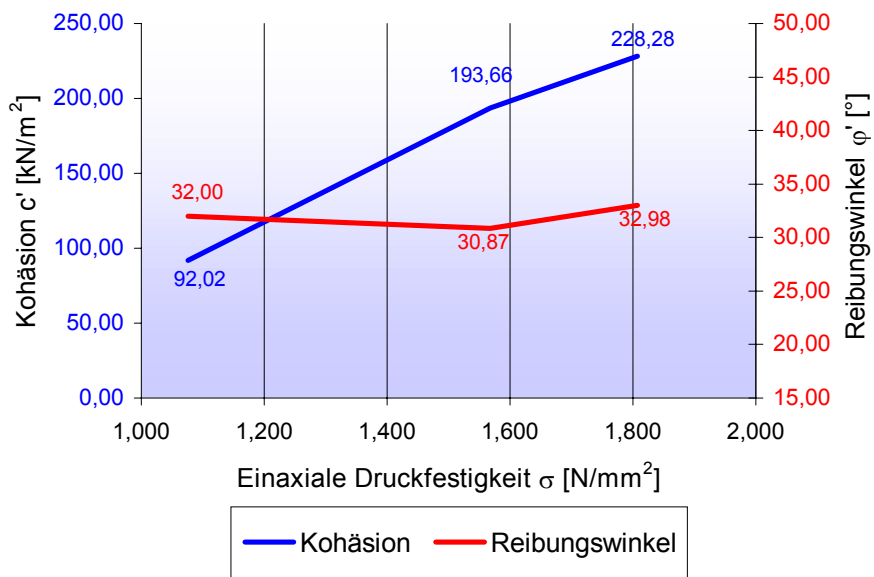
Anlage 57: Abhängigkeit der Scherparameter c' , ϕ' von der Einaxialen Druckfestigkeit σ' bei steigendem Bindemittelgehalt mit Weißfeinkalk und einer Proctordichte von 95 %



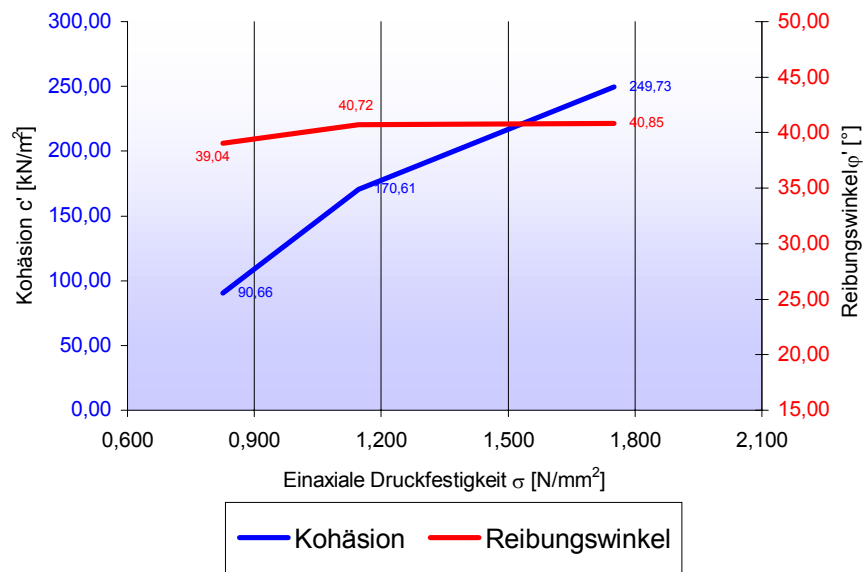
Anlage 58: Abhängigkeit der Scherparameter c' , ϕ' von der Einaxialen Druckfestigkeit σ' bei steigendem Bindemittelgehalt mit Weißfeinkalk und einer Proctordichte von 98 %



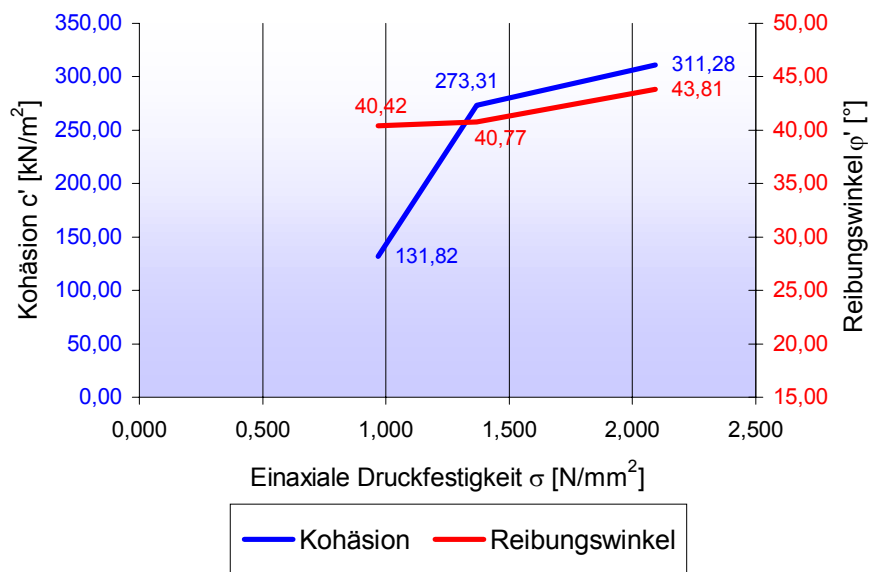
Anlage 59: Abhängigkeit der Scherparameter c' , ϕ' von der Einaxialen Druckfestigkeit σ' bei steigendem Bindemittelgehalt mit DOROSOL C10 und einer Proctordichte von 95 %



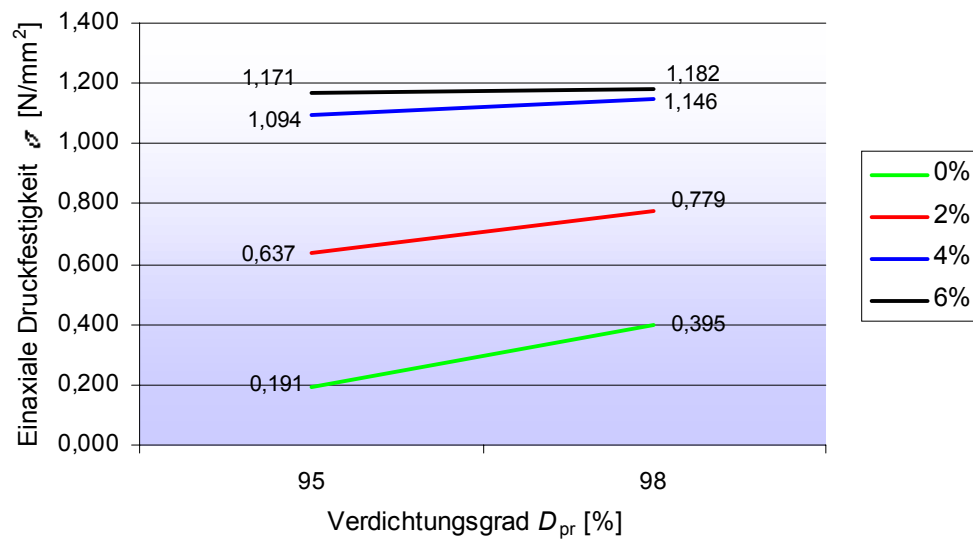
Anlage 60: Abhängigkeit der Scherparameter c' , ϕ' von der Einaxialen Druckfestigkeit σ' bei steigendem Bindemittelgehalt mit DOROSOL C10 und einer Proctordichte von 98 %



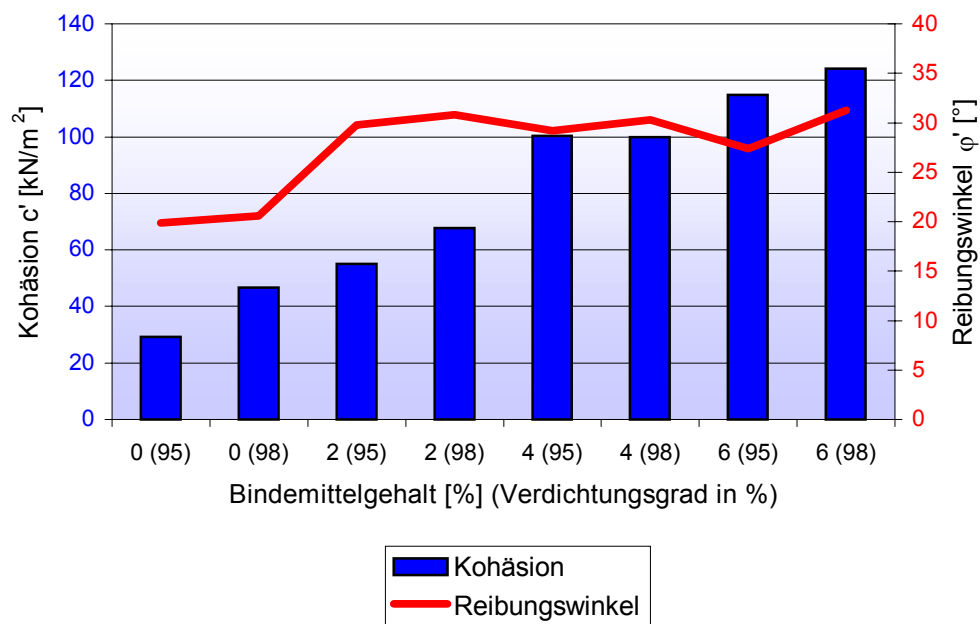
Anlage 61: Abhängigkeit der Scherparameter c' , φ' von der Einaxialen Druckfestigkeit σ' bei steigendem Bindemittelgehalt mit Pectacrete und einer Proctordichte von 95 %



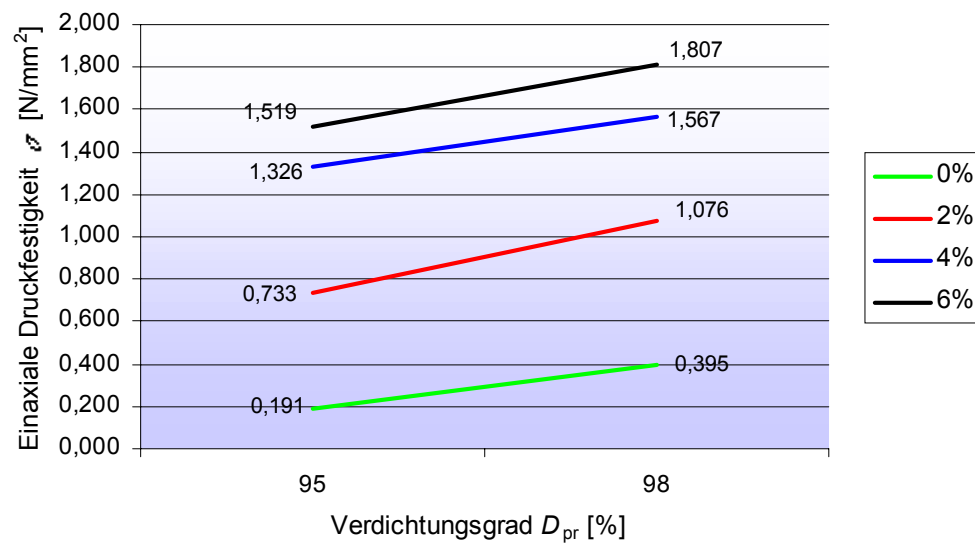
Anlage 62: Abhängigkeit der Scherparameter c' , φ' von der Einaxialen Druckfestigkeit σ' bei steigendem Bindemittelgehalt mit Pectacrete und einer Proctordichte von 98 %



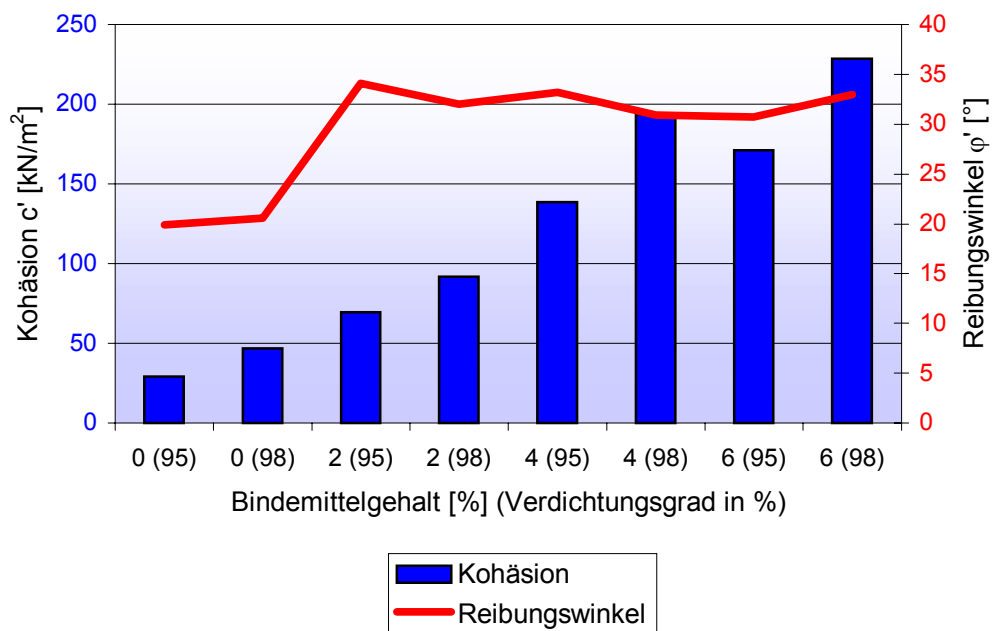
Anlage 63: Druckfestigkeitsentwicklung in Abhängigkeit des Verdichtungsgrades nach 28 Tagen Feuchtraumlagerung bei Zugabe von Weißfeinkalk



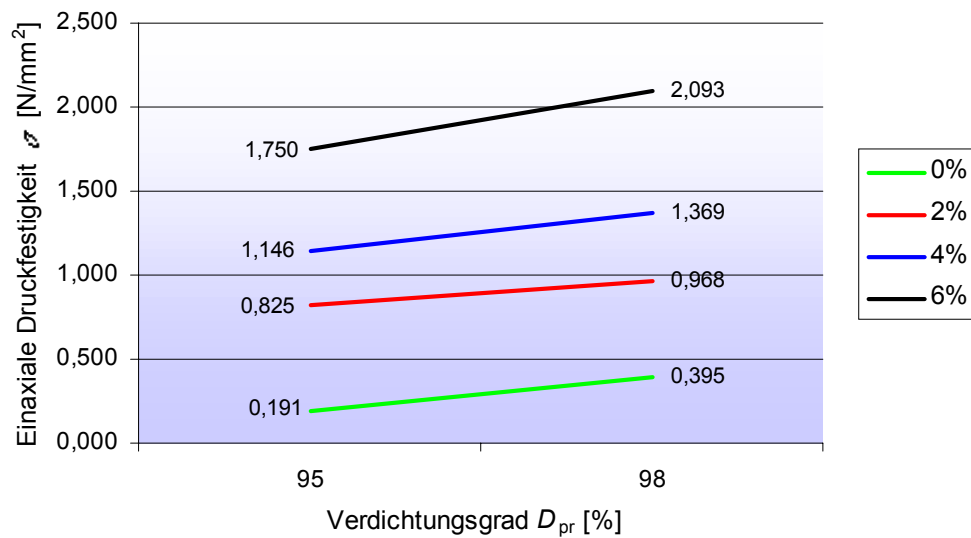
Anlage 64: Abhängigkeit der Scherparameter c' und ϕ' vom Bindemittelgehalt und dem Verdichtungsgrad bei Zugabe von Weißfeinkalk



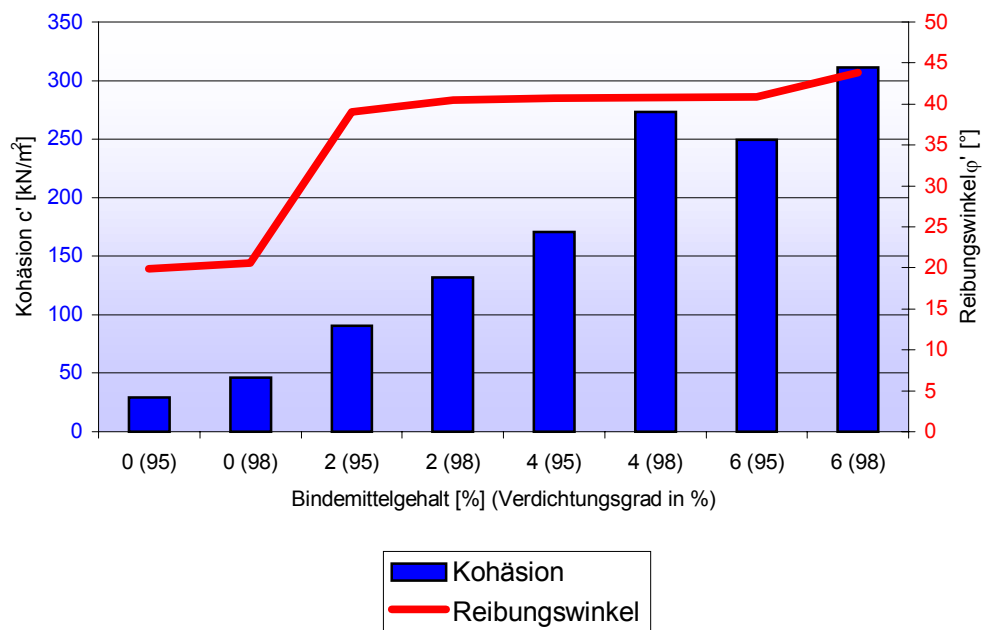
Anlage 65: Druckfestigkeitsentwicklung in Abhängigkeit des Verdichtungsgrades nach 28 Tagen Feuchtraumlagerung bei Zugabe von DOROSOL C10



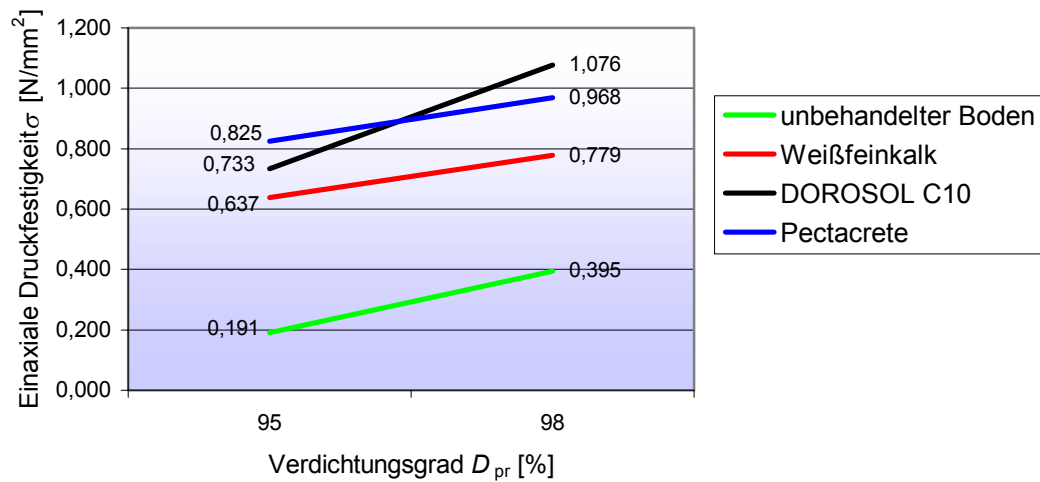
Anlage 66: Abhängigkeit der Scherparameter c' und ϕ' vom Bindemittelgehalt und dem Verdichtungsgrad bei Zugabe von DOROSOL C10



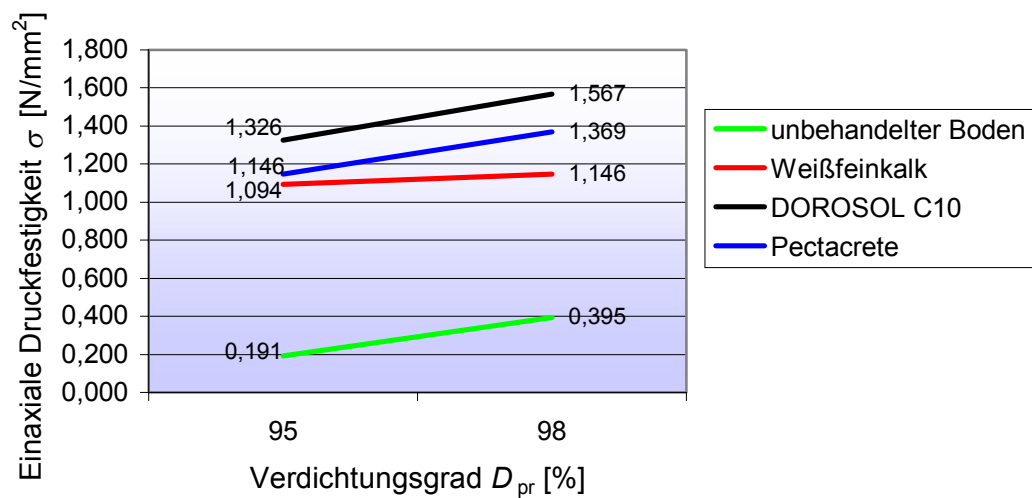
Anlage 67: Druckfestigkeitsentwicklung in Abhängigkeit des Verdichtungsgrades nach 28 Tagen Feuchtraumlagerung bei Zugabe von Pectacrete



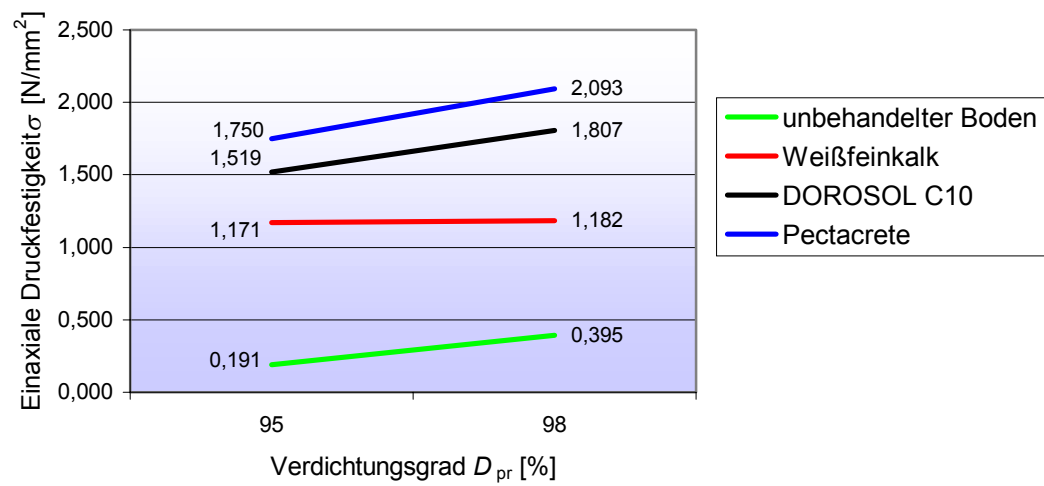
Anlage 68: Abhängigkeit der Scherparameter c' und ϕ' vom Bindemittelgehalt und dem Verdichtungsgrad bei Zugabe von Pectacrete



Anlage 69: Druckfestigkeitsentwicklung bei 2 % Bindemittelgehalt im Vergleich zum unbehandelten Boden in Abhängigkeit des Verdichtungsgrades



Anlage 70: Druckfestigkeitsentwicklung bei 4 % Bindemittelgehalt im Vergleich zum unbehandelten Boden in Abhängigkeit des Verdichtungsgrades



Anlage 71: Druckfestigkeitsentwicklung bei 6 % Bindemittelgehalt im Vergleich zum unbehandelten Boden in Abhängigkeit des Verdichtungsgrades

Datenblatt des Weißfeinkalks

Kalk: Weißkalk CL 80
Hersteller: ZKW Otterbein

	Mittelwert
Glühverlust	2,0 %
CO ₂	1,5 %
SiO ₂	8,0 %
Al ₂ O ₃	3,0 %
Fe ₂ O ₃	1,5 %
CaO	80,0 %
MgO	2,5 %
SO ₃	0,3 %

Anlage 72: Chemische Zusammensetzung und Überwachungsdaten des verwendeten Weißfeinkalks

Datenblatt des Pectacrete

Zement: CEM I 32,5 R -pe-
Hersteller: Deuna Zement

Physikalische und technologische Daten

	Mittelwert
Feinheit	3900 cm ² /g
Wasserbedarf	31,3 %
Erstarrungsbeginn	139 min
Dehnung (Le Chatelier)	1,3 mm
Druckfestigkeit N 2 d	30,5 N/mm ²
Druckfestigkeit N 28 d	46,1 N/mm ²

chemische Zusammensetzung

	Mittelwert
Glühverlust	1,30 %
Unlöslichkeit	0,22 %
SiO ₂	20,87 %
Al ₂ O ₃	4,19 %
Fe ₂ O ₃	2,65 %
CaO	64,22 %
MgO	1,43 %
SO ₃	3,06 %
Cl ⁻	0,06 %

Anlage 73: Chemische Zusammensetzung und Überwachungsdaten des verwendeten Pectacrete