



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R7:1974

TEKNISKA HOGSKOLAN I LUND
SEKTIONEN FOR VAG- OCH VATTEN
BIBLIOTEKET

**Skånska moränlerors
hållfasthets- och
bärighetsegenskaper**

Jan Hartlén

Byggforskningen

Skånska moränlerors hållfasthets- och bärighetsegenskaper

Jan Hartlén

Skånska moränleror har undersökts i fält och på laboratorium med avseende på hållfasthets- och bärighetsegenskaperna. Undersökningen har initierats av att man av olika anledningar har liten kunskap om denna jord. Den främsta orsaken torde vara att moränlerorna tidigare har ansetts utgöra en så god undergrund att man inte behövt undersöka dem närmare. Dagens höghusbyggande kombinerat med elementbyggnadstekniken har emellertid ökat kraven på exakthet vid bedömning av bärighet och sättningar. En annan orsak till att moränlerorna studerats så litet är att det till följd av deras heterogena uppbyggnad är besvärligt att erhålla representativa prover.

Syftet med undersökningen har varit att finna lämpliga metoder att bestämma hållfastheten hos en stor jordvolym utgående från en liten undersökt volym med hänsyn till att moränleran är heterogen. För praktiskt bruk har enkla, signifikanta samband bestämts mellan hållfasthetsparametrarna och vattenhalt, portal och lerhalt. Olika metoder har även analyserats för att finna ut hur man bäst skall bestämma bärighet och sättningar vid grundläggning med plattor.

Litteraturgenomgång

I avhandlingens litteraturgenomgång belyses aktuella brottyper och brottteorier för moränleror. Eftersom moränleror är heterogena och innehåller linser och stora korn av friktionsmaterial samt olika typer av svaghetszoner, blir hållfastheten beroende av provvolymens storlek och provningsförfarandet. I avhandlingen visas hur svaghetszoner påverkar hållfastheten hos fasta leror med avseende på svaghetszonernas orientering (anisotropin) och den influerade provvolymens storlek (volyمبرoendet). I översikten belyses hur man utgående från det lilla provet undersökt på laboratorium eller i fält kan förutsäga den stora jordvolymens bärighet. Eftersom moränlera behandlats sparsamt i litteraturen behandlar litteraturgenomgången till stora delar fasta sedimenterade lerors egenskaper.

Utförda försök

Moränlera (Skåne), hållfasthet, bärighetsplatser i Lund och från en i Malmö, Tygelsjö och Hyllie. Moränlerornas lerhalt varierar mellan 15 och 32 %. Även en sandig morän från Arlövs undersöktes. Fältförsöken bestod av plattförsök (plattdiameter 0,08–1,10 m), ringskjuvförsök och vingborrförsök. På laboratoriet omfattade försöken enaxliga och treaxliga tryckförsök, fallkonförsök, ödometerförsök och i några fall direkta skjuvförsök. På laboratoriet undersöktes dels ostörda dels laboratoriepackade prover. I det senare fallet varierades vattenhalt och portal.

Resultat och rekommendationer

Brottypen beror av vattenmättningsgrad och spänningsnivå. Vid enaxliga, odränerade tryckförsök övergick brottet från att vara sprött till att bli plastiskt vid ett gränsvärde hos vattenmättningsgraden av drygt 90 %. Detta gränsvärde minskade med ökande horisontaltryck. Vid de odränerade försöken blev emellertid brottenveloppen i allmänhet rak – även vid sprött brott – vilket innebär att Mohr-Coulombs brotteori kan användas. Vid låga horisontaltryck och låg vattenmättningsgrad kan emellertid Griffiths teori (1921, 1924) vara lämpligare. Vid de dränerade försöken blev brottet mestadels plastiskt och brottenveloppen rak, varför Mohr-Coulombs teori bör kunna användas generellt.

Försöken visade att den odränerade och dränerade hållfastheten är lika stor hos ostörd och laboratoriepackad moränlera, se FIG. 1. Det är en stor fördel att på så sätt kunna undersöka laboratoriepackad moränlera, eftersom man här kan använda störda prover.

Den odränerade skjuvhållfastheten beror enligt de utförda enaxliga tryckförsöken och vingborrförsöken av den influerade jordvolymens storlek, se FIG. 1. I avhandlingen visas hur denna volym lämpligen definieras vid olika försökstyper. Även plattbärigheten uppvisade ett volyمبرoende, FIG. 2. Hållfasthetens volyمبرoende tycks bäst åskådliggöras med Weibulls teori (1939). Weibulls teori måste emeller-

Byggforskningen Sammanfattningar

R7:1974

Nyckelord:

Moränlera (Skåne), hållfasthet, bärighet, litteraturinventering, fältförsök, laboratorieförsök, doktorsavhandling.

Rapport R7:1974 avser anslag C439 från Statens råd för byggnadsforskning till Chalmers tekniska högskola, institutionen för geoteknik med grundläggning, Göteborg.

UDK 624.131.37:533.6

624.131. 4:533.6

SfB (19)

ISBN 91-540-2308-4

Sammanfattning av:

Hartlén, J, 1974, *Skånska moränlerors hållfasthets- och bärighetsegenskaper*. (Statens institut för byggnadsforskning) Stockholm. Rapport R7:1974, 196 s., ill. 30 kr.

Rapporten är skriven på svenska med svensk och engelsk sammanfattning.

Distribution:

Svensk Byggtjänst
Box 1403, 111 84 Stockholm
Telefon 08-24 28 60

Grupp: konstruktion

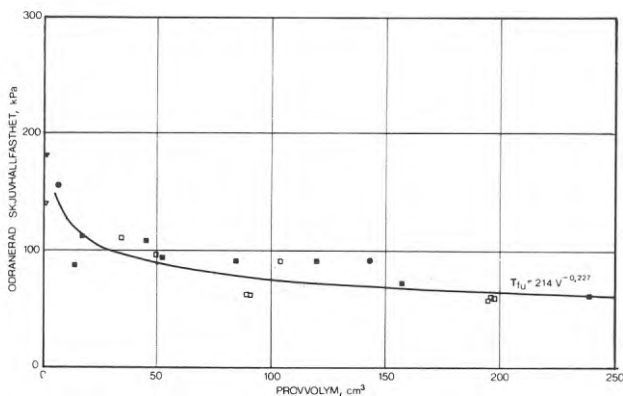


FIG. 1. Den odränerade skjuvhållfasthetens beroende av den influerade jordvolymens storlek, här hos moränlera från Tygelsjö. Lerhalt = 17 %, $e_0 = 0,41-0,46$ $w_0 \approx 14$ %. ■ □, enaxligt tryckförsök på ostörd respektive packad moränlera; ▼ ▽, konförsök på ostörd respektive packad moränlera; ●, vinnborrförsök.

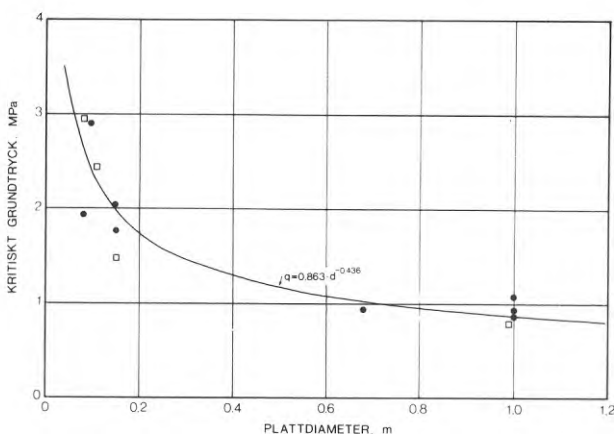


FIG. 2. Kritiskt grundtryck som funktion av plattdiametern, här enligt plattförsök utförda i Rehab, Lund. Moränlerans lerhalt är 32 %, $e_0 = 0,49$ och $w_0 = 16$ %. ●, långsamt försök; □, snabbt försök.

tid begränsas uppåt av en hållfasthet motsvarande hållfastheten hos moränlera fri från svaghetszoner (intakt-hållfastheten). Hållfastheten bestämd med fallkonförsök kan antas ge ett mått på denna hållfasthet. Nedåt begränsas Weibulls teori av en hållfasthet motsvarande hållfastheten hos en stor jordvolym. Denna lägsta hållfasthet antas i rapporten motsvara minimivärdet uppmätt vid enaxliga tryckförsök. Minimivärdet blev nämligen ungefär lika inom volymintervallet 70–200 cm³.

Den odränerade skjuvhållfasthetens volymberoende avtog med ökande vattenhalt och kunde försummas när vattenhalten översteg plasticitetsgränsen. Provkropparna var då i stort sett vattenmätade. I avhandlingen görs en teoretisk ansats som visar varför hållfastheten

endast är volymberoende när moränleran är spröd.

Den dränerade hållfasthetens volymberoende kan enligt utförda försök försummas. Detta förklaras av att brottet mestadels blev plastiskt vid de konsoliderade, dränerade försöken.

Om man vid plattgrundläggning skall bestämma tillåten grundpåkänning utförs lämpligen plattförsök. I avhandlingen föreslås hur plattförsök bör utföras och utvärderas. Ett mindre exakt mått på jordens bärlighet erhålls om man beräknar bärligheten utgående från skjuvhållfasthetsparametrarna. För de undersökta lerrika moränlerorna (lerhalt ca 30 %) blev det odränerade fallet avgörande för bärligheten. Om hållfastheten utvärderades som minimivärdet från vinnborrförsöken (vingdimension minst 50 mm × 100

mm) eller som medelvärdet från de enaxliga tryckförsöken (provdimension 50 mm × 100 mm) erhöles god överensstämmelse med uppmätta kritiska grundtryck vid plattförsöken.

För de undersökta lerfattiga moränlerorna (lerhalt ca 15–17 %) blev den dränerade skjuvhållfastheten avgörande för bärligheten. Hållfasthetsparametrarna bestäms därför lämpligen med konsoliderade, dränerade triaxialförsök (provdimension 50 mm × 100 mm) på laboratoriepackade prover. Ett tämligen gott mått på bärligheten erhöles även för de lerfattiga moränlerorna när beräkningarna baserades på minimihållfastheten uppmätt vid vinnborrförsök (vingdimension 50 mm × 100 mm).

För mindre fast lagrade moränleror än de här undersökta kan sättningen och inte säkerheten mot grundbrott bli dimensionerande. Oftast är det då snedsättningarna som blir avgörande. Sättningen beräknad med Jakys metod och kompressionsmodulen bestämd från ödometerförsökets andra pålastningsgren inom aktuellt spänningsintervall (antingen på ostörd moränlera eller på moränlera packad vid naturlig vattenhalt till naturligt portal) gav god överensstämmelse med sättningarna uppmätta vid plattförsöken.

I avhandlingen ges avslutningsvis signifikanta uttryck med vilka man kan uppskatta dels den odränerade skjuvhållfastheten τ_{fu} , dels de dränerade skjuvhållfasthetsparametrarna c' och φ utgående från moränlerans naturliga vattenhalt w_0 , portal e_0 och lerhalt l_c . Sambanden har bestämts inom ett brett vattenhalts- och portalsintervall. De med multipel regressionsanalys bestämda sambanden blev

$$\tau_{fu} = 18 w_0^{-2,05} e_0^{-1,88} l_c^{2,66} \text{ kPa } \tau_{fu} \leq \leq 200 \text{ kPa}$$

$$c' = 3,0 w_0^{-3,23} e_0^{-2,12} l_c^{4,19} \text{ kPa om } c' \leq \leq 20 \text{ kPa}$$

$$c' = -24 - 140 \lg w_0 - 80,9 \lg e_0 + + 155 \lg l_c \text{ kPa om } 20 \text{ kPa} < c' \leq 50 \text{ kPa}$$

$$\varphi' = 22,0 w_0^{0,166} e_0^{-0,139} l_c^{-0,311} \text{ grader } 24^\circ < \varphi' < 33^\circ$$

De naturliga moränlerorna är i allmänhet inte vattenmätade — inte ens under grundvattenytan. Om man av försiktighetsskäl vill bestämma hållfastheten vid vattenmättnad anges i avhandlingen de då aktuella sambanden omformade från ovan givna ekvationer.

The geotechnical parameters of strength and bearing capacity of boulders clays from the southwest part of Sweden

Jan Hartlén

Boulder clays from the southwest part of Sweden have been investigated with respect to the geotechnical parameters of strength and bearing capacity. The investigation was started because little is known about this type of soil. There may be many reasons for this, one of which is probably that boulder clays usually provide good foundations for buildings and also that boulder clays cover only a smaller part of Sweden. Another reason may be that the heterogeneous structure of boulder clay makes it difficult to test a relevant soil volume in the field or in the laboratory. Nowadays, with building heights increasing and applying the construction technique of premanufactured elements with small tolerable differential settlements, the need to know more about boulder clays has largely increased.

The aim of the research has been to find relevant methods to determine the operational strength in a large soil volume from a small soil volume investigated in the field or in the laboratory. The problem in predicting the strength in a large soil volume is the heterogeneous structure of the material containing lenses of different materials as well as boulders. A correlation has been made between laboratory tests and full scale field tests. Simple, significant relations have been given to predict the strength parameters from the standard parameters of water content, void ratio and clay content.

Different methods have been studied to find how to determine the bearing capacity and the settlements when founding on slabs.

Literature survey

The types of failure and failure theories typical for boulder clays are shown in the literature survey. As the boulder clays are heterogenous, the shear strength is dependent on the sample size and the test method. As little is written about the geotechnical characteristics of boulder clays, the literature survey is concentrated on stiff fissured sedimentary clays. It is shown how the soil volume involved and the orientation of the weakness

zones influence the strength of stiff clays. Recommendations given in the literature describe how these influences are to be taken into account when predicting the characteristics of the soil deposit.

Test locations and programmes

The boulder clays investigated are found in southwestern Sweden: three places in Lund and one place in each Malmö, Tygelsjö and Hyllie. The clay content (percentage of sample by weight containing particles smaller than 0.002 mm) varied between 15 and 32 %. A sandy moraine from Arlöv was also examined. The field tests included plate tests (plate diameter 0.08–1.10 m), ring shear tests and vane tests. In the laboratory unconfined and triaxial compression tests, fall cone tests, oedometer tests and, in a few cases direct shear tests were performed. In the laboratory both undisturbed and recompacted boulder clay were examined. In the latter case the water content and the void ratio were varied.

Results and recommendations

According to the tests the mode of failure is dependent on the degree of saturation and the stress level. In the unconfined compression tests the failure was brittle when the sample was under about 90 % of saturation. The degree of saturation for brittle fracture decreased with an increasing horizontal stress. In the unconfined compression tests the failure envelope generally became straight – even at brittle fracture. This means that the Mohr-Coulomb failure theory can be used. At low horizontal stresses and low degrees of saturation the test results indicate, in spite of what has been said above, that Griffith's theory (1921, 1924) may be more fitting. Tests under drained conditions showed mostly that the failures were plastic and the failure envelopes were straight, which means that the Mohr-Coulomb theory may be used.

The test results have revealed that the drained and undrained shear strength are independent on whether the test is carried out on an undisturbed or a recompacted boulder clay, see FIG. 1.

National Swedish Building Research Summaries

R7:1974

Key words:

boulder clay (southwest part of Sweden), strength, bearing, literature survey, field test, laboratory test, doctor's dissertation (tech)

Report R7:1974 has been supported by Grant C439 from the Swedish Council for Building Research to Chalmers Institute of Technology, Department for Geotechnics, Gothenburg.

UDC 624.131.37:533.6
SfB (19)
ISBN 624.131.4:533.6
91-540-2308-4

Summary of:

Hartlén, J, 1974, *Skånska moränlevers hållfasthets- och bärighetsegenskaper*. The geotechnical parameters of strength and bearing capacity of boulder clays from the southwest part of Sweden. (Statens institut för byggnadsforskning) Stockholm. Report R7:1974, 196 p., ill. 30 Sw. Kr.

The report is in Swedish with Swedish and English summaries.

Distribution:

Svensk Byggtjänst
Box 1403, S-111 84 Stockholm
Sweden

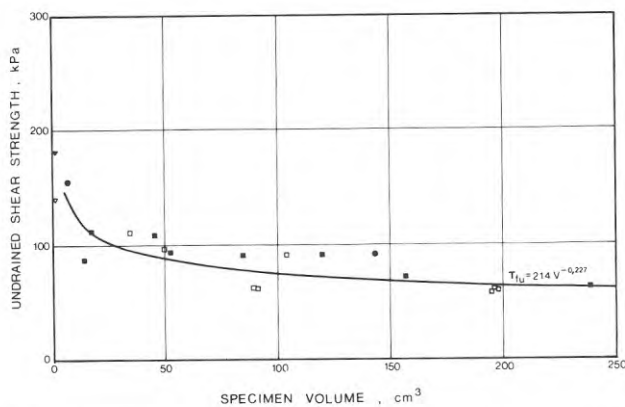


FIG. 1. The undrained shear strength versus the influenced sample volume. Clay content = 17 %, $e_0 = 0.41-0.46$, $w_0 \approx 14$ %. ■ □, unconfined compression test on undisturbed and recompacted specimens respectively; ▼ ▽, fall cone test on undisturbed and recompacted specimens respectively; ●, field vane test.

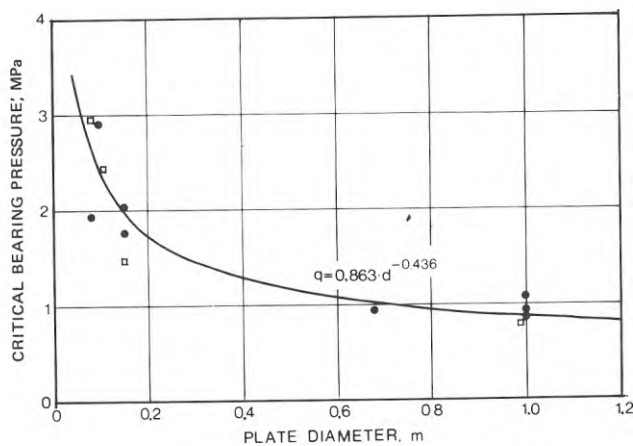


FIG. 2. Critical bearing pressure versus plate diameter from plate load tests in Rehab, Lund. Clay content = 32 %, $e_0 = 0.49$, $w_0 = 16$ %. ●, slow test; □, fast test.

In view of the difficulty of taking undisturbed samples it is a great advantage to be able to examine recompacted instead of undisturbed boulder clay.

According to the unconfined compression tests and field vane tests, FIG. 1., the undrained shear strength is dependent on the influenced soil volume. This report suggests how the influenced volume for different test methods may be defined. The plate bearing capacity also showed a volume dependence, FIG. 2. Weibull's theory (1939) seems to be the best one fitting the volume dependence. The theory must however be limited by a maximum shear strength corresponding to the intact strength of the boulder clay — the strength when the sample is free from weakness zones and other discontinuities. The intact strength is probably best determined by the fall cone test. Further, Weibull's theory must contain a lower limit corresponding to the strength of

the soil deposit. This report assumes that this strength is defined as the minimum value measured from unconfined compression tests, because the minimum value was the same within the sample volume interval of 70–200 cm³.

The volume dependence of the undrained shear strength decreased with increasing water content and could be neglected when the water content exceeded the plasticity limit. The investigated samples were almost saturated to above this point. In the report, a theoretical attempt is made to show why the boulder clay, when plastic, is not volume dependent.

The drained shear strength determined from consolidated, drained triaxial tests did not show a volume dependence. This is explained by the fact that the failure was plastic.

When choosing a foundation pressure for slabs, the most reliable type of test method is the field plate test. This

report contains recommendations for the execution and evaluation of plate tests. A less exact way of determining the bearing capacity is to calculate it from the shear strength parameters. The test results of the more clayey boulder clays (clay content ≈ 30 %) show that the undrained conditions are critical. Good agreement was obtained between the measured critical plate pressure (from the load — creep rate curve) and the calculated bearing capacity if, in the latter case, the strength was taken as the minimum value from the field vane tests (vane size 50 mm \times 100 mm) or as the mean value from the unconfined compression tests (200 cm³ sample volume).

For the less clayey boulder clays (clay content 15–17 %) the bearing capacity was critical under drained conditions. The shear strength parameters from the drained triaxial tests gave good agreement with the measured critical plate pressures. Fairly good agreement was also obtained when the strength was taken as the minimum value from the field vane tests.

The settlement and not the factor of safety against failure can determine the foundation pressure when the boulder clay is in a loose state. It is usually the differential settlement and not the mean settlement which is the limiting factor. On the basis of the plate tests, the settlements can be calculated by Jaky's expression. The modulus of compressibility taken within actual stress levels from the second loading curve of an oedometer test gave good agreement with the load-settlement curves from the plate tests.

Finally, the report gives significant expressions by which the undrained strength τ_{fu} and the drained shear strength parameters of cohesion c' and angle of friction ϕ can be estimated from the initial water content w_0 , void ratio e_0 and clay content l . The expressions determined by means of multiple regression analyses became

$$\tau_{fu} = 18 w_0^{-2.05} e_0^{-1.88} l_c^{2.66} \text{ kPa } \tau_{fu} \leq 200 \text{ kPa}$$

$$c' = 3.0 w_0^{-3.23} e_0^{-2.12} l_c^{4.19} \text{ kPa if } c' \leq 20 \text{ kPa}$$

$$c' = -24 - 140 \lg w_0 - 80.9 \lg e_0 + 155 \lg l_c \text{ kPa if } 20 \text{ kPa} < c' \leq 50 \text{ kPa}$$

$$\phi' = 22.0 w_0^{0.166} e_0^{-0.139} l_c^{-0.311} \text{ degrees } 24^\circ < \phi' < 33^\circ$$

Usually, natural boulder clays are not saturated — not even under the ground water level. If one is cautious and wishes to assess the strength parameters when the boulder clay is saturated, the above expressions can be converted as shown in the report.

Rapport R7:1974

SKÅNSKA MORÄNLERORS HÅLLFASTHETS- OCH BÄRIGHETSEGENSKAPER
THE GEOTECHNICAL PARAMETERS OF STRENGTH AND BEARING CAPA-
CITY OF BOULDERS CLAYS FROM THE SOUTHWEST PART OF SWEDEN

av Jan Hartlén

Denna rapport avser anslag C 439 från Statens råd för byggnadsforskning till Chalmers tekniska högskola, institutionen för geoteknik med grundläggning, Göteborg.

Försäljningsintäkterna tillfaller fonden för byggnadsforskning

RÄTTELSER

Sid.	Står	Skall stå
14 ekv. (2)	σ'_1, σ'_3	σ_1, σ_3
31 Fig. 13	Lanttasaari	Lauttasaari
36 Fig. 16	y-axeln 2,0 2,5 3,0 x-axeln -4 -3 -2 -1,0	1,82 2,38 resp. 2,82 -5 -4 -3 -2 resp. -1
53 Fig. 26	$\pi/4 - \phi/2$	$\pi/4 + \phi/2$
62 Fig. 32b		Skala 1:2
152 Fig. 18, rad 7	τ_{fu}^{medel}	τ_{fu}^{mean}
172 ekv. (47b)	$\phi' = 22,0 w_o^{0,166} e_o^{-0,139} l_c^{-0,311}$	$\phi' = 22,0 w_o^{0,166} e_o^{-0,139} l_c^{-0,311}$

FÖRORD

I denna avhandling redogörs för skånska moränlerors hållfasthets- och bärrighetsegenskaper. Försöken har bestått av laboratorie- och fältförsök. Försök har även utförts på fasta sedimenterade leror men för att ge rapporten en rimlig omfattning behandlas i allmänhet inte dessa resultat här utan i stället hänvisas till årsrapporter insända till Statens råd för byggnadsforskning (Hartlén 1969, 1971, 1972b).

Till stora delar har undersökningen finansierats genom anslag från Statens råd för byggnadsforskning. Undersökningen har genomförts vid institutionen för geoteknik med grundläggning, Chalmers tekniska högskola under ledning av professor Sven Hansbo och docent Roland Pusch.

Delar av den experimentella undersökningen har under min ledning utförts som examensarbeten av K-A Appelqvist, M Astner, L Augustsson, K Kihlberg, T Kullbjer, P-A Larsson, S Larsson, S Lindgren, P Maripuu, C Olsson, R Oscarsson, J Sjöstedt, L Torkelsson, L Waltgård och L Wiman, vilka tackas för väl utförda arbeten.

Jag vill vidare framföra mitt varma tack till mina kolleger för all den hjälp och uppmuntran jag fått under arbetets gång.

Göteborg i januari 1974

Jan Hartlén

INNEHÅLL

SAMMANFATTNING

SUMMARY

BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER.....	7
1	INTRODUKTION.....9
1.1	Bakgrund.....9
1.2	Omfattning och syfte.....10
2	FASTA LERORS HÅLLFASTHETSEGENSKAPER- LITTERATURGENOMGÅNG..... 13
2.1	Brotteorier..... 13
2.1.1	Brottyper..... 13
2.1.2	Plastiskt brott..... 14
2.1.3	Sprött brott..... 15
2.2	Hållfasthetens beroende av tidigare spänningstillstånd..... 21
2.3	Inhomogenitetens betydelse för hållfasthetsanisotropi..... 25
2.4	Inhomogenitetens betydelse för hållfasthetens volymberoende 32
3	EGNA UNDERSÖKNINGAR..... 41
3.1	Allmänt..... 41
3.2	Geografisk och geologisk beskrivning av försöksplatserna... 41
3.3	Försöksutrustning, utförande och utvärdering.....49
3.4	Resultat från undersökningarna..... 65
3.4.1	Sparta, Lund.....65
3.4.2	Rehab, Lund.....78
3.4.3	Tygelsjö.....94
3.4.4	Kv. Lärkträdet, Malmö.....107
3.4.5	Hyllie, Arlov och Marknad, Lund.....112
4	ANALYS AV FÖRSÖKSRESULTAT.....115
4.1	Brottprocessen.....115
4.1.1	Inverkan av vattenhalt, portal och spänningsnivå.....115
4.1.2	Jämförelse mellan ostörd och packad moränlera..... 124
4.2	Hållfasthetens volymberoende..... 129
4.2.1	Vattenhaltens betydelse..... 130
4.2.2	Inverkan av större korn..... 131
4.2.3	Samband och gränser..... 137
4.3	Jämförelser mellan olika metoder att bestämma hållfast- hetsparametrarna.....144
4.3.1	Odränerad skjuvhållfasthet.....144
4.3.2	Dränerad skjuvhållfasthet..... 147
4.4	Bärighet och sättningar vid plattgrundläggning..... 149
4.4.1	Bärighet.....149

4.4.2	Sättningar.....	159
4.5	Hållfasthetsparametrarnas beroende av olika parametrar....	165
4.5.1	Odränerad skjuvhållfasthet.....	165
4.5.2	Dränerad skjuvhållfasthet.....	170
5	SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER.....	176
5.1	Brottprocessen.....	176
5.2	Hållfasthetens och bärighetens volymberoende.....	177
5.3	Metoder att bestämma moränlerors hållfasthet.....	178
5.4	Bärighet och sättningar vid plattgrundläggning.....	179
5.5	Hållfasthetens beroende av vattenhalt, portal och lerhalt...181	
6	LITTERATUR.....	183
	BILAGOR	
1	Plattförsök i full skala i Rehab, Lund.....	189
2	Plattförsök i full skala i kv. Lärkträdet, Malmö.....	192
3	Ödometerförsök.....	193
4	Pressiometerförsök i Rehab, Lund.....	196

BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER

Allmänt definieras använda beteckningar när de första gången uppträder i texten. För beteckningar som återkommer ett flertal gånger har följande sammanställning gjorts.

A	provarea
b	plattbredd, provbredd
c	sprickavstånd, kohesion
c'	effektiv kohesion
CD	konsoliderade, dränerade triaxialförsök
CU	konsoliderade, odränerade triaxialförsök
d	plattdiameter, provdiameter
E	elasticitetsmodul
e	portal
e_o	begynnelseportal
g	tyngdkraftens acceleration
h	provhöjd, konintryck
I_L	flytindex
I_p	plasticitetstal
k	konstant, definierad varje gång den används
l	plattlängd
I_c	lerhalt
M	kompansionsmodul
N_c N_q N_p	bärighetsparametrar enligt Brinch Hansen
q	tryck
q_b	bärighet
q_k	kritiskt grundtryck, definierad från kryphastighetskurvan
q_m	kritiskt grundtryck vid stor involverad jordvolym
R	multipl korrelationskoefficient
s	sättning
s_c s_q s_p	formfaktorer enligt Brinch Hansen
S_r	vattenmättningsgrad
t	tid
u	portryck
V	provvolym

w	vattenhalt
w_L	flytgräns
w_p	plasticitetsgräns
w_o	ursprunglig vattenhalt
ε	kompresion
ε_f	brottkompresion
v	kontraktionstal
ρ	skrymdensitet
ρ'	effektiv densitet
ρ_d	torrdensitet
ρ_s	kompaktdensitet
σ	totalspänning
σ'	effektivspänning
$\sigma_1 \quad \sigma_2 \quad \sigma_3$	största, mellersta och minsta huvudspänning
σ_{df}	draghållfasthet
σ_i	jämförelsetryck
σ_t	tryckhållfasthet
τ	skjuvspänning
τ_f	skjuvhållfasthet
τ_{fd}	dränerad skjuvhållfasthet
τ_{fu}	odränerad skjuvhållfasthet
τ_o	skjuvhållfasthet hos intakt lera
τ_m	skjuvhållfasthet hos stor jordvolym
ϕ	friktingsvinkel
ϕ'	effektiv friktionsvinkel

Förkortningar

CTH	Chalmers tekniska högskola, Göteborg
DGI	Danmarks geotekniska institut, Köpenhamn
LTH	Lunds tekniska högskola, Lund
SGI	Statens geotekniska institut, Stockholm

1 INTRODUKTION

1.1 Bakgrund

Moränlera är en mindre vanligt förekommande jordart i Sverige. Där den förekommer utgör den i allmänhet en god byggnadsundergrund. Som följd härav har moränlerornas hållfasthets- och deformationsegenskaper inte studerats närmare. I samband med att hushöjderna ökar och elementbyggnadstekniken alltmer används ökar emellertid kraven på kännedom om moränlerans geotekniska egenskaper. Statens råd för byggnadsforskning (BFR) har därför ställt ekonomiska medel till mitt förfogande för genomförandet av denna undersökning.

Moränlerorna avsattes under istiden direkt ur isen och har därefter förblivit opåverkade bortsett från normal klimatpåverkan (vittring, erosion o.d.). De består av osorterade mineralpartiklar från nedkrossade bergarter. Ibland innehåller moränlera även sedimentliknande bildningar, vilka tagits upp av isen vid dess framdrift och blandats in i det nedkrossade materialet.

En moränleras egenskaper beror i hög grad på var materialet transporterats i isen och avlagrats ur denna. Man skiljer mellan yt- och bottenmoräner. Ytmoränen är ofta stenig och ganska lucker medan bottenmoränen är fast. Sättet för moränleras bildning och avsättning medför att dess struktur är heterogen. Egenskaperna hos ett litet prov är ofta inte representativa för en stor jordvolym. Ingenjörsmässigt ligger svårigheten däri att utgående från ett litet prov undersökt på laboratoriet förutsäga sättningar och bärförmåga hos jorden. Från geoteknisk synpunkt är mineralsammansättning, svaghetszoner, halt grova korn, lagringstäthet samt vattenhalt av speciellt intresse.

Vid berg- och betongprovning har man sedan minst 40 år varit medveten om att heterogena materials egenskaper inte kan bestämmas korrekt utgående från små provkroppar. Halvempiriska samband har därför uppställts mellan hållfasthetsegenskaper och provvolym för olika materialtyper (exv. Weibull, 1939).

När det gäller heterogena jordar har litet gjorts men problemet har uppmärksamats genom att man för fasta leror funnit att spridningen hos uppmätt hållfasthet blivit stor. Svårigheten är då att bestämma jordens verkliga hållfasthet ur samlingen försöksdata. Lerornas hållfasthet varierar mellan en största hållfasthet, motsvarande den intakta lerans hållfasthet, och en minsta hållfasthet, motsvarande svaghetsplanens hållfasthet. Genom att testa några olika provvolymmer kan man utgående från olika empiriska ansatser bestämma den i jorden verksamma hållfastheten. Moränleror är en typ av fasta leror som uppvisar specifika egenskaper. Spridningen i uppmätt hållfasthet beror inte enbart av svaghetsplanens orientering och frekvens utan även av andra faktorer, såsom halt grova korn och vatten.

Fasta leror har ofta genomgående spricksystem vilket medför att de geotekniska egenskaperna är anisotropa. Anisotropin kan även orsakas av anisotrop konsolidering och av skiktning. Det är emellertid tvivelaktigt om moränleror har utpräglade anisotropa egenskaper trots att de utsatts för höga normaltryck av isen.

Moränlera är oftast fast och innehåller stora korn, varför det är svårt att ta upp ostörda, representativa prover för laboratorieundersökning. Materialets struktur är också sådan att trimning av lämpliga prover är svår. Eftersom moränleran avsattes direkt ur isen och packades av denna är det möjligt att framställa lämpliga provkroppar genom att på laboratorium packa den omrörda moränleran till naturlig densitet och undersöka dessa provkroppar. Detta förutsätter emellertid att cementering eller andra tideffekter inte ägt rum i den naturliga moränleran.

1.2 Omfattning och syfte

Undersökningarna har omfattat ett studium av olika moränlerors hållfasthets- och bärighetsegenskaper. Försökslokalerna, vilka är belägna i sydvästra Skåne, utgörs av tre platser i Lund och en vardera i Tygelsjö, Malmö, Hyllie och Arlov.

Undersökningen har omfattat fält- och laborieförsök. I fält har vingborrförsök, plattförsök och ringskjuvförsök utförts och i laboratorium enaxliga tryckförsök, odränerade och dränerade triaxialförsök, dränerade direkta skjuvförsök, fallkonförsök samt ödometerförsök. I laboriet har såväl ostörd som packad moränlera undersökts. Den sistnämnda har packats vid olika vattenhalter och till olika densiteter.

I denna avhandling analyseras hur kornfördelning, vattenhalt, portal, spänningsnivå, provvolym och existerande svaghetszoner påverkar brottprocessen och hållfasthetsegenskaperna. Vidare jämförs olika metoder för hållfasthetsbestämning.

Syftet med undersökningen har varit att finna metoder och utvärderingssätt med vilka man korrekt kan bestämma skjuvhållfastheten i jorden med hänsyn till volymberoende, spridning i försöksresultat etc. För praktiskt bruk har enkla, signifikanta samband bestämts mellan hållfasthetsparametrarna och vattenhalt, portal och lerhalt.

Avslutningsvis anges i avhandlingen hur man från fält- eller laborieförsök kan bestämma bärighet och sättningar vid plattgrundläggning.

Följande punkter kommer speciellt att belysas i denna avhandling:

- Brottprocessens beroende av moränlerans vattenhalt (sprött brott vid låg vattenhalt, segt brott vid hög vattenhalt).
- Hållfasthetens volymberoende.
- Hållfasthetsparametrarnas beroende av portalet.
- Hållfasthetsparametrarnas beroende av vattenhalten.
- Jämförelse mellan olika metoder att bestämma hållfastheten samt den statistiska spridningen hos några av metoderna.

- Jämförelse mellan laboratoriepackad och ostörd moränleras hållfasthet.
- Utvärdering av kritiskt grundtryck vid grundläggning på moränlera. Det kritiska grundtryckets volymberoende.
- Lämpliga metoder för beräkning av plattors bärighet och sättning.

2 FASTA LERORS HÅLLFASTHETSEGENSKAPER - LITTERATURGENOMGÅNG

I detta avsnitt görs en litteraturgenomgång över moränlerors och fast sedimenterade lerors hållfasthetsegenskaper. Eftersom brottprocessen hos moränlera beror av vattenmättningsgraden - brottet är sprött vid låg och plastiskt vid hög vattenmättningsgrad - ges först en översikt över brotteorier vid plastiskt och sprött brott. Därefter kopplas hållfasthetsegenskaperna till spänningshistorien. I samband härmed visas hur man i Finland och Danmark uppskattar hållfastheten utgående från portal och kornfördelning. Eftersom moränleror innehåller svaghetszoner belyses i två avsnitt hur dessa svaghetszoner påverkar hållfasthetens anisotropi respektive hur den testade volymens storlek påverkar hållfastheten.

2.1 Brotteorier

2.1.1 Brottyper

Om ett prov belastas treaxligt fås olika typer av kraft-deformationskurvor. Om provet efter uppnådd maximal skjuvspänning flyter under oförändrat spänningstillstånd benämns materialet idealplastiskt. Om provet efter att ha nått toppvärdet faller samman (den mobiliserbara tillskottsspänningen $\sigma_1 - \sigma_3$ går mot noll vid en liten deformationsökning) benämns brottet sprött. Fast lagrade material kan efter brott vara dilatanta och löst lagrade material kontraktanta. Hos leror kan den mobiliserbara skjuvspänningen efter uppnått toppvärde sjunka till ett restvärde, när strukturen brutits ner. För materialen gäller i allmänhet att brottet utbildas långsamt i plastiska och dilatanta material samt snabbt i spröda och kontraktanta material. De senare materialen är farligast, eftersom brottet i dessa oftast sker utan förvarning (exv. kvicklereskred). Brottet i moränlera är oftast sprött vid låga vattenhalter och plastiskt vid höga vattenhalter. Brotteorier för plastiskt och sprött brott presenteras i avsnitt 2.1.2 respektive 2.1.3.

2.1.2 Plastiskt brott

De mest kända plasticitetsteorierna är Trescas flytvillkor uppställt 1864 och von Mises flytvillkor uppställt 1913. von Mises och Trescas flytvillkor förutsätter att materialet är isotropt, dvs. att materialet har samma egenskaper oberoende av huvudspänningarnas riktning. Jordar har ej dessa isotropa egenskaper. Exempelvis förekommer i en ideal friktionsjord endast tryckspänningar.

För jordar används nästan uteslutande Coulombs brottvillkor från 1776. Mohr gav 1882 detta brottvillkor den matematiska formuleringen.

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

Hållfasthetsparametrarna uttrycks i c (kohesion) och ϕ (friktionsvinkel). Senare har brottvillkoret utvidgats att gälla även vid effektivspänningsanalys.

Enligt Mohr-Coulombs brottvillkor bildar skjuvytan vinkeln $(\pi/4 - \phi/2)$ mot största huvudspänningsriktningen. Hållfastheten antas vidare vara direkt proportionell mot normalspänningen mot brottytan. Båda dessa antaganden visar sig ofta vara oriktiga (provkroppen kan få ett utseende likt en tunna och brottenveloppen kan bli konvex uppåt).

Genom att omforma ekv. (1) till ekv. (2) finner man att Mohr-Coulombs brottvillkor ej tar hänsyn till mellersta huvudspänningens storlek

$$\sigma'_1 - \sigma'_3 = (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \phi + 2c \cos \phi \quad (2)$$

Trescas och von Mises brottvillkor har för friktionsmaterial utvidgats så att de tar hänsyn till den mellersta huvudspänningen (enligt Bishop, 1966). I och med att de utvidgade hypoteserna tar hänsyn till mellersta huvudspänningen fås olika deviatorspänning vid brott om försöket utförs som kompressionsförsök ($\sigma'_2 = \sigma'_3$) eller som töjningsförsök ($\sigma'_1 = \sigma'_2$). Trescas och von Mises utvidgade kriterier kan emellertid inte användas på friktions-

jordar med godtycklig lagringstäthet (övre giltighetsgräns $\phi' = 36,9^\circ$, se exv. Bishop, 1966).

Vid experimentella försök har framkommit att Mohr-Coulombs brotteori är det lämpligaste brottkriteriet för jordar, trots de invändningar som ovan gjorts. I den fortsatta framställningen kommer därför denna brotteori att användas vid plastiskt brott.

2.1.3 Sprött brott

Spröda jordars brottmekanism är komplicerad och någon fullständig förklaring synes ej föreligga. De i litteraturen presenterade brotteorierna har gällt andra material än jord (exv. glas, metaller och berg). Som grund för de flesta teorierna ligger Griffiths teori från 1921 och 1924. Griffith uppställde denna efter att ha funnit att de vid försök uppmätta hållfastheterna hos glasplattor var avsevärt mindre än de teoretiskt beräknade.

Griffith har för det tvådimensionella fallet givit ett uttryck för brottillståndet (Mc Clintock & Argon, 1966) under förutsättning att sprickor med samma storlek har sina plan parallella med den obelastade riktningen men i övrigt är godtyckligt fördelade. Brottkriteriet blir vid tvåaxligt spänningstillstånd:

$$\sigma_2 = \sigma_{df} \quad \text{när} \quad \sigma_2 \leq \sigma_1 \leq 3 \left| \sigma_{df} \right| \quad (3a)$$

och

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 8 \sigma_{df} (\sigma_1 + \sigma_2) = 0 \quad \text{när} \quad \sigma_1 > 3 \left| \sigma_{df} \right| \quad (3b)$$

där σ_{df} är materialets draghållfasthet.

Vid treaxligt spänningstillstånd bör enligt Mc Clintock & Argon (1966) den mest kritiskt orienterade sprickan vara parallell med mellersta huvudspänningen, då normalspänningar parallella med sprickplanet knappast orsakar spänningskoncentrationer. Brottet bestäms alltså av största och minsta huvud-

spänningen, varför teorin för treaxligt spänningstillstånd erhålls genom att ersätta σ_2 med σ_3 i ekv. (3).

En brist i Griffiths teori är att den enaxliga tryckhållfastheten förutsätts vara 8 ggr större än draghållfastheten trots att den enligt mätningar kan bli 10 – 20 ggr större. Mc Clintock och Walsh, 1962 (se Mc Clintock & Argon, 1966) modifierade Griffiths teori så att hänsyn tas till att sprickor kan tryckas ihop av pålagda spänningar, varigenom sprickorna överför normal- och tangentialkrafter. Genom modifieringen kan tryckhållfastheten blir mer än 8 ggr större än draghållfastheten, emellertid knappast mer än 10 ggr större eftersom däröver den erforderliga friktionsvinkeln blir orimligt stor.

Griffiths teori och den modifierade Griffith-teorin gäller den initiella brottutbildningen. I ett senare stadium när makrobrottet utbildas är enligt bl.a. Paul & Gangal (1967) Mohr-Coulombs brotteori bäst lämpad. Emellertid bör den modifieras med "tension cut-off" så att normalspänningen mot brottytan alltid är positiv, för att ge friktionsandelen i Mohr-Coulombs uttryck en fysikalisk mening, se FIG. 1.

Mohr-Coulombs teori anger att brottplanet lutar ($\pi/4 - \phi/2$) mot huvudspänningsaxeln, vilket oftast inte är fallet för spröda material. Om stämpelytorna vid ett enaxligt tryckförsök är glatta vrids sprickorna så, att de blir parallella med tryckspänningsriktningen (Gramberg, 1965; Paul & Gangal, 1967 m.fl.). Makrobrottet kan bli ett axiellt splittringsbrott enligt FIG. 2. Enligt Mohr-Coulombs teori motsvarar detta en friktionsvinkel på $\pi/2$, vilket är ett orimligt högt värde.

Om stämpelytorna däremot inte är glatta visade Paul & Gangal (1967) att brottet i stället blir snett. Vid stämplarna utbildas friktion mellan prov och stämpel motsvarande en radiell kompressionsspänning σ_2 . Denna spänning förhindrar förgrening av sprickor över ett stort intervall lutningar. Om σ_2 är numeriskt lika stor som draghållfastheten σ_{df} (σ_2 kan blir många gånger större) konstaterade Paul & Gangal att den centrala delen kan ha undergått

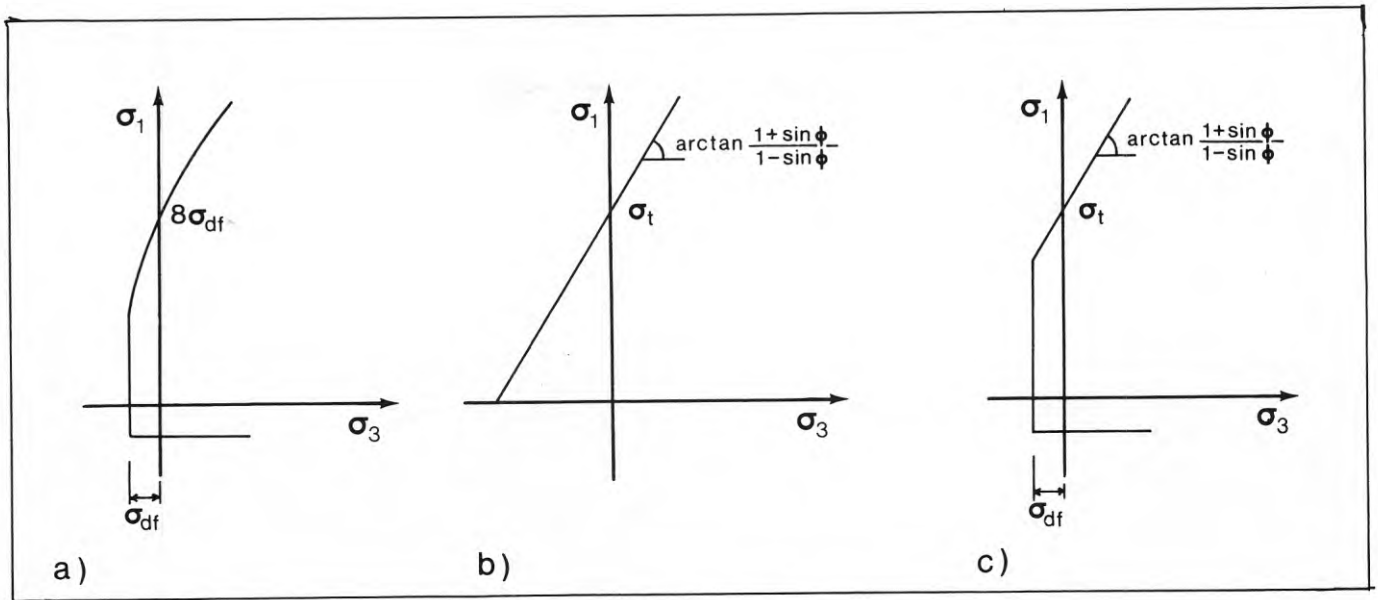


FIG. 1. Brottkriterier enligt a) Griffith, b) Mohr-Coulomb och c) Mohr-Coulomb modifierad med »tension cut-off».

Failure criteria according to a) Griffith, b) Mohr-Coulomb and c) Mohr-Coulomb modified with tension cut-off.

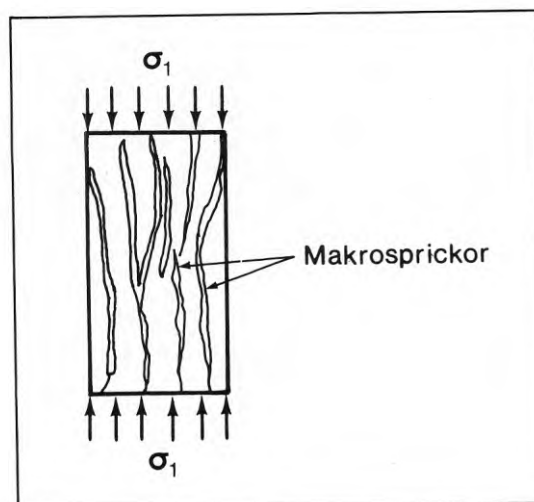


FIG. 2. Axiellt splittringsbrott vid enaxligt tryckförsök (glatta stämplar).

Axial cleavage fracture under unconfined compression test (smooth end plates).

omfattande sprickbildning innan materialet nära ändytorna börjat spricka. Huvuddelen av sprickorna i den zon där $\sigma_2 = 0$ utbildas i provaxelns riktning. På grund av brotthårdnande utbildas inte ett makrobrott. Ytterligare last kan därför påläggas, varvid sprickorna till allt större del blir vertikala i provmitt samtidigt som de tillväxer mot provändarna. När spricktätheten blivit stor, sammanbinds sprickorna till en eller flera makrosprickor i närheten av provcentrum. Det slutliga brottet utgörs av makrosprickor, vilka avskiljer två relativt opåverkade koner nära cylinderns ändytor enligt FIG. 3b. På grund av smärre randeffekter kan makrobrottet träffa ändytornas ränder och därvid orsaka ett snett brott enligt FIG. 3c. Båda dessa typer torde förekomma lika ofta och ibland utbildas båda typerna samtidigt enligt FIG. 3d.

Enligt Gramberg (1965) orsakas axiellt splittringsbrott av inducerade dragspänningar av samma typ som vid det brasilianska spräckprovet. Grambergs förklaring skall här återges utgående från ett element belastat med huvudspänningarna σ_1 och σ_2 enligt FIG. 4a.

I elementet finns ett antal sprickor och oregelbundenheter. Den farligast orienterade av dessa representeras här av en cirkel (en por) medan materialet runt om antas vara kontinuerligt. Enligt spänningsteorin (jfr hålrum i elastiskt medium) uppkommer en indirekt (mikro-)dragspänning σ_{di} vinkelrätt mot σ_1 - riktningen vid poren, förutsatt att förhållandet σ_1/σ_2 är tillräckligt stort.

Den inducerade dragspänningen σ_{di} kan bli lika stor som den yttre belastningen σ_1 , om σ_2 är förhållandevis liten. Porytan är inte alltid jämn utan kan innehålla sprickor. En spricka ökar den inducerade dragspänningen σ_{di} till σ_{dic} på grund av sprickeffekten, FIG. 4b. Vid en ökning av σ_1 kan σ_{dic} nå gränsen för de teoretiska kohesionskrafterna σ_{dh} och brott utbildas parallellt med största huvudspänningsriktningen. När väl brottet initierats utbreder det sig lättare eftersom spricktoppen representerar den skarpast möjliga sprickan. Makrobrottet utgörs på så sätt av en axiell spricka.

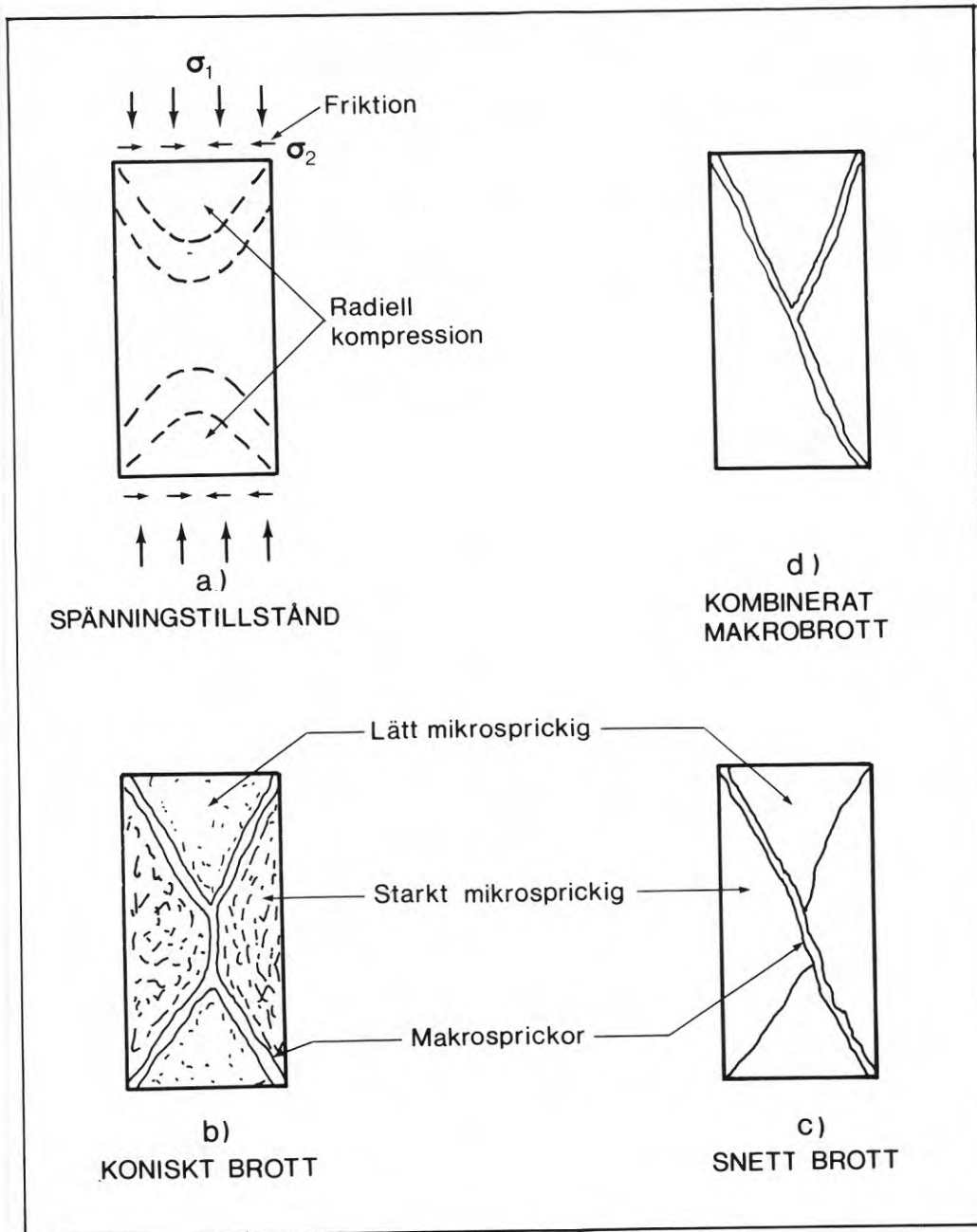


FIG. 3. Provkroppar enaxligt tryckta mellan skrovliga stämplor (Paul & Gangal, 1967).
 Specimens subject to unconfined compression between rough plates (Paul & Gangal, 1967).

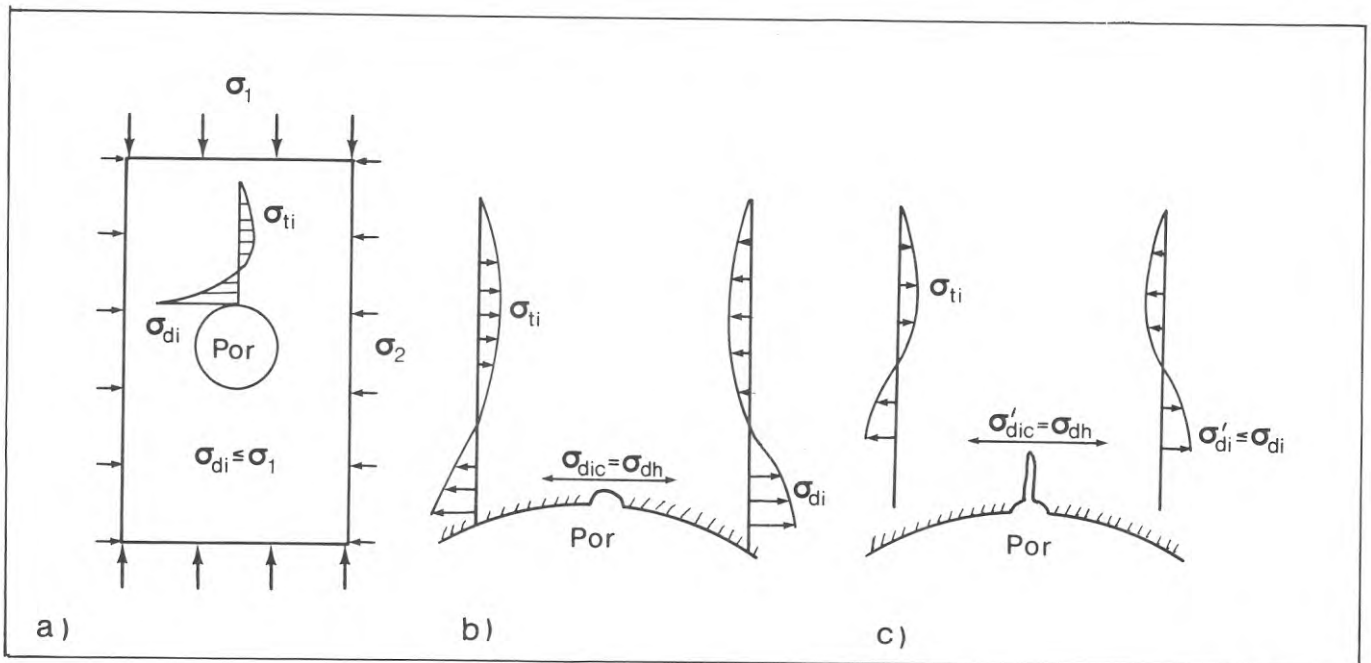


FIG. 4. Uppkomst av axiellt splittringsbrott enligt Gramberg (1965). a) Tryckspänningen σ_1 inducerar dragspänningen σ_{di} vid en por, b) Spänningskoncentration vid en spricka i poren, c) Ytterligare spänningskoncentration vid toppen av en initiell brottspricka.

Axial cleavage according to Gramberg (1965). a) The compressive stress σ_1 induces a tensile stress σ_{di} at the boundary of a pore, b) The tensile stress is concentrated at a crack in the pore, c) Further stress concentration at the tip of the initial fracture.

Grambergs teori gäller spröda material. Om materialet är segt kan man anta att σ_{di} eller σ_{dic} orsakar materialflytning vid spricktoppen, vilket förhindrar att makrobrott utbildas.

Gramberg fann att dragspänningar endast kan induceras vinkelrätt mot σ_1 om $\sigma_2 < 0,2 \sigma_1$ à $0,3 \sigma_1$. Trollope (1967) har liksom Gramberg (1965) visat att vid små allsidiga tryck utbildas axiellt splittringsbrott, medan när det allsidiga trycket är stort utbildas plastiskt makrobrott.

Sammanfattningsvis finner man att Mohr-Coulombs teori är användbar för plastiska och spröda leror för att bestämma spänningstillståndet vid det slutliga brottet. Om förhållandet σ_1/σ_3 är stort bör vid försök på spröda material Griffiths teori användas för att förklara det initiella brottet - uppkomsten av axiella sprickor.

2.2 Hållfasthetens beroende av tidigare spänningstillstånd

Moränlerornas bildningsätt innebär att de är heterogena och ofullständigt sorterade med förekomst av linser och korn av olika ursprung och inbakade äldre lersediment.

Moränlerorna konsoliderades under högt normaltryck och i många fall även under höga tangentialkrafter. Dessa krafter har medfört att brottplan och kontinuerliga brottzoner uppkommit. Brottmönstren kan i många fall tänkas följa Mohr-Coulombs teori innebärande att brottplanen lutar kraftigt och är svagt krökta.

I vissa områden har isens rörelse varit fram- och återgående, vilket medfört att moränlerans struktur blivit mycket komplicerad.

Stenar och block i moränleran kan ha blivit orienterade i en viss riktning av överlasten och av fritt vattenflöde i isen. En sådan orientering har iakttagits av Gustavsson & Stjernkvist (1966) hos en moränlera i Lund.

Även mikrostrukturellt finns en skillnad mellan lösa, sedimenterade, siliga lerors och moränlerors uppbyggnad. Enligt Pusch (1973) är strukturen hos en moränlera från Hyllie mycket tätare och innehåller domäner (grupper av parallella lerpartiklar). De väl utvecklade domänerna har bildats på grund av stora inre krafter (orsakade av högt konsolideringstryck). Emellertid visade Puschs undersökningar att moränleran även innehåller små lokala zoner med öppna, flockulerade partiklar.

Man förstår av det nu sagda, att moränlerans hållfasthets- och deformations-egenskaper är anisotropa samt beroende av den testade jordvolymens storlek.

I detta avsnitt behandlas hållfasthetsegenskapernas beroende av förkonsolideringstrycket - uttryckt i form av moränlerans portal.

Utgående från fastheten - liksom bildnings sättet - benämner man moränlera yt- eller bottenmorän. Enligt Helenelund (1970) kan moränen indelas utgående från torrdensiteten, i mycket tät ($\rho_d > 2,1 \text{ t/m}^3$), tät ($1,9-2,1 \text{ t/m}^3$), medeltät ($1,7-1,9 \text{ t/m}^3$), lös ($1,5-1,7 \text{ t/m}^3$) och mycket lös ($< 1,5 \text{ t/m}^3$) morän.

Jacobsen (1970) har bestämt empiriska samband mellan de danska moränlerornas hållfasthet och portal e_k ¹⁾. I FIG. 5a visas den odränerade skjuvhållfasthetens beroende av portalet. Jacobsen fann att om vingborrhållfastheten reducerades till 90 % av uppmätt värde överensstämde denna hållfasthet med hållfastheten uppmätt vid enaxliga tryckförsök

Den i FIG 5a inlagda kurvan har funktionen

$$\tau_{fu} = 10 \exp(0,77 e_k^{-1,2}) \quad \text{kPa} \quad (4)$$

De dränerade hållfasthetsparametrarna har av Jacobsen bestämts med plattförsök och triaxialförsök. I FIG 5b och c redovisas kohesionens och friktionsvinkelns beroende av portalet. Som lämpliga samband anger Jacobsen

$$c \approx 430 \exp(-7,3 e_k) \quad \text{kPa} \quad (5a)$$

$$\phi \approx 35,3 - 9 e_k \quad \text{grader} \quad (5b)$$

vilka motsvarar resultaten från triaxialförsöken i den av Jacobsen konstruerade triaxialapparaten med provhöjden lika stor som provdiametern. Orsak till spridningen i resultat mellan olika metoder anser Jacobsen främst vara olika spänningsnivå vid fält- och laboratorieförsök liksom av progressivt brott vid de dränerade plattförsöken.

Helenelund (1964, 1970) har angett hur friktionsvinkeln kan uppskattas utgående från torrdensiteten, TAB. 1. Värdena har bestämts med ringskjuvförsök.

1) Jacobsen beräknade portalet utgående från moränlerans skrymdensitet bestämd genom att sänka ned provet i trikloretylen och mäta reduktionen i tyngd. Jacobsen benämner detta portal e_k .

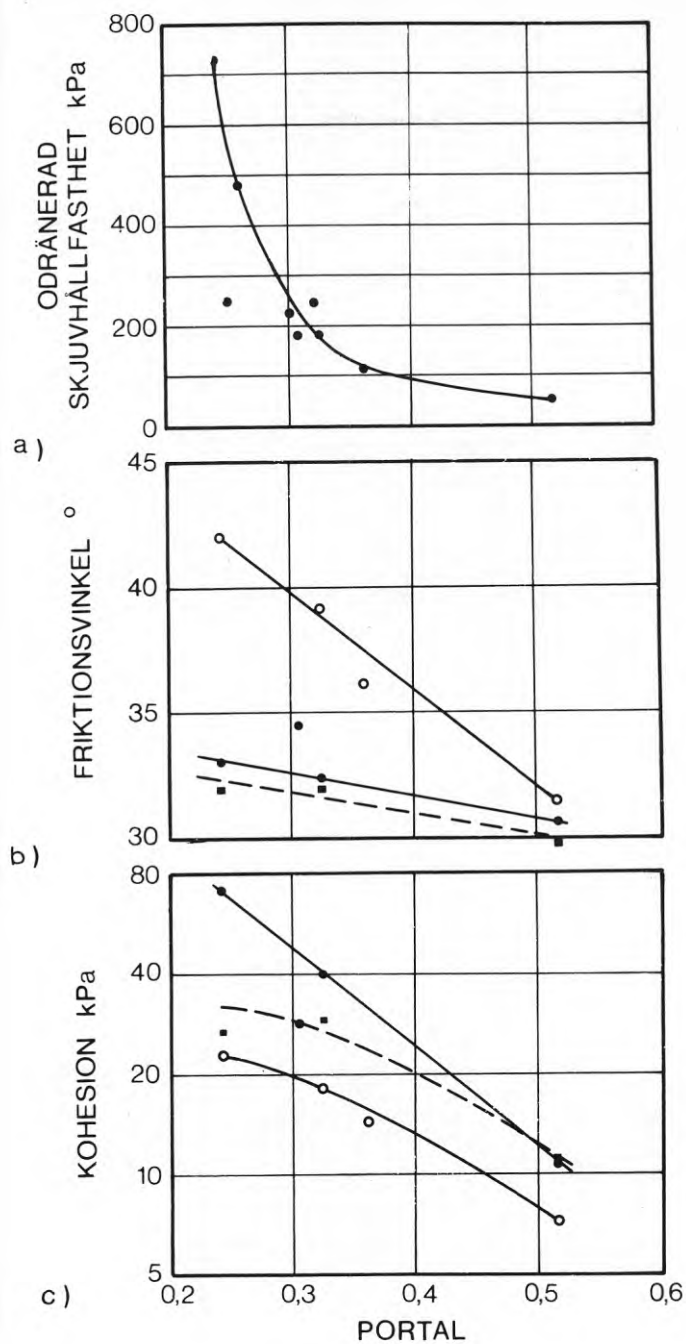


FIG .5a) Odränerade försök
Undrained tests .

FIG .5b) och 5c)
Dränerade försök .
● triaxialförsök (h = d)
■ triaxialförsök (h = 2d)
○ plattförsök

Drained tests .
● triaxial test (h = d)
■ triaxial test (h = 2d)
○ plate load test

FIG. 5. Den odränerade hållfasthetens och de dränerade hållfasthetsparametrarnas beroende av por-
talet hos danska moränleror. (Efter Jacobsen, 1970.)

The undrained shear strength and the drained shear strength parameters versus the void ratio in
Danish boulder clays. (From Jacobsen, 1970.)

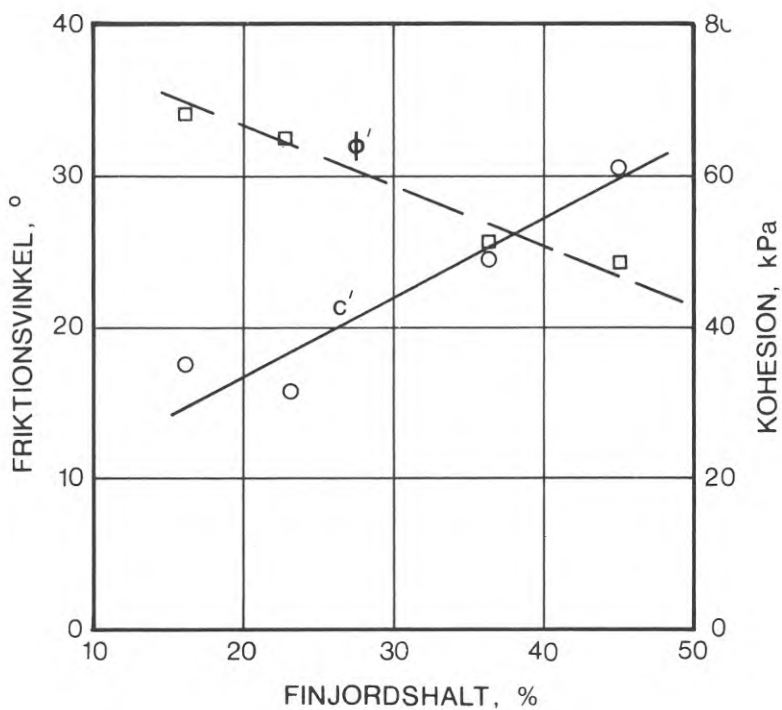


FIG. 6. Kohesionens och friktionsvinkeln beroende av finjordshalten enligt Helenelund (1964).
 ○, kohesion; □, friktionsvinkel.

The cohesion and angle of friction versus the fine grain (silt and clay) content (Helenelund, 1964).
 ○, cohesion; □, angle of friction.

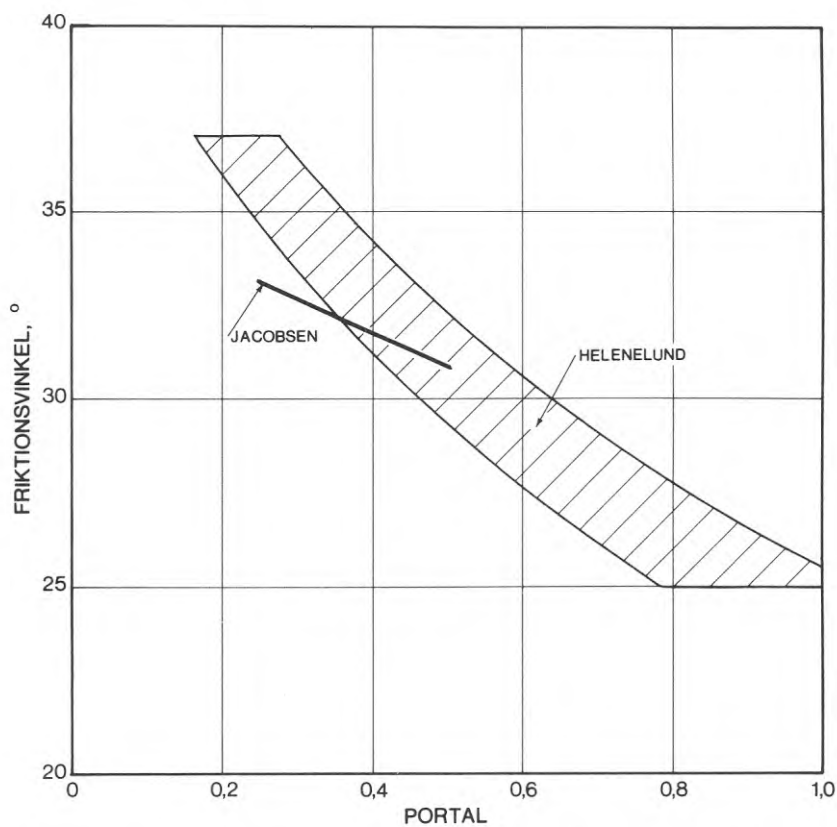


FIG. 7. Approximativ uppskattning av friktionsvinkeln utgående från portalet enligt Jacobsen (1970) och Helenelund (1964). I sistnämnda fallet har ρ_s antagits vara $2,67 \text{ t/m}^3$.

Approximative estimation of the angle of friction based on the void ratio according to Jacobsen (1970) and Helenelund (1964). In the latter ρ_s is assumed to be 2.67 t/m^3 .

TAB 1. Approximativ uppskattning av friktionsvinkeln hos siltig morän-
lera utgående från torrdensiteten enligt Helenelund (1964).

Torrdensitet, t/m^3	Friktionsvinkel, grader
1,3 - 1,5	25
1,5 - 1,7	28
1,7 - 1,9	31
1,9 - 2,1	34
2,1 - 2,3	37

Helenelund har funnit att friktionsvinkeln avtar och kohesionen ökar med ökande finjordshalt enligt FIG. 6.

För att få en jämförelse mellan Jacobsens och Helenelunds samband för friktionsvinkeln kan torrdensiteten i TAB. 1 omformas till ett portal förut-
satt att kompaktdensiteten är känd. Om ρ_s sätts till $2,67 t/m^3$ blir sam-
bandet mellan ϕ' och e enligt vad FIG. 7 visar.

Om en exaktare bestämning önskas av friktionsvinkeln liksom om kohesionen
önskas bestämd bör detta enligt Helenelund lämpligen ske i fält med ring-
skjuvförsök.

Avslutningsvis kan man konstatera att eftersom moränlerorna blivit förbe-
lastade av tidigare rådande istryck är de ofta fasta. För finska och danska
moränleror finns empiriska samband uppställda mellan moränleras håll-
fasthetsparametrar och portal.

2.3 Inhomogeniteters betydelse för hållfasthetsanisotropi

Normalkonsoliderade lerors hållfasthetsanisotropi har både teoretiskt och
experimentellt studerats av åtskilliga forskare. För överkonsoliderade leror
blir ett sådant studium mycket svårare då inverkan fås förutom av huvud-

spänningarnas och deformationernas storlek även av svaghetszonernas fördelning och frekvens samt för moränlerorna även den heterogena kornfördelningen i olika punkter.

En av de få undersökningar som behandlat svaghetsplanens inverkan på hållfasthetsegenskaperna hos moränlera är utförd av Kaczyński & Wysokiński (1970). Den undersökta moränleran är grå och starkt överkonsoliderad samt består av ett välblandat lerigt, sandigt material med förekomst av enstaka stenar. Inga större störningar av glaciotektonik har observerats i lerorna utan endast breda bälten av horisontell veckning. Moränlerans horisont är genomskuren av branta sprickiga ytor. Sprickytorernas orientering framgår av FIG. 8.

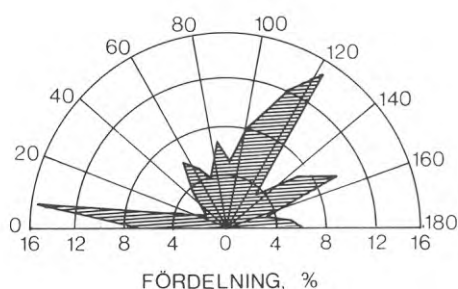


FIG. 8. Sprickytorernas orientering i en moränlera från Plock enligt Kaczyński & Wysokiński (1970).
The orientation of the fissures in a boulder clay from Plock, Poland (Kaczyński & Wysokiński, 1970).

Huvudorsaken till sprickytorna skulle vara spänningarna av istäcket samt till en mindre del frysning av grundvattnet under glaciationen. Senare uttorkning kan även, enligt Kaczyński & Wysokiński (1970), ha orsakat sprickor. Moränlerans geotekniska data är $\rho = 2,12 \text{ t/m}^3$, $\rho_s = 2,66 \text{ t/m}^3$, lerhalt = 10,5 - 12,5 % (egentligen borde således materialet benämnas morän men benämns i artikeln boulder clay), $e_o = 0,43$, $w_L = 22 \%$ och $w_p = 11 \%$. Svaghetsplanens betydelse undersöktes genom att utföra triaxialförsök på provkroppar orienterade så att de naturliga svaghetsplanen bildade $30-45^\circ$ mot största huvudspänningsriktningen. Triaxialförsök utfördes även på provkroppar utan synbara svaghetsplan. Svaghetsplanens orientering inverkar markant på hållfastheten och brottdeformationen. Hållfastheten blev avsevärt lägre hos den sprickiga moränleran, när svaghetsplanen var kritiskt

orienterade i förhållande till spänningsfältet, än hos den homogena moränleran. Svaghetsplan orienterade mellan 0 och 20° mot största huvudspänningsriktningen påverkar inte hållfastheten enligt Kaczyński & Wysokiński. Undersökningen visade att brottdeformationen avtog med minskande hållfasthet.

Vid Kaczyński & Wysokińsis försök framkom att svaghetsplanens betydelse för hållfastheten var starkt beroende av moränlerans konsistens. Om moränlerans vattenhalt var större än flytgränsen orsakade svaghetsplanen ingen hållfasthetsreduktion. Markant påverkan av svaghetsplanen erhöles endast när vattenhalten understeg plasticitetsgränsen.

Någon förklaring finns inte till hur man generellt skall ta hänsyn till sprickornas inverkan på hållfastheten. Enligt Marsland (1972) inverkar inte enbart sprickornas orientering utan bl.a. även sprickornas form och råhet. I FIG. 9 visas en del typiska resultat för en sprickig Londonlera enligt triaxialförsök utförda av Marsland. Försöken visar tydligt sprickmönstrens inverkan på hållfasthets-deformationskurvorna.

Den lägsta hållfastheten uppmättes hos prover när en spricka hade samma lutning som det potentiella brottplanet. Medelhållfastheter uppmättes hos prover som antingen innehöll råa oregelbundna sprickor eller sprickor med större eller mindre lutning än det potentiella brottplanet. Den största hållfastheten uppmättes hos prover vilka antingen saknade synbara sprickor eller innehöll sprickor som var parallella med eller vinkelräta mot största huvudspänningsriktningen.

En ansats att förklara sprickornas inverkan kan göras genom att betrakta jorden som ett homogent medium med ett svaghetsplan. För detta material är i FIG. 10 brottenveloperna inlagda dels för det sammansatta materialet (PQ) och dels för svaghetsplanet (XY).

Antag att provkroppen är orienterad så att svaghetsplanet bildar vinkeln i mot basplanet. Vid något stadium under skjuvningen skär Mohrs cirkel (ABCD) brottenvelopen XY i B och C. Om därvid $\beta_1 \leq i \leq \beta_2$ kommer brottet att utbildas längs svaghetsplanet. Om $i < \beta_1$ eller $i > \beta_2$ utbild-

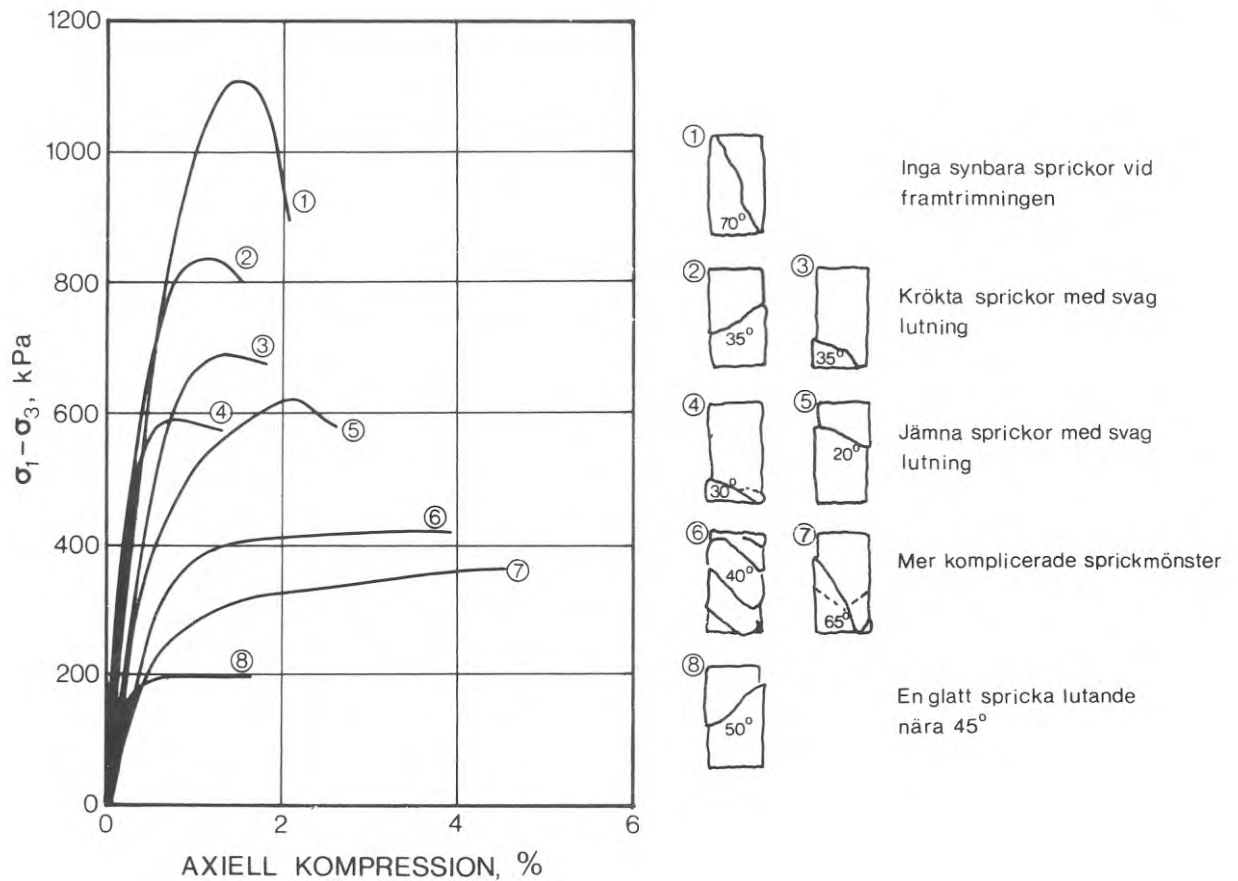


FIG. 9. Spänning-deformationskurvornas beroende av sprickmönstret för en sprickig Londonlera (Marsland, 1972).

Stress-strain curves for different types of fissure systems in a fissured London clay (Marsland, 1972).

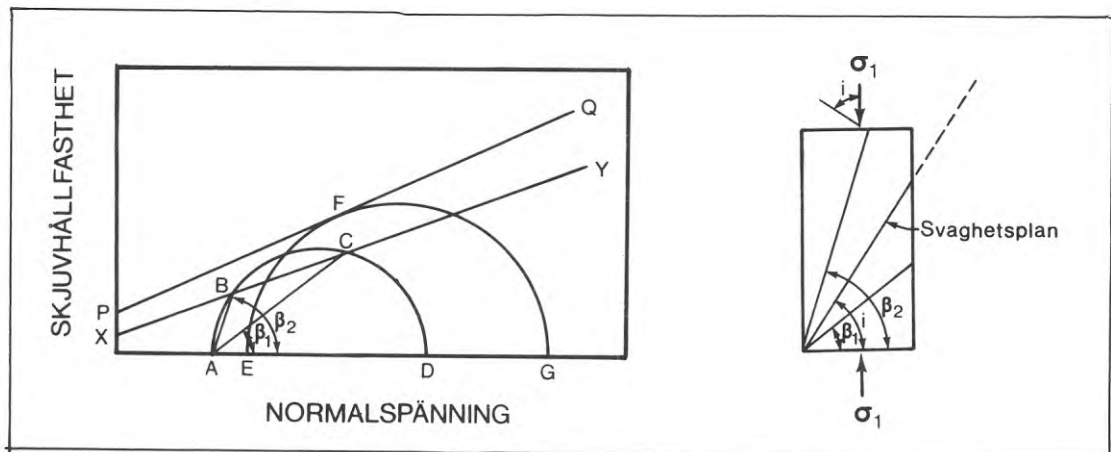


FIG. 10. Brotthypotes för skiktade material enligt Jaeger (1962). PQ, brottenveloppen för det sammansatta materialet när brottplanet skär över skikten; XY, brottenveloppen för ett svaghetsplan.

Failure hypothesis for stratified clays according to Jaeger (1962). PQ, the failure envelope for the composite material when shear takes place across the individual layers; XY, the envelope for a plane of weakness.

das inget brott utan σ_1 kan ökas ytterligare. Brott kommer i det senare fallet att utbildas först när spänningscirkeln tangerar PQ i F, resulterande i en brottyta som skär över skiktgränserna. Man kan härav dra slutsatsen att deformationen ökar, när spänningstillståndet ändras från ABCD till EFG. Detta innebär att hållfastheten hos material med svaghetszoner ökar med ökande brottdeformation.

Denna brottypotes uppställd av Jaeger, 1962¹⁾ tycks stämma med försöken på moränlera utförda av Kaczyński & Wysokinski, 1970 och med försök på fasta, sprickiga, sedimenterade leror (se exv. Lo & Milligan, 1967 och Ward, Marsland & Samuels, 1965). Lo & Milligans försök visar tydligt skillnaden mellan en horisontalskiktad och en homogen, överkonsoliderad leras egenskaper. Anisotropin undersöktes i båda fallen genom att enaxligt trycka trimmade provkroppar med huvudspänningsriktningen bildande olika vinklar i mot den vertikala riktningen i fält. FIG. 11 redovisar försöksresultaten.

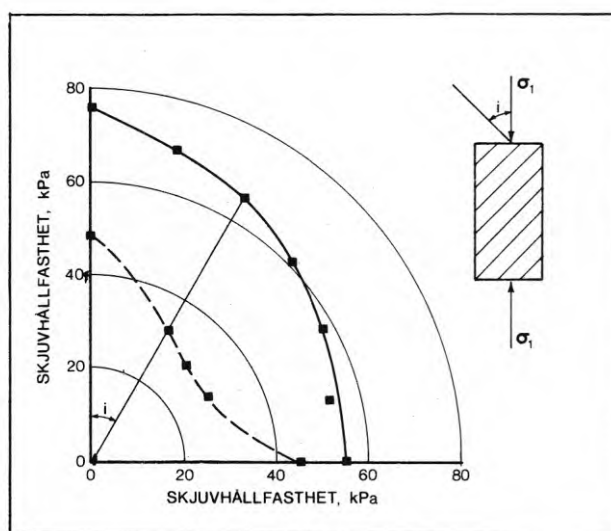


FIG. 11. Skjuvhållfasthetens beroende av belastningsriktningen vid enaxligt tryckförsök. ———, motsvarar en homogen, överkonsoliderad lera; - - -, en skiktad, överkonsoliderad lera. (Efter Lo & Milligan, 1967.)

Variation of shear strength with load inclination under unconfined compression test. ———, represents a homogeneous over-consolidated clay; - - -, a stratified, over-consolidated clay. (After Lo & Milligan, 1967.)

1) Se Lo & Milligan (1967).

Den homogena lerans hållfasthetsfördelning förklaras av anisotrop konsolidering. Denna hållfasthetsfördelning är typisk även för anisotropa, normalkonsoliderade leror. För den homogena leran avtog brottdeformationen med ökande hållfasthet. Den skiktade lerans hållfasthetsfördelning överensstämmer med Kaczyński & Wysokiński (1970) försöksresultat. Brottdeformationen avtog med minskande hållfasthet i enlighet med Jaegers hypotes (1962).

Förutom svaghetsplanens orientering tycks också storleken hos normaltrycket mot den potentiella glidyta påverka anisotropin. Patton (1966) studerade normaltryckets inverkan genom att utföra direkta skjuvförsök på plastprover, där den potentiella brottytan hade ett antal godtyckliga oregelbundenheter ("tänder"). Försöksvariabler var "tändernas" lutning, antal och hållfasthet. Identiska prover skjuvades vid varierande normaltryck. Följande slutsatser kunde dras: 1. brottenveloppen för prov med oregelbundna brottytor blir krökt, 2. förändring i brottenveloppens lutning återspeglar förändring i brotttyp och 3. förändring av brottprocessen beror av de fysikaliska egenskaperna hos oregelbundenheterna längs brottytan. Den erhållna krökta brottenveloppen kunde ersättas med två raka envelopper OA och AB enligt FIG. 12.

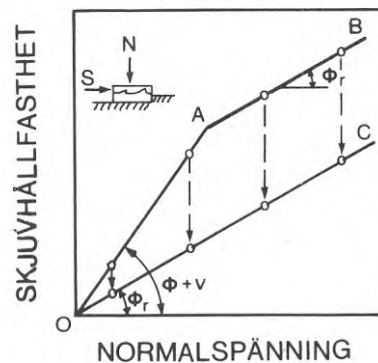


FIG. 12. Brottenveloppen för en oregelbunden yta. OC, resthållfastheten (Patton, 1966). Failure envelope for irregularly inclined surfaces. OC, the residual strength (Patton, 1966).

Brottenveloppen OA kan tecknas

$$\tau = \sigma \tan(\phi + v) \quad (6)$$

där v är vinkeln mellan "tanden" och glidyta och ϕ friktionsvinkeln hos

en opolerad plan glidyta i det intakta plastmaterialet. För praktiskt bruk rekommenderar Patton att ϕ sättes lika med restfriktionsvinkeln ϕ_r . Vid låga normaltryck glider den ena plastdelens ojämnheter över den andra delens samtidigt med en dilatation vinkelrätt mot skjuvplanet, vilket resulterar i brottenveloppen OA. Vid höga normaltryck skär brottplanet utan dilatation genom "tändernas" basytor och enveloppen AB erhålls. Brottenveloppen OAB är därför associerad med två olika brottyper.

Pattons försök har verifierats för berg av bl.a. Hendron (1968).

Ringskjuvförsök utförda av Helenelund (1964) på en siltig, lerig morän antyder att de slutsatser Patton drog är relevanta även för morän. Eftersom toppvärdet blir allt mindre uttalat med ökande normalspänning (FIG. 13) avtar även dilatationen med ökande normaltryck. Att toppvärdet försvagades vid ökande normalspänning kan till en del även bero av en ökande nedkrossning av konglomeraten. Brottenveloppen blev i motsats till vid Pattons försök rak med $c' = 38$ kPa och $\phi' = 36,5^\circ$.

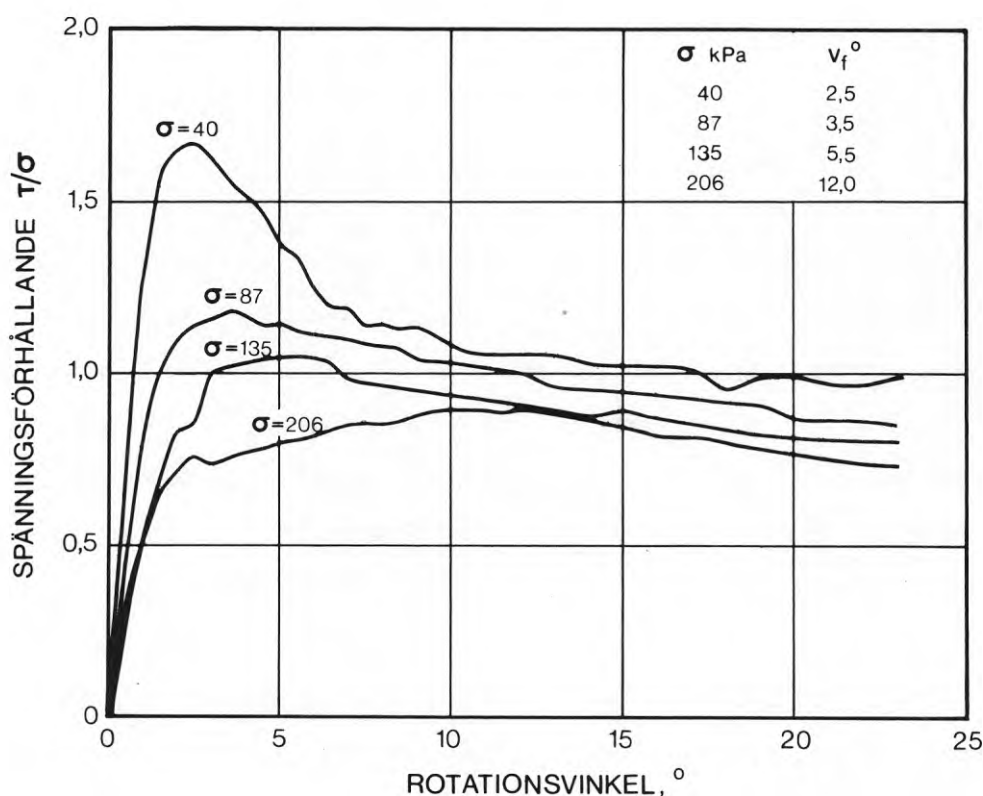


FIG. 13. Kraft-deformationskurvor från ringskjuvförsök på en siltig, lerig morän i Lanttasari (Helenelund, 1964).

Stress-deformation curves from ring shear tests on a silty, clayey moraine from Lanttasari (Helenelund, 1964).

En fast sprickig lera kan ofta betraktas som ett system av tätt lagrade block. Brottet utbildas, liksom vid Pattons försök, antingen genom att blocken glider över varandra eller som skjuvbrott genom hela massan. Systemets hållfasthet beror då av intaktdelarnas hållfasthet och av förhållandet mellan sprickavstånd och provstorlek. Uttryck finns angivna hur man kan beräkna den mobiliserbara skjuvspänningen med hänsyn tagen till nämnda faktorer, se Sangrey & Paul (1971).

Avslutningsvis kan man konstatera att existerande svaghetszoner i en moränlera medför att hållfastheten blir anisotrop. Såväl hållfastheten som brottdeformationen blir minst, när svaghetsplanens orientering sammanfaller med den potentiella brottytan. Moränlerans konsistens tycks påverka anisotropins storlek. När vattenhalten överstiger flytgränsen tycks anisotropin bli försumbar. Även normaltryckets storlek mot glidytan påverkar anisotropins storlek. Med ökande normaltryck avtar anisotropin. Ovan gjorda slutsatser har främst verifierats för det odränerade fallet. Motsvarande undersökningar tycks inte ha utförts för det dränerade fallet.

2.4 Inhomogenitetens betydelse för hållfasthetens volymberoende

Man har sedan lång tid känt till att hållfasthetsegenskaperna hos spröda material som vissa berg, betong och glas är beroende av provvolymens storlek. Detta beroende orsakas av en heterogen struktur och förekomst av svaghetszoner. Den mest kända teorin för bestämning av hållfasthetens beroende av influerad provvolym uppställdes av Weibull, 1939. Hans teori syftade primärt inte till att finna ett uttryck för volymberoendet utan till att studera den statistiska spridningen i försöksresultat.

I föregående avsnitt 2.3 analyserades svaghetsplanens inverkan på hållfasthetsegenskaperna. I detta avsnitt kommer olika ansatser att analyseras som anger hur man utgående från ett litet jordprovs hållfasthet skall bestämma hållfastheten i en stor jordvolym.

Enligt Lo (1970) åskådliggörs hållfasthetens storleksberoende hos en fast, sprickig lera enligt FIG. 14

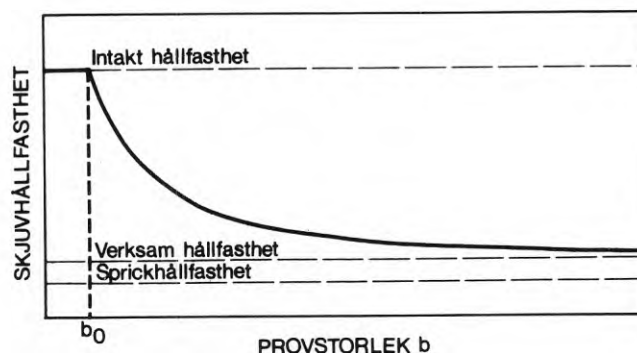


FIG. 14. Skjuvhållfastheten hos en fast sprickig lera som funktion av provstorleken (Lo, 1970).
Diagram of the shear strength-sample size relationship for a fissured clay (Lo, 1970).

Enligt Lo har hållfastheten, oberoende av mätmetod, en övre begränsning svarande mot den intakta lerans hållfasthet och en nedre begränsning svarande mot hållfastheten längs en spricka. I FIG. 14 är b_0 det minsta avståndet mellan två sprickor. När den influerade provvolymen har större utsträckning än b_0 innehåller materialet sprickor och får därmed en lägre hållfasthet än den intakta leran. När provvolymen ökar, ökar dessutom sannolikheten för förekomst av fler sprickor liksom sannolikheten för att dessa har stor utbredning och kritisk orientering. Hållfastheten avtar därför med ökande provvolym mot ett asymptotvärde motsvarande hållfastheten i en stor jordvolym (benämns här verksam hållfasthet). Sannolikheten för att sprickorna är orienterade så att de bildar ett sammanhängande svaghetsplan är mycket liten, varför den verksamma hållfastheten kommer att vara större än sprickhållfastheten. I litteraturen finns dock några exempel på att den verksamma hållfastheten och sprickhållfastheten varit densamma, se exv. Skempton (1964).

För att beskriva hållfasthetens volymlberoende har ett flertal teorier uppställts. Weibulls teori (1939) baserades på "svagaste-länken teorin" grundad framför allt på drag- och böj försök på olika material, såsom keramik,

cement och bomullsfibrer. Sannolikheten S för att brott skulle utbildas tecknade Weibull under förutsättning att arean är konstant och provlängden varierar

$$S = 1 - e^{-\left(\sigma/\sigma_i\right)^m \cdot V} \quad (7)$$

där σ är den exaxliga dragspänningen, σ_i ett jämförelsetryck, m en materialkonstant och V provvolymen. Om sannolikheten för brott skall vara densamma för två provkroppar med lika area men olika längd (provvolym V_1 resp. V_2) blir brottspänningen σ_1 respektive σ_2 enligt

$$\lg \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{1}{m} \cdot \lg \frac{V_2}{V_1} \quad (8)$$

Ekv. (8) har den form som brukar betecknas Weibulls teori. För att använda denna krävs således att konstanten m bestäms. Weibulls teori avsåg drag- och böjförök men har senare även använts för tryckförök. En uppenbar svaghet i teorin är att hållfastheten antas gå mot noll när volymen ökar obegränsat. Detta medför att teorin är olämplig för bestämning av den i jord verksamma hållfastheten.

Lo (1970) har givit ett uttryck där skjuvhållfasthetens storleksberoende baseras på ytan hos brottplanet, eftersom brottet mestadels utbildas i en glidzon medan omgivande jord är överksam. En fördel med att basera storleksberoendet på glidytans storlek är att man kan jämföra olika försökstyper, t.ex. direkta skjuvförök och triaxialförök. Los uttryck är åskådliggjort i FIG. 14 och kan tecknas

$$\tau_A = \tau_m + (\tau_o - \tau_m) \cdot e^{-\alpha(A-A_o)^\beta} \quad A > A_o \quad (9)$$

där A är ytan av det potentiella brottplanet, A_o ytan av det största potentiella brottplan hos vilket intakthållfastheten kan uppmätas (ytan är fri från sprickor), τ_o och τ_m är den intakta lerans respektive den stora jordvolymens ($A \rightarrow \infty$) hållfasthet samt τ_A är hållfastheten hos ett brottplan med storleken A . I ekvationen är α och β positiva materialkonstanter.

Vid bestämning av parametrarna i ekv. (9) kan man enligt Lo bestämma intakthållfastheten med vingborrförsök, eftersom den cylindriska brottytan är tvångsstyrd och sprickmönstret i allmänhet är plant. I övrigt kan kurvan bestämmas genom att utföra tre tryckförsök på provkroppar med varierande storlek varvid α , β och τ_m blir kända. Lo antar således att spridningen vid en viss skjuvareal är försumbar, vilket är förvånansvärt (jfr exv. FIG. 9). Lo har verifierat sitt uttryck genom att jämföra resultat från triaxialförsök, direkta skjuvförsök och stora fältskjuvboxförsök på olika leror. Resultaten från försök på en sprickig fast lera från Nanticoke, Kanada visas i FIG. 15.

I FIG. 15 är även resultaten från fältvingborrförsök ($d = 37$ mm, $h = 75$ mm) inlagda, likaså hållfastheten längs ett sprickplan enligt konsoliderade, odränerade triaxialförsök. Liksom vid Marslands försök på en Londonlera, se FIG. 9, erhöles hos intakta prov ett mycket väl uttalat toppvärde hos kraftdeformationskurvan, medan hållfastheten längs ett sprickplan inte uppvisade detta toppvärde. Försöksresultaten i FIG. 15 ansluter väl till Los samband. För samma lera tagen på ett mindre djup erhöles dock vid triaxialförsök på små provkroppar ibland en större hållfasthet än intakthållfastheten bestämd med vingborrförsök. (Redan här kan nämnas att mina undersökningar visat att vingborrförsöken inte ger något entydigt mått på intakthållfastheten, eftersom även den vingborrade hållfastheten tycks vara storleksberoende.)

Försöksresultaten i FIG. 15 redovisas i FIG. 16 enligt Weibulls framställning. Brottytans storlek har ersatts med provvolymen för triaxialförsöken. För de stora direkta skjuvförsöken ($A = 0,372$ m²) var det svårt att bestämma den influerade volymen. Lo valde provhöjden lika med gapet (25 mm) mellan boxhalvorna.

Man finner att Weibulls teori stämmer väl med resultaten från triaxialförsöken, men att hållfastheten från de direkta skjuvförsöken överskattas ca 50 %. Man måste emellertid beakta osäkerheten vid bedömning av influerad jordvolym vid direkta skjuvförsök. Med hänsyn till den stora skjuvytan

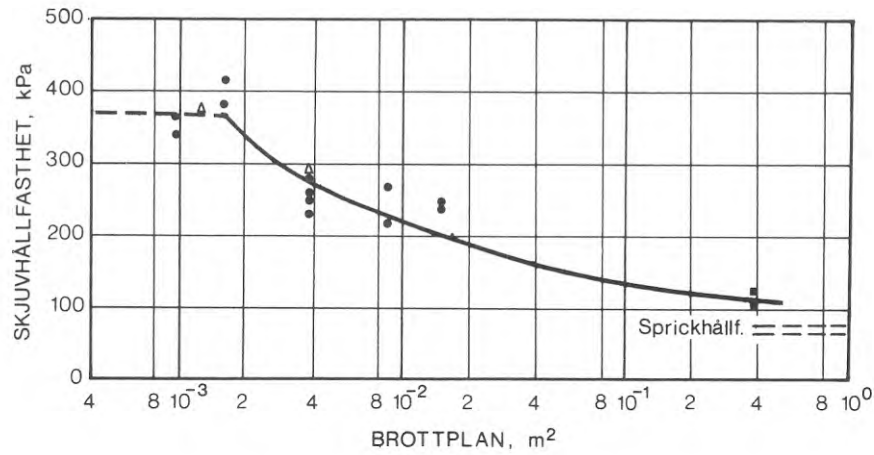


FIG. 15. Hållfasthetens storleksberoende hos en fast, sprickig lera från Nanticoke. ●, okonsoliderat odränerat triaxialförsök; ■, in situ skjuvboxförsök; ▲, laboratorieskjuvboxförsök; △, fältvingborrförsök (Lo, 1970).

Diagram of the shear strength-sample size relationship for a stiff, fissured clay from Nanticoke. ●, unconsolidated undrained triaxial test; ■, in situ shear box test; ▲, laboratory shear box test; △, field vane test (Lo, 1970).

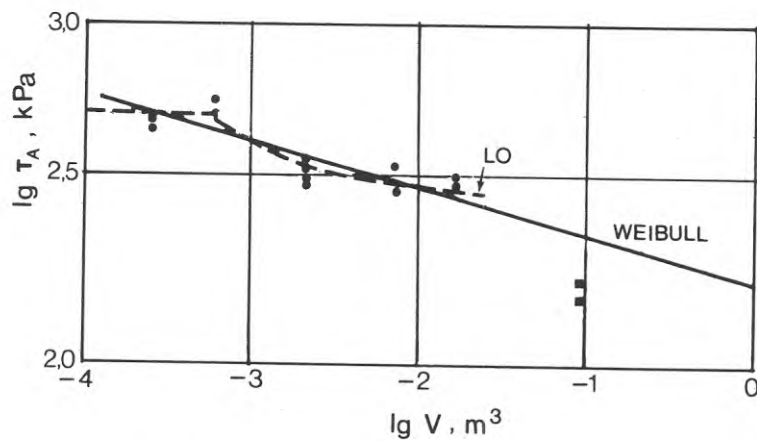


FIG. 16. Jämförelse mellan Weibulls teori och försöksdata enligt FIG. 15 (Lo, 1970).
Comparison of Weibull's theory with the test results according to FIG. 15 (Lo, 1970).

är enligt min mening säkerligen en större volym influerad än den av Lo antagna, eftersom det primära brottet inte följer spaltorienteringen.

En del av de data som återfinns i FIG. 15 hämtade Lo (1970) från en artikel av Lo, Adams & Seychuk (1969). I den sistnämnda artikeln fanns även resultat från plattförsök ($d = 0,3$ m) medtagna. Hållfastheterna utvärderade från plattförsöken var 1,4 - 2,3 ggr större än hållfastheten bestämd med direkta skjuvförsök (efter korrektion för anisotropi). Skillnaden i hållfasthet förklarades med skillnad i brottutbildning. Vid plattförsöken utbildades ett Prandtl-brott vilket skar över det horisontella skiktmonstret och därmed tvångsstyrde brottytan.

Lo (1970) testade sin ansats på i litteraturen publicerade undersökningar. Han har bl.a. utgått från en undersökning utförd av Simons (1967) på en Londonlera. Simons försöksprogram omfattade okonsoliderade, odränerade triaxialförsök på provkroppar med varierande storlek (trimmade ur block) samt direkta skjuvförsök i fält ($b = 0,6$ m). Los samband följde Simons försöksresultat väl. Den enligt ekv. (9) beräknade verksamma hållfastheten överensstämde dessutom väl med hållfastheten framräknad från ett 3 m djupt och 3 m brett skred i samma lera 3 dagar efter en slänts färdigställande.

De hittills presenterade teorierna har inte tagit hänsyn till sprickstorleken och sprickorienteringens fördelningsfunktioner. En ansats har gjorts av Protodyakonov & Kojman, 1964¹⁾ att ta hänsyn till avståndet mellan svaghetsplanen. Sambandet är baserat på försök på kol- och bergmaterial och kan tecknas

$$\sigma_b = \sigma_o \frac{c}{b+c} + \sigma_m \frac{b}{b+c} \quad (10)$$

σ_b är tryckhållfastheten hos en kubisk provkropp med sidan b , σ_m är hållfastheten hos jordmassan ($b \rightarrow \infty$), σ_o är intakthållfastheten samt c avståndet mellan svaghetsplanen.

1) Se Lo (1970).

Praktiskt kan Protodyakonov & Kojmans samband vara svårt att använda, då man måste känna sprickavstånd och intakthållfasthet, innan man kan bestämma den verksamma hållfastheten. I allmänhet varierar sprickavståndet, varför man i stället borde utgå från sprickavståndets fördelningsfunktion.

Bishop (1967) har givit ett empiriskt samband som liknar Protodyakonov & Kojmans,

$$\sigma_d = \frac{\sigma_o \sigma_m (d + c)}{\sigma_o d + \sigma_m c} \quad (11)$$

Beteckningarna har förklarats vid ekv. (10). Bishops samband avser cylindriska provkroppar.

Med Bishops samband bestäms den stora jordmassans hållfasthet redan när provdiametern är ca 4 ggr sprickavståndet medan det enligt Protodyakonov & Kojmans samband krävs ett avsevärt större prov.

I litteraturen har även andra rekommendationer givits för hur man skall bestämma den i en stor jordmassa verksamma hållfastheten, se exv. Adams & Radhakrishna (1971), Hooper & Butler (1966) och Blight (1967). Olika förfaranden rekommenderas i samtliga fall, varför Marslands (1972) åsikt tycks stämma att vid detta stadium inget generellt förfarande kan rekommenderas.

Det som hittills behandlats om hållfasthetens storleksberoende har framför allt avsett den odränerade skjuvhållfastheten. Den dränerade skjuvhållfasthetens storleksberoende har nämligen behandlats mycket sparsamt i litteraturen. Ett storleksberoende bör emellertid existera även vid detta fall. Skempton (1964) har i viss mån behandlat detta problem i fjärde "Rankine Lecture" (rörande långtidsstabiliteten hos lerslänter i sprickiga, överkonsoliderade leror). Skempton studerade ett antal skred och fann att om leran var sprickig och fast mobiliserades i genomsnitt längs glidytan en hållfasthet mellan maximi- och resthållfastheten. Hur stor del som mobiliserades uttryckte Skempton med en restfaktor r

$$r = \frac{\tau_p - \tau_f}{\tau_p - \tau_r}$$

där τ_p är maximihållfastheten, τ_r resthållfastheten och τ_f den mobiliserade hållfastheten. För Londonleran blev r i allmänhet 0,6 till 0,8. Även ett skred i moränlera i Selset studerades. Moränleran hade $w = 12\%$, $w_L = 26\%$, $w_p = 13\%$ samt lerhalten 17%. Triaxial- och skjuvboxförsök gav maximihållfasthetsparametrarna $c' = 9 \text{ kPa}$, $\phi' = 32^\circ$ och restparametrarna $c'_r = 0$, $\phi'_r = 30^\circ$. Den mobiliserade hållfastheten vid skredet var mycket nära maximihållfastheten ($r = 0,08$). Orsaken berodde enligt Skempton av att moränleran var anmärkningsvärt homogen utan förekomst av sprickor. Enligt Skempton behöver man inte befara progressivt brott i moränlera förutsatt att denna är homogen och sprickfri.

Man kan avslutningsvis konstatera att hållfastheten hos spröda, sprickiga material är beroende av den testade provvolymens storlek - ju större provvolym desto lägre hållfasthet. Det mest kända sambandet för hållfasthetens volymberoende torde vara Weibulls. Vid praktisk geoteknik är problemet att bestämma hållfastheten i en stor jordvolym utgående från hållfastheten i en liten volym. Olika teorier har uppställts men något generellt förfarande tycks inte finnas.

Den dränerade hållfasthetens volymberoende är sparsamt behandlat i litteraturen. Ett eventuellt volymberoende kan orsakas av progressivt brott.

3 EGENA UNDERSÖKNINGAR

3.1 Allmänt

Undersökningens syfte har varit att bestämma moränlerors hållfasthets- och bärighetsegenskaper. Undersökningarna har utförts i Skåne där merparten av de svenska moränlerorna finns samt har omfattat fält- och laboratorieförsök. I fält har vingborrförsök, plattförsök och ringskjuvförsök utförts och i laboratorium enaxliga och treaxliga tryckförsök, fallkonförsök och ödometerförsök. Fältförsöken har utförts i norra och östra Lund (benämns i fortsättningen Rehab, Lund respektive Sparta, Lund), i Tygelsjö och i kv. Lärkträdet, Malmö. Laboratorieförsöken har utförts på moränlera från nämnda lokaler samt dessutom, fast i mindre omfattning, på moränlera från Hyllie och Gamla marknadsplatsen i Lund (benämns Marknad, Lund) samt på morän från Arlov. I laboratoriet har såväl ostörda som laboratoriepackade prover undersökts. De sistnämnda har packats vid olika vattenhalter med olika packningsarbete.

3.2 Geografisk och geologisk beskrivning av försöksplatserna

Försöksplatserna har som nämnts varit lokaliserade till sydvästra Skåne. I FIG. 17 är de olika lokalerna inlagda på en karta, vilken visar moränområdena i Skåne. För att kunna jämföra moränlerornas egenskaper med andra fasta lerors egenskaper har även tre olika fasta leror undersökts. Två av dessa senare leror finns i norra Skåne (Vallåkra och Åsen) och en på Gotland (Kättelviken).

Nedan skall platserna med moränlera presenteras såväl geografiskt som geologiskt. Dessutom ges de geotekniska standardparametrarnas storlek i TAB. 2.

De undersökta moränlerorna är alla avsatta av den lågbaltiska isströmmen. Moränlerorna benämns ofta kritamoränleror på grund av deras stora innehåll av nedkrossade kritbergarter, skrivkrita, kritkalksten och enfärgad

flinta. Nedkrossningen i moränleran har ofta varit ofullständig, varför man enligt Magnusson, Lundqvist & Regnéll (1963) kan påträffa stora flak av skrivkrita (flera hundra meter långa).

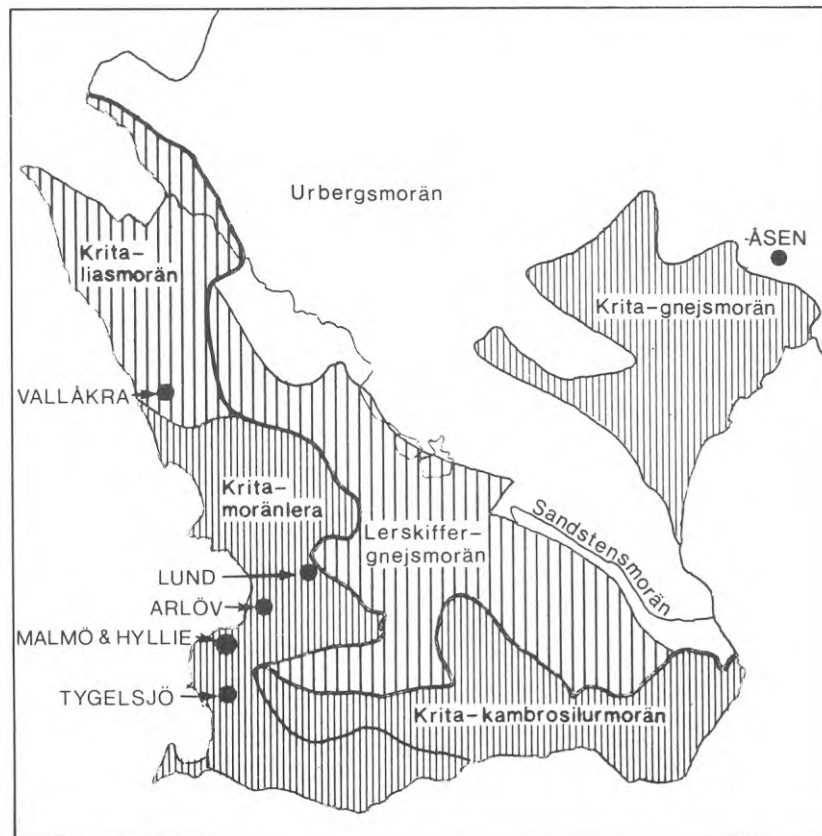


FIG. 17. Försökslokalerna inlagda på en karta utvisande moränområdena i Skåne enligt G. Ekström. (Efter Magnusson, Lundqvist & Regnéll, 1963.)

The experiment locations shown on a map of the moraine areas of Skåne, after G. Ekström. (From Magnusson, Lundqvist & Regnéll, 1963.)

Moränlerorna är heterogena på grund av att de avsatts direkt från inlandsisen. I moränlerorna finns linser och korn av helt olika material, likaså inbakade äldre lersediment. Typen av uppbyggnad medför att det existerar svaghetszoner. Däremot tycks det inte finnas öppna sprickor eller hålrum i de undersökta moränlerorna.

Moränleran blev belastad av istäcket. Hur stort tryck som verkade är inte känt, men det torde ha överstigit 1,2 MPa. Förutom detta höga normaltryck existerade vid isens framryckning höga skjuvspänningar i gränsen mellan

isen och underliggande jord, vilket ledde till bildandet av glatta brottplan eller kontinuerliga brottzoner i den avsatta jorden.

Vid isens avsmältning fjädrade moränleran tillbaka något genom det minskade trycket. Det kan därvid tänkas att siltlinser och skiktgränser upp- mjukades och nu bildar svaghetszoner.

Pusch (1973) har analyserat mikrostrukturen hos en moränlera från Hyllie i sydvästra Skåne. Den befanns likna den för andra fasta leror. Lerfraktionen var till större delen uppbyggd av domäner, men det fanns även små lokala zoner med öppna, flockulerade lerpartikelgrupper. De sistnämnda förklarades genom valvverkan mellan grova korn, varför partiklarna blivit i stort sett obelastade. De öppna lerpartikelgrupperna kan enligt Pusch även utgöra resultatet av en senare lermineralbildning.

Sparta, Lund

Försöksplatsen är belägen inom studentområdet Sparta mellan Ole Römers väg och motorvägen Malmö-Lund. På den aktuella platsen är nu ett parkeringshus uppfört. Försöken utfördes i en schaktgrop på djupet 1,5 m under markytan.

Moränleran är sandig, siltig med inslag av krita. I FIG. 18 redovisas kornfördelningen och i TAB. 2 geotekniska standarddata.

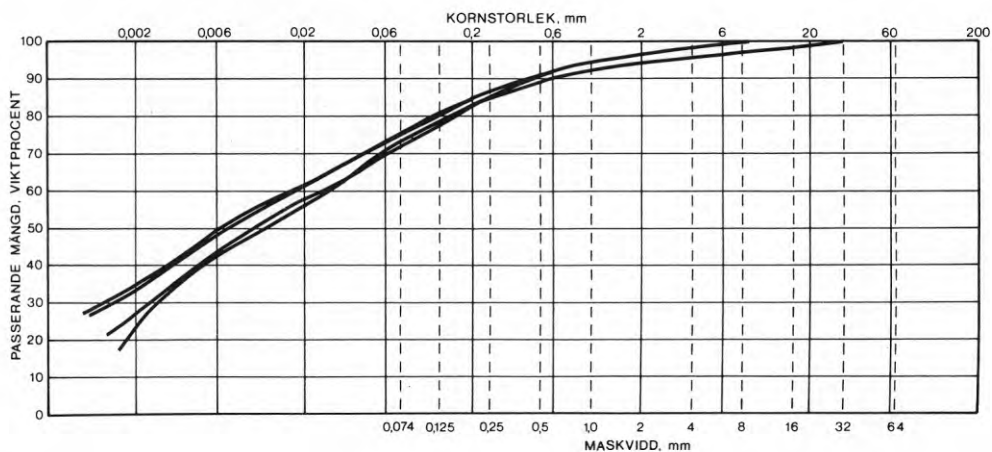


FIG. 18. Kornfördelningen hos moränleran i Sparta, Lund. Djup under markytan 1,4–2,0 m.

The particle size distribution of the boulder clay in Sparta, Lund. Depth below ground level 1.4–2.0 m.

Moränlerans optimala vattenhalt är enligt standard proctormetoden 16,5 % och tillhörande maximala torrdensitet 1,85 t/m³.

Rehab, Lund

Försöksplatsen är belägen i norra Lund, norr om N. Fäladen och begränsas i öster av Örtoftavägen, i söder av Skjutbanevägen och i väster av järnvägen Lund-Eslöv. På detta fält avser Malmöhus läns landsting uppföra ett rehabiliteringscentrum (därav min benämning på lokalen).

Försöken utfördes i två olika provgropar på djupet 1,9 m under markytan. Från denna nivå och 1 m ner är jorden en brungrå, sandig, siltig moränlera. Därunder övergår jorden i en gråbrun, sandig, siltig moränlera. På 14 m djup under markytan påträffades vid borrning fast botten – troligen skifferberg. I FIG. 19 och i TAB. 2 redovisas genomsnittsdata för moränleran från schaktbotten och 2 m ner. Spridningen var liten.

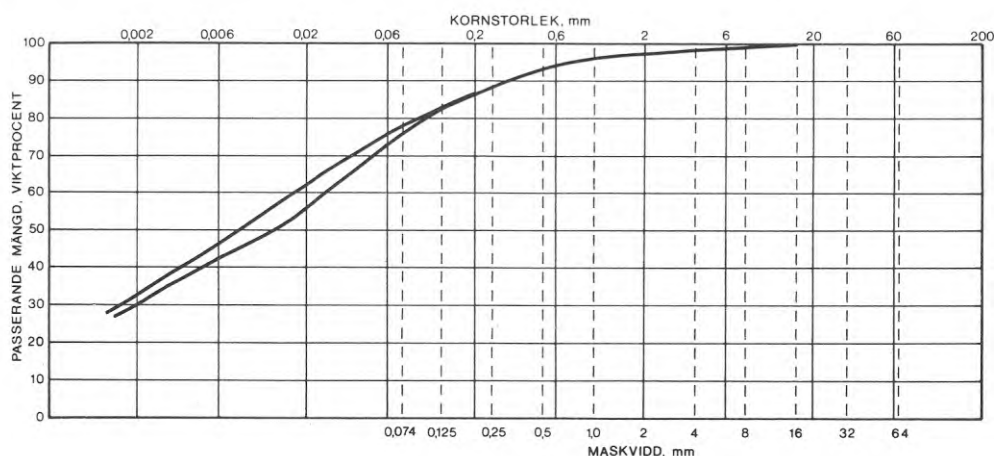


FIG. 19. Kornfördelningen hos moränleran i Rehab, Lund. Djup under markytan 2–4 m.

The particle size distribution of the boulder clay in Rehab, Lund. Depth below ground level 2–4 m.

Moränlerans optimala vattenhalt är enligt modifierad proctormetod 11,5 % och tillhörande torrdensitet 2,03 t/m³.

Tygelsjö

Försöksplatsen är belägen väster om väg E6 genom Tygelsjö. På denna plats är nu ett brofundament uppfört för en bro över den nya motorvägen Malmö-Vellinge.

Försöken utfördes i en 1,5 m djup provgrop. Från denna nivå och minst 1 m ner är jorden en brun siltig, sandig moränlera. I FIG. 20 redovisas kornfördelningen och i TAB. 2 geotekniska standarddata.

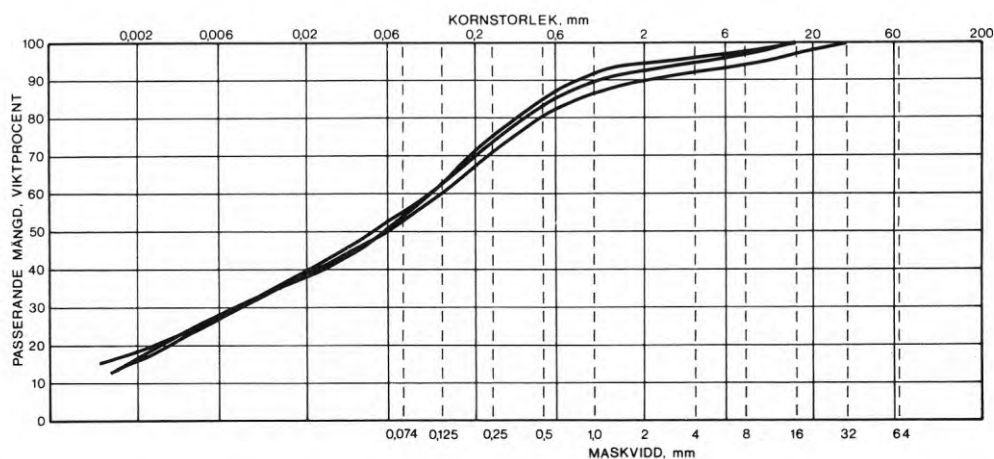


FIG. 20. Kornfördelningen hos moränleran i Tygelsjö. Djup under markytan 1,5–2,5 m.
The particle size distribution of the boulder clay in Tygelsjö. Depth below ground level 1.5–2.5 m.

Proctorpackningar anger att den optimala vattenhalten är 10,5 % och torrdensiteten $2,05 \text{ t/m}^3$ enligt standardmetoden och vattenhalten 9,0 % och torrdensiteten $2,10 \text{ t/m}^3$ enligt modifierade metoden.

Kv. Lärkträdet, Malmö

Försöksplatsen är belägen i kv. Lärkträdet, Malmö. Angränsande gator är Zenithgatan, Sallerupsvägen, Nobelvägen och Celsiusgatan. På platsen kommer ett flertal höghus och parkeringshus att uppföras.

Försöken utfördes på djupet 4,0 m under markytan. Från provgropsbotten och 6 m ner består jorden av en likartad brungrå, siltig, sandig moränlera/morän. Fast botten är belägen 10 m under markytan och torde utgöras av kalkberg. I FIG. 21 redovisas moränlerans kornfördelning och i TAB. 2 dess geotekniska standarddata.

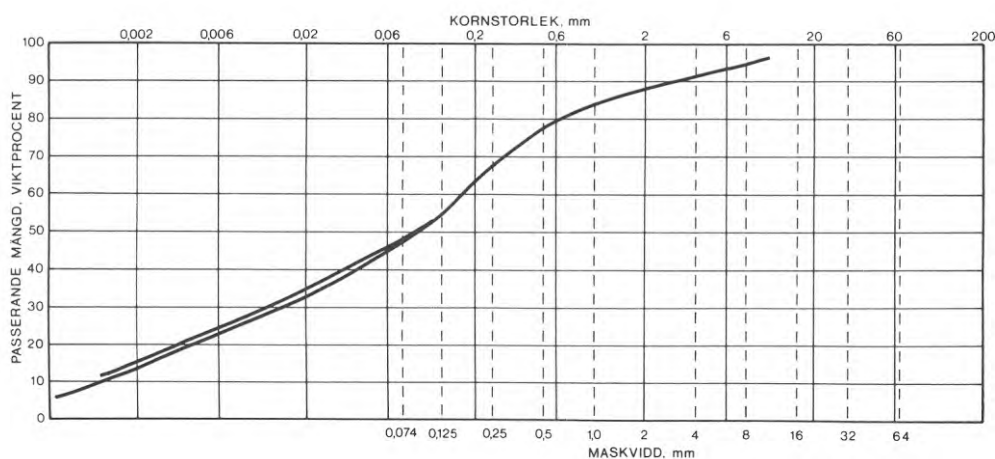


FIG. 21. Kornfördelningen hos moränleran i kv. Lärkträdet, Malmö. Djup under markytan 4–7 m.
The particle size distribution of the boulder clay in kv. Lärkträdet, Malmö. Depth below ground level 4–7 m.

Hyllie

Moränleran från Hyllie undersöktes i laboratorium. "Ostörda" prover har tagits upp av AB Svensk Grundundersökning med deras specialprovtagare (se SGI, särtryck och preliminära rapporter, nr 38, 1969). Provtuberna har innerdiametern 118 mm och höjden 300 mm.

Försöksplatsen är belägen vid det nya vattentornet i Hyllie. Prover togs på djupen 5,2 m och 5,7 – 6,3 m under markytan. Jorden består inom de undersökta nivåerna av en likartad brun, sandig, siltig moränlera. I FIG. 22 redovisas kornfördelningen för olika nivåer och i TAB.2 standarddata.

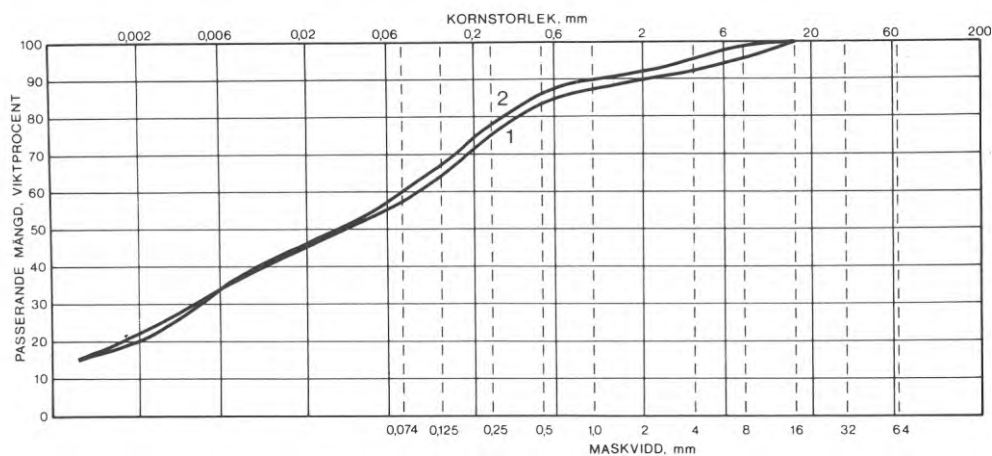


FIG. 22. Medelkornfördelningen hos moränleran i Hyllie. Djup under markytan 5,2 m (kurva 1) och 6,1 m (kurva 2).

The average particle size distribution of the boulder clay in Hyllie. Depth below ground level 5.2 m (curve 1) and 6.1 m (curve 2).

Arlöv

Liksom för Hyllie-leran utfördes på morän från Arlöv endast laboratorieförsök på prover tagna med nämnda specialprovtagare. Lokalen är belägen alldeles sydost om järnvägsbron vid Arlövs industriområde. Prover togs på djupen 3,2 m och 5,0 m under markytan. Analyserna visar att jorden på de undersökta nivåerna utgörs av en brungrå, lerig, siltig, sandig morän. På större djup (ca 6 m) övergår moränen i en gråbrun, siltig, sandig moränlera. Densiteten och vattenhalten ökar mot djupet. I FIG. 23 redovisas kornfördelningen vid de olika nivåerna och i TAB. 2 standarddata.

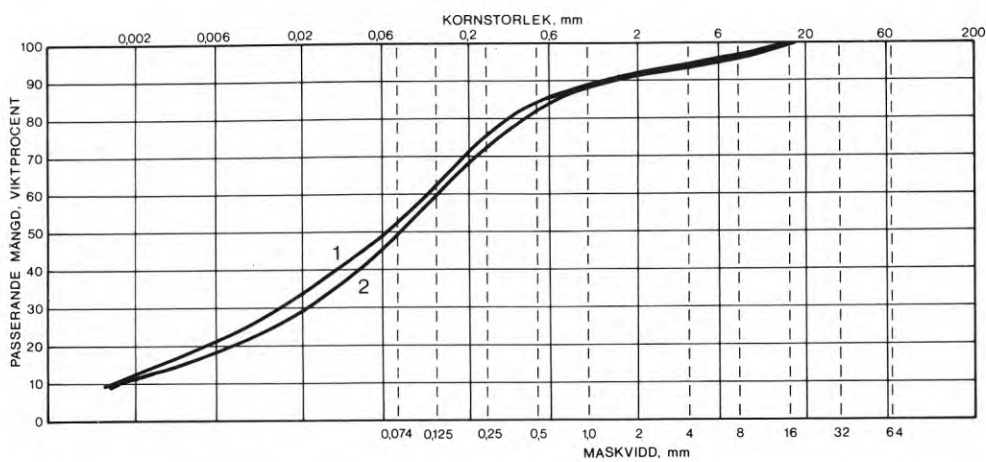


FIG. 23. Kornfördelningen hos moränen från Arlöv. Djup under markytan 3,2 m (kurva 1) och 5,0 m (kurva 2).

The particle size distribution of the moraine in Arlöv. Depth below ground level 3.2 m (curve 1) and 5.0 m (curve 2).

Marknad, Lund

Endast laboratorieförsök utfördes på moränlera från Marknad, Lund upptagen med nämnda specialprovtagare. Lokalen är belägen 70 m öster om Bryggaregatan och 30 m norr om Åldermansgatan vid Gamla marknadsplatsen i Lund. Prover togs på djupet 2,2 m under markytan. Jorden är brun, sandig, siltig moränlera. Data framgår av TAB. 2 och FIG. 24.

TAB. 2 De undersökta moränlerornas geotekniska standarddata.

Lokal	Djup m	Skrym- densitet t/m ³	Vattenhalt %	Torr- densitet t/m ³	Kompakt- densitet t/m ³	Finleks- tal %	Flytgräns %	Plasticitets- gräns %	Finjords- halt %	Ler- halt %	Skemptions- aktivitets- tal	Kalk- halt %
Sparta, Lund	1,4- 2,0	2,10	16-17	1,80	2,67	32	35	18	71	29	0,5	-
Rehab, Lund	1,8- 3,5	2,07	16	1,78	2,66	30	30	21	74	32	0,3	-
Tygel- sjö	1,5- 2,5	2,04	14	1,79	2,66	25	26	13	52	17	0,8	-
Kv. Lärk- trädet, Malmö	4,0- 7,0	2,25	13	1,99	2,67	16	-	13	46	15	0,2	-
Hyllie	5,2 5,7- 6,3	2,24 2,26	12 11	2,00 2,03	2,64 2,66	17 18	18 18	11 11	55 58	22 21	0,3 0,3	34 28
Arlöv	3,2 5,0	2,14 2,26	10 11	1,87 2,02	- -	21 17	16 -	11 12	49 45	13 12	0,4 0,4	11 13
Marknad, Lund	2,2	2,10	17	1,80	2,66	≈27	≈23	14	70	23	0,5	21

1) Uttryckt i viktprocent av totala jordmängden.

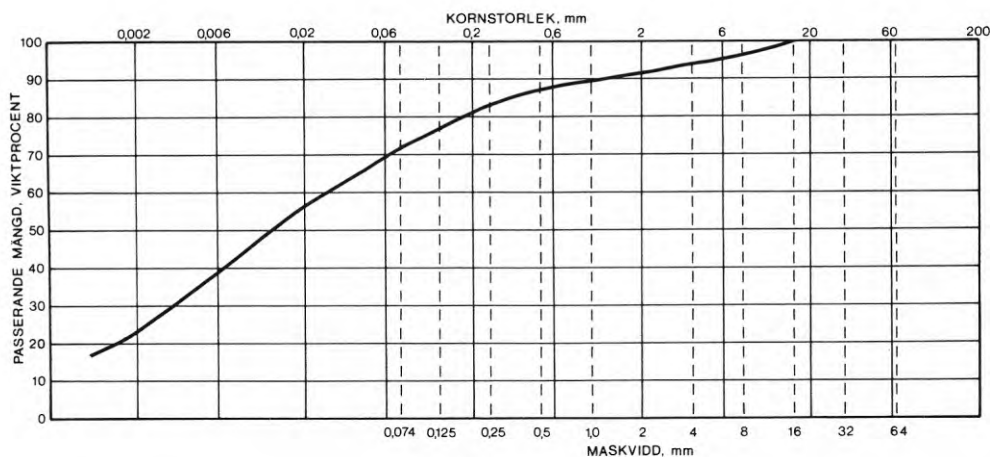


FIG. 24. Kornfördelningen hos moränleran i Marknad, Lund. Djup under markytan 2,2 m.
The particle size distribution of the boulder clay in Marknad, Lund. Depth below ground level 2.2 m.

3.3 Försöksutrustning, utförande och utvärdering

Provtagning

Upptagning av ostörda prover gjordes på två olika sätt. Moränleran i Hyllie, Arlöv och Marknad, Lund togs som tidigare nämnts upp med en specialprovtagare, typ Svensk Grundundersökning. I övriga lokaler kunde ett billigare provtagningsätt användas, eftersom provgropar togs upp. Vid det senare fallet handschaktades en yta försiktigt fram ca 0,20 m under den av gräv-maskin framtagna schaktbotten. En provtub pressades ned med hjälp av en domkraft. Mothållet utgjordes av en balk förankrad med jordskruvar. Efter det att tuberna pressats ned grävdes de fram. Tuberna var av glasfiberarmerad plast med skarpeggad kant och med innerdiametrarna 50 och 150 mm. Det framkom att den mindre dimensionen var olämplig på grund av de grövre kornen i moränleran - leran erhöll en tätare struktur i den mindre tuben. Som exempel kan nämnas att vid provtagning i Sparta, Lund blev densiteten i den stora tuben $2,10 \text{ t/m}^3$ mot $2,21 \text{ t/m}^3$ i den lilla tuben.

Framställning av provkroppar

De ostörda provkropparna trimmades med hjälp av skalpell. Håligheter uppkomna vid avlägsnandet av utstickande stenar fylldes med betongspackel.

De laboratoriepackade proverna framställdes genom att moränleran packades i fyra skikt med fallvikt med bestämd fallhöjd. Proverna packades in i en delbar cylinder, vars väggar beströks med molybdendisulfid för att undvika dragsprickor vid isärtagandet av cylinderhalvorna. Två packningscylindrar användes, en med $d = 50$ mm och $h = 100$ mm och en med $d = 35,7$ mm och $h = 80$ mm. Om andra provstorlekar skulle undersökas trimmades dessa ur de packade provkropparna på samma sätt som vid framställning av ostörda provkroppar.

Fallkonförsök

Vid konförsöken användes ett stativ av Geonors fabrikat samt koner med spetsvinkeln 30° och massorna 400 g och 600–620 g. Skjuvhållfastheten har utvärderats enligt Hansbos rekommendation (Hansbo, 1957).

Moränleror är mycket fasta, vilket gör att inte ens 400 g 30° konen ger speciellt djupt konintryck. Detta medför att skjuvhållfastheten varierar starkt vid små variationer i intryck. Missvisande konintryck fås när konen träffar grövre korn i moränleran, varför spridningen ofta blir stor för denna jordtyp.

Hur stor den influerade jordvolymen är vid konförsök är svårt att bestämma. Hansbo (1957) har angett att den plasticerade zonen har en utbredning enligt FIG. 25. Om man approximerar zonen till en rät, stympad, cirkulär kon och antar att denna volym är ett mått på den influerade jordvolymen fås

$$V = \frac{7}{3} \pi h^3 \tan^2 \frac{i}{2} \quad (12)$$

där i är konens spetsvinkel och h konintrycket.

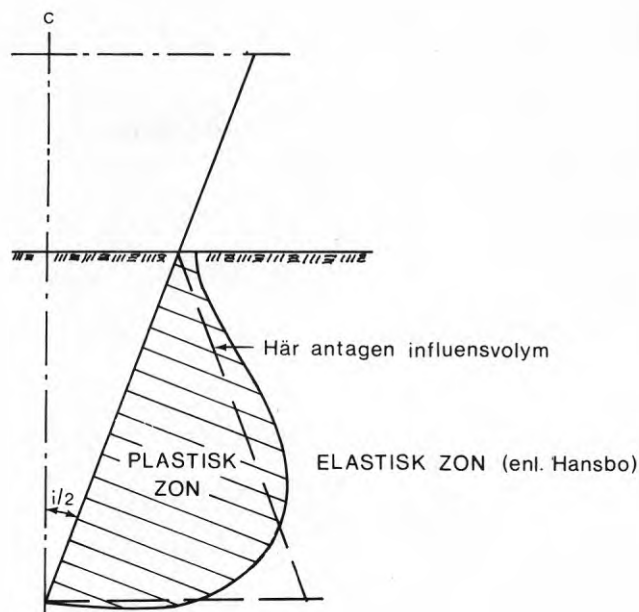


FIG. 25. Antagen plasticerad zon och influensvolym vid konförsök.

Assumed configuration of the plastic zone and assumed volume of influence around a fall cone during penetration.

Vingborrförsök

Vingborrförsöken utfördes med olika vingborrtyper och vingdimensioner. I de flesta fallen var vingens höjd dubbelt så stor som diametern. Hållfastheten har beräknats under antagandena att en cirkulärcylindrisk glidyta utbildas och att skjuvhållfastheten är densamma i horisontell och vertikal led samt utbildas samtidigt i dessa riktningar. Korrektheten i dessa antaganden är diskutabel för moränlera på grund av steninnehåll, sprödhet och eventuell anisotropi.

Den influerade jordvolymen vid vingborrförsök kan inte anges. I denna rapport antas volymen motsvara cylindervolymen $V = \pi d^2 h / 4$, där d är vingdiametern och h vinghöjden. Denna volym bör inte avvika alltför mycket från den verkliga influerade volymen med hänsyn till att det initiella brottet inte utgörs av den slutliga cirkulärcylindriska glidytan utan av lokala brott vid svaghetszoner vid vingsidorna. Vid det slutliga brottet influeras däremot en mindre volym motsvarande en smal zon längs cylinderns mantelyta.

Enaxliga och treaxliga tryckförsök

Treaxliga tryckförsök är i allmänhet den bästa metoden att bestämma hållfasthetsparametrarna, eftersom man känner spänningstillståndet under hela försöket. Problemet är dock att vid odränerade försök rätt mäta portrycket i brottzonen. Detta gäller speciellt för moränleror, eftersom dessa i allmänhet inte är vattenmättade.

Det råder delade meningar om vilken dimension provkroppen bör ha. Praxis är att man väljer höjden dubbelt så stor som diametern, så att den av Mohr-Coulomb postulerade brottytan kan utbildas enligt FIG. 26a. I avsnitt 2.1.3 visades att om stämplarna inte är glatta utbildas skjuvspänningar längs ändytorna, vilka för spröda material motverkar axiellt splittringsbrott. Vid ändytorna fås förstyvade koner (FIG. 3b och FIG. 26b). Dessa kan tänkas få minskande betydelse vid ökande höjd-diameterförhållande.

Enligt Jacobsen (1967, 1970) fås den lämpligaste dimensionen när höjden (h) är lika stor som diametern (d) förutsatt att stämplarna är glatta. Enligt Harremoës, Jacobsen & Ovesen (1970) underskattas hållfasthetsparametrarna om $h = 2d$. Vid brott utbildas för $h = 2d$ endast en brottyta eller en smal brottzon, där alla deformationerna äger rum medan övriga delar av provet är intakta. Om försöket utförs under konstant volym betyder detta att vatten kan strömma till eller bort från brottzonen till de intakta delarna. Om jorden är förbelastad dilaterar materialet i brottzonen, vatten sugas dit, hållfastheten avtar och hållfasthetsparametrarna undervärderas. Om däremot $h = d$ kommer hela provet att genomplasticeras och förhållandena blir desamma inom hela provet, vilket skulle ge ett korrektare mått på hållfasthets- och deformationsegenskaperna (FIG. 26c). (Om ändytorna är råa fås även för $h = d$ styva koner och krökta brottlinjer.)

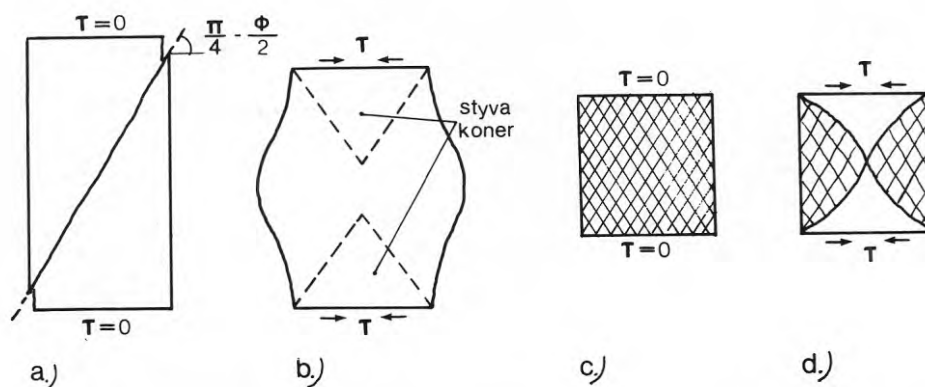


FIG. 26. Brottyper vid olika provformer och olika typer av stämplor. a) $h = 2d$ glatta stämplor, b) $h = 2d$ skrovliga stämplor, c) $h = d$ glatta stämplor, d) $h = d$ skrovliga stämplor. (Efter bl.a. Harremoes, Ovesen & Jacobsen, 1970.)

The modes of failure for different sample forms and different types of pressure heads. a) $h = 2d$ smooth end plates, b) $h = 2d$ rough end plates, c) $h = d$ smooth end plates, d) $h = d$ rough end plates. (From among others Harremoes, Ovesen & Jacobsen, 1970.)

Jacobsens (1970) undersökningar visar emellertid att h/d -förhållandet i intervall $0,7 \leq h/d \leq 2,0$ inte påverkar den odränerade hållfastheten hos moränlera, se FIG. 27, när tryckplattorna är glatta. Kraft-deformationskurvorna visar emellertid att brottkompressionen blir mycket stor (30 %) för $h/d = 1$. För $h/d = 2$ blir brottkompressionen blott hälften så stor, se FIG. 28.

Även vid triaxialförsöken blev skillnaden liten mellan prover med $h = d$ och $h = 2d$, se FIG. 5.

Med ledning av ovannämnda resultat användes vid tryckförsöken provkroppar med $h/d = 2$. Vid en del enaxliga tryckförsök användes emellertid andra h/d -förhållanden för att studera denna faktors betydelse för hållfastheten.

De enaxliga tryckförsöken utfördes i tryckapparat av Geonors fabrikat.

För att undvika skjuvspänningar vid ändytorna lades mellan prov och stämpel antingen dubbla lager aluminiumfolie smorda med molybdendisulfid eller dubbla lager teflonfilmer. Från en mekaniskt registrerad kraft-deformationskurva har hållfastheten utvärderats enligt gängse förfarande.

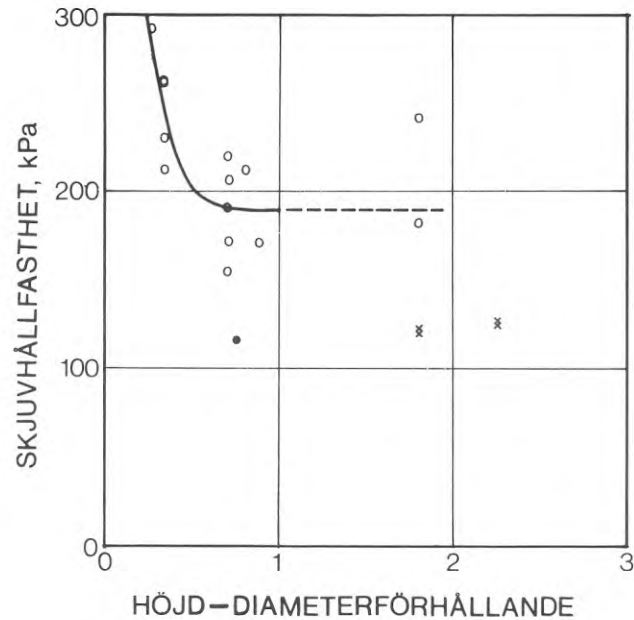


FIG. 27. Provdimensionens inverkan på den odränerade hållfastheten. Enaxliga tryckförsök på Kratbjerg-moränlera, $d = 37$ mm. h/d -förhållandet är angivet vid brott (Jacobsen, 1970).
 ○, glatta stämplor; x, skrovliga stämplor; ●, sprucket prov, glatta stämplor.

The effect of sample height on the undrained shear strength. Unconfined compression tests on Kratbjerg boulder clay. $d = 37$ mm. The h/d -ratio is given at failure (Jacobsen, 1970).

○, smooth end plates; x, rough end plates; ●, cracked sample, smooth end plates.

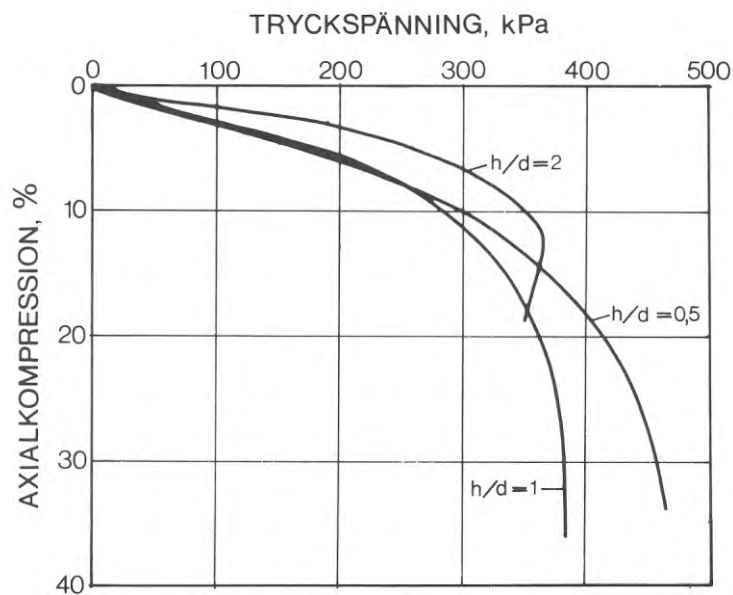


FIG. 28. Kraft-deformationskurvor från enaxliga tryckförsök på Kratbjerg-moränlera. Glatta stämplor (Jacobsen, 1970).

Stress-strain curves for unconfined compression tests with smooth end plates. Boulder clay from Kratbjerg (Jacobsen, 1970).

För att studera hållfasthetens volymberoende trimmades provkroppar till olika volym.

De treaxliga tryckförsöken utfördes i en triaxialapparat av Geonors fabrikat. Såväl dränerade som odränerade försök utfördes. I det förra fallet dränerades provkroppen genom ändytorna och via pappersdräner längs periferin. Provdimensioner var $h = 80$ mm, $d = 35,7$ mm och $h = 100$ mm, $d = 50$ mm. Proverna skjuvades med konstant deformationshastighet. Hastigheten varierades inom försöksserierna för att kontrollera att den var så låg att hållfasthetsvärdena inte blev beroende av tiden. Minsta erforderliga tid till brott bestämdes ur \sqrt{t} -kurvan bestämd under konsolideringsfasen¹⁾. Under konsoliderings- och skjuvningsfasen mättes provkroppens volymändring. Vid utvärderingen av försöksresultaten har även hänsyn tagits till att provets diameter ökar under skjuvningsfasen. Styvheten i pappersdräner och gummi-membran har försumrats.

Vid utvärderingen av hållfasthetsparametrarna har i allmänhet försöksresultaten representerats i form av Mohrs cirklar även om vid låga celltryck brottet var av spröd karaktär.

Vid tryckförsöken har den influerade volymen satts lika med provkroppens volym.

Direkta skjuvförsök

Vid direkta skjuvförsök användes skjuvboxar av typ Casagrande. En fördel med denna skjuvboxtyp är att man kan undersöka en eventuell hållfasthetsanisotropi. Å andra sidan är direkta skjuvförsök av Casagrande-typ ofta olämpliga att utföra på moränlera, eftersom grova korn i det potentiella brottplanet armerar leran. Försöken utfördes konsoliderade, dränerade i två olika stora boxar, den ena med $d = 25$ mm och $h = 15 - 18$ mm och den andra med $d = 75$ mm och $h \approx 25$ mm.

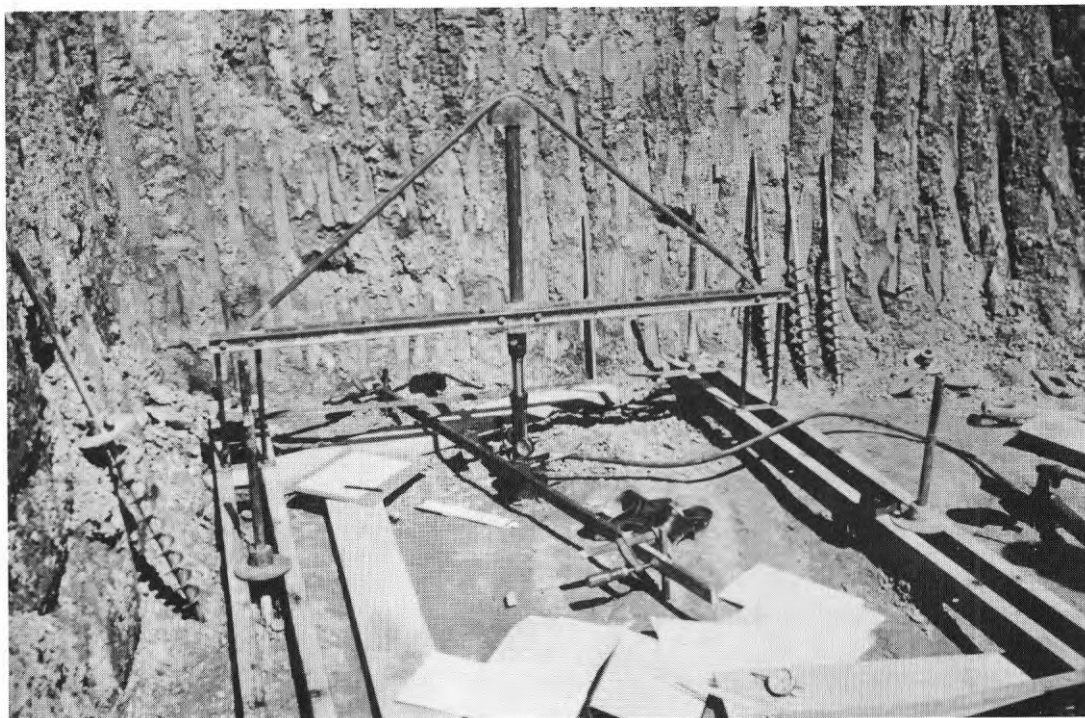
1) Se Bishop & Henkel (1972) s. 204.

Proven konsoliderades under ca 15 h. Laststegen under skjuvningsfasen förtätades nära brott. Tid till brott var 8 - 16 h. Varje laststeg fick ligga på tills deformationstillväxten åtminstone blev linjär med logaritmen för tiden.

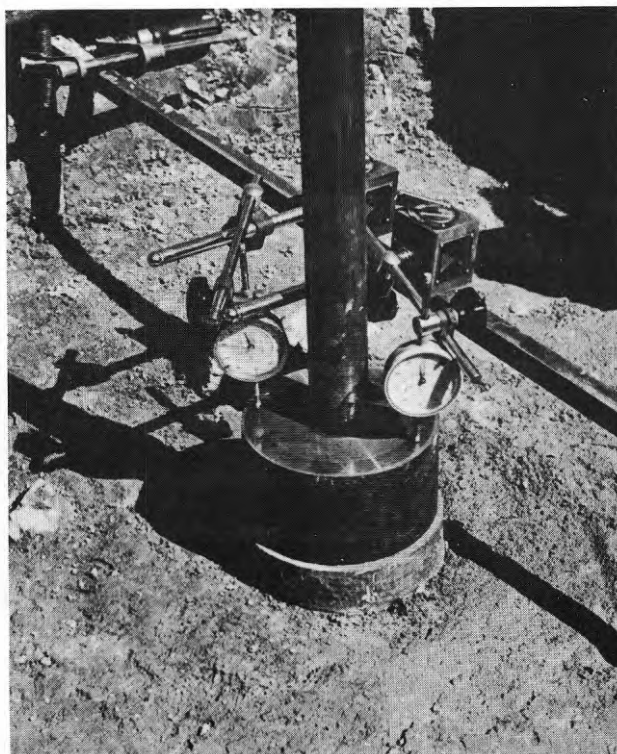
Den främsta invändningen mot Casagrandes skjuvbox är att skjuvspänningen och normalspänningen är olikformiga under försöket (se exv. Hvorslev, 1937, 1960 och Peynircioglu, 1939). Skjuvspänningens olikformighet orsakas av att deformationen är större vid kanterna än i mitten av provet, vilket medför progressivt brott. Normalspänningens olikformighet orsakas av att normallasten blir alltmer excentrisk med ökande deformation resulterande i ett vridande moment. Även detta orsakar progressivt brott. Enligt Hvorslev (1937) medför emellertid dessa olikformigheter en minskning av brott-skjuvspänningen med endast några procent. Vid mina försök har korrektion gjorts för areaändringen under skjuvningen. Den största bristen vid direkta skjuvförsök är trots allt att man inte känner huvudspänningarna under försöket.

Plattförsök

Plattförsöken utfördes i fält med två olika belastningssystem beroende på plattdimensionen. Belastningsutrustningen vid modellplattförsöken, se FIG. 29, bestod av en fackverksbalk, vilken med stänger monterades i en ram av U-balkar. Denna ram förankrades i jorden med jordskruvar. Referenssystemet för mätning av plattans vertikallrörelse utgjordes av ett 1,7 m långt fyrkantrör (20 x 50 mm), vilket i yttre ändarna fästes med skruvtvingar i stänger nedslagna i moränleran. Indikatorlockor med delningen 1/100 mm fästes mot fyrkantröret. Last på plattan påfördes med en 50 kN Nike-domkraft med handpump, varvid fackverksbalken utgjorde mothåll. Oljetrycket avlästes på en precisionsmanometer. Manometern kalibrerades före och efter försöken.



a)



b)

FIG. 29. Belastningssystemet vid plattförsök i modellskala. a) Vy, b) platta och mätklockor.
The load system for field model plate tests. a) Elevation, b) plate and dial gauges.

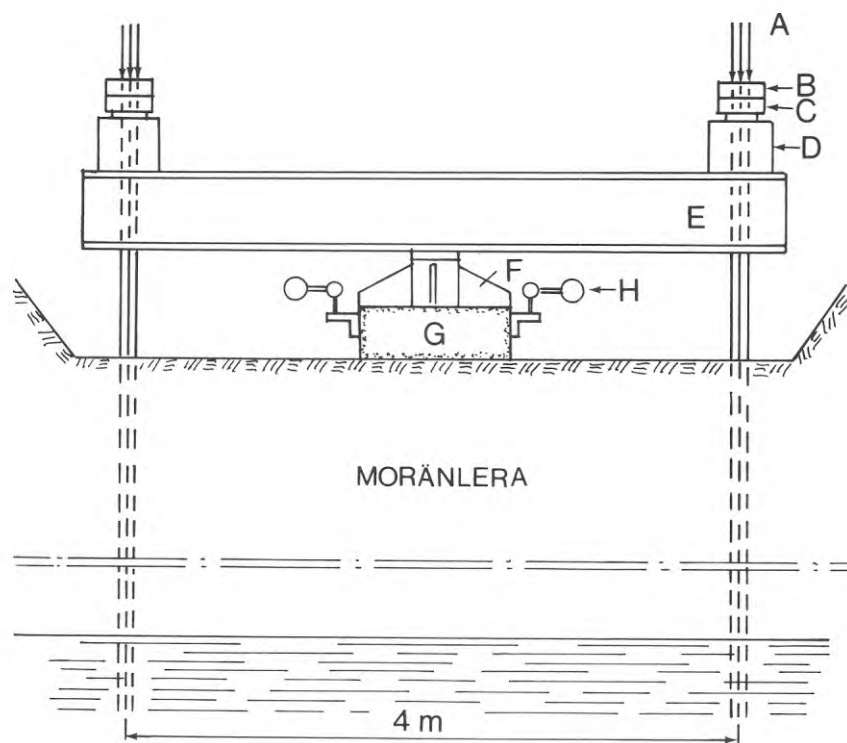


FIG. 30. Belastningssystem vid fullskaleförsök. A, stag; B, dragstycke; C, elektrisk lastcell, D, hydraulisk domkraft; E, balk; F, trycklock; G, platta; H, mätsystem för vertikallrörelser.

Load system for full scale field load test. A, tie-rods; B, clamp; C, electric load cell; D, hydraulic jack; E, beam; F, load transfer plate; G, plate; H, vertical deformation measurement system.

Vid plattförsöken i full skala bestod belastningssystemet, FIG. 30 och 31 av en 5 m lång balk (2 st sammansvetsade INP 47,5), trycklock, två förspänningsdomkrafter typ Dywidag 1,4 MN, två elektriska kraftmätare med mätbryggor samt ett referenssystem. Noggrannheten hos kraftavläsningen var 1,0 kN. Vinkelrätt balken placerades referenssystemet. Detta bestod av 2 st 6 m långa 2" rör i ena änden fastspända i ett nedgrävt betongfundament med ingjutet T-rör och i andra änden fritt löpande i ett annat motsvarande T-rör. På rören monterades indikatorlockor med delningen 1/100 mm mot fyra vinkeljärn fastsatta i plattan för mätning av plattans vertikallrörelse. Under försökens gång kontrollavvägdes referenssystemet med ett precisionsavvägningsinstrument försett med planplattmikrometer. Avvägningarna visade att referenssystemet och intilliggande plattor ej påverkades under tryckningen.



Vy av belastningssystemet



Domkraft och kraftgivare



Platta, trycklock och referenssystem

FIG. 31. Utrustning vid plattförsök i full skala.
Equipment for full scale field plate tests.

Försöksprogrammet omfattade platsgjutna betongplattor och glatta molybden-disulfidsmorda stålplattor. Vid försöken användes två belastningsmodeller. Vid den ena modellen fick varje laststeg ligga på under bestämd tid (i allmänhet 8 min.), medan vid den andra typen varje laststeg fick ligga på under så lång tid, att sättningstillväxten avtog eller åtminstone blev konstant mot logaritmen för tiden.

Vid bestämning av en jords bärighets- och kompressionsegenskaper från plattförsök måste hänsyn tas till belastningshastighet och plattans storlek och form. Enligt Burmister (1963) krävs att minst 2 plattförsök med olika plattdiametrar utförs, varvid minsta diametern skall vara större än 0,3 m. (Om plattdiametern är mindre än 0,3 m utgör enligt Burmister skjuvdeformationerna en dominerande del av totalsättningen.)

Ur last-sättningskurvan kan man bestämma sättningsegenskaperna. Kurvan kan för moränlera ofta approximeras med en rät linje inom de i praktiken aktuella grundtrycken. Utgående från någon på elasticitetsteorin baserad formel bestäms en elasticitetsmodul, vilken används vid en sättningsberäkning.

Att utgående från last-sättningskurvan bestämma en moränleras bärighet kan vara besvärligt, eftersom kurvan ofta är jämnt krökt vid höga tryck. Olika förfaranden rekommenderas i litteraturen. Jag skall inte närmare gå in på dessa olika metoder utan endast ange en enkel metod, som vid laboratorie- och fältförsök befunnits ge värden på säkra sidan. Vid utvärderingen av det kritiska grundtrycket uppritas vertikalrörelsen mellan exempelvis 2 och 8 min. som funktion av grundtrycket. Man erhåller en kryphastighetskurva. Vid ett visst grundtryck fås en markant ökning i kryphastigheten. Det kritiska grundtrycket definieras av den punkt, där krökningsradien har minimum.

Ringskjuvförsök

Helene Lund (1965) utvecklade en fältringskjuvapparat för bestämning av moränens skjuvhållfasthetsparametrar. Denna prototyp har jag sökt vidareutveckla för moränlera.

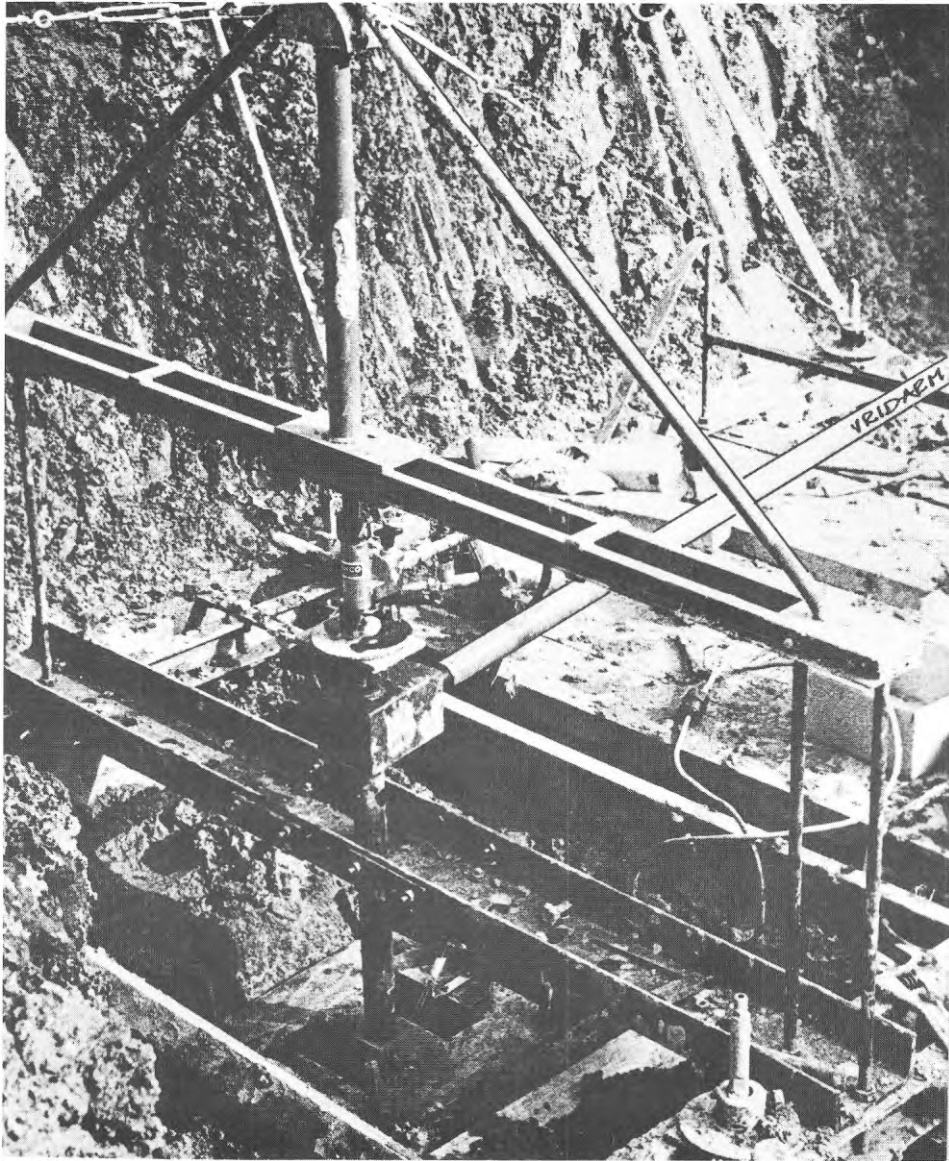
Den av mig använda skjuvapparaten bestod av en belastningsanordning för påförande av normalkraften, en vevanordning för påförande av skjuvkraften samt ett skjuvdon.

Som belastningsanordning användes samma fackverksbalk som vid modellplattförsöken, se ovan FIG. 29 och nedan FIG. 32a. Belastningsanordningen fastgjordes med jordskruvar. Skjuvkraften påfördes skjuvdonet via en horisontell arm infästad i den vertikala stången. För att förhindra att den vertikala stången skulle snedställas av horisontallasten passerade stången genom ett snedfasat hål i en platta, vilken var fästad i jorden och ställningen. Vridningen av den horisontella armen åstadkoms via ett snöre fastsatt i hävarmen och vevanordningen.

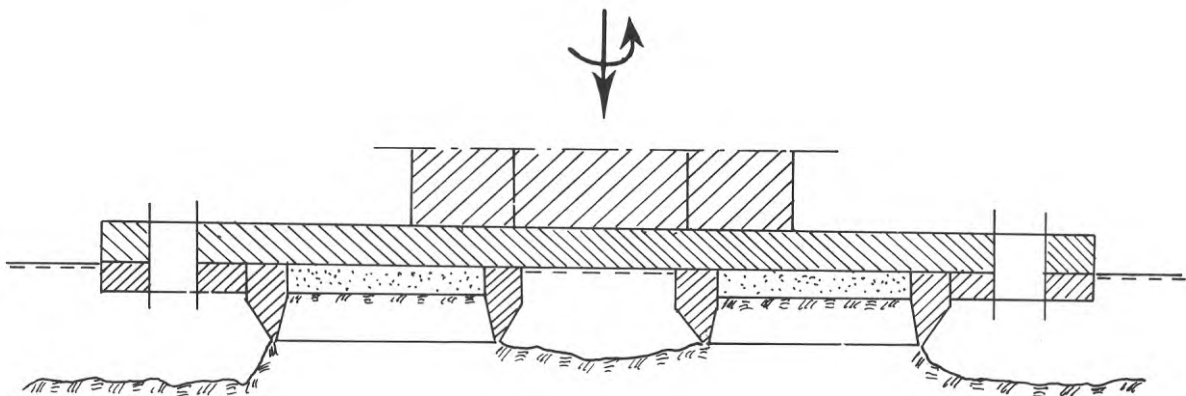
Skjuvningen kunde genom nedväxling (max 1:1600) ske mycket långsamt. Kraften mellan vevanordning och hävarm mättes med en dynamometer fäst i snöret. På laboratoriet uppmättes friktionskrafterna i systemet, varvid framkom att den med dynamometern uppmätta kraften endast med maximalt 5 % översteg den verkliga.

Skjuvdonet hade ett utseende påminnande om ett ekerhjul, se FIG. 32c. Brottytan utbildas mellan yttre och inre ringen. Genom håltagningen i centrum fås tämligen homogena spänningar i den potentiella glidytan. Mellan ekrarna fanns filterstenar, vilka via uppborrade hål i ringarna stod i kontakt med en yttre vattenyta för att säkerställa dränerade förhållanden.

FIG. 32b visar en sektion genom skjuvdon och tryckplatta vid påförd belastning.

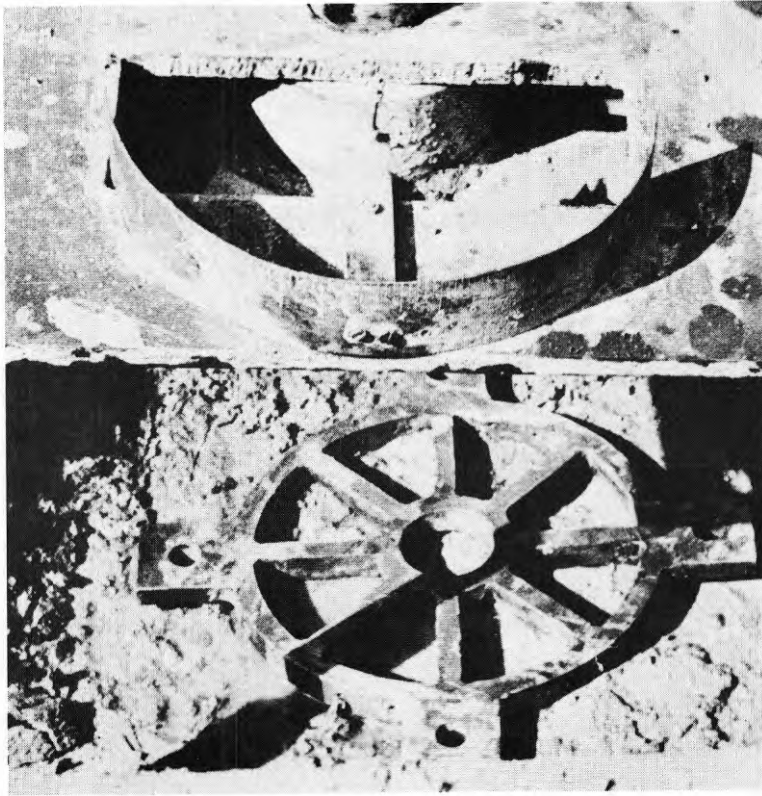


a) Ringskjuvapparat.

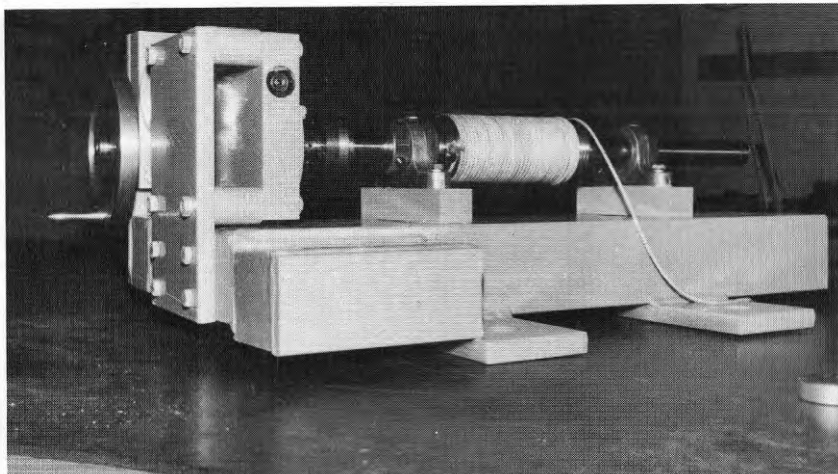


b) Sektion genom skjuvdonet med tryckplatta vid påförd normal- och skjuvlast.

FIG. 32. Ringskjuvapparat.
Field ring shear apparatus.



c) Ringskjuvdonet med tryckplatta och skjuvdeformationsmätare.



d) Vevanordning för vridning av hävarm och därmed skjuvdon. Vev-
utslaget kan nedväxlas till 1:1600.

FIG. 32. Ringskjuvapparat (fortsättning).

Field ring shear apparatus (continued).

Försöken tillgick så att en yta försiktigt frilades med hjälp av en spatel. Skjuvdonet pressades ner i leran med hjälp av en domkraft. Överflödigt material längs ringen borttogs. Normallasten fick ligga på under ca 1 dygn. Under skjuvningsfasen (skjuvningen skedde med konstant deformationshastighet) avlästes skjuvkraft och tillhörande deformation.

Ödometerförsök

Något utanför undersökningens målsättning studerades även moränlerornas kompressionsegenskaper. Orsaken är att man vid val av tillåtet grundtryck måste tillse att sättningarna inte blir så stora att konstruktionen skadas.

Från plattförsök får man god information om moränleras sättningsegenskaper. Emellertid är det i allmänhet inte möjligt att utföra denna relativt dyra försökstyp, utan man är hänvisad till ödometerförsök. Intressant är därför att jämföra de uppmätta sättningarna vid plattförsök med sättningarna beräknade från ödometerförsök. Det är inte självklart att överensstämmelsen blir god på grund av svårigheten att ta upp ostörda prover och att trimma provkroppen. Risk finns att förkonsolideringseffekten och en eventuell cementering förstörs. För att återställa förkonsolideringen lastar man därför i allmänhet först upp till 1,2 (ibland 2,4) MPa. Därefter avlastas provet till det i marken rådande effektiva jordtrycket före byggnation. Jordens kompressionsegenskaper bestäms därefter vid ny pålastning.

I allmänhet är ödometrar med diametern 50 mm för små. Ju större kornstorleken är desto större måste ödometern vara. För välgraderade jordar bör minsta provdimension vara 5 ggr största kornstorlek. Erforderlig dimension bestäms också av inhomogeniteternas karaktär. Jag har använt en ödometer med provdiametern 75 mm och höjden 25 mm. Den på Danmarks Geotekniska Institut använda ödometern för moränlera har diametern 60 mm och höjden 30 mm. Förutom att ödometern skall vara stor måste den ha liten egenelasticitet.

3.4 Resultat från undersökningarna

Nedan ges resultaten från de utförda undersökningarna. En mer omfattande presentation av större delen av försöken återfinns i rapporter insända till Statens råd för byggnadsforskning (Hartlén 1969, 1971, 1972b). Försöken har syftat till att bestämma hållfasthetsparametrarnas beroende av ursprunglig vattenhalt och portal samt hållfasthetens och bärighetens beroende av den influerade jordvolymen.

3.4.1 Sparta, Lund

Merparten av försöken utfördes på laboratorium. På laboratoriet bestämdes såväl ostörd som laboratoriepackad moränleras hållfasthet med enaxliga tryckförsök, konförsök och konsoliderade, dränerade triaxialförsök. Provkropparna trimmades till olika volym. Vid försök på laboratoriepackad moränlera varierades såväl vattenhalt som portal. En mindre serie fältförsök utfördes bestående av plattförsök i modellskala ($d = 0,15$ m) och ring-skjuvförsök.

Fallkonförsök

Hållfastheten bestämdes genom konförsök hos den ostörda och den packade moränleran. En 400 g 30° kon användes vid samtliga försök. Den ostörda moränlerans hållfasthet bestämdes på en avjämnad yta i fält och på upptagna jordprover. 26 försök utfördes i fält och 30 på laboratorium. FIG.33 visar frekvensdiagram över hållfastheten.

Som framgår blev spridningen stor och fördelningen sned. De extremt höga hållfastheterna orsakades troligen av att konen träffade en sten eller dylikt. Om man exempelvis bortser från hållfastheter större än 600 kPa (detta är visserligen fel då även försök med större konintryck kan ha påverkats av stora korn) blir medelhållfastheten i stort sett lika stor i fält och laboratorium, nämligen

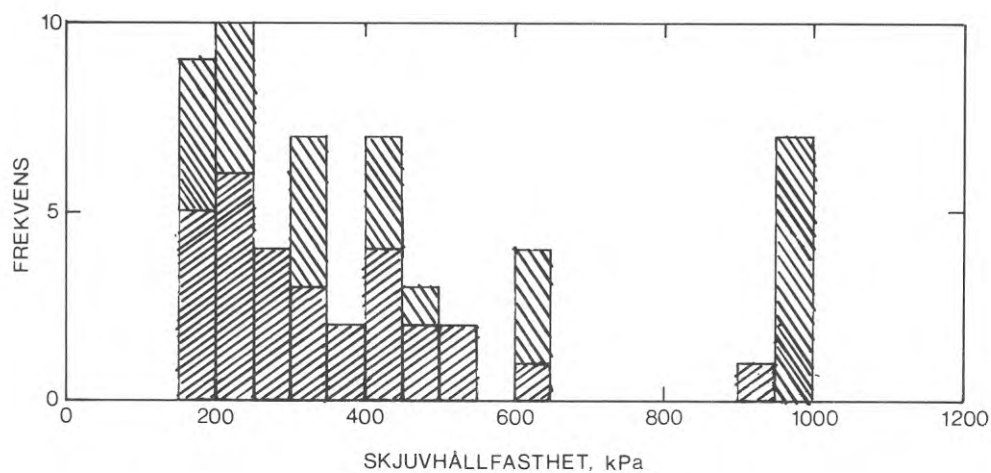


FIG. 33. Frekvensdiagram över den ostörda moränlerans hållfasthet enligt konförsök (Sparta, Lund). ▨, laboratorieförsök; ▩, fältförsök.

Frequency diagram of the shear strength of the undisturbed boulder clay according to fall cone tests (Sparta, Lund). ▨, laboratory tests; ▩, field tests.

TAB. 3 Konhållfastheten hos packad moränlera vid olika portal och vattenhalt (Sparta, Lund). (Medelvärden)

Portal e_o	Torrdensitet $\rho_{d'}$, t/m ³	Vattenhalt w_o , %	Skjuvhållfasthet τ_{fu} , kPa	Antal försök
0,82	1,47	16,7	103	15
0,61	1,66	16,6	128	15
0,54	1,73	16,9	182	15
0,47	1,82	14,2	640	10
0,46	1,84	17,2	184	15
0,54	1,73	19,3	75	10

$$\tau_{fu}^{\text{medel}} = 320 \text{ kPa} \quad (\tau_{fu} < 600 \text{ kPa})$$

Om medelvärdet bestäms för alla utförda försök blir detta 430 kPa.

Hållfastheten bestämdes även hos moränlera packad med olika arbete och vid olika vattenhalt. Medelvärdena redovisas i TAB. 3.

Som framgår av TAB. 3 är hållfastheten starkt beroende av såväl portal som vattenhalt. I FIG. 34-36 är dessa hållfastheter redovisade tillsammans med hållfastheten vid olika provvolym enligt enaxliga tryckförsök. Konhållfastheterna har i figurena redovisats för en volym bestämd enligt ekv. (12). Man finner att konhållfastheten stämmer väl med volymlberoendekurvor (enligt de enaxliga tryckförsöken). Konförsöket är tydligen en relevant metod att bestämma moränleras hållfasthet vid liten volym. Man skulle kunna benämna konhållfastheten moränlerans intakthållfasthet. Konmetoden är därför olämplig att använda för att bestämma moränleras verkamma hållfasthet. Detta framgår även av FIG. 79.

Vingborrförsök

Hållfastheten bestämdes endast med fickvingborr¹⁾ ($h = 32 \text{ mm}$, $d = 16 \text{ mm}$). 20 försök utfördes. Spridningen blev avsevärt mindre vid vingborrförsöken än vid konförsöken. Medelhållfastheten blev

$$\tau_{fu}^{\text{medel}} = 350 \text{ kPa}$$

Den minsta uppmätta hållfastheten blev 295 kPa och den största 395 kPa.

Medelhållfastheten är redovisad i FIG. 34, varvid den influerade volymen har antagits motsvara cylindervolym $V = \pi d^2 h / 4$, se s. 51. Vingborrhållfastheten stämmer väl med volymlberoendet bestämt med enaxliga tryckförsök. (Det är rimligt att hållfastheten uppmätt med vingborr blir större än den med enaxliga tryckförsök eftersom brottplanet är tvångsstyrt.)

1) Två försök utfördes med en vinge med $h = 84 \text{ mm}$, $d = 42 \text{ mm}$ och gav hållfastheten ca 300 kPa. Utrustningen var dock för klen.

Enaxliga tryckförsök

I FIG. 34 redovisas den uppmätta skjuvhållfastheten som funktion av provvolymen för ostörd och laboratoriepackad moränlera. Vattenhalten var vid försöken 16,5 – 17,4 % och skrymdensiteten ca 2,10 t/m³ hos ostörda prover och ca 2,14 t/m³ hos packade prover. I figuren har ett uttryck för hållfasthetens volymlberoende bestämts med minsta kvadratmetoden. Sambandet har antagits följa Weibulls teori. För den ostörda moränleran blir detta

$$\tau_{fu} = 558 V^{-0,312} \quad \text{kPa} \quad (13a)$$

och för den laboratoriepackade moränleran

$$\tau_{fu} = 193 V^{-0,130} \quad \text{kPa} \quad (13b)$$

där V uttrycks i cm³.

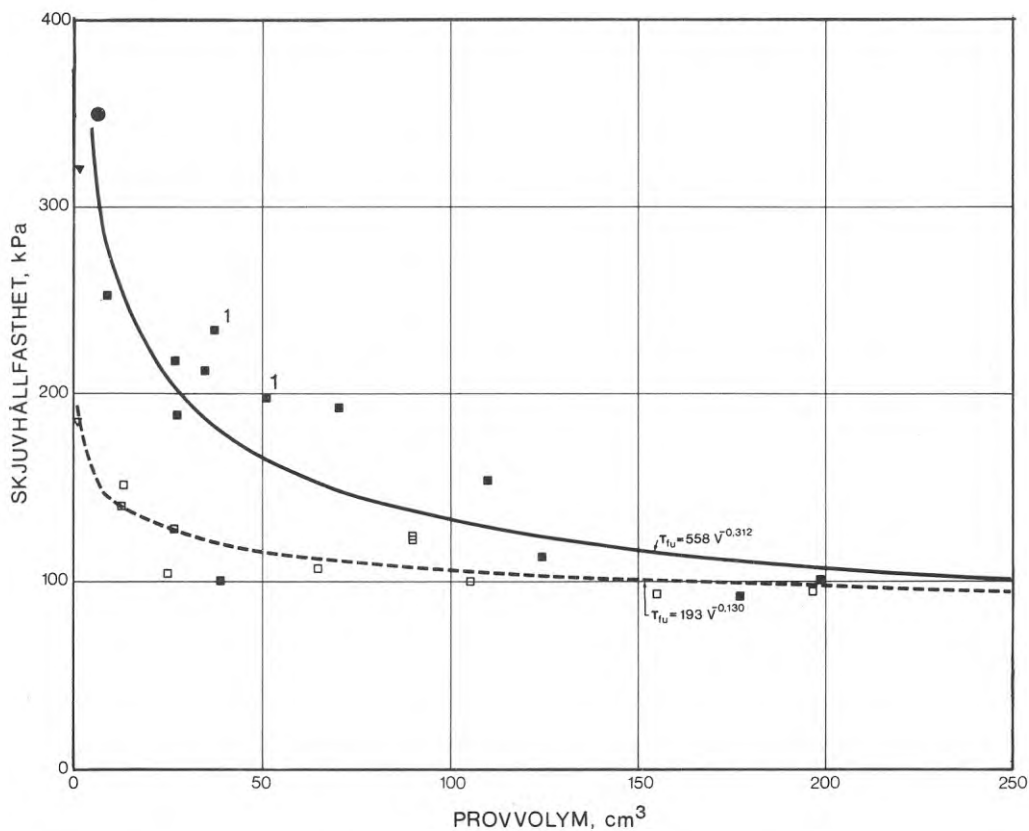


FIG. 34. Den odränerade skjuvhållfastheten som funktion av provvolymen hos ostörd och laboratoriepackad moränlera från Sparta, Lund. $e_0 = 0,46-0,54$; $w_0 = 16,5-17,4$ %. ■ □, enaxliga tryckförsök på ostörd resp. laboratoriepackad moränlera; ▼▼, konförsök på ostörd resp. laboratoriepackad moränlera; ●, vingborrförsök. 1) $h/d = 1$ vid enaxliga tryckförsök, övriga $h/d = 2$.

The undrained shear strength versus the specimen volume. Undisturbed and compacted boulder clay from Sparta, Lund. $e_0 = 0.46-0.54$; $w_0 = 16.5-17.4$ %. ■ □, unconfined compression test on undisturbed and recompacted specimens respectively; ▼▼, fall cone test on undisturbed and recompacted specimens respectively; ●, field vane test. 1) $h/d = 1$ for unconfined compression tests, otherwise $h/d = 2$.

Man finner att hållfastheten är större hos den ostörda moränleran än hos den laborierpackade. Skillnaden avtar med ökande provvolym. Spridningen är störst för den ostörda moränleran, vilket förklaras av att denna har en heterogenare struktur med linser av olika material, medan den packade moränleran består av ett hopälat material.

Spridningen avtar med ökande volym. Av FIG. 34 framgår det intressanta förhållandet att den lägsta uppmätta hållfastheten hos packad och ostörd moränlera inom volymintervallet 50–200 cm³ blev lika stor och kan förmodas motsvara hållfastheten i en stor jordvolym. En viss spridning i minimivärdena kan förklaras av mätfel. Minimivärdet (samma för ostörd och laborierpackad moränlera) kan sättas till

$$\tau_m = 95 \text{ kPa}$$

Enaxliga tryckförsök utfördes på moränlera laborierpackad till olika densitet vid naturlig vattenhalt. Provvolymer varierades. I FIG. 35 visas en sammanställning av resultaten. Spridningen blev mycket liten. Hållfasthetens volymberoende blev i stort sett lika vid de olika portalen.

För att studera vattenhaltens inverkan på hållfastheten packades moränleran vid tre olika vattenhalter med ett arbete motsvarande standard proctorpackning. Försöksresultaten redovisas i FIG. 36. En vattenhaltsökning medförde att såväl hållfasthetsvärdet som volymberoendet avtog. Förändringen återspeglades i att brottet blev segare med ökande vattenhalt.

Vattenhaltens och portalets inverkan på deformationsegenskaperna belyses i TAB. 4, där uppmätt brottkompression och elasticitetsmodul redovisas. Den senare är utvärderad som en sekantmodul mellan nollast och en last motsvarande halva tryckhållfastheten.

Moränleran blev alltmer plastiskt med ökande portal och som nämnts med ökande vattenhalt.

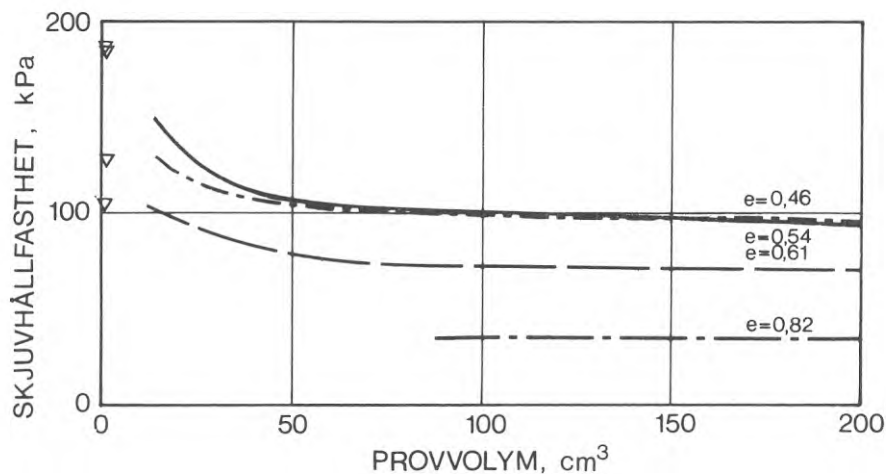


FIG. 35. Odränerad skjuvhållfasthet som funktion av provvolym och portal hos labororiepackad moränlera från Sparta, Lund. Kurvorna är bestämda med enaxliga tryckförsök utom punkterna ∇ som bestämts med konförsök. $w_0 = 16,6-17,2\%$.

The undrained shear strength versus the specimen volume and the void ratio. The curves are determined by unconfined compression tests except the points ∇ which are from fall cone tests. Compacted boulder clay from Sparta, Lund. $w_0 = 16.6-17.2\%$.

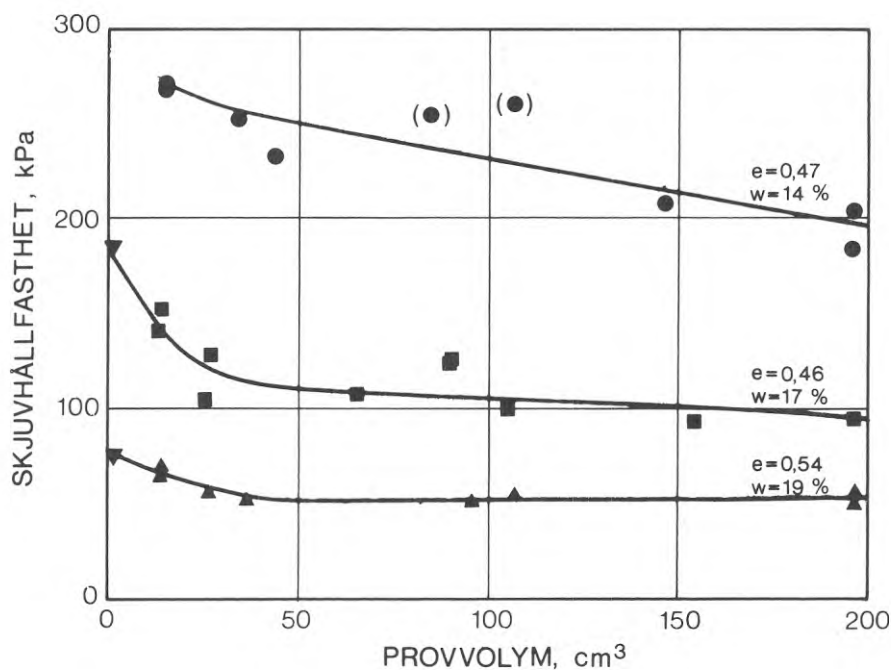


FIG. 36. Skjuvhållfastheten som funktion av vattenhalten och provvolymen hos moränlera packad enligt standard proctorförfarandet (Sparta, Lund). ∇ , konförsök; övriga punkter motsvarar enaxliga tryckförsök. (○), för lågt portal ($e_0 = 0,44$).

The undrained shear strength versus the specimen volume and the water content. All the specimens are compacted with an energy input corresponding to standard proctor (Sparta, Lund). ∇ , fall cone tests; the remainder are from unconfined compression tests. (○), too low a void ratio ($e_0 = 0.44$).

TAB. 4 E-modulen och skjuvhållfastheten enligt enaxliga tryckförsök som funktion av vattenhalt och portal hos laboratoriepackad moränlera från Sparta, Lund. (Medelvärden)

Portal e_o	Vatten- mättnings- grad $S_r, \%$	Vatten- halt $w_o, \%$	Skjuvhåll- fasthet ¹⁾ τ_{fu}, kPa	E-modul ²⁾ E, MPa	Brott- kompr. $\epsilon_f, \%$	Antal försök	
0,47	81	14,2	195	17,7	7	2 ¹⁾	3 ²⁾
0,46	100	17,2	94	3,9	13	2 ¹⁾	3 ²⁾
0,54	95	19,3	53	1,1	25	2 ¹⁾	3 ²⁾
0,54	84	16,9	98	7,1	10	3 ¹⁾	6 ²⁾
0,61	73	16,6	69	7,3	4	3 ¹⁾	3 ²⁾
0,82	54	16,7	34	3,6	3	3 ¹⁾	3 ²⁾

1) $V = 150 - 200 \text{ cm}^3$

2) $V = 100 - 200 \text{ cm}^3$

Hållfasthetens och elasticitetsmodulens stora vattenhaltsberoende visas i FIG. 37. Observeras bör att portalet inte var lika stort vid de olika vattenhaltarna. Volymberoendet hos hållfasthet och elasticitetsmodul tycks kunna försummas vid vattenhalter över 20 %. Av figuren framgår att hållfastheten och elasticitetsmodulen (definierad enligt ovan) är lika stor hos packade och ostörda prover vid provvolymen $150 - 200 \text{ cm}^3$.

Hållfastheten uppmätt inom provvolymintervallet $150 - 200 \text{ cm}^3$ som funktion av ursprunglig vattenhalt och ursprungligt portal har bestämts till

$$\tau_{fu} = 0,087 w_o^{-3,11} e_o^{-2,22} \text{ kPa} \quad (14)$$

Sambandet är starkt ($R = 0,96$, signifikans = 97,5 %).

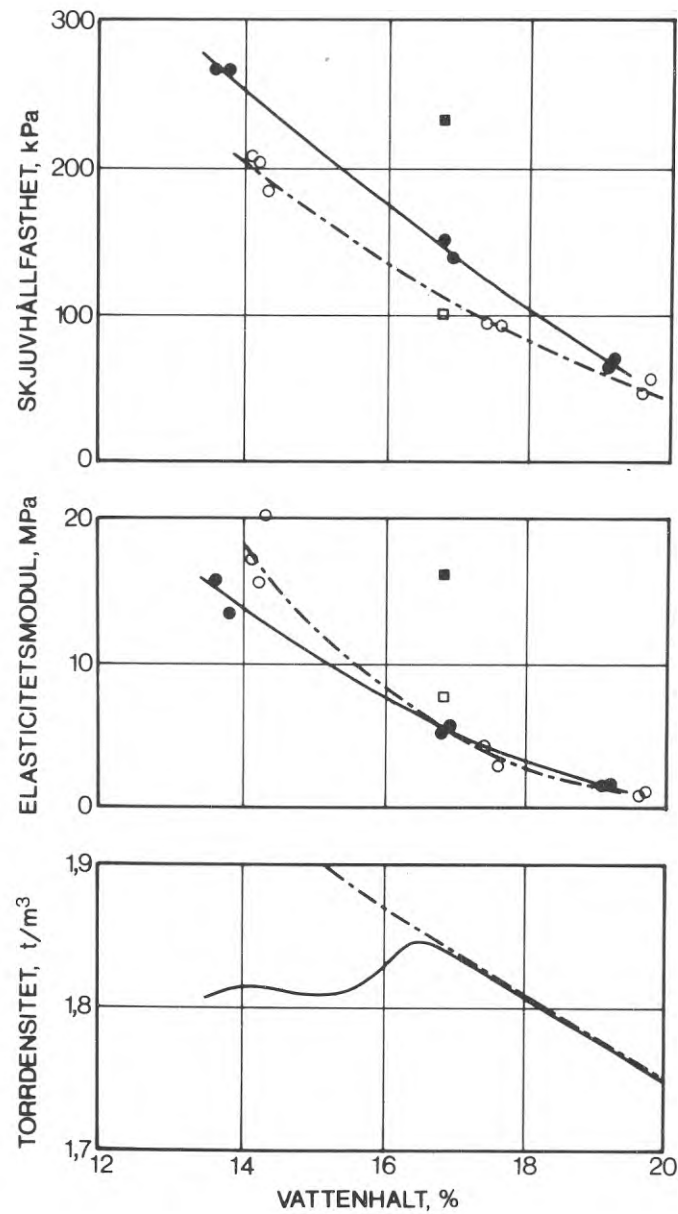


FIG. 37. Skjuvhållfasthetens och elasticitetsmodulens vattenhaltsberoende hos laboratoriepackad och ostörd moränlera vid volymintervallen 12–15 och 150–200 cm³ (Sparta, Lund).

■, V = 12–15 cm³ och □, V = 150–200 cm³ avser ostörd moränlera samt ●, V = 12–15 cm³ och ○, V = 150–200 cm³, avser laboratoriepackad moränlera.

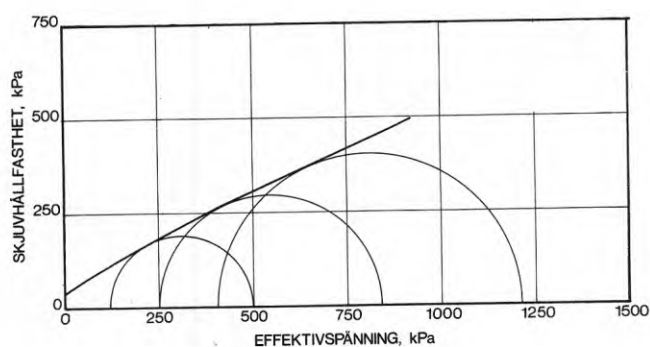
The undrained shear strength and the Young's modulus versus the water content. The parameters are determined by unconfined compression tests within the two volume intervals 12–15 and 150–200 cm³. Undisturbed and recompacted boulder clay from Sparta, Lund.

■, V = 12–15 cm³ and □, V = 150–200 cm³ for undisturbed boulder clay, and ●, V = 12–15 cm³ and ○, V = 150–200 cm³ for recompacted boulder clay.

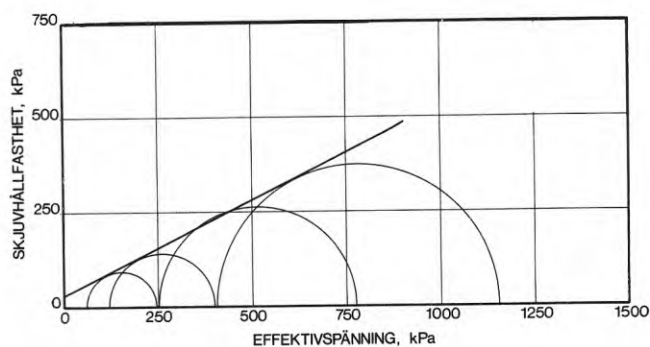
Treaxliga, dränerade tryckförsök

Liksom vid de enaxliga tryckförsöken undersöktes vid triaxialförsöken både ostörd och laboratoriepackad moränlera. De packade proverna undersöktes vid olika vattenhalt och portal.

FIG. 38a visar Mohrs spänningscirklar för ostörd moränlera och FIG. 38b för moränlera packad vid samma vattenhalt och till samma densitet som den ostörda moränleran.



Ostörd moränlera
Undisturbed boulder clay



Laboratoriepackad moränlera
Recompacted boulder clay

FIG. 38. Dränerade triaxialförsök på ostörd och laboratoriepackad moränlera från Rehab, Lund.
 $w_0 \approx 16\%$; $e_0 = 0,44-0,47$.

Drained triaxial tests on the undisturbed and recompacted boulder clay from Rehab, Lund.
 $w_0 \approx 16\%$; $e_0 = 0,44-0,47$.

Triaxialförsök utfördes även på moränlera packad vid vattenhalterna 14,1, 18,0 och 21,4 % med ett packningsarbete motsvarande standard proctor. Vidare undersöktes ursprungsportalens inverkan genom att packa moränlera vid vattenhalten ca 17 % med olika stort arbete. I TAB. 5 redovisas utvärderade hållfasthetsparametrar från dessa försöksserier. Spridningen blev mycket liten.

I motsats till vid de enaxliga tryckförsöken blev inte hållfasthetsparametrarna lika hos ostörd och laboratoriepackad moränlera. (Kohesionen är större hos den ostörda leran.)

TAB. 5 Ostörd och packad moränleras hållfasthetsparametrar enligt dränerade triaxialförsök. Den laboratoriepackade moränleran packades vid olika vattenhalt och till olika densitet. Vid en del av försöken har mobiliserade hållfasthetsparametrar (c'_1 och ϕ'_1) utvärderats vid 1 % axiell kompression. Hållfasthetsparametrarna är utvärderade vid $\varepsilon_f \leq 15$ %. (Sparta, Lund)

Typ	Torrdensitet $\rho_d, \text{t/m}^3$	Vattenhalt $w_o, \%$	Portal e_o	Brottkompr. $\varepsilon_f, \%$	Skjuvhållfasthetsparametrar			
					c' kPa	ϕ' grader	c'_1 kPa	ϕ'_1 grader
Ostörd	1,82	15,6	0,47	5-6	60	26,5 ¹⁾	60	15,6
Packad ²⁾	1,81	14,1	0,48	>16	34	27,0	8	8,0
Packad ²⁾	1,85	16,5	0,44	9-12	27	27,0	20	13,7
Packad ²⁾	1,80	18,0	0,48	9-12	20	27,6	29	9,5
Packad ²⁾	1,71	21,4	0,56	11->17	10	27,5	17	5,1
Packad	1,76	16,6	0,52	17-19	28	25,7		
Packad	1,67	16,8	0,60	18-19	14	25,1		
Packad	1,48	17,2	0,80	19-24	8	24,9		

1) ϕ' bestämd i intervallet $\sigma' = 250 - 500$ kPa

2) Packad med ett arbete motsvarande standard proctorpackning.

För det fall vattenhalten är lika ($w \approx 17$ %) framgår av TAB. 5 att såväl kohesionen som friktionsvinkeln avtar med ökande portal (se även FIG. 76).

Resultaten från de försöksserier moränleran packades med ett arbete motsvarande standard proctor och vattenhalten varierades redovisas i FIG. 39. Kohesionen blev i motsats till friktionsvinkeln starkt vattenhaltsberoende.

Kohesionens och friktionsvinkelns beroende av portal och vattenhalt har bestämts med minsta kvadratmetoden för den laboratoriepackade moränleran. Som resultat erhöles

$$c' = 0,109 w_o^{-2,20} e_o^{-2,01} \quad \text{kPa} \quad (15)$$

Detta samband är starkt ($R = 0,97$, signifikans = 95 %). Däremot kunde inte friktionsvinkelns beroende förutsägas med tillräcklig säkerhet troligen på grund av dess lilla variation. Försöksresultaten blev dessutom i viss mån motsägande.

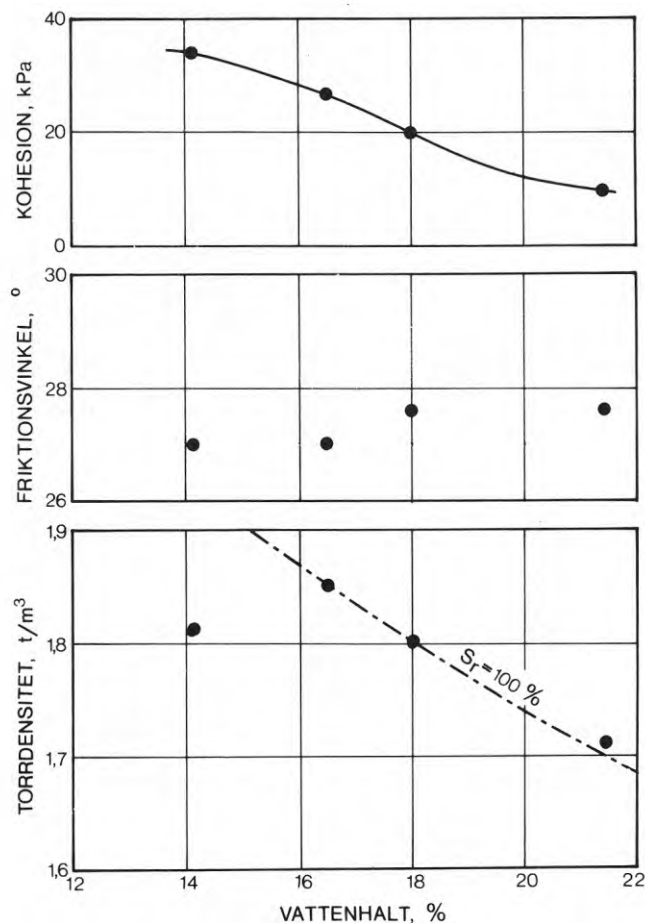
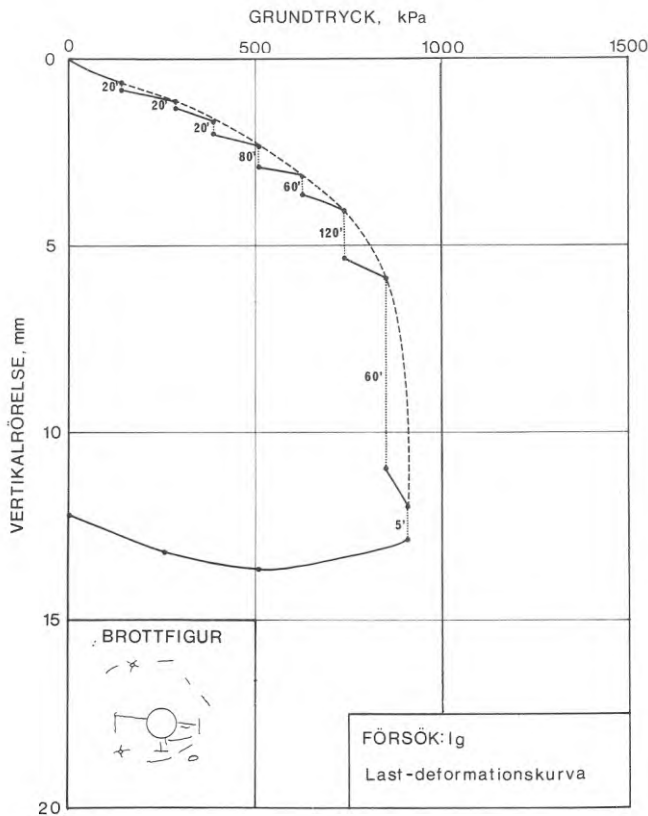


FIG. 39. Effektiv kohesion, effektiv friktionsvinkel och packningskurva som funktion av ursprunglig vattenhalt hos packad moränlera från Sparta, Lund. $d = 50$ mm; $h = 100$ mm.

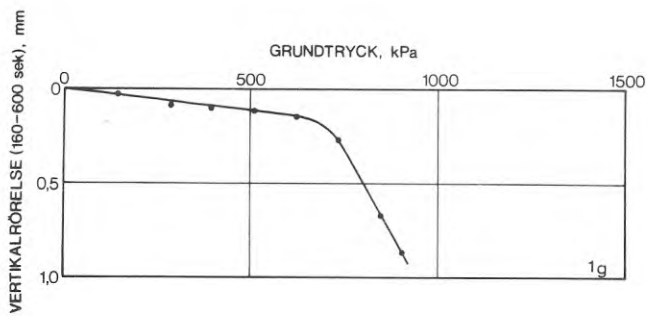
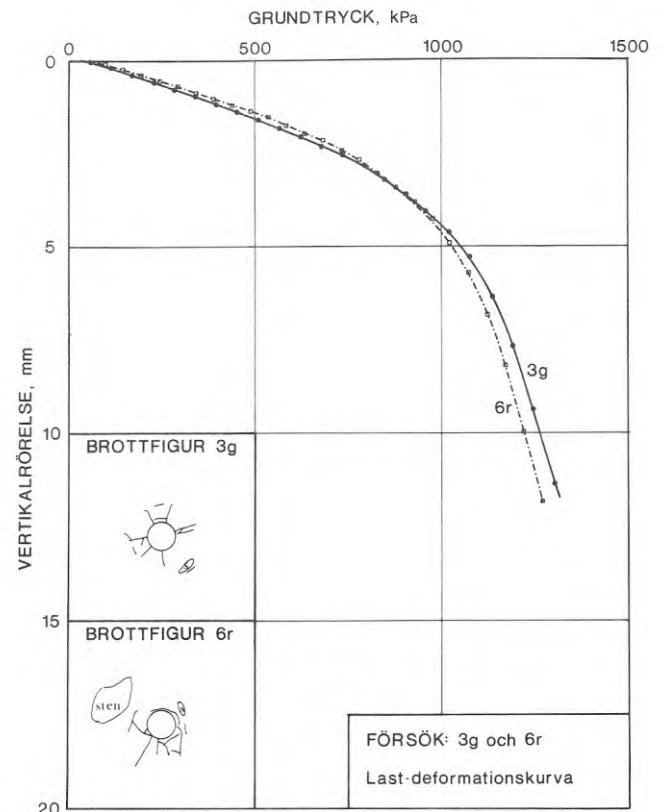
Effective cohesion, effective angle of friction and compaction curve versus initial water content. Drained triaxial tests $d = 50$ mm; $h = 100$ mm. Recompacted boulder clay from Sparta, Lund.

Plattförsök

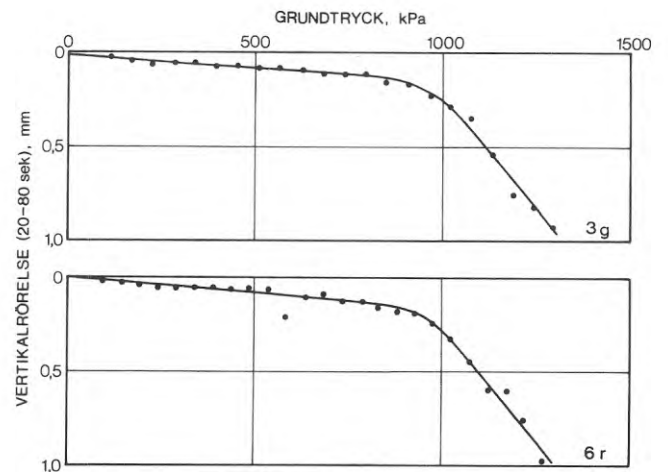
Fem plattförsök utfördes. Vid samtliga försök var plattdiametern 0,15 m. Vid tre av försöken belastades glatta stålplattor och vid två av försöken platsgjutna betongplattor. Vid tre försök fick lasten ligga på tills deformationstillväxten stabiliserats enligt kriteriet på s. 60, medan vid de två övriga försöken varje laststeg fick ligga på i 80 sek. FIG. 40 redovisar last-sättningskurvor och kryphastighetskurvor för ett långsamt och två snabba försök.



a



b



Långsamt försök
Slow test

Snabba försök
Fast tests

FIG. 40. Resultat från ett långsamt och två snabba plattförsök. Plattediameter 0,15 m. g, glatt stålplatta; r, platsgjuten betongplatta. a) Last-sättningskurva (--- antagen 80 s-kurva). b) Kryphastighetskurva.

Results from one slow and two fast plate load tests. Plate diameter 0.15 m. g, smooth steel plate; r, in situ cast concrete plate. a) Load-settlement curve (--- assumed 80 s-curve). b) Creep rate curve.

Att utvärdera en bärighet från last-sättningskurvan är svårt. Ett tämligen entydigt värde kan däremot utvärderas om man utgår från kryphastighetskurvan, se s. 60. Utvärderade kritiska grundtryck från denna senare kurva redovisas i TAB. 6

TAB. 6 Kritiskt grundtryck bestämt från plattförsök ($d = 0,15$ m)

Försök	Plattyp ¹⁾	Belastningshastighet	Kritiskt grundtryck kPa
1	glatt	långsam	710
2	glatt	långsam	740
4	skrovlig	långsam	≈ 700
3	glatt	snabb	950
6	skrovlig	snabb	950

1) glatt betecknar molybdendisulfidinsmord stålplatta, skrovlig betecknar platsgjuten betongplatta.

Någon skillnad i kritiskt tryck erhöles inte mellan glatta och skrovliga plattor. Som medelvärde kan man för de långsamma försöken ansätta det "dränerade" kritiska trycket

$$q_{kd} = 700 \text{ kPa}$$

och från de snabba försöken det "odränerade" kritiska trycket

$$q_{ku} = 950 \text{ kPa}$$

I avsnitt 4.4 kommer dessa kritiska tryck att kopplas till uppmätta hållfasthetsparametrar i laboratorium och fält.

Ringskjuvförsök

Vid ringskjuvförsöken uppstod svårigheter att bestämma skjuvytans storlek, varför skjuvdonet modifierades. Därefter utfördes endast ett fåtal försök inom ett snävt normalspänningsintervall, varvid man får en uppfattning om spridningen. I FIG. 41 jämförs resultaten med brottenveloperna från de dränerade triaxialförsöken på ostörd och packad moränlera.

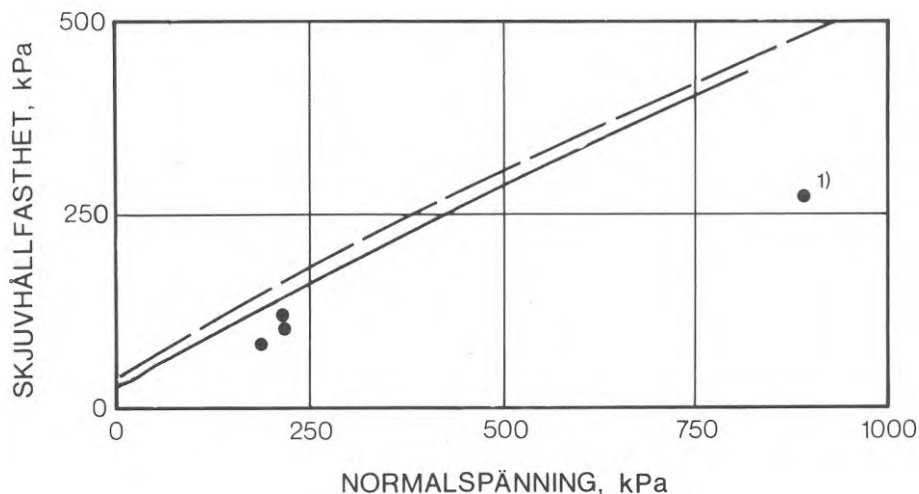


FIG. 41. Resultat från ringskjuvförsök jämförda med brottenveloperna från dränerade triaxialförsök på ---, ostörd; —, packad moränlera (Sparta, Lund). 1) Brottillstånd i jorden av hög normalspänning.

Results from field ring shear tests compared with the failure envelopes according to triaxial tests on ---, undisturbed; —, recompacted boulder clay (Sparta, Lund). 1) Failure due to high applied vertical pressure.

Ringskjuvförsöken gav en något lägre hållfasthet än triaxialförsöken. Orsaken kan dels vara en felskattning av skjuvarean, men troligen framför allt på grund av att skjuvytan passerade genom svaghetszoner.

3.4.2 Rehab, Lund

Försöken omfattade fält- och laborieförsök. Fältförsöken utgjordes av plattförsök och vingborrförsök och laborieförsöken av enaxliga och treaxliga tryckförsök, konförsök och ödometerförsök. Laborieförsöken utfördes på ostörd och laboriepackad moränlera.

I FIG. 42 visas en plan över området med borrhöjningar och läget av de två provgroparna angivna. I FIG. 43 redovisas resultatet av en grundundersökning utförd av AB Jacobson & Widmark.

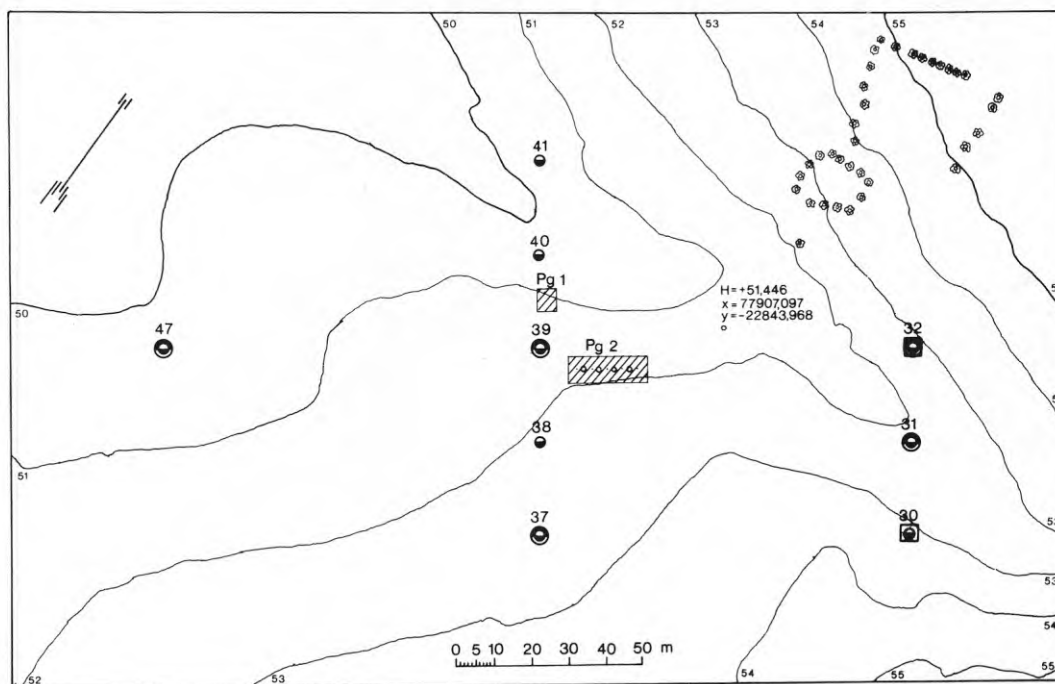


FIG. 42. Plan över försöksplatsen. Pg 1 och Pg 2 är provgroparna. Nivålinjer och borrhöjningar är redovisade.

Plan of the test field showing the test pits Pg 1 och Pg 2, the contours and the borings.

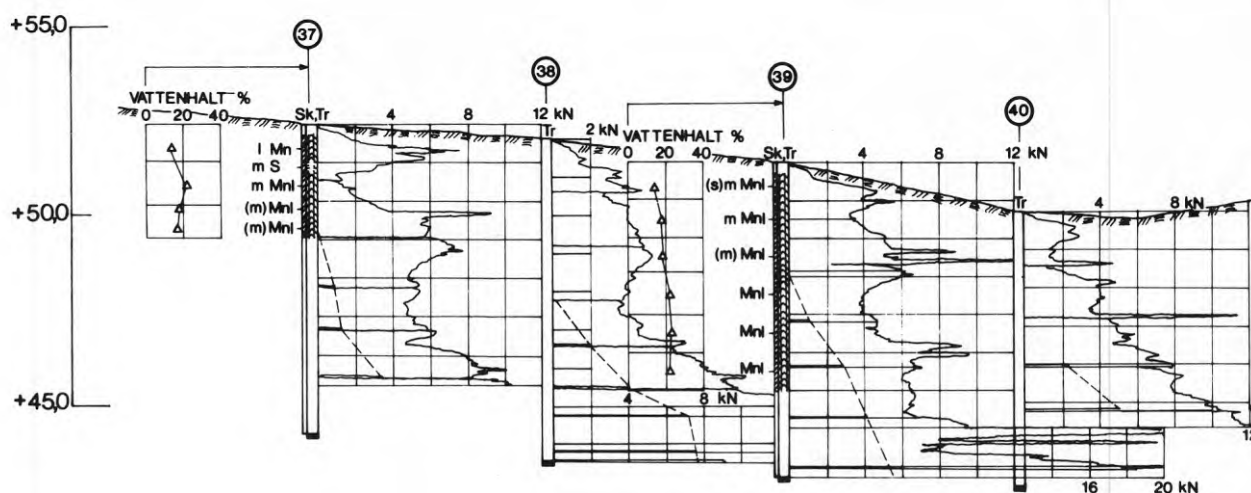


FIG. 43. Resultat från sonderingar och provtagningar.
Results from soundings and samplings.

Fallkonförsök

Konförsöken utfördes i laboratorium på ostörd och packad moränlera. Konen hade spetsvinkeln 30° och massan 602 g. 92 försök utfördes på ostörd och 113 försök på laboratoriepackad moränlera. I FIG. 44 redovisas frekvensdiagram över konintryck för båda moränleretyperna. I nämnda figur är även teoretiska normalfördelningskurvor inlagda.

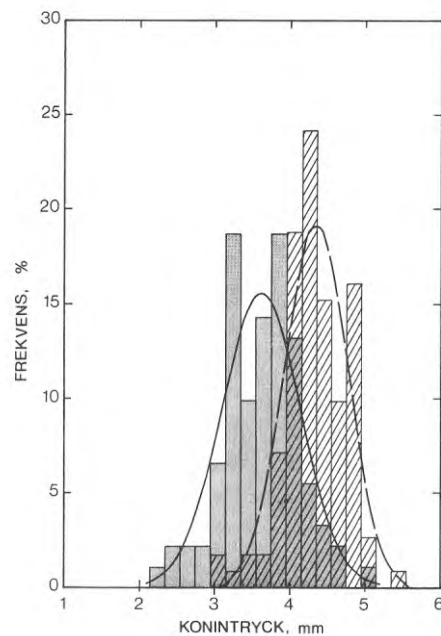


FIG. 44. Frekvensdiagram över konintrycket vid konförsök på ostörd och laboratoriepackad moränlera. Normalfördelningskurvorna är inlagda. ▨, ostörd moränlera; ■, laboratoriepackad moränlera.

The frequency diagram for the cone penetration under fall cone tests on undisturbed and compacted boulder clay. The standard frequency curves are also shown. ▨, undisturbed boulder clay; ■, recompacted boulder clay.

I TAB. 7 visas medelvärden och standardavvikelser.

TAB. 7 Resultat från konförsök på ostörd och laboratoriepackad moränlera (Rehab, Lund)

Typ	Konintryck, mm		Medelskjuvhållfasthet kPa
	Medelvärde	Standardavvikelse	
Ostörd moränlera	3,62	0,52	460
Packad moränlera	4,34	0,42	320
Ostörd och packad moränlera	4,02	0,59	373

Hållfastheten liksom spridningen blev större hos ostörd än hos packad moränlera. Beaktas bör att konintrycken egentligen blev för små för att vara relevanta vid utvärdering av hållfastheten.

Medelhållfastheterna är inlagda i FIG. 45. Den ostörda moränlerans hållfasthet stämmer väl med hållfasthetens volymberoende baserat på resultaten från de enaxliga tryckförsöken. Liksom för moränleran från Sparta, Lund synes man kunna använda konhållfastheten som ett mått på moränlerans in-takthållfasthet.

Vingborrförsök

20 vingborrförsök utfördes med fickvingborr. Medelhållfastheten blev 370 kPa och spridningen relativt liten. Den största uppmätta hållfastheten blev 430 kPa och den lägsta 280 kPa. I FIG. 45 är hållfastheten inlagd för en volym motsvarande en cylinder begränsad av glidytor. Vingborrhållfastheten, liksom konhållfastheten, överensstämmer väl med hållfasthetens volymberoende bestämt med enaxliga tryckförsök. 80 m norr om provgrop 1 och 2 (i skogs-dungen, se FIG. 42) utfördes vingborrförsök med olika vingdimensioner. Försöken utfördes inom djupintervallet 1,7 till 3,4 m under markytan. Försöksprogram och resultat redovisas i TAB. 8 nedan. Nämnas bör att hållfastheten ökade svagt mot djupet.

TAB. 8 Resultat från vingborrförsök 80 m norr om provgroparna.

Vingdimension mm	Typ	Antal försök	Medelhållfasthet kPa	Minimihållfasthet kPa (antal data)	
16 x 32	Geonor	4	350		
30 x 60	SGI	9	270	≈ 250	(5)
35 x 81	Nilcon	10	320	≈ 240	(2)
40 x 80	Nilcon	2	265		
50 x 100	DGI	11	245	≈ 150	(2)

Som synes blev, i motsats till vad Lo (1970) antog, såväl den vingborrade hållfasthetens medelvärde som minimivärde volymberoende. Volymberoendet blev inte lika starkt som vid de enaxliga tryckförsöken.

Enaxliga tryckförsök

I FIG. 45 redovisas hållfastheten bestämd med enaxliga tryckförsök som funktion av provvolymen för ostörd och laboratoriepackad moränlera - den senare packad vid naturlig vattenhalt till naturlig densitet. På grund av stora svårigheter att framställa ostörda provkroppar utgör de inlagda kurvorna medelvärdeskurvor till ostörda och packade prover. För jämförelsens skull har även kon- och vingborrhållfastheten inlagts i figuren.

Hos denna lera tycks hållfastheten vara densamma hos ostörd och laboratoriepackad moränlera inom det undersökta volymintervallet. Med minsta kvadratmetoden har två olika funktioner anpassats till försöksresultaten. Med samma ansats som för moränleran från Sparta, Lund blir uttrycket

$$\tau_{fu} = 949 V^{-0,383} \quad \text{kPa} \quad (16)$$

Om man använder en regressionsmetod som bestämmer ett asymptotvärde blir sambandet

$$\tau_{fu} = 95 + 277 \cdot 1,01^{-V} \quad \text{kPa} \quad (17)$$

I ekv. (16) och (17) är V uttryckt i cm^3 .

Andra kurvor kan tecknas som skulle ansluta lika väl till försöksresultaten, exempelvis en hyperbelkurva med asymptotvärde. Statistiskt sett är ekv. (16) bäst lämpad med hänsyn till att spridningen avtar med ökande volym (se även FIG. 78).

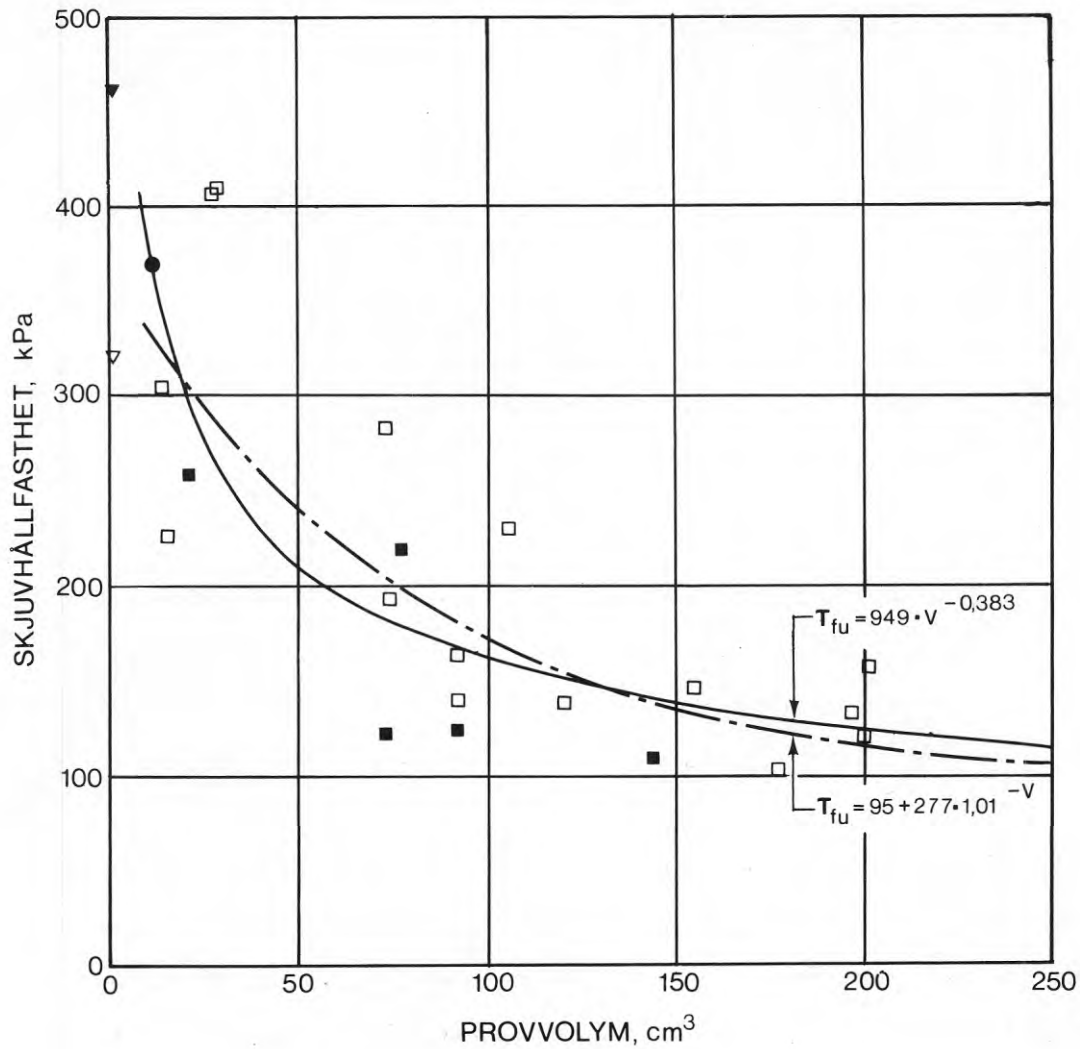


FIG. 45. Odränerad skjuvhållfasthet som funktion av provvolymen hos ostörd och laboriepackad moränlera från Rehab, Lund. $w_0 \approx 16,4\%$, $e_0 \approx 0,49$. ■ □, enaxligt tryckförsök på ostörd resp. packad moränlera; ▼ ▽, konförsök på ostörd resp. packad moränlera; ●, vingborrförsök.

The undrained shear strength versus the specimen volume. Undisturbed and recompacted boulder clay from Rehab, Lund. $w_0 \approx 16.4\%$, $e_0 \approx 0.49$. ■ □, unconfined compression test on undisturbed and recompacted specimens respectively; ▼ ▽, fall cone test on undisturbed and recompacted specimens respectively; ●, field vane test.

Hållfastheten i en stor jordvolym blir enligt ekv. (17) 95 kPa. Om man i stället, på samma sätt som för moränleran från Sparta, Lund, antar att den verksamma hållfastheten bestäms av minimihållfastheten uppmätt inom det undersökta volymintervallet blir denna

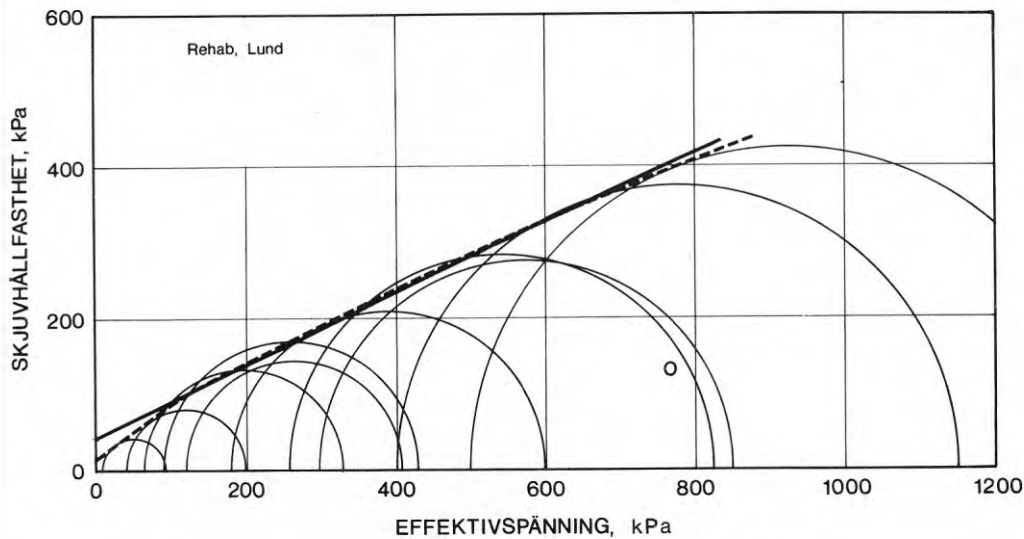
$$\tau_m = 110 \text{ kPa}$$

Med hänsyn tagen till ett mätfel på ca 5 kPa sammanfaller τ_m med uppmätt minimivärde inom volymen 70 - 200 cm³. Denna verksamma hållfasthet är troligen korrektare än den beräknad enligt ekv. (17) då som ovan nämnts ekv. (17) är mindre lämplig ur statistisk synpunkt.

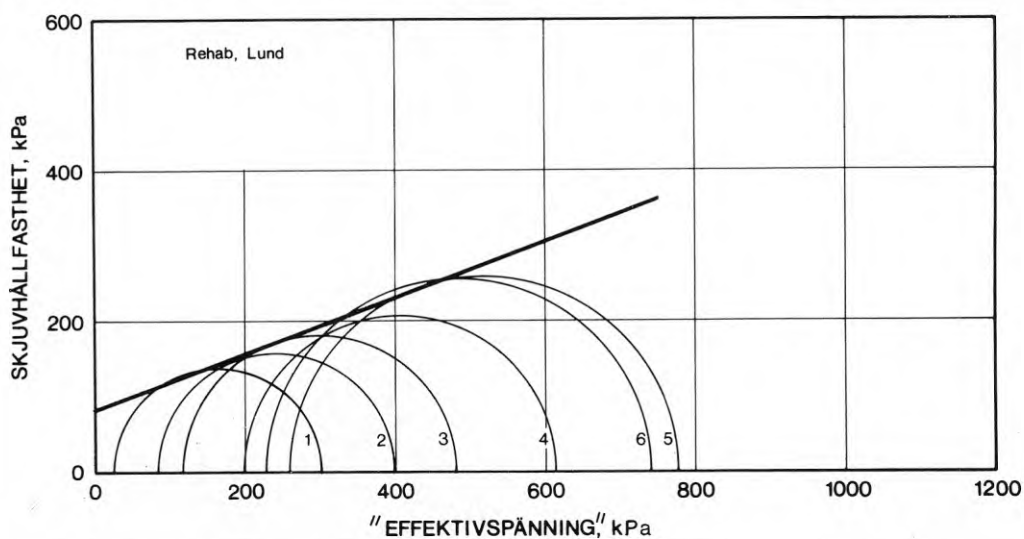
Treaxliga tryckförsök

De treaxliga tryckförsöken utfördes såväl konsoliderade dränerade som konsoliderade odränerade. På grund av svårigheter att framställa ostörda provkroppar undersöktes endast ett ostört prov, medan övriga prover framställdes genom laboratoriepackning vid naturlig vattenhalt till naturlig densitet.

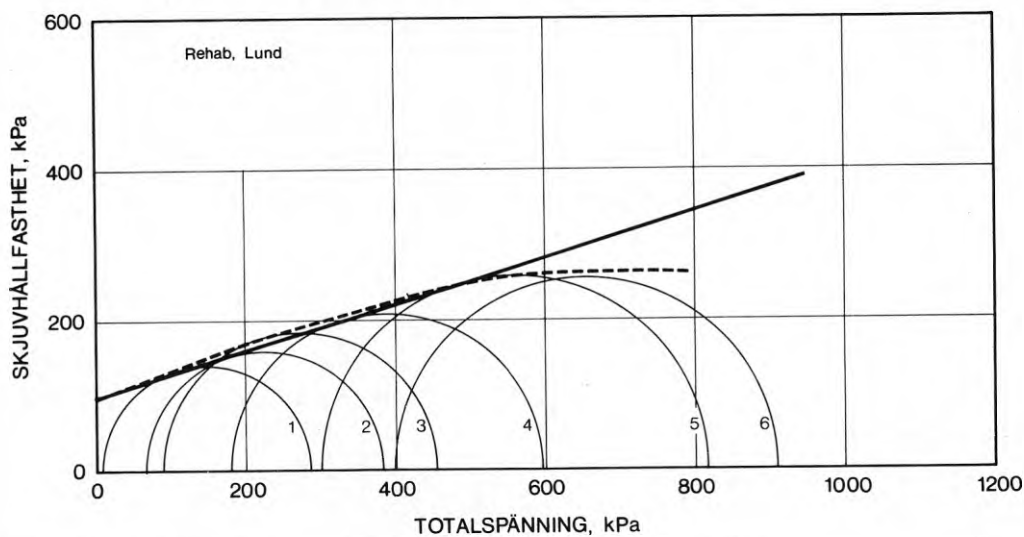
Triaxialförsöken redovisas i form av Mohrs cirklar i FIG. 46. De odränerade försöken redovisas för dels totalspänningar och dels effektivspänningar beräknade från uppmätta portryck. Man måste emellertid beakta att moränleran inte var vattenmättad, varför de beräknade effektivspänningarna kan avvika från de verkliga.



Konsoliderade, dränerade försök (o anger ostörd moränlera).



Konsoliderade, odränerade försök. Beräknade effektiva spänningar.

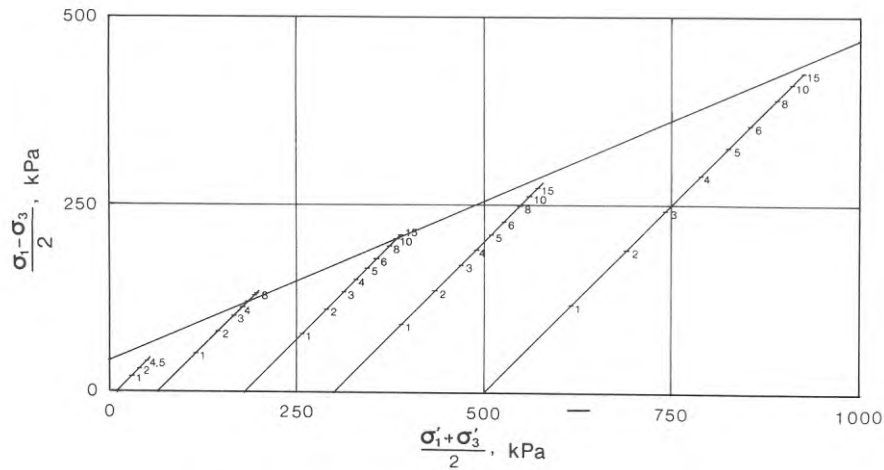


Konsoliderade, odränerade försök. Totalspänningsanalys.

FIG. 46. Triaxialförsök på laborierpackad moränlera från Rehab, Lund. ———, envelopp är en rak medelenvlope; - - -, envelopp är ansluten till mätdata. $w_0 = 16,8\%$; $e_0 = 0,49$.

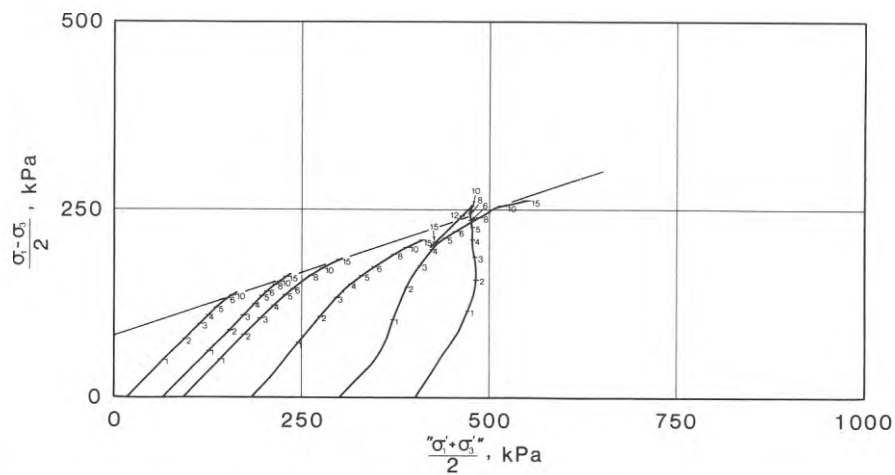
Triaxial tests on the recompact boulder clay from Rehab, Lund. ———, a straight average envelope; - - -, dashed envelope is for experimental data. $w_0 = 16,8\%$; $e_0 = 0,49$.

För att klargöra brottprocessen redovisas i FIG. 47 spänningsvägarna från några av de dränerade och odränerade försöken.



Dränerade försök.

Drained tests.



Odränerade försök. Beräknade effektivspänningar från uppmätta porttryck.

Undrained tests. Effective stresses according to measured pore pressures.

FIG. 47. Spänningsvägen vid triaxialförsök på laboratoriepackad moränlera. Motsvarande försök är redovisade i form av Mohr-diagram i FIG. 46. Siffrorna anger axiell kompression i procent.

Stress paths from some of the triaxial tests on the recompacted boulder clay. Corresponding tests are shown in FIG. 46. The figures on the curves are the axial compression in per cent.

Brottenveloppen kan vid de dränerade försöken med god noggrannhet ersättas med en rät linje, utom vid små celltryck (mindre än ca 40 kPa). Skillnaden mellan den ostörda och den laboratoriepackade moränlerans hållfasthet ligger inom spridningsmättet.

En effektivspänningsanalys visar att den uppmätta hållfastheten vid de odränerade försöken sammanfaller med hållfastheten vid de dränerade försöken, när konsolideringstrycket överstiger 200 kPa. Vid lägre konsolideringstryck än 200 kPa blir däremot den dränerade hållfastheten beräknad från de odränerade försöken större än hållfastheten uppmätt vid de dränerade försöken. Orsaken till skillnaden i hållfasthet vid låga celltryck kan som ovan nämnts bero av att portrycket inte mättes korrekt vid låga (även negativa) tryck på grund av att moränleran inte var vattenmättad.

Om man för samtliga fall approximerar brottenveloppen med en rät linje blir hållfasthetsparametrarna enligt TAB. 9.

TAB. 9 Hållfasthetsparametrar bestämda från triaxialförsök på laboratoriepackad moränlera (1 försök på ostörd moränlera). (Rehab, Lund)

Typ av triaxialförsök	Hållfasthetsparametrar		Brottkompr. ϵ_f %
	c kPa	ϕ grader	
Konsoliderat dränerat	42	25,4	8-15
Konsoliderat odränerat; totalspänningsanalys	112	14,0	11-> 15
Konsoliderat odränerat; effektivspänningsanalys	85	19,6	11-> 15

Vid de konsoliderade, odränerade försöken blir vid totalspänningsanalys skjuvhållfastheten 112 kPa vid celltrycket noll. Denna överensstämmer med den verksamma skjuvhållfastheten bestämd med enaxliga tryckförsök.

Plattförsök

Plattförsöken bestod av modell- och fullskaleförsök. Modellplattförsöken omfattade glatta stålplattor och platsgjutna betongplattor med diametrar mellan 0,08 och 0,15 m. Totalt utfördes 4 långsamma och 3 snabba försök. Fullskaleförsöken omfattade 4 platsgjutna betongplattor med diametrarna 0,68 m (1 platta) och 1,0 m (3 plattor). Tre av försöken utfördes långsamt och ett snabbt. I TAB. 10 redovisas försöksprogrammet liksom de utvärderade kritiska grundtrycken. FIG. 48 - 50 visar last-sättningskurvor och kryphastighetskurvor för några av försöken. I bilagan visas motsvarande kurvor för övriga fullskaleförsök.

TAB. 10 Belastningsprogram och utvärderade kritiska grundtryck vid plattförsök i Rehab, Lund.

Försök	Platttyp ¹⁾	Plattdiameter m	Belastningstid ²⁾	Kritiskt grundtryck kPa
M1	glatt	0,08	snabb	2950
M2	glatt	0,08	långsam	1940
M3	skrovlig	0,10	långsam	2900
M4	skrovlig	0,11	snabb	2450
M5	skrovlig	0,15	långsam	2050
M6	glatt	0,15	långsam	1750
M7	glatt	0,15	snabb	1480
1	skrovlig	1,00	långsam	1080
2	skrovlig	0,68	långsam	940
3	skrovlig	1,00	långsam	830
4	skrovlig	0,99	snabb	800

1) Glatt betecknar molybdendisulfidsmord stålplatta. Skrovlig betecknar platsgjuten betongplatta.

2) Långsamt försök innebär att last under kritiskt tryck legat på tills stabilisering inträtt. Snabb innebär att varje laststeg legat på i 8 min.

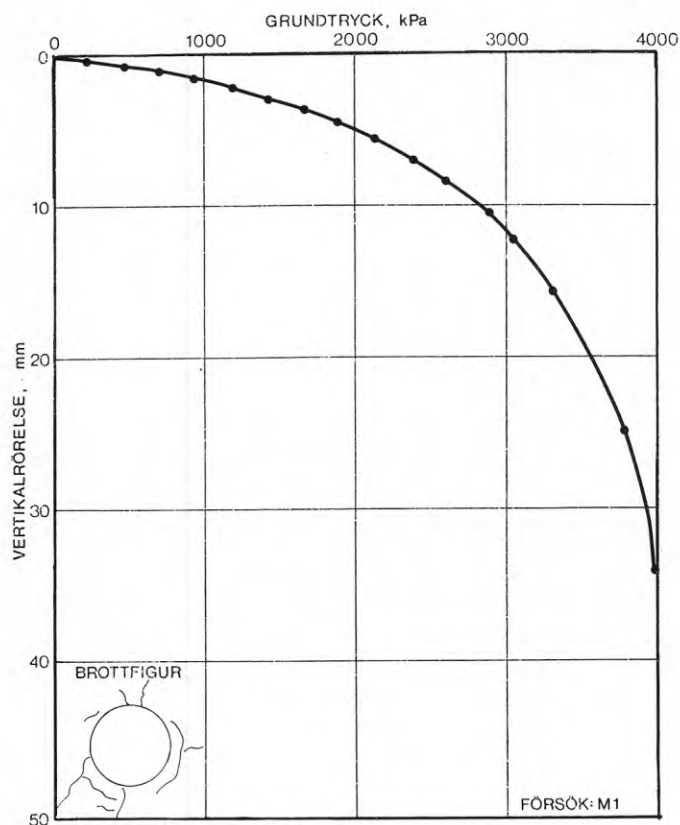


Fig. 48 a)

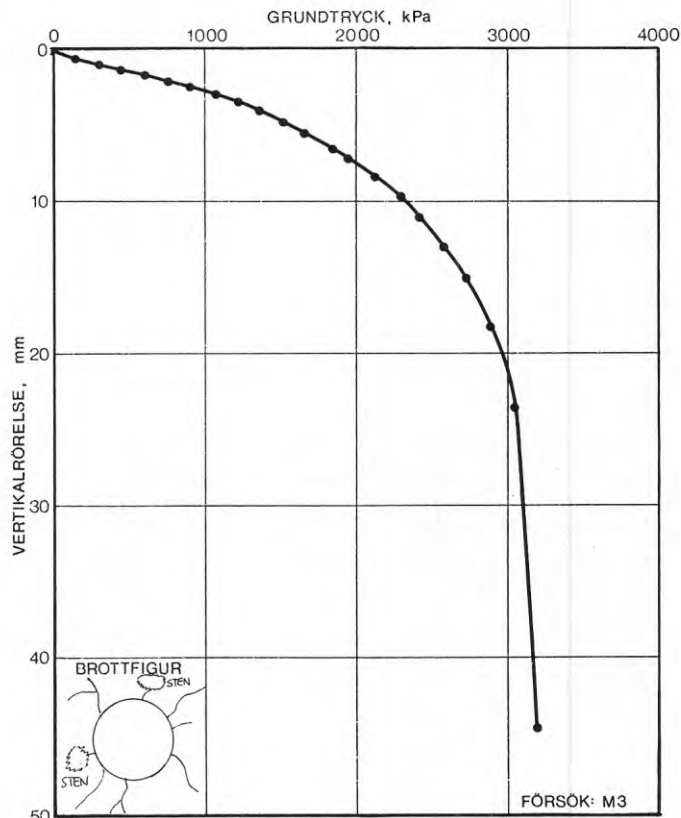


Fig. 49 a)

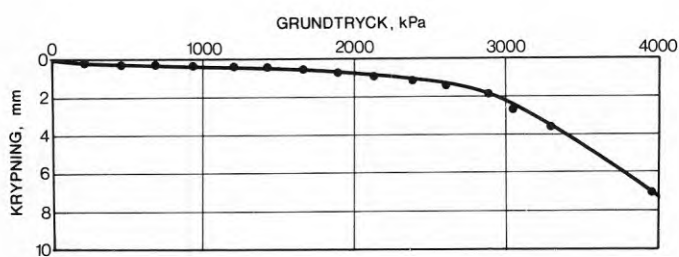


Fig. 48 b)

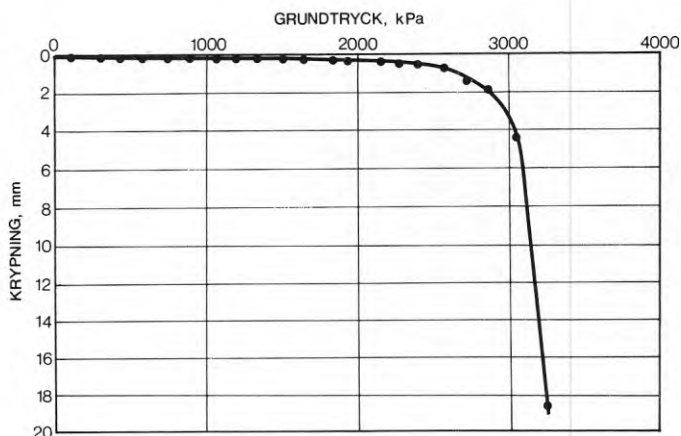


Fig. 49 b)

FIG. 48–49. Modellplattförsök. De övre figurerna visar last-sättningskurvorna och de nedre kryphastighetskurvorna (krypning mellan 1 och 8 min).

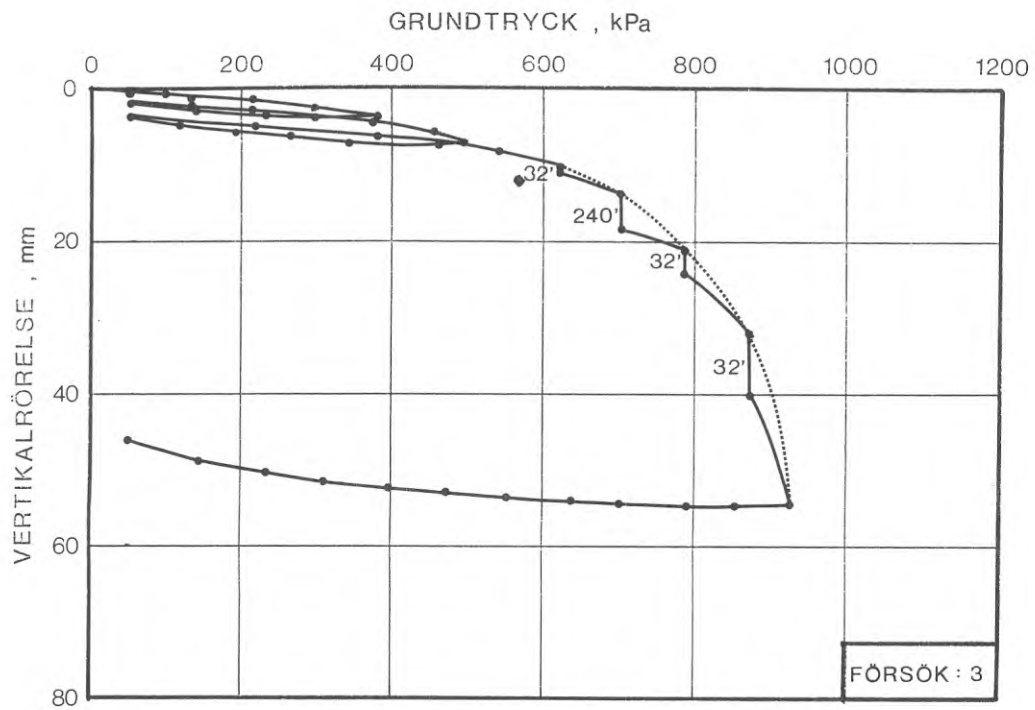
FIG. 48. Glatt metallplatta $d = 0,08$ m, snabbt försök.

FIG. 49. Platsgjuten betongplatta $d = 0,10$ m, långsamt försök.

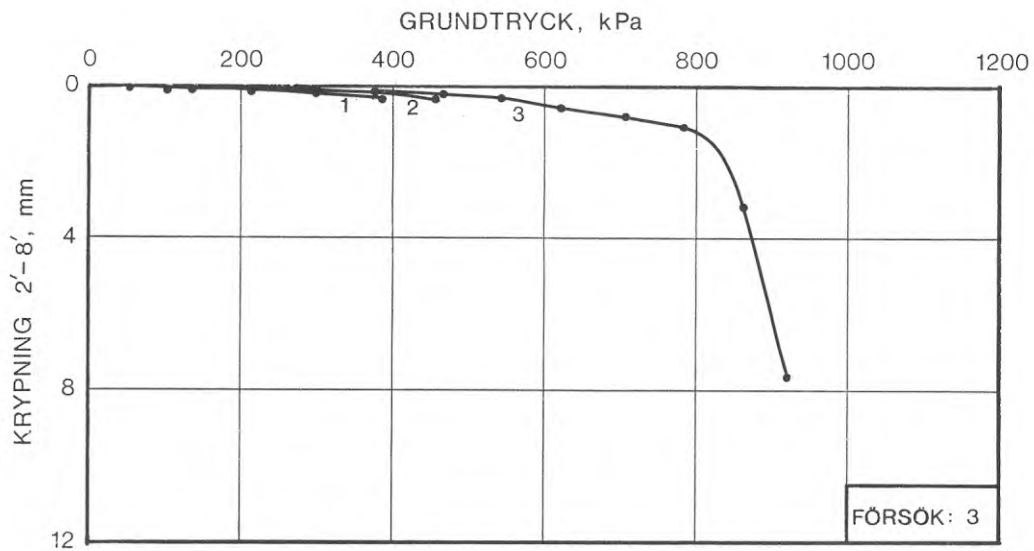
Plate load tests in model scale. The upper figures show load-settlement curves and the lower figures creep-rate curves (creep between 1 and 8 min).

FIG. 48. Smooth metal plate $d = 0.08$ m, slow test.

FIG. 49. In situ cast concrete plate $d = 0.10$ m, fast test.



a)



b)

FIG. 50. Plattförsök i full skala. Platsgjuten betongplatta, $d = 1,00$ m. a) Last-deformationskurva. \cdots , 8 min kurva. Siffrorna anger belastningstid i min. b) Kryphastighetskurva. Siffrorna anger belastningsgrenens nummer.

Full scale plate load test. In situ cast concrete plate, $d = 1,00$ m. a) Load-settlement curve. \cdots , an assumed 8 min curve. The figures stand for the time in min per load increment. b) Creep-rate curve. The figures stand for the number of the load cycle.

Väldefinierade kritiska grundtryck kunde utvärderas från kryphastighetskurvorna. Dessa tryck uppvisar ett beroende av plattstorleken enligt FIG. 51. Av ekonomiska skäl kunde tyvärr inte någon platta med en diameter på ca 0,4 m provbelastas.

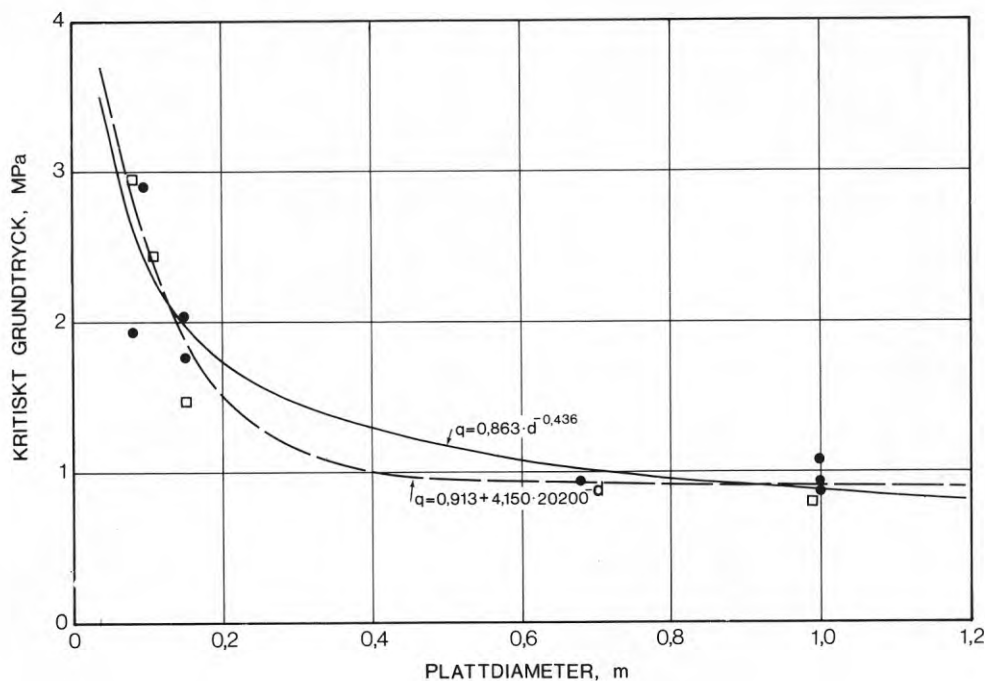


FIG. 51. Kritiskt grundtryck som funktion av plattdiametern enligt plattförsök i Rehab, Lund. ●, långsamt försök; □, snabbt försök.

Critical pressure versus plate diameter from load tests in Rehab, Lund. ●, slow test; □, fast test.

Till skillnad mot plattförsöken i Sparta, Lund blev det kritiska grundtrycket här tydligen oberoende av om varje laststeg legat på under 8 min. eller om det fått ligga på tills stabilitet inträtt. Liksom för de enaxliga tryckförsöken har två olika kurvtyper anpassat till det kritiska grundtryckets beroende av plattdiametern. Dessa är

$$q_k = 0,863 \cdot d^{-0,436} \quad \text{MPa} \quad (18)$$

respektive

$$q_k = 0,913 + 4,15 \cdot 20200^{-d} \quad \text{MPa} \quad (19)$$

där plattdiametern d uttrycks i m.

Enligt ekv. (19) blir bärigheten vid stor influerad jordvolym ca 910 kPa. Samma invändningar måste emellertid göras mot en kurvpassning enligt ekv. (19) som mot ekv. (17) vid de enaxliga tryckförsöken. Ett sannolikt kritiskt grundtryck vid stor influerad jordvolym är därför med hänsyn till de lägsta uppmätta trycken

$$q_m \approx 800 \quad \text{kPa}$$

En jämförelse mellan volymlberoendet vid de enaxliga tryckförsöken och plattförsöken görs i avsnitt 4.2.

Sättnings beroende av plattdiametern redovisas i FIG. 52. Sättningen har utvärderats vid grundtrycket 400 kPa, där last-sättningskurvan fortfarande är i det närmaste rak och långtidssättningarna är små.

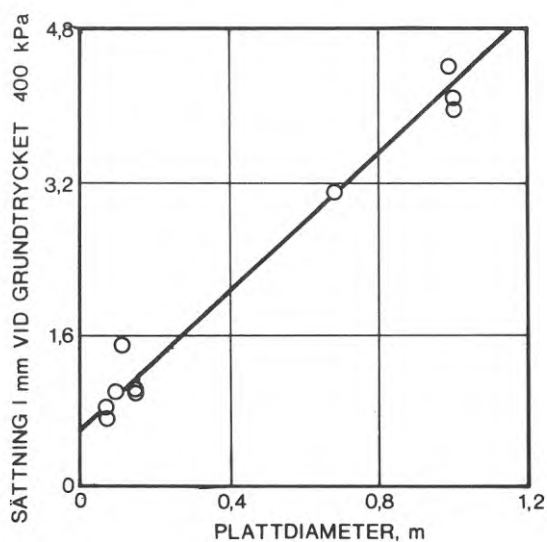


FIG. 52. Uppmätt sättning vid grundtrycket 400 kPa som funktion av plattdiametern.
Measured settlement at the pressure of 400 kPa versus the plate diameter.

Sättningen kan antas öka linjärt med plattdiametern, trots att den inlagda kurvan inte passerar genom origo.

Ödometerförsök

Två ödometerförsök utfördes på ostörd moränlera i en ödometer med provdiameter 75 mm och provhöjden 25 mm. Dessutom har AB Jacobson & Widmark (J & W) utfört 3 försök i SGI X-ödometern. Två av dessa senare försök utfördes på provkroppar utstansade ur lerklumpar tagna i provgropar. Det tredje försöket utfördes på material inpackat enligt modifierad proctormetod. Samtliga ödometerkurvor redovisas i bilaga . I TAB. 11 ges utvärderade kompressionskaraktistika.

TAB. 11 Kompressionskaraktistika för moränlera från Rehab, Lund enligt ödometerförsök.

Lokal	Djup m	Prov- diameter mm	Prov- höjd mm	Typ	$\frac{m}{\sigma'_i = 100 \text{ kPa}}$	β	$m\beta$	$M^{-1})$ MPa	Utfört av
Provgrop 2	2,0	75	25	ostörd	36	0,29	10,4	47	Förf.
Provgrop 2	2,0	75	25	ostörd	43	0,32	13,8	39	Förf.
210 m öster pg2	2,0	50	13	ostörd	25	0,36	9,0	-	J&W
210 m nordost pg2	3,5	50	13	ostörd	32	0,34	10,9	-	J&W
210 m nordost pg2	3,5	50	18	packad	30	0,37	11,1	-	J&W

1) $\sigma' = 400 - 1200 \text{ kPa}$

I TAB. 11 uttrycker m kompressionsmodultalet och β spänningsexponenten vid första belastningsgrenen. M' är kompressionsmodulen vid andra pålastningsgrenen.

Man kan möjligen liksom vid hållfasthetsbestämning använda laboratoriepackade prover i stället för ostörda.

Man kan jämföra kompressionsmodulen M' bestämd vid ödometerförsöken med de i FIG. 52 angivna sättningarna uppmätta vid plattförsöken. Om man antar att Jakys metod (Hansbo, 1970a) är tillämplig kan kompressionsmodulen från plattförsöken bestämmas ur

$$M = \frac{qd}{2s} \quad (20)$$

Lutningen hos linjen i FIG. 52 motsvarar då en kompressionsmodul på 55 MPa^1 , vilket ger en acceptabel överensstämmelse med kompressionsmodulen bestämd från ödometerförsökets återbelastningsgren.

3.4.3 Tygelsjö

Försöken utfördes i fält och i laboratorium. Fältförsöken omfattade plattförsök, ringskjuvförsök samt vingborrförsök och laboratorieförsöken enaxliga och treaxliga tryckförsök, konförsök samt ödometerförsök. Vid laboratorieförsöken undersöktes ostörd och laboratoriepackad moränlera. Vattenhalt, packningsarbete och packningssätt varierades.

Fallkonförsök

Konförsök utfördes på laboratoriepackad och ostörd moränlera. Försöken utfördes med en 400 g kon med 30° spets. Hållfastheten vid olika vattenhalt och torrdensitet ges i TAB. 12. De är även återgivna i FIG. 54.

TAB. 12 Hållfastheten bestämd med konförsök hos ostörd och laboratoriepackad moränlera från Tygelsjö. (Medelvärden)

Typ	Torrdensitet $\rho_d, \text{ t/m}^3$	Vattenhalt $w, \%$	Portal e_o	Skjuvhållfasthet $\tau_{fu}, \text{ kPa}$
Ostörd	1,83	14,2	0,45	180
Packad	1,82	9,9	0,46	325
Packad	1,85	13,2	0,44	140
Packad	1,84	15,5	0,45	30
Packad	1,90	14,8	0,40	140

1) Kompressionsmodulen utvärderad från fullskaleförsöken ($d = 1,0 \text{ m}$) blir 48 MPa .

Konhållfastheten bestämd för den ostörda moränleran ansluter väl till den ostörda hållfasthetens volymberoende baserat på de enaxliga tryckförsöken, ekv. (21). Även konhållfastheten hos den laboratoriepackade moränleran ansluter väl till denna kurva, men understiger hållfasthetens volymberoende för den packade moränleran. Det senare sambandet är emellertid mycket osäkert vid små volymer på grund av ett för litet antal försöksvärden.

Vingborrförsök

Vingborrförsök utfördes med två olika vingdimensioner 16 x 32 mm (fickvingborr) respektive 45 x 90 mm (SGI-vinge med instrument typ Nilcon). I FIG. 53 visas frekvensdiagram över uppmätta hållfastheter.

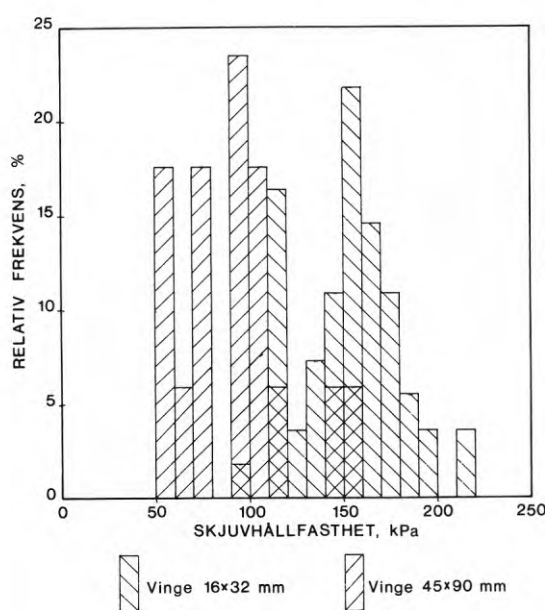


FIG. 53. Frekvensdiagram över den vingborrade hållfastheten uppmätt med två olika vingstorlekar (Tygelsjö).

Frequency diagram of the shear strength according to vane shear tests. Two vane sizes (Tygelsjö).

Som synes är hållfastheten mätt med vingborr volymberoende. Spridningen är stor för båda dimensionerna. Medelhållfastheterna är

$$\tau_{fu}^{\text{medel}} = 155 \text{ kPa} \quad \text{med vingen } 16 \times 32 \text{ mm}$$

$$\tau_{fu}^{\text{medel}} = 92 \text{ kPa} \quad \text{med vingen } 45 \times 90 \text{ mm}$$

Om man beräknar volymen enligt s. 51 blir den influerade volymen vid fickvingborrförsöken $6,4 \text{ cm}^3$ och vid försöken med den större vingen 143 cm^3 . Hållfasthetens medelvärde för de två vingdimensionerna ansluter väl till hållfasthetens volymberoende hos den ostörda moränleran baserad på de enaxliga tryckförsöken, se FIG. 54. Visserligen överstiger vingborrhållfastheten något detta samband. Detta är naturligt eftersom brottytan är tvångsstyrd vid vingborrförsöken.

Enaxliga tryckförsök

FIG. 54 visar hållfastheten hos laboratoriepackad och ostörd moränlera (vid samma densitet och vattenhalt) som funktion av provvolymen. Även hållfastheten enligt konförsök och vingborrförsök är inlagd. Vid tryckförsöken varierade h/d -förhållandet mellan 1,3 och 2,5.

Hållfastheten hos ostörd och laboratoriepackad moränlera överensstämmer i det närmaste. Med minsta kvadratmetoden har sambandet för den ostörda moränleran bestämts till

$$\tau_{fu} = 184 V^{-0,187} \quad \text{kPa} \quad (21)$$

och för den laboratoriepackade moränleran till

$$\tau_{fu} = 334 V^{-0,328} \quad \text{kPa} \quad (22)$$

Sambandet för resultaten för den ostörda och laboratoriepackade moränleran sammantagna ger ett starkare samband än det för den ostörda moränleran och ett nästan lika starkt samband som det för den laboratoriepackade moränleran. Ekv. (21) och (22) kan därför ersättas med

$$\tau_{fu} = 214 V^{-0,227} \quad \text{kPa} \quad (23)$$

I samtliga ekvationer uttrycks V i cm^3 . Volymberoendet är inte lika starkt hos denna moränlera som hos moränlerorna från Lund. Orsaken kan vara att lerhalten endast är 17 % mot ca 30 % hos de från Lund.

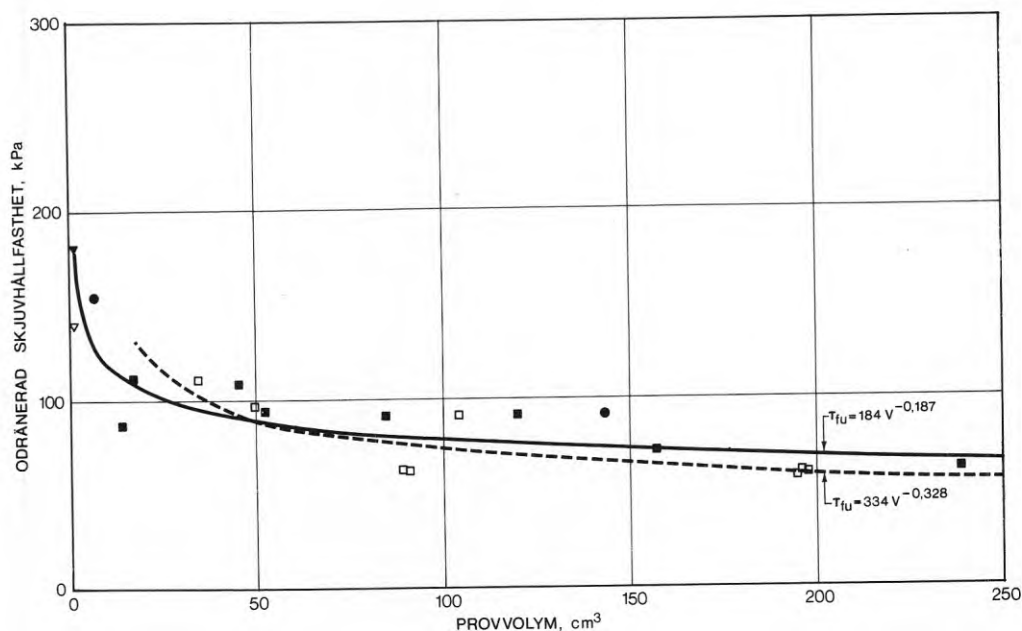


FIG. 54. Den odränerade skjuvhållfastheten som funktion av provvolymen hos ostörd och laboratoriepackad moränlera från Tygelsjö. $w_0 \approx 14\%$; $e_0 \approx 0,41-0,46$; \blacksquare , \square , enaxligt tryckförsök på ostörd resp. packad moränlera; \blacktriangledown , \triangledown , konförsök på ostörd resp. packad moränlera; \bullet , vingborrförsök.

The undrained shear strength versus the specimen volume. Undisturbed and recompacted boulder clay from Tygelsjö. $w_0 \approx 14\%$; $e_0 \approx 0.41-0.46$. \blacksquare , \square , unconfined compression test on undisturbed and recompacted specimens respectively; \blacktriangledown , \triangledown , fall cone test on undisturbed and recompacted specimens respectively; \bullet , field vane test.

Den vid stor influerad jordvolym verksamma hållfastheten kan förmodas vara

$$\tau_m = 60 \text{ kPa}$$

hos såväl ostörd som packad moränlera.

Vattenhaltens inverkan på hållfasthetens storlek och volymlberoende studerades genom att packa moränleran vid olika vattenhalt med samma packningsarbete. Resultaten uppvisade liten spridning och redovisas i FIG. 55 och 56.

I FIG. 56 redovisas hållfastheten och elasticitetsmodulen (utvärderad som sekantmodul mellan nolltryck och halva tryckhållfastheten) som funktion av vattenhalten för två volymintervall. För den större provvolymen har även mobiliserad skjuvspänning vid 1 % axialkompression inlagts.

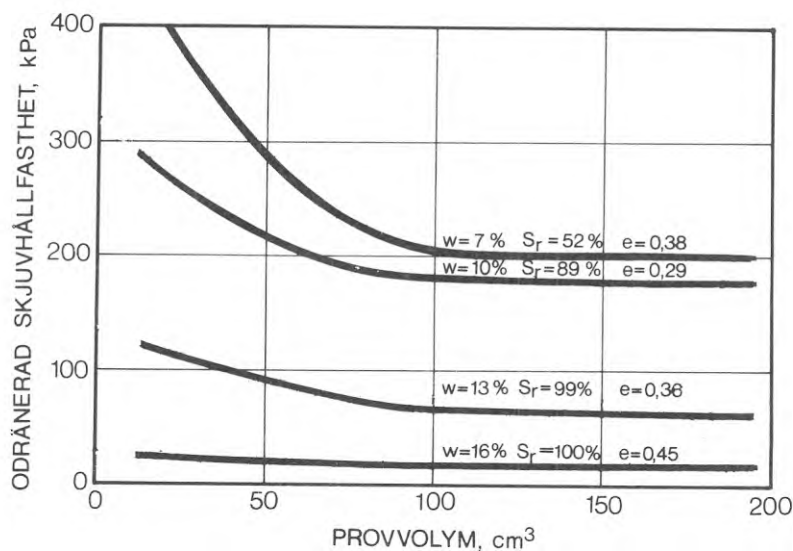


FIG. 55. Hållfastheten och dess volymlberoende som funktion av vattenhalten. Moränleran från Tygelsjö har packats med lika stort arbete vid samtliga försök.

The strength value and its dependence on volume versus the water content. The boulder clay from Tygelsjö was recompacted with the same energy for all the tests.

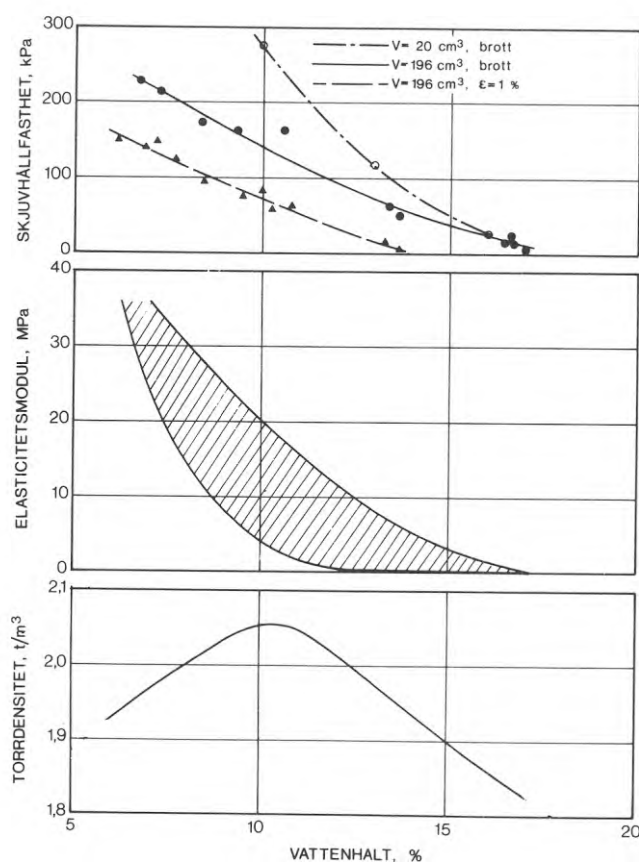


FIG. 56. Skjuvhållfasthet, elasticitetsmodul och torrdensitet som funktion av vattenhalten vid ett och samma packningsarbete. Data för två volymintervall redovisas. För den större volymen redovisas även mobiliserad skjuvspänning vid 1 % axialkompression (Tygelsjö).

Shear strength, Young's modulus and dry density versus water content at two different volume intervals. The same compaction energy has been applied to all the specimens. At the larger volume the mobilized strength at 1 % compression is also shown (Tygelsjö).

Liksom för moränleran från Sparta, Lund finner man att volymberoendet avtar med ökande vattenhalt. Vissa svårigheter finns att tolka FIG. 55 eftersom även portalet varierar. Detsamma gäller FIG. 56, men man kan ändå dra slutsatsen att E-modulen avtar med ökande vattenhalt.

Hållfasthetens beroende av vattenhalt och portal har för samtliga (dynamiskt) packade prover, se TAB. 13, bestämts till

$$\tau_{fu} = 0,236 w_o^{-2,01} e_o^{-1,55} \quad \text{kPa} \quad (24)$$

Sambandet är starkt ($R = 0,95$, signifikans = 97,5 %).

De hittills relaterade laborierpackade provkropparna framställdes genom dynamisk packning. En del provkroppar framställdes även genom statisk packning (packning med jämnt tryck över hela ytan typ ödometerkompression). I TAB. 13 ges utvärderade hållfastheter och elasticitetsmoduler vid olika vattenhalt och portal för båda packningsmetoderna. Hållfastheten hos statiskt packad moränlera tycks överensstämma med den hos dynamiskt packad moränlera.

TAB. 13 Odränerad skjuvhållfasthet, elasticitetsmodul och brottkompression hos prover dynamiskt och statiskt packade vid olika vattenhalt och till olika densitet. Moränleran är från Tygelsjö. Provvolum 150 - 200 cm³. (Medelvärden)

Typ	Torr- densitet $\rho_d, \text{t/m}^3$	Vatten- halt $w_o, \%$	Portal e_o	Skjuvhåll- fasthet τ_{fu}, kPa	E-modul E, MPa	Brott- kompr. $\epsilon_f, \%$	Antal försök
Ostörd	1,82	13,5	0,46	61	6,67	≈ 3,5	3
Dyn.packad	1,93	7,0	0,38	218	35,4	2	2
Dyn.packad	1,79	8,4	0,49	90	15,1	2	2
Dyn.packad	2,07	9,8	0,29	171	16,2	5	2
Dyn.packad	1,99	10,0	0,34	131	13,6	4	3
Dyn.packad	1,96	13,5	0,36	58	1,08	17	2
Dyn.packad	1,74	13,8	0,53	40	3,68	3,5	2
Dyn.packad	1,89	14,5	0,41	60	1,97	13,5	3
Dyn.packad	1,91	15,3	0,39	51	1,72	13,5	2
Dyn.packad	1,81	15,9	0,47	23	≈ 0,69	≈ 15	3
Dyn.packad	1,84	16,3	0,45	21	0,34	> 20	5
Stat.packad	1,80	10,1	0,48	90	15,2	2	2
Stat.packad	1,88	12,2	0,42	96	-	4	2
Stat.packad	1,67	13,7	0,59	32	4,48	2	2
Stat.packad	1,88	15,6	0,42	28	0,87	> 20	2

Treaxliga tryckförsök

De treaxliga tryckförsöken utfördes på ostörd och laboratoriepackad moränlera. I det senare fallet varierades portal och vattenhalt. Vid en försöks- serie togs korn större än 0,5 mm bort. Dessa försök behandlas i avsnitt 4.2. Triaxialförsöken utfördes i samtliga fall konsoliderade dränerade.

I FIG. 57 redovisas Mohrs spänningscirklar för ostörd moränlera.

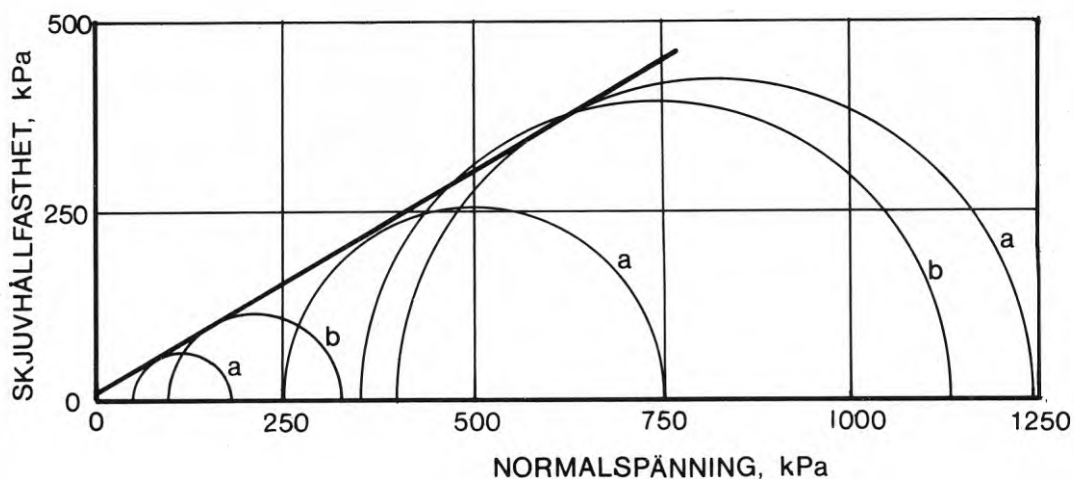


FIG. 57. Konsoliderade, dränerade triaxialförsök på ostörd moränlera från Tygelsjö. a, prov med volymen 200 cm³; b, med volymen 70 cm³. $w_0 = 13-14\%$; $e_0 \approx 0,45$.

Consolidated drained triaxial tests on undisturbed boulder clay from Tygelsjö. a, a specimen volume of 200 cm³; b, of 70 cm³. $w_0 = 13-14\%$; $e_0 \approx 0.45$.

För den ostörda moränleran påverkades inte hållfasthetens storlek av prov- volymen inom volymintervallet 70 - 200 cm³.

Hållfasthetsparametrarna från samtliga försöksserier redovisas i TAB. 14.

Spridningen inom respektive försöksserie var liten.

TAB. 14 Hållfasthetsparametrar bestämda från konsoliderade, dränerade triaxialförsök på ostörd och packad moränlera från Tygelsjö. Vid en del försök har mobiliserade hållfasthetsparametrar (c'_1 och ϕ'_1) utvärderats vid 1 % axiell kompression. (Medelvärden)

Typ	Torr- densitet ρ_d t/m ³	Vatten- halt w_o %	Portal e_o	Brott- ¹⁾ kompr. ϵ_f %	Skjuvhållfasthetsparametrar				Vatten- mättn. S_r %
					c' kPa	ϕ' grader	c'_1 kPa	ϕ'_1 grader	
Ostörd	1,83	14,2	0,45	14-17	4	30,8	24	11,0	83
Packad	1,80	7,0	0,48	9-16	50	28,0	35	7,3	39
Packad	1,82	9,9	0,46	≈15	19	27,8	25	7,2	57
Packad	1,85	13,2	0,44	11-18	6	30,7	4	12,7	80
Packad	1,84	15,5	0,45	14-16	4	31,4	11	9,3	93
Packad	1,90	14,8	0,40	11-16	11	31,3			98
Packad	2,02	10,2	0,32	7-15	39	29,0 ²⁾			86

1) Brottkompressionen ökade med ökande celltryck.

2) Vid $\sigma' = 160 - 410$ kPa.

I FIG. 58 redovisas hållfasthetsparametrarna som funktion av vattenhalten för material inom densitetsgränserna $1,80 \leq \rho_d \leq 1,85$ t/m³ ($0,44 \leq e_o \leq 0,48$). Kohesionen avtar starkt med ökande vattenhalt medan friktionsvinkeln ökar något. Den höga kohesionen vid 7 % vattenhalt kan ha orsakats av porundertryck i brottytan trots att försöken utfördes dränerade på grund av att moränleran inte var vattenmättad.

Hållfasthetsparametrarna blev lika hos ostörd moränlera och hos moränlera packad vid naturlig vattenhalt och naturligt portal.

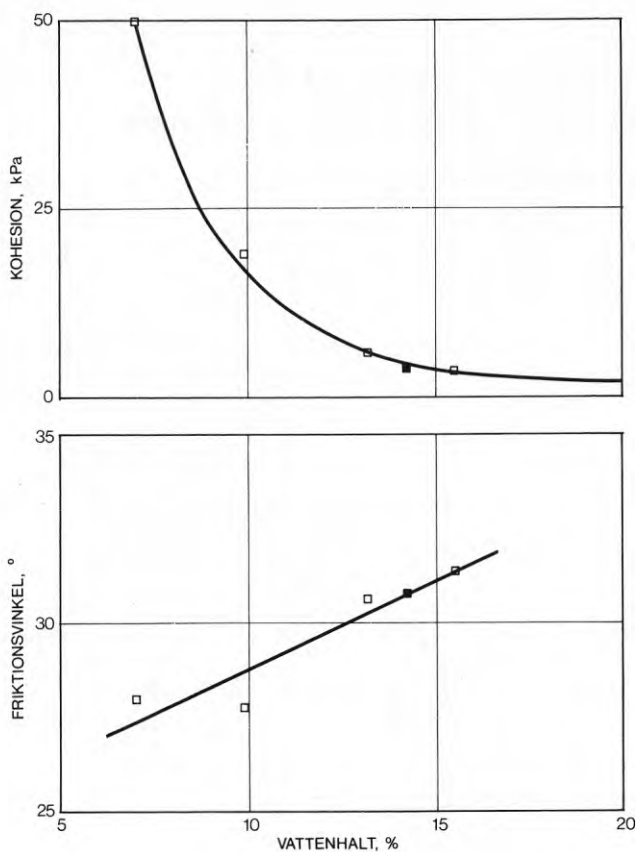


FIG. 58. De effektiva hållfasthetsparametrarna som funktion av vattenhalten. $0,44 \leq e_0 \leq 0,48$.

■, ostörd, □, laboratoriepackad moränlera från Tygelsjö.

The effective shear strength parameters versus the water content. $0,44 \leq e_0 \leq 0,48$. ■, undisturbed, □, recompacted boulder clay from Tygelsjö.

De i FIG. 58 inlagda kurvorna följer sambanden (portalet i stort sett lika)

$$c' = 5,15 \cdot 10^{-3} w_o^{-3,48} \text{ kPa} \quad (25a)$$

och

$$\phi' = 24,2 + 46 w_o \text{ grader} \quad (25b)$$

För samtliga triaxialförsök, TAB. 14, blir sambanden

$$c' = 7,69 \cdot 10^{-4} w_o^{-3,33} e_o^{-2,96} \text{ kPa} \quad (26a)$$

och

$$\phi' = 24,5 + 46,8 \lg w_o - 0,851 \lg e_o \text{ grader} \quad (26b)$$

Sambanden är starka ($R \approx 0,95$, signifikans $\approx 95\%$).

Plattförsök

Plattförsöken omfattade endast modellplattor – glatta stålplattor och platsgjutna betongplattor. Plattdiametrarna varierade mellan 0,081 och 0,253 m. Vid 4 försök fick varje laststeg ligga på under 1 min. 20 sek. (betecknas snabbt) och vid 3 försök under 20 min. (betecknas långsamt). I TAB. 15 anges försöksprogrammet samt de utvärderade kritiska grundtrycken. FIG. 59 visar last-sättningskurvorna och kryphastighetskurvorna för ett snabbt och ett långsamt försök.

TAB. 15 Försöksprogram och utvärderade kritiska grundtryck vid plattförsök i Tygelsjö.

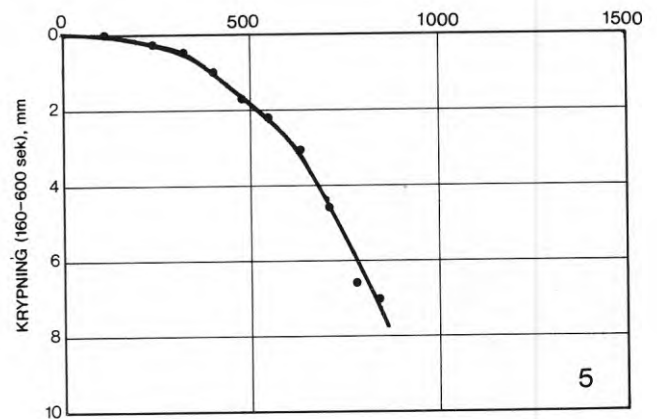
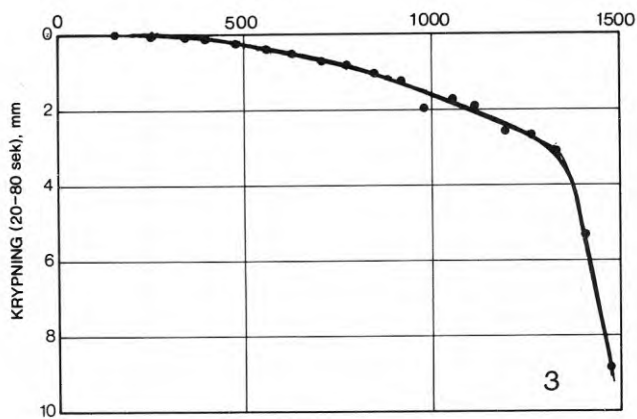
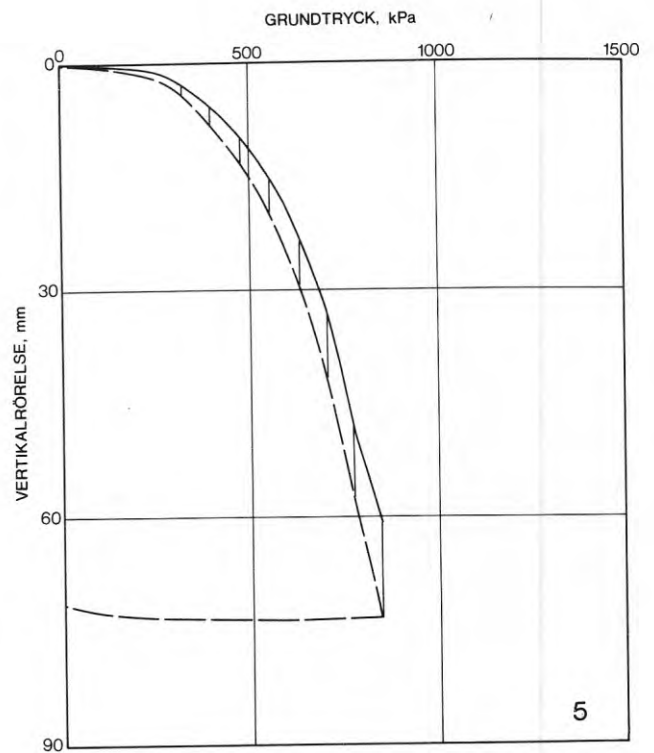
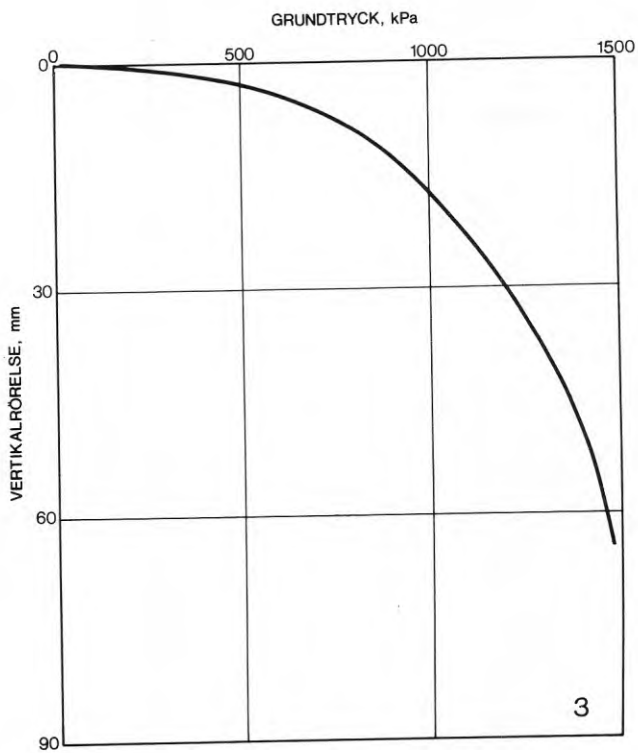
Försök	Platttyp ¹⁾	Plattdiameter m	Belastningstid ²⁾	Kritiskt grundtryck kPa
1	glatt	0,081	snabb	≈ 500
3	glatt	0,150	snabb	≈ 400
6	skrovlig	0,153	snabb	320
7	skrovlig	0,253	snabb	≈ 350
4	glatt	0,081	långsam	≈ 400
2	glatt	0,150	långsam	≈ 320
5	glatt	0,150	långsam	330

1) glatt betecknar stålplatta smord med molybdendisulfid och skrovlig platsgjuten betongplatta.

2) snabb anger att varje laststeg legat på 1 min. 20 sek. och långsamt att varje laststeg legat på 20 min.

Svårigheter uppstod vid utvärderingen av de kritiska grundtrycken, speciellt vid de snabba försöken. Kryphastighetskurvorna uppvisar ofta två "kritiska" tryck. Kurvan har tre tämligen raka delar med olika lutning. I tabellen ovan har i sådana fall det lägre trycket utvärderats som kritiskt tryck, eftersom kryphastigheten blev stor över detta tryck.

Det kritiska grundtrycket blev oberoende av belastningshastigheten samt avtog något med ökande plattdiameter enligt gjorda utvärderingar.



a)

b)

FIG. 59. Plattförsök i Tygelsjö. Glatta stålplattor, $d = 0,15$ m. Övre kurvorna är last-sättningskurvor (—, 1' 20'' kurva; ---, 20' kurva). Undre kurvorna är kryphastighetskurvor. Belastningstid per laststeg a) 1 min 20 s och b) 20 min.

Field plate load tests in Tygelsjö. Smooth steel plates, $d = 0.15$ m. The upper curves are load-settlement curves (—, 1' 20'' curve; ---, 20' curve) and the lower curves creep rate curves. Time per load step a) 1 min 20 s b) 20 min.

Något kritiskt grundtryck vid stor influerad jordvolym kan inte utvärderas från dessa försök, eftersom plattdimensionerna varit för små. Av TAB. 15 kan man därför endast dra slutsatsen att $q_m \leq 320$ kPa - motsvarande det minsta uppmätta trycket.

Ringskjuvförsök

Ett fåtal ringskjuvförsök utfördes. De utvärderade skjuvhållfastheterna vid olika normaltryck jämförs med brottenveloppen från de dränerade triaxialförsöken i FIG. 60.

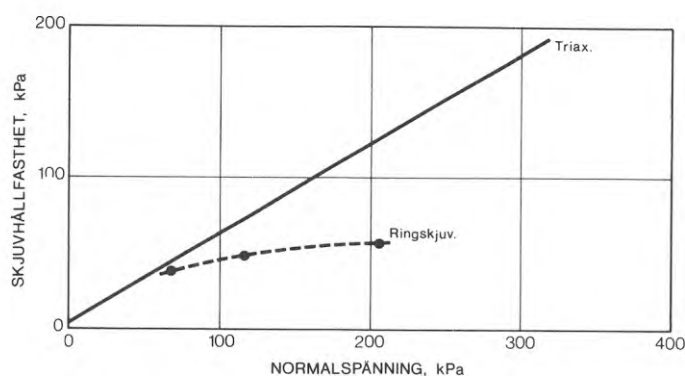


FIG. 60. Uppmätt hållfasthet med ringskjuvförsök i fält jämförd med brottenveloppen, enligt konsoliderade dränerade triaxialförsök, hos den ostörda moränleran (Tygelsjö).

The measured shear strengths from field ring shear tests compared with the drained failure envelope of the undisturbed boulder clay from triaxial tests (Tygelsjö).

Vid det lägsta normaltrycket sammanfaller uppmätt hållfasthet i det närmaste med brottenveloppen bestämd genom triaxialförsök. Däremot är brottenveloppen tydligen starkt krökt, varför överensstämmelsen vid högre normaltryck är dålig. Orsaken till den starka krökningen kan vara lokala brott vid skjuvdonets kant samt uppsjälkning vid de högre normaltrycken.

Ödometerförsök

Ett ödometerförsök utfördes på ostörd moränlera. Kurvan är återgiven i bilagan . Följande kompressionsparametrar har utvärderats.

$$\left. \begin{array}{l} m \approx 25 \\ \beta \approx 0 \end{array} \right\} \sigma_i = 100 \text{ kPa (ur primärkurvan)}$$

$$M \approx 144 \text{ MPa (ur andra pålastningsgrenen)}$$

3.4.4 Kv. Lärkträdet, Malmö

Försöksprogrammet i Malmö var inte lika omfattande som vid de ovan behandlade lokalerna. Fältförsöken bekostades till en del av AB Centrumfastigheter, som kommer att uppföra ett flertal höghus och parkeringsdäck inom området. Plattförsöken utfördes i samarbete med AB Flygfältsbyrån.

En provgröp framschaktades i två omgångar till nivån + 0,8 respektive - 0,15. Ursprunglig markyta ligger på nivån ca + 4,0. På respektive nivå utfördes ett plattförsök ($d = 1,10$ m). Grundvattenytan bestämd i öppna rör låg i medeltal på nivå + 0,8.

I laboratorium undersöktes endast laboratoriepackad moränlera från nivån - 0,15. Försökstyperna var enaxliga tryckförsök, konsoliderade dränerade triaxialförsök och ödometerförsök.

Vingborrförsök

Vingborrförsök utfördes inom djupintervallet 3,5 - 5,3 m under markytan. Vingdimensionerna var 35 x 81, 40 x 80 och 50 x 100 mm. Resultaten framgår av nedanstående tabell. Hållfastheten var konstant mot djupet.

Vingdimension mm x mm	Typ	Antal försök	Medelhållfasthet kPa	Minimihållfasthet kPa (antal data)
35 x 81	Nilcon	9	309	200 (2)
40 x 80	Nilcon	12	208	170 (3)
50 x 100	DGI	16	193	110 (5)

Både medel- och minimihållfastheten är tydligen även i denna lerfattiga moränlera volymberoende.

Enaxliga tryckförsök

Enaxliga tryckförsök utfördes på provkroppar packade vid varierande vattenhalt. För att studera om tiden mellan packning och tryckning inverkade – exempelvis av att portrycket till följd av packningen bortgår – lagrades provkropparna olika lång tid i fuktrum före tryckning. I FIG. 61 visas hållfasthetens vattenhaltsberoende utan hänsyn tagen till lagringstid och i FIG. 70 redovisas tidens betydelse. Provdimensionen var i samtliga fall $h=100$ mm $d=50$ mm. Vid vattenhalter över 10,5 % erhöles inget toppvärde intill 15 % kompression, varför i dessa fall brottet definierats vid denna axialkompression.

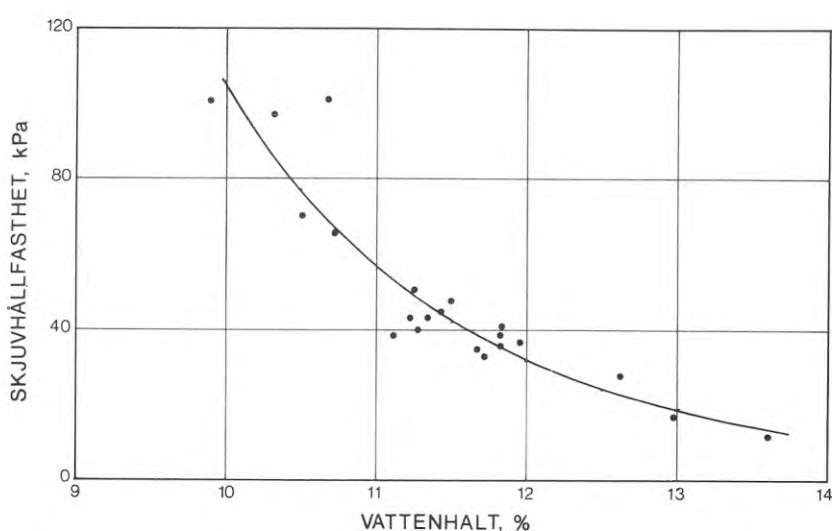


FIG. 61. Hållfasthetens beroende av vattenhalten enligt enaxliga tryckförsök. $e_0 = 0,25 - 0,29$. Kv. Lärkträdet, Malmö.

The undrained shear strength versus the water content. Unconfined compression tests. $e_0 = 0.25-0.29$. Kv. Lärkträdet, Malmö.

Denna moränleras skjuvhållfasthet är mycket känslig för små förändringar i vattenhalten.

Försöksresultaten angivna i FIG. 61 ansluter väl ($R = 0,95$, signifikans = 90 %) till sambandet

$$\tau_{fu} = 2,45 \cdot 10^{-5} w_o^{-6,64} \quad \text{kPa} \quad (27)$$

Treaxliga tryckförsök

En serie om fem konsoliderade, dränerade triaxialförsök utfördes på laboratoriepäckad moränlera. Moränleran packades vid vattenhalten ca 12,4 % till torrdensiteten $1,97 - 2,00 \text{ t/m}^3$.

Brottenveloppen kan med god noggrannhet approximeras med en rät linje. Hållfasthetsparametrarna blir

$$c' = 6 \text{ kPa}$$

$$\phi' = 34,1^\circ$$

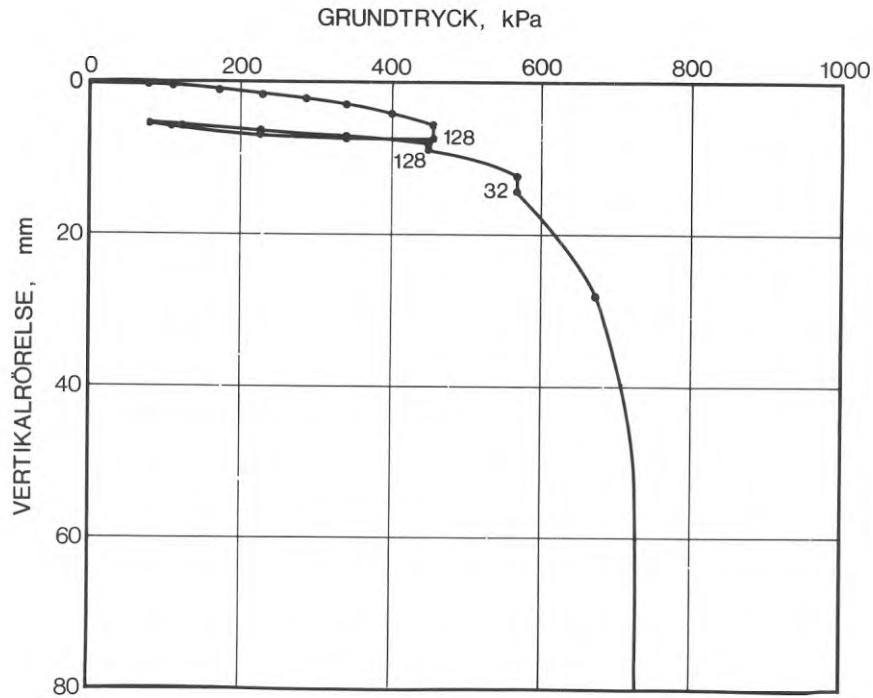
Vid 1 % axiell kompression har $c' = 5 \text{ kPa}$ och $\phi' = 13,0^\circ$ mobiliserats. Liksom för de andra undersökta moränlerorna har således i stort sett full kohesion mobiliserats vid 1 % kompression.

Plattförsök

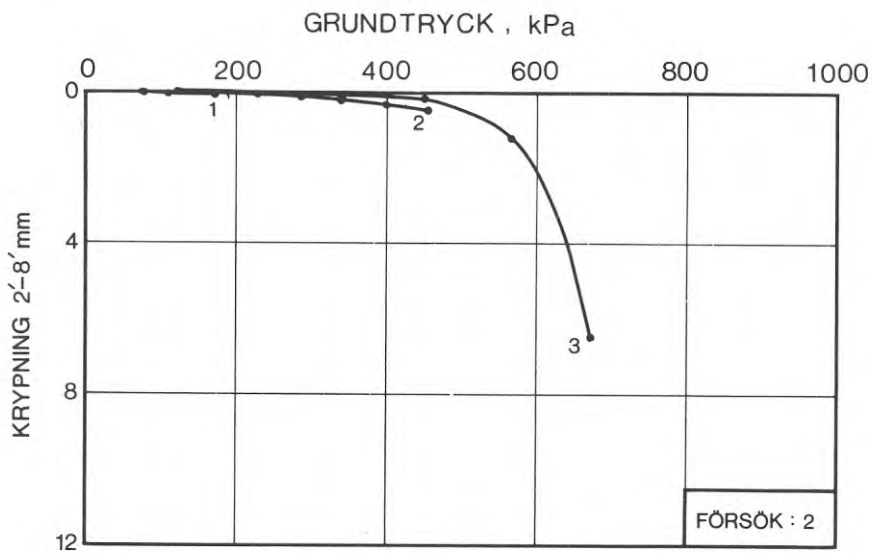
Provbelastning utfördes på betongplattor ($d = 1,10 \text{ m}$) platsgjutna på nivåerna $+0,80$ och $-0,15$. Eftersom moränleran (eventuellt moränen) på den övre nivån inte undersöktes i laboratoriet återges endast i bilagan last-sättningskurvan och kryphastighetskurvan från försöket på denna nivå. Vid båda försöken fick varje laststeg verka under så lång tid att sättningstillväxten åtminstone blev linjärt proportionell mot logaritmen för tiden. FIG. 62 visar last-sättningskurvan och kryphastighetskurvan för försöket på den lägre nivån. Kryphastighetskurvan definierar det kritiska grundtrycket väl. Kurvan hade fått en ännu starkare krökning vid det kritiska grundtrycket om inte avlastning utförts vid belastningsgren 2.

Det utvärderade, kritiska grundtrycket blir

$$q_k = 550 \text{ kPa}$$



a)



b)

FIG. 62. Plattförsök på moränlera i kv. Lärkträdet, Malmö. Platsgjuten betongplatta, $d = 1,10$ m. a) Last-sättningskurva. Angivna siffror betecknar belastningstid per laststeg. b) Kryphastighetskurva. Siffrorna anger belastningsgrenens nummer.

Field plate load test in kv. Lärkträdet, Malmö. In situ cast concrete plate, $d = 1.10$ m. a) Load-settlement curve. The figures stand for the duration per load increment. b) Creep-rate curve. The figures stand for the number of the load cycle.

Ödometerförsök

Tre ödometerförsök utfördes på packad moränlera. Moränleran packades vid vattenhalterna 10, 12 och 14 % till skrymdensiteten 2,20 - 2,26 t/m³. Utvärderade kompressionskaraktistika redovisas i TAB. 16 och ödometerkurvorna i bilagan.

TAB. 16 Kompressionskaraktistika enligt ödometerförsök på packad moränlera från kv. Lärkträdet, Malmö vid tre olika ursprungsvattenhalter.

Vattenhalt, %		Torrdensitet, t/m ³		$\frac{m^{1)} \quad \beta^{1)}}{\sigma_i = 100 \text{ kPa}}$		$M^{2)}$
Före	Efter	Före	Efter			MPa
9,5	8,3	2,10	2,31	≈ 53	≈ 0	260
12,0	8,8	2,01	2,26	≈ 48	≈ 0	260
14,2	9,3	1,93	2,23	≈ 15	≈ 0	215

1) Utvärderad i intervallet $\sigma' = 300 - 810 \text{ kPa}$

2) Utvärderad som sekantmodul i intervallet $\sigma' = 1000 - 1500 \text{ kPa}$

Kompressionsegenskaperna blev vid första pålastningsgrenen beroende av den initiella vattenhalten. Vid andra pålastningsgrenen hade den ursprungliga vattenhalten mindre inverkan.

För att få en jämförelse mellan de uppmätta kompressionsegenskaperna från ödometerförsöken och från plattförsöket har från plattförsöket en kompressionsmodul utvärderats enligt ekv. (20). Kompressionsmodulen blir

$$M = 117 \text{ MPa} \quad \text{vid } q = 0 - 100 \text{ kPa}$$

och

$$M = 92 \text{ MPa} \quad \text{vid } q = 0 - 200 \text{ kPa}$$

Överensstämmelsen mellan kompressionsmodulen från plattförsöket och kompressionsmodulen från ödometerförsökets andra pålastningsgren är sämre än fallet var för moränleran från Rehab, Lund. Med hänsyn till att sättningen är liten är ändå överensstämmelsen god.

Om ödometermodulen i stället bestäms längs den första krökta delen hos andra pålastningsgrenen blir kompressionsmodulen för en tillskottsbelastning över den i jorden tidigare rådande spänningen 80 kPa i stället något låg i förhållande till modulen från plattförsöket. Vid ursprungsvattenhalten 14 respektive 12 % blir modulerna

$$\left. \begin{array}{l} M' = 41 \text{ MPa} \\ M' = 45 \text{ MPa} \end{array} \right\} \text{ för } \sigma' = 80 - 160 \text{ kPa}$$

$$\left. \begin{array}{l} M' = 55 \text{ MPa} \\ M' = 58 \text{ MPa} \end{array} \right\} \text{ för } \sigma' = 80 - 320 \text{ kPa}$$

3.4.5 Hyllie, Arlov och Marknad, Lund

Moränlera från Hyllie, Arlov och Marknad, Lund undersöktes endast i laboratorium. Moränleran togs med AB Svensk Grundundersöknings specialprovtagare. Konsoliderade, dränerade direkta skjuvförsök och triaxialförsök utfördes på framtrimmade "ostörda" provkroppar.

De direkta skjuvförsöken utfördes i skjuvbox av typ Casagrande med diametrarna 25 mm och 75 mm. Vid försöken trimmades provkropparna i olika riktningar för att ge den påtvingade brottytan en vinkel av 0° , 45° eller 90° mot horisontalplanet i fält.

Vid triaxialförsöken trimmades provkropparna fram så att största huvudspänningsriktningen bildade vinkeln 90° mot horisontalplanet i fält. Två provvolymmer undersöktes med dels $d = 37,5$ mm och $h = 80$ mm och dels $d = 50$ mm och $h = 100$ mm.

TAB. 17 ger de utvärderade hållfasthetsparametrarna för de olika försökstyperna och lokalerna. Det är svårt att dra några generella slutsatser. Antalet försök liksom antalet undersökta moränleror är för litet. Spridningen blev dessutom större vid dessa försök än vid de tidigare redovisade - troligen beroende av att störningen blev stor vid den här använda provtagningsmetodiken.

En jämförelse mellan triaxialförsöken och de direkta skjuvförsöken antyder att friktionsvinkeln i stort blev lika, medan kohesionen blev större vid de direkta skjuvförsöken. Att kohesionen blev större kan förklaras av att brottplanet då var tvångsstyrt.

Vid triaxialförsöken ($d = 36$ respektive $d = 50$ mm) erhöles ingen märkbar skillnad vid olika provvolym. Vid de direkta skjuvförsöken erhöles en något högre friktionsvinkel vid den större skjuvarean.

TAB. 17 Hållfasthetsparametrar bestämda från dränerade direkta skjuvförsök och triaxialförsök på "ostörd" moränlera från olika lokaler. Provkropparna har orienterats så att huvudspänningarna bildat olika riktning i förhållande till horisontalplanet i naturen.

Lokal	Djup m	ρ_d t/m ³	w_o %	Typ ¹⁾	Orientering ²⁾	d mm	c' kPa	ϕ' grader	Antal försök
Hyllie	5,05-5,35	$\approx 1,96$	12	T	$\sigma_{1\perp H}$	36-50	≈ 0	$\approx 34,0$	3)
		$\approx 1,98$	12	DS	$\tau//H$	25	48	35,4	4
	5,65-5,95	$\approx 1,97$	12	DS	$\tau 45^\circ$	25	27	31,7	5
		$\approx 1,96$	12	T	$\sigma_{1\perp H}$	50	≈ 2	$\approx 34,2$	3
	5,95-6,25	1,97	12	DS	$\tau//H$	25	57	32,0	6
		1,99	12	DS	$\tau//H$	75	41	36,5	3
	1,97	12	DS	$\tau_{\perp H}$	25	20	35,5	10	
Marknad, Lund	2,00-2,30	1,80	17	T	$\sigma_{1\perp H}$	36-50	16	29,3	3
		1,76	17	DS	$\tau//H$	25	8	31,4	4
		1,80	17	DS	$\tau//H$	75	(13)	(34,7)	2
		1,77	17	DS	$\tau_{\perp H}$	25	28	30,5	4
Arlöv ³⁾	3,10-3,30	1,94	10	T	$\sigma_{1\perp H}$	36-50	20	41,0	3
		2,03	12	T	$\sigma_{1\perp H}$	50	≈ 9	$\approx 37,6$	2(3)
	4,80-5,10	2,03	12	DS	$\tau//H$	25	64	38,5	5
		2,02	12	DS	$\tau_{\perp H}$	25	27	42,1	3

1) Typ: T: triaxialförsök, DS: direkt skjuvförsök.

2) H anger horisontalplanet i fält.

3) Undersökt material i Arlov är en lerig morän.

Någon signifikant skillnad hos hållfasthetsparametrarna framkom inte vid olika skjvningsriktning.

Värdena givna i TAB. 17 kommer inte att användas i den fortsatta framställningen på grund av att moränleran troligen blev störd vid provtagningen och att dessa försök ingick i en förberedande provserie avsedd att utveckla försöksmetodiken. Emellertid torde resultaten kunna ligga till grund för ovan gjorda jämförelser.

4 ANALYS AV FÖRSÖKSRESULTAT

4.1 Brottprocessen

4.1.1 Inverkan av vattenhalt, portal och spänningsnivå

Vid presentationen av försöksresultaten framkom att vattenhalten och portalen markant påverkar hållfasthetsparametrarnas storlek och volymberoende.

Karaktären på brottet förändras vid en ändring av vattenhalten eller portalen. I FIG. 63 visas den axiella brottkompressionen som funktion av vattenmättningsgraden ($S_r = \rho_s w/e$) vid enaxliga tryckförsök på packad moränlera.

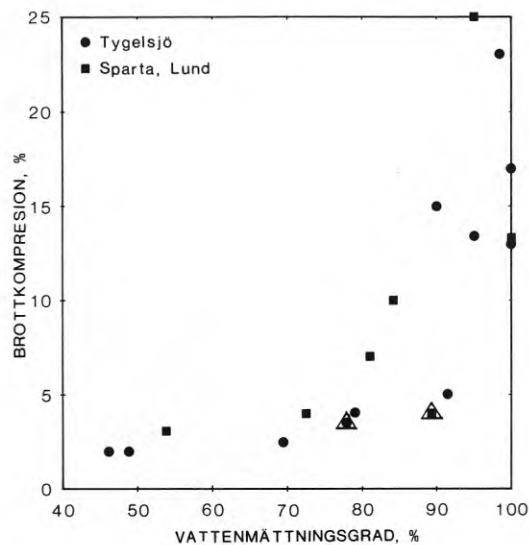


FIG. 63. Axiell brottkompression vid enaxliga tryckförsök som funktion av vattenmättningsgraden. Samtliga prov är packade utom Δ .

The axial failure compression at the unconfined compression tests versus the degree of saturation. All specimens except those denoted Δ were recompacted.

En regressionsanalys ger för moränleran från Sparta, Lund

$$\varepsilon = 1,65 \left(\frac{w_o}{w_{opt}} \right)^{4,73} e_o^{-2,60} \% \quad (28)$$

där w_{opt} är 16,5 % (enligt standard proctor) och för moränleran från Tygelsjö

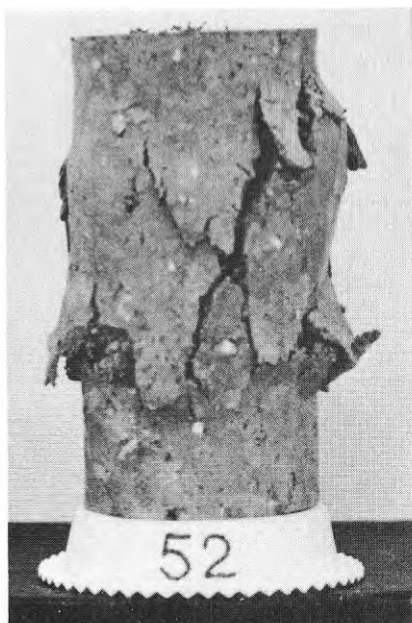
$$\varepsilon = 0,078 \left(\frac{w_o}{w_{opt}} \right)^{2,99} e_o^{-4,87} \% \quad (29)$$

där w_{opt} är 10,5 %

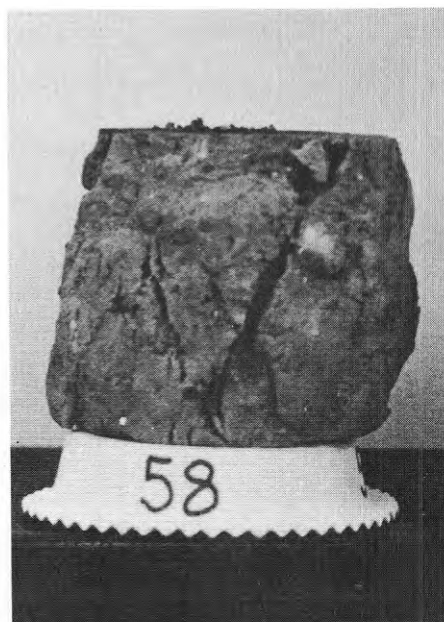
Brottkompressionen ökar kontinuerligt med ökande vattenhalt och med avtagande portal eller alternativt med ökande vattenmättningsgrad. Det råder således, såsom Seed & Chan (1959) angett, ingen markant skillnad i brotttyp vid övergång från den torra till den våta sidan. Antagandet av Lambe (1958) att brottet hos packad lera är sprött på torra sidan och segt på våta sidan kan trots detta med tämligen god approximation sägas gälla för de undersökta moränlerorna.

I FIG. 64 visas några provkroppar enaxligt tryckta till brott. Någon större skillnad kunde inte iaktas hos brottfigurerna hos moränleran packad vid olika vattenhalt och till olika densitet. Utom vid de högsta vattenhaltarna bestod brottet av såväl axiella sprickor som sneda skjuvplan. De axiella sprickorna blev starkast framträdande vid de lägsta vattenhaltarna. De axiella sprickorna orsakas troligen av befintliga svaghetsplan, grova korn o.d., se avsnitt 2.1. Vid vattenhalter över den optimala dominerade skjuvsprickorna på grund av att moränleran blev alltmer plastisk med ökande vattenhalt. Vid de högsta vattenhaltarna utbildades ibland inget brott utan endast plastisk flytning.

Förutsättningen för att det spröda axiella splittringsbrottet skall utbildas är att lateraltrycket avsevärt understiger axialtrycket. Är detta inte fallet utbildas även hos en initieilt spröd lera ett rent skjuvbrott. Storleken hos lateraltrycket när brottet övergår från splittringsbrott till skjuvbrott är olika för olika material. Pattons (1966) direkta skjuvförsök på plastprover, se s. 30, visade att brottet vid höga normaltryck utbildas genom plan skjuvning, medan vid lägre tryck ett dilatansbrott utbildas där ojämnheter glider över varandra. Denna typ av brottenvelop har visat sig vara tillämplig för sprickigt berg. Direkta skjuvförsök utfördes på en fast, silurisk lera från Kättelviken på Gotland och en fast, skiktad, triassisk lera från Vallåkra i Skåne, varvid framkom att denna typ av brottenvelop även kan



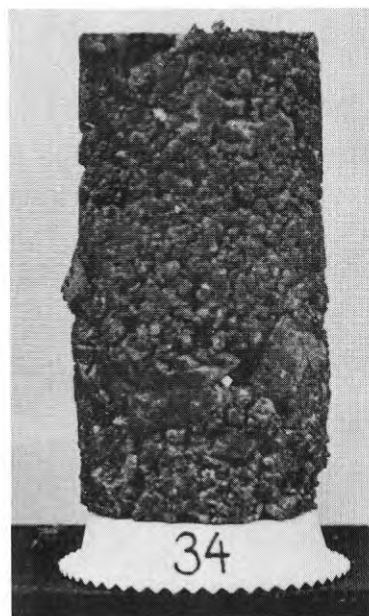
$w_0 = 14,1 \%$ $e_0 = 0,49$



$w_0 = 18,7 \%$ $e_0 = 0,51$



$w_0 = 17,4 \%$ $e_0 = 0,47$



$w_0 = 17,0 \%$ $e_0 = 0,80$

FIG. 64. Provkroppar enaxligt tryckta till brott. Packad moränlera från Sparta, Lund.
Unconfined compression test specimens at failure. Recompacted clay from Sparta, Lund.

erhållas för sprickiga, fasta leror. FIG. 65 visar resultaten för leran från Kättelviken. Denna lera har ett tämligen godtyckligt orienterat spricksystem. Lerans mikrostruktur har beskrivits av Pusch (1969).

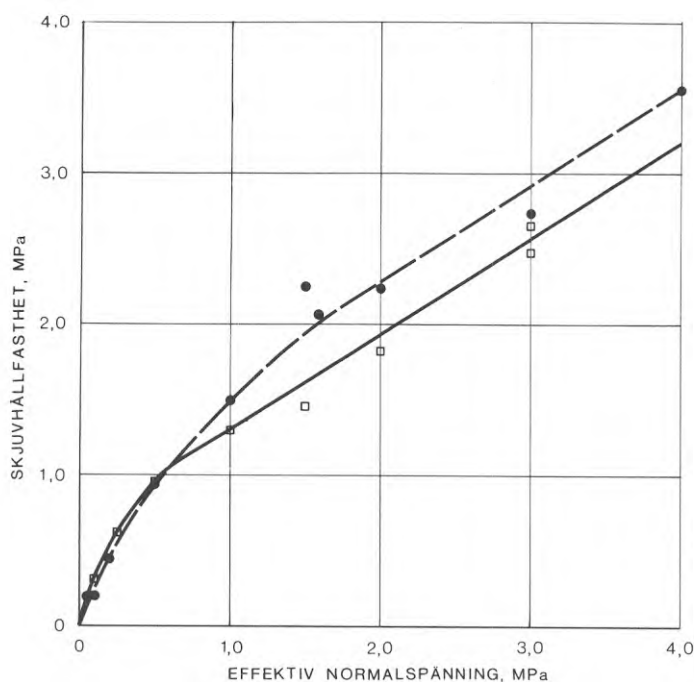


FIG. 65. Dränerade direkta skjuvförsök i Casagrande-box på en fast silurisk lera från Kättelviken. □ ———, skjuvytan parallell med horisontalplanet; ● — — —, skjuvytan vinkelrät mot detta horisontalplan.

Drained shear box tests on a stiff, silurian clay from Kättelviken. □ ———, the shear surface parallel to; ● — — —, the shear surface perpendicular to the ground surface.

Dränerade försök

Sprickiga leror uppträder tydligen som om de var homogena över en viss normalspänning mot det potentiella brottplanet. För moränlera torde denna normalspänning vara liten. För moränleran från Rehab, Lund blev vid dränerade försök brottensveloppen i stort sett rak vid $\sigma'_3 > 40$ kPa. Motsvarande tryck för moränleran från Tygelsjö är troligen lägre och för moränleran från kv. Lärkträdet, Malmö nära noll. Detta medför att Mohr-Coulombs brottteori kan användas generellt vid dränerade försök.

Att moränleran vid dränerade triaxialförsök uppträder som ett homogent material redan vid små celltryck kan bero av att vatten sugas in i den poten-

tiella skjuvzonen. Vattnet mjukar upp leran så att denna blir plastisk. Att så är fallet styrks av att toppvärdet endast blev svagt uttalat vid de dränerade försöken och att brottkompressionen blev i det närmaste oberoende av den ursprungliga vattenhalten (i motsats till vid de enaxliga tryckförsöken). I och med att brottkompressionen blev stor vid de dränerade försöken homogeniserades leran och spridningen i hållfasthetsvärdena blev mycket mindre än vid de enaxliga tryckförsöken.

Odränerade försök

Vid presentationen av försöksresultaten i avsnitt 3 antogs att Mohr-Coulombs brotteori var relevant även vid odränerade försök. För att studera riktigheten i detta antagande har "hollow cylinder"-försök, enaxliga tryckförsök och odränerade triaxialförsök utförts på packad moränlera med kornfördelningar enligt FIG. 66.

"Hollow cylinder"-försöken utfördes för att bestämma brottenveloppen i andra spänningskvadranten. Försöksapparaturen visas i FIG. 67. Moränleran packades in mellan ett inre perforerat rör täckt med ett gummimembran och en yttre mässingscylinder. Före försökets början avlägsnades packningscylindern och lock med låsskruv monterades. Provkroppen belastades med ett inre vattentryck överfört via ett membran. Belastningshastigheten valdes till 0,4 kPa/sek. diskontinuerligt påförd. Membranets volymförändring avlästes i ett vattenståndsrör.

Teorin bakom "hollow cylinder"-försöket finns bl.a. redovisad av Timoshenko & Godier (1951). I det elastiska stadiet blir huvudspänningarna

$$\sigma_r = a^2 p_i (b^2/r^2 - 1) / (b^2 - a^2) \quad (30)$$

$$\sigma_\theta = -a^2 p_i (b^2/r^2 + 1) / (b^2 - a^2) \quad (31)$$

Beteckningar framgår av FIG. 68. Ekvationerna anger att σ_r alltid är en tryckspänning (positivt tecken) och σ_θ en dragspänning. Den senare är absolut sett störst vid cylinderns inre mantelyta.

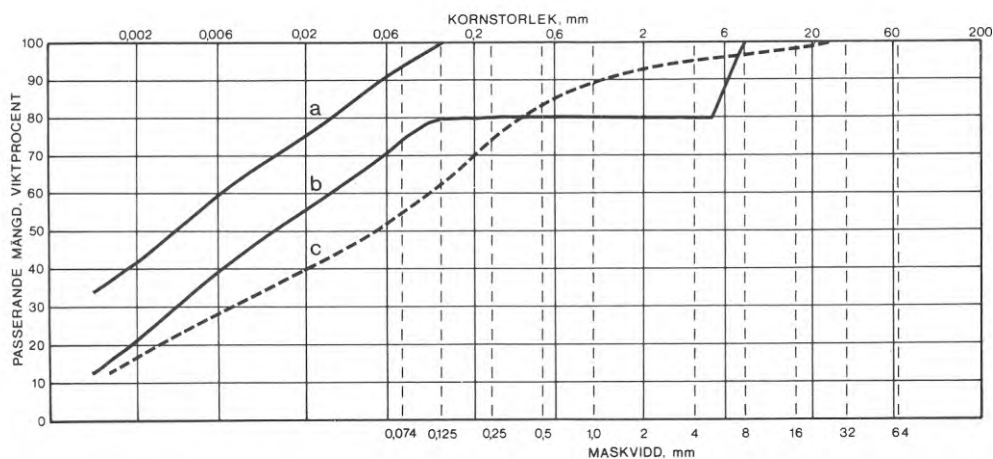


FIG. 66. Kornfördelningar: a) korn $> 0,125$ mm bortsiktat, benämns »utan grovjord», b) 20 % grovjord iblandad, benämns »med 20 % grovjord», c) ursprunglig fördelning för Tygelsjömöräneran.
 Particle size distributions: a) particles > 0.125 mm removed, named »without coarse particles», b) 20 % coarse particles mixed in, named »20 % coarse particles», c) natural boulder clay from Tygelsjö.

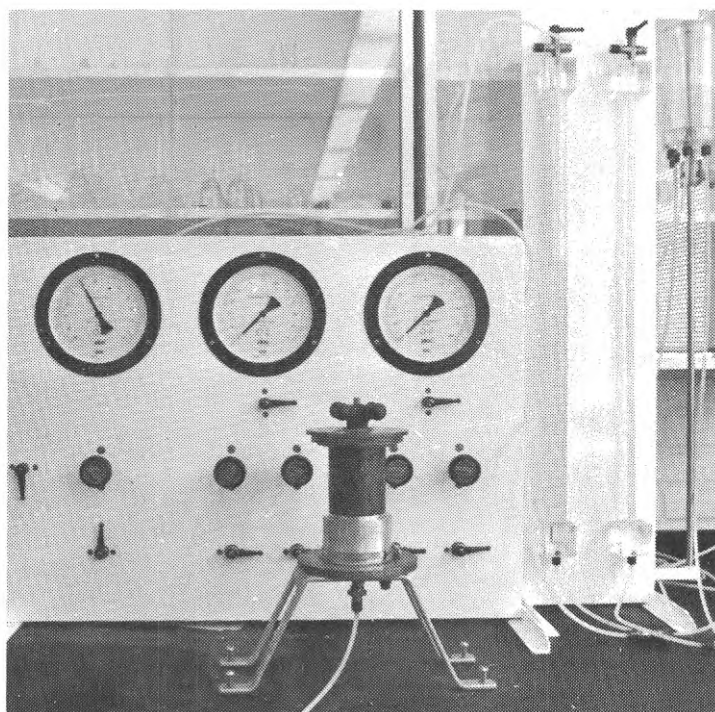
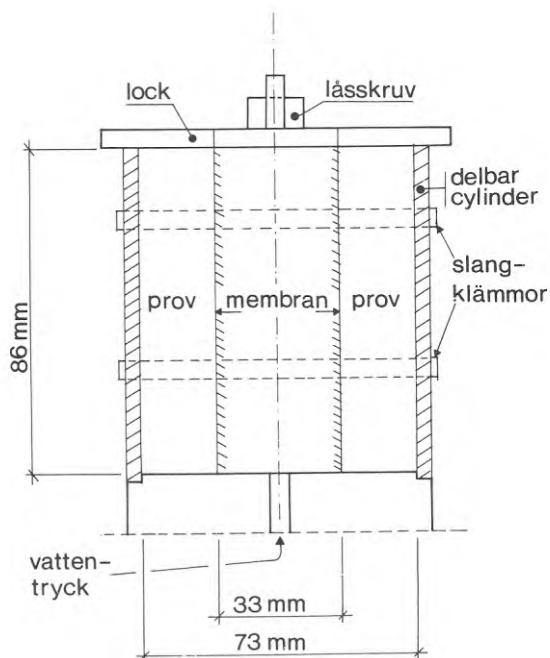


FIG. 67. Försöksutrustning vid »hollow cylinder»-försök.
 The test equipment used in the »hollow cylinder» tests.

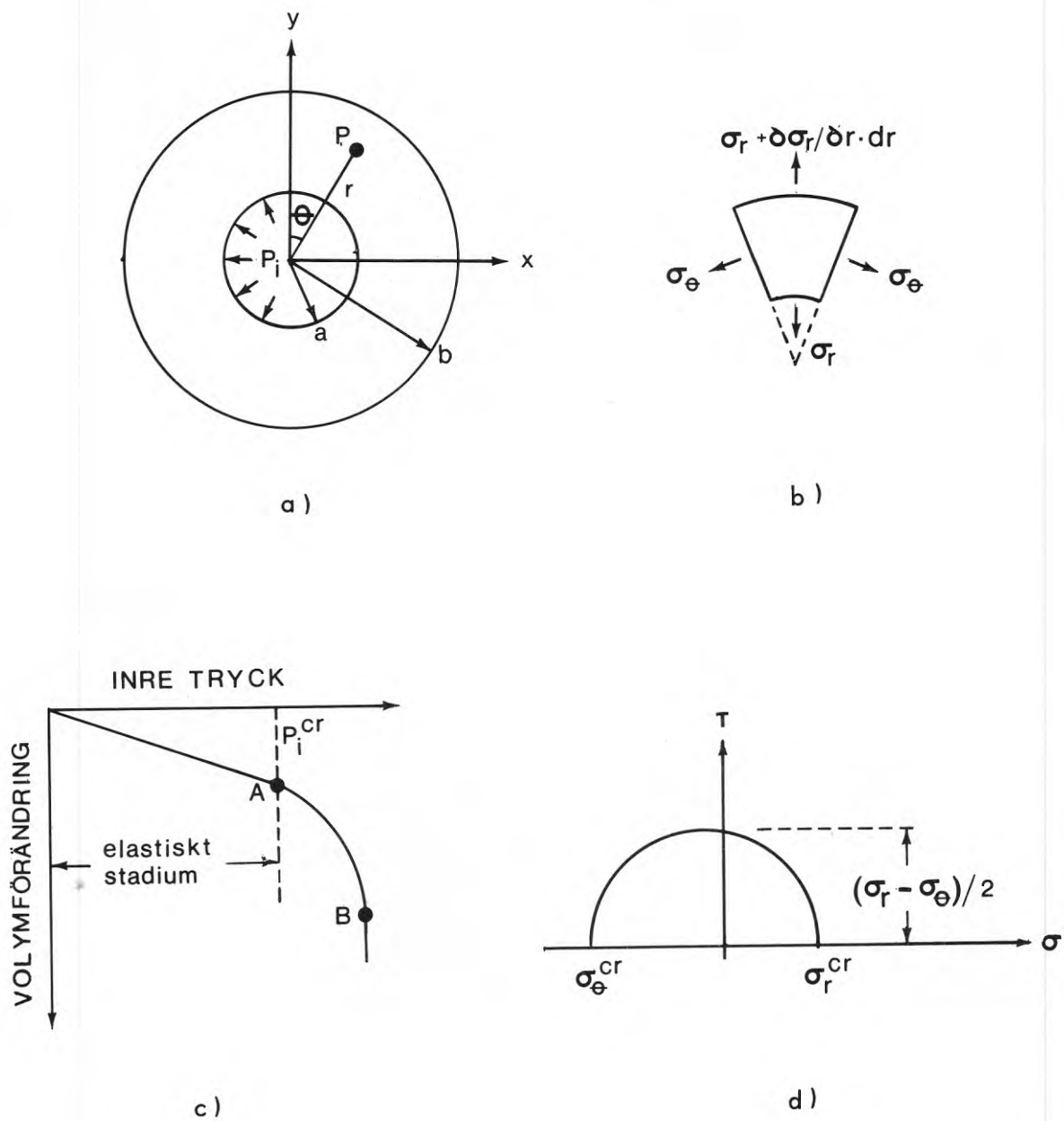


FIG. 68. Utvärdering av »hollow cylinder»-försök. a) Tvärsnitt, b) Spänningar i punkt P, c) Arbetskurva, d) Kritiskt spänningstillstånd i punkt A.

Interpretation of a »hollow cylinder» test. a) Cross section, b) Stresses at the point P, c) Characteristic curve, d) The critical stress state at the point A.

Sambandet mellan inre tryck och volymförändring fick ett typutseende enligt FIG. 68c. Vid punkt A sker sannolikt uppsprickning vid inre mantelytan medan punkt B representerar ett tillstånd då hela cylinderväggen är genomsprucken. Vid utvärderingen definierar punkt A på arbetskurvan ett kritiskt spänningstillstånd. Största och minsta huvudspänningen är då

$$\sigma_1^{cr} = \sigma_r^{cr} = p_i^{cr} \quad (32)$$

$$\sigma_3^{cr} = \sigma_\theta^{cr} = -p_i^{cr} (b^2 + a^2) / (b^2 - a^2) \quad (33)$$

Moränleran packades vid vattenhalterna 18, 20 och 22 % hos finjorden. FIG. 69 redovisar spänningstillståndet vid brott enligt de tre försökstyperna. Enligt Mohr-Coulomb gäller ett linjärt samband mellan huvudspänningarna i spänningsplanetens första kvadrant. Detta stämmer väl med erhållna resultat för moränleran utan grovjord. Vid den högsta vattenhalten stämmer det även när grovjord är inblandad men med minskande vattenhalt ökar kurvans krökning.

I spänningsplanetens andra kvadrant har endast en punkt ("hollow cylinder"-försöket) bestämts. Ytterligare kartläggning av brottkurvans utseende i denna kvadrant skulle kräva dragförsök av annan typ eller förändring av geometrin hos den använda apparaturen. En grov uppskattning av brottkurvans form i andra kvadranten är därför nödvändig. Anpassning till brottkriteriet enligt FIG. 1c med "tension cut-off" ligger nära till hands och har därför gjorts i FIG. 69.

Tydligen kan man vid odränerade försök, utom möjligen vid låg vattenmättningsgrad, använda Mohr-Coulombs teori modifierad med "tension cut-off". Vid den lägsta vattenhalten tycks emellertid brottensveloppen snarare motsvara Griffiths teori även om för moränleran med grovjord brottensveloppen blev mer krökt än vad Griffiths teori anger och för moränleran utan grovjord förhållandet mellan tryckhållfasthet och draghållfasthet ej blev korrekt. Griffiths antagande att kvoten mellan tryck- och draghållfasthet är konstant (lika med 8) överensstämmer tämligen väl med försöksresultaten under förutsättning att de i FIG. 69 inlagda envelopperna är korrekta, se TAB.18.

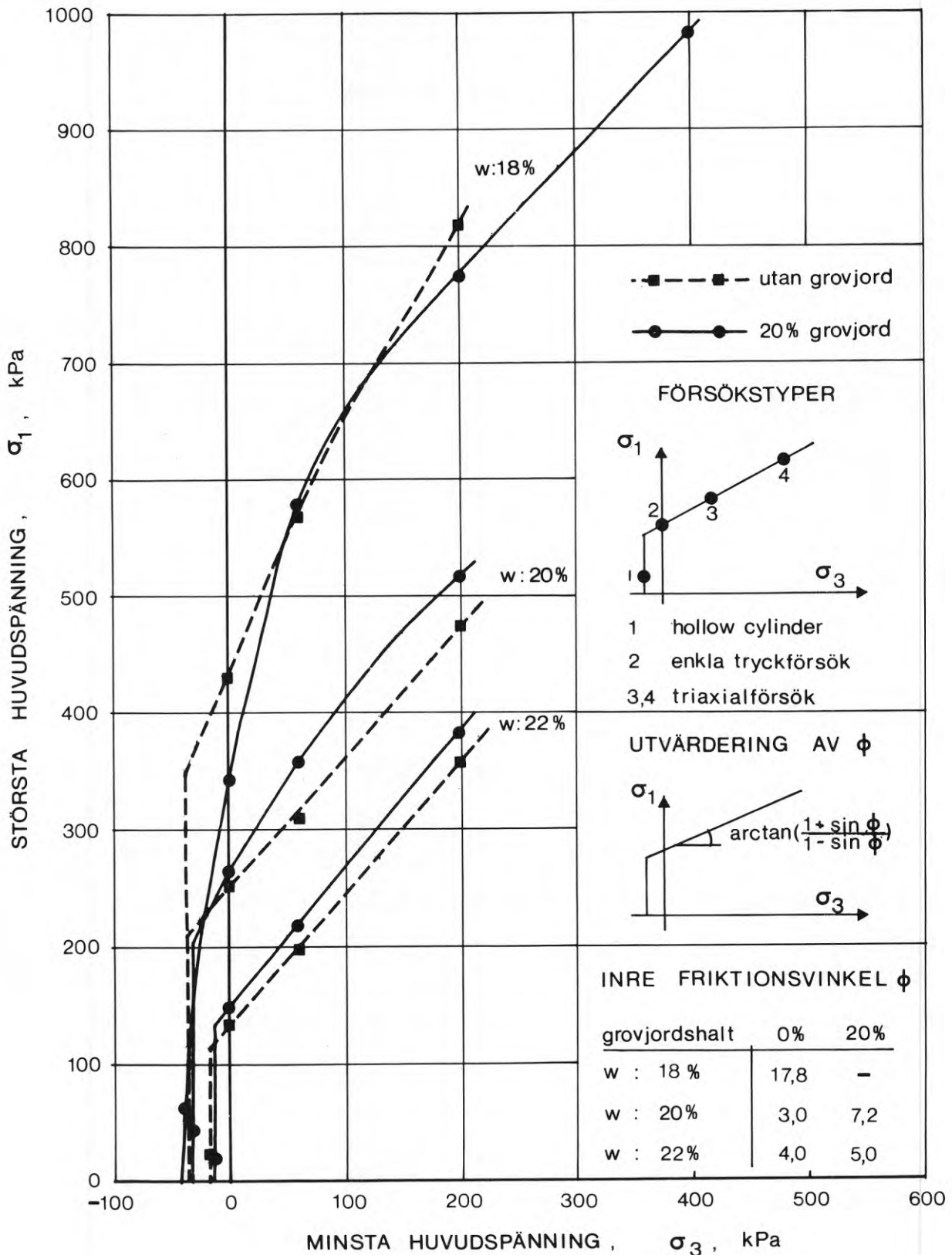


FIG. 69. Uppmätt hållfasthet enligt tre olika försökstyper hos moränlera med och utan grovjord (FIG. 66) packad vid vattenhalterna 18, 20 och 22 %. Vid de högsta vattenhalterna har hållfastheten utvärderats för $e \leq 15$ %.

The shear strength measured from unconsolidated triaxial tests, unconfined compression tests and »hollow cylinder tests» at the water contents 18, 20 and 22 %. Recompacted boulder clay with and without coarse particles (FIG. 66). The strength is defined at $e \leq 15$ %.

TAB. 18 Kvot mellan enaxlig tryck- och draghållfastheten hos packad moränlera med kornfördelningar enligt FIG. 66 vid tre olika vattenhalter.

Typ	Kvot mellan enaxlig tryck- och draghållfasthet		
	w = 18 %	w = 20 %	w = 22 %
Utan grovjord	12,5	7,6	7,5
Med 20 % grovjord	7,9	8,0	10,7

4.1.2 Jämförelse mellan ostörd och packad moränlera

Tidberoendet

En skillnad mellan ostörd och packad moränlera kan orsakas av ett i de packade proverna efter packningen kvarstående porövertryck. Inverkan av tiden mellan packning och tryckning studerades hos moränleran från kv. Lärkträdet, Malmö. Denna lera valdes därför att den vid höga vattenhalter blev flytbenägen under packningen. Provkropparna förvarades efter packningen inneslutna i en plastsäck i ett klimatrums med relativa luftfuktigheten 98 % och temperaturen +7°C. FIG. 70 visar hållfastheten som funktion av lagringstiden.

Enligt regressionsanalys är hållfasthetens beroende av lagringstiden svagt (signifikans < 90 %, R = 0,85). Sambandet är

$$\tau_{fu} = 26 + 3,58 \lg t \quad \text{kPa} \quad (34)$$

där tiden t uttrycks i sek.

Om hänsyn även tas till variationen i densitet och vattenhalt hos de olika provkropparna ökar signifikansen till drygt 90 % och korrelationskoefficienten till 0,88. Uttrycket blir då

$$\tau_{fu} = 31,1 + 3,27 \lg t - 3,38 w + 16,8 \rho_d \quad \text{kPa} \quad (35)$$

där tiden t uttrycks i sek., w i % och ρ_d i t/m³.

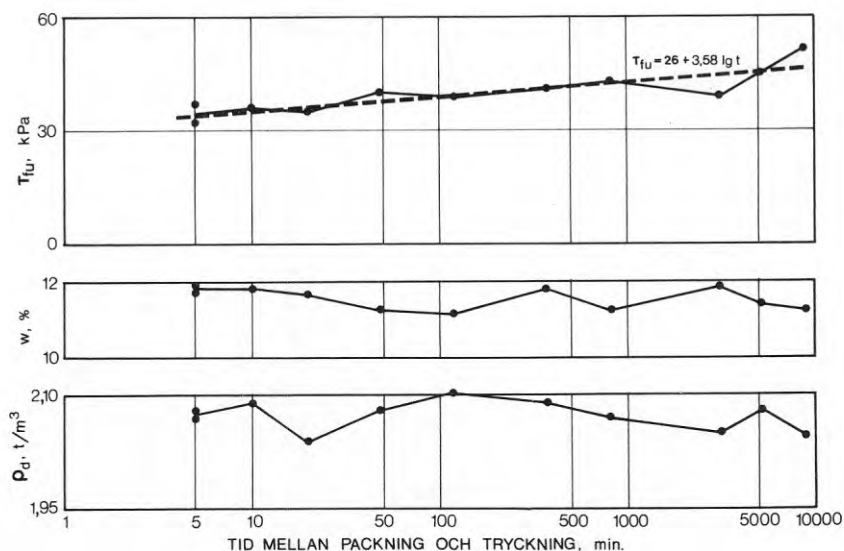


FIG. 70. Hållfasthetens beroende av tiden mellan packning och tryckning. Laboratoriepackad moränlera från kv. Lärkträdet, Malmö.

The strength versus the time between compaction and compression (Kv. Lärkträdet, Malmö).

Om man antar att ekv. (35) kan extrapoleras blir hållfasthetens procentuella tillväxt med tiden i förhållande till hållfastheten efter 1 tim. och 2 tim. förvaringstid - gängse tid vid försöken - för $w = 11,5\%$ och $\rho_d = 2,05 \text{ t/m}^3$ enligt

Tid mellan packning och tryckning	Proc. hållfasthetstillväxt i förhållande till hållfastheten efter förvaringstiden	
	1 h	2 h
1 dygn	12	9
1 vecka	19	16
1 månad	25	21

Tidberoendet torde inte vara lika starkt för de andra undersökta moränlerorna. Som nämndes tidigare blev moränleran från kv. Lärkträdet, Malmö flytbenägen under packningen vilket inte var fallet för de andra moränlerorna. Den uppmätta tideffekten kan också ha blivit förstärkt av

att provkropparna torkade ut något på ytan. Att tidberoendet i allmänhet inte är särskilt starkt för moränleror framgår även av att hållfastheten hos de största provkropparna blev lika stor för laboratoriepackad som för ostörd moränlera.

Vid de dränerade triaxialförsöken varierades tiden till brott mellan 18 tim. och 2,5 dygn utan att hållfastheten förändrades hos de olika moränlerorna.

1 % axiell kompression

Moränlerornas hållfasthet byggs upp av kohesion och friktion. FIG. 71 visar mobiliserad kohesion och friktionsvinkel dels vid 1 % kompression och dels vid brottkompression för moränleran från Sparta, Lund (lerhalt 29 %) och för moränleran från Tygelsjö (lerhalt 17 %). Hållfasthetsparametrarna är utvärderade från konsoliderade, dränerade triaxialförsök på ostörd och packad moränlera. Vattenhalten varierades vid den senare typen. Ursprungsportalet var lika vid alla försök utom vid $w = 21,4$ % för moränleran från Sparta, Lund.

Hos de packade moränlerorna kan full kohesion anses ha mobiliserats vid 1 % kompression trots en relativt stor spridning. Spridningen är naturlig eftersom stor osäkerhet råder när 1 % axiell kompression uppnåtts på grund av olika god anliggning mellan stämpel och prov vid de olika försöken. Försöken har dessutom utförts med alltför stor skjuvningshastighet för att uppmätta spänningar vid 1 % kompression skall vara korrekta. Bishop & Henkel (1972) anger att om skjuvning krävs under exempelvis 1 dygn för att brottvärdet skall bli korrekt så krävs skjuvning även under 1 dygn till 1 % kompression för att detta senare värde skall bli korrekt. En så låg skjuvningshastighet ansågs inte vara motiverad, eftersom brottvärdena var de intressantaste. Trots den relativt stora spridningen hos kohesionen kan man därför anse att full kohesion mobiliserats vid 1 % axialkompression. Skjuvmotståndet vid fortsatt kompression beror således av friktion.

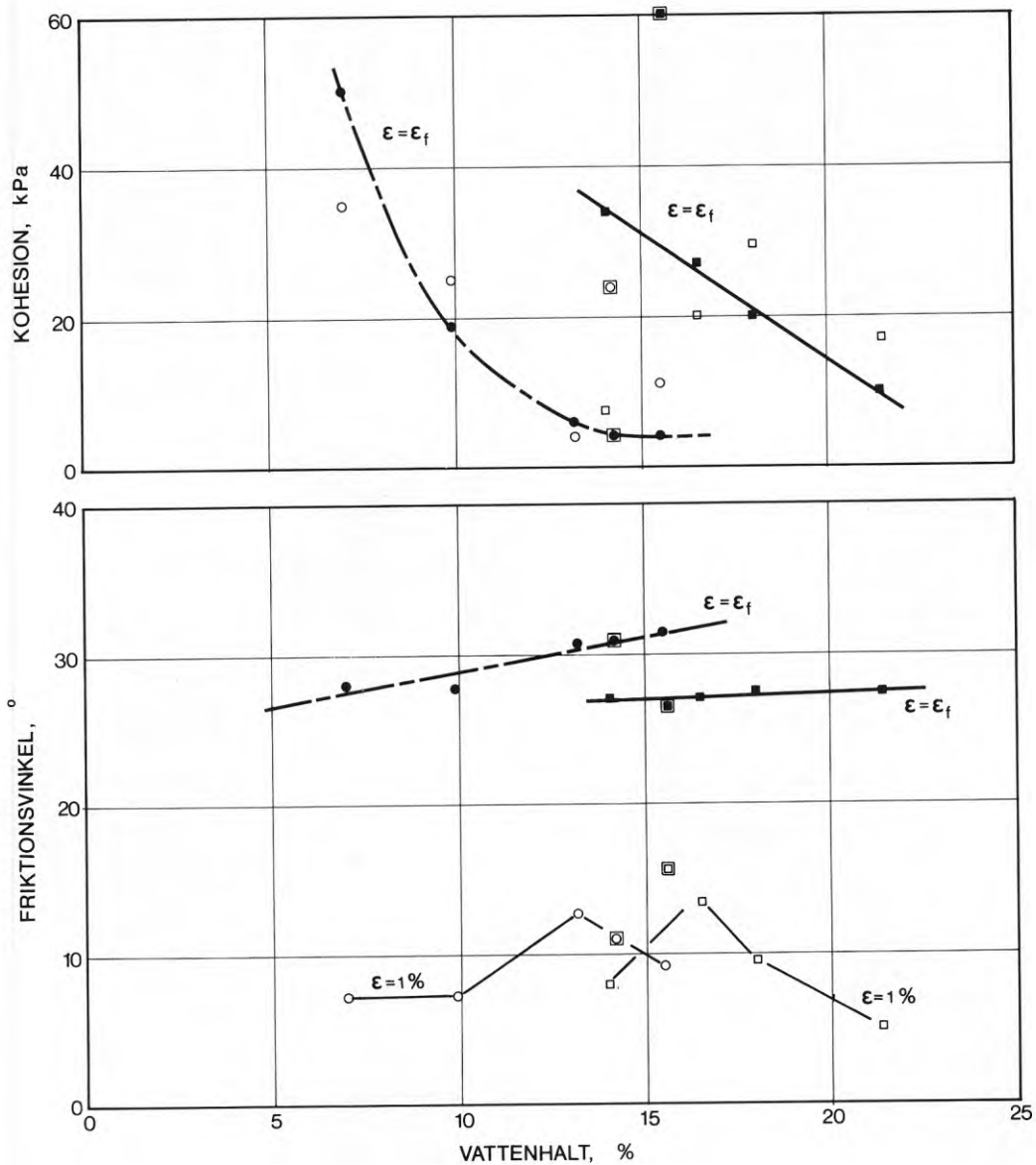


FIG. 71. Mobiliserad effektiv kohesion och friktionsvinkel vid 1 % axialkompression och vid brott hos ostörd och packad moränlera från Tygelsjö och Sparta, Lund. $e_0 = 0,44-0,48$ utom vid $w = 21,4$ %, där $e_0 = 0,56$.

$\square \epsilon = 1\%$ } Sparta, Lund; $\circ \epsilon = 1\%$ } Tygelsjö.
 $\blacksquare \epsilon = \epsilon_f$ } $\bullet \epsilon = \epsilon_f$ }

$\square \blacksquare$, osv. ostörd moränlera; övriga packad moränlera.

Mobilized effective cohesion and angle of friction at 1 % axial compression and at failure for the undisturbed and recompacked boulder clay from Tygelsjö and Sparta, Lund. $e_0 = 0.44-0.48$ except at $w = 21.4$ then $e_0 = 0.56$.

$\square \epsilon = 1\%$ } Sparta, Lund; $\circ \epsilon = 1\%$ } Tygelsjö.
 $\blacksquare \epsilon = \epsilon_f$ } $\bullet \epsilon = \epsilon_f$ }

$\square \blacksquare$, etc. undisturbed boulder clay; the remainder recompacked.

Även för den ostörda moränleran från Sparta, Lund har full kohesion mobiliserats vid 1 % axiell kompression. För den ostörda moränleran från Tygelsjö är däremot kohesionen större vid denna kompression än vid brott. Detta antyder att Tygelsjö-leran är "cementerad".

Den mobiliserade friktionsvinkeln var lika stor för ostörd som för packad moränlera vid såväl 1 % kompression som vid brott.

Brottkompression

En jämförelse mellan ostörd och laboratoriepackad moränlera visar att den axiella brottkompressionen blev mindre hos ostörd moränlera vid såväl odränerade som dränerade tryckförsök när lerhalten var ca 30 % (Sparta och Rehab, Lund), medan brottkompressionen blev i stort sett lika vid båda försökstyperna när lerhalten var ca 17 % (Tygelsjö). Skillnaden mellan de två lerhaltarna kan bero av att vid den större lerhalten lerpartiklarna i den ostörda leran har kopplats in i partikelsystemet och att cementering har ägt rum.

En jämförelse mellan ostörd och packad moränleras dränerade hållfasthetsparametrar visar, se FIG. 71, att friktionsvinkeln blev lika hos packad och ostörd moränlera. I Tygelsjö-leran blev även kohesionen lika stor, medan kohesionen blev avsevärt större hos den ostörda moränleran från Sparta, Lund. FIG. 54 och FIG. 34 visar att samma förhållande gäller för den odränerade hållfastheten som för kohesionen hos de två lerorna. Vid liten provvolym blev nämligen den odränerade hållfastheten lika stor hos packad som hos ostörd moränlera från Tygelsjö, medan hållfastheten blev avsevärt större hos den ostörda leran från Sparta, Lund.

Packningsmetod

Moränleror konsoliderades under ett högt istryck. Konsolideringen skedde troligen till större delen under statisk last. På laboratoriet framställdes däremot de packade provkropparna genom dynamisk packning. För att undersöka om packningsmetoden inverkar, packades moränleran från Tygelsjö även statiskt.

Endast enaxliga tryckförsök utfördes. Hållfastheten hos statiskt packad moränlera blev i stort sett lika stor som hos dynamiskt packad moränlera. Detta stämmer inte med Seed & Chans resultat (1959). Enligt Seed & Chan blev hållfastheten beroende av packningsmetoden vid vattenmättningsgraden över 85 %. Hållfastheten blev störst hos statiskt packade prover.

Avslutningsvis kan följande slutsatser dras. Vid odränerade försök inverkar vattenmättningsgraden och horisontaltryckets storlek på brottypen. Brottet blir sprött vid låg vattenmättningsgrad och lågt horisontaltryck och annars plastiskt. Vid sprött brott bör Griffiths teori vara mest lämplig. Vid plastiskt brott används Mohr-Coulombs brotteori. Mohr-Coulombs brotteori tycks, utom vid extremfall, även kunna användas vid sprött brott utan att felet blir besvärande stort.

Vid de dränerade försöken blev brottet i allmänhet plastiskt. Mohr-Coulombs teori kan därför användas speciellt eftersom brottenveloppen mestadels blev rak.

Laborariepackad moränlera kan undersökas i stället för ostörd vid bestämning av de dränerade och odränerade hållfasthetsparametrarna. Detta är en stor fördel med hänsyn till svårigheten att ta upp och trimma ostörda provkroppar.

Vid dränerade försök mobiliseras kohesionen vid liten axiell kompression och ytterligare skjuvmotstånd orsakas av friktion. Detta förhållande gäller såväl ostörd som laborariepackad moränlera.

4.2 Hållfasthetens volyoberoende

I litteraturöversikten visades hur man sökt bestämma hållfasthetens beroende av den testade provvolymen hos fasta, sprickiga leror. Vidare visades hur man försökt bestämma hållfastheten i en stor jordvolym utgående från en liten jordvolym. Hållfastheten avtar med ökande skjuvarea från ett högsta värde (intakthållfastheten) mot ett asymptotvärde på grund av att vid ökande skjuvarea sannolikheten ökar för förekomst av sprickor som har stor utbredning och kritisk orientering.

Mina undersökningar har visat att även moränleras hållfasthet är volymberoende. Orsaken är den heterogena strukturen. Moränleran består av ett ältat material med linser av friktionsjord och äldre lersediment samt innehåller grova korn upp till blockstorlek. Ett litet prov undersökt på laboratoriet är därför oftast inte representativt för den stora jordvolymen. Som en följd av den heterogena uppbyggnaden blir spridningen i försöksresultat stor.

Volymberoendet uppmättes hos ostörda och laboratoriepackade prover vid enaxliga tryckförsök, vid plattförsök och vid vingborrförsök.

4.2.1 Vattenhaltens betydelse

FIG. 36 och 55 visar att hållfasthetens volymberoende vid enaxliga tryckförsök på packad moränlera från Sparta, Lund respektive Tygelsjö avtar med ökande vattenhalt. Enligt FIG. 36 och 55 tycks beroendet blir försumbart när vattenhalten överstiger plasticitetsgränsen. Alternativt kan hållfasthetens volymberoende sägas vara försumbart, när moränleran är nära vattenmättad.

Vattenhaltens betydelse för volymberoendet kan åskådliggöras på följande sätt. Anta att ett prov utsätts för en enaxlig tryckspänning (eller ett treaxligt spänningstillstånd med ett celltryck avsevärt mindre än största huvudspänningen) mellan två stela plattor enligt FIG. 72.

Eftersom plattorna är stela blir den totala kompressionen lika stor i alla vertikalsnitt. Detta medför att spänningen varierar mellan de olika snitten, eftersom halten grova korn varierar och därmed även styvheten. Spänningen blir störst i det snitt där grovjordshalten är störst. När den yttre pålagda spänningen nått ett visst värde initieras ett mikrobrott i finjorden i det mest ansträngda snittet. Om moränleran är spröd kan mikrobrottet utbredas med accelererande hastighet och leda till makrobrott. Om leran

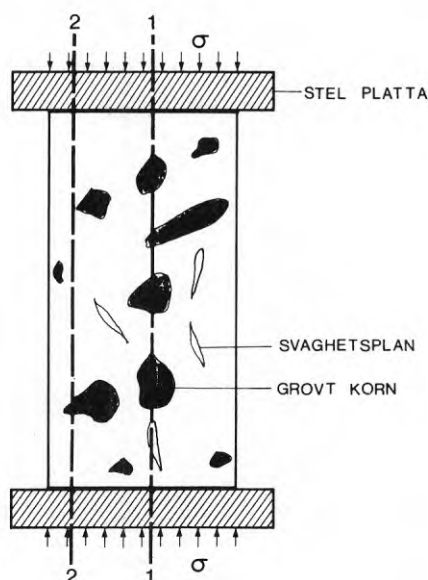


FIG. 72. Moränlereprov enaxligt tryckt mellan stela stämplat.

A specimen of boulder clay with coarse particles and weakness planes subject to unconfined compression between stiff end plates.

däremot är seg uppstår en lokal plastisk flytning med åtföljande spänningsomlagring. Det sega materialet kan bära ytterligare lasttillskott tills finmaterialet plasticerats längs hela skjuvytan. Sprickor i moränleran orsakar även spänningskoncentrationer vid sprickändarna, vilka hos den spröda leran leder till makrobrott. Hos den sega leran leder spänningskoncentrationerna däremot till lokal plasticering.

På grund av skillnaden i brottutbildning i sega och spröda material blir därför moränleras hållfasthet endast volyberoende, när moränleran är spröd.

4.2.2 Inverkan av större korn

En första ansats att teckna hur förekomsten av stora korn påverkar hållfastheten vid enaxliga tryckförsök - i viss mån även vid plattförsök - kan göras utgående från FIG. 72. Antag att provkroppen kan delas upp i två zoner med sektionsareorna A_1 och A_2 ($A_2/A_1 = m$) med grovjordshalterna

(uttryckta i volymsandelar) a_1 respektive a_2 ($a_1 < a_2$). Vid en pålagd yttre spänning σ blir medelspänningarna i de två sektionerna σ_1 och σ_2 . Jämvikt ger

$$\sigma (A_1 + A_2) = \sigma_1 A_1 + \sigma_2 A_2 \quad (36)$$

Deformationsvillkoret $\epsilon_1 = \epsilon_2$ ger om förhållandet mellan finjordens och grovjordens E-modul sätts till n

$$\sigma_1 (1 - a_1) + n \sigma_1 a_1 = \sigma_2 (1 - a_2) + n \sigma_2 a_2 \quad (37)$$

Eftersom grovjordshalten a_2 är större än halten a_1 blir σ_2 större än σ_1 . Det första mikrobrottet utbildas i sektorn A_2 , varför man kan sätta

$$\sigma_2 = 2 \tau_{fu}^{\text{reell}}$$

där τ_{fu}^{reell} är den verkliga hållfastheten hos finjorden. Om moränleran är spröd kan makrobrottet utbildas vid denna spänning σ_2 . Den yttre pålagda spänningen σ är emellertid mindre, vilket medför att man uppmäter en hållfasthet

$$\tau_{fu}^{\text{uppm}} = \frac{\sigma}{2}$$

Sambandet mellan denna felaktigt uppmätta hållfasthet och den verkliga hållfastheten kan beräknas utgående från ekv. (36) och (37) till

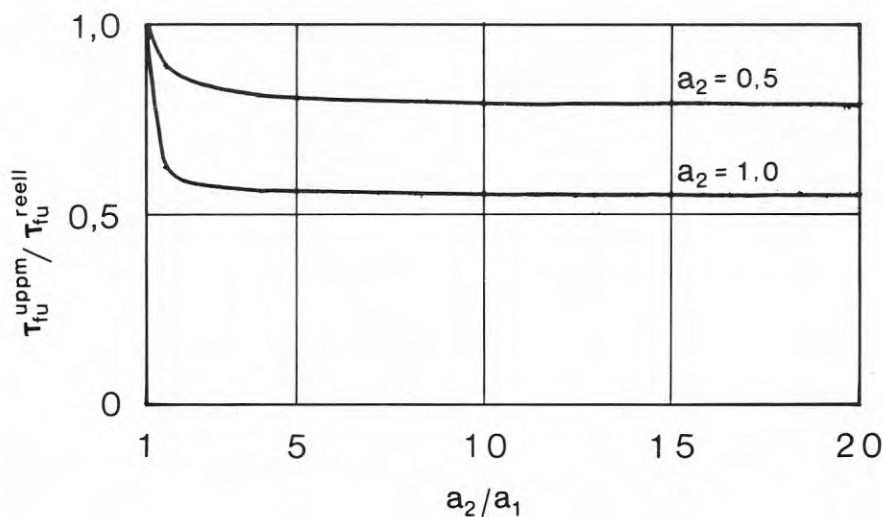
$$\tau_{fu}^{\text{uppm}} = \tau_{fu}^{\text{reell}} \frac{1 - a_2(1 - n)}{1 - a_1(1 - n) + m} \quad (38)$$

$$\text{där } a_1 < a_2, n < 1$$

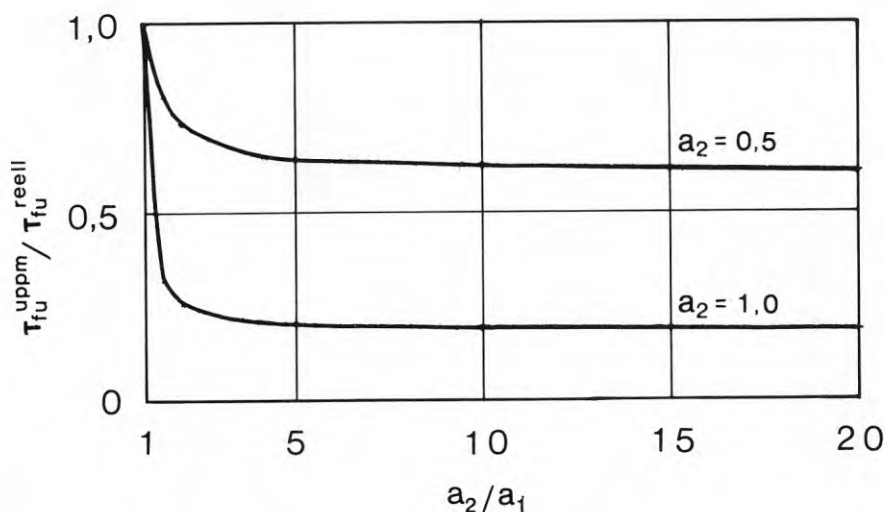
FIG. 73 visar hur förhållandet mellan uppmätt och verklig hållfasthet varierar med grovjordshalterna för de fall sektionens arean med största grovjordshalt utgör 50 och 9 % av totalarean. När volymsandelen grov-

jord i snittet med högst halt är tre gånger större än i det andra snittet in-
verkar inte förhållandet mellan de två snittens grovjordshalter utan endast
halten grovjord i snittet med högsta halten.

För det fall moränleran är plastisk blir τ_{fu}^{reell} och τ_{fu}^{uppm} i stort sett lika
stora.



$$A_1 = A_2$$



$$A_1 = 10A_2$$

FIG. 73. Förhållandet mellan uppmätt och verklig hållfasthet vid enaxligt tryckförsök hos ett sprött material med varierande grovjordshalt. Sektionsareorna A_1 och A_2 har grovjordshalterna a_1 respektive a_2 ($a_1 < a_2$). Förhållandet mellan grovjordens och finjordens E-modul är satt till 10.

The ratio between measured and real shear strength of a brittle material with a varying content of coarse particles measured under an unconfined compression test. The section areas A_1 and A_2 are for the contents of coarse particles a_1 and a_2 respectively, ($a_1 < a_2$). The ratio between the Young's modulus of the coarse and fine material is assumed to be 10.

För att studera hur halten grovjord inverkar på en moränleras hållfasthets-egenskaper utfördes enaxliga och treaxliga tryckförsök samt "hollow cylinder"-försök (tidigare presenterade på s. 119). Försöken utfördes dels på en finkornig moränlera och dels på samma moränlera när grovjord blandats in. Kornfördelningarna för de två moränlerorna visades i FIG. 66. Grovjorden var en krossprodukt med kornstorleken 5 - 8 mm, flisigheten¹⁾ ca 1,70 och sfäriciteten ca 0,67.

Moränleran med de två kornfördelningarna packades in vid fyra olika vattenhalter. Spännings-kompressionssambanden bestämda med enaxliga tryckförsök visas i FIG. 74. Vid de lägre vattenhalterna blev hållfastheten något lägre, när grovjord var inblandad. Att inverkan av grovjorden inte blev särskilt markant måste bero av att stenarna var tämligen jämnt fördelade inom provkroppen. Vid de högre vattenhalterna styvade stenarna upp leran på grund av att den finkorniga matrisen då var plastisk. Vattenmättningsgraden var lika stor vid vattenhalterna 18 och 20 % på grund av att portalet var något olika. Av figuren framgår att inte bara vattenmättningsgraden utan även vattenhalten inverkar.

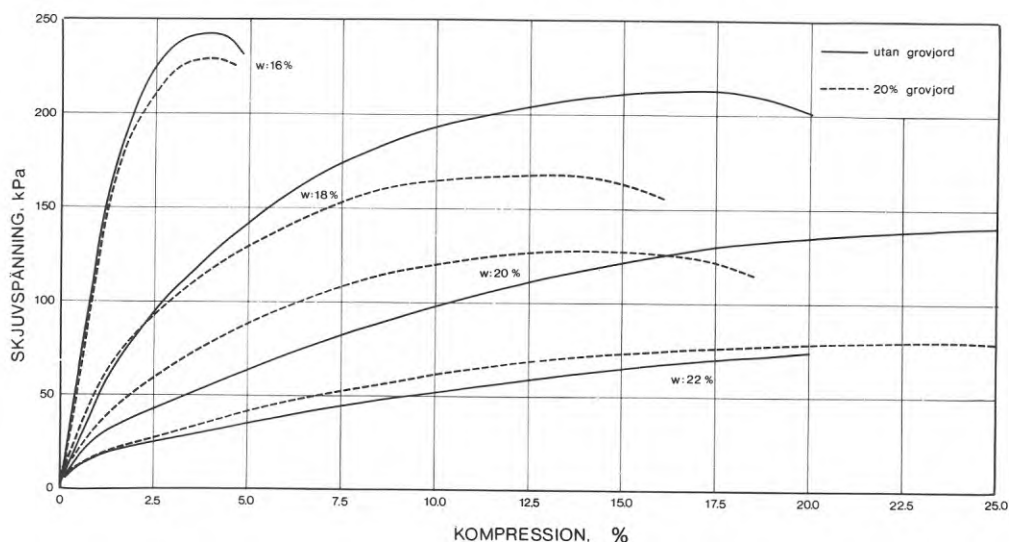


FIG. 74. Spännings-kompressionssamband hos två typer av moränlera, en med och en utan grovjord, se FIG. 66, enligt enaxliga tryckförsök.

The stress-strain relationships of two types of boulder clay, one with and one without coarse particles, see FIG. 66, from unconfined compression tests.

1) Flisighet definieras av $f = b/c$ och sfäricitet av $\psi = (bc/a^2)^{1/3}$ där a , b och c är kornens karakteristiska mått enligt Krumbein, 1941.

De okonsoliderade, odränerade triaxialförsöken utfördes vid olika celltryck. Brottenveloperna har redovisats i FIG. 69. Den dränerade skjuvhållfastheten tycks oberoende av celltryckets storlek bero av grovjordhalten på samma sätt som den odränerade skjuvhållfastheten.

Förekomsten av grova korn påverkar således hållfasthetsparametrarna. Försök utfördes för att få en uppfattning av hur mycket hållfasthetsparametrarna påverkas av att man på laboratoriet inte undersöker de grövsta fraktionerna i moränleran. Hos naturlig moränlera från Sparta, Lund och Tygelsjö sorterades fraktioner större än 1,00 och 0,125 mm respektive 0,50 mm bort enligt FIG. 75. Konsoliderade, dränerade försök utfördes på prover av de naturliga och de finkorniga moränlerorna packade vid naturlig vattenhalt. Spännings-kompressionskurvorna blev konforma för de olika kornfördelningarna. FIG. 76 visar för moränleran från Sparta, Lund de dränerade hållfasthetsparametrarna som funktion av portalet.

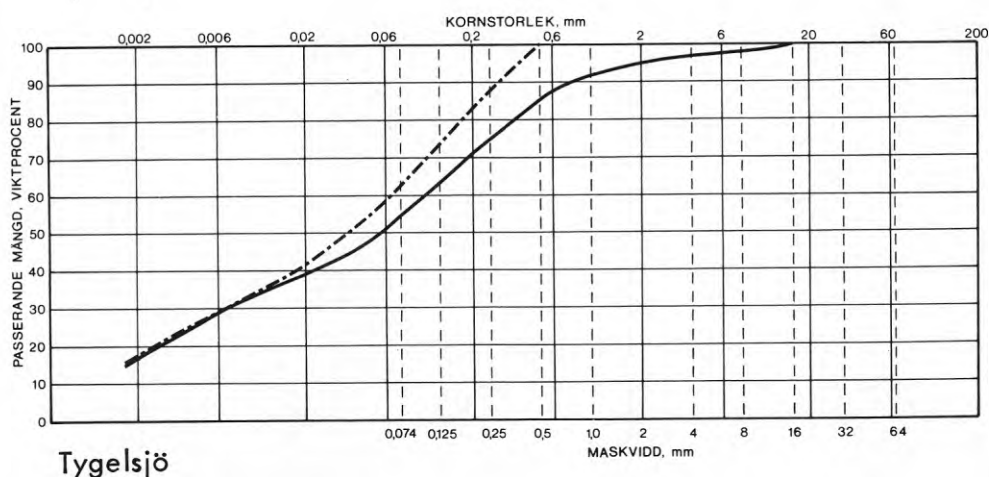
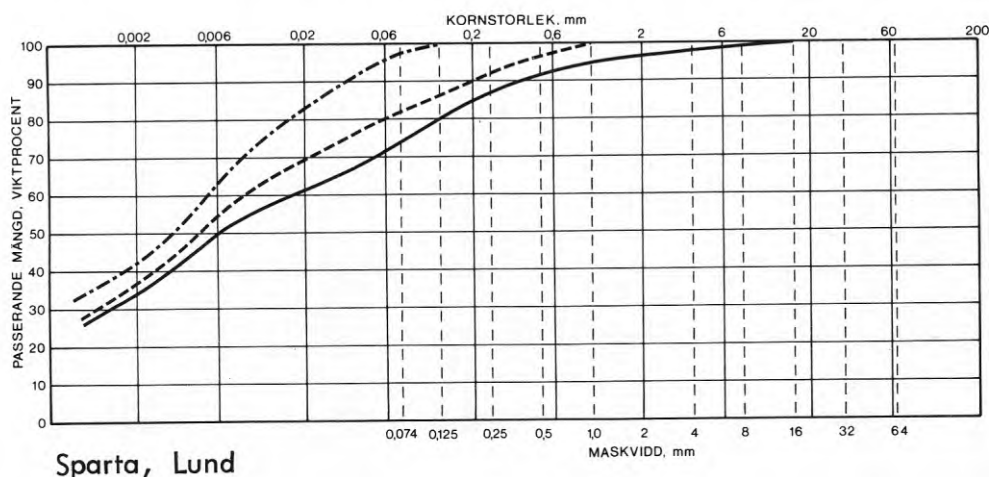


FIG. 75. Kornfördelningarna hos moränlerorna i naturligt tillstånd och när de grövre fraktionerna borttagits.

The particle size distributions of the boulder clays in the natural state and when the coarser fractions are removed.

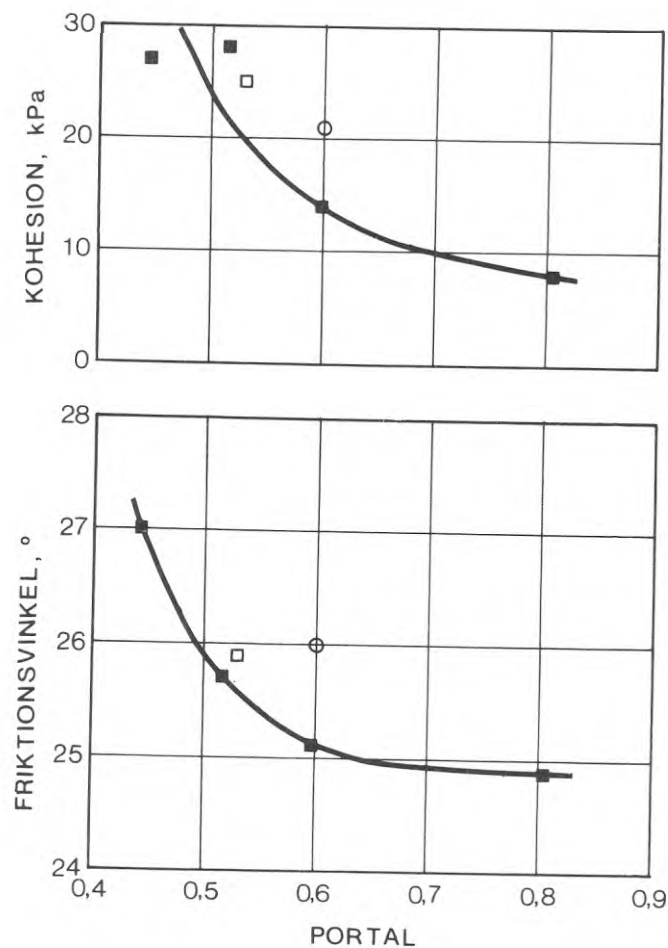


FIG. 76. De dränerade hållfasthetsparametrarnas beroende av portalet enligt triaxialförsök på packade prover med kornfördelningar enligt FIG. 75. Vattenhalt ca 17%. (Sparta, Lund).

■, naturlig moränlera; □, korn $\leq 1,00$ mm; ○, korn $\leq 0,125$ mm.

The drained shear strength parameters versus the void ratio according to triaxial tests. Recompact-ed boulder clay with different particle size distributions, see FIG. 75. Water content $\approx 17\%$. (Sparta, Lund).

■, natural boulder clay; □, particles ≤ 1.00 mm; ○, particles ≤ 0.125 mm.

Hållfasthetsparametrarnas beroende av kornfördelningen för moränleran från Tygelsjö framgår av TAB. 19.

TAB. 19 Hållfasthetsparametrarna bestämda med dränerade triaxialförsök på moränlera från Tygelsjö med två kornfördelningar.

Typ av moränlera	ρ_d t/m ³	w_o %	S_r %	c' kPa	ϕ' grader
Naturlig	1,82	9,9	57	19	27,8
Partiklar $\geq 0,5$ mm bortsiktade	1,85	9,4	57	19	29,6

Sammanfattningsvis visar försöken att när de grövsta fraktionerna inte var representerade i den testade volymen förändrades hållfasthetsparametrarna endast svagt. Vid ovannämnda försök sorterades 10–20 viktsprocent bort, medan vid försök i allmänhet knappast en så stor andel brukar vara borttagen.

4.2.3 Samband och gränser

Förutom att kornfördelningen kan vara olika hos en liten och en stor provvolym inverkar även existerande svaghetszoner på volymberoendet. Svaghetszonerna kan i en moränlera utgöras av glatta brottplan eller kontinuerliga brottzoner orsakade av normaltrycket från isen (Pusch, 1973), av frysning av grundvattnet eller senare uttorkning (Kaczyński & Wysokiński 1970). Ju större provkroppen är desto större är sannolikheten för att svaghetszoner finns samt att dessa är kritiskt orienterade. Orienterings betydelse visades i FIG. 9.

När hållfasthetens volymberoende har åskådliggjorts i litteraturen har olika parametrar använts. Weibull valde provets volym¹⁾, Bishop och Protodyakonov & Kojman provets diameter respektive sidlängd och Los skjувarean (se litteraturgenomgång). Av Los undersökningar framgick, FIG. 16, att Weibulls och Los samband kan vara lämpligast. Protodyakonov & Kojmans och Bishops uttryck kan inte användas, eftersom dessa uttryck förutsätter att sprickavståndet är lika inom hela provet, vilket sannolikt inte är fallet i moränlera. Vid redovisning av försöksresultaten har i denna rapport provvolymen använts som storleksmått. Anledningen härtill är att det är volymen som bestämmer sannolikheten för förekomst av svaghetszoner och stora partiklar. Vid enaxliga tryckförsök på moränlera från Sparta, Lund (FIG. 34) och från Tygelsjö (FIG. 54) varierade h/d -förhållandet. Försöksresultaten anslöt då bäst till en medelkurva med provvolymen som storleksmått. För moränleran från Sparta, Lund

1) Ursprungligen valde Weibull provets längd och förutsatte att arean var konstant, men senare har även Weibulls samband använts för de fall h/d -förhållandet varit konstant.

är däremot sambandet mellan hållfasthet och provarea mycket svagt med korrelationskoefficienten 0,48. En ytterligare anledning att välja volymen som storleksmått är att axiellt splittringsbrott utbildades vid de lägre vattenhalterna och i sådana fall kan inte någon skjuvarea definieras.

En svårighet med volymen som storleksmått är att bestämma denna vid konförsök, direkta skjuvförsök, vingborrförsök och plattförsök. Om man vid vingborrförsök väljer volymen lika med den av brottytorna inneslutna cylindervolymen erhålls enligt avsnitt 3.4.3 god överensstämmelse med volymberoendet enligt enaxliga tryckförsök. Att den influerade volymen vid vingborrförsök definieras på detta sätt beror av att det initiella brottet kan antas utbildas från vingarnas sidor vid någon svaghetszon. Eftersom moränlera ofta är spröd initierar detta brott makrobrottet.

Vid konförsök har volymen antagits motsvara en stympad cirkulär kon enligt FIG. 25. Influensvolymen blir enligt ekv. (12) $0,07 \text{ cm}^3$ vid konintrycket 5 mm och $0,5 \text{ cm}^3$ vid intrycket 10 mm. För att konhållfastheten skall ansluta till skjuvhållfasthetens volymberoende bestämt med enaxliga tryckförsök innebär detta att den influerade volymen vid konförsök är större ($2\text{--}10 \text{ cm}^3$ enligt FIG. 78). Å andra sidan är det möjligt att den enligt ekv. (12) antagna volymen är korrekt. Konförsöket kan i stället antas bestämma intakthållfastheten, varför konhållfastheten inte skall ansluta till volymberoendekurvan. Detta antagande styrks av att vid fickvingborrförsöken en hållfasthet uppmättes som var lika stor som konhållfastheten och vingborrhållfastheten kan antas motsvara intakthållfastheten med hänsyn till att vingen är liten och till att brottplanet till viss del är tvångsstyrt. Även Lo (1970) och Blight (1967) ansåg att vingborrhållfastheten motsvarar intakthållfastheten. Enligt mina undersökningar gäller inte detta generellt eftersom hållfastheten bestämd med fältvingborr uppvisar ett volymberoende, se FIG. 53, TAB. 8 och s. 107. Spridningen vid konförsök torde inte återspegla en verklig hållfasthetsspridning utan i stället att metoden är olämplig med hänsyn till halten grovjord (stenträff o.d.)

Vid direkta skjuvförsök är den influerade volymen svår att bestämma. Vid försök i Casagrandes skjuvbox är större del av provet än spaltöppningens storlek influerad. Detta framkom bl.a. vid skjuvförsök på en skiktad triassisk lera från Vallåkra, där brottytan vid låga normalspänningar var mycket ojämn. (Jfr även Pattons försök, s. 30).

Det kritiska grundtryckets beroende av plattdiametern vid plattförsök redovisades i FIG. 51. Den influerade volymen vid plattförsök är svår att definiera. Glidytns utbredning beror av belastningsytans form. Vid det plana fallet är centrumvinkeln $133,6^\circ$, vilket innebär att glidytns djupaste punkt når $0,66 B$ under markytan. B anger belastningsytans bredd. Enligt Brinch Hansen (1966) beror centrumvinkeln förhållandevis svagt av belastningsytans form. Enligt Brinch Hansen blir centrumvinkeln minst vid kvadratisk lastyta motsvarande vinkeln 120° . Enligt Bjurström (1944) blir vid sfärisk glidyta centrumvinkeln $133,4^\circ$.

Glidytns form är tydligen tämligen oberoende av lastytans form. Den av glidytn inneslutna jordvolymen bör kunna approximeras till en ellipsoid med huvudaxlarna $2d$, d och $0,66 d$. Det initiala brottet kan antas utbildas inom denna volym, varför den influerade volymen vid plattförsök kan ansättas till

$$V = \frac{2}{3} \pi \cdot 2d \cdot d \cdot 0,66 d = 2,76 d^3 \quad (39)$$

Här antas för enkelhetens skull att denna volym utgör den influerade volymen vid såväl snabba som långsamma försök. Det kritiska grundtryckets beroende av volymen blir därmed för plattförsöken i Rehab, Lund

$$q_k = 7,45 V^{-0,145} \text{ MPa} \quad (40)$$

om V uttrycks i cm^3 (liksom vid tryckförsöken). Om V uttrycks i m^3 blir $q_k = 1,00 V^{-0,145} \text{ MPa}$.

Det kritiska grundtryckets volymberoende enligt ekv. (40) kan jämföras med den odränerade hållfasthetens volymberoende bestämt med enaxliga tryckförsök enligt ekv. (16) för moränleran från Rehab, Lund. FIG. 77 visar att volymberoendet är större för skjuvhållfastheten bestämd med enaxliga tryckförsök. Orsakerna härtill kan vara följande: Det är mindre sannolikt att den influerade volymen vid plattförsök är så stor som ekv. (39) anger. Brottytan är vidare tvångsstyrd vid plattförsök, vilket försvagar det kritiska grundtryckets volymberoende. Ett större normaltryck mot den potentiella glidytan råder vid plattförsök än vid enaxliga tryckförsök, vilket motverkar sprött brott och medför därmed ett mindre uttalat volymberoende.

I FIG. 77 är även resultaten redovisade från vingborrförsöken, se TAB. 8, utförda 80 m norr om provgroparna i Rehab, Lund. Volymberoendet tycks vara lika starkt vid vingborrförsöken som vid plattförsöken. Detta kan bero av att brottytan i båda fallen är tvångsstyrd.

I avsnitt 4.4 jämförs skjuvhållfastheten bestämd med vingborrförsök och enaxliga tryckförsök med plattbärligheten.

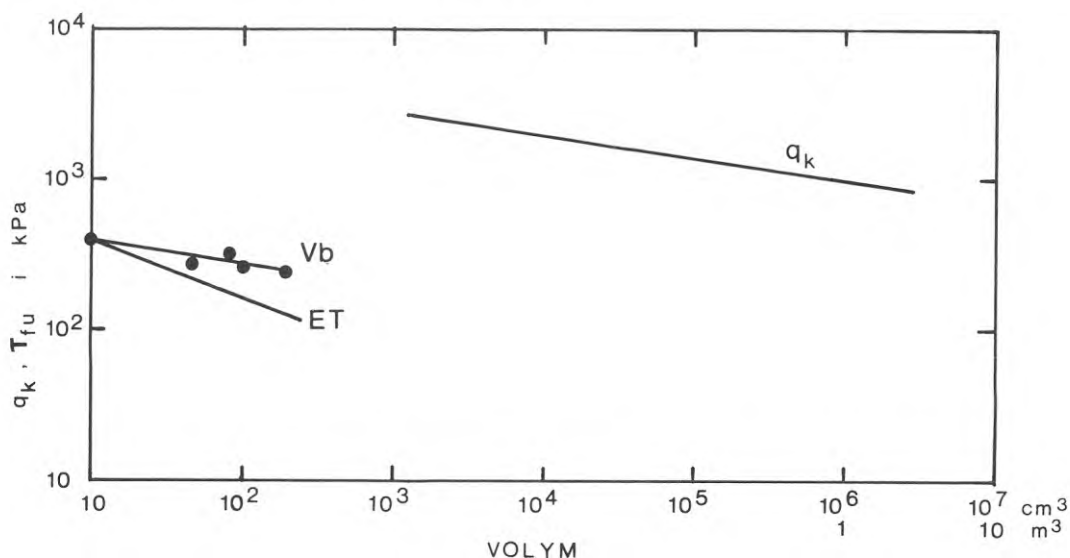


FIG. 77. Det kritiska grundtryckets (q_k) volymberoende enligt utförda plattförsök samt den odränerade skjuvhållfasthetens volymberoende enligt enaxliga tryckförsök (ET) och vingborrförsök (Vb) (Rehab, Lund).

The dependence of the critical pressure (q_k) on the influenced soil volume according to plate load tests and the dependence of the undrained shear strength on the influenced volume according to unconfined compression tests (ET) and field vane tests (Vb) (Rehab, Lund).

Spridningen i hållfasthet vid de enaxliga tryckförsöken avtar med ökande volym och tycks nedåt begränsas av ett asymptotvärde. Eftersom spridningens storlek beror av provkroppens storlek är det olämpligt att använda en regressionsanalys, som bestämmer den nedre begränsningen. Los samband, ekv. (9), är således olämpligt för moränleror. (Att Lo inte erhöll någon hållfasthetsspridning vid en viss volym är anmärkningsvärt, eftersom olika brottyper utbildas enligt bl. a. försöken redovisade i FIG. 9.) Med hänsyn till spridningens beroende av provvolymen bör en lämplig kurvpassning erhållas vid dubbellogaritmisk representation. FIG. 78 återger på detta sätt de undersökta moränlerornas volymberoende, vilka tidigare redovisats i linjärdiagram i FIG. 34, 45 och 54. I FIG. 78 är konhållfastheten i samtliga fall redovisad vid volymen $0,5 \text{ cm}^3$ (trots varierande konintryck) med hänsyn till svårigheten att korrekt bestämma den influerade volymen vid denna försökstyp.

Weibulls teori bör således vara lämplig för att återge hållfasthetens volymberoende hos moränleror förutsatt att sambandet modifieras med en undre och eventuellt en övre begränsning hos hållfastheten. Den undre begränsningen benämns här verksam hållfasthet och antas motsvara hållfastheten i en stor jordvolym. Den verksamma hållfastheten antas i denna rapport sammanfalla med de lägsta hållfastheterna uppmätta vid enaxliga tryckförsök, eftersom minimivärdet blev detsamma inom volymintervallet ca $70 - 200 \text{ cm}^3$. Minimihållfastheten blev vidare lika stor hos ostörd som hos laboratoriepackad moränlera. Den övre gränsen för hållfastheten, av bl. a. Lo (1970) benämnd intakthållfasthet, bestäms troligen med konförsök eller fickvingborrförsök.

I TAB. 20 anges utvärderad intakthållfasthet, volymberoende, verksam hållfasthet samt intaktvolym (den största volym inom vilken intakthållfastheten uppmätts).

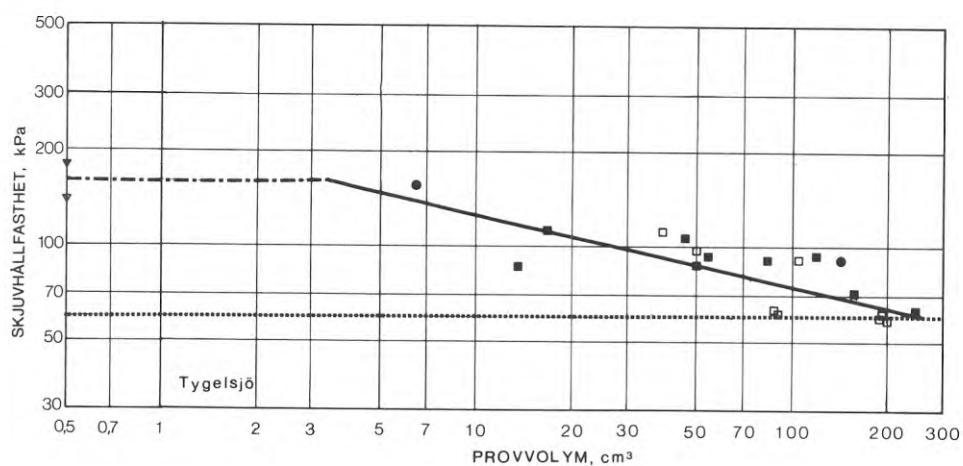
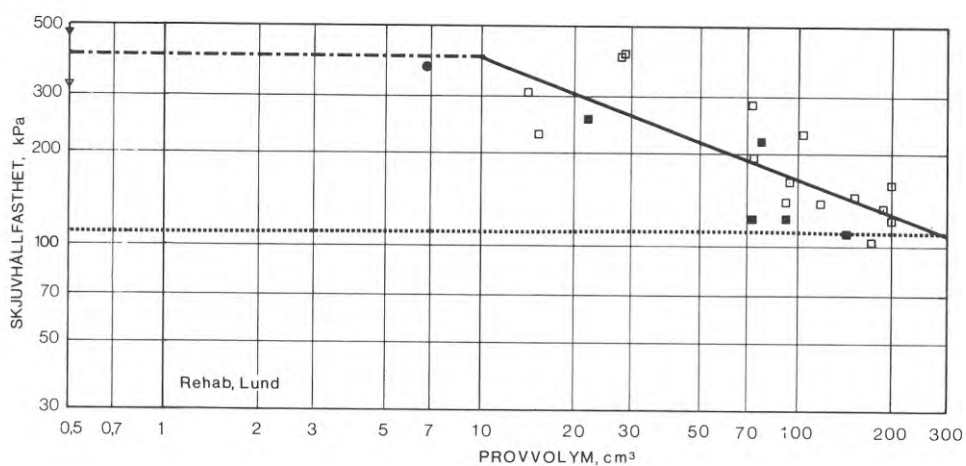
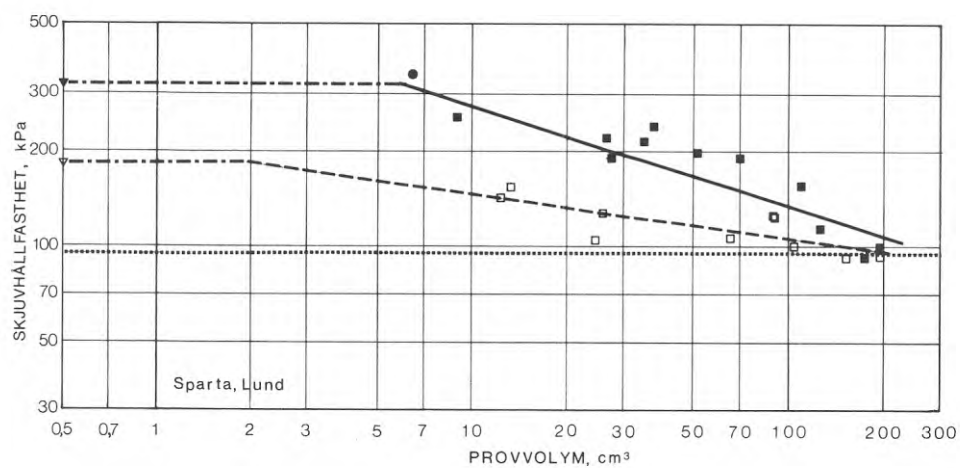


FIG. 78. Den odränerade skjuvhållfasthetens volymerberoende hos tre olika moränleror. Motsvarande kurvor i lin-lin-diagram återfinns i FIG. 34, 45 och 54. Beteckningar, se dessa figurer.
 — — — — —, antagen intakt hållfasthet; , antagen verksam hållfasthet.

The undrained strength-volume relationships for three different boulder clays. Corresponding datas are shown in lin-lin-diagram in FIG. 34, 45 and 54. Legend, see respective figures.
 — — — — —, assumed intact strength; , assumed operational strength.

TAB. 20 Parametrar som definierar volymberoendet hos den odränerade skjuvhållfastheten.

Lokal	Typ	Intakthållf. kPa	Volymberoende ¹⁾ kPa	Verksam hållf. kPa	Intaktvolym cm ³
Sparta, Lund	Ostörd	325	$\tau_{fu}=558 V^{-0,312}$	95	6
	Packad	185	$\tau_{fu}=193 V^{-0,130}$	95	2
Rehab, Lund	Ostörd + packad	400	$\tau_{fu}=949 V^{-0,383}$	110	10
Tygelsjö	Ostörd + packad	160	$\tau_{fu}=214 V^{-0,227}$	≈ 60	4 (-7)

1) Volymen V i cm³

Volymberoendet avtog med ökande vattenhalt och blev försumbart över en viss vattenhalt. Detta framgår av FIG. 36 för moränleran från Sparta, Lund och av FIG. 55 för moränleran från Tygelsjö. Orsaken är att brottet övergår från att vara sprött till att bli segt vid ökande vattenhalt och därmed avtar volymberoendet enligt förklaringen på s. 130.

Hittills har framför allt den odränerade hållfasthetens volymberoende behandlats. Den dränerade hållfasthetens volymberoende torde inte vara lika starkt. Brottet blev segt vid triaxialförsöken och därmed avtar sannolikheten för ett volymberoende. Vid triaxialförsök med provdiametern 37 mm och 50 mm uppmättes ingen skillnad i hållfasthet hos moränleran från Tygelsjö. Skempton (1964) fann också att vid skred i en moränlera i Selset en hållfasthet mobiliserades som nära överensstämde med topphållfastheten vid dränerade skjuvförsök.

Avslutningsvis kan konstateras att försöksresultaten visar att hållfasthetens volymberoende väl återges med Weibulls teori. Emellertid måste teorin begränsas uppåt med en hållfasthet motsvarande intakthållfastheten och nedåt motsvarande hållfastheten i en stor jordvolym - benämnd verksam hållfasthet. Den verksamma odränerade hållfastheten motsvaras troligen

av minimivärdet uppmätt vid enaxliga tryckförsök (eventuellt även vid vingborrförsök enligt s. 147).

För det dränerade fallet motsvarar den verksamma hållfastheten troligen hållfastheten bestämd med dränerade triaxialförsök vid provdimensionen $h = 2d = 100$ mm.

4.3 Jämförelser mellan olika metoder att bestämma hållfasthetsparametrarna

I avsnitt 4.2 framkom att hållfastheten beror av försöksmetoden på grund av hållfasthetens volymberoende. Eftersom spridningen är kopplad till detta beroende ger också de olika metoderna olika stor spridning. I detta avsnitt kommer olika metoders lämplighet att analyseras.

4.3.1 Odränerad skjuvhållfasthet

Jacobsen (1967, 1970) har angett att för de danska moränlerorna erhålls en mycket god överensstämmelse mellan olika metoder, om vissa korrektionsfaktorer används. Den vingborrade hållfastheten (vingtyp DGI) reducerad till 90 % av uppmätt värde överensstämmer med hållfastheten uppmätt vid enaxliga tryckförsök ($h = d = 35,7$ mm) och vid plattförsök i fält ($d = 50 - 150$ mm). De enaxliga tryckförsöken ger således samma hållfasthet som plattförsöken. Plattornas lilla storlek bör emellertid beaktas. Att den vingborrade hållfastheten blir störst beror enligt Jacobsen av att brottplanet då är tvångsstyrt.

Mina försök visar emellertid att hållfasthetsförhållandet mellan olika provningsförfaranden beror av moränlerans vattenhalt, vilket framgår av FIG. 79. Såsom nämndes i avsnitt 4.2 avtar volymberoendet när moränleran blir alltmer plastisk. Konförsöket ger lika stor hållfasthet som det enaxliga tryckförsöket vid godtycklig provvolym, när vattenhalten överstiger plasticitetsgränsen. (Över denna vattenhalt var samtidigt provkropparna vattenmättade.)

En jämförelse mellan hållfastheten hos de olika moränlerorna uppmätt vid konförsök, vingborrförsök och enaxliga tryckförsök görs i TAB. 21. Hållfastheterna är uttryckta i förhållande till den utvärderade verksamma hållfastheten.

TAB. 21 Förhållandet mellan hållfasthet enligt olika metoder och verksam hållfasthet hos ostörd och laboratoriepackad moränlera.

Lokal	Typ	Verksam hållfasthet kPa	Uppmätt hållf. i förhållande till verksam hållf.		
			Konförsök	Vingborrförsök	Enaxligt tryckförsök ($V = 150-200 \text{ cm}^3$)
Sparta, Lund	Ostörd	95	3,5	3,7 ¹⁾	1,0
	Packad	95	1,9	-	1,0
Rehab, Lund	Ostörd	110	4,4	3,5 ¹⁾ ; $\approx 2,3$ ²⁾	$\approx 1,0$
	Packad	110	3,0	-	1,2
Tygelsjö	Ostörd	≈ 60	3,0	2,6 ¹⁾ ; 1,5 ³⁾	1,1
	Packad	≈ 60	2,3	-	1,0

1) $h = 32 \text{ mm}$, $d = 16 \text{ mm}$. 2) $h = 100 \text{ mm}$, $d = 50 \text{ mm}$. 3) $h = 90 \text{ mm}$, $d = 45 \text{ mm}$.

Den verksamma hållfastheten kan enligt TAB.21 med relativt god noggrannhet bestämmas som medelvärdet från enaxliga tryckförsök på laboratoriepackad moränlera vid provdimensionen $h = 100 \text{ mm}$, $d = 50 \text{ mm}$. Hållfastheten bestämd med konförsök ger i allmänhet en för hög hållfasthet på grund av det tidigare visade volymberoendet. Endast nära full vattentätning ger enligt FIG. 79 konförsöket ett mått på den verksamma hållfastheten.

Den vingborrade hållfasthetens medelvärde blir för stort i förhållande till den verksamma hållfastheten. Om man i stället för medelvärdet utgår från uppmätt minimivärde finner man följande förhållanden (TAB. 22) för de ostörda moränlerorna.

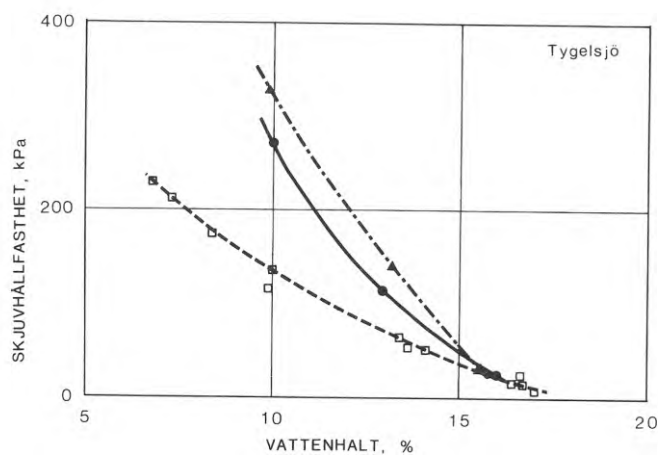
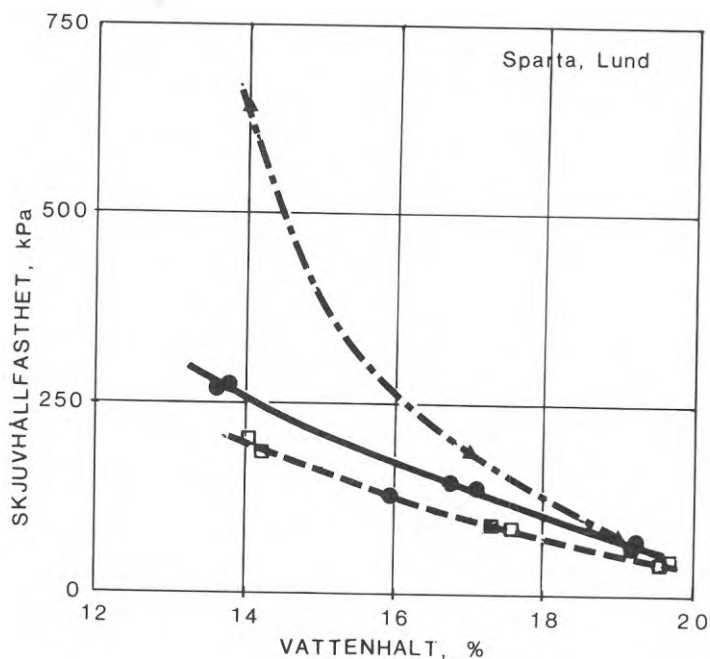


FIG. 79. Den odränerade skjuvhållfastheten hos laboratoriepackad moränlera som funktion av vattenhalten. $e_0 = 0,46-0,54$ för moränleran från Sparta, Lund. $e_0 = 0,34-0,38$ för moränleran från Tygelsjö utom vid $w > 16\%$ då $e_0 \approx 0,45$. \blacktriangle , konförsök; \bullet , enaxligt tryckförsök, $V = 12-15$ (Sparta, Lund) resp. 20 cm^3 (Tygelsjö). \square , enaxligt tryckförsök, $V = 150-200\text{ cm}^3$.

The undrained shear strength of a recompacted boulder clay versus the water content. $e_0 = 0.46-0.54$ for the boulder clay from Sparta, Lund and $e_0 = 0.34-0.38$ for Tygelsjö except when $w > 16\%$ then $e_0 \approx 0.45$. \blacktriangle , fall cone test; \bullet , unconfined compression test, $V = 12-15$ (Sparta, Lund) resp. $V = 20\text{ cm}^3$ (Tygelsjö). \square , unconfined compression test $V = 150-200\text{ cm}^3$.

TAB. 22 Förhållandet mellan vingborrhållfasthetens minimivärde och verksam hållfasthet.

Lokal	Min. hållfasthet vid vingborrförsök i förhållande till verksam hållfasthet	Antal värden
Sparta, Lund	3,1 ¹⁾	3
Rehab, Lund	2,5 ¹⁾ ; $\approx 1,4$ ²⁾	2;2
Tygelsjö	1,9 ¹⁾ ; 1,0 ³⁾	8;4

1) $h = 32$ mm, $d = 16$ mm. 2) $h = 100$ mm, $d = 50$ mm. 3) $h = 90$ mm, $d = 45$ mm.

Den lägst uppmätta hållfastheten vid vingborrförsök överensstämmer bättre med den verksam hållfastheten än medelvärdet. Vingdimensionen bör vara minst $h = 2d = 100$ mm.

Sammanfattningsvis kan konstateras att hållfastheten i en stor jordvolym troligen kan bestämmas med enaxliga tryckförsök på laboratoriepackad moränlera med provdimensionen $h = 100$ mm, $d = 50$ mm. Lämpligt antal försök bestäms av hållfasthetsspridningen och är för de undersökta moränlerorna ca 4. Den verksam hållfastheten kan även bestämmas med vingborrförsök. Man väljer då största möjliga vinge ($h = 2d \geq 100$ mm). Den verksam hållfastheten motsvarar de lägst uppmätta värdena. En sådan utvärderingsmetod kräver ett stort antal försök (minst 10).

Dessa rekommenderade förfaranden har fördelen att de kan utföras med standardiserad utrustning.

4.3.2 Dränerad skjuvhållfasthet

Jacobsen (1970) har jämfört de dränerade hållfasthetsparametrarna bestämda dels med triaxialförsök ($h = d = 70$ mm och $h = 2d = 71,4$ mm, den förra med glatta ändytor) och dels med plattförsök ($d = 0,05 - 0,15$ m). Genom att vid plattförsöken variera lasten utanför plattan kunde hållfasthetsparametrarna utvärderas. Resultaten är redovisade i FIG. 5. Ingen

noterbar skillnad erhöles mellan de två typerna av triaxialförsök. Däremot gav plattförsöken andra $c' - \phi'$ - värden än triaxialförsöken, vilket enligt Jacobsen berodde på olika spänningsnivå vid fält- och laboratorieförsöken och på att brottet var progressivt vid plattförsöken. Man måste emellertid ifrågasätta om värdena utvärderade från plattförsöken är representativa för en stor jordvolym, eftersom plattorna var små.

Helenelund (1964) anser att de dränerade hållfasthetsparametrarna lämpligen bestäms med ringskjuvförsök i fält.

I denna undersökning bestämdes de dränerade parametrarna från dränerade triaxialförsök med provdimensionen $h \approx 2d = 75 - 100$ mm. Ingen noterbar skillnad erhöles mellan de två provdimensionerna. Eftersom erforderlig provstorlek vid de enaxliga tryckförsöken är $h = 2d = 100$ mm bör denna dimension även vara tillräcklig vid de dränerade triaxialförsöken. Anledningen till detta är att brottet var plastiskt och spridningen i hållfasthet var liten vid de dränerade triaxialförsöken. Eftersom Jacobsens resultat inte uppvisade någon nämnvärd skillnad mellan de två provdimensionerna $h = d$ och $h = 2d$, bör triaxialförsöken kunna utföras med den "standardiserade" provdimensionen $h = 2d = 100$ mm.

Dränerade ringskjuvförsök utfördes i ringa omfattning. Resultaten var svåra att utvärdera. Speciellt gällde detta vid höga normaltryck, troligen på grund av att lokala brott vid skjuvdonets rand medförde att skjuvarean blev mindre än den teoretiska. Detta antyds även av att brottenveloppen blev starkt krökt. Vid låga normaltryck blev överensstämmelsen tämligen god mellan hållfasthetsenveloppen från triaxialförsök och ringskjuvförsök.

Ibland bestäms hållfasthetsparametrarna i skjuvbox typ Casagrande. Denna metod är enligt min mening mindre lämplig eftersom hållfastheten kan överskattas - framför allt kohesionen - på grund av att brottplanet är tvångsstyrt, se s. 113.

En lämplig metod att bestämma de dränerade hållfasthetsparametrarna bör således vara dränerade triaxialförsök. Provkroppens dimension bör vara $h = 2d = 100$ mm. Däremot kan odränerade triaxialförsök med portryckmätning ge felaktiga hållfasthetsparametrar, se s. 87. Laboratoriepackade prover kan användas.

4.4 Bärighet och sättningar vid plattgrundläggning

När tillåtet grundtryck bestäms inför plattgrundläggning skall säkerheten mot brott vara acceptabel och sättningarna inte bli så stora att konstruktionen skadas. Oftast är det inte totalsättningens utan snedsättningens storlek som blir avgörande, eftersom ett fundament kan vila på ett stort block medan ett intilliggande kan vila på finkornig moränlera.

För de fasta bottenmoränlerorna är det mestadels säkerheten mot brott som bestämmer tillåtet tryck, medan för de ytliga moränlerorna det ofta blir sättningarnas storlek som blir dimensionerande – speciellt som sättningarna måste väljas restriktivt med hänsyn till risken för snedsättning. Helene-lund (1964) har utgående från rekommenderade friktionsvinklar baserade på torrdensiteten, se TAB. 1, visat hur tillåtet grundtryck beror av torrdensiteten under förutsättning att brottsäkerheten är 3 och medelsättningen maximalt 10 mm, se FIG. 80.

Här skall metoder anges för beräkning av bärighet och uppkommande sättningar vid plattgrundläggning.

4.4.1 Bärighet

Plattors bärighet kan beräknas enligt ekv. (41) för fallet vertikal last, horisontell platta och horisontell markyta

$$q_B = 0,5 g \rho' b N_p s_p + q N_q s_q + c N_c s_c \quad (41)$$

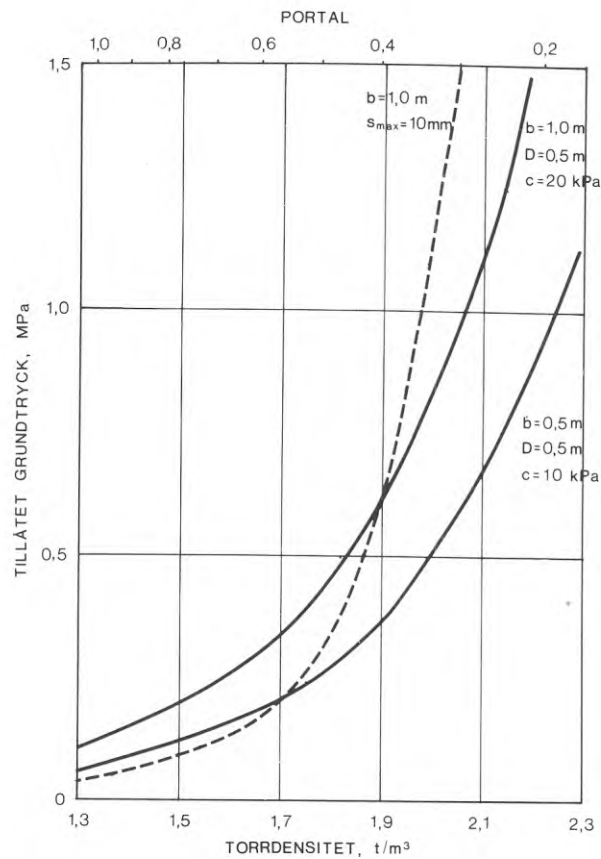


FIG. 80. Tillåtet grundtryck för en smal bottenplatta grundlagd på morän med varierande densitet om tillåten sättning är maximalt 10 mm och säkerheten mot brott skall vara minst 3-faldig. Grundläggningdjup 0,5 m (Helenelund, 1964).

Dependence of the allowable bearing pressure on the density of till if both 3-fold safety against failure and 10 mm maximum settlement are required. The plate is considered to be long, with $b = 0.5\text{ m}$. Foundation depth 0.5 m below ground surface (Helenelund, 1964).

där q_B = bärigheten
 ρ' = effektivdensiteten under grundläggningsnivån
 N_p, N_q, N_c = bärighetsfaktorer
 q = tryck på grundläggningsnivån utanför plattan
 s_p, s_q, s_c = formfaktorer för plattor med ändlig utsträckning

Vid de plattförsök jag utfört är $q = 0$, $s_p = 1 - 0,40 b/l = 0,6$ och $s_c = 1 + 0,2 b/l = 1,2$, där formfaktorerna valts enligt Brinch Hansen (1970). Med dessa värden insatta blir bärighetsekvationen

$$q_B = 3 \rho' b N_p + 1,2 c N_c \quad (42a)$$

Bärighetsfaktorerna kan väljas enligt Brinch Hansen (1970) och blir då

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi$$

$$N_p = 1,5 (N_q - 1) \tan \phi$$

där $N_q = e^{\pi \tan \phi} \cdot \tan^2(45 + \phi/2)$ (Prandtl's lösning)

För det odränerade fallet ($\phi = 0$) blir

$$q_B = 1,2 \cdot 5,14 \tau_{fu} = 6,2 \tau_{fu} \quad (42b)$$

Uppmätta kritiska grundtryck från plattförsöken kommer att jämföras med bärigheter beräknade enligt ekv. (42). Man skall då beakta att vid uppnått kritiskt grundtryck inte jordens hela bärförmåga är uttömd, men att ytterligare lasttillskott medför stora och långvariga vertikallrörelser. Å andra sidan väljs lämpligen en lägre säkerhetsfaktor om man utgår från det kritiska grundtrycket, förslagsvis 2,0 à 2,5.

I Rehab, Lund bestämdes det kritiska grundtryckets storleksberoende. Detta är återgivet i FIG. 81 med en medelkurva inlagd enligt Weibulls teori. I figuren jämförs de uppmätta kritiska grundtrycken med de teoretiskt beräknade bärigheterna. Bärigheten har för långtidsfallet beräknats utgående från resultaten av dränerade triaxialförsök på packad moränlera. Bärig-

heten för korttidsfallet har beräknats utgående från medelhållfastheten vid provvolymen 200 cm^3 och från den utvärderade verksamma hållfastheten enligt enaxliga tryckförsök.

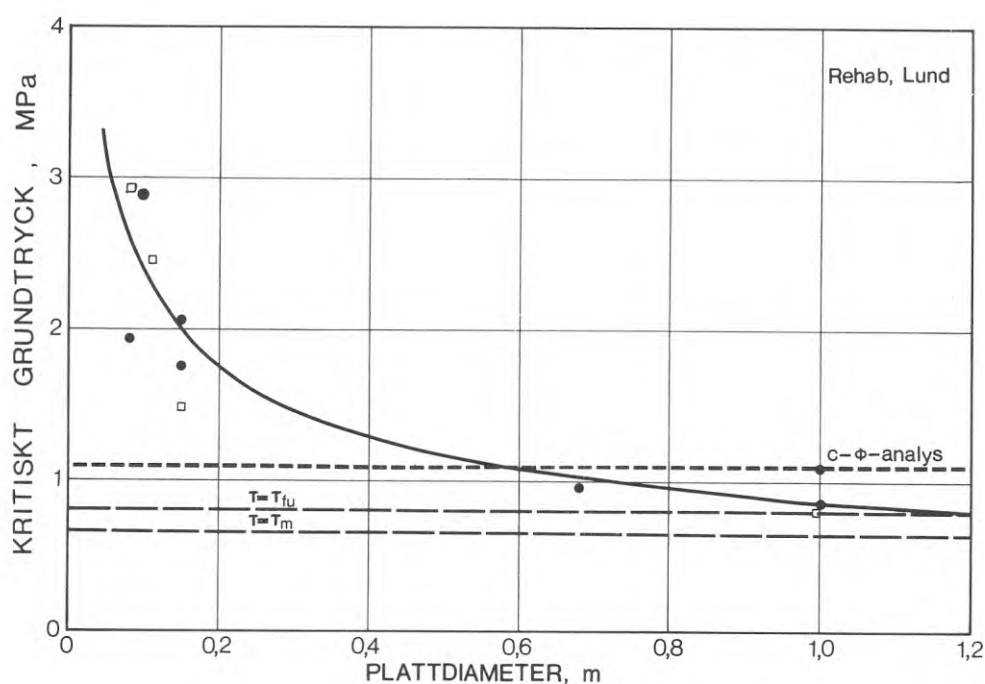


FIG. 81. Uppmätta kritiska grundtryck och teoretiskt beräknade bärrigheter hos moränleran från Rehab, Lund, se FIG. 51. -----, långtidsfallet med $c' - \phi'$ enligt CD-försök; — — — —, korttidsfallet med $\tau = \tau_{fu}^{\text{medel}}$ ($V = 150 - 200 \text{ cm}^3$) respektive $\tau = \tau_m$ enligt enaxliga tryckförsök.

The measured critical pressure of the boulder clay from Rehab, Lund, FIG. 51, compared with the theoretically calculated bearing capacity. -----, calculated long term bearing capacity with $c' - \phi'$ from the triaxial tests; — — — —, calculated short term bearing capacity according to $\tau = \tau_{fu}^{\text{medel}}$ ($V = 150 - 200 \text{ cm}^3$) and to the operational strength τ_m ; both determined from unconfined compression tests.

FIG. 81 visar att bärrigheten beräknad från triaxialförsöken överstiger det kritiska trycket 1,0 - 1,3-faldigt vid plattdiametern 1,0 m. Detta är rimligt med hänsyn till att bärrigheten är större än det kritiska grundtrycket. Om bärrigheten beräknas utgående från den odränerade medelhållfastheten stämmer bärrigheten väl med uppmätta kritiska grundtryck vid plattdiametern 1,0 m. Däremot underskattas det kritiska grundtrycket 1,2 - 1,6-faldigt, om beräkningen baseras på den verksamma hållfastheten. Det är dock möjligt att den beräknade bärrigheten baserad på den verksamma hållfastheten ger bättre överensstämmelse med jordens bärrighet för en mycket stor platta.

Bärigheten överskattas starkt när den baseras på parametrar från de konsoliderade, odränerade triaxialförsöken .

Pressiometerförsök har utförts i Rehab, Lund av AB Jacobson & Widmark. Försök utfördes i fyra borrhål på olika djup under markytan. Resultatet från ett av försöken ges i bilagan, FIG. B 8. Bärigheten utvärderad från dessa försök varierade med djupet och blev

Djup m	Bärighet enligt pressiometerförsök, kPa	
	gränser	medelvärde
2,0	720-850	780
2,4	740-940	830
2,9	720-1100	870
3,4	640-820	700
4,4	530-660	640

Bärigheten utvärderad från pressiometerförsöken överensstämmer väl med det kritiska grundtrycket utvärderat från plattförsöken .

I TAB. 23 är resultaten samlade från plattförsöken i de olika lokalerna. Även teoretiskt beräknade korttids- och långtidsbärigheter är angivna. För samtliga moränleror gäller att bärigheten beräknad från den laboratoriepackade moränlerans hållfasthet stämmer bättre med de uppmätta kritiska grundtrycken än om beräkningen baseras på den ostörda moränlerans hållfasthet. Detta beror troligen av att den under packningen hopåltade moränleran ger ett bättre medelvärde på jordens egenskaper än det ostörda moränlereprovet .

Beräknade bärigheter baserade på de dränerade parametrarna överstiger för de lerrikare moränlerorna (Sparta och Rehab, Lund) bärigheterna baserade på de odränerade parametrarna .

TAB. 23 Uppmätta kritiska grundtryck vid plattförsök i fält samt teoretiskt beräknade bärrigheter

Lokal	Typ	Plattdiam. m	Uppmätt kritiskt tryck, kPa			Beräknad bärrighet, kPa			τ_m	
			Belastningshastighet			Drän.	Odrän. parametrar			
			Snabb	Långsam	Verksam		Triax	ET		Vb(medel)
Sparta, Lund	Ostörd	0,15	950	720	≤ 700	1660	600	-	-	590
	Packad	0,15	-	-	-	780	590	-	-	-
Rehab, Lund	Ostörd	0,15	1480	1900	≤ 800	-	≈ 650	1520 ¹⁾	930 ¹⁾	680
	Packad	0,15	-	-	-	1080	810	-	-	-
Tygelsjö	Ostörd	1,00	800	900	≤ 800	-	≈ 650	1520 ¹⁾	930 ¹⁾	680
	Packad	1,00	-	-	-	1100	810	-	-	-
Kv. Lärkträdet, Malmö	Ostörd	0,15	≈ 320	≈ 320	≤ 320	175	410	570 ²⁾	370 ²⁾	370
	Packad	0,15	-	-	-	245	370	-	-	-
Kv. Lärkträdet, Malmö	Ostörd	1,10	-	550	≤ 550	-	-	1200 ¹⁾	680 ¹⁾	-
	Packad	1,10	-	-	-	410	≈ 150	-	-	-

Beteckningar: ET = enaxligt tryckförsök ($V = 150-200 \text{ cm}^3$)
Vb(medel) = medelvärde av vingborrad hållfasthet
Vb(min) = minimivärde av vingborrad hållfasthet
 τ_m = verksam hållfasthet enligt enaxliga tryckförsök

1) $h = 2d = 100 \text{ mm}$
2) $h = 2d = 90 \text{ mm}$

För de lerfattiga moränlerorna (Tygelsjö och kv. Lärkträdet, Malmö) blev kohesionsinterceptet litet vid de dränerade triaxialförsöken, varför en liten variation i kohesionen medför stor förändring i teoretiskt beräknad bärlighet vid små plattdiametrar. Sålunda blir den beräknade bärligheten för moränleran från Tygelsjö vid plattdiametern 0,15 m

$$\begin{aligned} q_B &= 205 \text{ kPa} && \text{om } c' = 5 \text{ kPa} \\ q_B &= 400 \text{ kPa} && \text{om } c' = 10 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Det är därför svårt att vid så små plattdiametrar som användes i Tygelsjö förutsäga de dränerade hållfasthetsparametrarnas giltighet.

I kv. Lärkträdet, Malmö belastades en stor platta ($d = 1,10 \text{ m}$). Bärligheten beräknad på basis av de dränerade försöken underskattar det kritiska trycket 1,3-faldigt. För att beräknad och uppmätt bärlighet skall överensstämma krävs en kohesion på 9 kPa mot uppmätt 6 kPa, således en liten skillnad. Om man, som ofta rekommenderas för de lerfattiga moränlerorna, försummar kohesionsandelen blir den beräknade bärligheten 109 kPa, vilket är mycket på säkra sidan.

Viktsondering i kv. Lärkträdet, Malmö visade att moränleran är fast lagrad (20 halvvarv för 200 mm sjunkning vid lasten 1 kN). Enligt Svensk Byggnorm (1967) blir tillåtet grundtryck 67 kPa för fast lagrad mo och plattdiameter 1,0 m. Detta motsvarar en bärlighet på 200 kPa om säkerheten antas vara 3. Även detta ofta använda förfarande underskattar således bärligheten starkt.

Följande slutsatser kan sammanfattningsvis dras från försöken, jfr TAB. 23.

- Moränlerans bärlighet överskattas starkt om beräkningen baseras på den vingborrade hållfasthetens medelvärde.
- Bärligheten beräknad utgående från minimivärdet hos den vingborrade hållfastheten (vingdimension $h = 2d = 100 \text{ mm}$) blir något större än uppmätt kritiskt tryck och stämmer därför väl med bärligheten i fält.

- För de lerrika moränlerorna (moränlerorna från Lund med en lerhalt på ca 30 %) blir bärigheten lägre om den baseras på det odränerade fallet än på det dränerade fallet. För dessa moränleror tycks god överensstämmelse råda mellan uppmätt kritiskt tryck enligt plattförsöken ($d = 1,0$ m) och beräknad bärighet, om beräkningen baseras på medelhållfastheten från enaxliga tryckförsök. Däremot undervärderas moränlerans bärighet om man utgår från den verk samma hållfastheten bestämd med enaxliga tryckförsök. Det är emellertid möjligt att kritiskt grundtryck för plattor större än de här testade överensstämmer med bärigheten baserad på den verk samma hållfastheten. Å andra sidan är brottplanen tvångsstyrda vid plattförsök, varför bärigheten kan vara större än den teoretiskt beräknade. Detta framkom vid försök utförda på en sprickig lera av Lo et al, se s. 37. Vid de försöken översteg hållfastheten utvärderad från plattförsöken 1,4 - 2,3-faldigt den verk samma hållfastheten utvärderad från de enaxliga tryckförsöken.
- För de lerbattiga moränlerorna (kv. Lärkträdet, Malmö och Tygel-sjö med lerhalten 15 - 17 %) bestäms bärigheten av den dränerade hållfastheten. Beräkningarna blir emellertid osäkra - speciellt för mindre plattor - på grund av att en liten variation i uppmätt kohesion medför en stor ändring i beräknad bärighet. Man bör emellertid inte försumma kohesionsandelen.
- Vid en bärighetsberäkning bestäms hållfasthetsparametrarna lämpligen på laboratoriepackad moränlera. Spridningen blir mindre än hos den ostörda moränleran och hållfastheten överensstämmer troligen bättre med den stora jordvolymens. Vid tryckförsöken bör provdimensionen vara minst $h = 2d = 100$ mm.
- Om tillåtet grundtryck baseras på Svensk Byggnorm (1967) för friktionsmaterial underskattas bärigheten kraftigt. I praktiken väljs ändå ibland detta förfarande och motiveras med att det i moränleran ofta finns inlagrade silt- och sandskikt, vilka kan vara avgörande för tillåtet grundtryck.

Som synes råder stor osäkerhet, när man skall bestämma moränleras bärighet. Det kan vara farligt att extrapolera givna slutsatser till moränleror med andra geotekniska parametrar, exempelvis till ett ibland förekommande översta löst moränlager. Om man önskar bestämma moränlerans bärighets-egenskaper mer exakt bör fältförsök utföras. Plattförsök är förhållandevis billiga att utföra, om man ser till de inbesparingar man oftast kan göra i form av ett högre tillåtet grundtryck. Det kritiska grundtrycket tycks inte vara beroende av belastningshastigheten vid försökets utförande (emellertid krävs minst 8 min. per steg och minst 12 steg till kritiskt grundtryck) och platttyp (glatt respektive skrovlig). Kritiskt grundtryck utvärderas lämpligen som den punkt på kryphastighetskurvan¹⁾ där krökningsradien är minst. Vid plattförsök bör plattediametern överstiga 0,60 m.

De undersökta lerfattiga moränlerorna har liknande konsistensgränser och kornfördelningar som de moränleror Jacobsen (1970) undersökte (lerhalt 12 - 18 % och finjordshalt 50 - 65 %)²⁾. I FIG. 82 har för dessa moränleror uppmätta bärigheter och kritiska grundtryck angivits som funktion av portalet för det fall plattan är lagd direkt på moränleran. Vid Jacobsens försök var i en del fall en belastning påförd utanför plattan, varför uppmätt bärighet i sådana fall omformats enligt ekv. (41).

Jacobsens försök uppvisar stor spridning, vilket måste bero av de små plattediametrarna (i allmänhet 0,05 m). Om man för praktiskt bruk använder FIG. 82 för att få en uppfattning om bärigheten bör man utgå från de undre gränsvärdena. Detta bör ge tämligen säkra värden trots bärighetens volymberoende eftersom gränslinjen stämmer väl med det uppmätta kritiska grundtrycket i kv. Lärträdet, Malmö ($d = 1,10$ m) och eftersom inte någon signifikant skillnad erhöles mellan plattediametrarna 0,15 m och 0,25 m vid plattförsöken i Tygelsjö. Detta antagande styrks även av att volymberoendet vid de enaxliga tryckförsöken blev svagare hos de lerfattiga än hos de lerrika moränlerorna.

-
- 1) Kryphastighetskurvan uppritas med grundtrycket som funktion av vertikalkrörelsen mellan lämpligen 2 och 8 min.
 - 2) De lerrika moränlerorna från Lund har lerhalten ca 30 % och finjordshalten 70 - 80 %.

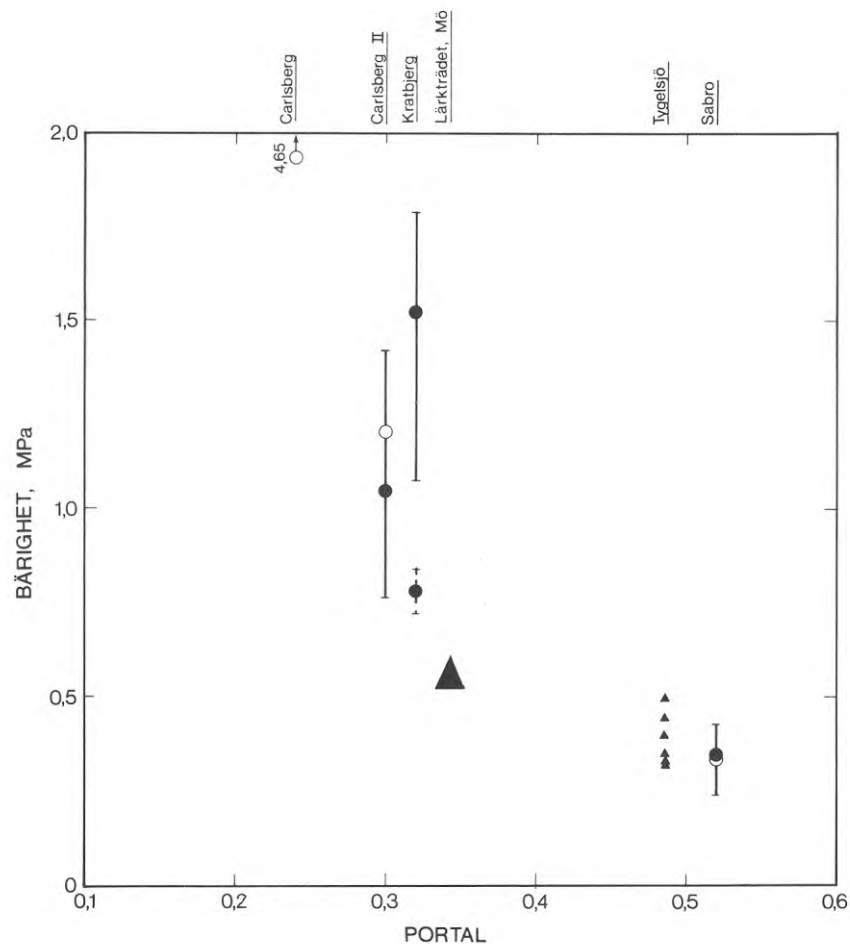


FIG. 82. Bärighet och kritiskt grundtryck enligt plattförsök som funktion av portalet hos lerfattiga skånska och danska moränleror (lerhalt 12–18 %). Plattan är grundlagd på leran (delvis baserat på resultat omformade från Jacobsen, 1970). ▲▲, kritiskt grundtryck vid $d = 0,08–0,25$ resp. $d = 1,1$ m. ◐, bärighet vid dränerade försök, spridning och medelvärde; ●, bärighet vid dränerade försök då svällning tillåts; ○, bärighet vid snabba försök, medelvärde. Samtliga plattor hade diametern $d = 0,05–0,30$ m utom ▲ som hade $d = 1,1$ m.

The bearing capacity and the critical pressure measured from plate load tests versus the void ratio of southern Swedish and Danish boulder clays with low clay content (12–18 %). The plate is placed on the clay surface. (Partly based on results transformed from Jacobsen, 1970.) ▲▲, critical foundation pressure, $d = 0.08–0.25$ and 1.1 m respectively. ◐, bearing capacity from drained tests, scattering and mean value; ●, bearing capacity from drained tests when swelling was allowed; ○, bearing capacity from undrained tests, mean value. The diameter of all the plates was $0.05–0.30$ m except ▲ where $d = 1.1$ m.

4.4.2 Sättningar

En moränleras kompressionsegenskaper är mycket svåra att bestämma i laboratorium. Här skall en del för kompressionsegenskaperna betydelsefulla faktorer analyseras (en mer omfattande analys är tidigare given, Hartlén 1972a). Den faktor som har störst betydelse för kompressibiliteten är om jorden är en botten- eller ytmorän. Som en indikation kan torrden-siteten användas, se s. 22.

Vattenhalten har även en stor betydelse, vilket framkom vid de enaxliga tryckförsöken, se FIG. 37 och 56. Flera oförutsedda sättningsskador vid grundläggning på en till synes fast moränlera torde ha berott av en liten vattenhaltsökning i samband med grundläggningsarbetena.

Andra faktorer som påverkar en moränleras kompressionsegenskaper är kornfördelning, kornform och största kornstorlek. Kornfördelningen inverkar så att i välgraderade jordar sker mindre krossning än i ensgraderade jordar. Krossningen är således liten hos moränlerorna. Vid hög finjordshalt kan inte de grova kornen bilda ett sammanhängande skelett, varigenom finjordens kompressionsegenskaper blir avgörande. Kompressibiliteten ökar därför med ökande finjordshalt, se Högberg (1972). Kornformen har betydelse för krossningens storlek. Kornen i en morän är mestadels skarpkantade, vilket medför spänningskoncentrationer och därmed större krossning än hos rundkantade korn. Krossningen har emellertid underordnad betydelse för moränlerornas kompressibilitet. Största kornstorleken inverkar både positivt och negativt på moränens egenskaper. Blockförekomsten påverkar spänningsfördelningen så att blocken kan förhöja tillåtna grundtryck och reducera sättningarna. Emellertid kan inte detta utnyttjas eftersom risken finns att ett intilliggande fundament helt vilar på blockfri morän, varför differentialsättningarna kan bli skadligt stora.

I laboratorium kan kompressionsegenskaperna bestämmas med ödometerförsök eller triaxialförsök. Ödometerförsöket har behandlats tidigare, se s. 64. Vid triaxialförsök rekommenderar Crawford & Burn (1962) att E-modulen bestäms efter det provet belastats cykliskt.

Med hänsyn till svårigheterna att på laboratorium bestämma ostörd moränleras kompressionsegenskaper är det önskvärt att man i stället bestämmer egenskaperna i fält. Ofta kan man samtidigt bestämma tillåtet grundtryck med hänsyn till bärigheten. Man kan välja mellan att utföra pressiometerförsök (Hansbo, 1970b) och belastningsförsök.

Metoder för sättningsberäkning

Vid en sättningsberäkning utgår man från om det är en yt- eller bottenmorän. För en ytmorän används lämpligen de gängse metoderna för friktions- respektive kohesionsmaterial beroende av moränens lerhalt. Om last påförs en bottenmorän används i allmänhet metoder baserade på elasticitetsteorin. Här kommer endast bottenmoränerna att behandlas.

Sättningsmätningar har visat att initialsättningen är proportionell mot påförd last (Crawford & Burn, 1962; De Jong & Harris, 1971 och Hansbo, 1970b) och att den därför kan beräknas utgående från elasticitetsteorin. Parametrar som skall bestämmas är jordens elasticitetsmodul eller kompressionsmodul och tvärkontraktionstalet. Elasticitetsmodulen bestäms med någon av ovan angivna metoder och ν sätts ofta till 0,5 (volymkonstans). Normalt bör man enligt Crawford & Burn (1962) välja $\nu = 0,4$ för att därigenom inkludera en viss volymförändring på grund av att moränleran i allmänhet inte är vattenmättad. Vid beräkning av långtidssättningar sätts vanligen $\nu = 0,33$.

Sättningsmätningar i fält har visat, att sättningarna kan fortsätta att utbildas flera år efter byggnadens färdigställande (Crawford & Burn, 1962; De Jong & Harris, 1971 och Hansbo, 1970b). Långtidssättningarna är emellertid inte av hydrodynamisk utan av viskoelastisk och plastisk typ (krypning). De kan överslagsmässigt antas öka linjärt med logaritmen för tiden. Allmänt gäller att ju större säkerheten är mot grundbrott desto mindre blir långtidssättningarna och desto fortare avslutas dessa. Enligt Balstrup (1970) är långtidssättningarna försumbara hos de danska moränlerorna, om säkerheten mot grundbrott är större än 4.

Många gånger har beräknade sättningar inte överensstämt med verkliga. På grund av störda jordprover och apparatfel blir de beräknade sättningarna ofta för stora vid grundtryck aktuella i praktiken och på grund av stora sidodeformationer för små vid höga tryck. De Jong & Harris(1971) fann således att kompressionsmodulen bestämd från sättningsmätningar på ett 26-våningshus grundlagt på moränlera blev 24 ggr större än modulen bestämd från ödometerförsök och 5 ggr större än modulen bestämd från okonsoliderade, odränerade triaxialförsök. Jacobsen (1970) anger att om ödometern är styv blir överensstämmelsen mellan beräknade och uppmätta sättningar tämligen god om säkerhetsfaktorn mot grundbrott är större än 4.

I fält har jag belastat stora plattor ($d \approx 1,0$ m) i Rehab, Lund och i kv. Lärkträdet, Malmö. För dessa försök jämförs i FIG. 83 beräknade sättningar med uppmätta last-sättningskurvor. Sättningarna har beräknats med Jakys metod¹⁾ ekv. (20), utgående från kompressionsmodulen bestämd från ödometerförsökets andra pålastningsgren. Kompressionsmodulen var spänningsberoende inom hela spänningsområdet hos moränleran från kv. Lärkträdet, varför modulen bestämts inom spänningsintervallet 80 - 350 kPa. Den mindre spänningen motsvarar vertikaltrycket i leran före avschakt och den större spänningen en tillskottslast motsvarande knappt halva kritiska grundtrycket.

Att överensstämmelsen blir god mellan beräknade sättningar och uppmätta last-sättningskurvor är rimligt, eftersom moränlerorna är överkonsoliderade. Överensstämmelsen är god upp till halva kritiska grundtrycket och större tryck är inte aktuella i praktiken. Som vanligt är, överskattas den verkliga sättningen något vid små tryck och underskattas vid höga tryck. Hänsyn har inte tagits till långtidssättningarna, men dessa bör vara små upp till halva kritiska grundtrycket, eftersom vid plattförsöken sättningsutbildningen avtog mot logaritmen för tiden efter ca 8 min. lastpåläggning. Även för de mindre plattorna blev överensstämmelsen god mellan

1) Jakys metod har visat sig vara lämplig även vid belastningsförsök på sand och morän enligt fältförsök utförda vid inst. för geoteknik med grundläggning, CTH.

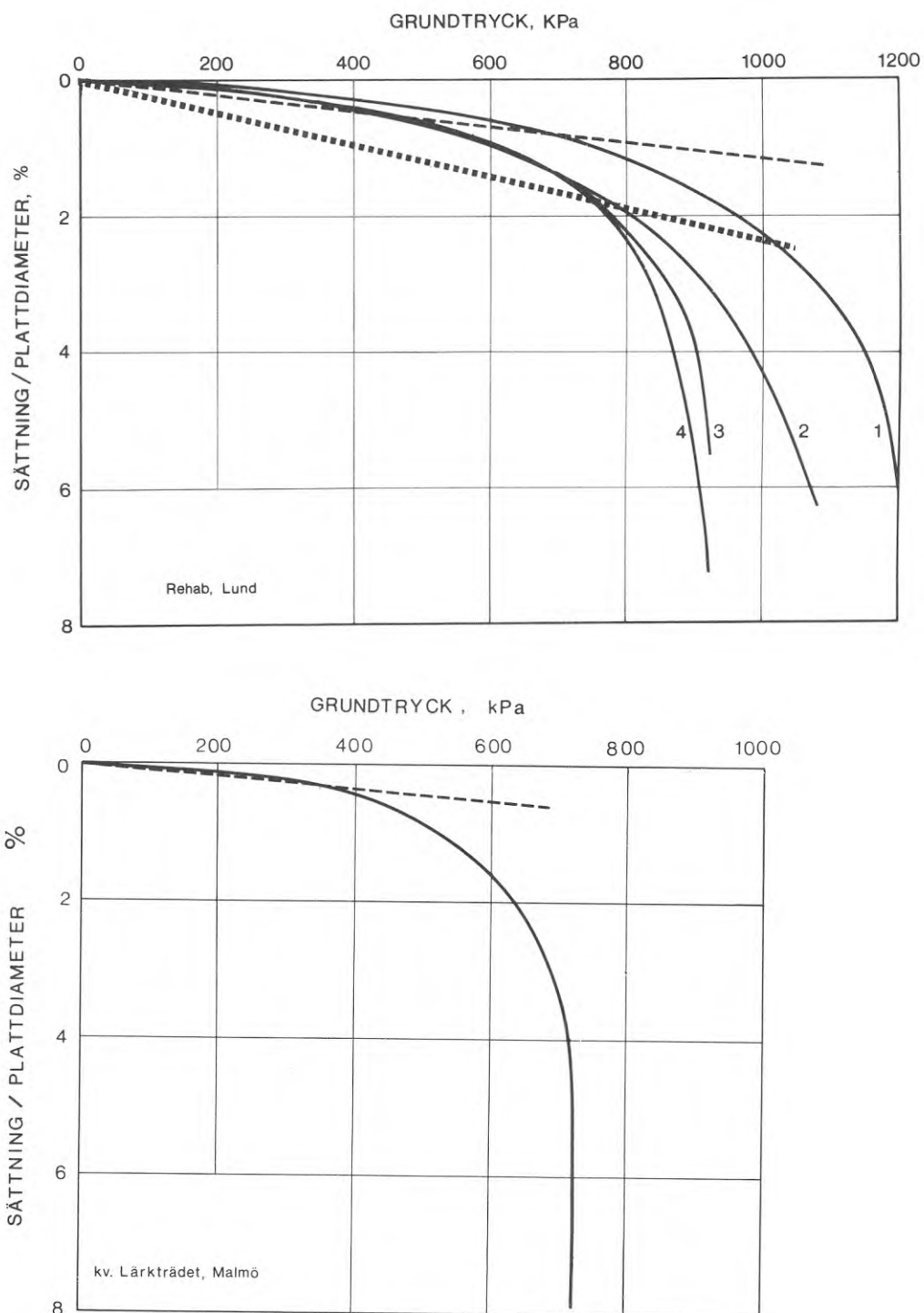


FIG. 83. Sättning genom plattdiameter som funktion av grundtrycket vid plattförsök i Rehab, Lund och kv. Lärkträdet, Malmö, ———. I figuren är sättningarna beräknade från ödometerförsök — — —, och från pressiometerförsök, ·······, inlagda.

Settlement divided by plate diameter versus foundation pressure measured by plate load tests in Rehab, Lund and kv. Lärkträdet, Malmö, ———. — — —, represent calculated settlements based on the reloading curve from the oedometer tests, ·······, settlement calculated from pressuremeter tests (only Rehab, Lund).

beräknad och uppmätt sättning, se s. 93. Om sättningen beräknas med kompressionsdata från ödometerförsökets primärkurva enligt gängse metod med skiktindelning och med tillskottslasten beräknad enligt 2:1-metoden överskattas sättningen mycket.

För moränleran från Rehab, Lund har även sättningarna beräknats från de av AB Jacobson & Widmark utförda pressiometerförsöken. Sättningarna har beräknats enligt Hansbo (1972) med medelvärdet hos pressiometermodulen inom djupintervallet 2,0 - 3,5 m under ursprunglig markyta. I FIG. 83 har beräknade sättningar inlagts för det fall plattdiametern är 1,0 m. Som framgår av FIG. 83 blir sättningarna beräknade med denna metod större än de uppmätta sättningarna vid plattförsöken. Detta kan bero av att sättningarna beräknade från pressiometerförsöken inkluderar långtidssättningar utbildade under 10 år.

Elasticitetsmodulen hos moränlerorna kan även utvärderas från enaxliga och treaxliga tryckförsök. FIG. 84 visar utvärderad elasticitetsmodul vid olika celltryck och vid olika långt driven axialkompression. Utvärderingen är gjord enligt Duncan & Chang (1970). Spridningen blev liten mellan de olika försöken. De inlagda kurvorna sammanfaller för moränleran från Rehab, Lund vid $\sigma'_3 = 0$ med elasticitetsmodulen utvärderad från de enaxliga tryckförsöken. Elasticitetsmodulen blev i stort lika stor när försöken utfördes konsoliderade dränerade och konsoliderade odränerade. Moränleran från kv. Lärkträdet, Malmö uppträder enligt FIG. 84 som ett friktionsmaterial vid celltrycket 0. Detta förklarar svårigheten att utföra enaxliga tryckförsök på denna lera.

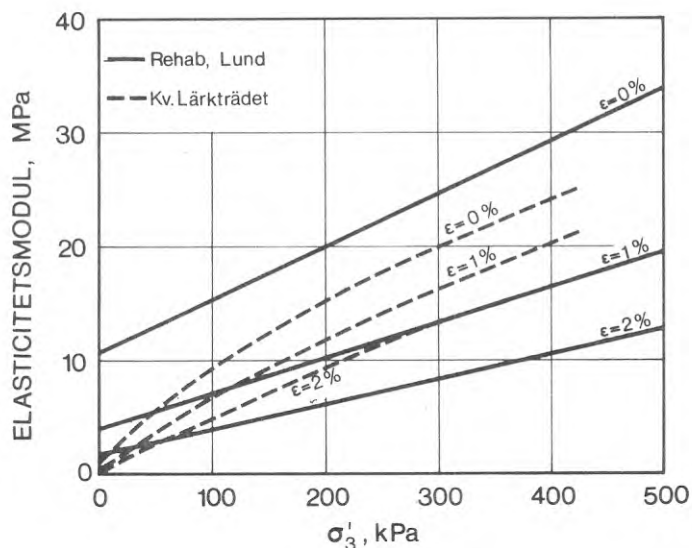


FIG. 84. E-modulen utvärderad från dränerade triaxialförsök vid olika långt driven axialkompression och vid olika celltryck.

Young's modulus at different axial compression and different cell pressure according to Duncan & Chang, 1970. Drained triaxial tests on recompacted boulder clay.

Kompressionsmodulen från plattförsöken utvärderad med Jakys metod blev för moränleran från Rehab, Lund ca 50 MPa och för moränleran från kv. Lärkträdet, Malmö ca 90 MPa (sekantmodul mellan $q = 0$ och $q = 200$ kPa). Man kan omforma dessa moduler till E-moduler, antag $\nu = 1/3$, enligt

$$E = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \quad M = 0,67 \cdot 50 = 34 \text{ MPa (Rehab, Lund)}$$

och

$$E = 60 \text{ MPa (kv. Lärkträdet, Malmö)}$$

För att så stora E-moduler skall uppmätas vid triaxialförsöken krävs enligt FIG. 84 orimligt stora lateraltryck i jorden. Man bör tydligen följa Crawford & Burns rekommendation (1962) och bestämma E-modulen först efter cyklisk belastning (liksom vid ödometerförsök) för att representativa värden skall erhållas.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att för de undersökta moränlerorna kan sättningarna beräknas enligt någon metod baserad på elasticitetsteorin, förslagsvis med Jakys metod. Kompressionsmodulen bestäms inom aktuellt

spänningsintervall från ödometerförsökets andra pålastningsgren. Vid ödometerförsök måste ödometern vara tillräckligt stor och ha liten egenelasticitet. Kompressionsmodulen utvärderad från andra pålastningsgrenen tycks vara oberoende av om den undersökta leran är ostörd eller laboratoriepackad. Om E-modulen skall utvärderas från triaxialförsök bör den bestämmas först efter det provet belastats cykliskt. Fältmätningar har visat att större delen av sättningarna utbildas i samband med lastpåföringen.

4.5 Hållfasthetsparametrarnas beroende av olika parametrar

I tidigare avsnitt har angetts hur man lämpligen bestämmer moränlerors hållfasthetsparametrar. Vidare har en koppling gjorts mellan uppmätta hållfasthetsparametrar och jordens bärförmåga. I detta avsnitt kommer samband att anges med vilka man kan få en uppfattning om hållfasthetsparametrarnas storlek utgående från vattenhalt, portal och lerhalt. Sådana samband är speciellt önskvärda för det dränerade fallet, eftersom triaxialförsök är kostsamma att utföra.

Parametrar som påverkar hållfastheten är vattenhalt, portal, kornfördelning, mineraltyp och kornform. I litteraturen har de två sistnämnda parametrarnas betydelse inte belysts.

Hos de här undersökta moränlerorna är inte kornformen bestämd och mineraltypen är endast bestämd hos moränleran från Hyllie (Pusch, 1973).

4.5.1 Odränerad skjuvhållfasthet

Enligt Jacobsen (1970) bestäms den odränerade skjuvhållfastheten hos de danska moränlerorna av portalet, ekv. (4). Enligt Theill (1971) påverkas den odränerade hållfastheten starkt av vattenhalten hos laboratoriepackad moränlera från Jylland.

I avsnitt 3.4 angavs att för moränlerorna från Sparta, Lund och från Tygelsjö bestäms hållfastheten entydigt av vattenhalten och portalet, se ekv. (14) respektive ekv. (24).

Ett allmängiltigt hållfasthets samband för olika moränleror måste även inkludera kornfördelning och eventuellt mineraltyp och kornform. Helenelund har för de dränerade parametrarna visat finjordshaltens inverkan, FIG. 6. För moränlerorna i denna undersökning råder i stort sett ett linjärt samband mellan finjordshalt och lerhalt, likaså mellan plasticitetsgräns och lerhalt. Det är därför naturligt att som en första ansats sätta

$$\tau_{fu} = f(w, e, I_c)$$

Med multipel regressionsanalys har ett sådant samband bestämts för moränlerorna från Sparta och Rehab, Lund och från Tygelsjö. Sambandet blir om man som kriterium väljer att den procentuella avvikelser skall vara minimal i förhållande till uppmätt värde¹⁾

$$\tau_{fu} = 18,0 w_o^{-2,05} e_o^{-1,88} I_c^{2,66} \quad \text{kPa} \quad (43)$$

Sambandet är starkt med $R = 0,95$ och signifikansen = 99,5 %.

Om man som kriterium i stället väljer att den absoluta avvikelser mellan uppmätt och beräknad hållfasthet skall vara minimal fås sambandet

$$\tau_{fu} = -79 - 438 \lg w_o - 326 \lg e_o + 475 \lg I_c \quad (44)$$

med $R = 0,93$ och signifikansen 99,5 %. En analys av restvärdena visar att ekv. (43) ger bäst överensstämmelse mellan uppmätt och beräknad hållfasthet inom hela hållfasthetsintervallet.

1) Regressionsanalysen utfördes efter det hållfasthetsvärdena logaritmerats.

Enligt ekv. (43) behöver endast vattenhalt, portal och lerhalt vara kända för att hållfastheten skall kunna beräknas med god noggrannhet. I FIG. 85a jämförs uppmätt hållfasthet med enligt ekv. (43) beräknad hållfasthet.

Hållfastheterna vid regressionsanalyserna bestämdes med enaxliga tryckförsök vid provvolymen 150 - 200 cm³. Ingen åtskillnad har gjorts om försöken utförts på ostörd eller laboratoriepackad moränlera.

Intervallerna inom vilka ekv. (43) och (44) bestämts är för moränleran från Sparta, Lund $14,2 \% \leq w_o \leq 19,7 \%$, $0,44 \leq e_o \leq 0,82$ och för moränleran från Tygelsjö $7,0 \% \leq w_o \leq 16,3 \%$, $0,29 \leq e_o \leq 0,53$. För moränleran från Rehab, Lund är $w_o \approx 16,4 \%$, $e_o = 0,47 - 0,52$. Lerhalten varierar mellan 17 och 32 % och vattenmättningsgraden mellan 45 och 100 %.

Moränleran från kv. Lärkträdet, Malmö var starkt beroende av vattenhalten, FIG. 61, troligen beroende av låg lerhalt och hög silthalt. Om resultat från försök på denna moränlera medtas vid regressionsanalysen blir sambandet vid kriteriet minimal procentuell avvikelse

$$\tau_{fu} = 23,5 w_o^{-2,15} e_o^{-1,39} l_c^{2,78} \quad \text{kPa} \quad (45)$$

Jämförelsen mellan beräknade värden enligt ekv. (45) och uppmätta värden är gjord i FIG. 85b. Hållfastheten hos moränleran från kv. Lärkträdet överskattas med ekv. (45).

Den odränerade hållfastheten beräknad från plattförsöket blir för moränleran från kv. Lärkträdet, Malmö 89 kPa, medan hållfastheten enligt ekv. (43) blir ca 60 kPa och enligt de enaxliga tryckförsöken ca 20 kPa. Detta antyder att ekv. (43) ger ett bättre mått på hållfastheten än de enaxliga tryckförsöken. Samtidigt innebär det att ekv. (45) är ointressant.

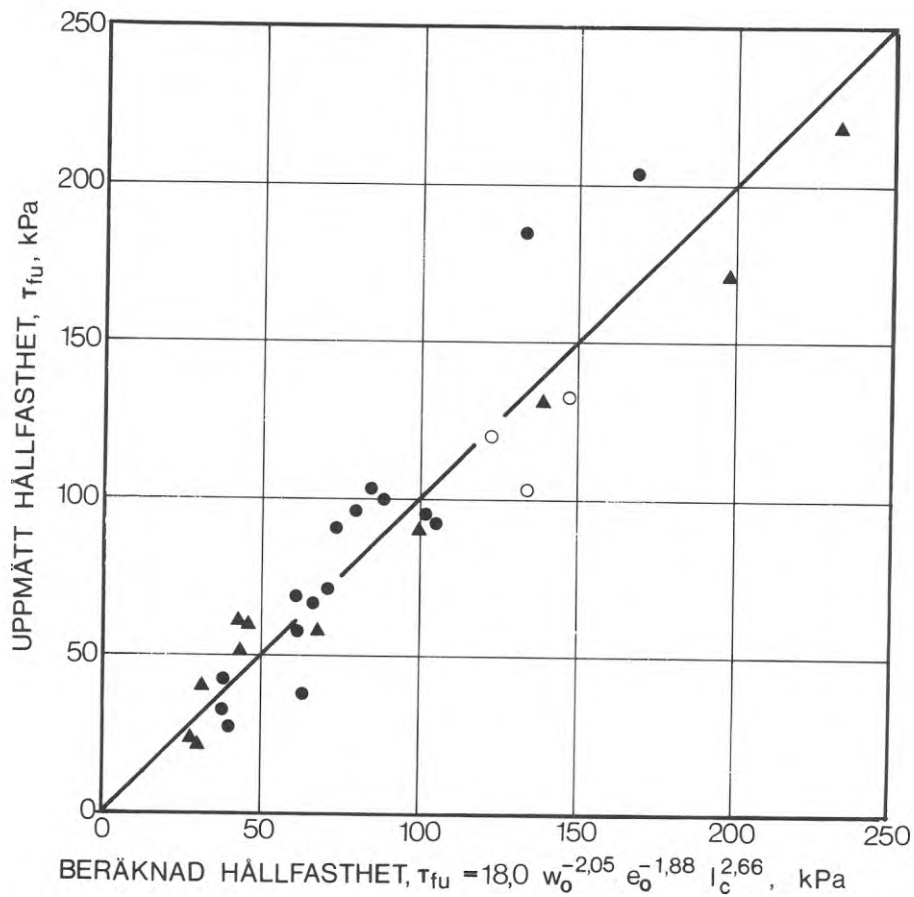


FIG. 85. Jämförelse mellan beräknad och uppmätt hållfasthet enligt enaxliga tryckförsök ($V = 150\text{--}200\text{ cm}^3$). ●, Sparta, Lund $14,2\% \leq w_0 \leq 19,7\%$, $0,44 \leq e_0 \leq 0,82$, lerhalt = 29 %; ○, Rehab, Lund $w_0 \approx 16,4\%$, $0,47 \leq e_0 \leq 0,52$, lerhalt = 32 %; ▲, Tygelsjö $7,0\% \leq w_0 \leq 16,3\%$, $0,29 \leq e_0 \leq 0,53$, lerhalt = 17 %; □, Kv. Lärkträdet, Malmö $10,1\% \leq w_0 \leq 11,9\%$, $0,25 \leq e_0 \leq 0,29$, lerhalt = 15 %.

Comparison between the calculated and the measured undrained shear strength from unconfined compression tests ($V = 150\text{--}200\text{ cm}^3$). ●, Sparta, Lund $14.2\% \leq w_0 \leq 19.7\%$, $0.44 \leq e_0 \leq 0.82$, clay content = 29 %; ○, Rehab, Lund $w_0 \approx 16.4\%$, $0.47 \leq e_0 \leq 0.52$, clay content = 32 %; ▲, Tygelsjö $7.0\% \leq w_0 \leq 16.3\%$, $0.29 \leq e_0 \leq 0.53$, clay content = 17 %; □, Kv. Lärkträdet, Malmö $10.1\% \leq w_0 \leq 11.9\%$, $0.25 \leq e_0 \leq 0.29$, clay content = 15 %.

a) Beräknad och uppmätt hållfasthet för moränlerorna från Sparta och Rehab, Lund och från Tygelsjö.

Measured and computed strengths for the boulder clays from Sparta and Rehab, Lund and from Tygelsjö.

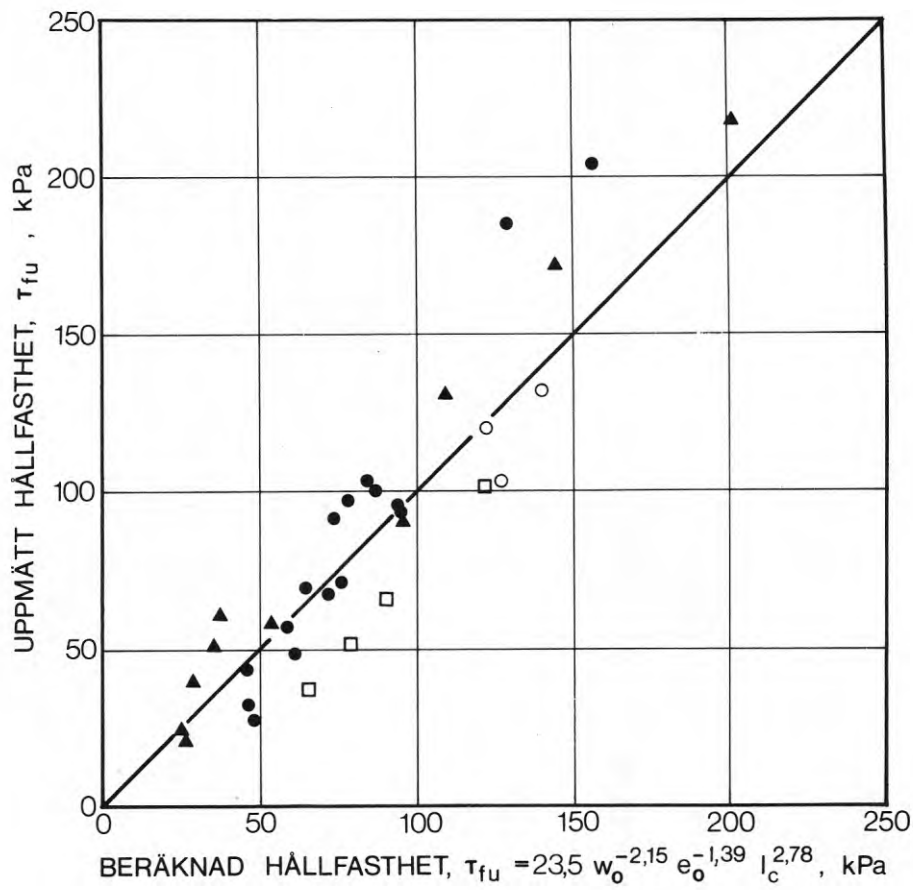


FIG. 85. Fortsättning
Continued

b) Beräknad och uppmätt hållfasthet för moränlerorna från Sparta och Rehab, Lund samt från Tygelsjö och kv. Lärkträdet, Malmö.

Measured and computed strengths for the boulder clays from Sparta and Rehab, Lund and from Tygelsjö and kv. Lärkträdet, Malmö.

Den odränerade skjuvhållfastheten hos de undersökta moränlerorna kan således med god noggrannhet bestämmas med ekv. (43) utgående från vattenhalt, portal och lerhalt. Den så beräknade hållfastheten kan antas motsvara hållfastheten i en stor jordvolym, eftersom sambandet baserats på hållfastheter uppmätta med enaxliga tryckförsök vid provvolymen $150 - 200 \text{ cm}^3$.

4.5.2 Dränerad skjuvhållfasthet

HeleneLunds ringskjuvförsök (1964) visade, FIG. 6, att såväl kohesionen som friktionsvinkeln beror av finjordshalten hos de finska moränerna. Friktionsvinkeln kan enligt HeleneLund uppskattas utgående från kornfördelning och torrdensitet. Däremot kan, enligt HeleneLund, kohesionen inte uppskattas utgående från så enkla parametrar utan bör bestämmas i fält från fall till fall.

Jacobsen (1970) har funnit att för de danska moränlerorna kan kohesionen och friktionsvinkeln bestämmas utgående från portalet, ekv. (5).

Theill (1971) har studerat hållfastheten hos laboratoriepackad moränlera från Jylland. Från dränerade triaxialförsök ($h = 80 \text{ mm}$, $d = 35,7 \text{ mm}$) bestämdes friktionsvinkeln till

$$\lg \phi' = 2,09 - 3,32 \cdot 10^{-3} S_r + 3,21 \frac{\rho_d}{\rho_{\max}} - 0,65 \lg w_p \quad (46)$$

där S_r är i % och ρ_{\max} är maximal torrdensitet enligt standard proctormetoden. Theill fann inte något samband för kohesionen.

För att renodla ekv. (46) kan ρ_{\max} approximativt antas vara direkt beroende av lerhalten. Detta var fallet vid proctorinpackningar av moräner och moränleror från Sturup utförda av ingenjörsfirman Orrje & Co AB.

Enligt Kumbasar & Togrol (1969) är vidare optimal vattenhalt och densitet vid standard proctorpackning direkt beroende av plasticitetsgränsen. Plasticitetsgränsen är slutligen direkt beroende av lerhalten hos de i denna undersökning behandlade moränlerorna.

Man skulle av ovanstående resonemang som en första ansats kunna renodla de i litteraturen givna sambanden till

$$\phi' = f(e, S_r, I_c)$$

eller eftersom $S_r = \rho_s w/e$ fås

$$\phi' = f(e, w, I_c)$$

Friktionsvinkeln skulle således vara beroende av samma parametrar som den odränerade skjuvhållfastheten. Givetvis beror friktionsvinkeln även av andra parametrar som kornform och mineraltyp.

För att se hur relevanta de i litteraturen givna sambanden är för de skånska moränlerorna jämförs i TAB. 24 beräknade och uppmätta friktionsvinklar.

TAB. 24 Jämförelse mellan beräknad och uppmätt friktionsvinkel hos de undersökta moränlerorna.

Lokal	Uppmätt ϕ'	Enligt Jacobsen	Enligt Helenelund	Enligt Theill
Sparta, Lund	26,5°	31,1°	29,8° - 32,8°	19,3°
Rehab, Lund	25,4°	30,9°	29,6° - 32,6°	-
Tygelsjö	30,8°	31,0°	30,2° - 33,2°	24,5°
Kv. Lärkträdet, Malmö	34,1°	32,3°	32,4° - 35,4°	-

Jacobsens och Helenelunds rekommendationer stämmer väl för de lerfattiga moränlerorna, vilket är naturligt eftersom deras samband framtagits för denna typ. För de lerrika moränlerorna överskattas däremot friktionsvinkeln. För båda moränleretyperna underskattar Theills samband uppmätta friktionsvinklar.

Jacobsen har givit ett uttryck för kohesionen, ekv. (5a). Detta samband underskattar uppmätta värden hos de undersökta lerrika moränlerorna. Vidare anger exv. TAB. 5 att kohesionen även är beroende av vattenhalten.

I avsnitt 3.4 angavs kohesionens beroende av vattenhalt och portal hos moränleran från Sparta, Lund ekv. (15), och kohesionens och friktionsvinkeln beroende av samma parametrar hos moränleran från Tygelsjö, ekv. (26). För dessa moränleror liksom för de från Rehab, Lund och kv. Lärkträdet, Malmö har med multipel regressionsanalys följande samband bestämts¹⁾. Om man utgår från kriteriet att den procentuella avvikelser skall vara minimal fås

$$c' = 3,0 w_o^{-3,23} e_o^{-2,12} I_c^{4,19} \quad \text{kPa} \quad (47a)$$

$$\phi' = 22,0 w_o^{0,166} e_o^{-0,139} I_c^{-0,311} \quad \text{grader} \quad (47b)$$

Sambanden är mycket starka. För kohesionen är $R = 0,99$ och signifikansen 99,5 % och för friktionsvinkeln $R = 0,95$ och signifikansen 99 %.

Om man som kriterium väljer att den absoluta avvikelser skall vara minimal fås

$$c' = -23,6 - 140 \lg w_o - 80,9 \lg e_o + 155 \lg I_c \quad \text{kPa} \quad (48a)$$

$$\phi' = 27,4 + 11,4 \lg w_o - 7,12 \lg e_o - 21,3 \lg I_c \quad \text{grader} \quad (48b)$$

För dessa båda samband är signifikansen 99 % och $R = 0,99$ respektive 0,95.

Ovan givna samband har bestämts inom intervallen $14,1 \% \leq w_o \leq 21,4 \%$ $0,44 \leq e_o \leq 0,80$ för moränleran från Sparta, Lund, $w_o \approx 16,8 \%$ $e_o = 0,49$ för Rehab, Lund, $7,0 \% \leq w_o \leq 15,5 \%$ $0,32 \leq e_o \leq 0,48$ för Tygelsjö och $w_o = 12,4 \%$ $e_o = 0,35$ för kv. Lärkträdet, Malmö. Lerhalten varierar mellan 15 och 32 % och vattenmättningsgraden mellan 39 och 100 %.

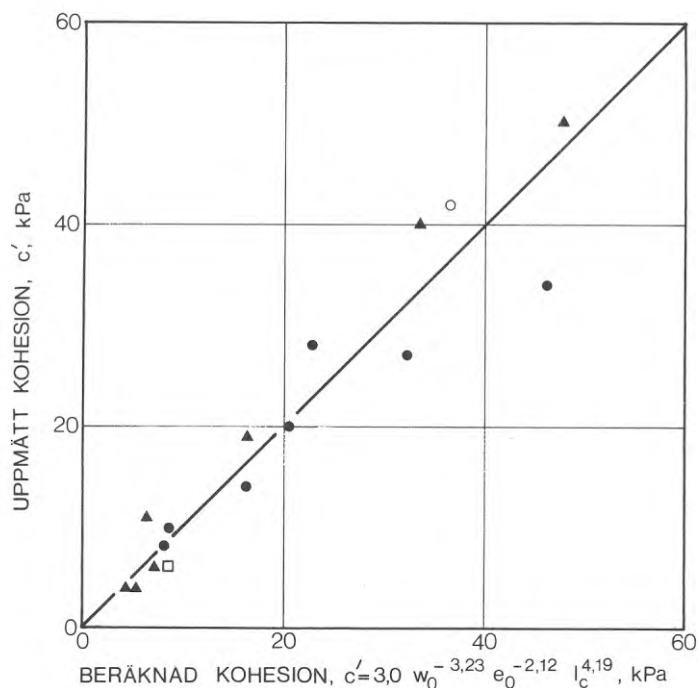
1) Den ostörda moränleran från Sparta, Lund har uteslutits, då kohesionen blev alltför stor (enligt plattförsöken) för att vara relevant för jordmassan, se TAB. 23.

I FIG. 86 och 87 jämförs uppmätt och beräknad kohesion respektive friktionsvinkel enligt de två kriterierna.

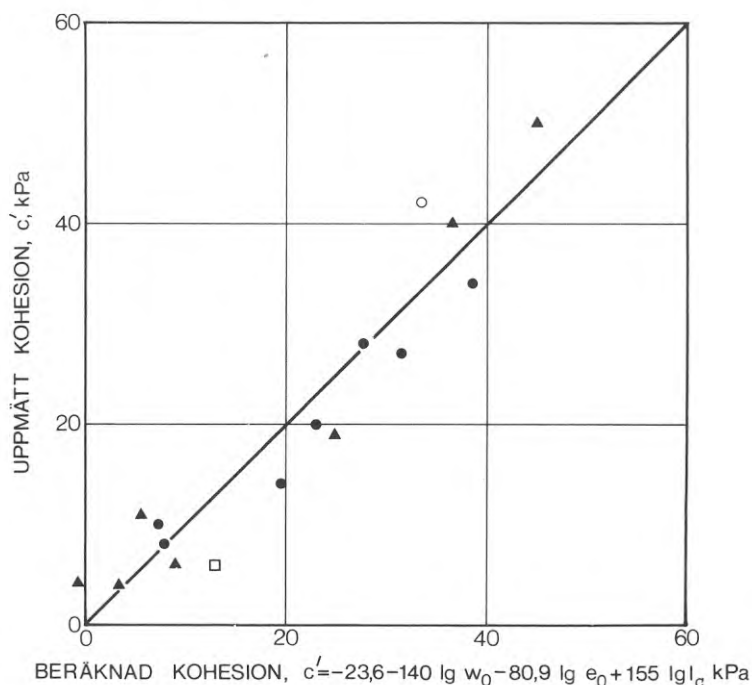
Ekv. (47 a) används lämpligen när beräknad kohesion blir mindre än 20 kPa annars används ekv. (48 a). Vid beräkning av friktionsvinkeln kan ekv. (47 b) användas generellt.

De givna sambanden ger även en relativt god överensstämmelse med uppmätta värden för moränlerorna från Hyllie och Marknad, Lund och moränen från Arlöv, TAB. 17, trots de reservationer som gjordes på s. 114.

Sammanfattningsvis kan konstateras att samband har bestämts med vilka man med god noggrannhet kan beräkna kohesionen och friktionsvinkeln hos de undersökta moränlerorna. Hur relevanta sambanden är för andra moränleror kan inte sägas förrän ytterligare data insamlats.



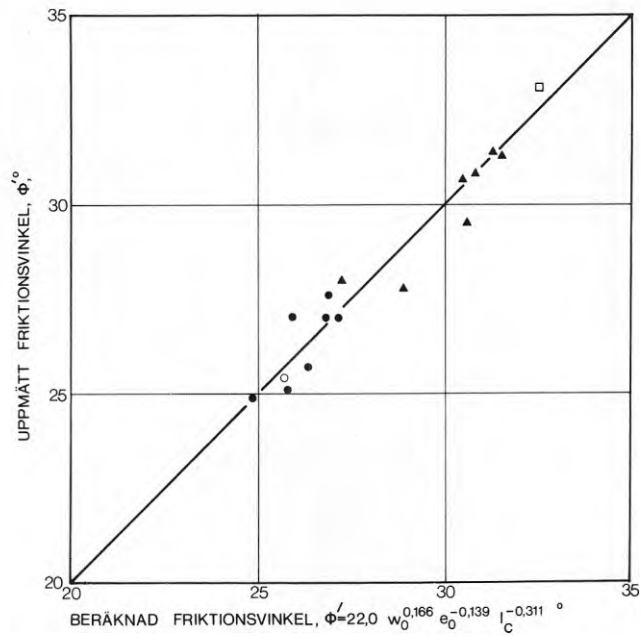
Uppmätt och beräknad kohesion vid kriteriet minimal procentuell avvikelse.



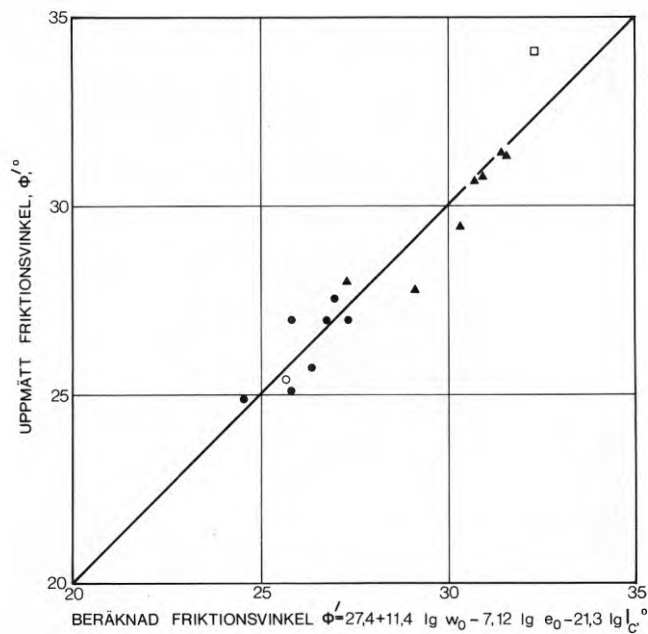
Uppmätt och beräknad kohesion vid minimal absolut avvikelse.

FIG. 86. Jämförelse mellan uppmätt och beräknad effektiv kohesion. Försöken utgjordes av konsoliderade, dränerade triaxialförsök. ●, Sparta, Lund $14,1 \% \leq w_0 \leq 21,4 \%$, $0,44 \leq e_0 \leq 0,80$, lerhalt = 29 %; ○, Rehab, Lund $w_0 \approx 16,8 \%$, $e_0 = 0,49$, lerhalt = 32 %; ▲, Tygelsjö $7,0 \% \leq w_0 \leq 15,5 \%$, $0,32 \leq e_0 \leq 0,48$, lerhalt = 17 %; □, Kv. Lärkträdet, Malmö $w_0 = 12,4 \%$, $e_0 = 0,35$, lerhalt = 15 %.

Measured and computed effective cohesion. The tests were consolidated drained triaxial tests. The upper figure represents the criteria of minimum percentage deviation and the lower minimum absolute deviation. ●, Sparta, Lund $14.1 \% \leq w_0 \leq 21.4 \%$, $0.44 \leq e_0 \leq 0.80$, clay content = 29 %, ○, Rehab, Lund $w_0 \approx 16.8 \%$, $e_0 = 0.49$, clay content = 32 %; ▲, Tygelsjö $7.0 \% \leq w_0 \leq 15.5 \%$, $0.32 \leq e_0 \leq 0.48$, clay content = 17 %; □, Kv. Lärkträdet, Malmö $w_0 = 12.4 \%$, $e_0 = 0.35$, clay content = 15 %.



Uppmätt och beräknad friktionsvinkel vid kriteriet minimal procentuell avvikelse.



Uppmätt och beräknad friktionsvinkel vid kriteriet absolut avvikelse.

FIG. 87. Jämförelse mellan uppmätt och beräknad effektiv friktionsvinkel vid konsoliderade, dränerade triaxialförsök. Beteckningar, se FIG. 86.

Measured and computed effective angle of friction. The tests were consolidated drained triaxial tests. Symbols, see FIG. 86.

5 SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

Skånska moränleror har undersökts i fält och på laboratorium. Främst har deras hållfasthets- och bärighetsegenskaper studerats. I det följande sammanfattas slutsatserna från undersökningen.

5.1 Brottprocessen

Vattenmättningsgraden och horisontaltryckets storlek bestämmer brottypen. Vid de enaxliga tryckförsöken övergick brottet från att vara sprött till att bli plastiskt vid drygt 90 % vattenmättningsgrad, vilket vid dessa försök inträffade när vattenhalten översteg plasticitetsgränsen. Vid ökande horisontaltryck avtog vattenmättningsgraden för vilken brottet blev plastiskt. Vid de odränerade försöken blev emellertid mestadels brottenveloppen rak även vid sprött brott, varför Mohr-Coulombs teori kan användas. Vid låg vattenmättningsgrad och lågt horisontaltryck - även negativt - tycks emellertid Griffiths teori vara lämpligare att använda.

Vid de enaxliga tryckförsöken bestod det spröda brottet av axiella sprickor och sneda skjuvplan. Vid plastiskt brott utbildades framför allt sneda skjuvplan, utom vid de högsta vattenhalterna då provkroppen genomplasticerades och fick utseendet likt en tunna.

Vid de dränerade försöken blev brottet som regel plastiskt. Mohr-Coulombs teori kan därför användas generellt vid det dränerade fallet, speciellt som brottenveloppen mestadels blev rak.

Vid de dränerade försöken mobiliserades kohesionen vid liten axiell kompression och ytterligare skjuvmotstånd utgjordes av friktion. Detta förhållande gällde såväl ostörd som laboratoriepackad moränlera.

Den laboratoriepackade moränleran har lika stor odränerad och dränerad hållfasthet som den ostörda moränleran. Detta är en stor fördel med hänsyn till svårigheten att ta upp och trimma ostörda provkroppar.

5.2 Hållfasthetens och bärighetens volymberoende

Den odränerade skjuvhållfastheten blev beroende av den influerade volymen vid såväl enaxliga tryckförsök som vid vingborrförsök. Plattbärigheten blev på motsvarande sätt beroende av plattdiametern.

Volymberoendet hos den odränerade hållfastheten avtog med ökande vattenhalt (ju segare brott desto mindre volymberoende). När vattenhalten översteg plasticitetsgränsen, vilket vid dessa försök i det närmaste sammanföll med vattenmättning, blev volymberoendet försumbart. Volymberoendet hos den spröda moränleran orsakas av brottinitiering till följd av spänningskoncentrationer vid svaghetszoner och stora korn. I rapporten ges en teoretisk ansats, vilken visar hur förekomsten av grova korn minskar hållfastheten, när moränleran är spröd. Volymberoendet kan förklaras av att vid ökande volym ökar sannolikheten för förekomst av svaghetszoner och att svaghetszonerna är kritiskt orienterade. Att hållfastheten hos plastisk moränlera inte är volymberoende beror av att spänningskoncentrationerna endast orsakar lokal plasticering och spänningsomlagring. Hållfastheten hos den plastiska moränleran blir därför tämligen oberoende av eventuellt befintliga svaghetszoner och grova korn.

En annan typ av volymberoende fås av att de största kornen inte finns i den lilla provvolym som undersöks vid laboratorieförsöken. Försöken visade emellertid att en bortsortering av de 10 % största kornen endast medför en liten förändring i hållfasthetsparametrarna.

Hållfasthetens beroende av den influerade provvolymen tycks bäst uttryckas med Weibulls teori på grund av att spridningen i uppmätt hållfasthet avtar med ökande provvolym. Weibulls teori måste emellertid begränsas av en nedre asymptot motsvarande hållfastheten i en stor jordvolym och (eventuellt) uppåt av moränlerans intakthållfasthet.

Provstorleken uttrycks lämpligen med ett volymmått, eftersom detta bäst uttrycker sannolikheten för att det finns svaghetszoner inom provet. Detta

framkom bl.a. vid enaxliga tryckförsök med olika höjd-diameter-förhållanden hos proverna. Vid enaxliga tryckförsök utgör den influerade volymen hela provvolymen. Vid vingborrförsök erhöles för moränleran från Tygelsjö god överensstämmelse med andra metoder, när volymen definierades som den volym som innesluts av den cirkulär-cylindriska glidytan. Eftersom brottytan är tvångstyrd vid vingborrförsöken blev emellertid medelhållfastheten vid vingborrförsöken något större än medelhållfastheten vid de enaxliga tryckförsöken vid en viss volym. Vid konförsök definieras volymen möjligen av ekv. (12) och vid plattförsök möjligen av ekv. (39).

Det nedre gränsvärdet hos uppmätt hållfasthet vid enaxliga tryckförsök kan antas motsvara hållfastheten i en stor jordvolym. Denna slutsats kan bl.a. göras på grund av att minimivärdet inom olika volymintervall blev lika stort.

Det kan antas att konhållfastheten uttrycker moränlerans intakthållfasthet (hållfastheten hos moränlera fri från inhomogeniteter), eftersom brottytan vid konförsöket är påtvingad och den influerade volymen är liten. Detta antagande styrks av att konhållfastheten sammanföll med hållfastheten uppmätt med fickvingborr ($h = 2d = 32 \text{ mm}$).

Vid de dränerade triaxialförsöken uppmättes inte något volymberoende hos hållfastheten. Detta förklaras av att brottet var plastiskt.

5.3 Metoder att bestämma moränlerors hållfasthet

Som tidigare påpekats kan man utföra hållfasthetsprovning på laboratoriepackad moränlera i stället för ostörd. Den packade moränleran kan framställas genom dynamisk packning. Packningscylindern bör vara delbar samt bestruken med molybdendisulfid för att undvika dragsprickor vid isärtagandet.

Den odränerade hållfastheten bestäms lämpligen med enaxliga tryckförsök. Mellan prov och stämpel placeras en teflonfilm för att undvika skjuvspänningar vid ändytorna. Lämplig provdimension är $h = 2d = 100$ mm. I allmänhet blir spridningen liten vid denna provdimension, varför man praktiskt kan använda medelvärdet av uppmätt hållfasthet som den i den stora jordvolymen verksamma hållfastheten. Lämpligt försöksantal bör vara minst 4.

Om vingborrförsök utförs bör vingen minst ha dimensionen $h = 2d = 100$ mm. Som praktiskt användbar hållfasthet väljs minimivärdet. Lämpligt försöksantal torde vara minst 10.

Konförsök är en olämplig metod att bestämma moränleras hållfasthet. Endast vid vattenmättnad ger konförsöket en någorlunda tillförlitlig hållfasthet, eftersom hållfasthetens volyberoende då bör vara försumbart.

De dränerade hållfasthetsparametrarna bestäms lämpligen med konsoliderade, dränerade triaxialförsök. Lämplig provdimension är $h = 2d = 100$ mm. Konsoliderade, odränerade försök med portrycksmätning gav inte de korrekta dränerade parametrarna för moränleran från Rehab, Lund.

Direkta skjuvboxförsök utförda i en Casagrande-box torde vara en mindre lämplig försöksmetod på grund av att hållfasthetsparametrarna (framför allt kohesionen) kan överskattas.

5.4 Bärighet och sättningar vid plattgrundläggning

Den lämpligaste metoden att bestämma bärigheten vid plattgrundläggning är att utföra belastningsförsök i fält. Samtidigt kan moränlerans deformationsegenskaper bestämmas. Vid plattförsök bör plattediametern överstiga 0,6 m. Belastningsprogrammet vid plattförsök utformas så att varje laststeg upp till kritiskt grundtryck får ligga på under så lång tid, att sättningsutbildningen stabiliseras mot logaritmen för tiden. Det kritiska grundtrycket utvärderas från kryphastighetskurvan - tryck som funktion av sätt-

ning mellan förslagsvis 2 och 8 minuter – som det tryck, där krökningsradien är minst. Detta tryck utgör ett gott mått på bärigheten, eftersom långtidsdeformationerna blir stora för högre tryck. Tillåtet grundtryck väljs som det kritiska grundtrycket belastat med en säkerhetsfaktor på förslagsvis 2,0 à 2,5.

Tillåtet grundtryck måste även väljas så att sättningarna blir tillåtet stora. I allmänhet blir medelsättningarna små, varför det är snedsättningarnas storlek som blir avgörande.

Bärigheten kan även beräknas utgående från uppmätta hållfastheter. Överensstämmelsen mellan beräknade bärigheter och uppmätta kritiska grundtryck blir för de undersökta moränlerorna genomgående bäst, när man utgår från den laboratoriepackade moränlerans hållfasthet.

För de lerrika moränlerorna (lerhalt ca 30 %) erhålls god överensstämmelse mellan uppmätt kritiskt tryck vid plattdiametern 1,0 m och beräknad bärighet baserad på den enaxliga tryckhållfasthetens medelvärde vid provvolymen 150 – 200 cm³. Däremot underskattas bärigheten något om man utgår från den verksamma hållfastheten, vilket möjligen kan bero av att kritiskt grundtryck är mindre hos ännu större plattor än de här undersökta.

De lerfattiga moränlerorna (lerhalt ca 15 – 17 %) uppträder snarast som friktionsjord, varför beräkningarna bör baseras på de dränerade parametrarna. Det är svårt att korrekt beräkna bärigheten för små plattor, eftersom en liten ändring i kohesion medför stor ändring i beräknad bärighet. Vid triaxialförsök utförda på laboratoriepackad moränlera tycks kohesionen bli bestämd på säkra sidan (en eventuell cementering är nedbruten). Försummas kohesionen underskattas i allmänhet den beräknade bärigheten mycket.

Minimivärdet av den vingborrade hållfastheten ger en något större bärighet än uppmätt kritiskt grundtryck vid stor platta och överensstämmer därför väl med plattbärigheten, eftersom denna är något större än det kritiska grundtrycket. Detta gäller både lerrik och lerfattig moränlera.

Om tillåtet grundtryck baseras på Svensk Byggnorm 1967 för friktionsmaterial underskattas bäri gheten mestadels kraftigt. Detta dimensioneringsförfarande väljs ibland i praktiken på grund av att det i moränlera ofta finns inlagrade silt- och sandskikt, vilka kan bestämma bäri gheten.

Vid en sättningberäkning använder man lämpligen Jakys metod med en kompressionsmodul bestämd från ödometerförsökets andra pålastningsgren inom aktuellt spänningsintervall. Försöken kan utföras på laboratoriepackad moränlera. I regel överskattas sättningen vid låga tryck och underskattas vid höga tryck (oftast över tillåtet grundtryck). Största delen av sättningarna utbildas i allmänhet under de tre första åren enligt sättningsuppföljningar gjorda hos olika byggnader (exv. Crawford & Burn, 1962 och De Jong & Harris, 1971).

När man bestämmer tillåtet grundtryck måste hänsyn tas till risken för ytoppmjukning vid grundarbetena. Några procents vattenhaltsökning kan förstöra en tidigare mycket fast schaktbotten. Vid val av grundkonstruktion är det fördelaktigt att välja hel styv bottenplatta, eftersom denna reducerar effekten av variationer i undergrunden.

5.5 Hållfasthetens beroende av vattenhalt, portal och lerhalt

Med multipel regressionsanalys har starka samband bestämts för de undersökta moränlerorna med vilka hållfastheten kan beräknas utgående från lerhalt, vattenhalt och portal. Den odränerade skjuvhållfastheten kan med god noggrannhet beräknas enligt

$$\tau_{fu} = 18,0 w_o^{-2,05} e_o^{-1,88} I_c^{2,66} \text{ kPa} \quad \text{om } \tau_{fu} \leq 200 \text{ kPa} \quad (43)$$

Sambandet är bestämt för de undersökta moränlerorna inom intervallen

$$I_c = 17 - 32 \%, w_o = 7 - 20 \% \text{ och } e_o = 0,29 - 0,82.$$

De dränerade hållfasthetsparametrarna kan beräknas på motsvarande sätt.

Kohesionen beräknas enligt

$$c' = 3,0 w_o^{-3,23} e_o^{-2,12} I_c^{4,19} \text{ kPa} \quad \text{om} \quad c' \leq 20 \text{ kPa} \quad (47 \text{ a})$$

respektive

$$c' = -24 - 140 \lg w_o - 80,9 \lg e_o + 155 \lg I_c \text{ kPa} \quad \text{om} \quad 20 \text{ kPa} < c' \leq 50 \text{ kPa} \quad (48 \text{ a})$$

Friktionsvinkeln beräknas enligt

$$\phi' = 22,0 w_o^{0,166} e_o^{-0,139} I_c^{-0,311} \text{ grader} \quad \text{om} \quad 24^\circ < \phi' < 33^\circ \quad (47 \text{ b})$$

Sambanden har bestämts för de undersökta moränlerorna inom intervallen

$$I_c = 15 - 32 \%, \quad w_o = 7 - 21 \% \quad \text{och} \quad e_o = 0,32 - 0,80.$$

De naturliga moränlerorna är i allmänhet inte vattenmättade - inte ens under grundvattenytan. Om man av försiktighetskäl eller av någon annan anledning vill bestämma hållfasthetsparametrarna när moränleran är vattenmättad används nedanstående samband i stället för de ovan givna (ρ_s är satt till $2,67 \text{ t/m}^3$)

$$\tau_{fu} = 135 e_o^{-3,93} I_c^{2,66} \approx 135 e_o^{-4} I_c^{8/3} \text{ kPa} \quad \text{om} \quad \tau_{fu} \leq 200 \text{ kPa}$$

$$c' = 72,4 e_o^{-5,35} I_c^{4,19} \text{ kPa} \quad \text{om} \quad c' \leq 20 \text{ kPa}$$

$$c' = 36 - 221 \lg e_o + 155 \lg I_c \text{ kPa} \quad \text{om} \quad 20 \text{ kPa} < c' \leq 50 \text{ kPa}$$

$$\phi' = 18,7 e_o^{0,027} I_c^{-0,311} \text{ grader} \quad \text{om} \quad 24^\circ < \phi' < 33^\circ$$

6 LITTERATUR

- Adams, J I & Radharkrishna, H S, 1971, Uplift resistance of augered footings in fissured clay. (The National Research Council of Canada.) Canadian Geotechnical Journal, vol. 8, nr 3, p. 452-462. Toronto
- Appelqvist, K-A & Augustsson, L, 1971, Undersökning av hållfasthetens volymberoende hos en moränlera. (Inst. för geoteknik med grundläggning, CTH.) Examensarbete nr G 70/12. Göteborg.
- Astner, M, 1970, Undersökning av en packad moränleras odränerade skjuv-hållfasthet. (Inst. för geoteknik med grundläggning, CTH.) Examensarbete nr G 70/10. Göteborg
- Balstrup, T, 1970, Danske erfaringer av moräneler. (Statens geotekniska institut.) Särtr. och prel. rapp., nr 39, p. 107-114. Stockholm.
- Bishop, A W, 1966, The strength of soils as engineering materials. (Institution of Civil Engineers.) Géotechnique, vol. 16, no. 2, p. 91-128. London.
- Bishop, A W, 1967, Disc, Progressive failure - with special reference to the mechanism causing it. (Proc. Geot. Conf.) Vol. 2, p. 142-150. Oslo.
- Bishop, A W & Henkel, D J, 1972, The measurements of soil properties in the triaxial test. (Edward Arnold.) London.
- Bjurström, G, 1944, Jordstatisk beräkningsmetod vid kohesionär mark under antagande av sfäriska glidytor. (Teknisk Tidskrift.) p. 769-771. Stockholm.
- Blight, G E, 1967, Observations on the shear testing on indurated fissured clays. (Proc. Geot. Conf.) Vol. 1, p. 97-102. Oslo.
- Burmister, D M, 1963, Prototype load bearing tests for foundations of structures and pavements. (American Society for Testing Materials.) Field testing of soils, STP 322, p. 98-119. Philadelphia.
- Crawford, C B & Burn, K N, 1962, Settlement studies on the Mt Sinai Hospital, Toronto. (The Engineering Inst. of Canada.) Engineering Journal, vol. 45, no. 12. Montreal.
- De Jong, J & Harris, M C, 1971, Settlements of two multistory buildings in Edmonton. (The National Research Council of Canada.) Canadian Geotechnical Journal, vol. 8, no. 2, p. 217-235. Toronto.
- Duncan, J M & Chang, C-Y, 1970, Nonlinear analysis of stress and strain in soils. (American Society of Civil Engineers.) Vol. 96, no. SM5, p. 1629-1653. New York
- Gramberg, J, 1965, Axial cleavage fracturing, a significant process in mining and geology. (Engng Geology.) Vol. 1, no. 1, p. 31-72. Amsterdam.

- Griffith, A A, 1921, The phenomena of rupture and flow in solids. (Royal Soc. of London.) Phil. trans., vol. A 221, p. 163-198. London.
- Griffith, A A, 1924, The theory of rupture. Proc. 1st Int. Congr. for Applied Mech. p. 55-63. Delft.
- Gustavsson, O & Stjernkvist, S, 1966, Några iakttagelser i en morän-skärning i Lund. (Geol. Fören. i Stockholm.) Föth., vol. 87, p. 431-440. Stockholm.
- Hansbo, S, 1957, A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test. (Statens geotekniska institut.) Proc., nr 14. Stockholm.
- Hansbo, S, 1970 a, Provisoriskt kompendium i geoteknik. (Inst. för geoteknik med grundläggning, CTH.) Göteborg.
- Hansbo, S, 1970 b, Fältstudier av sättningar i morän och moränlera. (Statens geotekniska institut.) Särtr. och prel. rapp., nr 39, p. 67-77. Stockholm.
- Hansbo, S, 1972. Bestämning av tillåten grundpåkänning med hänsyn till viskösa elasto-plastiska egenskaper hos lera. (Norges geotekniske institutt.) Nordisk Geoteknikermöte i Trondheim, p. 69-78. Oslo.
- Hansen, Brinch, J, 1966, Three-dimensional effect in stability analysis. (Danmarks geotekniska institut.) Bull. no.21, p. 10-11. Köpenhamn.
- Hansen, Brinch, J, 1970, A revised and extended formula for bearing capacity. (Danmarks geotekniska institut.) Bull. no. 28, p. 5-11. Köpenhamn.
- Harremoës, P, Jacobsen, M & Ovesen, K, 1970, Laerebog i geoteknik. Polyteknisk Forlag. Köpenhamn.
- Hartlén, J, 1969, Skjuvhållfastheten hos starkt överkonsoliderad lera. (Statens råd för byggnadsforskning.) Årsrapport. Stockholm.
- Hartlén, J, 1971, Undersökning av moränlera från Lund. (Statens råd för byggnadsforskning.) Årsrapport. Stockholm.
- Hartlén, J, 1972 a, Sättningar vid grundläggning på morän. (Svenska Teknologföreningen.) Sättningskurs. Stockholm.
- Hartlén, J, 1972 b, Moränleras deformations- och bärighetsegenskaper. (Statens råd för byggnadsforskning.) Årsrapport. Stockholm.
- Hartlén, J, 1973 a, Plattgrundläggning på moränlera. (Statens geotekniska institut.) Särtr. och prel. rapp., nr 54, p. 17-32. Stockholm.
- Hartlén, J, 1973 b, Fält- och laboriemetoder vid undersökning av moränlera. (Statens geotekniska institut.) Särtr. och prel. rapp., nr 54, p. 33-38. Stockholm.

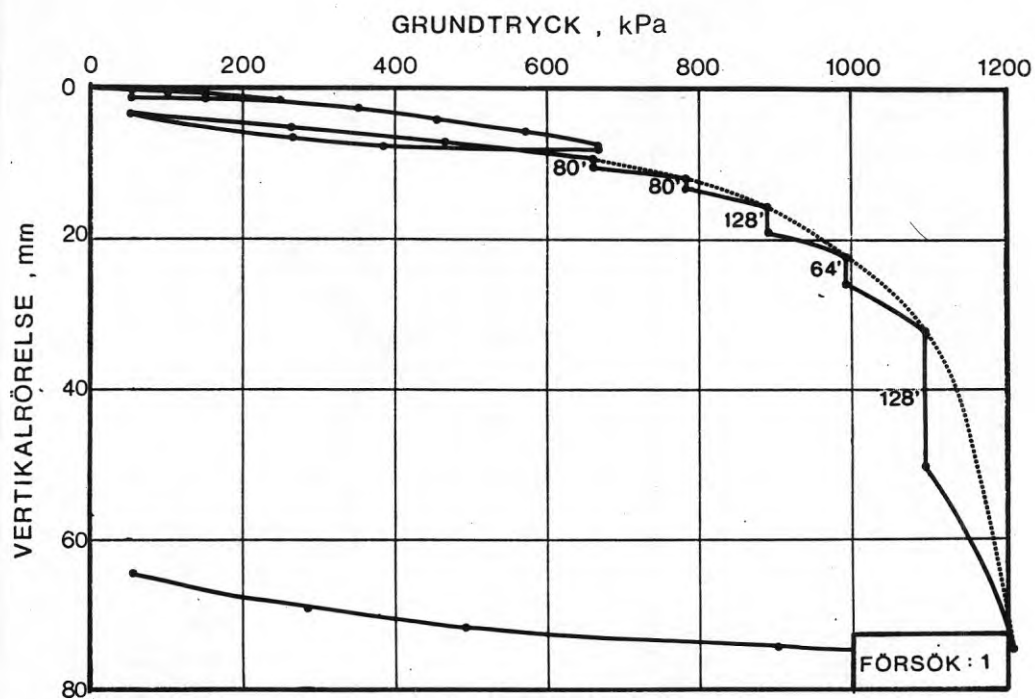
- Hartlén, J, 1973 c, The geotechnical characteristics of moraine clays related to their structure. (Acta Universitatis Upsaliensis.) Bull. Geol. Inst. Univ. Uppsala. Under tryckning.
- Helene Lund, K V, 1964, On the bearing capacity of glacial till. (Statens Tekn. Forskningsanstalt.) Medd. Ser. III, nr 79. Helsingfors. (Engelsk sammanfattning)
- Helene Lund, K V, 1965, Torsional field shear tests. (Proc. 6th Int. Conf. Soil. Mech. a. Found. Engng.) Vol. 1, p. 240-243. Montreal.
- Helene Lund, K V, 1970, Geotekniska moränundersökningar i Finland. (Statens geotekniska institut.) Särtr. och prel. rapp., nr 39, p. 33-45. Stockholm.
- Hendron Jr, A J, 1968, Mechanical properties of rock. (Rock Mech. in Engng Practice.) p. 21-53. London
- Hooper, J A, & Butler, F G, 1966, Some numerical results concerning the shear strength of London clay. (Institution of Civil Engineers.) Géotechnique, vol. 16, no.4, p. 282-304. London.
- Hvorslev, M J, 1937, Über die Festigkeitseigenschaften gestörter bindiger Böden. (Danmarks Naturvidenskabelige Samfund.) Ingeniörsvidenskabelige Skrifter, Series A, nr 45. Köpenhamn.
- Hvorslev, M J, 1960, Physical components of the shear strength of saturated clays. (ASCE Research Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils.) p. 169-273. New York.
- Högberg, E, 1972, Vattenhaltens inverkan på densitet och kompressibilitet hos packade jordar. (Statens institut för byggnadsforskning.) Nr R8. Stockholm.
- Jacobsen, M H, 1967, The undrained shear strength of a preconsolidated boulder clay. (Proc. Geot. Conf.) Vol. 1, p. 119-122. Oslo.
- Jacobsen, M H, 1970, Strength and deformation properties of preconsolidated moraine clays. (Danmarks geotekniska institut.) Bull.no.27, p. 21-35. Köpenhamn.
- Kaczyński, R & Wysokiński, L, 1970, The influence of the weakness surfaces on the strength of the cohesive soils. (Proc. 2nd Semin. Soil. Mech. a. Found. Engng.) p. 220-230.
- Kihlberg, K & Kullbjör, T, 1971, Packad moränleras skjuvhållfasthet. (Inst. för geoteknik med grundläggning, CTH.) Examensarbete nr G 71/4. Göteborg.
- Krumbein, W C, 1941, Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles (J. Sedim. Petr.) Vol. 2, no.2.

- Kumbasar, V & Togrol, E, 1969, Penetration resistance of compacted cohesive soils. (Proc. 7th Int. Conf. Soil. Mech. a. Found. Engng.) Vol. 1, p. 219-224. Mexico
- Lambe, T.W, 1958, The engineering behavior of compacted clay. (American Society of Civil Engineers.) Vol.84, no. SM2, p.1655:1-35. New York.
- Larsson, P-A & Wiman, L, 1970, Bestämning av ostörd och packad moränleras dränerade skjuvhållfasthet. (Inst. för geoteknik med grundläggning, CTH.) Examensarbete nr G 70/6. Göteborg.
- Larsson, S & Oscarsson, R, 1973, Den vingborrade hållfasthetens beroende av vingstorlek och vingtyp i moränlera. (Inst. för geoteknik med grundläggning, CTH.) Examensarbete nr G 73/1.
- Lindgren, S, 1970, Undersökning av moränlerors odränerade skjuvhållfasthet. (Inst. för geoteknik med grundläggning, CTH) Examensarbete nr G 70/7. Göteborg.
- Lo, K Y, 1970, The operational strength of fissured clays. (Institution of Civil Engineers.) Géotechnique, vol. 20, no.1, p. 57-74. London.
- Lo, K Y, Adams, J I & Seychuk, J L, 1969, The shear behaviour of a stiff fissured clay. (Proc. 7th Int. Conf. Soil. Mech. a. Found. Engng.) Vol. 1, p. 249-255, Mexico.
- Lo, K Y & Milligan, V, 1967, Shear strength properties of two stratified clays. (American Society of Civil Engineers.) Proc., vol. 93, no.SM1, p. 1-15. New York.
- Magnusson, N H, Lundqvist, G & Regnéll, G, 1963, Sveriges geologi. (Svenska Bokförlaget Norstedts.) p. 431. Stockholm.
- Maripuu, P & Waltgård, L, 1970, Undersökning av packad moränleras skjuvhållfasthet vid varierande packningsgrad och kornstorleksfördelning. (Inst. för geoteknik med grundläggning, CTH.) Examensarbete nr G 70/9. Göteborg.
- Marsland, A, 1972, The shear strength of stiff fissured clays. (Stress Strain Behaviour of Soils.) p. 59-68. London.
- Marsland, A & Butler, M E, 1967, Strength measurements on stiff fissured Barton clay from Fawley (Hampshire). (Proc. Geot. Conf.) Vol. 1, p. 139-145. Oslo.
- Mc Clintock, F A & Argon A S, 1966, Brittle fracture. (Mechanical behaviour of materials.) p. 488-517. Ontario.
- Olsson, C, 1972, Inverkan av vatten- och grovjordshalt på moränleras geotekniska egenskaper. (Inst. för geoteknik med grundläggning, CTH.) Examensarbete nr G 72/5. Göteborg.
- Patton, F D, 1966, Multiple modes of shear failure in rock. (Proc. 1st Int. Cong. Rock Mech.) Vol. 1, p. 509-514. Lissabon.

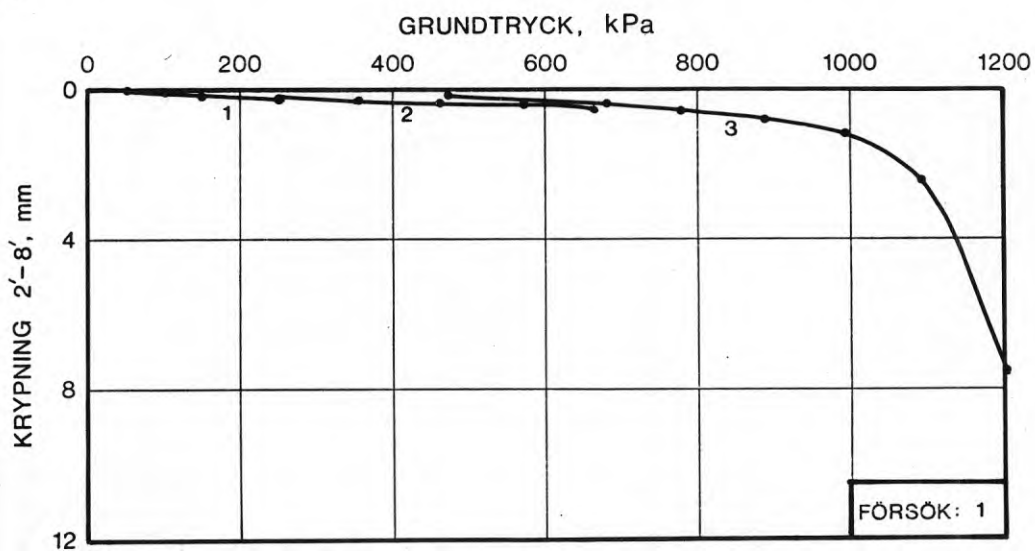
- Paul, B & Gangal, M, 1967, Initial and subsequent fracture curves for biaxial compression of brittle materials. (8th Symp. Rock Mech.) p. 113-141. Minnesota.
- Peynircioglu, H, 1939, Über die Scherfestigkeit bindiger Böden (Dege-Böden. (Degebo.) Häfte 7, p. 28-53. Berlin.
- Pusch, R, 1969, Geotechnical aspects of the interpretation of distorted strata in silurian deposits. (Almqvist & Wiksell.) Acta Univ. Stockh. Stockholm Contr. in Geology, vol. XXI:2. Stockholm.
- Pusch, R, 1973, Structural variations in boulder clay. (Int. Symp. on Soil Structure.) Proc., p. 113-121. Göteborg.
- Sangrey, D A, & Paul, M J, 1971, A regional study of landsliding near Ottawa. (The National Research Council of Canada.) Canadian Geotechnical Journal, vol. 8, no.2, p. 315-335. Toronto.
- Seed, H B. & Chan, C K, 1959, Structure and strength characteristics of compacted clays. (American Society of Civil Engineers.) Vol. 85, no. SM5, p. 87-128. New York.
- Simons, N E, 1967, Disc. on shear strength of stiff clay. (Proc. Geot. Conf.) Vol. 2, p. 159-160. Stockholm.
- Sjöstedt, J & Torkelson, L, 1972, Moränleras bärighets- och deformationsegenskaper. (Inst. för geoteknik med grundläggning, CTH.) Examensarbete nr G 71/5. Göteborg.
- Skempton, A W, 1964, Long-term stability of clay slopes. (Institution of Civil Engineers.) Géotechnique, vol. 14, no.2, p. 77-102. London.
- Svensk Byggnorm 67, 1967, Föreskrifter, råd och anvisningar till byggnadsstadgan. (Statens Planverk.) Publ. nr 1. Stockholm.
- Theill, E V, 1971, Moraenelersfyld. Sætninger og styrker. (Amtveijinspektörföreningen i Danmark.) Dansk Vejtidskrift, nr 6, p. 101-105, 120. Köpenhamn.
- Timoshenko, S & Godier, I N, 1951, Theory of elasticity. (Mc Graw Hill Book Co., Inc.) New York.
- Trollope, D H, 1967, Disc. shear strength of rock. (Proc. Geot. Conf.) Vol. 2, p. 250-252. Oslo.
- Ward, W H, Marsland, A & Samuels, S G, 1965, Properties of the London clay at the Ashford common shaft. In-situ and undrained strength tests. (Institution of Civil Engineers.) Géotechnique, vol. 15, no. 4, p. 321-344. London.
- Weibull, W, 1939 A statistical theory of the strength of materials. (Ingenjörsvetenskapsakademin.) Handlingar, nr 151. Stockholm.

BILAGOR

Bilaga 1. Plattförsök i full skala i Rehab, Lund, FIG. B1 - B3.



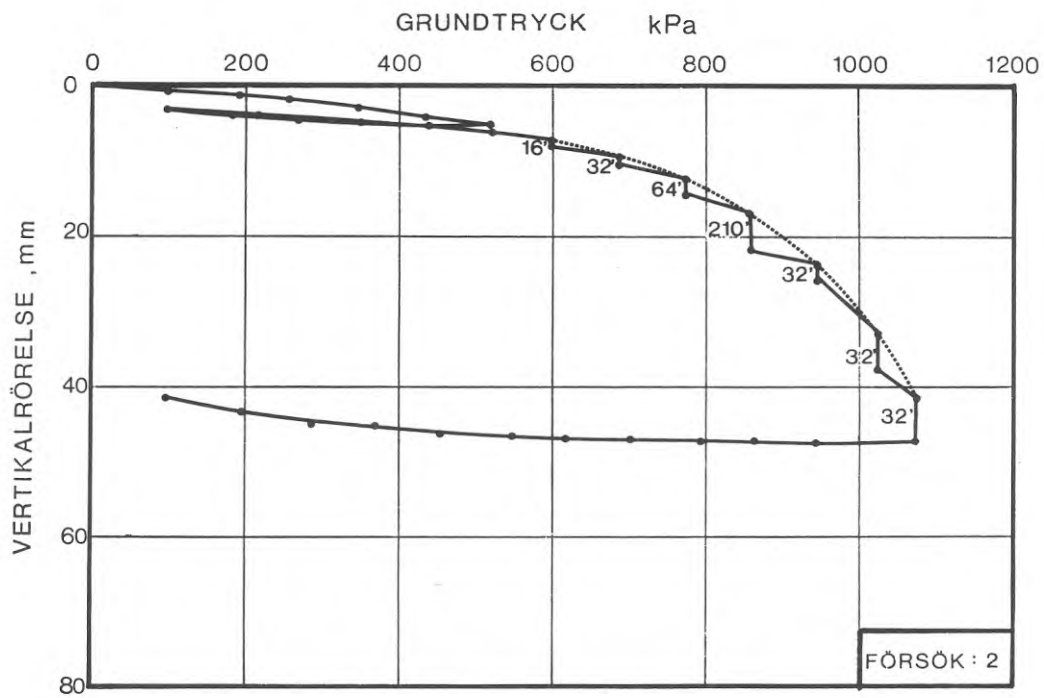
a)



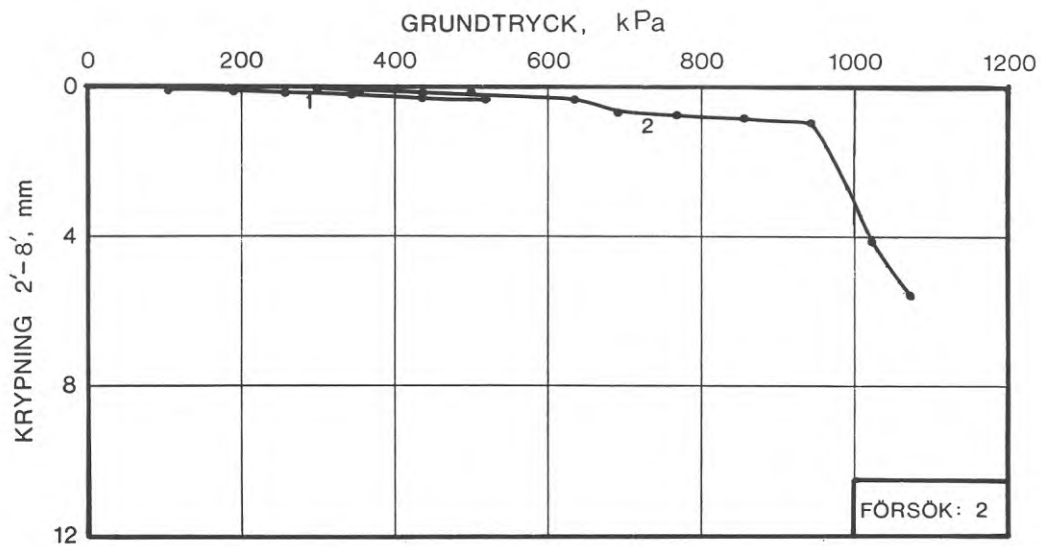
b)

FIG. B1. Plattförsök. Betongplatta med diametern 1,00 m. a) Last-sättningskurva. , antagen 8 min -kurva. b) Kryphastighetskurva. Siffrorna anger belastningsgrenens nummer.

Plate load test. Concrete plate, $d = 1.00$ m (Rehab, Lund). a) Load-settlement curve. , assumed 8 min -curve. b) Creep-rate curve. The figures stand for the number of the load cycle.



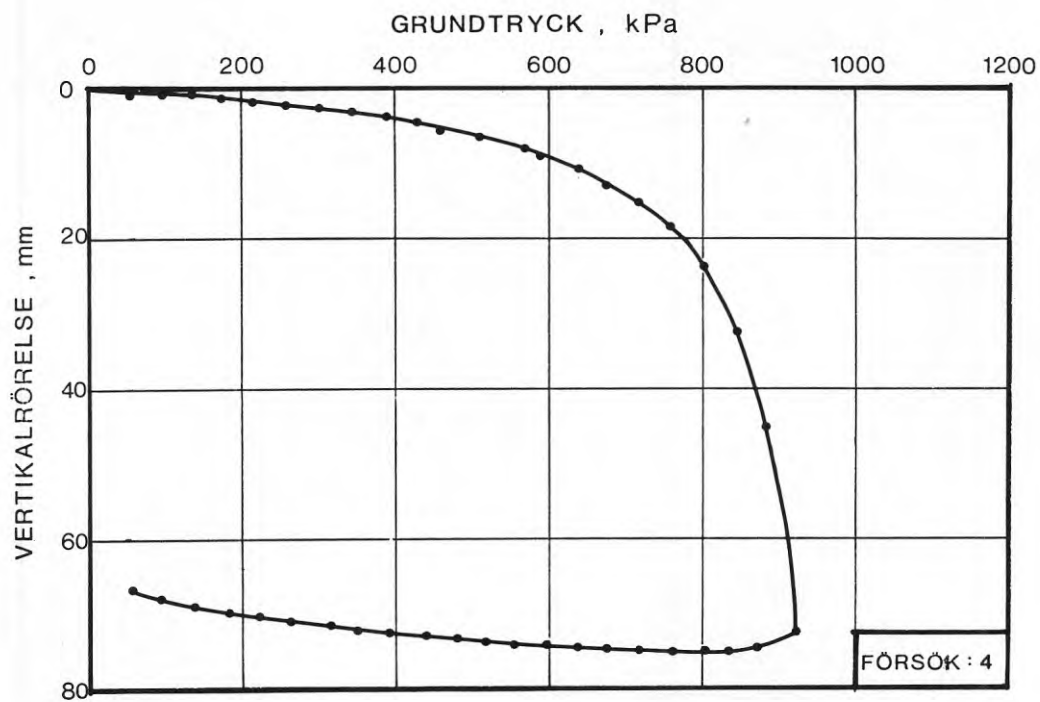
a)



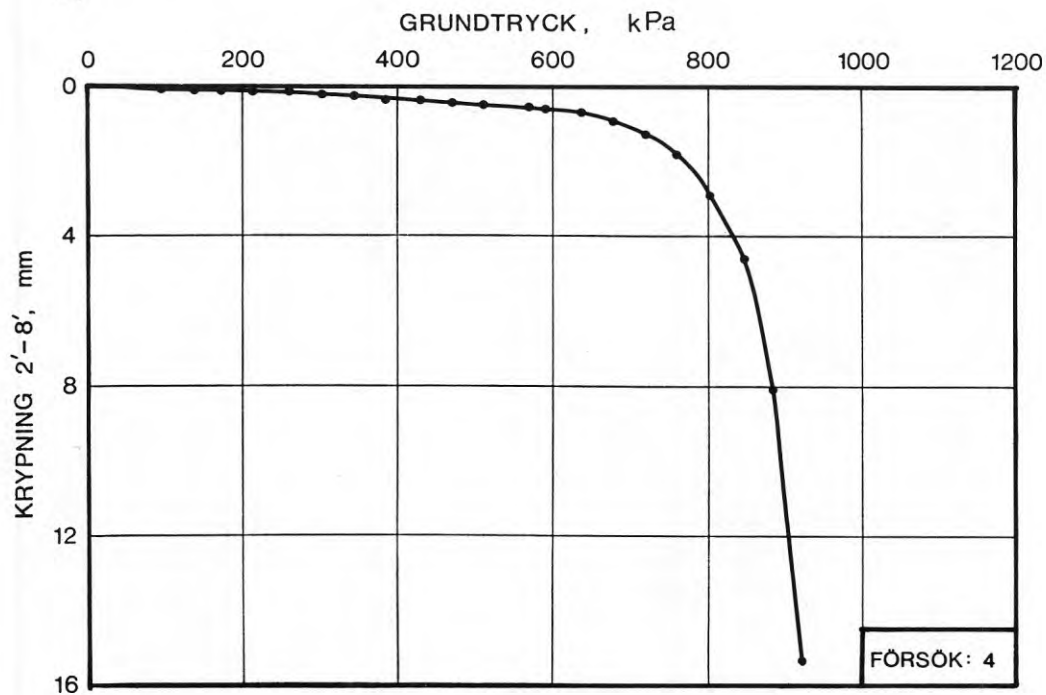
b)

FIG. B2. Plattförsök. Betongplatta, $d = 0,68$ m. I övrigt se FIG. B1.

Plate load test. Concrete plate, $d = 0,68$ m (Rehab, Lund). Legend: FIG. B1.



a)



b)

FIG. B3. Plattförsök. Betongplatta, $d = 0,99$ m. a) Last-sättningskurva. Belastningstid per laststeg 8 min. b) Kryphastighetskurva.

Plate load test. Concrete plate, $d = 0.99$ m (Rehab, Lund). a) Load settlement curve. Time per load interval 8 min. b) Creep-rate curve.

Bilaga 2. Plattförsök i full skala i kv. Lärkträdet, Malmö.

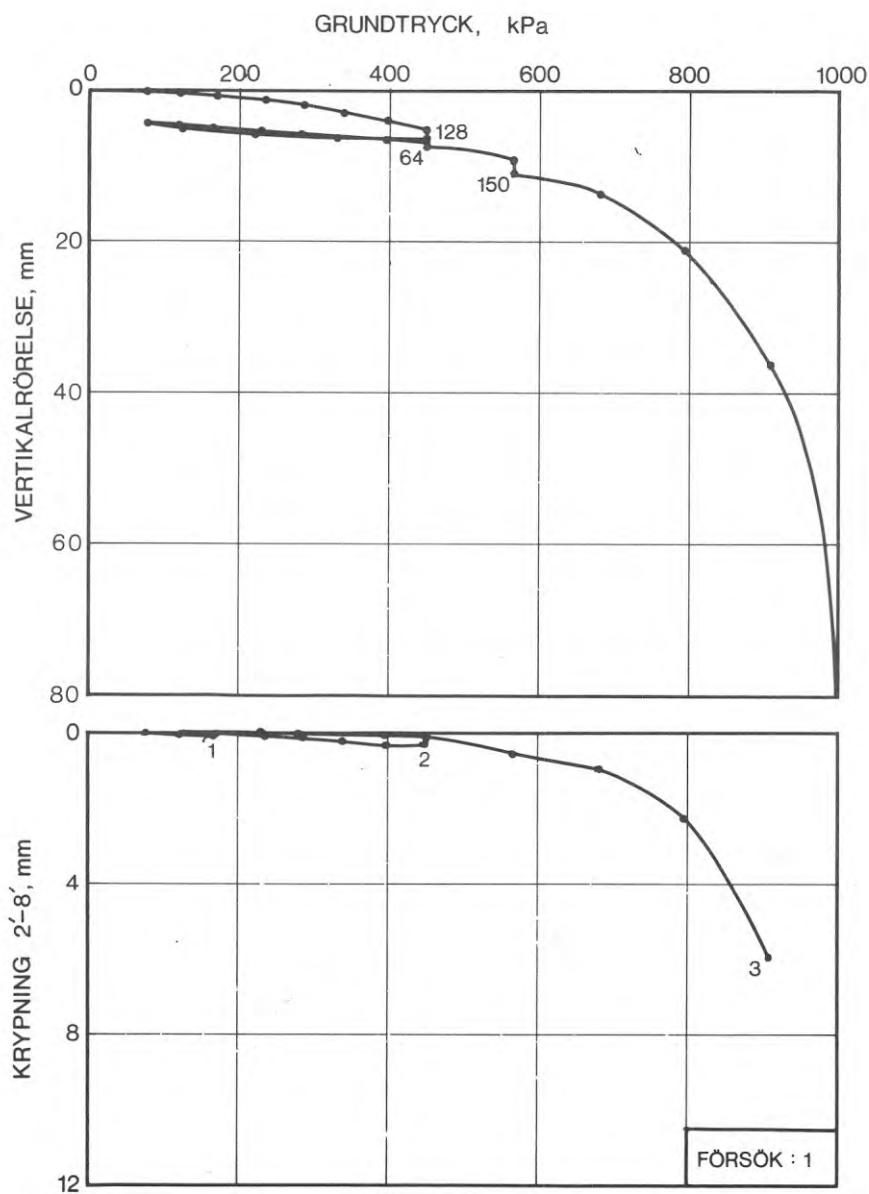


FIG. B4. Plattförsök på nivån + 0,80. Betongplatta, $d = 1,10$ m.

Plate load test in kv. Lärkträdet, Malmö at level + 0.80. Concrete plate, $d = 1.10$ m. Upper curve: load-settlement. Lower curve: creep-rate curve.

Bilaga 3. Ödometerförsök

Ödometerförsöken redovisas i FIG. B5 - B7.

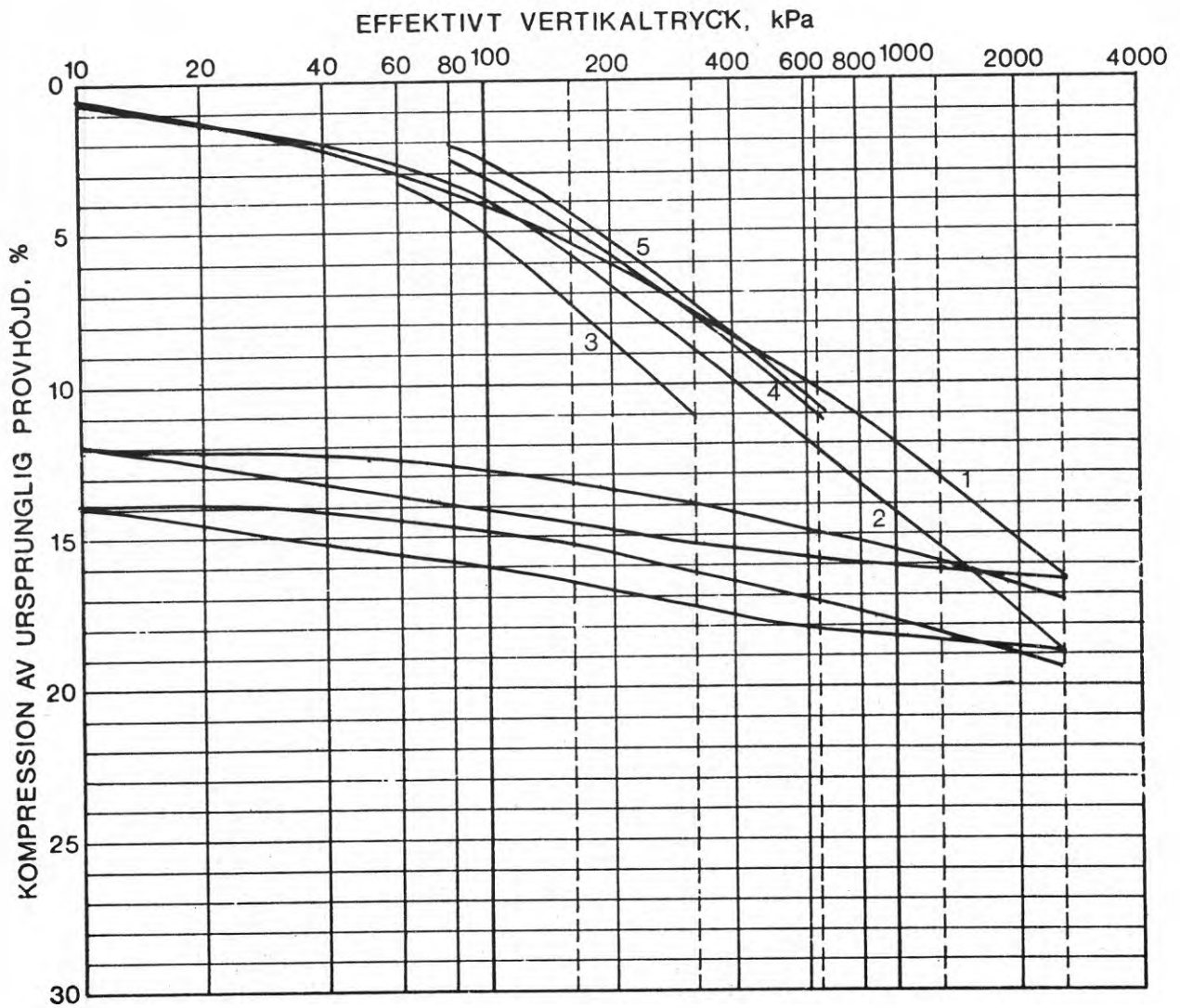


FIG. B5. Ödometerförsök på moränlera från Rehab, Lund.

Försök 1 och 2 är utförda på moränlera från provgröp 2.

Försök 3 är utförd på moränlera tagen 210 m öster provgröp 2.

Försök 4 och 5 är utförda på moränlera tagen 210 m nordost provgröp 2.

Försök 1-4 utförda på ostörd moränlera och försök 5 på laboratoriepackad moränlera.

Oedometer tests on boulder clay from Rehab, Lund.

Test nos. 1 and 2 are performed on specimens from test pit 2.

Test no. 3 is performed on a specimen taken 210 m east test pit 2.

Test nos. 4 and 5 are performed on specimens taken 210 m northeast test pit 2.

Test nos. 1-4 represent undisturbed specimens and test no. 5 recompacted specimen.

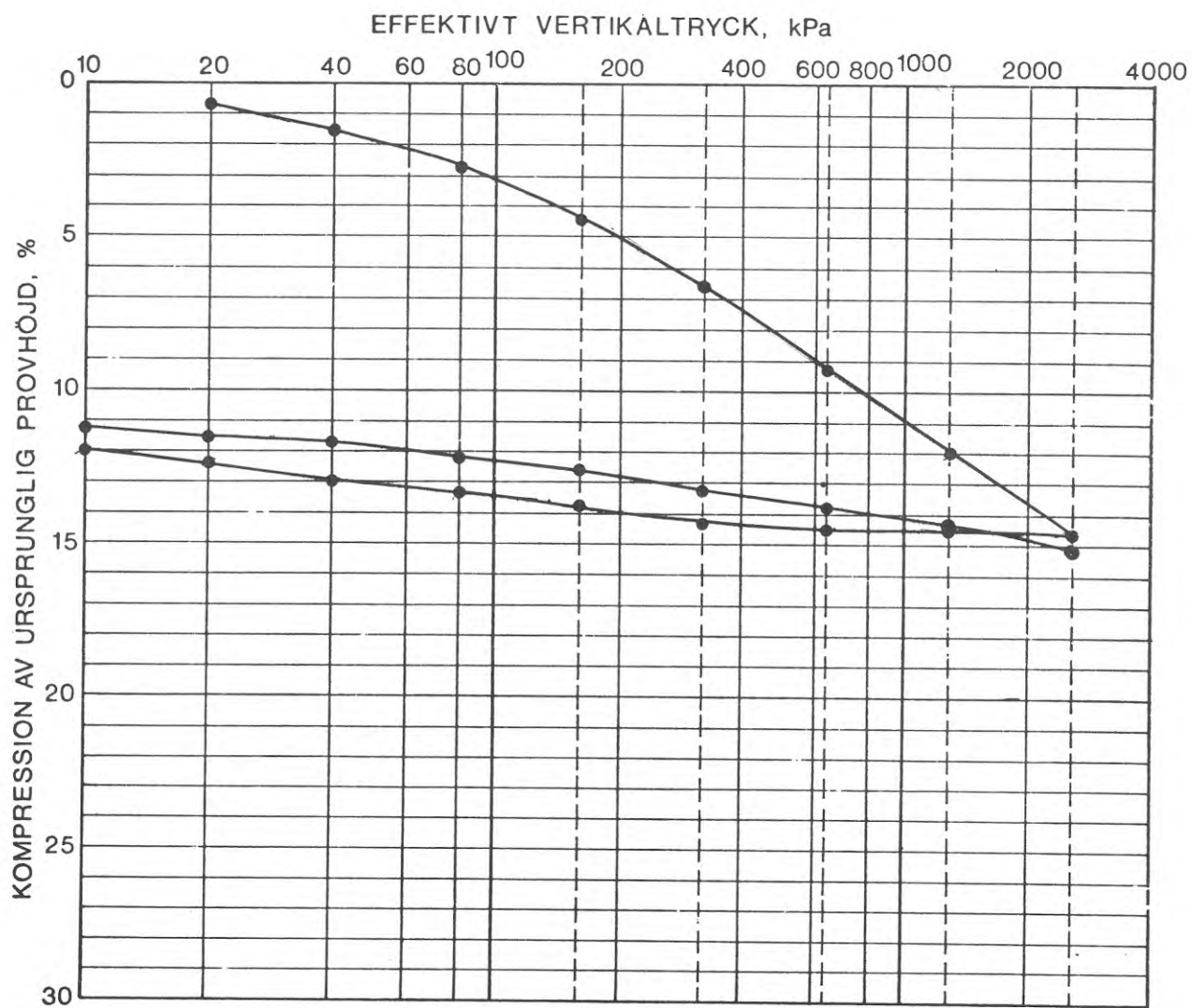


FIG. B6. Ödometerförsök på ostörd moränlera från Tygelsjö.

Oedometer test on undisturbed boulder clay from Tygelsjö.

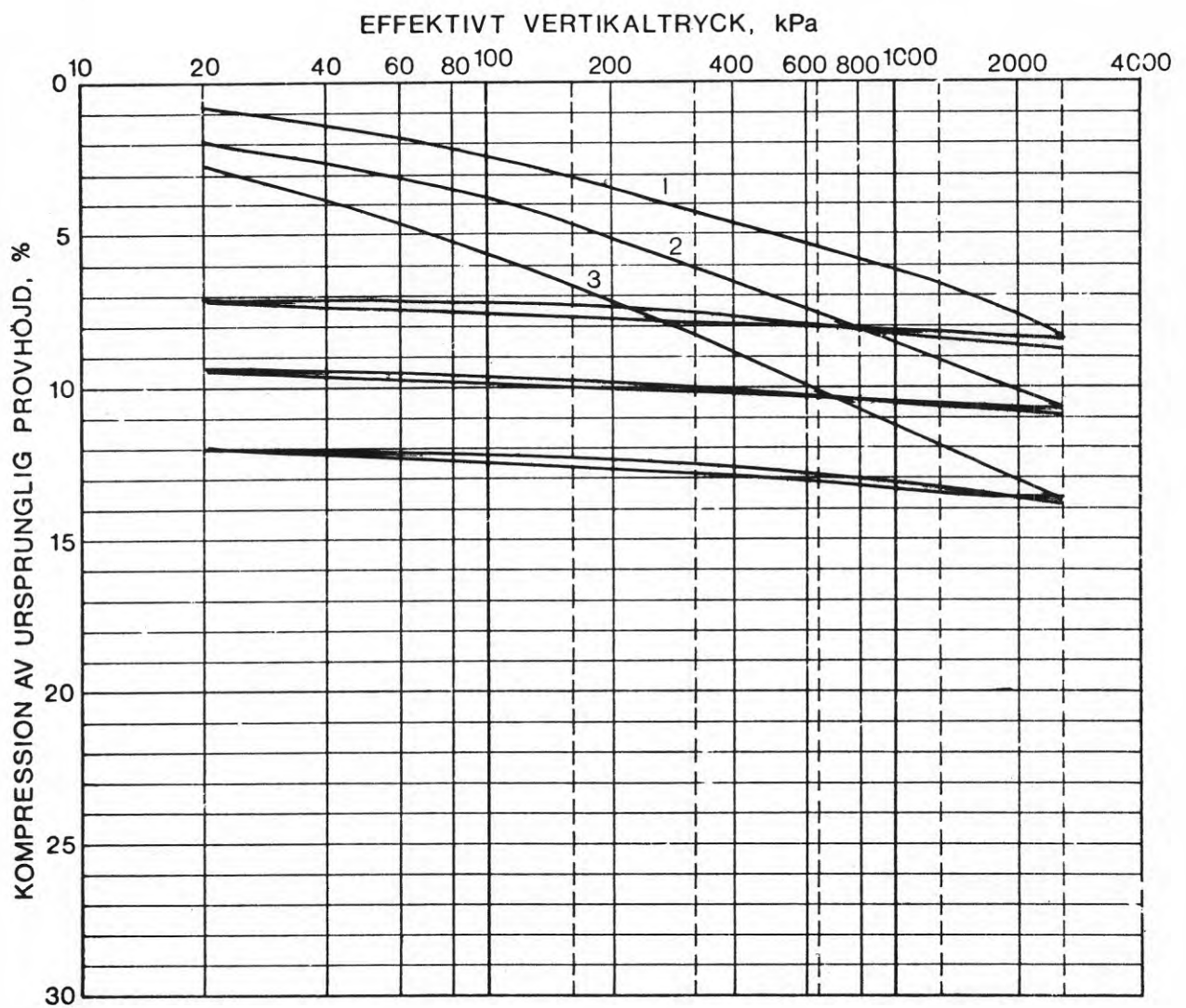


FIG. B7. Ödometerförsök på laboratoriepackad moränlera från kv. Lärkträdet, Malmö.

Oedometer tests on recompacted boulder clay from kv. Lärkträdet, Malmö.

1. $w_0 = 9,5\%$ $\rho_d = 2,10 \text{ t/m}^3$
2. $w_0 = 12,0\%$ $\rho_d = 2,01 \text{ t/m}^3$
3. $w_0 = 14,2\%$ $\rho_d = 1,93 \text{ t/m}^3$

Bilaga 4. Pressiometerförsök i Rehab, Lund.

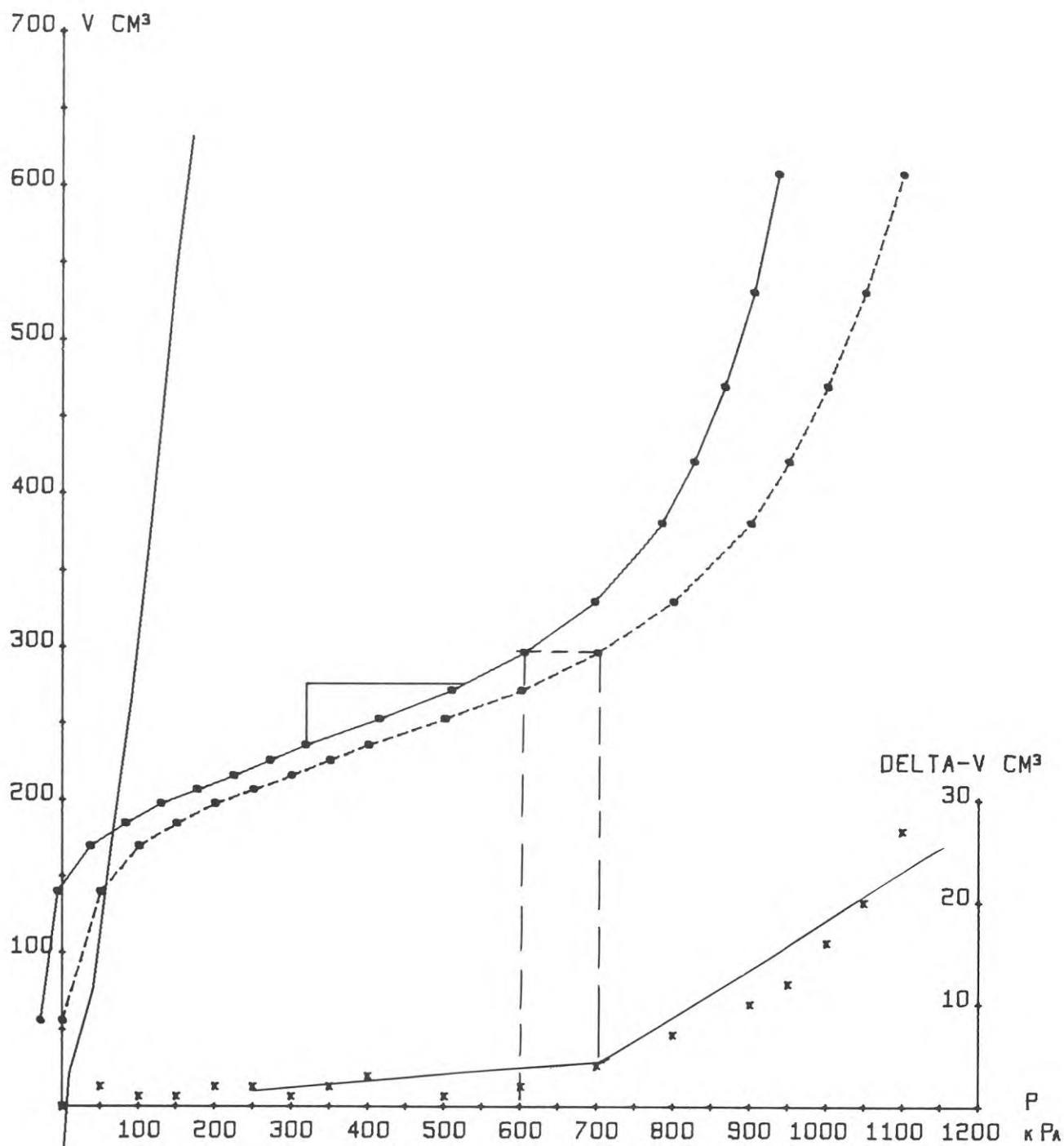


FIG. B8. Pressiometerförsök utfört av AB Jacobson & Widmark på djupet 2,0 m under markytan i Rehab, Lund.

Pressuremeter test performed by AB Jacobson & Widmark at a depth of 2.0 m below ground surface in Rehab, Lund.

R7:1974

Denna rapport avser anslag C 439 från Statens råd för byggnadsforskning till Chalmers tekniska högskola, institutionen för geoteknik med grundläggning, Göteborg.

Försäljningsintäkterna tillfaller fonden för byggnadsforskning.

Distribution: Svensk Byggtjänst, Box 1403, 111 84 Stockholm

Grupp: konstruktion

Pris: 30 kronor + moms