



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

R36:1973

TEKNISKA HOGSKOLAN I LUND
SEKTIONEN FOR VAG- OCH VATTEN
BIBLIOTEKET

**Kompressibilitet hos
friktionsjord**

Laboratoriestudium

Leif Andréasson

Byggforskningen

Kompressibilitet hos friktionsjord Laboriestudium

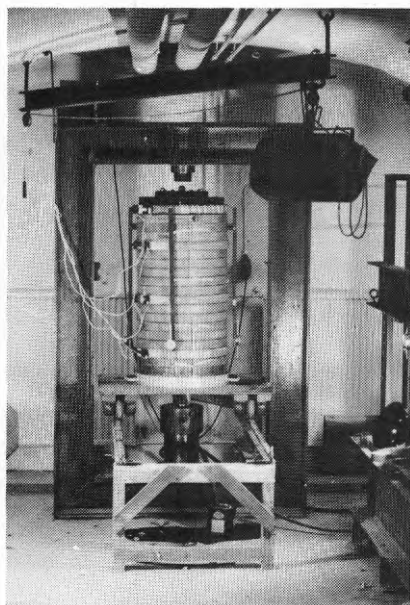
Leif Andréasson

Föreliggande undersökning syftar till klarläggande av de samband som råder mellan en friktionsjords kompressibilitet och jordens övriga, enklare bestämbara egenskaper.

Kompressionsegenskaperna hos jord är av mycket stort geotekniskt intresse, men på friktionsjord är det ofta svårt att göra kompressionsförsök.

I rapporten analyseras en mängd kompressionsförsök. Resultaten av analyserna kan användas för utvärdering av kompressionsmodulen utgående från jordens portal, korngradering och kornstorlek.

Kompressionsegenskaperna hos friktionsjord beror av jordens lagringstäthet samt av vissa karakteristiska egenskaper, såsom kornform, kornstorlek och korngradering. För att finna sambanden mellan kompressibilitet och övriga egenskaper hos friktionsjord analyseras i denna undersökning ett stort antal kompressionsförsök. Analysen omfattar såväl egna försök som i litteraturen redovisade resultat. Undersökningarna omfattar kompressometer- och ödometerförsök på rena friktionsjordar från finsandfraktion upp till stenfraktion, men begränsas till att gälla kompressionen vid förstagningsbelastning. I anslutning till analysen av olika faktors inverkan undersöks också felkällor hos ödometerförsöket och lämpliga mätetal



SGIs ringkompressometer \varnothing 50 cm, provhöjd 96 cm.

för korngradering, kornstorlek och kornform.

Kompressionsmodulen för jord kan skrivas

$$M = m \sigma_j \left(\frac{\sigma'}{\sigma_j} \right)^{1-\beta}$$

där

M = kompressionsmodulen, uttryckt som tangentmodul

m = modultalet, dimensionslöst men till sin storlek beroende av σ_j

σ_j = jämförelsespänningen, nödvändig för dimensionsriktighet. Av flera skäl bör man välja $\sigma_j = 100 \text{ kN/m}^2$

σ' = effektivspänningen

β = spänningsexponenten

Med kompressionsmodulen tecknad på detta sätt kan man använda de båda parametrarna m och β för att entydigt beskriva denna. Vid analys av olika faktors inverkan på kompressionsmodulen är det lämpligt att studera inverkan på m och β separat eftersom dessa påverkas på olika sätt.

Kompressionsmodulen brukar bestämmas med antingen ödometer eller ringkompressometer. Av dessa båda apparater är ringkompressometern med mätning av kompressionen mellan två ringar att föredra. Ödometern har nämligen två ganska betydande felkällor: sidofriktion och dålig anliggning mellan stämpel och prov. Vid försök på fast lagrad jord är det främst den dåliga anliggningen mellan stämpel och prov som ger felaktigheter. Om inga speciella åtgärder vidtas för att motverka den dåliga anliggningen måste man ha ett relativt högt prov för att få riktiga värden. Undersökningen visar nämligen, att vid ett diameter- höjdförhållande 1:1 kompenseras den dåliga anliggningen mellan stämpel och prov i det närmaste av sidofriktionen mot ödometerringen.

Lagringstätheten hos jorden påverkar i hög grad kompressionsmodulen. Härvid är det modultalet m som påverkas; spänningsexponenten β kan betraktas som en materialkonstant. Vid jämförelser mellan olika jordar med samma lagringstäthet kompliceras jämförelserna av att också kornformen inverkar i hög grad. Det är svårt att finna ett lätt bestämbart mätetal för kornformen. Bland annat av denna anledning har portalet valts som mått på lagringen; vid jämförel-

Byggforskningen Sammanfattningar

R36:1973

Nyckelord:

kompressibilitet (friktionsjord), laboriestudium, doktorsavhandling

Rapport R36:1973 avser anslag C439 från Statens råd för byggnadsforskning till Chalmers tekniska högskola, institutionen för geoteknik med grundläggning, Göteborg.

UDK 624.131.431

624.131.37

SfB Yp1

ISBN 91-540-2150-2

Sammanfattning av:

Andréasson, L., 1973, *Kompressibilitet hos friktionsjord. Laboriestudium.* (Statens institut för byggnadsforskning) Stockholm. Rapport R36:1973, 144 s., ill. 25 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

ser mellan olika jordar med samma portal inverkar nämligen kornformen i mycket ringa grad på modultalet. Modultalet är proportionellt mot portalet upphöjt till en exponent som ligger mellan $-2,65$ och $-3,7$.

Graderingen påverkar modultalet i stor utsträckning om man jämför jordar med samma portal. Modultalet är då i stort sett omvänt proportionellt mot graderingskoefficienten C_u . Graderingens inverkan vid jämförelser mellan jordar med samma lagringstäthet är inte

utredd. Graderingskoefficienten C_u är för praktiskt bruk fullt användbar som mätetal för graderingen, men det är möjligt att med ganska enkla metoder åstadkomma ett bättre mätetal.

Kornstorleken påverkar främst spänningsexponenten β som ökar med ökande kornstorlek. Även modultalet m påverkas, fastän i ganska ringa grad om jämförelsen görs vid samma portal och med $\sigma_j = 100 \text{ kN/m}^2$. Som mätetal för kornstorleken har korndiametern d_{50} använts, trots att denna

har vissa brister. Använd tillsammans med graderingskoefficienten C_u är d_{50} emellertid acceptabel som mätetal.

Kornformen påverkar spänningsexponenten som minskar med ökande rundningsgrad hos kornen. Även modultalet m påverkas om man jämför jordar med samma lagringstäthet; då ökar m med ökande rundningsgrad. Jämför man däremot jordar med samma portal och med $\sigma_j = 100 \text{ kN/m}^2$ är modultalet relativt oberoende av rundningsgraden. Något enkelt bestämbar mätetal för kornformen har ännu inte kunnat tas fram.

För att få fram matematiska samband mellan kompressionsmodulen och jordens karakteristiska egenskaper har m - och β -värdena från 466 olika kompressionsförsök analyserats i dator. Därvid befanns att modultalet m kan beskrivas med initialportalet e_0 och graderingskoefficienten C_u . En uppdelning gjordes mellan fint material (med $d_{50} < 5 \text{ mm}$) provat i ödometer och grovt material (med $d_{50} > 10 \text{ mm}$) provat i kompressometer.

För det finkorniga materialet erhöles $m = 295 C_u^{-0,78} e_0^{-2,64}$

och för det grövre materialet

$$m = 271 C_u^{-0,71} e_0^{-3,72}$$

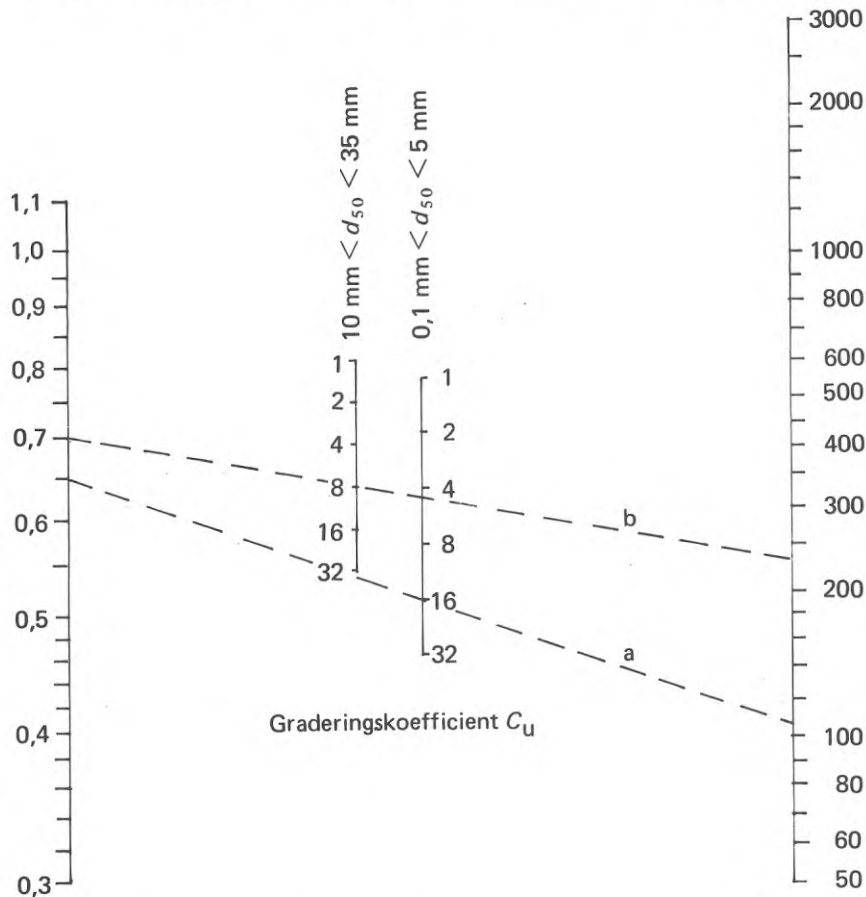
Spänningsexponenten β analyserades för allt material med hjälp av d_{50} och C_u :

$$\beta = 0,29 \lg \frac{d_{50}}{0,01} - 0,065 \lg C_u, \quad d_{50} \text{ i mm}$$

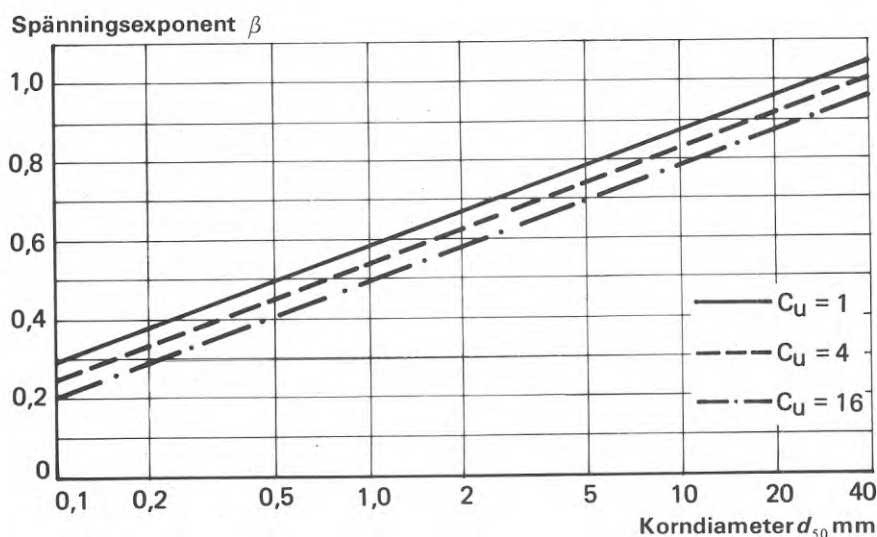
Som tidigare nämnts inverkar också kornformen på β -värdet. För det grövre materialet bestämdes rundningsgraden. Med hjälp av korndiametern d_{50} och rundningsgraden R_f kan β för det grövre materialet beskrivas med formeln

$$\beta = 0,4 \lg \frac{d_{50}}{0,01} - 1,1 R_f, \quad d_{50} \text{ i mm}$$

Eftersom sambanden är empiriska måste giltigheten begränsas till att gälla jordar med ungefär samma egenskaper som de undersökta. För dessa jordar varierade d_{50} mellan 0,1 och 35 mm och C_u mellan 1,1 och 34. Såväl naturliga jordar som krossmaterial har undersökts. Den pålagda vertikalspänningen har i allmänhet inte överskridit 1600 kN/m^2 . Med iakttagande av dessa begränsningar kan man emellertid tämligen väl beräkna kompressionsmodulen med hjälp av de härledda sambanden.



Portal e_0 Modultal m
Syftlinjenomogram för bestämning av modultalet m ur portalet och graderingskoefficienten.
Exempel a: $e_0 = 0,65, d_{50} = 1 \text{ mm}, C_u = 16 \Rightarrow m = 107$
Exempel b: $e_0 = 0,70, d_{50} = 20 \text{ mm}, C_u = 8 \Rightarrow m = 235$



Nomogram för bestämning av spänningsexponenten β ur kornstorleken och graderingskoefficienten.

Compressibility of cohesionless soils

A laboratory investigation

Leif Andréasson

This study was designed to establish the correlations between the compressibility of a cohesionless soil and its other properties which can be more easily determined.

The compressibility of a soil is of great importance from the point of view of soil mechanics. However, it is often very difficult to carry out compression tests on a cohesionless soil.

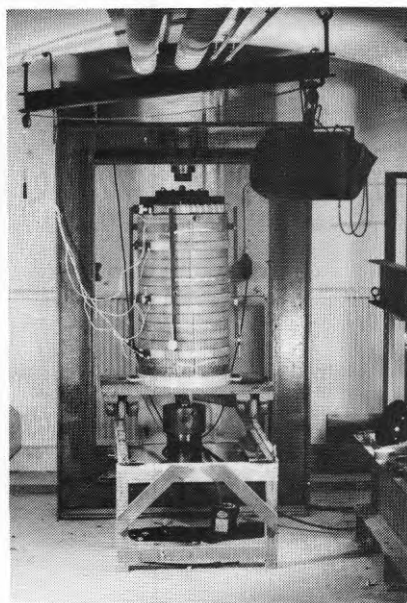
A large number of compression tests are analysed in the report. The results of these analyses can be used for calculating the modulus of compressibility by using the soil's void ratio, grading curve and grain size.

The compressibility of cohesionless soils depends on the soil density and some soil characteristics, such as grading, grain size shape. In order to discover the relationship between compressibility and other properties of cohesionless soil a large number of compression tests have been analysed. The analysis covers both my own tests and tests described in literature. The tests were made in compressometer or oedometer on pure cohesionless soils ranging from fine sands to coarse gravel. The relevance of the oedometer test is investigated as well as relevant parameters for description of grading, grain size and grain shape.

The modulus of compressibility of soil can be written

$$M = m \sigma_j \left(\frac{\sigma'_j}{\sigma_j} \right)^{1-\beta}$$

where



The SGI ring compressometer \varnothing 50 cm, sample height 96 cm.

M = modulus of compressibility (tangent modulus)

m = modulus number, dimensionless but dependent of the magnitude of σ_j

σ_j = relative stress, necessary to obtain correct dimensions. For several reasons $\sigma_j = 100 \text{ kN/m}^2$ is most suitable.

σ'_j = effective stress

β = stress exponent

The modulus of compressibility, formulated in this way, can be described by the parameters m and β . When analysing the influence of different soil properties on the modulus of compressibility, the influence on m and β should be investigated separately as they are influenced in different ways.

According to Swedish practice the modulus of compressibility is determined by oedometer or ring compressometer tests. The ring compressometer which permits measurements of compression between two rings is more suitable than the oedometer, because the oedometer results are affected by side friction and insufficient interaction between top plate and sample. Insufficient interaction between top plate and sample produces major errors, particularly if the soil is in a dense state. If no precautions are taken to prevent insufficient interaction it is therefore necessary to use relatively high samples. According to the investigation the insufficient interaction between top plate and sample is approximately compensated by the side friction if the diameter to height ratio is 1:1.

The modulus of compressibility is highly influenced by the density of the soil but it is only the modulus number m that is affected whereas the stress exponent β can be treated as a soil constant. It would seem handy to use the relative density as a parameter but this is complicated due to the fact that the grain shape is also a main influencing factor. However, the influence of the grain shape can be almost eliminated if the void ratio is chosen to describe the density of the soil. It was found that the modulus number is proportional to the void ratio raised to the power of -2.65 to -3.7 .

However, the modulus number of soils with the same void ratio was found to be highly influenced by the grading of the soil. Thus, the modulus number was found to be approximately inversely proportional to the coeffi-

National Swedish Building Research Summaries

R36:1973

Key words:

compressibility (cohesionless soils), laboratory investigation, doctor's dissertation (tech.)

Report R36:1973 has been supported by Grant C 439 from the Swedish Council for Building Research to Chalmers Institute of Technology, Department for Geotechnics, Gothenburg.

UDK 624.131.431
624.131.37
SfB Yp1
ISBN 91-540-2150-2

Summary of:

Andréasson, L, 1973, *Kompressibilitet hos friktionsjord. Laboratiestudium. Compressibility of cohesionless soils. A laboratory investigation.* (Statens institut för byggnadsforskning) Stockholm. Report 36:1973, 144 p., ill. 25 Sw. Kr.

The report is in Swedish with Swedish and English summaries.

Distribution:

Svensk Byggtjänst
Box 1403, S-111 84 Stockholm
Sweden

cient of uniformity C_u . For soils with the same relative density the influence of the grading has not been solved. Although it is possible to find a better parameter to describe the grading in a relatively easy way, the coefficient of uniformity C_u was chosen as it is convenient for practical purposes.

The grain size primarily affects the stress exponent β . The stress exponent increases with increasing grain size. The effect on the modulus number m

can be disregarded for soils with the same void ratio and with $\sigma_j = 100$ kN/m². As a measure of the grain size the grain diameter d_{50} has been used although this has got some deficiencies. However, if used together with the coefficient of uniformity C_u the grain diameter d_{50} is passable as a measure of the grain size.

The grain shape affects the stress exponent β in the way that it decreases when the roundness increases.

Also the modulus number m is affected for soils with the same relative density: m increases when the roundness increases. On the other hand, for soils with the same void ratio the modulus number is relatively independent of the grain shape. A suitable measure for the grain shape has not been found.

In order to establish mathematical relationships between the modulus of compressibility and the soil characteristics, m - and β -values from 466 compression tests have been analysed with the aid of an electronic computer. It was found that the modulus number m can be described by the initial void ratio e_0 and the coefficient of uniformity C_u . A division was made between fine-grained material ($d_{50} < 5$ mm) tested in oedometer and coarse-grained material ($d_{50} > 10$ mm) tested in ring compressometer. For the fine-grained material the analysis gave

$$m = 295 C_u^{-0.78} e_0^{-2.64}$$

and for the coarse-grained material

$$m = 271 C_u^{-0.71} e_0^{-3.72}$$

The stress exponent β can be expressed for all soils as

$$\beta = 0.29 \lg \frac{d_{50}}{0.01} - 0.065 \lg C_u$$

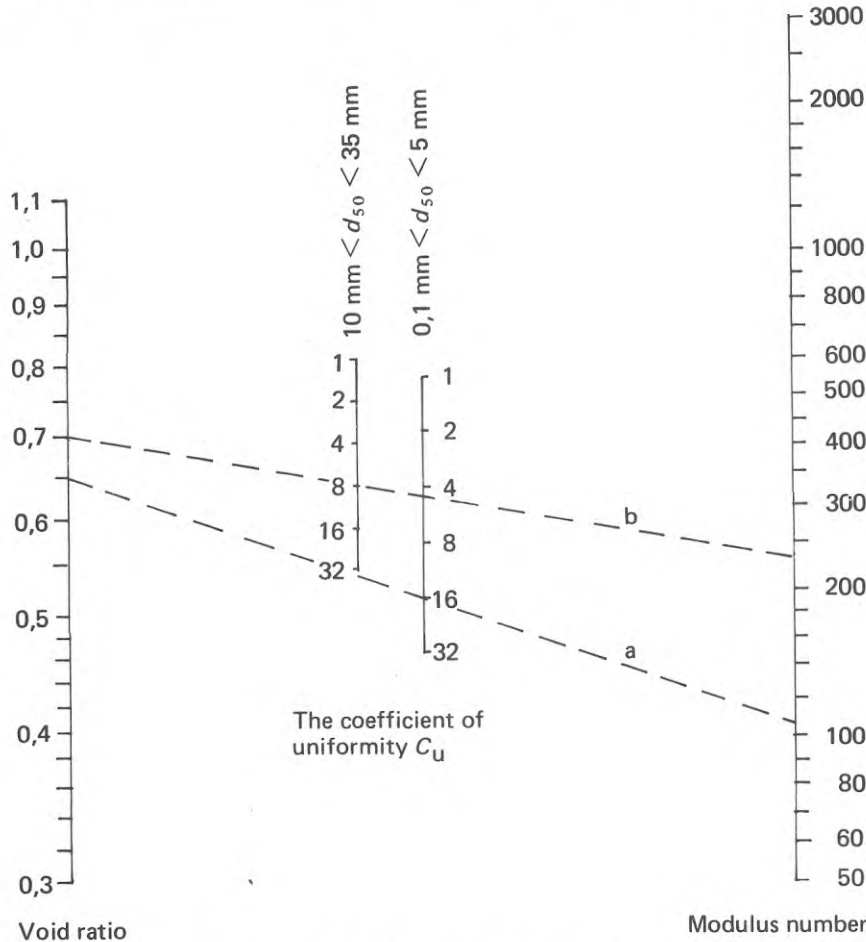
where d_{50} is measured in mm.

As mentioned above the grain shape affects the β -value. For the coarse-grained material the roundness was determined, and for this material β can be expressed by the grain diameter d_{50} and the roundness R_f

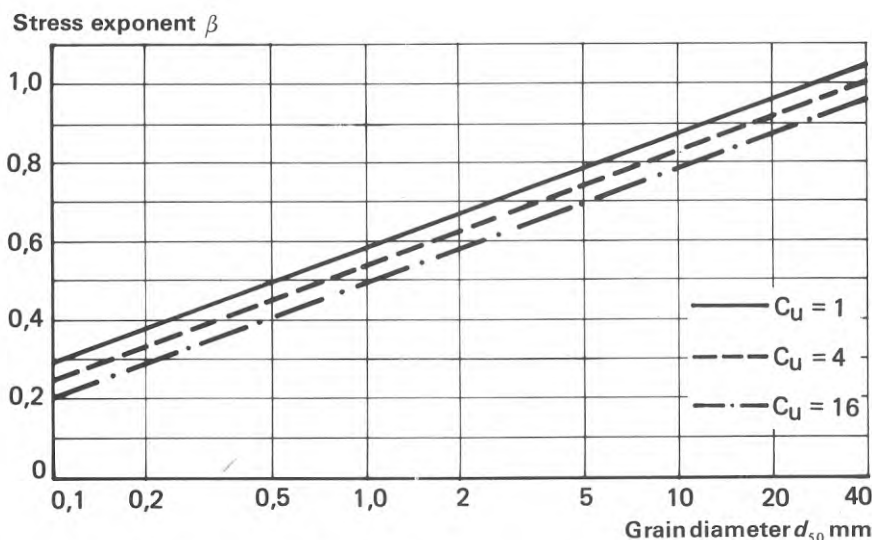
$$\beta = 0.4 \lg \frac{d_{50}}{0.01} - 1.1 R_f$$

where d_{50} is measured in mm.

As these relationships are empirical they are valid only for soils with approximately the same properties as the tested soils. For these soils d_{50} varied between 0.1 and 35 mm and C_u between 1.1 and 34. Both natural soils and crushed materials have been tested. Usually the vertical stress has been less than 1600 kN/m². However, within these limits it is possible to calculate the modulus of compressibility with reasonable accuracy by applying the relationships presented above.



Nomogram for determination of the modulus number m from the void ratio and the coefficient of uniformity. Example a: $e_0 = 0.65, d_{50} = 1$ mm, $C_u = 16 \Rightarrow m = 107$
Example b: $e_0 = 0.70, d_{50} = 20$ mm, $C_u = 8 \Rightarrow m = 235$



Nomogram for determination of the stress exponent β from the grain size and the coefficient of uniformity.

Rapport R36:1973

KOMPRESSIBILITET HOS FRIKTIONSJORD
Laboratoriestudium

COMPRESSIBILITY OF COHESIONLESS SOILS
A laboratory investigation

av Leif Andréasson

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	Rad	Står	Skall stå
13	18	$A\sigma_j \left(\frac{\sigma'_j}{\sigma_j}\right)B$	$A\sigma_j \left(\frac{\sigma'_j}{\sigma_j}\right)B$
40	21, 22	. . . och e_{\min} visat sig användbara för att beskriva jordens egenskaper. Med hjälp av e_0 , e_{\max}	utgår (står överst på nästa sida)
59	Fig.text	. . . de tre singelsorterna . . . the three pebble fractions	singel och karlskronagnejs pebbles and Karlskrona gneiss
70	Fig.text	. . . with — and without — — — . . .	without — and with — — —
79	30	entydligt	entydigt
139	Fig. 73	$\beta = 0,29 \lg \frac{d_{50}}{0,01} - 0,065 C_U$	$\beta = 0,29 \lg \frac{d_{50}}{0,01} - 0,065 \lg C_U$
141	26	En referens tillkommer:	Fumagalli, 1969: Tests on cohesionless materials for rockfill dams. Jour. Soil Mech. Found. Engng., ASCE Proc., Vol. 95 No SM 1.
144	16	Strasse und Autobahn nr 6	. . . nr 8

FÖRORD

Föreliggande undersökning av kompressibiliteten hos friktionsjord började för flera år sedan med att jag sommaren 1965 erbjöds att utföra kompressionsförsök på grovt material i Statens geotekniska instituts "jättekompresometer". Vad som då var en mindre undersökning, vilken avsåg att ge information om kompressibiliteten hos makadam, har sedan utökats till att omfatta kompressibiliteten hos all friktionsjord.

Undersökningen har huvudsakligen utförts vid Chalmers tekniska högskola under ledning av professor Sven Hansbo. Medel för genomförandet har ställts till förfogande av Statens råd för byggnadsforskning.

Till alla mina kolleger, som varit mig till stor hjälp vid arbetets genomförande, riktas ett varmt tack.

Göteborg i december 1972

Leif Andréasson

INNEHÅLL

BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER	6	
1	INTRODUKTION	9
1.1	Moduler och deformationsegenskaper	10
1.1.1	Definition av moduler	11
1.1.2	Modulernas spänningsberoende	13
1.1.3	Konsekvenser av modulernas spänningsberoende ..	15
1.1.4	Deformationer	18
1.2	Formulering av kompressibiliteten	19
1.2.1	Kompressionsmodul och kompression	19
1.2.2	Tolkning av kompressionsförsök	21
1.2.3	Jämförelsespänningen σ_j	26
1.3	Litteraturstudium av kompressionsmodulen	29
1.3.1	Sammanfattning	40
2	KOMPRESSIBILITET HOS GROVA FRIKTIONSJORDAR	42
2.1	Introduktion	42
2.2	Beskrivning av försöksutrustningen	42
2.3	Försökens utförande	44
2.4	Stenmaterialets egenskaper	47
2.5	Försöksresultat	49
2.5.1	Kompression vid pålastning	49
2.5.2	Svällning vid avlastning	56
2.5.3	Horisontaltryck	57
2.6	Slutsatser	59
3	OLIKA FAKTORERS INVERKAN PÅ KOMPRESSIONS- MODULEN	61
3.1	Försöksutrustningen	61
3.2	Jordens egenskaper	77
3.2.1	Lagringen	78
3.2.2	Graderingen	84
3.2.3	Kornstorleken	100
3.2.4	Kornformen	111
3.3	Slutsatser	119
4	EMPIRISK HÄRLEDNING AV KOMPRESSIONS- MODULEN	121
4.1	Modultalet m	123
4.2	Spänningsexponenten β	134
4.3	Slutsatser	138
	LITTERATUR	141

BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER

A, B	parametrar, använda vid beskrivning av moduler
a, b	m.m; definieras varje gång de används
C	integrationskonstant
C_f	formfaktor, använd för beskrivning av kornform
C_u	graderingskoefficient, d_{60}/d_{10}
D	diameter, som regel ödometerdiameter
d	korndiameter
d_a	aktiv kornstorlek, definieras av ekv. 3:9
d_w	verksam kornstorlek, definieras av ekv. 3:5
d_{xx}	den korndiameter, som svarar mot xx viktsprocent passerande mängd vid siktning
E	elasticitetsmodul
e	portal
e_{max}	portal vid lösaste lagring
e_{min}	portal vid fastaste lagring
e_o	begynnelseportal (portal före pålastning)
G	skjuvmodul
h	provhöjd
I_D	lagringstäthet (äldre beteckning relativ lagringstäthet, D_r)
K	tryckmodul
k	konstant, definierad varje gång den används
lg	10-logaritmen
ln	naturliga logaritmen
M	kompresionsmodul

m	kompresionsmodultal, definieras av ekv. 1:4
p	tryckspänning, likvärdig med σ
p_d	dragspänning
p_{Bd}	brottdragspänning
R	multipla korrelationskoefficienten
R_f	rundningsgrad
r	råhetstal, portalsexponent eller radie; definieras varje gång den används
β	spänningsexponent, definieras av ekv. 1:4
γ	vinkeldeformation (vid skjuvning)
δ	kompresion i längdenheter
e	kompresion
v	kontraktionstal
ρ	densitet
ρ_s	korndensitet
σ	spänning
σ_h	horisontalspänning
σ_j	jämförelsespänning; där ej annat anges är $\sigma_j = 100 \text{ kN/m}^2$
σ_v	vertikalspänning. Index v används endast där detta erfordras för tydlighetens skull, i övrigt använd σ
σ_1, σ_3	huvudspänningar
ϕ	friktionsvinkel

1 INTRODUKTION

Beräkning av sättningar är ett stort och centralt problem inom geotekniken, eftersom det oftast är sättningarnas storlek som är avgörande för den principiella utformningen av ett byggnadsverks grundkonstruktion. För beräkning av sättningar är kännedom om jordens deformationsegenskaper nödvändig.

När man bygger på lera utgör i regel en sättningsberäkning underlaget vid bedömning av de tillåtna påkänningarna. En sådan beräkning utförs standardmässigt och ofta med godtagbart resultat. En geoteknisk praxis finns utbildad för bestämning av lerors kompressionsegenskaper: man tar upp ostörda prover och gör rutinmässiga kompressionsförsök.

För friktionsjord är det inte lika vanligt att man utför sättningsberäkningar. Delvis beror detta på att sättningar i friktionsjord oftast är små om man jämför med dem i lera, och de kommer som regel snabbt, nära nog direkt efter lastens påförande, men det beror också på att det är så svårt att bestämma kompressionsegenskaperna hos friktionsjord. Många typer av byggnader är emellertid så sättningskänsliga, att man måste ta hänsyn också till små sättningar. Vidare är en del friktionsjordar så löst lagrade att sättningarna inte alls blir små utan tvärtom så stora, att man måste ta hänsyn till dem för flertalet byggnadsverk. I friktionsjord är det dock svårt att med enkla metoder ta upp ostörda prover, och ofta är jorden så grovkornig att normal laboratorieutrustning inte tillåter provning. På grund härav är sambandet mellan friktionsjordarnas enkelt bestämbara egenskaper och deras kompressibilitet av stort intresse.

Sambanden mellan en jords olika egenskaper, t. ex. kornstorleken inverkan på kompressibiliteten, har också ett mycket

betydande geotekniskt intresse, eftersom det är nödvändigt med ingående kunskaper om de verkliga orsakssammanhangen för att kunna bedöma sättningsberäkningarnas relevans. Därför är sådana samband av stort intresse också för leror, trots att man här har enkla och okomplicerade metoder att bestämma deformationsegenskaperna.

Vid traditionella sättningsberäkningar använder man sig nästan uteslutande av ödometermodulen och ser till att skjuvspänningarna är så små att säkerheten mot skjuvbrott är tillfredsställande. Under en avgränsad lastyta är emellertid deformationsbilden annorlunda än i ödometerfallet; skjuvdeformationerna är mer dominerande. Orsaken till att man normalt inte tar hänsyn till detta är helt enkelt den, att det ännu inte finns någon enkel metod att separera spänningarna och deformationerna i sina isotropa och deviatoriska komponenter (vilket skulle vara en teoretiskt mycket tilltalande metod). Dessutom har erfarenheten visat att när säkerheten mot brott är tillfredsställande (>3), så kan man med tillräcklig noggrannhet beräkna sättningen enbart med hjälp av kompressionsmodulen.

Syftet med denna undersökning är främst att söka finna de faktorer hos friktionsjordar som bestämmer deras kompressibilitet. Undersökningen gäller rena, ej förbelastade friktionsjordar. Därmed förstås också att jorden måste vara helt vattenmättad eller helt torr, eftersom i en fuktig jord alltid finns en form av kohesion, orsakad av porvinkelvattnet.

1.1 Moduler och deformationsegenskaper

För jord finns flera olika moduler definierade. De är för jord liksom för de flesta andra material till sin storlek beroende av spänningen. Här definieras de vanligaste modulerna och redovisas sambandet mellan modul och spänning.

1.1.1 Definition av moduler

Samtliga moduler ger förhållandet mellan en spänningsändring och motsvarande deformation, och varje modul kan bestämmas som antingen tangent- eller sekantmodul, fig. 1. Båda metoderna förekommer, men i denna rapport kommer endast tangentmodulen att användas.

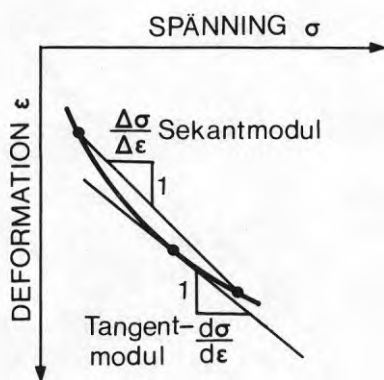


FIG. 1. Sekant- och tangentmodul.

Secant and tangent modulus.

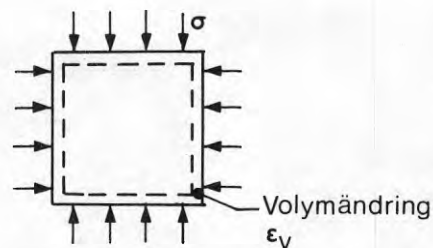
Man kan utgå från två grundmoduler, nämligen tryckmodulen (volymförändringsmodulen) K och skjuvmodulen (formförändringsmodulen) G . Ur dessa kan övriga moduler härledas.

a) Tryckmodulen K

Isotrop (allsidigt lika) spänningsändring

$$K = \frac{d\sigma}{d\epsilon_v} = \frac{d\sigma}{d\epsilon_1 + d\epsilon_2 + d\epsilon_3}$$

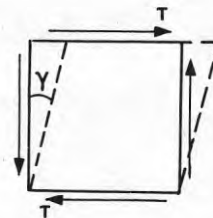
Tryckmodulen kan bestämmas genom isotropa triaxialförsök.



b) Skjuvmodulen G

Enkel skjuvning

$$G = \frac{d\tau}{d\gamma}$$



Skjuvmodulen G brukar sällan bestämmas, men man kan bestämma den exempelvis genom direkt skjuvning i SGI-skjuvapparaten.

Ur tryckmodulen och skjuvmodulen kan man direkt härleda

c) Elasticitetsmodulen E

$$E = \frac{3G}{1+G/3K}$$

och

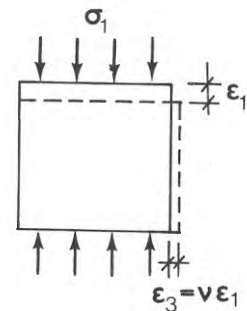
d) Kontraktionstalet ν

$$\nu = \frac{1 - 2G/3K}{2 + 2G/3K}$$

E och ν kan också definieras direkt:

Enaxiell spänningsändring,

$$E = \frac{d\sigma_1}{d\epsilon_1}, \quad d\epsilon_3 = \nu d\epsilon_1$$

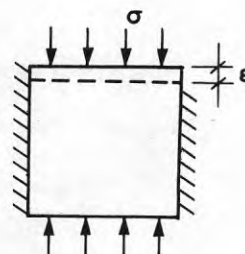


Elasticitetsmodulen E och kontraktionstalet ν brukar inte bestämmas direkt inom geotekniken, men används trots detta ofta, beroende på att elasticitetsteorin är matematiskt väldefinierad och att beräkningsexempel baserade på elasticitetsteorin finns lösta för ett stort antal belastningsfall. Storleken av E och ν bestäms då ofta överslagsmässigt. För friktionsjord brukar man exempelvis anta $\nu = 1/3$ eller beräkna ν enligt den approximativa formeln $\nu = (1 - \sin\phi) / (2 - \sin\phi)$.

e) Kompressionsmodulen M

Enaxiell spänningsändring vid förhindrad sidorörelse.

$$M = \frac{d\sigma}{d\epsilon}$$



Kompressionsmodulen kan också härledas ur K och G :

$$M = K + 4G/3$$

Kompressionsmodulen bestäms genom ödometerförsök. Den är alltså endast relevant för det spänningstillstånd som råder i ödometern, dvs för $\sigma_2 = \sigma_3 = K_0 \sigma_1$, där K_0 = koefficienten för vilojordtryck.

Det är vanligt att uttrycka sambanden mellan de olika modulerna med hjälp av kontraktionstalet ν . Sambanden blir då:

$$E = 3(1-2\nu)K = \frac{1-\nu-2\nu^2}{1-\nu} M = 2(1+\nu)G$$

1.1.2 Modulernas spänningsberoende

För jord gäller som allmän regel, att modulerna till sin storlek är beroende av spänningen och att man kan betrakta dem som konstanter endast inom små spänningsintervall. Vissa undantag finns naturligtvis, men principiellt kan man skriva

$$\text{tangentsmodulen} = A \sigma_j \left(\frac{\sigma_j}{\sigma_j} \right)^B \quad (1:1)$$

där A = modultalet
 B = spänningsexponenten } dimensionslösa parametrar

σ_j = jämförelsespänning, nödvändig för dimensionsriktighet.

Detta sätt att skriva modulen för jord har huvudsakligen empirisk bakgrund. Det gäller för samtliga moduler, men observerades först för kompressionsmodulen, vilken Ohde (1939) tecknade $V = \nu \sigma^\omega$ med σ i kp/cm^2 .

Parametrarna A och B i ekv. (1) är konstanta under ett och samma pålastnings- (eller avlastnings-) förlopp under förutsättning att man ej överskrider någon kritisk gräns för jorden. Om exempelvis förkonsolideringstrycket överskrids vid ödometerförsök, så förändras modultal och spänningsexponent. Belastas sand så högt att sandkornen krossas sker motsvarande förändring.

Metoden att skriva tangentmodulen under formen (1:1) är mycket fördelaktig, eftersom den ger möjlighet att i samma form beskriva väsentligt olika moduler. Om parametern $B = 0$ så är modulen konstant, om $B > 0$ ökar modulen med spänningen (detta brukar gälla för kompressionsmodulen) och om $B < 0$ avtar modulen med spänningen (skjuvmodulen minskar med ökande skjuvspänning). Matematiskt sett är (1:1) ekvationen för en rät linje i ett dubbellogaritmiskt koordinatsystem. Detta gör att loglog-diagram lämpar sig väl för grafisk återgivning av deformationsmodulerna, och det är i sådana diagram lätt att tolka parametrarna A och B vilket visas i fig. 2.

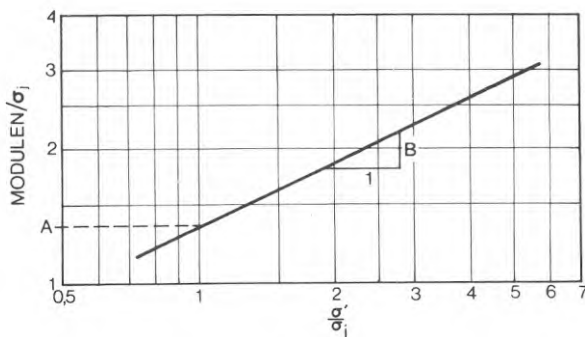


FIG. 2. Bestämning av parametrarna A och B i dubbellogaritmiskt diagram.
Interpretation of the parameters A and B according to eq. (1:1) in a log-log diagram.

Man kan av fig. 2 se, att modultalet A till sin storlek beror av σ_j , medan B är oberoende av σ_j . Valet av jämförelsespänningen σ_j har således en viss betydelse. Detta kommer att närmare belysas längre fram.

1.1.3 Konsekvenser av modulernas spänningsberoende

Deformationsmodulerna för jord kan ej behandlas på samma sätt som man brukar behandla modulerna för material som kan betraktas som idealelastiska. Man kan nära nog säga att talet om elasticitetsmodul och kontraktionstal för en jord är rent fiktivt. För att illustrera detta redovisas i fig. 3 resultatet av två olika försök på sand, dels ett ödometerförsök för bestämning av kompressionsmodulen M , dels ett enkelt skjuvförsök för bestämning av skjuvmodulen G .

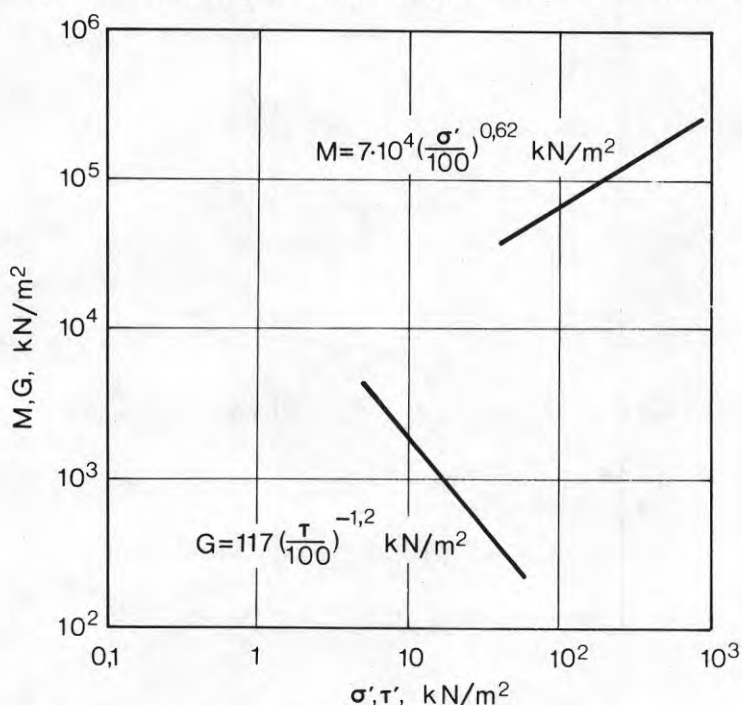


FIG. 3. Resultat av ödometerförsök och skjuvförsök på Simrishamns-sand. Ödometer: \varnothing 83 mm, $h = 32$ mm. Skjuvapparat: SGI \varnothing 50 mm, $h = 18$ mm. Portal $e_0 = 0,63$, normaltryck vid skjuvning 100 kN/m^2 .

Results from oedometer and shear tests on sand. Oedometer: \varnothing 83 mm, $h = 32$ mm. Shear apparatus: type SGI \varnothing 50 mm, $h = 18$ mm. Void ratio $e_0 = 0,63$, normal stress in shear test 100 kN/m^2 .

För friktionsjord brukar man anta $\nu = 1/3$ och då är $M = 4 G$ enligt de elasticitetsteoretiska sambanden. Detta gäller emellertid inte enligt kurvorna i fig. 3, vilka visar att relationen mellan M och G är i hög grad spänningsberoende. Om man däremot gör kompressionsförsök med samtidig mätning av horisontaltrycken, så får man resultat som stämmer bättre

med teorierna. I fig. 4 visas resultatet av kompressionsförsök med mätning av horisontaltrycket.

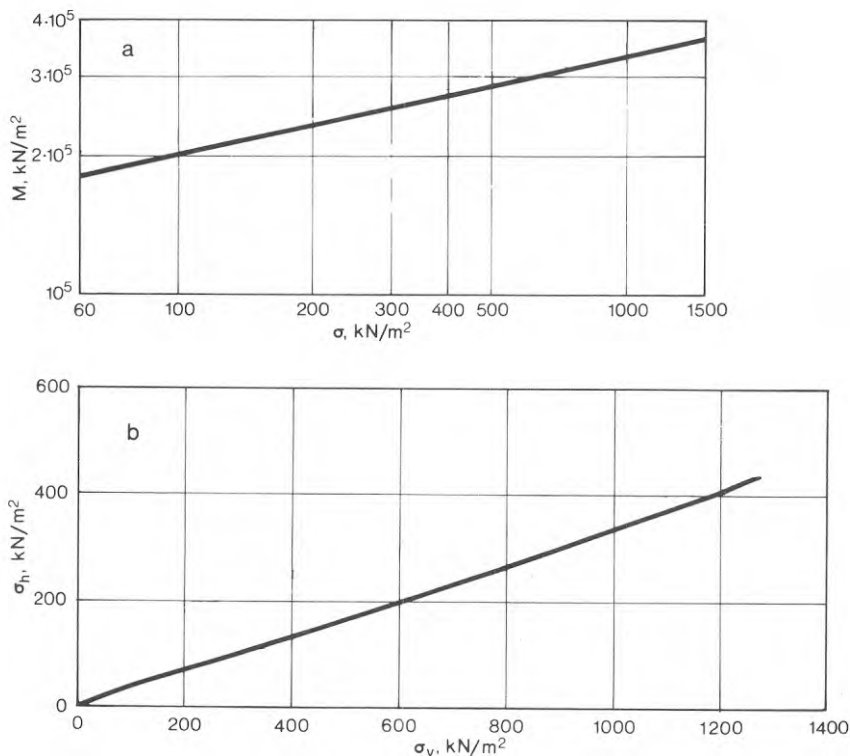


FIG. 4. Försök på singel 8–16 mm, portal $e_0 = 0,51$, i SGI:s jättekompresometer $\varnothing 50$ cm, $h = 96$ cm.

- a) Kompressionsmodulen som funktion av vertikaltrycket
 b) Horisontaltrycket som funktion av vertikaltrycket.

Compression test in the large compressometer of SGI, $\varnothing 50$ cm, $h = 96$ cm. Pebbles 8–16 mm, void ratio $e_0 = 0.51$.

- a) Modulus of compressibility in relation to vertical stress
 b) Lateral stress in relation to vertical stress.

Man ser av fig. 4 b att horisontaltrycket är en nästan linjär funktion av vertikaltrycket. Detta är vanligen fallet vid försök av denna typ, och man kan därför ur figuren beräkna $\sigma_h / \sigma_v = 0,33$.

För det försök som redovisas i fig. 4 gäller att horisontaltöjningen är försumbar vid sidan av vertikalkompressionen. Man kan då direkt enligt elasticitetsläran beräkna kontraktionstalet:

$$\nu = \frac{1}{1 + \sigma_v / \sigma_h} = \frac{1}{1 + 3} = 0,25$$

Enligt fig. 4 a är kompressionsmodulen $M = 202 \cdot 10^3 \left(\frac{\sigma}{100}\right)^{0,22}$ kN/m². Eftersom $\nu = 0,25$ fås enligt elasticitetsläran att $G = M/3$. Man kan också beräkna E och K , men måste hela tiden komma ihåg, att sambanden bara gäller vid vissa speciella lastfall. De elasticitetsteoretiska ekvationerna för beräkning av exempelvis sättningar, där E och ν ingår, kan användas i praktiken om ett rådande spänningstillstånd överlagras av en mindre tillskottsspänning. Allmänt sett gäller emellertid, att uttryck av typen $s = qD \frac{1-\nu^2}{E}$ (sättning under cirkulär ytlast) och liknande inte är användbara för jord. Detta är man väl i regel medveten om, men uttrycken används trots detta, ty uttrycken är både enkla och lätthanterliga och erfarenheten har visat, att med lämpligt val av E och ν träffar man ofta förvånande rätt. För lösning av deformationsproblem med hänsyn till modulernas spänningsberoende fordras emellertid i regel finita elementmetoder.

I samband med granskningen av modulernas spänningsberoende kan även noteras, att brottgränskurvan i $\tau - \sigma$ -diagrammet för en jord också är krökt och empiriskt tycks följa samma allmänna samband som gäller för modulerna, dvs

$$\tau = a \sigma_j \left(\frac{\sigma'_j}{\sigma_j}\right)^b$$

Endast om $b = 1$ får man det vanliga sambandet $\tau = \sigma' \tan \phi$, men detta är vanligen ej fallet - brottgränskurvan brukar vara konvex uppåt. I fig. 5 redovisas resultat av skjuvboxförsök på sand, där parametern $b = 0,9$.

En tillämpning av det allmänna sambandet mellan τ och σ blir emellertid mycket besvärlig. Om man som exempel väljer sambandet mellan σ_1 och σ_3 vid brott, så kan man inte i det allmänna fallet lösa ut förhållandet σ_1/σ_3 explicit. Vid tillämpning av det allmänna sambandet mellan τ och σ gäller

därför att man i regel måste använda finita elementmetoder för beräkningar.

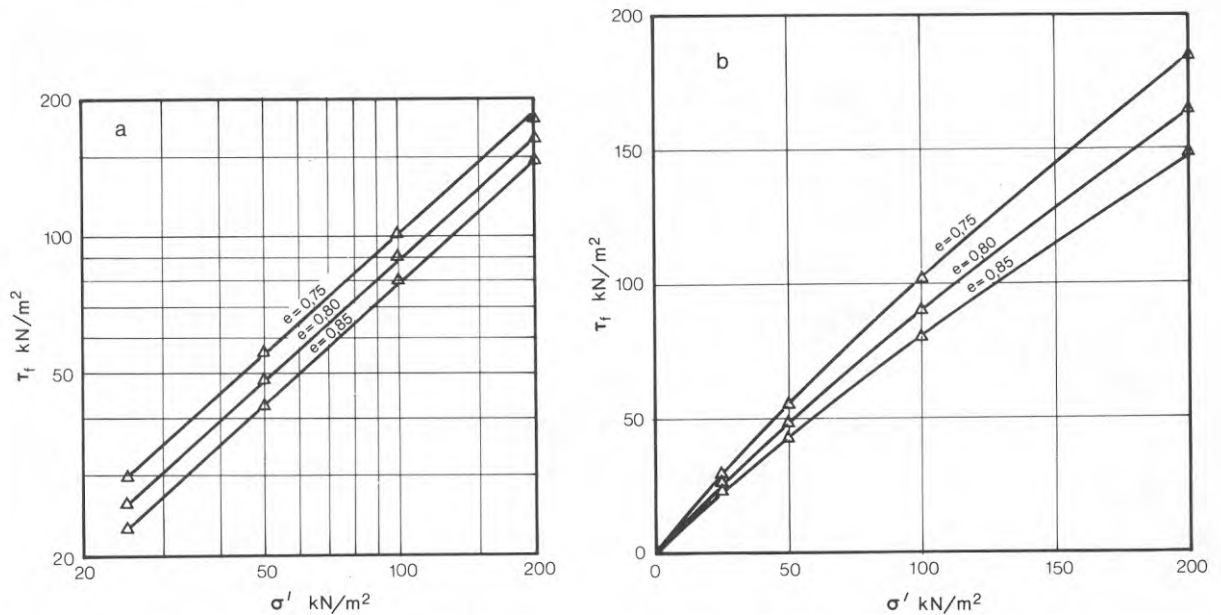


FIG. 5. Skjuvboxförsök på sand 0,5 – 1,0 mm. Casagrandes skjuvbox, provarea 36 cm².

a) Loglog-diagram

b) Linjärdiagram.

Shear box test on sand, 0.5 – 1.0 mm. Casagrande shear box, sample area 36 cm².

a) Log-log diagram

b) Lin-lin diagram.

1.1.4 Deformationer

Enligt ekvation (1:1) kan man allmänt skriva tangentmodulen = $A \sigma_j \left(\frac{\sigma}{\sigma_j}\right)^B$. Detta innebär att man direkt kan härleda ett uttryck för deformationen:

$$\text{deformationen} = \int \frac{d\sigma}{A \sigma_j \left(\frac{\sigma}{\sigma_j}\right)^B} = \frac{1}{A(1-B)} \left(\frac{\sigma}{\sigma_j}\right)^{1-B} + C \quad (1:2)$$

Ekvation (1:2) är giltig för $B \neq 1$. Om $B = 1$ fås istället

$$\text{deformationen} = \frac{1}{A} \ln \frac{\sigma}{\sigma_j} + C \quad (1:3)$$

Ekvation (1:2) ger, om integrationskonstanten $C = 0$, en rät linje i ett loglog-diagram. Ekvation (1:3) ger en rät linje i ett

linlog-diagram.

Uttrycken (1:1), (1:2) och (1:3) är formulerade helt allmänt och gäller för såväl isotrop som deviatorisk spänning. De kommer att behandlas mer ingående speciellt för ödometerfallet i avsnitt 1.2.

1.2 Formulering av kompressibiliteten

Medan vi i avsnitt 1.1 såg rent allmänt på de olika typerna av moduler och deformationer, så skall vi här specialisera oss på kompressionsmodulen och deformationerna i ödometerfallet, dvs. vad man brukar kalla kompressibiliteten.

1.2.1 Kompressionsmodul och kompression

Kompressionsmodulen $M = \frac{d\sigma'}{d\epsilon}$ skrivs

$$M = m \sigma_j \left(\frac{\sigma'}{\sigma_j} \right)^{1 - \beta} \quad (1:4)$$

där m = modultalet (kompressionsmodultalet)

β = spänningsexponenten

σ_j = jämförelsespänningen

Detta beteckningssätt har föreslagits av Hansbo (1970), som i lätt modifierad form övertagit det av Janbu (1963), vars uttryck löd

$$M = m \sigma_a \left(\frac{\sigma'}{\sigma_a} \right)^{1 - \alpha}$$

Janbu ansatte σ_a till $1 \text{ kp/cm}^2 \approx 100 \text{ kN/m}^2$

I Tyskland används vanligen uttrycket $E_s = v \sigma^w$ med v tolkat för $\sigma = 1 \text{ kp/cm}^2$.

Som tidigare nämnts innebär formuleringen av M enligt ekv. (1:4) att kompressionsmodulens spänningsberoende kan variera inom ganska vida gränser. Beroende på spänningsexponentens storlek kan M vara en med spänningen avtagande eller tilltagande funktion, fig. 6. Parametrarna m och β är konstanta endast om kurvan ej innehåller brytpunkter. Detta innebär att man får olika värden på m och β under och över förbelastningstrycket.

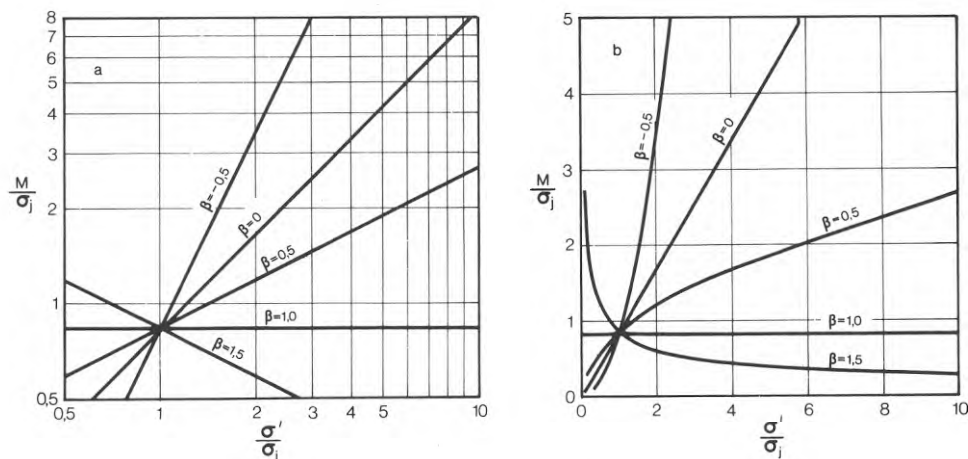


FIG. 6. Spänningsberoendet hos kompressionsmodulen $M = m \cdot \sigma_j \left(\frac{\sigma'_j}{\sigma_j}\right)^{1-\beta}$ vid olika värden på β .

a) Loglog-diagram

b) Linjärdiagram

Stress dependence of the modulus of compressibility $M = m \cdot \sigma_j \left(\frac{\sigma'_j}{\sigma_j}\right)^{1-\beta}$ for different values of β .

a) Log-log diagram

b) Lin-lin diagram

Efter integration av $d\epsilon = \frac{d\sigma}{M}$ med M enligt ekv. (1:4) fås kompressionen ϵ :

$$\beta \neq 0 \quad \epsilon = \frac{1}{m\beta} \left(\frac{\sigma'_j}{\sigma_j}\right)^\beta + C \quad (1:5)$$

$$\beta = 0 \quad \epsilon = \frac{1}{m} \ln\left(\frac{\sigma'_j}{\sigma_j}\right) + C \quad (1:6)$$

Ekvation (1:5) gäller normalt för friktionsjord, och ekv. (1:6) gäller för normalkonsoliderad lera, vars kompressionskurva vanligtvis är rät i linlogdiagrammet. Om man går från ett känt tryck σ'_0 till ett annat tryck σ' försvinner integrationskonstanten C:

$$\beta \neq 0 \quad \Delta \epsilon = \frac{1}{m\beta} \left[\left(\frac{\sigma'}{\sigma_j} \right)^\beta - \left(\frac{\sigma'_0}{\sigma_j} \right)^\beta \right] \quad (1:5 \text{ a})$$

$$\beta = 0 \quad \Delta \epsilon = \frac{1}{m} \ln \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \quad (1:6 \text{ a})$$

Ekvation (1:6 a) är bara en omformulering av metoden att beskriva en normalkonsoliderad leras kompressibilitet med hjälp av kompressionsindex ϵ_2 :

$$\epsilon = \frac{\epsilon_2}{\lg 2} \lg \frac{\sigma'}{\sigma'_0} = \frac{\epsilon_2}{\lg 2} \frac{1}{\ln 10} \ln \frac{\sigma'}{\sigma'_0}$$

$$\frac{1}{m} = 1,45 \epsilon_2$$

Ekvation (1:5) brukar man skriva utan konstanten C som förutsätts vara noll. Detta brukar gälla för förstagångsbelastad friktionsjord.

1.2.2 Tolkning av kompressionsförsök

När det gäller tolkning av kompressionsförsök har man en allmänt accepterad metod för leror: kompressionsförsöket tolkas i enkel-logaritmiskt diagram. Detta är en bra metod, och det finns ingen anledning att gå ifrån den för att man inför parametrarna m och β . För normalkonsoliderad lera, vars kompressionskurva är rät i halvlogdiagrammet, blir tolkningen enligt fig. 7.

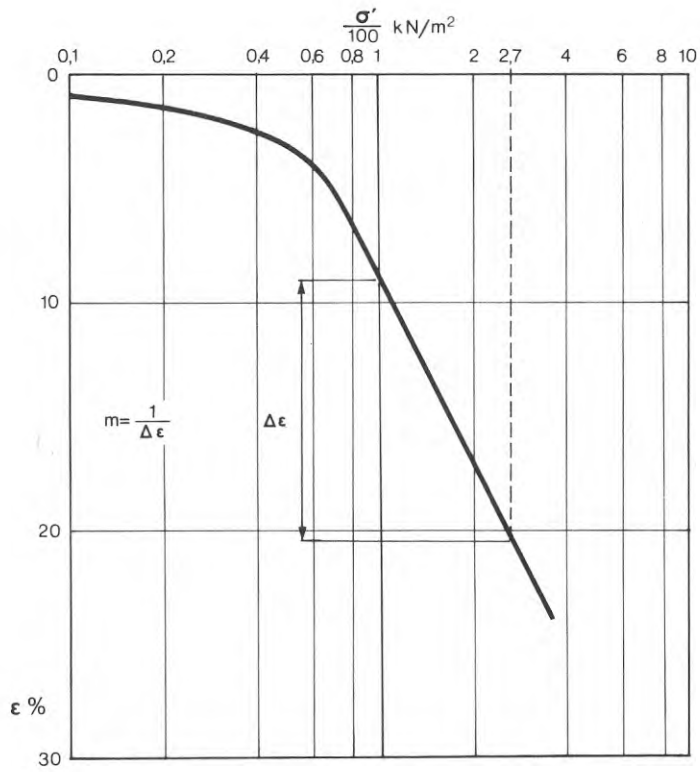


FIG. 7. Tolkning av modultalet m för normalt konsoliderad lera.
Interpretation of the modulus number m for a normally consolidated clay.

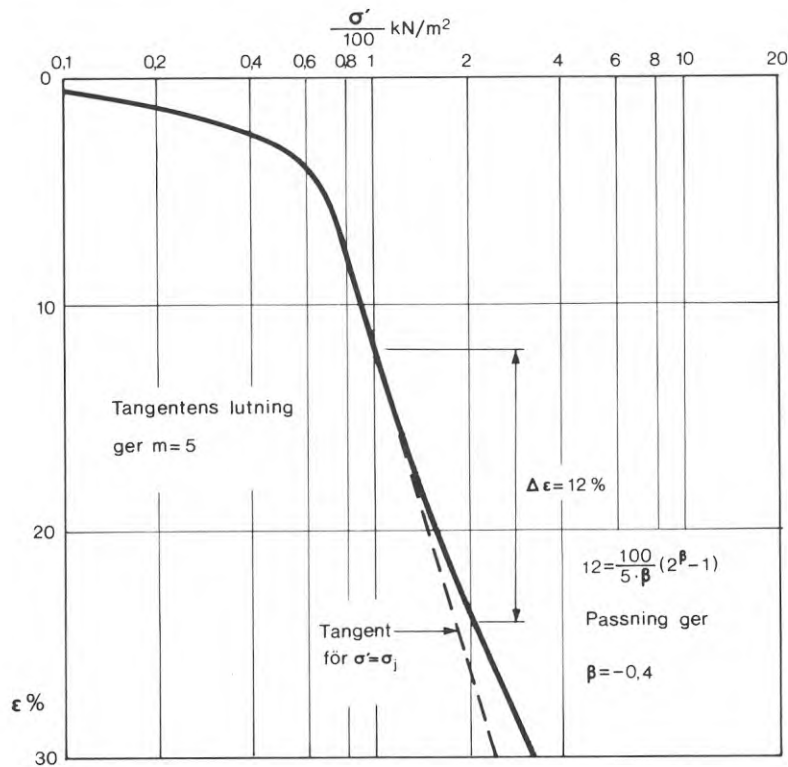


FIG. 8. Bestämning av parametrarna m och β för en kvicklera.
Interpretation of m and β for a highly sensitive clay.

Om jungfrukurvan är krökt i det enkellogaritmiska diagrammet, så är spänningsexponenten $\beta \neq 0$. Detta brukar vara fallet för kvickleror, vilka har en uppåt konkav jungfrukurva. Om man önskar ta hänsyn till kurvans krökning, så bestäms β genom en enkel passningsräkning, se fig. 8.

När det gäller friktionsjord finns det ingen vedertagen norm för tolkningen av kompressionsförsök, utan σ - ϵ -kurvan redovisas antingen i linjärt, enkellogaritmiskt eller dubbellogaritmiskt diagram. Skall man emellertid använda tangentmodulteorin och utvärdera parametrarna m och β , så syns tolkning av kompressionsförsök i dubbellogaritmiskt diagram vara lämpligast. I ett sådant diagram kan nämligen kompressionskurvan ritas som (eller överföras till) en rät linje, och den matematiska tolkningen blir enkel, jämför tolkningen av tangentmodulen, fig. 2.

Tolkningen av parametrarna m och β från ett kompressionsförsök på friktionsjord framgår av fig. 9. Där åskådliggörs också metodiken vid överföring av en till synes krökt kompressionskurva till en rät sådan. Denna justering måste i allmänhet göras, eftersom ϵ för $\sigma = 0$ ej kan bestämmas; dels måste provet belastas innan man kan läsa av ett ϵ -värde, dels är vid belastningens början provets överyta sällan så väl avjämnad att den helt ansluter till stämpeln.

Metodiken vid tolkningen av kompressionsförsök illustreras ytterligare i fig. 10, där kurvorna också redovisas i linjär skala (10 b).

Av fig. 10a framgår att inte heller de justerade värdena bildar en helt rät linje, utan vissa avvikelser förekommer. Förklaringen till detta är att en granulär massa inte uppträder som ett homogent medium. Om en labil del av kornskelettet bryts ner vid en viss spänning, så kan denna lokala kollaps påverka

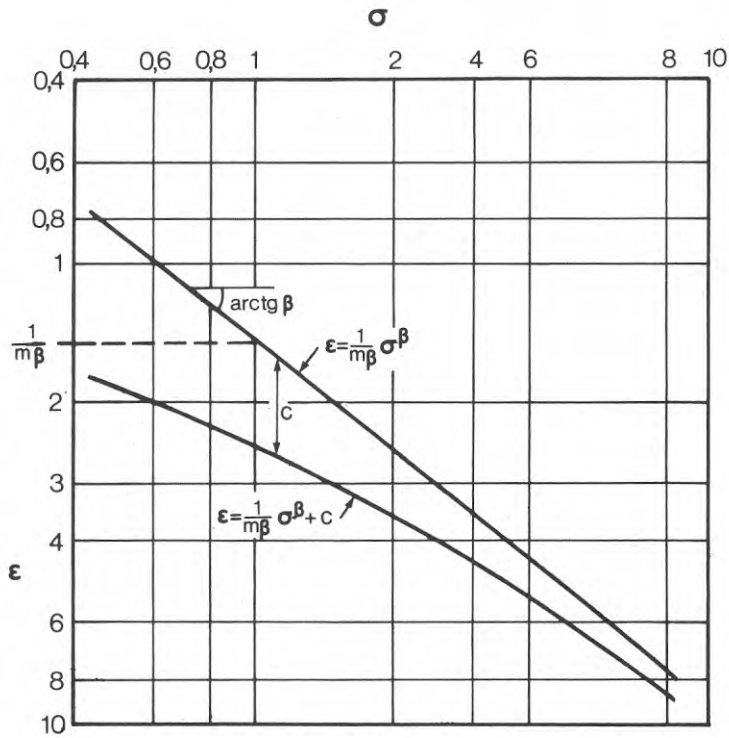


FIG. 9. Kompressionskurva i dubbellogaritmiskt koordinatsystem. Den räta linjens $\epsilon = \frac{1}{m\beta} \sigma^\beta$ läge bestäms av kompressionstalet $\frac{1}{m\beta}$ och dess lutning av exponenten β . Adderas ett konstant värde $\Delta\epsilon = C$ till värdena som bildar den räta linjen erhålls en krökt kurva $\epsilon = \frac{1}{m\beta} \sigma^\beta + C$, för vilken $\epsilon \neq 0$ när $\sigma = 0$.

Compression curve in a log-log diagram. The location of the straight line $\epsilon = \frac{1}{m\beta} \sigma^\beta$ is determined by the compression number $\frac{1}{m\beta}$ and its slope by the exponent β . If a constant value $\Delta\epsilon = C$ is added to the values which form the straight line, a curved line $\epsilon = \frac{1}{m\beta} \sigma^\beta + C$ is obtained for which $\epsilon \neq 0$ when $\sigma = 0$.

en stor del av provet eftersom en granulär massa har förutsättningar för språngvisa deformationer under jämnt ökande spänning. Därför bör man studera kompressionsförloppet i sin helhet och inte enbart studera kompressionerna under de enskilda laststegen. Detta medför att kompressionsmodulen bör utvärderas direkt ur kompressionskurvan. Gör man i stället så att man bestämmer kompressionsmodulen enligt formeln $M = \Delta\sigma/\Delta\epsilon$ med $\Delta\sigma$ och $\Delta\epsilon$ motsvarande ett laststeg, så gör man en numerisk derivering och en sådan förstorar de eventuella felen.

Vad som nu sagts om att kompressionskurvan för en friktionsjord bildar en rät linje i loglog-diagrammet är en i huvudsak empirisk iakttagelse och gäller rena friktionsjordar. Om jorden är fuktig, så uppkommer genom undertrycket i porvinkelvattnet

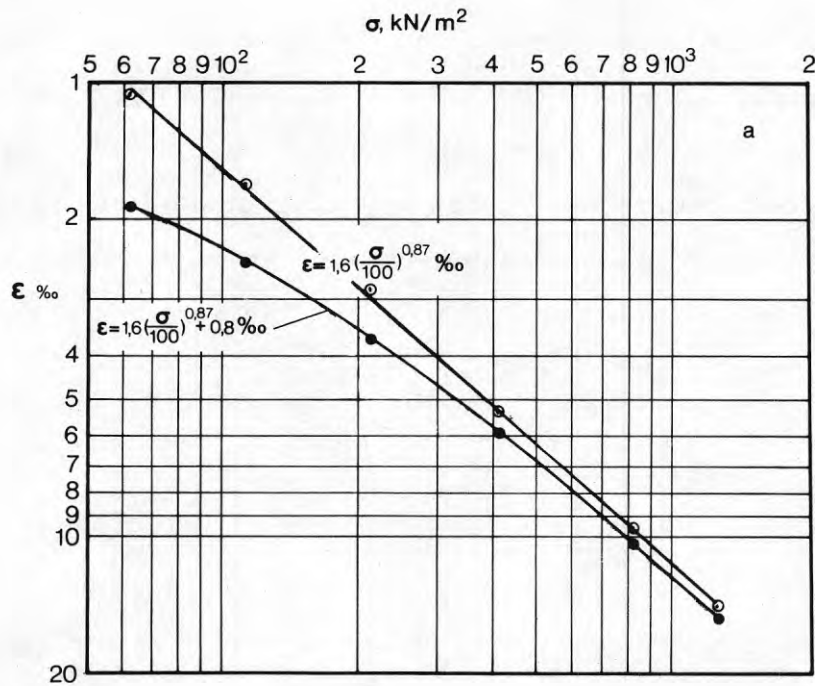


FIG. 10a. Tolkning av kompressometerförsök på singel 8–45 mm. Försöket är utfört i SGI:s jättekompressometer \varnothing 50 cm. Begynnelseportal $e_0 = 0,59$. ● direkt avlästa värden; ○ värden som flyttats 0,8 ‰/‰.

Interpretation of compressometer test on pebbles 8–45 mm. Test apparatus: The SGI large compressometer \varnothing 50 cm. Initial void ratio $e_0 = 0.59$. ● actual readings; ○ values moved 0.8 ‰/‰.

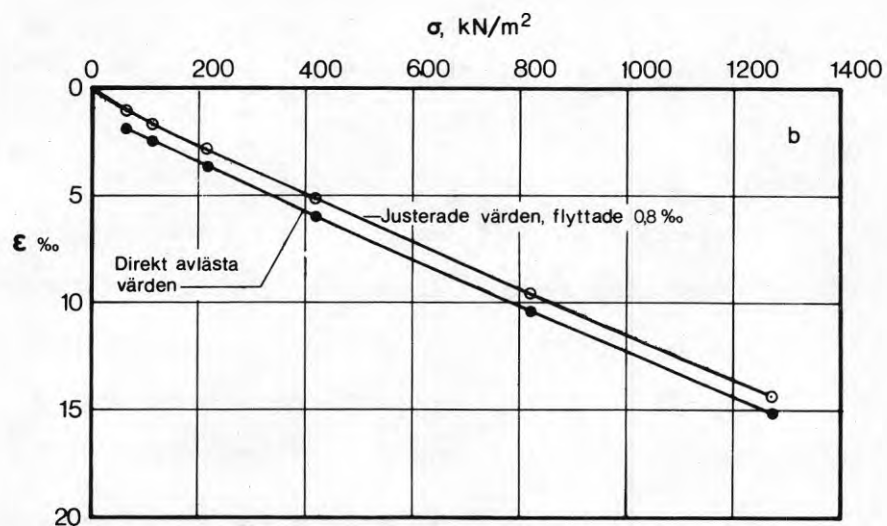


FIG. 10b. Kompressionsförsöket enligt FIG. 10a återgivet i linjär skala.

Compression test according to FIG. 10a in a linear diagram.

en falsk kohesion, och jorden fungerar då ur deformationssynpunkt inte som ett rent friktionsmaterial. Detta spelar emellertid praktiskt sett mindre roll, eftersom man är på den säkra sidan om man undersöker jorden helt vattenmättad eller helt torr. Den fungerar nämligen därvid som ett rent friktionsmaterial, och vid statisk belastning får man då större kompression än om jorden är fuktig.

1.2.3 Jämförelsespänningen σ_j

Storleken av jämförelsespänningen σ_j påverkar modultalet m , men exponenten β är oberoende av σ_j . I princip kan vilken spänning som helst väljas till σ_j , men vissa praktiska skäl talar för att σ_j bör väljas till $100 \text{ kN/m}^2 \approx 1 \text{ kp/cm}^2$. Skälen är följande:

- Modultalet m blir numeriskt av lagom storlek, från ensiffriga värden för lösa leror upp till fyrsiffriga för vissa friktionsjordar.
- Tolkningen blir enkel eftersom spänningen 100 kN/m^2 ligger inom det intervall som vanligen redovisas vid dubbellogaritmisk framställning av σ - ϵ -kurvan. Vidare har man vid denna spänning kommit över större delen av de initialimperfektioner (dålig anläggning mellan stämpel och prov, stor friktion hos apparaturen i förhållande till lasten etc) som är nästan oundvikliga vid vanliga kompressionsförsök.
- Jämförelser med i litteraturen redovisade försök underlättas, eftersom $\sigma_j = 100 \text{ kN/m}^2$ är vanligast förekommande.
- Modultalet m varierar minst med varierande kornstorlek och kornform om det tolkas för ett σ_j som ligger i närheten av den jämna 10-potensen 100 kN/m^2 .

Detta kommer senare att visas.

- Man kan förutsättningslöst söka ett värde på σ_j utifrån kriteriet att modultalet m skall variera så lite som möjligt vid olika tolkningar av ett kompressionsförsök i enlighet med vad som visas i fig. 11. Eftersom kompressionskurvan byggs upp av singulära punkter, som oftast ej kan fås att bilda en perfekt rät linje, kan kompressionskurvan tolkas som en rät linje i loglog-diagrammet på olika sätt. Man får då en skara räta linjer, vilkas skärningspunkter ligger i närheten av σ_{\max} - värdet (jfr fig. 11: $\sigma_{\max} = 1270 \text{ kN/m}^2$, skärningspunkten ligger vid $\sigma \approx 1500 \text{ kN/m}^2$). För två räta linjer i loglogdiagrammet som skär varandra vid $\sigma = \sigma_s$ och $\epsilon = \epsilon_s$ kan man skriva ekvationen på följande sätt:

$$\epsilon = \epsilon_s \left(\frac{\sigma'}{\sigma_s} \right)^\beta$$

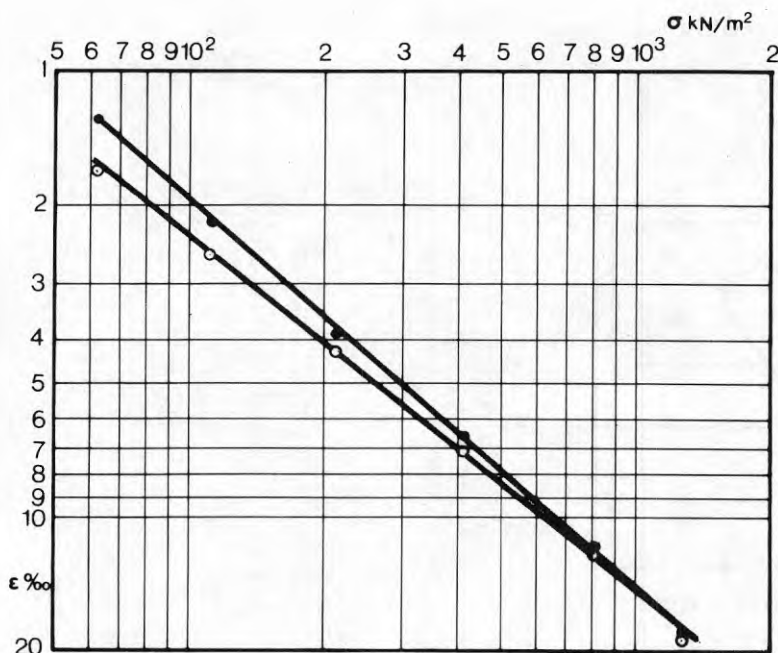


FIG. 11. Två olika tolkningar av samma försök.
Two different interpretations of the same test.

För $\sigma'_j = \sigma_j$ är $\epsilon = \frac{1}{m\beta}$. Således fås

$$\frac{1}{m\beta} = \epsilon_s \left(\frac{\sigma_j}{\sigma_s} \right)^\beta$$

Man kan nu finna det σ_j - värde för vilket m varierar minst genom att derivera m med avseende på β och sätta derivatan = 0.

$$\frac{\partial m}{\partial \beta} = \frac{\sigma_s^\beta \cdot \ln \sigma_s}{\epsilon_s \cdot \sigma_j^\beta \cdot \beta} - \frac{\sigma_s^\beta}{\epsilon_s \cdot \sigma_j^\beta \cdot \beta^2} - \frac{\sigma_s^\beta \cdot \ln \sigma_j}{\epsilon_s \cdot \sigma_j^\beta \cdot \beta} = 0$$

Härur fås

$$\sigma_j = \sigma_s \cdot e^{-\frac{1}{\beta}} \quad (1:7)$$

β varierar för friktionsjordar normalt från ca 0,2 till strax över 1,0. De allra flesta försök som kommer att redovisas här har utförts med en maximal vertikalspänning mellan 1000 och 2000 kN/m². Det är därför lämpligt att undersöka ekv. (1:7) med $\sigma_s = 1500$ kN/m² och β i intervallet 0,2 - 1,1. Sambandet mellan σ_j och β åskådliggörs i fig. 12.

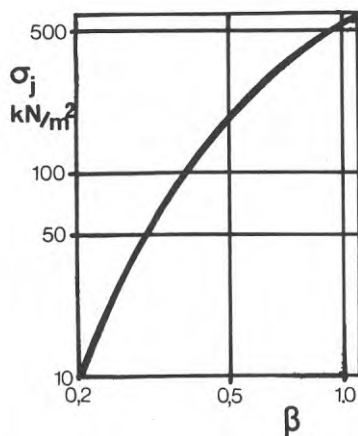


FIG. 12. Funktionen $\sigma_j = 1500 e^{-\frac{1}{\beta}}$ i intervallet $0,2 < \beta < 1,1$.

The function $\sigma_j = 1500 e^{-\frac{1}{\beta}}$ in the interval $0.2 < \beta < 1.1$.

Av fig. 12 framgår, att $\sigma_j = 100 \text{ kN/m}^2$ är den enda jämna 10-potens, som ligger inom det aktuella intervallet, och den ligger dessutom centralt inom intervallet. Det är därför lämpligt att välja $\sigma_j = 100 \text{ kN/m}^2$.

1.3 Litteraturstudium av kompressionsmodulen

Att jordens motstånd mot deformation, uttryckt exempelvis med kompressionsmodulen, varierar med spänningen är en gammal iakttagelse. Som vanligt är inom geotekniken kan man hänvisa till något tidigt yttrande av Terzaghi: "For powders both modulus of elasticity and resistance against shear increase in direct proportion with the intensity of the internal pressure" (Terzaghi 1925 b). Terzaghi publicerade samma år (Terzaghi 1925 a) en teoretisk modell för kompressibiliteten hos friktionsjord, baserad på kompressionsförsök på kvartssand:

$$e = -\alpha \ln(p + p_c) - \beta(p + p_c) + c$$

e = portalet

α, β, c, p_c = konstanter

p = spänningen i kp/cm^2

Härleder man ur detta uttryck kompressionsmodulen $M = \frac{dp}{de}$

fås

$$M = \frac{(1 + e_0)(p + p_c)}{\alpha + \beta(p + p_c)}$$

Terzaghi fann för kvarssanden $\alpha = 0,0457$, $\beta = 0,00165$ och $p = 0,65$ till $70,5 \text{ kp/cm}^2$ (beroende av lagringstätheten).

Uttrycket för M är visserligen i princip riktigt, såtillvida att M ökar med p och $\frac{dM}{dp}$ är avtagande, men i övrigt stämmer det dåligt överens med vad som redovisats i avsnitt 1.2.1.

Man måste emellertid hålla i minnet att Terzaghi grundade sin

formel på ett litet antal försök på en sandsort.

Vid senare undersökningar har man väl inte alltid insett betydelsen av modulernas spänningsberoende, men i stort sett kan man säga att förhållandet beaktats när det gällt sättning i lera på så sätt att man har tagit hänsyn till att kompressionsmodulen ökar med spänningen genom att använda ett ϵ_2 - eller C_c - värde för beskrivning av kompressionskurvan. Vid sättningsberäkning i friktionsjord däremot är antagandet om en konstant kompressionsmodul vanligt. Tangentmodul teorin så som den presenteras i avsnitt 1.2 har ännu inte vunnit allmän spridning, trots att huvuddragen presenterades av Ohde redan 1939. Ohde använde beteckningen Verdichtungszahl V i stället för kompressionsmodul M och hans formulering löd

$$V = v p^\omega$$

1951 lämnade Ohde en fylligare redogörelse för tangentmodulen, som han då tecknade

$$V = v \left(\frac{p}{p_{1,0}} \right)^\omega$$

med $p_{1,0} = 1 \text{ kp/cm}^2$ (100 kN/m^2). Ohdes "Verdichtungsbeivert" v är alltså detsamma som vårt m , och $\omega = 1 - \beta$. Enligt Ohde (1951) har m och β vid första pålastning och vid avlastning på sand värden enligt tabell 1.1.

Ohde gav också värden på m och β för silt och leror. För silt (Schluff) angav han m till 25 à 60 och β till 0,05 à 0,15, och för leror $m = 5$ till 20 och $\beta = 0$.

Beträffande d_w (verksamma korndiametern), se avsnitt 3.2.3.

Tabell 1.1.. Värden på m och β enligt Ohde (1951).

Sand	$\frac{d_{50}}{d_{10}}$	Kornstorlek d_w	Portal e	Pålastning		Avlastning	
				m	β	m	β
rundkornig,	1,35	0,20	0,64	300	0,30	900	0,30
medelfast	1,90	0,50	0,60	750	0,45	1100	0,45
medelkantig,	1,45	0,20	0,84	200	0,30	800	0,30
medelfast	1,90	0,50	0,68	300	0,45	1000	0,45
grusig	1,90	0,20	0,56	150	0,30	800	0,30
	5,00	0,65	0,46	300	0,45	1000	0,45
finsand	1,45	0,10	0,77	150	0,30	650	0,35
	1,85	0,20	0,72	250	0,40	700	0,40
finsand	2,5	0,10	0,69	100	0,20	750	0,40
	3,5	0,20	0,56	200	0,30	800	0,40

Ett flertal forskare har senare använt samma modell som Ohde för att beskriva kompressionsmodulen. Det huvudsakliga utvecklingsarbetet har utförts efter 1960.

Moussa (1961) utförde en omfattande undersökning av kompressibiliteten hos sand. I hans rapport finns också en sammanfattning av utvecklingen fram till 1960. Moussa fann som resultat av 218 ödometerförsök på sand med 25 olika kornfördelningskurvor att vid förstagångsbelastning beror modultalet m och spänningsexponenten β av begynnelseportalet e_o :

$$m = \frac{k_1 e_o^{-4}}{k_2 - \lg e_o} \quad (1:8)$$

$$\beta = k_2 - \lg e_o \quad (1:9)$$

k_1 och k_2 är materialkonstanter, beroende av portalen vid fastaste och lösaste lagring. Notabelt är att exponenten -4 i

formel (1:8) utgör ett medelvärde av samtliga försök, och att den i de olika försöken varierar mellan -2,97 och -4,73. Vidare borde termen $\lg e_0$ i nämnaren egentligen vara försedd med en koefficient som varierar mellan 0,32 och 1,43 (med medelvärdet 1).

Moussa fann att k_1 och k_2 beror av portalet e_{\max} och differensen $e_{\max} - e_{\min}$ på följande sätt:

$e_{\max} - e_{\min}$	0,262 - 0,366	0,366 - 0,420	0,420 - 0,766
$k_1 \dots$	$137 e_{\max}^{6,46}$	$78 e_{\max}^{6,27}$	$43 e_{\max}^{8,93}$
$k_2 \dots$	$\lg 2,49 e_{\max}^{1,40}$	$\lg 2,43 e_{\max}^{1,22}$	$\lg 2,00 e_{\max}^{2,29}$

Väsentligt är att Moussa fann att β -värdet minskar när begynnelseportalet ökar, dvs kompressionskurvorna i den dubbellogaritmiska framställningen konvergerar. En extrapolering utanför det undersökta intervallet (0-1000 kN/m²) är därför inte lämplig, eftersom man då kan råka ut för den fataliteten att få större kompression vid fast än vid lös lagring.

Chaplin (1961 c) invände mot Schultze och Moussa (1961) beträffande β -värdet och menade att vid lös lagring får man vid det vanliga ödometerförsöket så stor inverkan av väggfriktionen att β -värdet blir för litet. Själv fann Chaplin (1961 a och b) såväl teoretiskt som empiriskt att $\beta = 0,5$ för sand. För studium av kompressibiliteten rekommenderade Chaplin K_0 -försök (ingen horisontalrörelse) i triaxialapparat framför det normala ödometerförsöket.

Janbu (1963) redovisade klart och överskådligt "tangentmodulmetoden" (dvs metoden att analysera kompressionsförlopp med hjälp av kompressionsmodulen $M = m \sigma_j \left(\frac{\sigma'_j}{\sigma_j} \right)^{1-\beta}$).

Janbu utförde försök såväl i ödometer som triaxialapparat och lämnade en översiktlig redovisning av m - och β - värdenas variation enligt fig. 13.

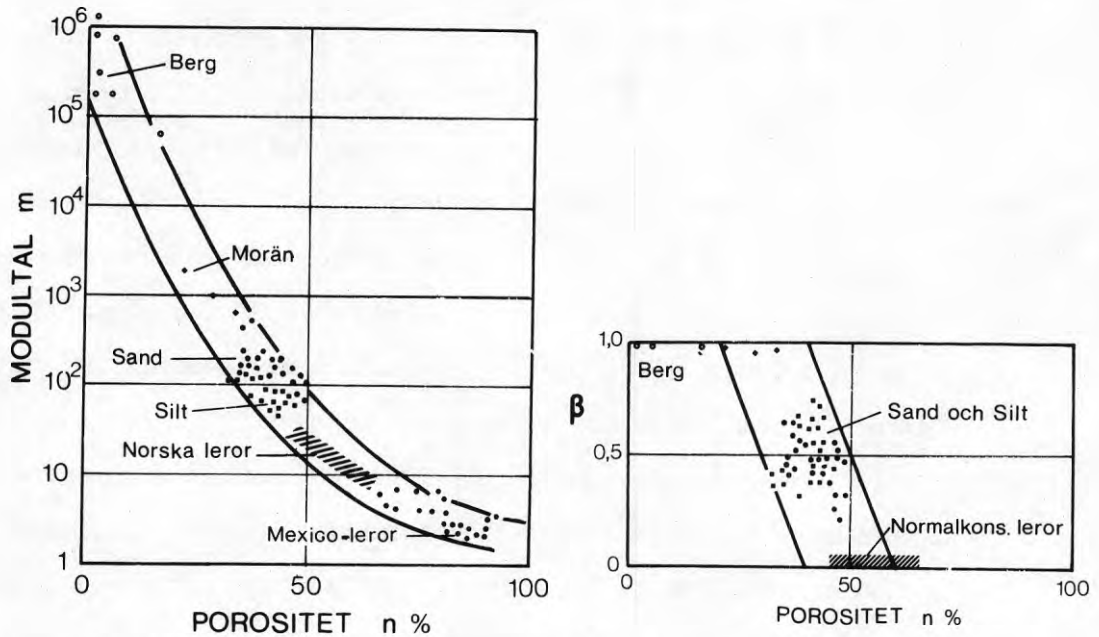


FIG. 13. Modultalet m och spänningsexponenten β enligt Janbu (1963).

Modulus number m and stress exponent β according to Janbu (1963).

Janbu har senare i flera skrifter (Janbu 1965, Janbu & Hjeldnes 1965, Janbu 1970) propagerat för och klargjort tangentmodulmetoden, och detta har han gjort på ett så lättillgängligt sätt att metoden nu i Sverige ofta kallas "Janbus metod".

Brinch Hansen (1966) gjorde ansatsen att kompressionen

$$\epsilon = b \cdot e_o^r \left(\frac{\sigma'}{\sigma_j} \right)^\beta \quad (1:10)$$

där e_o = begynnelseportalet

b , r och β antages vara materialkonstanter

Enligt Brinch Hansen är alltså exponenten β konstant för ett

och samma material, medan modultalet $m = \frac{1}{\beta b e_o^r}$ varierar med portalet.

Schmidt (1967) undersökte sand i DGI-ödometern med provdiameteren 6 cm och höjden 2 cm. Han utvärderade försöken enligt Brinch Hansens modell och granskade i samband därmed ansatsen att β är en materialkonstant. Schmidt fann att man genom att korrigera kompressionskurvorna med en lämplig konstant $\Delta \epsilon$ (jämför avsnitt 1.2.2, fig. 9 och 10) i de flesta fall kunde få β som en materialkonstant utan att för den skull göra våld på försöksresultaten. Vid en granskning av Moussas (1961) försök konstaterade Schmidt att denne ej justerat sina försöksvärden med hänsyn till initialspänningen. Om man gör detta, så blir för många sandsorter exponenten β konstant också för Moussas försök. Schmidt fann som resultat av sina försök på sand att β synes bero av korndiameteren d_{50} , fig. 14.

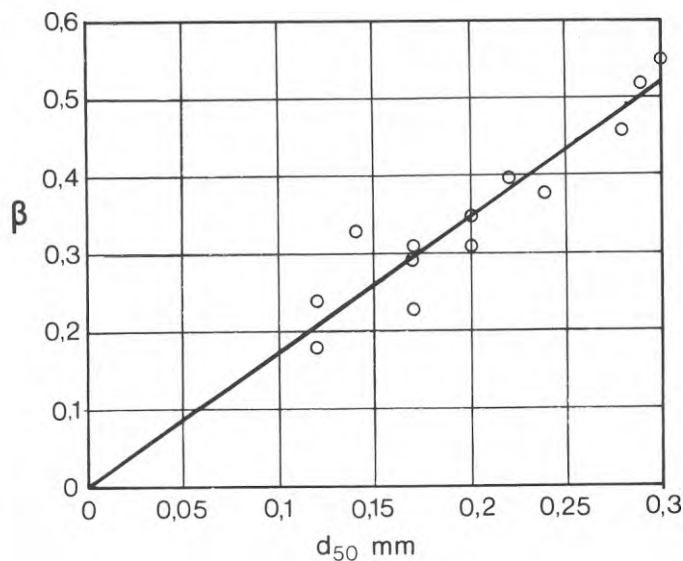


FIG. 14. Relation mellan spänningsexponenten β och korndiameteren d_{50} enligt Schmidt (1967).

Relation between the stress exponent β and the grain diameter d_{50} according to Schmidt (1967).

Som framgår av fig. 14 har Schmidt funnit ett påtagligt samband mellan β och d_{50} . Han konstaterade emellertid att Kotzias (1963) för silt med $d_{50} = 0.03$ funnit att β har medelvärdet 0,38. Detta förrycker onekligen Schmidts samband en smula.

För portalsexponenten r (se formel 1:10) fann Schmidt värden mellan 1,7 och 2,6. Detta kan jämföras med Moussas värden 3 till 4,7.

Jänke (1968) genomförde en systematisk undersökning på sand och grus för att bestämma inverkan av kornform, gradering, kornstorlek och portal. Försöksmaterialet utgjordes av krossad kvarts, naturligt rundat material samt en blandning av dessa material. Försöken gjordes i ödometer med diameter - höjdförhållande 1,8. Totalt gjordes 314 kompressionsförsök.

För att beskriva kornformen och kornens ytstruktur använde Jänke ett "råhetstal" r (se avsnitt 3.2.4) som var 1,0 för skarpkantiga korn med skrovlig yta och 0 för runda korn med glatt yta. Som mått på graderingen använde han graderingskoefficienten $C_u = d_{60}/d_{10}$ och som mått på kornstorleken den "verksamma kornstorleken" d_w , bestämd ur sambandet $\lg(d_{50}/d_w) = 0,701 \lg^2(d_{90}/d_{50})$ (se närmare härom i avsnitt 3.2.3).

Tyvärr gjorde inte Jänke någon statistisk bearbetning av sitt material, och inte heller visade han med något exempel hur han bestämde m och β . Detta är beklagligt, ty hans metod för bestämning av m och β förefaller inte helt tillfredsställande. Han angav att han bestämde β enligt formeln

$$1 - \beta = \frac{1 - \lg Q_1}{\lg 10}$$

där
$$Q_1 = \frac{\ln h_2}{\ln h_3} : \frac{\ln h_1}{\ln h_2}$$

med
$$h_1 = \text{provhöjd vid } \sigma_1 = 10 \text{ kN/m}^2$$

$$h_2 = \text{provhöjd vid } \sigma_2 = 100 \text{ kN/m}^2$$

$$h_3 = \text{provhöjd vid } \sigma_3 = 1000 \text{ kN/m}^2$$

Detta är uppenbarligen ett tryckfel. Sannolikt menade han

$$Q_1 = \ln \frac{h_2}{h_3} : \ln \frac{h_1}{h_2}$$

I så fall är bestämningsmetoden korrekt endast om värdena ϵ_1 , ϵ_2 och ϵ_3 (motsvarande h_1 , h_2 och h_3) stämmer perfekt med ekvationen $\epsilon = \frac{1}{m\beta} \left(\frac{\sigma'}{\sigma_j} \right)^\beta$. Någon korrektion för att uppnå detta gjorde uppenbarligen inte Jänke, och felet vid bestämningen av β kan därför bli ganska stort.

Modultalet m bestämmer han enligt formeln

$$m = \frac{\sigma_3^\beta - \sigma_1^\beta}{\beta \ln \frac{h_1}{h_3}}$$

Inte heller detta är tillfredsställande. Kompressionen vid det låga trycket 10 kN/m^2 är så påverkad av initialimperfectioner att den i regel inte är direkt användbar vid utvärdering av m . Vidare använde han vid bestämningen av m ett sannolikt felaktigt värde på β .

De samband Jänke fann kan emellertid ändå vara av intresse:

m ökar när graderingskoefficienten C_u minskar vid samma I_D , d_w och r

- m ökar när kornstorleken d_w ökar upp till $d_w = 0,45$ mm, varefter m avtar med ökande d_w
- m ökar när r (råhetsgraden) minskar utom vid fast lagring i närheten av $r = 1,0$; då är förhållandet omvänt
- β ökar med ökande lagringstäthet
- β ökar med ökande råhetstal
- β ökar med ökande d_w upp till $d_w \approx 0,35$ mm och är däröver ungefär konstant
- β minskar med ökande C_u vid lika d_w .

Fumagalli (1969) redovisade försök i ringkompressometer med höjden 20 och diametern 10 cm (Fumagalli omnämnde också och visade en bild på en ringkompressometer med diametern 1,3 m, höjden 2,6 m och maxlasten 20 MN - världens största?) Försöksmaterialet utgjordes av krossad och siktad kalksten, använd obehandlad respektive behandlad i roterande trumma för erhållande av ett mera rundat material. Kornformen beskrev Fumagalli med en formfaktor C_f (se avsnitt 3.2.4), som utgör ett mått på hur nära partiklarna ansluter till en sfär (sfäriska korn $C_f = 1,0$, flata partiklar $C_f \rightarrow 0$).

Fumagalli fann, att vid samma packningsgrad blev kompressionsmodulen högre ju högre C_f -värdet var - ett resultat som ej är förvånansvärt. Förvånansvärt är däremot att han i loglogdiagrammet fick kompressionskurvor i form av räta linjer ända upp till den höga lasten 6000 kN/m^2 - se fig. 15, där en del av hans resultat visas. Tyvärr visade Fumagalli endast kurvorna och ej de enskilda punkterna, så man kan ej avgöra hur stora avvikelserna var. Notabelt i sammanhanget är även att

försöksmaterialet var mycket välgraderat, $C_u = 34$, vilket medför att krossningseffekterna ej blir så påtagliga.

Exponenten β är densamma i de tre försök som återges här (fig. 15). Detta var emellertid ej fallet vid samtliga försök - β varierade mellan 0,63 och 0,47. Fumagalli konstaterade att när portalet ökar så minskar β "according to relationships not yet well established by testing".

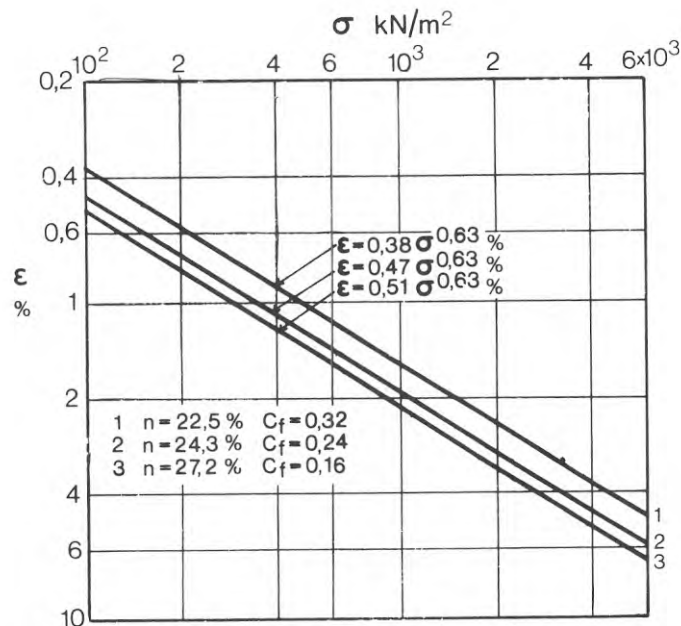


FIG. 15. Kompressionsförsök på krossad kalksten enligt Fumagalli (1969). De tre försöken skiljer sig åt beträffande kornform och porositet, medan packningsgraden var densamma (tät lagring).

Compression tests on crushed lime-stone according to Fumagalli (1969). In the three tests the particle shape and porosity varied but the relative density was the same (dense state).

Tammirinne (1969) genomförde en brett upplagd försöksserie på sand. Försöken gjordes i en ödometer av samma dimensioner som den Moussa (1961) använde ($D = 113$ mm, $h = 45$ mm). Tammirinne jämförde också hela tiden sina resultat med Moussas. Totalt redovisade han 108 ödometerförsök på 23 olika sandsorter.

Tammirinne belastade sanden stegvis upp till 1000 kN/m^2 och tolkade försöken i loglogdiagram. Vid tolkningen rättade han sig i stort sett efter kompressionsvärdena vid och över 100 kN/m^2 , fig. 16, eftersom han fann att kompressionskurvan i allmänhet uppvisade ett stabilt rätlinjigt förlopp först vid omkring 100 kN/m^2 .

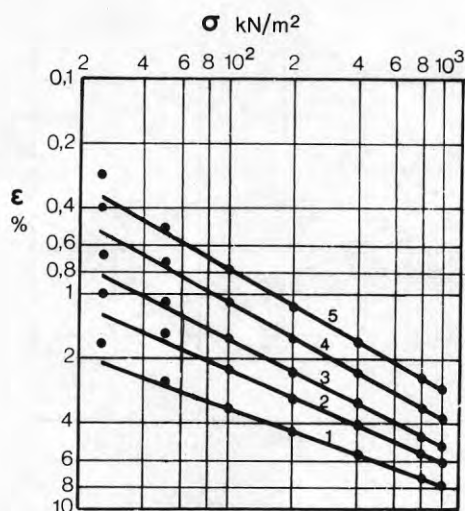


FIG. 16. Kompressionsförsök utförda av Tammirinne (1969). $d_{50} = 1,6 \text{ mm}$, $C_u = 22,2$.
Compression tests made by Tammirinne (1969). $d_{50} = 1.6 \text{ mm}$, $C_u = 22.2$.

Tammirinne fann att modultalet m bäst kan beskrivas med hjälp av begynnelseportalet e_o och portalet vid fastaste lagring e_{\min} . Han bestämde sambandet till

$$\lg m = 2,675 + 2,564 \lg e_{\min} - 3,313 \lg e_o \pm 0,159$$

Han försökte också använda e_{\max} (portalet vid lösaste lagring) som materialkonstant i stället för e_{\min} , men fann e_{\min} vara bäst. Vidare undersökte han möjligheten att ställa m i relation till lagringstätheten I_D , men bedömde att m bättre kan beskrivas med hjälp av e_o .

Beträffande spänningsexponenten β fanns Tammirinne att den varierar mellan 0,25 och 0,63 med medelvärdet 0,57. Han

försökte ställa β i relation till såväl e_0 , I_D som m , men fann i samtliga fall att spridningen blev mycket stor. Tendensen är emellertid densamma som för Moussa (1961), nämligen att β minskar när portalet ökar. Relationen mellan β och e_0 visas i fig. 17.

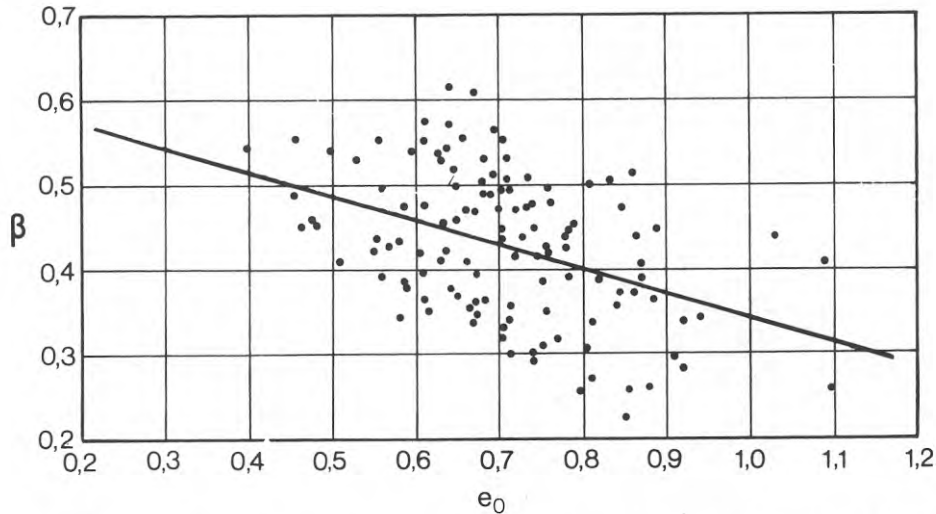


FIG. 17. Relation mellan spänningsexponenten β och begynnelseportalet e_0 för 22 olika jordar undersökta av Tammirinne (1969).

Relation between stress exponent β and initial void ratio e_0 for 22 different soils tested by Tammirinne (1969).

Tammirinne konstaterade vidare, att försöksserien inte klart visade vilka faktorer som bestämmer β , och att variationen för en och samma jord var så liten, att man för praktiskt bruk kan ansätta β som materialkonstant.

1.3.1 Sammanfattning

Som sammanfattning av denna litteratursökning kan man säga att det står fullkomligt klart att modultalet m i hög grad beror av jordens lagringstäthet. Som regel har man undvikit att använda lagringstätheten I_D som mått på lagringen, eftersom det då varit svårt att finna ut vilka egenskaper hos jorden som utöver I_D bestämmer modultalet, och i stället valt begynnelseportalet e_0 . Därvid har portalen e_{\max} och e_{\min} visat sig användbara för att beskriva jordens egenskaper. Med hjälp av e_0 , e_{\max}

och e_{\min} visat sig användbara för att beskriva jordens egenskaper. Med hjälp av e_o , e_{\max} och/eller e_{\min} har modultalet kunnat beskrivas tämligen väl för sand, även om olika forskare ej kommit till samma resultat. Modultalet synes vara proportionellt mot e_o upphöjt till en exponent som varierar mellan ca -2 och -5.

Spänningsexponenten β har varit svårare att få grepp om, och oenighet råder om β skall betraktas som en materialkonstant eller ej. För praktiskt bruk synes man emellertid kunna ansätta β som en materialkonstant. Sannolikt är β beroende av kornstorleken på så sätt att β ökar då kornstorleken ökar.

De tidiga undersökningar, som redovisades av Ohde (1951), har visat sig väl hålla måttet vid jämförelser med senare utförda undersökningar.

2 KOMPRESSIBILITET HOS GROVA FRIKTIONSJORDAR

2.1 Introduktion

Medan kompressionsegenskaperna för sand och finare fraktioner studerats ganska ingående har liknande studier i ganska ringa grad ägnats de grövre fraktionerna, beroende på att provningsanordningarna måste vara så stora. För att erhålla bättre kännedom om material av "makadamfraktion" genomfördes 1965-66 en undersökning vid Statens Geotekniska Institut av kompressionsegenskaperna hos några olika singel- och makadamsorter. Avsikten var främst att undersöka den inverkan som packningsgrad, kornform, kornstorlek etc. har på kompressionsegenskaperna. Försöken har tidigare endast redovisats i en intern rapport. I denna avhandling hänvisas på flera ställen till försöken, och det är därför lämpligt att ta med en relativt fullständig beskrivning av dem.

2.2 Beskrivning av försöksutrustningen

Försöken genomfördes i SGI:s "jättekompessometer". Denna konstruerades i slutet av 40-talet av Kjellman, Jacobson m. fl. och finns tidigare beskriven i litteraturen (Kjellman & Jacobson, 1955). En kortfattad beskrivning skall dock lämnas här.

Det cylindriska provet (se fig. 18) har diametern 50 cm och maximala höjden 100 cm. Väggarna utgörs av stålringar med höjden 4,9 cm och tjockleken 0,7 cm. Vid början av ett försök är ringarna åtskilda från varandra av mellanlägg med tjockleken 3 mm. När mellanläggen tagits bort kan provet komprimeras vertikalt utan inverkan av väggfriktion, och den verkliga vertikallasten är känd på varje nivå i provet.

Tre av ringarna (normalt används totalt 18 ringar) är mätringar för mätning av horisontaltryck. Mätningen utförs med hjälp av trådtöjningsgivare.

För mätning av den vertikala kompressionen används fyra mätklockor, symmetriskt placerade runt provet. Klockorna mäter mellan näst översta och näst understa ringen, varigenom man undviker att få med inverkan av dålig anliggning och stenkrossning vid stämpel och bottenplatta. Medelvärdet av de fyra avläsningarna används vid utvärdering av kompressionen.

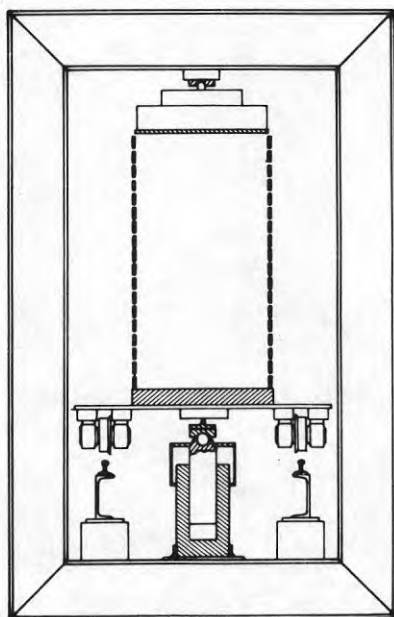


FIG. 18. SGI:s jättekompresometer, genomskärning.

The SGI large compressometer, cross section.

Belastningen påförs med en hydraulisk domkraft med ringa inre friktion - inga packningar, tätningen åstadkoms genom noggrann passning mellan kolv och cylinder. Domkraften

används även vid bestämning av den pålagda lasten och vid vägning av provet. Oljetrycket mäts med en s k pendelmanometer som medger mycket noggrann mätning av oljetrycket. En anmärkning mot systemet är att inre friktion kan uppstå i domkraften. De kontroller som gjordes visade dock att effekten härav på kompressionskurvorna torde vara försumbar. Vid vägning av provet kan dock vissa felaktigheter ha uppstått. En viss reservation får därför göras för densitetsbestämningarna.

2.3 Försökens utförande

Försöken utfördes på fyra skilda typer av grovt stenmaterial:

1. Singel av olika fraktioner
 - a) Singel 8 - 16 mm
 - b) Singel 16 - 38 mm
 - c) Singel 32 - 45 mm
 - d) Singel 8 - 45 mm
2. Makadam av granit från Stockholm, i fortsättningen kallad "Stockholms-granit".
3. Makadam av kvartsitisk sandsten från Hardeberga i Skåne, i fortsättningen kallad "Hardeberga-kvarsit".
4. Makadam av gnejs från Karlskrona, i fortsättningen kallad "Karlskrona-gnejs".

Vart och ett av dessa material belastades i kompressometern med en "normalserie", som omfattade stegvis pålastning med laststegen ca 50, 100, 200, 400, 800 och 1250 kN/m², och därefter avlastning med samma laststeg. Vid varje laststeg mättes vertikalkompression och horisontaltryck. För de tre första singelfraktionerna användes tre olika packningsgrader, nämligen lös, medelfast och fast lagring, medan de övriga sorterna

komprimerades vid endast två lagringstätheter, medelfast och fast, detta p g a att kompressionen vid lös lagring visade tendenser till att bli större än försöksapparaturen medgav.

Till varje nytt försök användes obegagnad sten, detta för att inverkan av krossning ej skulle påverka en jämförelse mellan två prov på samma stensort.

För fyllning av kompressometern användes en handmanövrerad, 20-liters skopa, hängande i en enkel traversanordning.

Packningsmetoder

Lös lagring. Ringarna placerades successivt på plats vartefter som fyllningen skedde: cirka tre ringar placerades i läge, varefter skopan hölls precis över det redan ifyllda materialet och tömdes försiktigt under samtidig långsam höjning.

Medelfast lagring. Fyllning skedde genom störtning från toppen med samtliga kompressometerringar på plats. För var 10:e cm packades provet genom att en stamp med massan 7 kg och arean 60 cm^2 fick falla fritt 15 cm 30 gånger, jämnt fördelat över provets yta.

Fast lagring. Fyllning skedde från toppen med samtliga ringar på plats. För var 10:e cm packades provet genom vibrering i 3 min med en plattvibrator, massa 16 kg. Efter fyllningen avjämnades provets överyta noggrant, varefter provet vägdes på domkraften, fig. 19. Därefter placerades överstämpeln och de fyra mätklockorna på plats. Gejdrarna, som hållit ringarna i läge under inpackningen, togs bort. Mätklockorna nollavlästes och pendelmanometern nollställdes för provets bruttolast, varefter pålastningen kunde börja, fig. 20.

Som första belastning pålades ungefär 25 kN/m^2 som yttre last, varefter mellanläggsbrickorna mellan kompressometer-ringarna försiktigt togs bort. Kompressometerens ringar hängde kvar genom friktion mot stenmaterialet. Därefter pålades yttre lasten 10 kN (motsvarar ca 50 kN/m^2), och mät-klockorna avlästes med jämna mellanrum tills stillestånd uppnåts. Stillestånd antogs råda när kompressionen blivit mindre än 0.01 mm på 10 minuter.

När stillestånd uppnåts avlästes de tre mätringarna, varvid minst två avläsningar gjordes på varje ring.

Avläsningarna efter varje laststeg gjordes sedan på samma sätt.

Vid de lägre belastningarna uppnåddes stillestånd ganska snabbt (minuter), medan det vid de högre belastningarna (160 och 250 kN) kunde dröja 3-4 timmar innan stillestånd uppnåts. Vid avlastning uppnåddes stillestånd så gott som omedelbart.

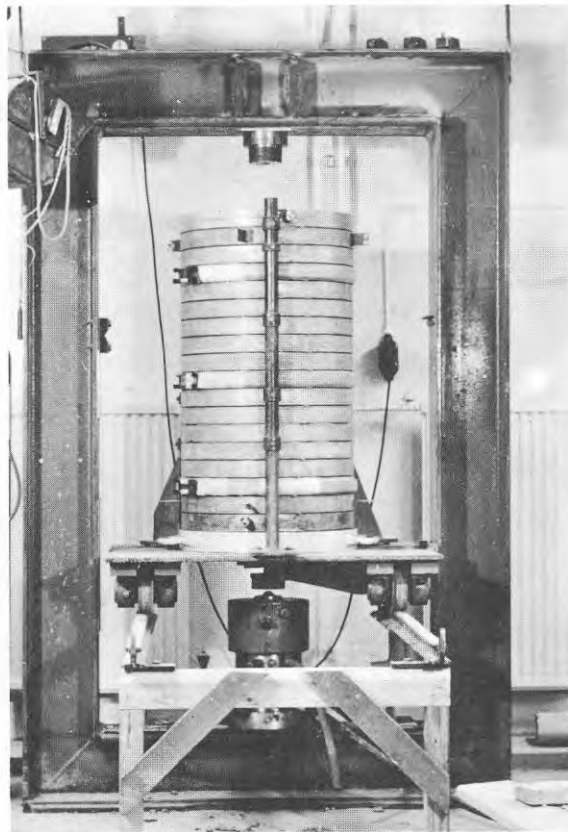


FIG. 19. Provet iordningställt för vägning.
The sample prepared for weighing.

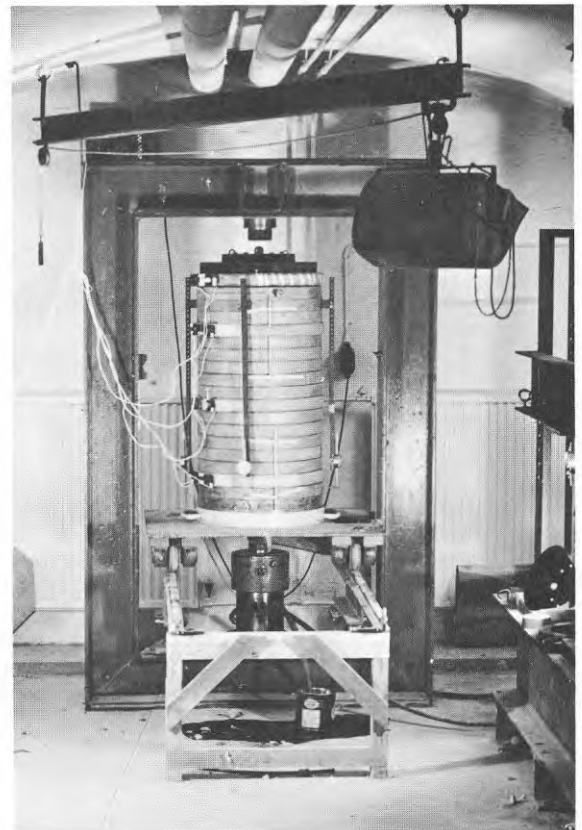


FIG. 20. Klart för belastning.
The sample prepared for loading.

2.4 Stenmaterialets egenskaper

Allmän beskrivning av stenmaterialet

Singel: I huvudsak ett naturligt rundat material, men ca 60% hade en eller flera krossytor (icke rundade ytor).

Från Stockholm.

Stockholmsgranit: En ren krossprodukt med skarpa kanter.

Hardebergakvartsit: En ren krossprodukt, tämligen rundade kanter.

Karlskronagnejs: Sprängsten med viss halt av finmaterial (ca 1%). Vid försöken användes dels tvättat, dels otvättat material. Någon skillnad noterades ej.

Petrografisk benämning

Singel: Grå och röda graniter samt grönstensmaterial till ca 85%. Återstående 15% porfyr, urkalksten, kvarts etc.

Stockholmsgranit: Grå, medelkornig stockholmsgranit.

Hardebergakvartsit: Kvartsitisk sandsten (kambrium).

Karlskronagnejs: Grå intermediär gnejs, svagt ögonstrukturerad, ställvis kaolinvittrad.

Kornstorleksfördelning

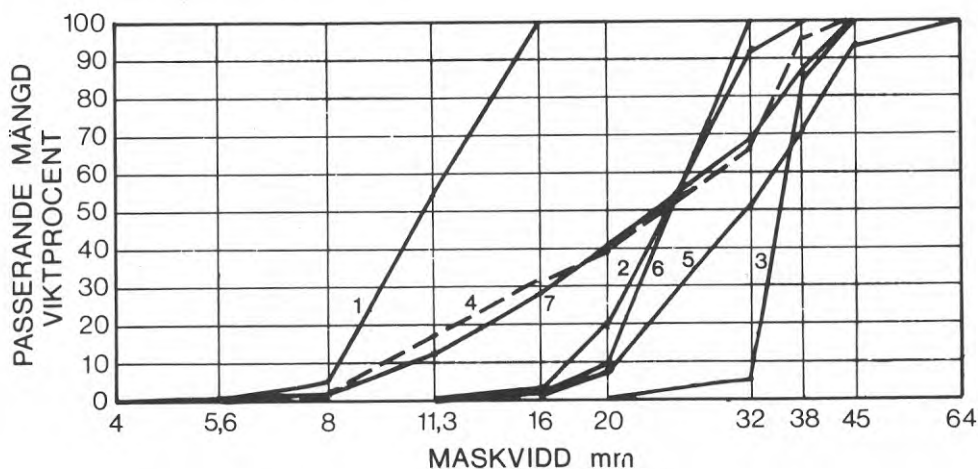


FIG. 21. Kornfördelningskurvor för de undersökta jordarna.

1. Singel 8 – 16, 2. Singel 16 – 38, 3. Singel 32 – 45, 4. Singel 8 – 45 (blandning 1:1:1 av de tre övriga singel-sorterna), 5. Stockholmsgranit, 6. Hardebergakvartsit, 7. Karlskronagnejs.

Grain size curves for the tested soils.

1. Pebbles 8 – 16, 2. Pebbles 16 – 38, 3. Pebbles 32 – 45, 4. Pebbles 8 – 45 (mixture 1:1:1 of the three other pebble fractions), 5. Granite from Stockholm, 6. Quartzitic sandstone from Hardeberga, 7. Gneiss from Karlskrona.

Tekniska egenskaper, sammanställning

Tabell 2.1. Tekniska egenskaper.

Jord	d_{50} mm	$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$	Flisig- het	Spröd- het	Sfäri- citet	Rund- nings- grad	e_{max}	e_{min}	ρ_s t/m ³
Singel 8 - 16	11	1,43	1,32	44	0,71	0,38	0,76	0,51	2,69
Singel 16 - 38	24	1,42			0,71	0,38	0,89	0,56	2,69
Singel 32 - 45	35	1,12			0,71	0,38	0,87	0,57	2,69
Singel 8 - 45	25	3,1			0,71	0,38	0,70	0,50	2,69
Stockholms- granit	32	1,65	1,17	41	0,69	0,10	0,94	0,59	2,68
Hardeberga- kvartsit	25	1,30	1,33	50	0,64	0,22	0,97	0,53	2,64
Karlskrona- gnejs	23	2,6	1,32	57	0,63	0,18	0,93	0,50	2,69

Flisighet och sprödhet har bestämts på fraktion 11,3 - 16 mm. Av Stockholms-graniten och Hardeberga-kvartsiten handkrossades erforderlig mängd.

Beträffande begreppen sfäricitet och rundningsgrad, se avsnitt 3.2.4.

2.5 Försöksresultat

2.5.1 Kompression vid pålastning

Som framhållits i inledningskapitlet kan kompressionsförsök tolkas på olika sätt genom att man till de avlästa kompressionsvärdena lägger ett konstant värde $\Delta\epsilon = C$ (jfr. fig. 9). Vidare finns olika uppfattningar om hur man bör tolka kompressionsförsök - se litteraturöversikten, avsnitt 1.3. De här redovisade kompressionsförsöken har tolkats enligt den metod, som bl. a. anges av Brinch-Hansen (1966): för samma jord antas spänningsexponenten β konstant och oberoende av portalet.

Som framgår av kompressionskurvorna, fig. 22, är det möjligt att använda denna tolkningsmetod utan att avvikelserna från de "verkliga" kompressionsvärdena blir alltför stora. Ett undantag utgör emellertid Karlskronagnejsen i fast lagring, fig. 22 d. Tre försök utfördes på detta material i fast lagring, och i dessa fall är resultatet sådant att man kan fråga sig om den använda tolkningsmetoden överhuvudtaget är tillämplig. Det är i varje fall inte möjligt att beskriva hela kompressionsförloppet med samma parametrar m och β . Kompressionsmodulen är till en början relativt konstant, men vid högre spänningar minskar den kraftigt. Förhållandet framgår tydligt av fig. 23, där försök 17 - 19 är redovisade i linjärskala. Förloppen påminner mera om plattbelastningsförsök upp till i närheten av brottlasten än om kompressionsförsök med förhindrad sidoutvidgning.

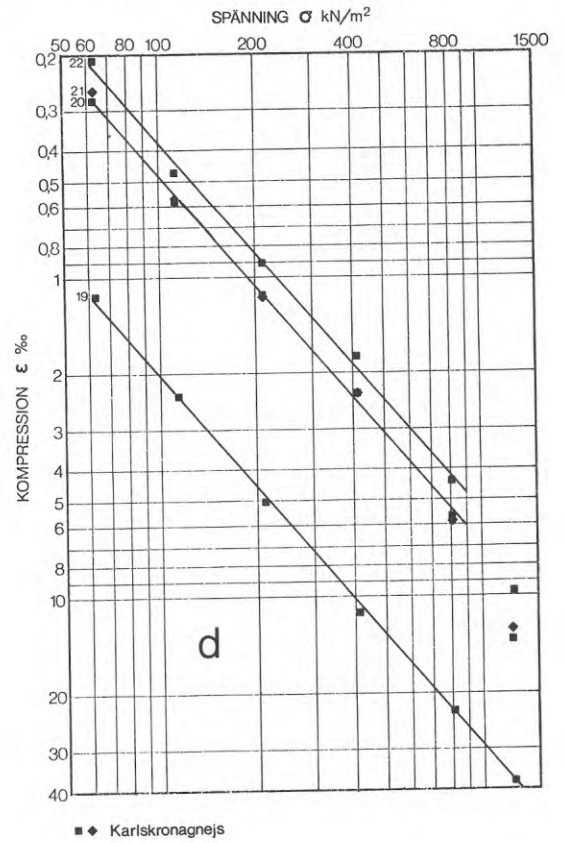
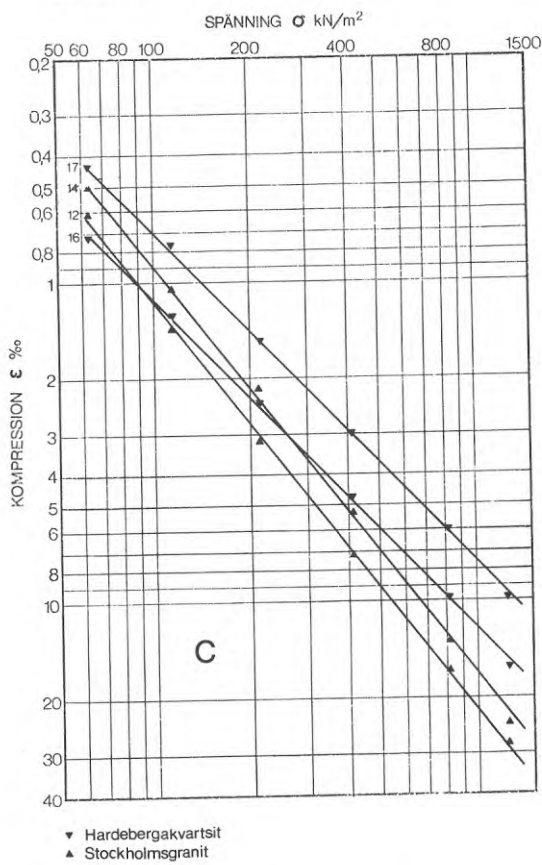
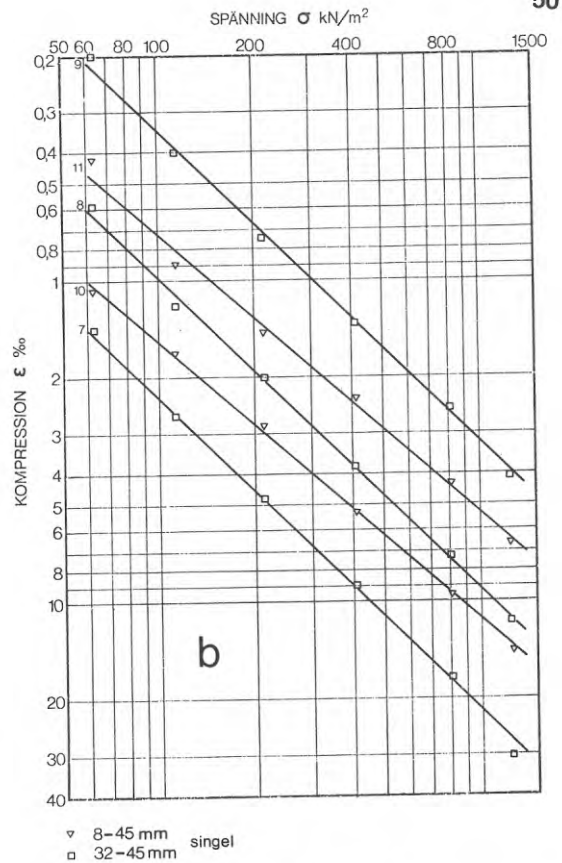
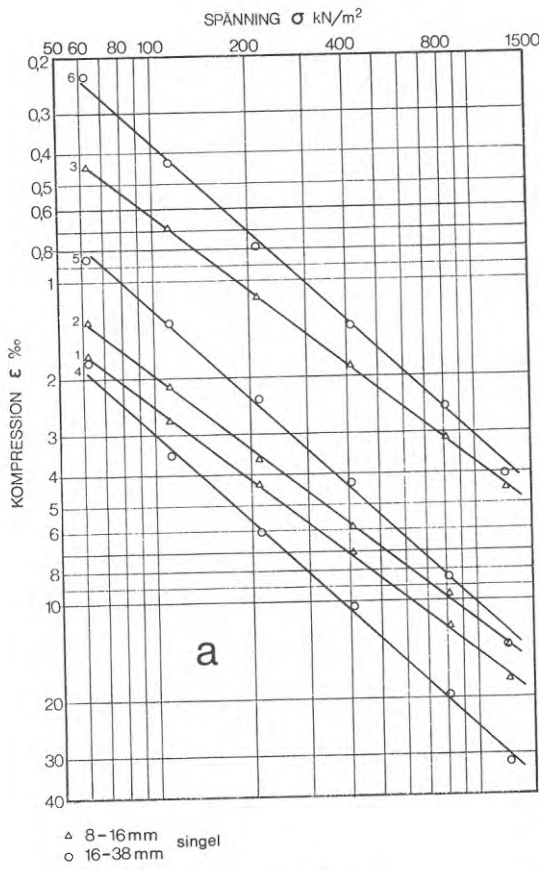


FIG. 22. Kompressionskurvor i loglog-skala. Försöken har tolkats med β som en materialkonstant. e_0 , m och β redovisas i TAB. 2.2.

Compression curves in log-log scale. The interpretation has been made with β as a soil constant. e_0 , m and β are presented in TAB. 2.2.

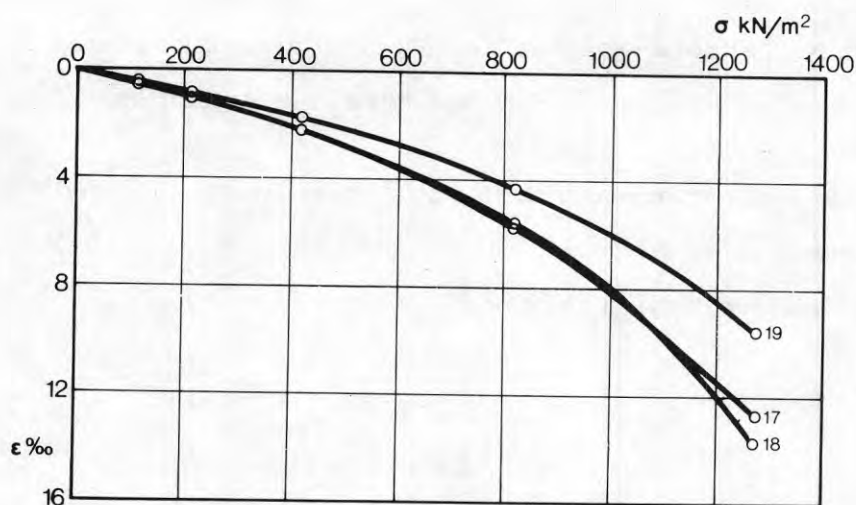


FIG. 23. Kompressionsförsök på Karlskrona-gnejs i fast lagring, återgivna i linjärskala. Motsvarande diagram i loglogskala visas i FIG. 22d.

Compression tests on Karlskrona-gneiss in a dense state, presented in linear scale. Corresponding diagram in a log-log scale is shown in FIG. 22d.

För flera av de övriga försöken gäller också att kompressionen vid högsta spänningen är något större än som motsvarar de inlagda räta linjerna i fig. 22 (dvs hela kompressionsförloppet kan inte beskrivas med ett enda parameterpar m och β), även om inte avvikelserna är lika kraftiga som för Karlskrona-gnejsen i fast lagring. Förhållandet torde bero på krossningseffekter vid de högre spänningarna. Karlskrona-gnejsen skiljer sig från de övriga materialen genom att den är framställd enbart genom sprängning och siktning. Alla de övriga materialen som ingår i undersökningen är på ett eller annat sätt nedkrossade, och styrkan hos de enskilda kornen kan därför förväntas vara minst hos Karlskrona-gnejsen. Den visar också den största sprödheten, se tabell 2.1. Detta kan vara anledningen till att kompressionsmodulen för Karlskrona-gnejsen visar en så markant minskande tendens. Rimligtvis borde då också samma material i medelfast lagring visa samma tendens, men det är inte fallet, se försök 16, fig. 22 d. En förklaring kan emellertid

vara att Karlskrona-gnejsen är så spröd att vid packning med plattvibratorn en slags förbelastningseffekt uppkommit.

Kompressionsparametrarna m och β har för varje försök utvärderats från de i fig. 22 inlagda räta linjerna. I tabell 2.2 redovisas för samtliga försök e_o , m och β .

Tabell 2.2. Utvärdering av kompressionsförsök första pålastning.

Material	Försöksnummer	e_o	m	β
Singel 8-16	1	0,76	521	0,78
	2	0,68	650	0,78
	3	0,51	2020	0,78
Singel 16-38	4	0,85	362	0,92
	5	0,70	876	0,92
	6	0,58	2860	0,92
Singel 32-45	7	0,87	436	0,98
	8	0,65	1040	0,98
	9	0,57	3000	0,98
Singel 8-45	10	0,59	728	0,87
	11	0,52	1570	0,87
Stockholms- granit	12	0,80	663	1,28
	13	0,60	878	1,28
Hardeberga- kvartsit	14	0,67	850	1,04
	15	0,55	1370	1,04
Karlskrona- gnejs	16	0,72	422	1,16
	17	0,50	1790	1,16
	18	0,51	1790	1,16
	19	0,56	2270	1,16

Vid bearbetning av försöksresultaten är det föga lönt att behandla varje jord för sig - antalet försök på varje jord är så litet att den naturliga spridningen förrycker utvärderingen. Modultalet m brukar ställas i relation till begynnelseportalet e_0 . I loglog-diagram brukar funktionen vara rätlinjig. När man på detta sätt jämför olika jordar har jag funnit att man kan uppnå en viss samstämmighet genom att multiplicera m med graderingskoefficienten C_u (Andréasson, 1971). Sambandet mellan $m \cdot C_u$ och e_0 visas i fig. 24.

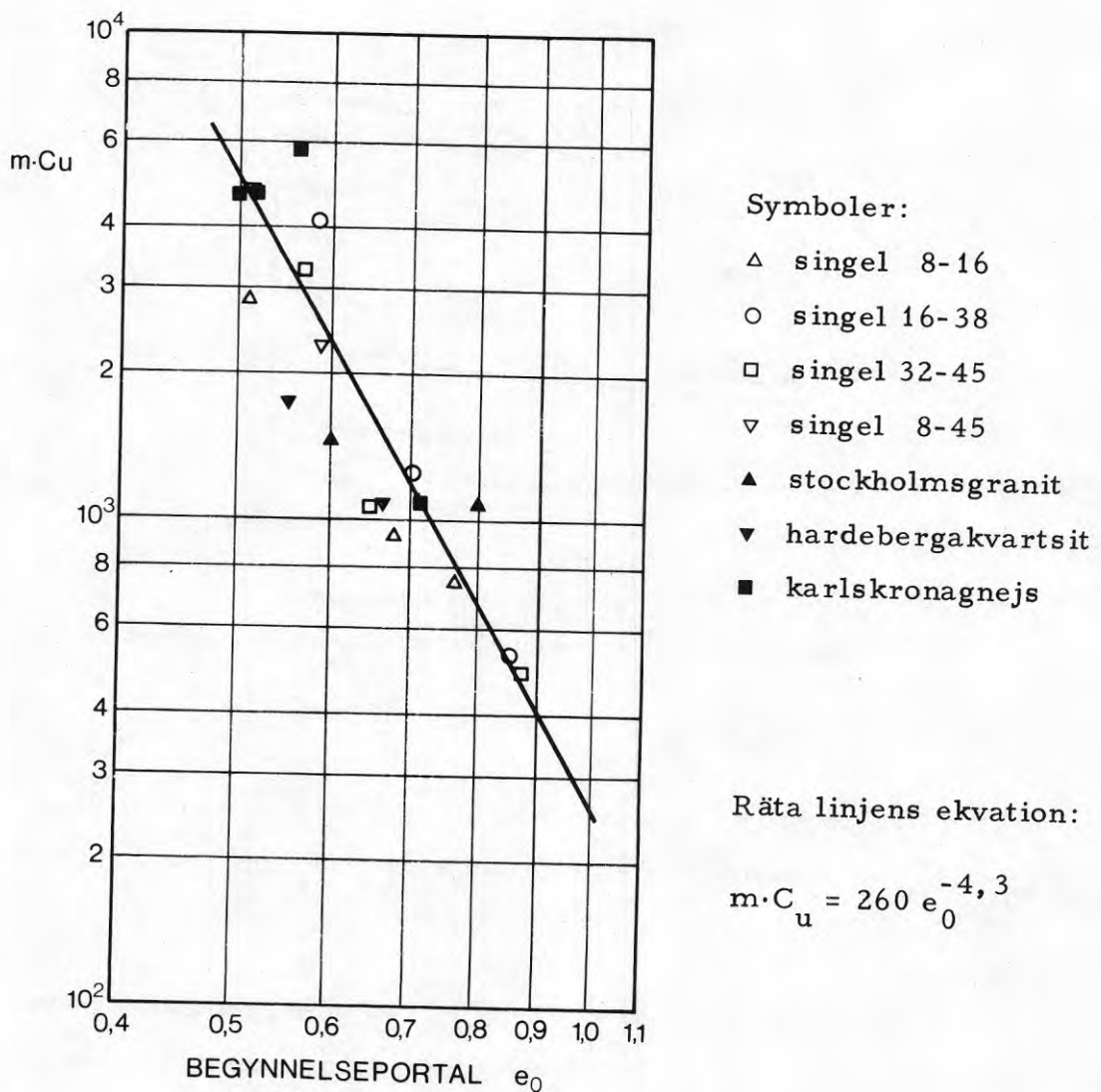


FIG. 24. Relation mellan produkten $m \cdot C_u$ och begynnelseportalet e_0 .
Relation between the product $m \cdot C_u$ and the initial void ratio e_0 .

Relationen mellan $m \cdot C_u$ och e_0 i fig. 24 är inte helt entydig. Detta är den emellertid inte heller för de enskilda jordarna: bortsett från de jordar, som representeras av endast två punkter, så går det inte att bilda en rät linje av värdena från någon av jordarna. Den "naturliga" spridningen är så stor att man ej bör dra för vittgående slutsatser av sambandet i fig. 24.

Sambandet mellan modultalet och kornstorleken kan studeras på de tre singelsorterna som har ungefär samma gradering och kornform. I fig. 25 har modultalet ställts i relation till d_{50} .

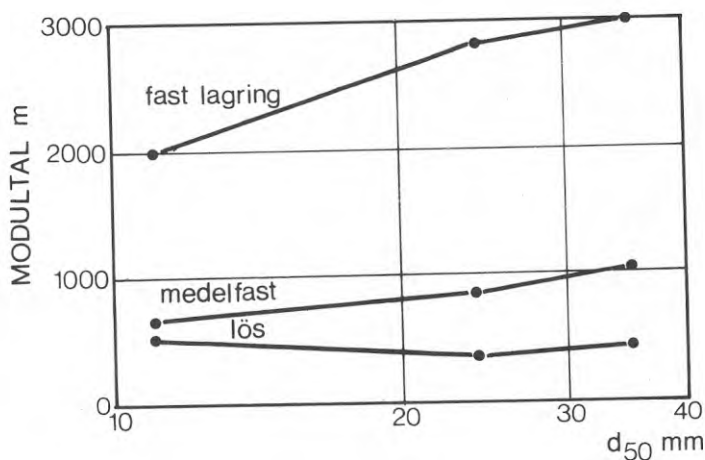


FIG. 25. Relation mellan m och d_{50} för de tre singelsorterna 8-16, 16-38 och 38-45.
Relation between m and d_{50} for the three pebble fractions 8-16, 16-38 and 38-45.

I fig. 25 kan man kanske skönja en svag ökning av m med ökande d_{50} . Tendensen är emellertid svag och slutsatsen blir snarast den att m är relativt oberoende av d_{50} .

Spänningsexponenten β bör enligt vad som framgått av avsnitt 1.3 kunna ställas i relation till kornstorleken. Sambandet mellan β och korndiametern d_{50} redovisas i fig. 26a. Relationen är entydig beträffande de fyra singelsorterna: β ökar med ökande kornstorlek. Tar man hänsyn till samtliga värden är emellertid spridningen så stor att enbart kornstorleksvariationerna

inte räcker till för att förklara variationerna hos β . Man kan emellertid också finna ett tydligt samband mellan β och rundningsgraden, vilket visas i fig. 26 b. Sambandet i fig. 26 b visar tydligt att β ökar när rundningsgraden minskar, dvs när kornen blir mer skarpkantiga. Utgående från de inlagda räta linjerna i fig. 26a och b kan man beskriva hur β beror av kornstorlek och kornform med formeln $\beta = 0,78 + 0,4 \lg d_{50} - 1,1 R_f$ med d_{50} i mm och R_f = rundningsgraden.

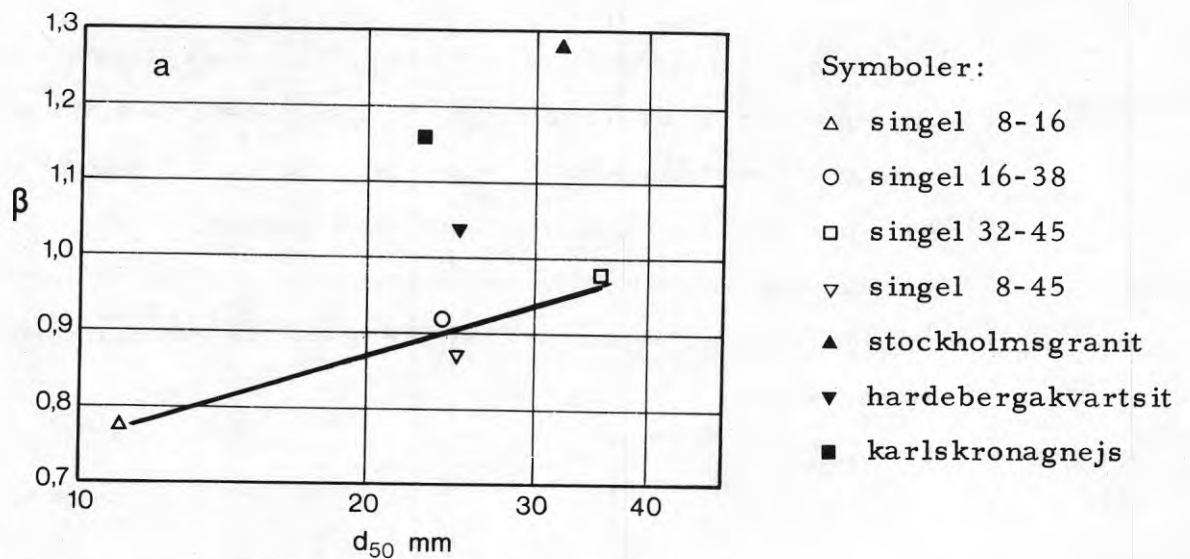


FIG. 26a. Relation mellan β och d_{50} för samtliga jordar.
Relation between β and d_{50} for the tested soils.

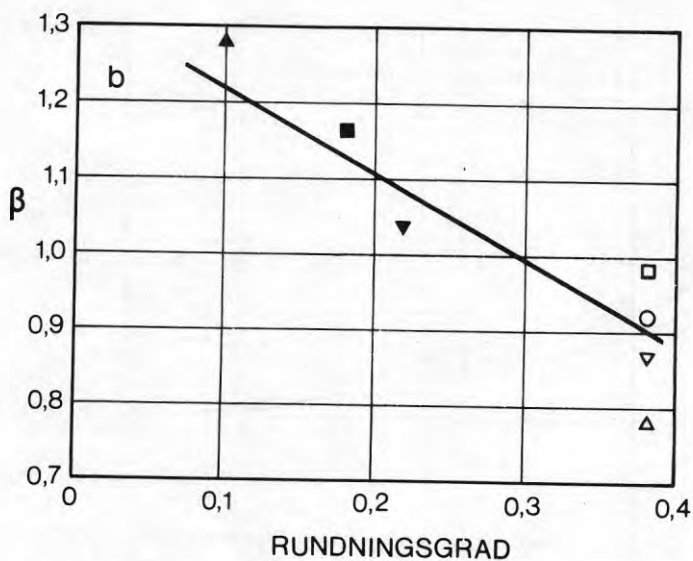


FIG. 26b. Relation mellan β och rundningsgraden för samtliga jordar.
Relation between β and the roundness for the tested soils.

2.5.2 Svällning vid avlastning

Kompressionen vid första pålastning varierade i mycket hög grad med portal och jordart, men detta var inte alls fallet vid avlastning: svällningen beror endast i ringa grad av lagringstätheten, och man kan knappast finna någon skillnad mellan de olika jordarna. Svällningen redovisas i fig. 27. Inverkan av lagringstätheten var störst för de tre "rena" singelsorterna - för övriga jordar kunde man knappast finna någon inverkan.

Svällningsmodulen varierar inte heller den mycket mellan de olika försöken - de försök som gav den minsta svällningen uppvisar en svällningsmodul som endast är ca 1,5 ggr så stor som modulen för de material som svällde mest. I fig. 28 redovisas den största och minsta modulen samt medelmodulen för samtliga försök. Modulvärdena har bestämts genom vanlig differensräkning: $M = \Delta \sigma / \Delta \epsilon$.

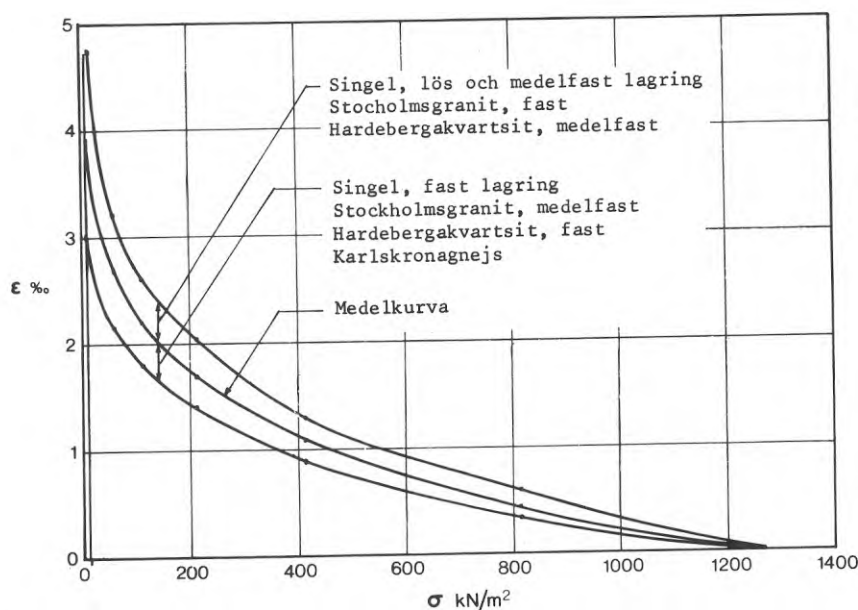


FIG. 27. Svällningen som funktion av vertikalspänningen vid avlastning. Linjärdiagram, samtliga försök. Lägsta spänningen motsvarar provets egenvikt.

Swelling versus vertical stress at unloading. The lowest stress corresponds to the weight of the sample.

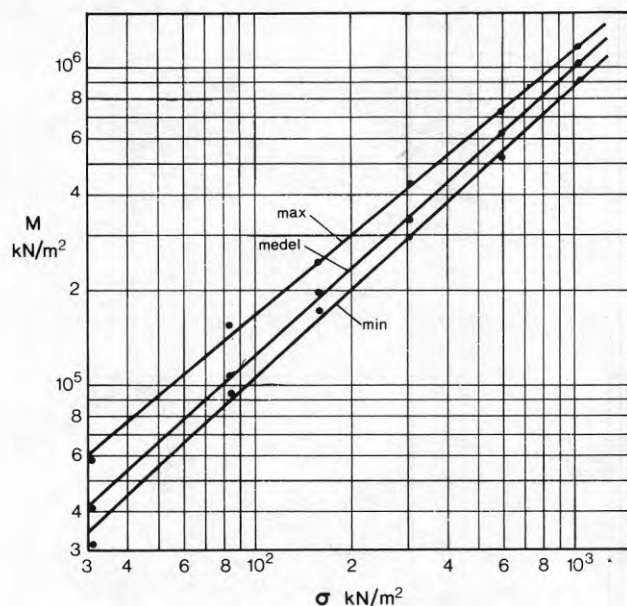


FIG. 28. Svällningsmodul (kompressionsmodul vid avlastning). Medelkurvan är beräknad ur svällningens medelvärde och har ekvationen $M = 12,5 \cdot 10^4 \cdot (\sigma^1/\sigma_j)^{0,9}$ kN/m², dvs. $m = 1250$ och $\beta = 0,1$.

Modulus of swelling (modulus of compressibility at unloading). The mean curve is computed from the mean value of the swelling and has the equation $M = 12,5 \cdot 10^4 (\sigma^1/\sigma_j)^{0,9}$ kN/m², which means $m = 1250$ and $\beta = 0,1$.

2.5.3 Horisontaltryck

Mätanordningarna för mätning av horisontaltryck fungerade tillfredsställande vid endast 10 av försöken - försök 1-9 och 19.

För dessa försök redovisas horisontaltrycken i fig. 29. Förhållandet mellan horisontal- och vertikaltryck under pålastning är relativt konstant. Man ser att förhållandet σ_h/σ_v minskar när lagringstätheten ökar. Detta illustreras i fig. 30, där σ_h/σ_v för $\sigma_v = 1270$ kN/m² ställts i relation till portalet för de tre singelsorterna. Om man antar att $\sigma_h/\sigma_v = K_0$ och använder sambandet $K_0 = 1 - \sin\phi$ kan man dra slutsatsen att friktionsvinkeln ϕ minskar när e_0 ökar - ett inte oväntat förhållande.

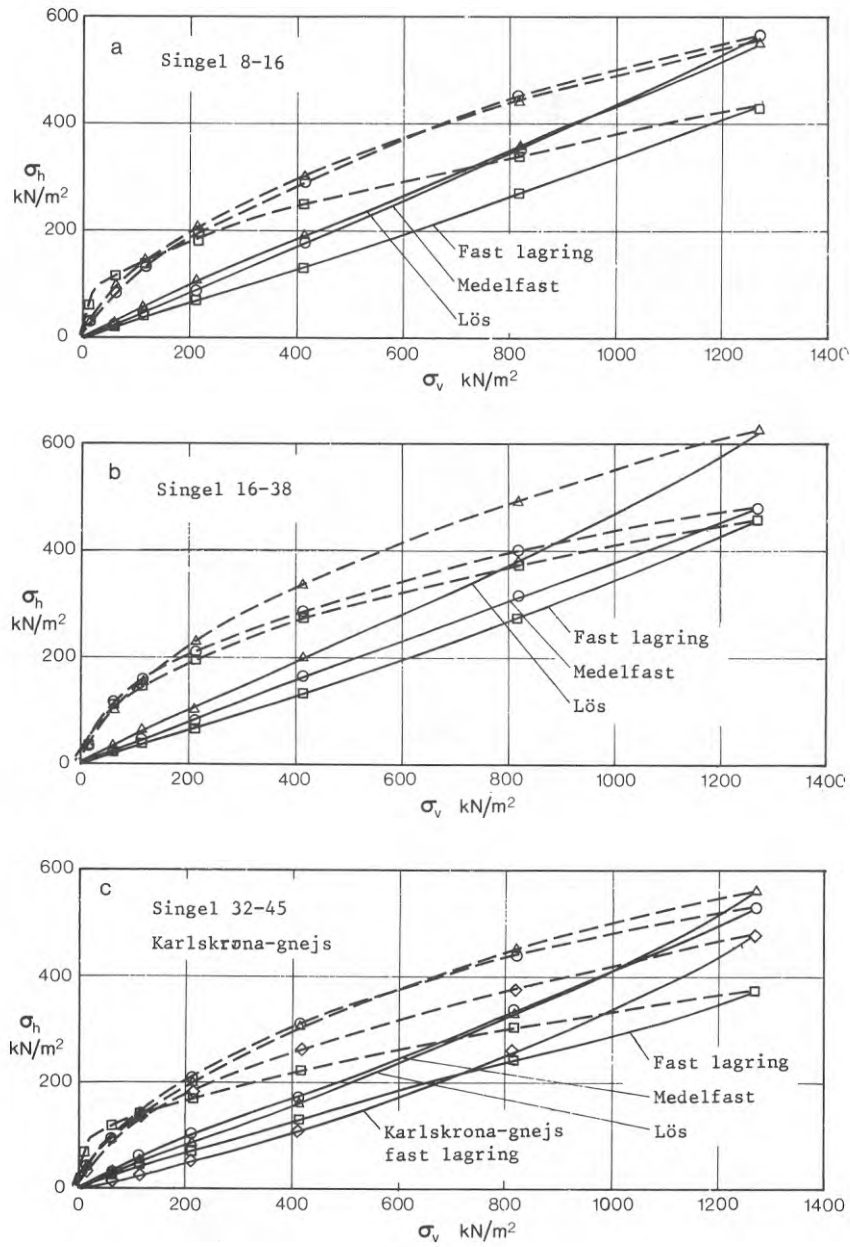


FIG. 29. Uppmätt horisontaltryck som funktion av vertikaltrycket. Medelvärden av horisontaltrycket uppmätt på tre olika nivåer redovisas. Som regel var de tre värdena lika, men vid vissa av försöken noterades en viss spridning.

Measured lateral stress in relation to the vertical stress. The mean value of the lateral stress measured at three different levels is shown. As a rule the three values agreed, but in some of the tests there was a slight difference.

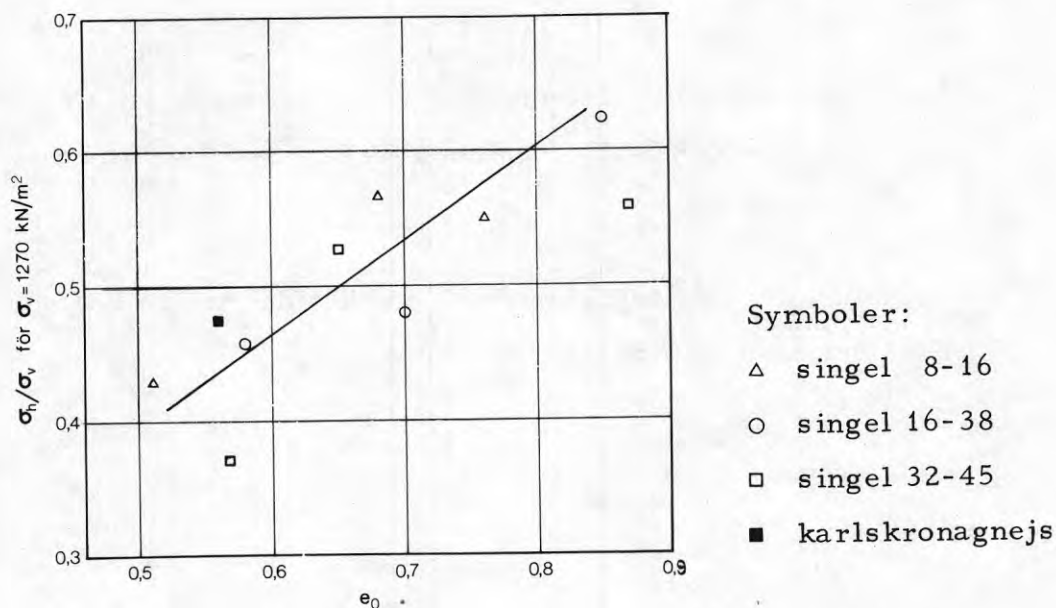


FIG. 30. Förhållandet σ_h/σ_v för $\sigma_v = 1270 \text{ kN/m}^2$ som funktion av portalet för de tre singel-sorterna.

The ratio σ_h/σ_v for $\sigma_v = 1270 \text{ kN/m}^2$ in relation to the void ratio for the three pebble fractions.

2.6 Slutsatser

Undersökningen har visat att grus och finsten i stort betar sig som sand vid kompression, dvs kompressionskurvan kan ritas som en rät linje i loglog-diagrammet.

Modultalet m (jämför ekv. 1:4) kan för de undersökta materialen beskrivas med formeln $m = (260/C_u) e_o^{-4,3}$. Vid fast lagring erhöles högre värden på modultalet än som brukar fås för sand i motsvarande fast lagring

Spänningsexponenten β (jämför ekv. 1:4) synes bero av kornstorleken och rundningsgraden. För de undersökta materialen kan β tämligen väl beskrivas med hjälp av kornstorleken d_{50} och rundningsgraden R_f enligt formeln $\beta = 0,78 + 0,4 \lg d_{50} - 1,1 R_f$

med d_{50} i mm.

Svällningsmodulen vid avlastning var i stort sett konstant vid samtliga försök. Svällningsmodulen kan beskrivas med $m = 1250$ och $\beta = 0,1$.

Horisontaltryckskoefficienten K_o varierade mellan 0,3 och 0,5. K_o sjönk med ökande lagringstäthet.

3 OLIKA FAKTORERS INVERKAN PÅ KOMPRESSIONS- MODULEN

3.1 Försöksutrustningen

Egentligen inverkar inte försöksutrustningen alls på kompressionsmodulen - denna är av en viss storlek oberoende av vad vi gör för fel när vi mäter den. Men eftersom vi är hänvisade till att diskutera endast våra uppmätta moduler, med inverkan av olika felaktigheter, så bör det vara på sin plats att i en diskussion om olika faktorerers betydelse också ta med försöksapparaturens inverkan.

För laboratoriemässig bestämning av kompressionsmodulen kan i regel tre olika typer av utrustning komma ifråga: ödometer med fast eller svävande ring, ringkompressometer samt triaxialapparat med utrustning för K_0 -mätning. I samtliga dessa fall är provet begränsat uppåt och nedåt av stämplarna som ger ändyteffekter. Vid ödometerförsöket, som är vanligast eftersom det är det enklaste provet, inverkar dessutom sidofriktionen. Flera undersökningar av dessa felkällor finns redovisade i litteraturen.

Muhs och Kany (1954) gjorde noggranna undersökningar av mätfelet vid ödometerförsöket. De gjorde försök med provdiametern 10 cm och olika provhöjd.

Vid försök med olika provhöjd fann Muhs och Kany, som väntat, att kompressionen var större ju mindre provhöjden var, fig. 31. Detta berodde emellertid inte enbart på sidofriktionen, utan främsta orsaken var att man hade ett konstant fel, oberoende av provhöjden, genom att stämpeln ej anslöt helt till provets yta. Genom att mäta sidofriktionen kunde man korrigera kompressionsdiagrammet så att inverkan av friktionen eliminerades. Därefter kunde man rita diagram över kompressionen som

funktion av provets diameter - höjdförhållande och extrapolera till $\frac{D}{h} = 0$, då rimligtvis inte ändyteffekterna skall inverka. Dessa extrapolerade värden antog Muhs och Kany som riktiga (streckad kurva i fig. 31).

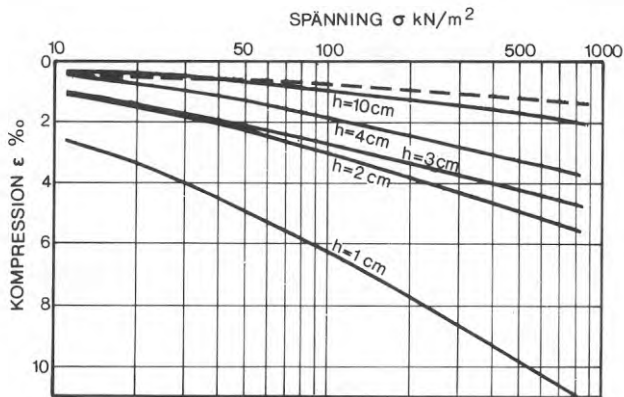


FIG. 31. Kompressionskurvor för finsand. Provdiameter 10 cm. — direkt avlästa värden; - - - värden korrigerade med hänsyn till sidofriktion och ändyteffekter. (Muhs och Kany, 1954).

Compression curves for fine sand. Sample diameter 10 cm. — direct readings, - - - readings corrected with regard to side friction and end plate effects. (Muhs and Kany, 1954).

Muhs och Kany diskuterade också fast kontra svävande ödometering och konstaterade att svävande ring är bäst, men att skillnaden är liten. Teoretiska korrektionsfaktorn α , som pålagd spänning skall multipliceras med för att man skall få medelspänningen i provet, blir för fast ring

$$\alpha_f = \frac{D/h}{D/h + 2\mu K_0}$$

och för svävande ring

$$\alpha_s = \frac{D/h}{D/h + \mu K_0}$$

där μ = friktionskoefficient jord-ring

K_0 = viltryckskoefficienten

Sammanfattningsvis konstaterade Muhs och Kany, att inverkan av ändyteeffekterna är stor och som regel dominerar över mantelfriktionen, och att man därför bör ha ett relativt högt prov. Vidare bör man vid utvärdering av kompressionsmodulen för sand korrigera modulen med hänsyn till felkällorna.

Tyvärr redogjorde inte Muhs och Kany för om de kontrollerat och tagit hänsyn till apparaturens egendeformation. Om nämligen apparaturen har en viss egendeformation, så påverkar denna försöksresultaten just på så sätt som framgår av fig. 31, dvs man får större kompression ju lägre provet är. Vid analys av kompressibiliteten hos jordar med hög kompressionsmodul är det av mycket stor vikt att man tar hänsyn till apparaturens egendeformation. Ödometrar för kompression av lera har ofta stor egenelasticitet. För en av CTH:s ödometrar, typ SGI X, har en egenelasticitet enligt fig. 32 uppmätts.

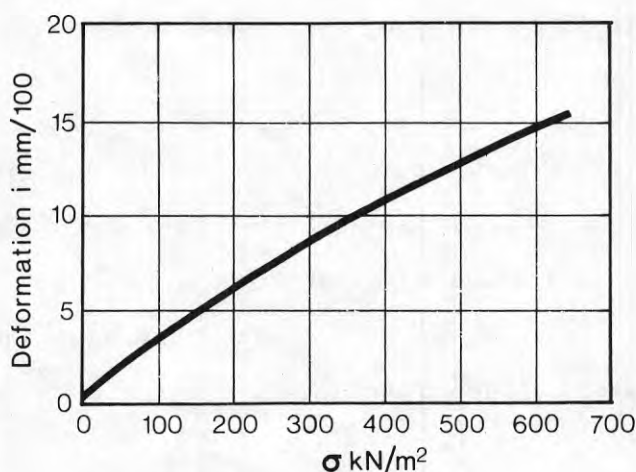


FIG. 32. Egenelasticitet hos en ödometer typ SGI X. Provet är ersatt med en mässingsattrapp, i övrigt är ödometern monterad som vanligt. Spänningen är beräknad på den vanliga provytan $19,6 \text{ cm}^2$.

Elasticity of an oedometer type SGI X. The oedometer is arranged as usual but the sample is replaced by a brass dummy. The stress is computed from the ordinary sample area 19.6 cm^2 .

Detta apparatfel spelar mindre roll vid normala försök på lera, men är mycket störande vid analyser av friktionsjordars kompressibilitet, allrahelst som apparatfelet också uppvisar en

viss hysteres. För att helt förklara de stora skillnader i kompressibilitet, som Muhs och Kany fick, räcker emellertid inte enbart apparatfelet till, utan oavsett om deras apparatur var kalibrerad eller ej måste man enligt deras försök utgå från att också anslutningen mellan prov och stämpel haft stor inverkan.

Schmidt (1967) uppgav att han gjort försök med olika provhöjder utan att finna någon mätbar inverkan härav. Eftersom Schmidt använde DGI-ödometern kan man utgå från att han tog hänsyn till apparatfelen. Brinch-Hansen betonade nämligen mer än en gång vid sina besök på CTH vikten av att man tog hänsyn till ödometerns egenelasticitet och uppgav att DGI-ödometern var mycket noga kalibrerad med hänsyn härtill.

Moussa (1961) undersökte inverkan av olika provhöjder och -diametrar. Hans resultat redovisas i fig. 33. Som framgår av figuren inverkar inte olika höjd - diameterförhållanden i någon högre grad. Någon så stor inverkan som Muhs och Kany (1954) fann kan man inte spåra.

Kjaernsli och Sande (1963) redovisade mätningar av väggfriktionen i NGI:s stora ödometer ($D = 50$ cm, $h = 25$ cm) vid försök på stenmaterial. Den totala väggfriktionen uppmättes till i genomsnitt 20%, vilket innebär att medelspänningen i provet var 10% lägre än den pålagda spänningen.

Vi kan konstatera att de ovan redovisade undersökningarna ger något olika resultat. De forskare, som rätt och slätt jämfört resultatet av försök med olika D/h -förhållanden har inte funnit några större skillnader, medan de som mätt sidofriktionens storlek funnit att denna reducerar den pålagda spänningen på provet med ca 10%. Det kan vara av intresse att se vad en sådan sidofriktion innebär vid utvärderingen av kompressionsmodulen. Antag därför en sand med de "sanna" parametrarna m och β . Om vi gör ett ödometerförsök på denna sand och

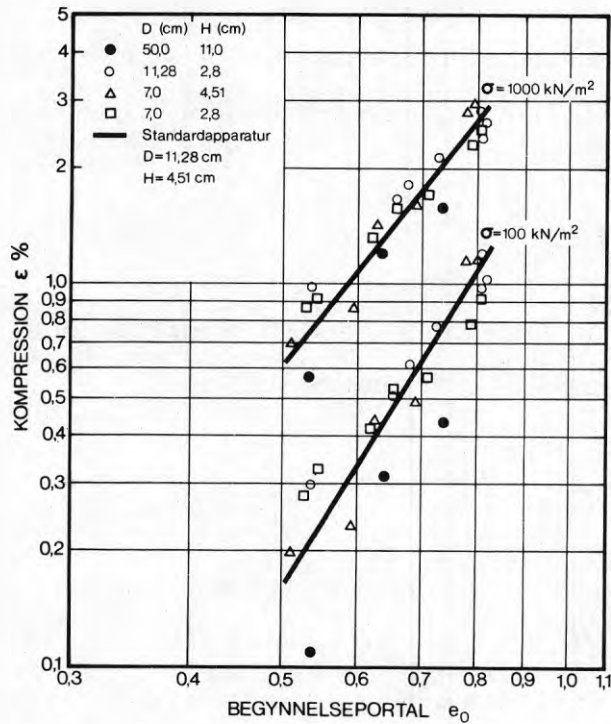


FIG. 33. Inverkan av olika provdimensioner enligt Moussa (1961).

Influence of different sample dimensions according to Moussa (1961).

betecknar den pålagda spänningen på provet med p , så är vertikala medelspänningen i provet $\sigma_m = 0,9 p$, och kompressionen vid yttre lasten p är

$$\epsilon = \frac{1}{m\beta} \left(\frac{0,9p}{\sigma_j} \right)^\beta$$

Genom derivering av ϵ med avseende på σ_m erhålls

$$M_1 = m\sigma_j \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_j} \right)^{1-\beta} = m \frac{0,9}{0,9\beta} \sigma_j \left(\frac{p}{\sigma_j} \right)^{1-\beta} \quad (3.2)$$

Så stor är alltså kompressionsmodulen vid spänningen $0,9p$. Hade vi inte tagit hänsyn till sidofriktionen hade vi emellertid tolkat kompressionsmodulen utgående från lasten p och fått

$$M_2 = \frac{m}{0,9^\beta} \sigma_j \left(\frac{p}{\sigma_j} \right)^{1-\beta} \quad (3.3)$$

vilket vi hade trott varit det rätta värdet på kompressionsmodulen vid spänningen p , då den emellertid är

$$M_3 = m \sigma_j \left(\frac{p}{\sigma_j} \right)^{1-\beta} \quad (3.4)$$

Om $\beta = 0,5$ (vanligt värde för sand) är alltså den kompressionsmodul vi bestämmer $1/0,9^{0,5} = 1,05$ gånger större än den sökta. Självfallet finner vi inte heller den sanna parametern m utan får en avvikelse på ca 5%. Inverkan på kompressionsmodulen av sidofriktionen blir alltså mindre än inverkan på medelspänningen σ_m i provet.

Eftersom ödometerförsökets relevans är ett problem av mycket stort intresse utfördes en undersökning vid CTH som komplement till de ovan redovisade.

Den ödometer som vanligen används vid CTH för provning av sand visas i fig. 34. Denna ödometer har försumbar egenelasticitet - mätklockan mäter direkt mellan bottenplattan och stämpeln. Stämpeln är svagt konad för att tillåta en liten snedställning. Bottenplattan är gjord av lättmetall. Den fasta ringen är av 18/24 -stål (s.k. syrafast stål) och har diameter - höjdförhållandet 2,5 samt tjockleken 8 mm - en tämligen konventionell utformning. Man brukar motivera behovet av en tjock ödometerring med att ringen måste vara styv. Jämförande försök har emellertid utförts med en ödometerring med tjockleken 2 mm utan att någon skillnad i resultaten kunna påvisas.

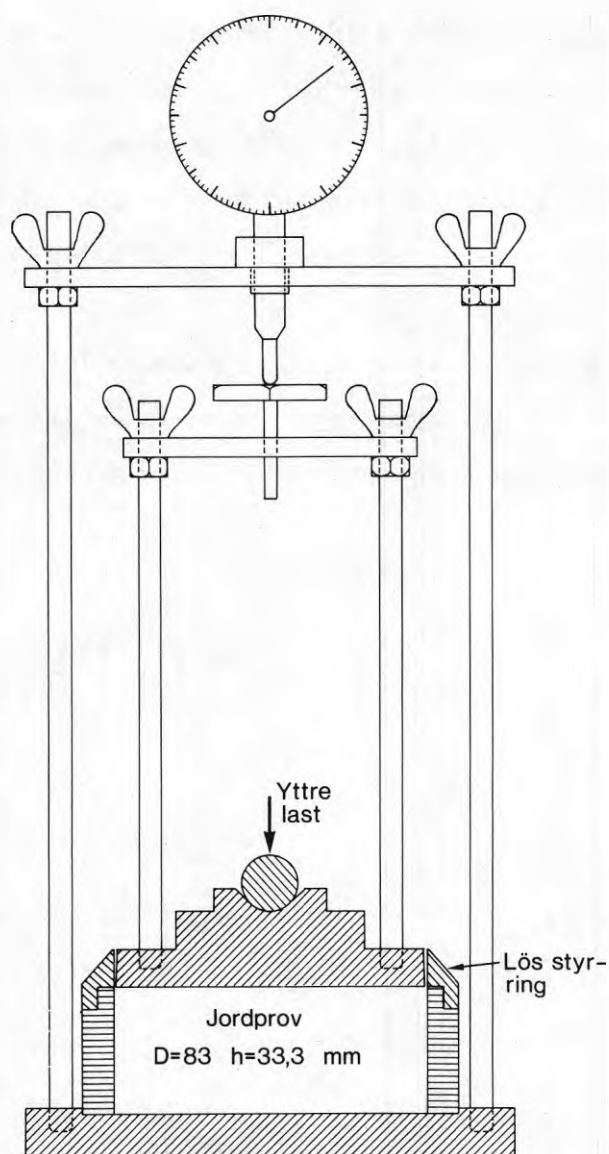


FIG. 34. CTH:s ödometer för kompressionsförsök på sand.
The CTH oedometer for compression tests on sand.

För att mäta friktionen och studera inverkan av olika provhöjder tillverkades ett antal lösa ringar med samma diameter som den vanligen använda ödometern (83 mm) och med $D/h = 1, 1,5, 2,5, 5$ och 10 . Ringarna monterades på en kraftgivare, som visas i fig. 35. Kraftgivaren består av en lättmetallring med tjockleken $0,4$ mm med pålimmade trådtöjningsgivare. Åtta dubbla givare är limmade med jämn delning, alltså totalt 16 givare, 8 vertikala och 8 horisontella. Givarna är kopplade

som fullbryggekoppling på sådant sätt att inverkan av snedbelastning blir minimal, se kopplingsschemat i fig. 35. Kraftgivarens kalibrerade känslighet överensstämmer med den teoretiskt beräknade - ca $0,35 \mu\text{strain}$ motsvarar 1 N. Detta innebär att om ringfriktionen är totalt 20% av den pålagda lasten, så fås för $\sigma = 100 \text{ kN/m}^2$ en friktionskraft i ringen på 108 N, vilket ger ett utslag på $38 \mu\text{strain}$. De lösa ödometer-ringarna spändes fast mot kraftgivaren med hjälp av skruvar. Genom förspänningen kunde också negativ friktionskraft på ödometeringen mätas.

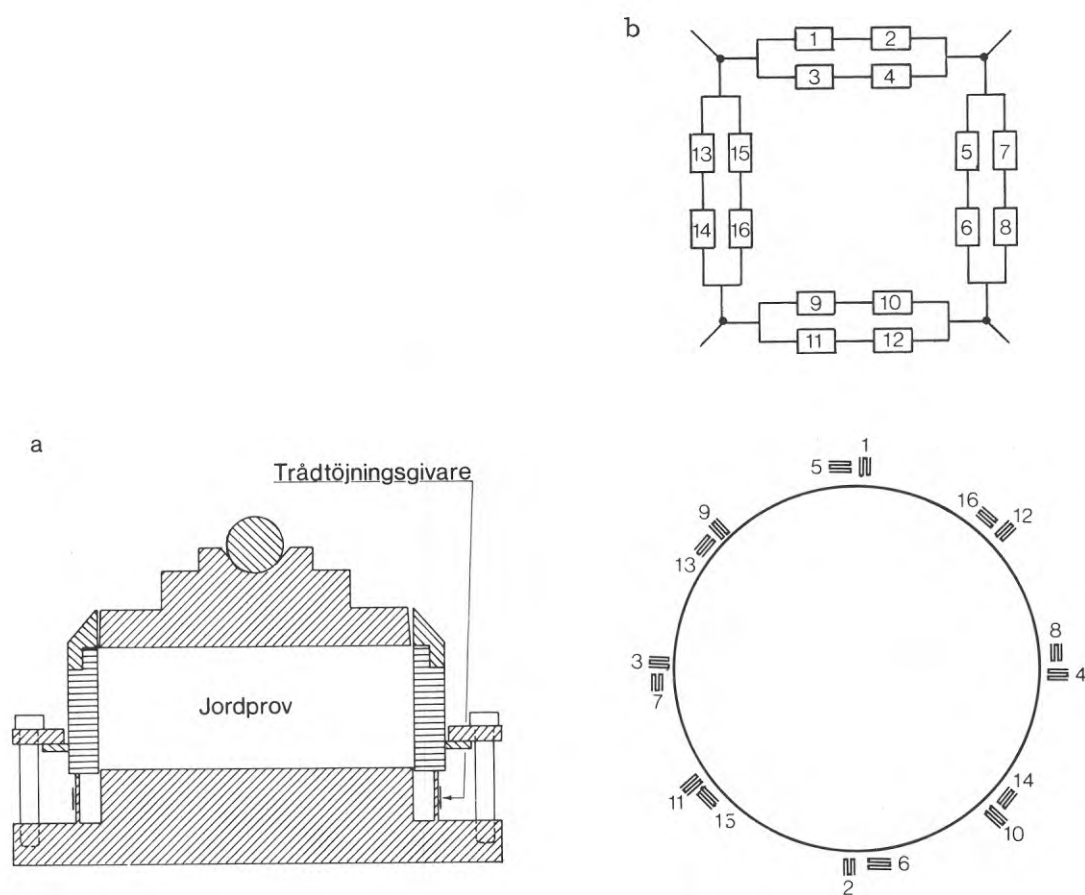


FIG. 35. Kraftgivare för mätning av ringfriktion.
 a) Kraftgivare med påmonterad ödometering
 b) Kopplingsschema för trådtöjningsgivare.

Force gauge for measuring ring friction.
 a) Force gauge with an oedometer ring
 b) Connection diagram for strain gauges.

Som försöksmaterial användes huvudsakligen en siktad fraktion 0,5 - 1,0 mm. Sanden kom från Gråbo grustag utanför Göteborg och var tämligen skarpkantig. Orsaken till att en sorterad fraktion valdes var att det erfarenhetsmässigt visat sig att försöksresultaten då blir jämnare, dvs resultaten från två identiska försök överensstämmer bättre än om man gör försök på en välgraderad sand.

Försöken visade att friktionen mellan ring och sand under hela första pålastningen utgjorde en så gott som konstant andel av den pålagda lasten. I fig. 36 a visas ett typiskt resultat. Vid detta försök gjordes också en andra på- och avlastning. Kompressionen visas i fig. 36 b, dels utan hänsyn till friktionen, dels med det pålagda trycket reducerat med halva friktionskraften.

För varje ödometerhöjd användes två olika lagringar, en lös och en fast. Den lösa lagringen åstadkoms genom att sanden ifylldes genom en tratt med trattens mynning hela tiden belägen omedelbart över ytan på sanden i ödometern. För åstadkommande av fast lagring siktades sanden genom 1,0 mm sikten från 20 cm höjd ned i ödometern. Efter fyllningen avplånades sandens överyta med linjal.

Den uppmätta ringfriktionen visas i fig. 37 som funktion av ödometerringens höjd. Den totala ringfriktionen ökar med ökande ringhöjd, fig. 37 b, men friktionen per ytenhet är relativt konstant, fig. 37 a.

Friktionen som funktion av portalet visas i fig. 38. Friktionen ökar med ökande portal, vilket torde bero på att $K_0 = 1 - \sin\phi$ ökar med ökande portal; man kan anta att friktionsvinkeln jord-vägg är konstant för ett och samma material.

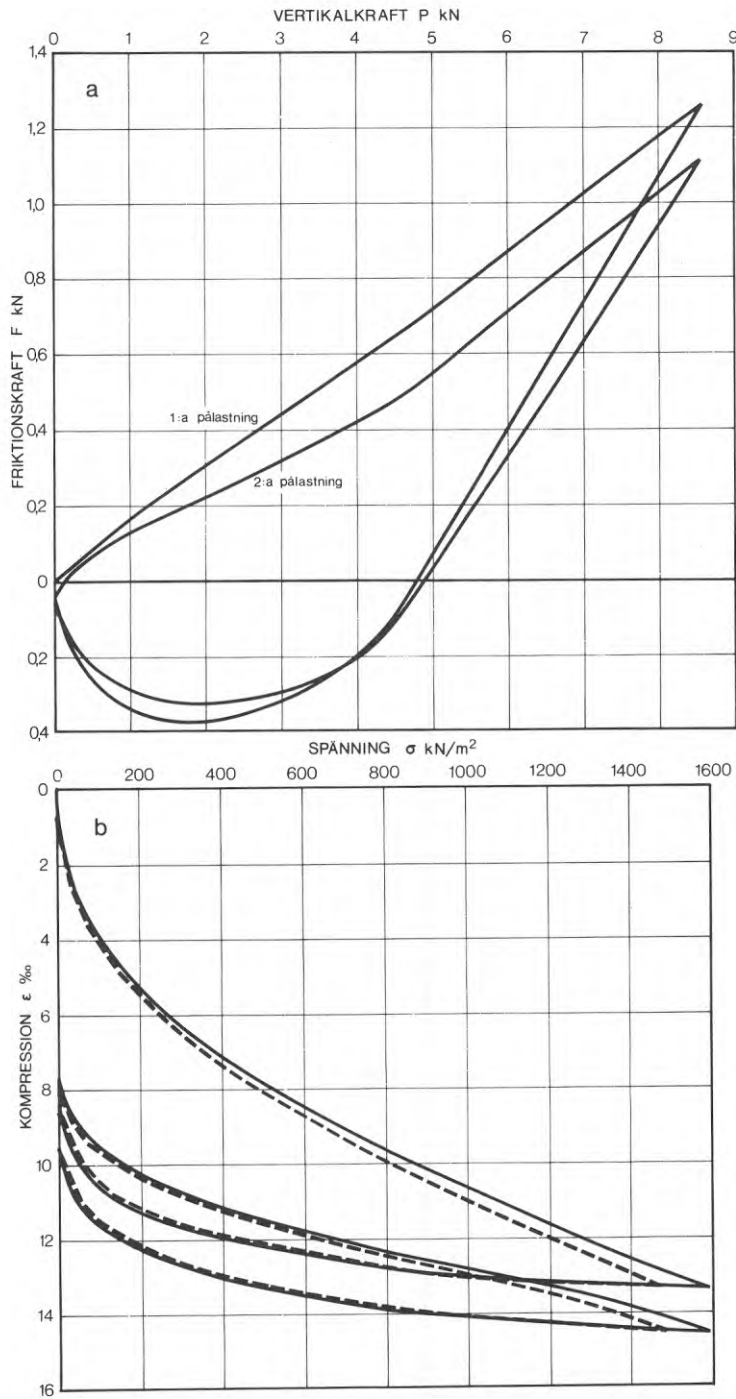


FIG. 36. Kompressionsförsök med mätning av ringfriktion. Ödometerhöjd 33 mm, diameter 83 mm.

- a) Total friktionskraft som funktion av pålagd vertikalkraft.
 b) Kompressionen redovisad dels utan — dels med - - - vertikalspänningen reducerad med hänsyn till ringfriktionen.

Compression test with ring friction measurement. Oedometer height 33 mm, diameter 83 mm.

- a) Total friction force in relation to the total vertical force.
 b) Compression shown with — and without - - - reduction of the vertical stress with regard to the ring friction.

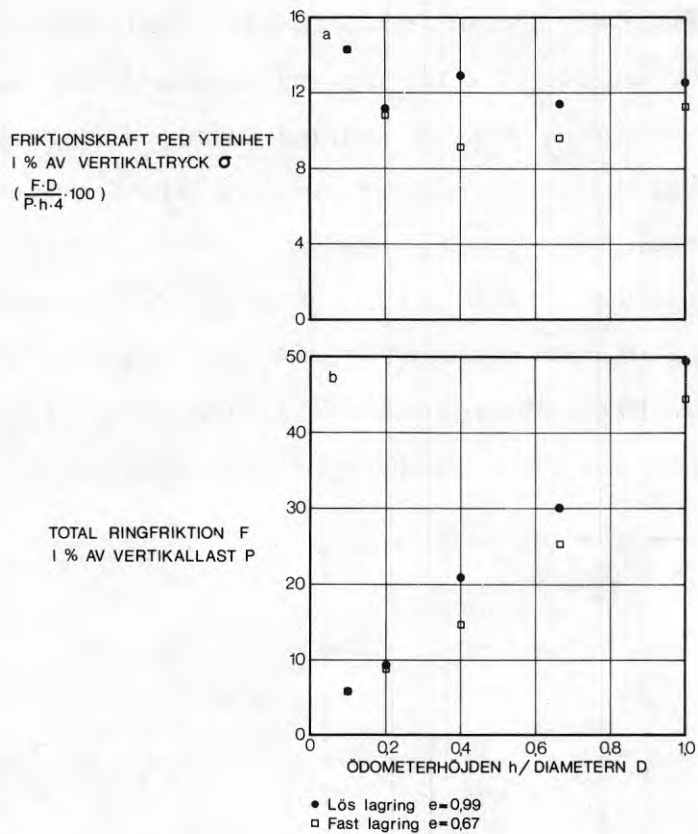


FIG. 37. Ringfriktionen som funktion av förhållandet h/D.

The ring friction as a function of the ratio h/D.

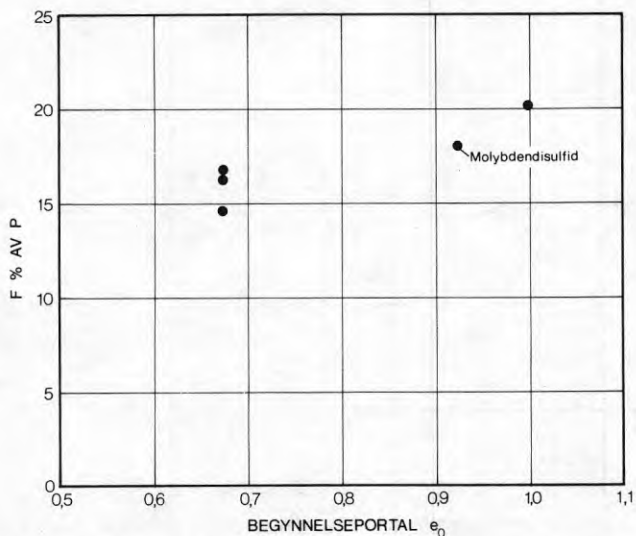


FIG. 38. Friktionskraften F i % av vertikallasten P som funktion av portalet. Ödometerhöjd 33 mm. Vid ett försök smordes ödometeringen med molybdendisulfid, men detta hade ingen märkbar effekt.

The friction force F in % of the vertical load P as a function of the void ratio. Oedometer height 33 mm. In one test the oedometer ring was greased with molybdenum disulphide without any observed effect.

Modultalet m , tolkat såväl med som utan hänsyn till friktionens inverkan, visas i fig. 39. Vid lös lagring är modultalet ungefär konstant oberoende av ödometerhöjden, men vid fast lagring ökar modultalet då höjden ökar, även om man tar hänsyn till friktionens inverkan. Den mest sannolika förklaringen till detta är dålig anliggning mellan stämpel och prov. Vid lös lagring synes det vara så att ojämnheter snabbt överbryggas, medan de vid fast lagring har en betydande effekt. Orsaken till att modultalet vid lös lagring minskar något med ökande h/D kan vara

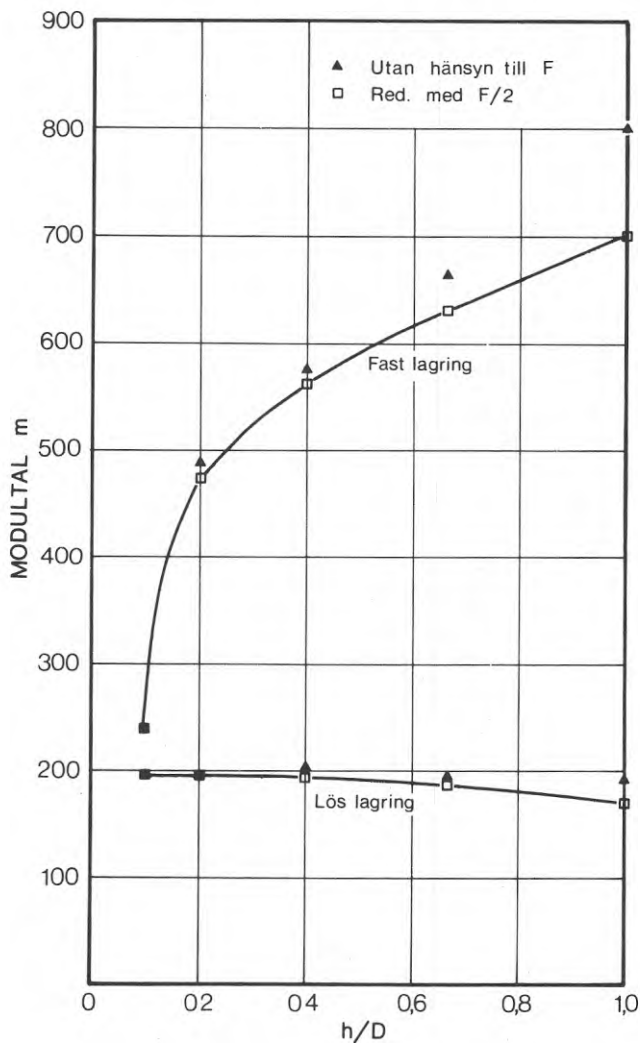


FIG. 39. Modultalet m som funktion av ödometers höjd-diameterförhållande. Begynnelseportalet vid lös lagring var ca 0,99 och vid fast lagring ca 0,67 utom för den lägsta provhöjden, där portalet blev 0,74 vid fast lagring (med samma inpackningsmetod som vid övriga försök).

Modules number m in relation to the height-diameter ratio of the oedometer. The initial void ratio was 0.99 in a loose state and 0.67 in a dense state except for the lowest sample height, where the void ratio was 0.74 in a dense state (with the same method of compaction as for the other tests).

att provets ytskikt packas något vid avplaningen av provets överyta - denna packning har större effekt vid ett lågt prov än vid ett högt.

Spänningsexponenten β var för samtliga ödometerhöjder utom den lägsta så gott som konstant - strax under 0,5. Vid korrigeringen av kurvorna med hänsyn till ringfriktionen blev förändringen av β så gott som försumbar, vilket sammanhänger med att friktionen utgjorde en så gott som konstant andel av den pålagda lasten. För ödometerhöjden 8,3 mm blev $\beta = 0,35$. Provhöjden var uppenbarligen så liten att de störande faktorernas inverkan blev för stor. Minsta provdimension genom största kornstorlek bör erfarenhetsmässigt vara ca 20 när man arbetar med ett ensgraderat material.

Om det är den dåliga anliggningen mellan stämpel och prov som orsakar avvikelserna mellan m -värdena vid fast lagring, så kan man anta att man vid varje laststeg har en sättningsandel, som är oberoende av ödometerhöjden. För att få fram denna andel har sättningsvärdena för varje last bestämts ur de friktionskorrigerade kompressionskurvorna och ritats upp i fig. 40. Sättningsvärdena för den lägsta ödometern (8,3 mm) har ej medtagits - dessa värden avviker starkt från de övriga, och man kan, eftersom β avviker kraftigt, anse detta prov vara icke jämförbart med de övriga. Ur fig. 40 kan man genom att extrapolera kurvorna till $h/D = 0$ utläsa den sättningsandel som orsakas av dålig anliggning mellan stämpel och prov. Med denna sättning reducerades sedan de kompressionsvärden som användes för uppritning av fig. 40. De kompressionsvärden som då erhöles var så gott som oberoende av ödometerhöjden. Medelvärdena är redovisade i fig. 41, där också den rätade (korrigerade) kurvan är inlagd. Denna kurva skall alltså representera det "sanna" kompressionsförloppet.

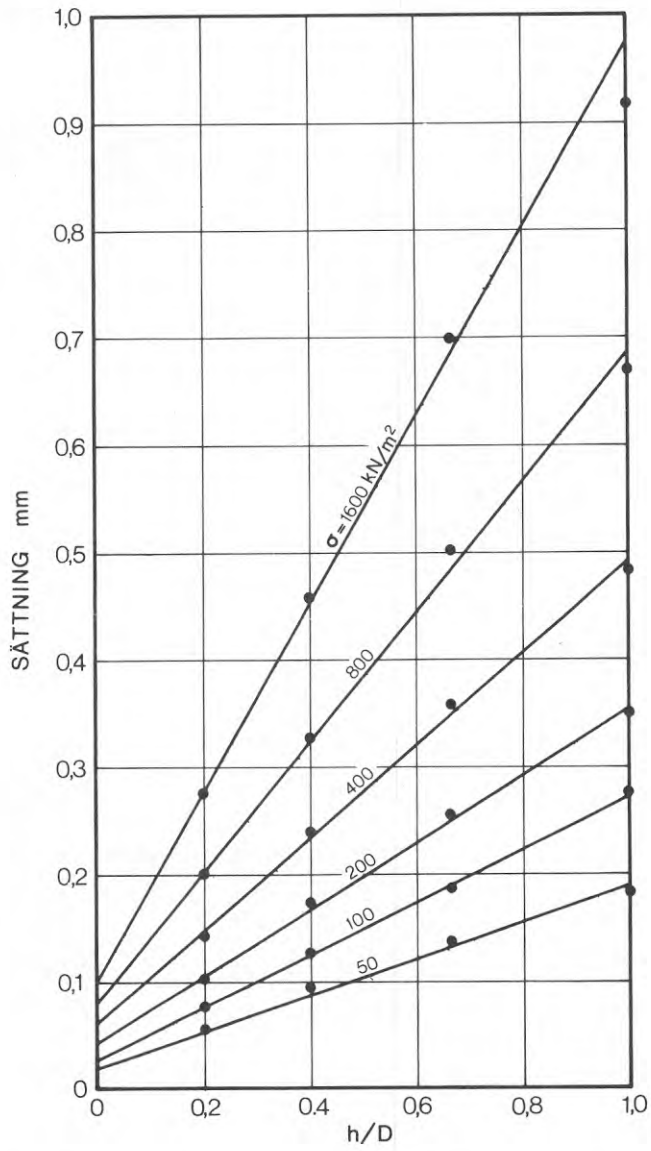


FIG. 40. Sättning i mm som funktion av h/D vid olika spänning. Spänningen är reducerad med hänsyn till ringfriktionen. Fast lagring, $e_0 = 0,67$.

Settlements in mm at different stresses in relation to the ratio h/D . The stress is reduced with regard to the ring friction. Dense state, $e_0 = 0.67$.

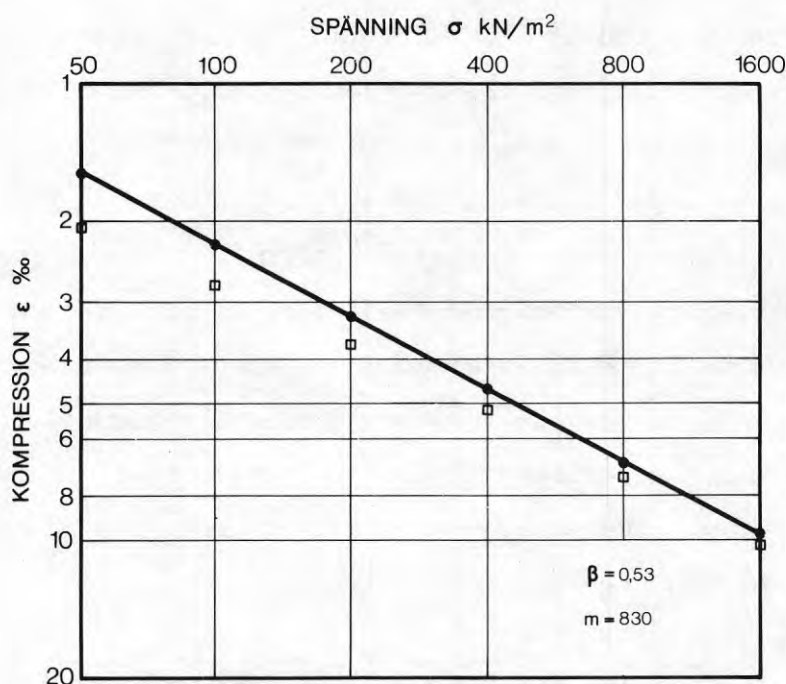


FIG. 41. »Sann» kompression vid fast lagring, korrigerad med hänsyn till såväl ringfriktion som dålig stämpelanläggning. □ direkt beräknade värden; ● värden som flyttats ett konstant stycke $\Delta\epsilon$ för att falla på en rät linje.

»True» compression at a dense state, corrected with regard to both ring friction and poor top plate connection. □ directly computed values, ● values corrected with a constant $\Delta\epsilon$ in order to form a straight line.

För att kontrollera resultatet i fig. 41 gjordes kompletterande försök, där den dåliga anläggningen mellan stämpel och prov i görligaste mån eliminerades. Ödometerhöjden 33 mm användes - det tidigare uppmätta m -värdet var 560 för $e_0 = 0,67$, jämför fig. 39. För att få god kontakt mellan stämpel och prov ströks på stämpeln ut ett 1,5 mm tjockt lager hårdplast (plastic padding) av relativt fast konsistens, varpå stämpeln place-

rades på den på vanligt sätt avjämnade provytan. När plasten härdat belastades provet på vanligt sätt. Två försök utfördes, som båda redovisas i fig. 42. Försöken var identiska så när som på att plastskiktet före härdning var lösare vid försök a än vid försök b. Det kan vara värt att nämna hur försöksvärdena korrigerades vid dessa försök - normalt brukar försöksvärdena korrigeras för att man skall få en så rät linje som möjligt. Ur de direkt avlästa kompressionsvärdena tolkades $m = 800$ à 900 och $\beta \approx 0,5$. Vid försöken ställdes mätklockan på noll då endast stämpeln låg på, och provet var då belastat med $1,4 \text{ kN/m}^2$. Den kompression provet undergick då stämpeln lades på blir ungefär

$$\frac{1}{m\beta} \left(\frac{1,4}{\sigma_j} \right)^{0,5} = \frac{1}{800 \cdot 0,5} \left(\frac{1,4}{100} \right)^{0,5} = 0,3 \text{ } \text{o}/\text{o}$$

Dessa $0,3 \text{ } \text{o}/\text{o}$ adderades till samtliga kompressionsvärden och spänningen justerades med hänsyn till ringfriktionen varpå värdena ritades direkt enligt fig. 42. De på detta sätt framtagna kompressionskurvorna stämmer mycket bra med den "sanna" kompressionskurvan i fig. 41.

Kompletterande försök gjordes också för att utröna om kornformen hade någon avgörande inverkan på friktionen mellan ring och jord. Därvid användes ödometerringen med $h = D = 83 \text{ mm}$. Försök gjordes dels på Simrishamnsgrus 2-4 mm (ett mycket rundkornigt material), dels på Gråbogrur 2-4 mm (kantigt material). Friktionskraften blev 36 till 38% av den pålagda lasten för båda materialen.

Sammanfattningsvis kan man som resultat av denna undersökning sägas att ringfriktionen visserligen inverkar men spelar en ganska obetydlig roll vid tolkning av kompressionsförsök så länge ödometers diameter är ca två gånger så stor som höjden. Däremot inverkar anläggningen mellan stämpel och jord i så hög grad vid försök på fast lagrat material att man

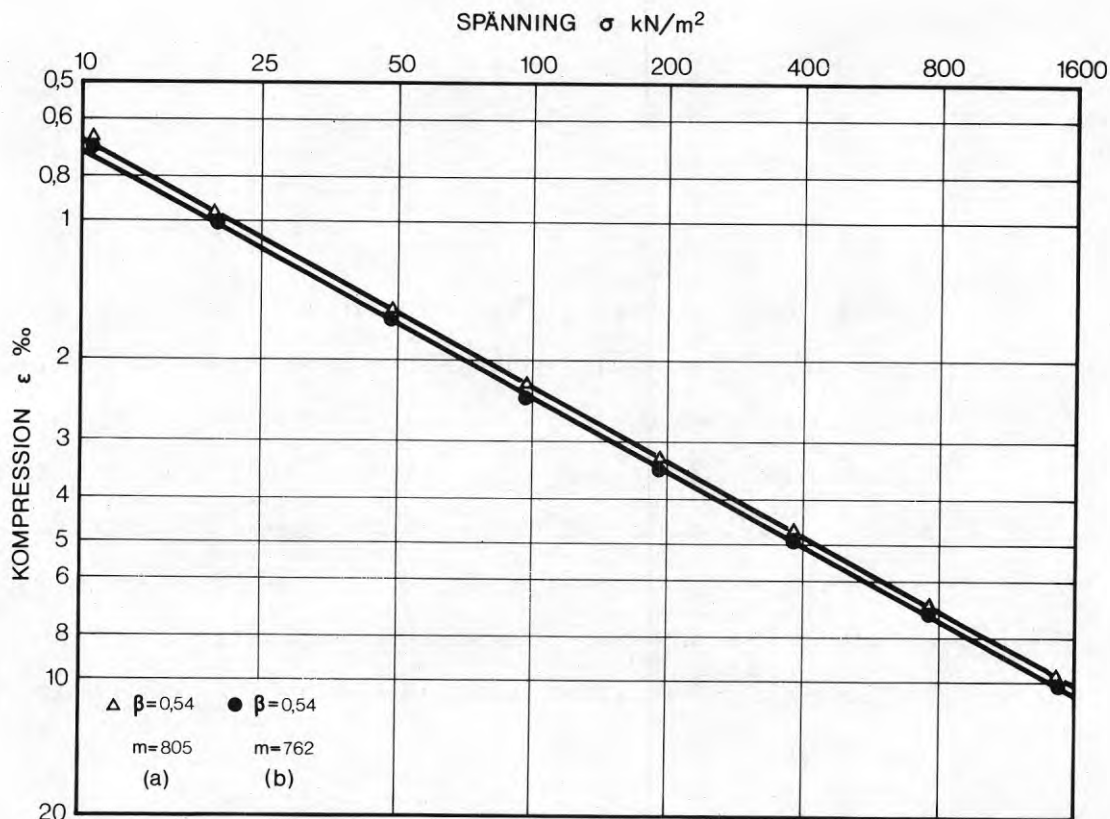


FIG. 42. Kompressionsförsök med ett härdplastsikt mellan stämpel och prov. Spänningen har justerats med hänsyn till ringfriktionen, men ingen justering har gjorts med hänsyn till dålig anliggning mellan stämpel och prov. Provhöjd 33 mm, $e_0 = 0,67$ (fast lagring).

Compression tests with a layer of thermosetting resin between the top plate and the sample. The stress has been corrected with regard to the ring friction but no adjustments have been made due to poor connection between top plate and sample. Sample height 33 mm, $e_0 = 0.67$ (dense state).

inte kan bortse från den vid användning av låga ödometrar. Det lämpligaste förhållandet höjd:diameter synes vara 1:1 - då kompenseras friktionen på ett ungefär av ojämnheter mellan stämpel och jord.

3.2 Jordens egenskaper

Kompressionsmodulen vid förstagångsbelastning av friktionsjord bestäms av hur jorden är sammansatt. De egenskaper som främst påverkar kompressibiliteten är

1. Lagringen
2. Graderingen
3. Kornstorleken
4. Kornformen

Dessutom inverkar vattenhalten, men denna undersökning begränsas till jord som uppträder som ren friktionsjord, dvs. jord där porvinkelvatten ej inverkar på effektivspänningen. Om jorden är helt torr eller helt vattenmättad är kompressions-egenskaperna likartade så länge det är fråga om sandjordar. För exempelvis sprängsten är förhållandena annorlunda, eftersom vattnet har inverkan på hållfastheten hos grövre korn. Detta problem behandlas emellertid ej här (har behandlats bl a av Lindblom, 1972).

3.2.1 Lagringen

Lagringen torde vara den faktor som påverkar kompressibiliteten mest. Som mått på lagringen brukar man använda antingen ett relativt värde, vanligen lagringstätheten $I_D = (e_{\max} - e) / (e_{\max} - e_{\min})$ eller ett mått på porvolymen, exempelvis por-talet e . Lagringstätheten I_D kan förefalla vara ett mycket lämpligt mått, eftersom detta oberoende av storleken på e_{\max} och e_{\min} talar om ifall man har lös eller fast lagring. Tyvärr finns ingen internationell norm för bestämning av e_{\max} och e_{\min} . Ett förslag till svensk norm finns emellertid (SGF:s laboratoriekommitté, 1971), enligt vilket e_{\min} bestäms antingen genom instampning vid optimal vattenhalt eller genom vibrering. e_{\max} bestäms på torkat material genom att materialet får strila genom en tratt ner i provcylindern med trattmynningen högst två cm över jordprovets yta. Dessa metoder ansluter i stort sett till gängse utländska metoder. En något avvikande metod för bestämning av e_{\min} anges av Muhs (1957). Denna metod kan liknas vid en vibrering av provet utan last på provytan:

i helt vattendränkt tillstånd packas provet genom att provcylindern utsättes för 30 dubbelslag med en "slaggaffel".

När det gäller sambandet mellan kompressionsmodulen och I_D kan man konstatera att i flertalet undersökningar som finns redovisade har inte kompressibiliteten satts i relation till lagringstätheten. Det existerar visserligen för en och samma jord ett klart samband mellan kompressibilitet och lagringstäthet, men, som Moussa (1961) konstaterar: "Es ist leicht einzuschen, dass diese Konstanten (som ger sambandet mellan lagringstäthet och kompressibilitet) jeweils nur für die betrachtete Sandart gelten und sich in keinem allgemeingültigen, funktionellen Zusammenhang zur bezogenen Dichte bringen lassen, da die bezogene Dichte $D_r (= I_D)$ keine Bodenkennziffer ist, sondern lediglich die Lagerungsform, unabhängig von der Bodenart, beschreibt". Eftersom man således, förutom lagringstätheten, måste använda också någon annan (eller andra) materialkonstant(er) för att beskriva kompressibiliteten, så har Moussa (1961), Tammirinne (1969) m. fl. valt att i stället använda portalet e som mått på lagringen.

Absolutbeloppet av portalet e är inte något mått på lagringen, eftersom såväl e_{\max} som e_{\min} kan variera inom vida gränser beroende på jordens sammansättning. I kombination med en lämplig materialkonstant utgör emellertid portalet ett mått på lagringen. Denna materialkonstant behöver ej byggas upp med hjälp av e_{\max} och e_{\min} , eftersom dessa beror av jordens sammansättning. Exempelvis existerar ett klart samband mellan å ena sidan graderingskoefficienten och å andra sidan e_{\max} och e_{\min} , fig. 47. Att slippa e_{\max} och e_{\min} är en inte oväsentlig fördel, eftersom dessa, speciellt då det gäller grövre jordar, kan vara svåra att bestämma på ett entydligt sätt.

Hittills har jag endast diskuterat densiteten utan hänsyn till att mineralkornen också vid samma densitet kan ha olika struktur. Man kan göra modeller av en jord, som vid samma portal har olika struktur, fig. 43.

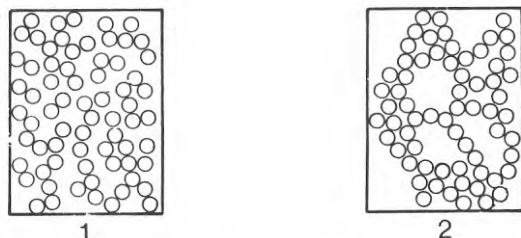


FIG. 43. Enkla modeller av en jord med två olika strukturmönster men samma portal (efter Pusch, 1972).

Simple models of a soil with two different structures but the same void ratio (Pusch, 1972).

Olika strukturer vid samma portal bör man kunna åstadkomma genom olika inpackningsmetoder. För att undersöka inverkan av olika inpackningsmetoder på kompressibiliteten utfördes därför en undersökning i CTH:s sandödometer.

För undersökningen användes en sandfraktion 0,5 - 1,0 mm, samma sand som användes vid mätning av ringfriktionen, se avsnitt 3.1. Denna sand packades in i ödometern på olika sätt, se teckenförklaringen till fig. 44. Gemensamt för alla inpackningsmetoderna var att ödometern var försedd med krage under inpackningen, och att sanden var helt torr. Efter inpackningen togs kragen bort och överytan avjämnades med linjal. Vid belastningen påfördes lasten i steg med fördubbling av lasten för varje laststeg.

Resultaten från kompressionsförsöken tolkades för samma β -värde, fig. 44. Kompressibiliteten hos varje prov kan då entydigt beskrivas med modultalet m . Eftersom kompressibiliteten hos olika prov med i princip samma inpackningsmetod

bör vara beroende av enbart portalet, skall man således kunna se om inpackningsmetoden påverkar kompressibiliteten genom att rita modultalet som funktion av portalet och undersöka om funktionen är densamma oberoende av inpackningsmetoden.

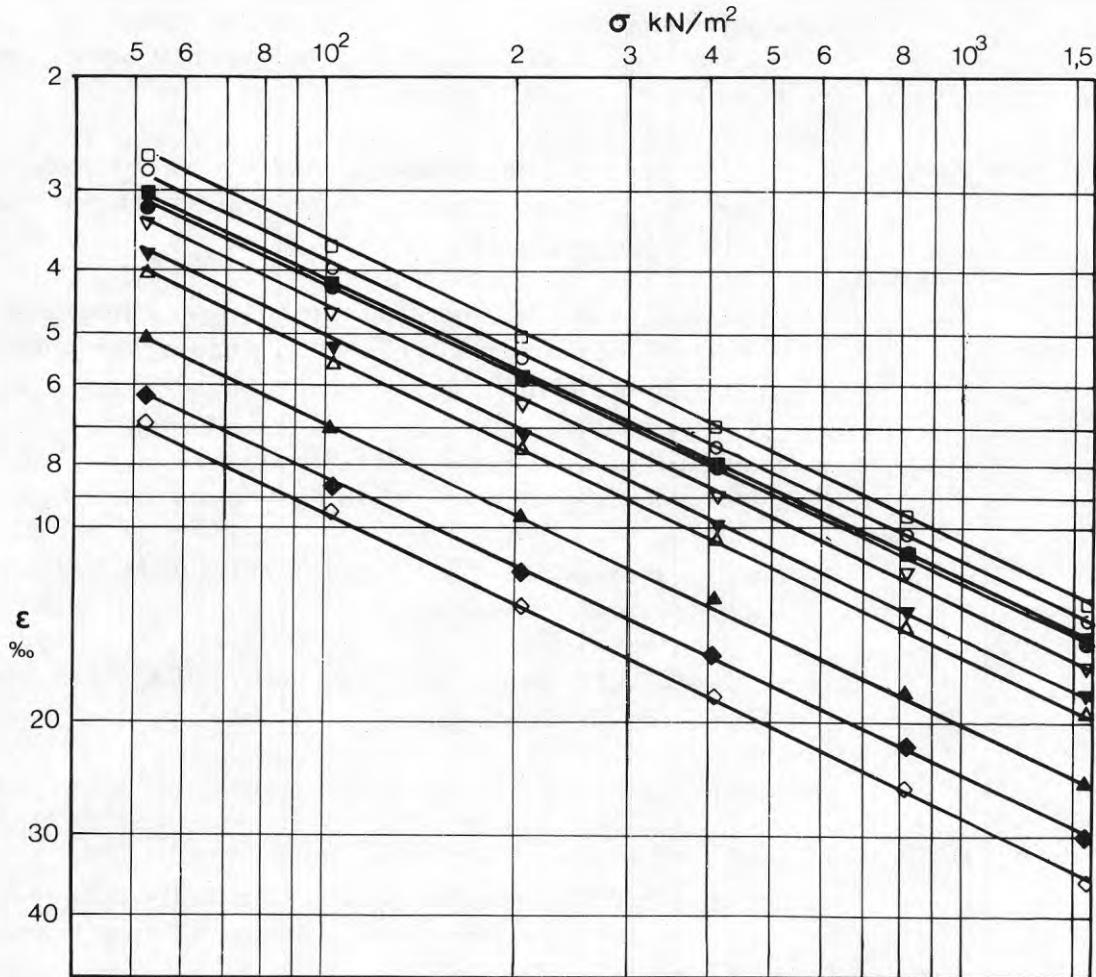


FIG. 44. Kompressionsförsök på sand 0,5 – 1,0 mm. Sanden är inpackad på olika sätt enligt teckenförklaringen nedan. En kurva från varje inpackningsmetod är redovisad. Kurvornas lutning motsvarar spänningsexponenten $\beta = 0,47$. Ödometer: CTH:s sandödometer.

Compression tests on sand 0.5 – 1.0 mm, compacted in different ways. The slope of the curves correspond to the stress exponent $\beta = 0.47$. Oedometer: The CTH sand oedometer.

Symboler, se nästa sida

- Sanden sedimenterad ned i ödometern medelst siktning genom sikt 1,0 mm. Sikten placerad 20 cm över ödometerens överyta.
- Sanden sedimenterad ned i ödometern medelst siktning genom sikt 1,0 mm. Sikten placerad 3 cm över ödometerens överyta.
- Sanden löst ihälld i ödometern till kragens överyta (jämför fig. 3:4), varefter ödometern vibrerades i 30 sek på en plattvibrator.
- ▽ Sanden löst ihälld i ödometern till kragens överkant, varefter ödometern bearbetades genom 16 dubbelslag med en "slag-gaffel".
- ▼ Sanden löst ihälld i ödometern till kragens överkant, varefter ödometern bearbetades genom 4 dubbelslag med slag-gaffeln.
- Sanden inpackad i tre skikt. Varje skikt packades genom stampning med ett lätt packningsredskap.
- △ Sanden löst ihälld från bågare, som hölls i jämnhöjd med kragens överyta.
- ▲ Sanden ihälld genom en tratt, som hölls 7 cm över ödometerens överkant.
- ◆ Sanden ihälld genom en tratt, som hölls 5 cm över ödometerens överkant.
- ◇ Sanden ihälld genom en tratt, som hölls omedelbart över sandens överyta på så sätt att sanden rasade ner i naturlig rasvinkel.

Relationen mellan modultal och portal är redovisat i fig. 45. Sambandet är inte helt entydigt utan kan tolkas på ett par olika sätt. Slopas man de tre punkter som markerar direkt lös ifyllning får man med ganska liten spridning $m = 200 e_0^{-2,5}$. Slopas man å andra sidan den punktsvärm som ligger mellan $e_0 = 0,65$ och $e_0 = 0,75$ (fast lagring), så finner man sambandet $m = 190 e_0^{-3,5}$. Med denna relation får man också $m \approx 800$ för $e_0 = 0,67$, vilket överensstämmer med undersökningen i avsnitt 3.1. Förklaringen

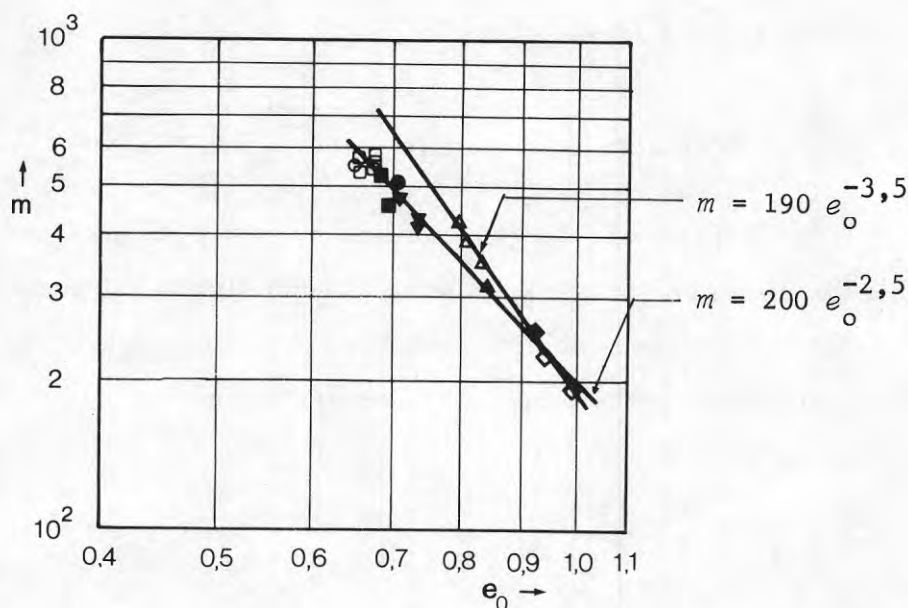


FIG. 45. Kompressionsmodultalet m som funktion av begynnelserportalet för sand 0,5 – 1,0 mm, inpackad på olika sätt.

The modulus number m in relation to the initial void ratio for sand 0.5 – 1.0 mm, compacted in different ways.

till avvikelserna i fig. 45 kan alltså vara följande. Vid lös lagring (inklusive direkt, lös ifyllning) blir provets ytskikt så löst att effekten av dålig stämpelanläggning utjämnas på ett tidigt stadium och ej nämnvärt påverkar kompressionen. Vid fast lagring däremot så är effekten av dålig stämpelanläggning markant. Någon skillnad härvidlag mellan de olika inpackningsmetoder som ger fast lagring kan man inte se.

Slutsatsen av denna undersökning blir att packningsmetoden påverkar anläggningen mellan stämpel och prov (vilket redan var bekant, se avsnitt 3.1), men att inpackningsmetoden i övrigt inte inverkar på resultatet så länge man håller sig till de "vanliga" inpackningsmetoderna, såsom vibrering, stampning med lätt redskap o. s. v.

Man kan i övrigt när det gäller packningsgraden kort konstatera, att den är en faktor som inverkar i mycket hög grad på kompressionsmodulen. Man kan ur Moussas (1961) och Tamminnes (1969) undersökningar dra slutsatsen att kompressionsmodulen för sandjordar är ungefär fem gånger så stor vid fast

lagring som vid lös lagring.

3.2.2 Graderingen

Graderingen bestäms inom geotekniken så gott som uteslutande genom siktning och (för finkornig jord) slamning. Vid dessa båda analyser bestämmer man inte riktigt samma sak. Vid siktning analysen bestämmer man mineralkornens mellanmått, det $s_k b$ -mättet, se fig. 46.

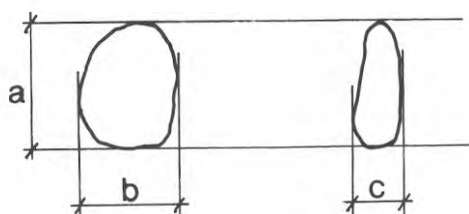


FIG. 46. De tre karakteristiska måtten för en mineralpartikel (enligt Krumbein, 1941).
Characteristic dimensions of a particle according to Krumbein (1941).

Vid slamningsförsök däremot bestämmer man inget av de karakteristiska måtten, utan bestämmer i stället diametern hos partiklarna med hjälp av Stokes lag under antagande av att partiklarna har sfärisk form. Det är därför rimligt att anta, att en viss form på kornkurvan kan ha olika betydelse beroende på om kurvan bestämts genom siktning eller slamning. Detta förhållande kan behöva beaktas om man som materialkonstant använder exempelvis $C_u = d_{60}/d_{10}$, och d_{10} ligger inom den del av kornkurvan som bestämts genom slamningsanalys: beloppet av d_{10} kan då avvika från det värde som skulle erhållits vid en siktanalys. Siktanalys är emellertid möjlig för alla rena friktionsjordarter, och det är först för mellanjordarten silt man behöver tillgripa slamningsanalys.

Graderingen har stor inverkan på en del egenskaper hos friktionsjord. Framför allt inverkar den på densiteten men påverkar

också packningsbarhet, kompressibilitet m. m.

Inom geotekniken används framför allt graderingskoefficienten $C_u = d_{60}/d_{10}$ som mätetal för graderingen. Detta mätetal utformades ursprungligen (Hazen, 1920) för att tillsammans med d_{10} användas vid dimensionering av filter. C_u har emellertid visat sig mycket användbar för beskrivning av kornkurvan. Så t. ex. kan man för "normala" kornfördelningar finna ett samband mellan C_u och densiteten vid fastaste och lösaste lagring, fig. 47.

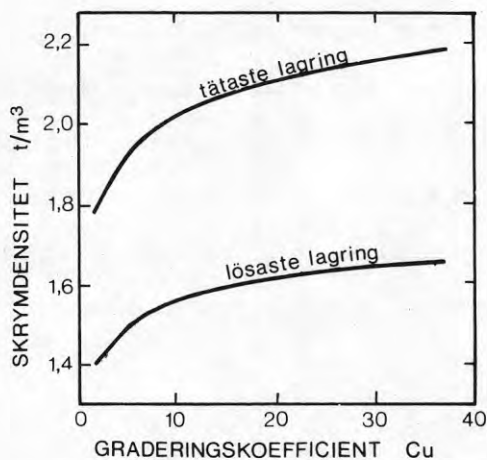


FIG. 47. Densiteten vid tätaste och lösaste lagring som funktion av graderingskoefficienten C_u för blandningar av Östersjösand (Siedek-Voss 1955).

The density in the densest and loosest state in relation to the coefficient of uniformity C_u for mixtures of Baltic sands (Siedek-Voss 1955).

Graderingskoefficienten C_u är emellertid endast ett tämligen begränsat mått på kornkurvans lutning, och flera andra mätetal används därför också. Bureau of Reclamation (Wagner, 1957) använder $C_A = d_{30}^2/d_{60} \cdot d_{10}$ vid sidan av C_u ; C_A utgör då ett mått på kurvans krökning. Inom sedimentologien används ofta kvartilvärdena d_{25} och d_{75} , och inom betongtekniken används den s. k. finhetsmodulen, som är ytan mellan kornkurvan och $d = 0,125$ mm (varvid en ytenhet är den fulla stapeln, 100%, mellan två diametrar d_0 och $2d_0$).

För att närmare studera vilket mätetal för kornkurvan som är mest relevant utfördes en undersökning på sand. Eftersom de tekniska egenskaperna hos sand även påverkas av kornformen m. m. så tillverkades en rad blandningar med olika kornkurvor men i övrigt lika material på följande sätt: Vanlig betongsand (slipsand) från Gråbo utanför Göteborg uppdelades i fraktioner genom noggrann siktning. Allt finmaterial tvättades noga bort, varje fraktion tvättades på sin egen sikt. Materialet torkades sedan vid 105°C . Genom att blanda de erhållna fraktionerna på olika sätt kunde sedan kornkurvor av önskat utseende tillverkas.

Som relationstal vid jämförelse mellan de olika blandningarna valdes portalet vid en standardiserad lagring. Denna lagring åstadkoms på följande sätt: En cylindrisk behållare med lös krage, fig. 48, fylldes med löst material, som avjämnades med linjal vid kragens överyta. Behållaren spändes sedan fast på en vibrator och vibrerades i en minut. Därefter togs kragen bort

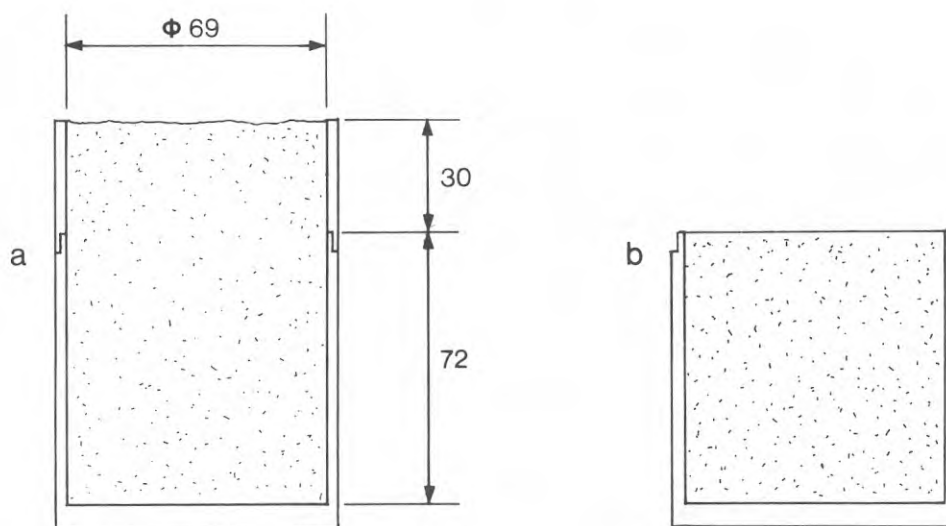


FIG. 48. Behållare för bestämning av portal vid packning genom vibrering. Behållarens volym = 273 cm^3 .

- a) Behållaren fylld med material före vibrering
- b) Materialets överyta avplanat efter vibrering.

Container for vibro-compaction of sand. The volume of the container = 273 cm^3 .

- a) The container filled with sand before vibration
- b) The top surface levelled after compaction.

och sandens överyta avplanades med linjal, varefter behållaren med innehåll vägdes. För varje sandblandning gjordes minst tre bestämningar av portalet, varefter medelportalet utvärderades. Maximala felet med denna metod uppskattas till en enhet i andra decimalen, dvs $\Delta e = 0,01$. Undantag får dock göras för vissa blandningar med partikelsprång, där felet kan vara något större beroende på att det visade sig svårt att få den inpackade massan helt homogen.

Inledningsvis undersöktes de "rena" fraktionerna, se fig. 49 a. Rimligtvis skall dessa ge samma portal under förutsättning att kornformen är lika och behållarens volym är tillräcklig för undvikande av störningar. Portalet efter packning visade sig också vara oberoende av kornstorleken, se fig. 49 b. Inverkan av lilla provvolymen visade sig för fraktion 4-8 mm omöjliggöra någon bestämning eftersom variationerna var alltför stora. Främst berodde detta på att avplaningen av överytan före vägning var svår att göra.

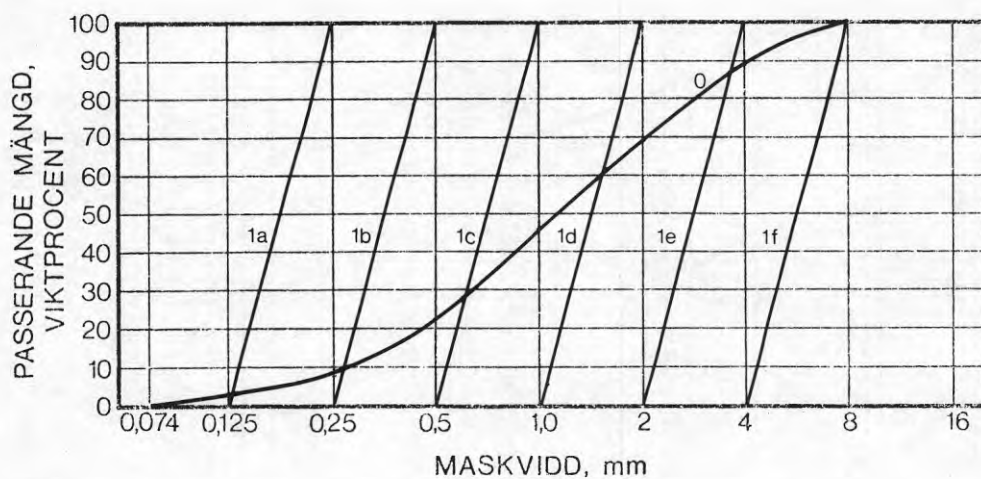


FIG. 49a. »Rena» fraktioner, använda för undersökning av kornstorlekens inverkan. Fraktion 4-8 mm hade för stora korn med hänsyn till provvolymen och gav inget entydigt resultat. Utgångsmaterialet (tvättat på 0,074-sikten) utgör kurva 0.

»Pure» fractions, used for investigation of the influence of the grain size on the void ratio. The grain size of the fraction 4-8 mm was too large with regard to the sample volume and gave no uniform results. The fractions were made by sieving the sand represented by curve No. 0.

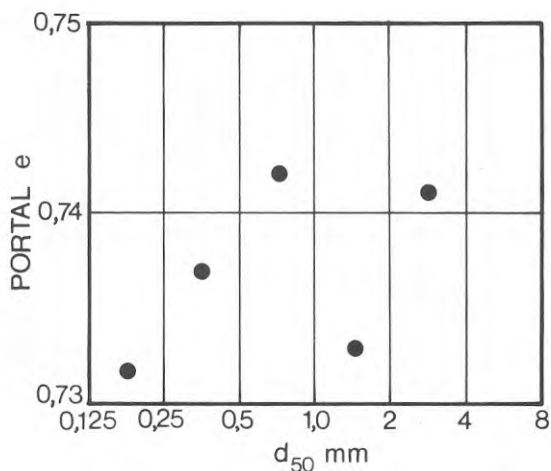


FIG. 49b. Kornstorleken inverkan på portalet efter packning. Kurva 0 gav portalet 0,45.
Void ratio after compaction in relation to the grain size. Curve No. 0 gave the void ratio 0.45.

Resultatet enligt fig. 49 b är anmärkningsvärt såtillvida som att det strider mot vissa tidigare undersökningar. Kolbuszewski och Frederick (1963) redovisade ett tydligt samband mellan kornstorleken och porositeten, se fig. 50.

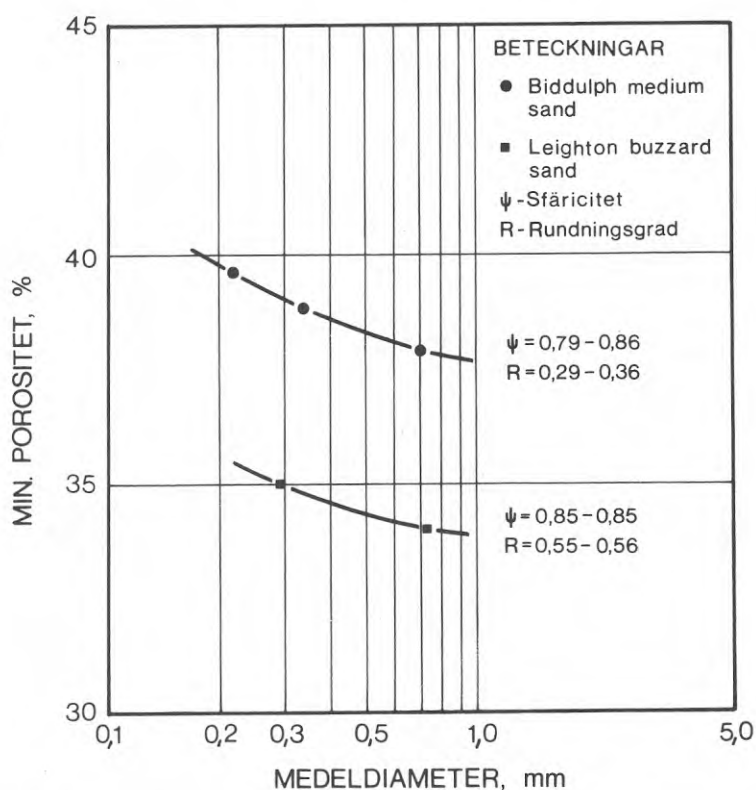


FIG. 50. Porositeten vid tätaste lagring som funktion av medeldiametern enligt Kolbuszewski och Frederick (1963).

Variation of minimum porosity with particle size for sands according to Kolbuszewski and Frederick (1963).

Enligt fig. 49 b är portalsvariationen så liten att den ligger inom felmarginalen, då kornens diameter d_{50} ändras från 0,18 mm till 2,8 mm. Enligt fig. 50 minskar emellertid portalet då korndiametern ökar. De olika resultaten kan förklaras med att kornformen kan vara beroende av kornstorleken, och portalet påverkas i hög grad av kornformen. Kornformen hos Gråbo-materialet syns emellertid vara i stort sett oberoende av kornstorleken - jämför fig. 63, där foton av samtliga fraktioner visas. Vidare kan de sorterade fraktionerna ha olika kornstorleksfördelningar, jämför kurva 0 i fig. 49 a, som har olika krökning inom olika fraktionsgränser. Oberoende av vilket resultat som är det rätta kan vi emellertid konstatera, att då vi har ett material där kornstorleken ej påverkar portalet, så lämpar sig detta material väl för studier av enbart grade-ringens inverkan.

Av de sorterade fraktionerna tillverkades flera olika blandningar, se fig. 51, och för varje blandning bestämdes portalet efter packning på ovan beskrivet sätt.

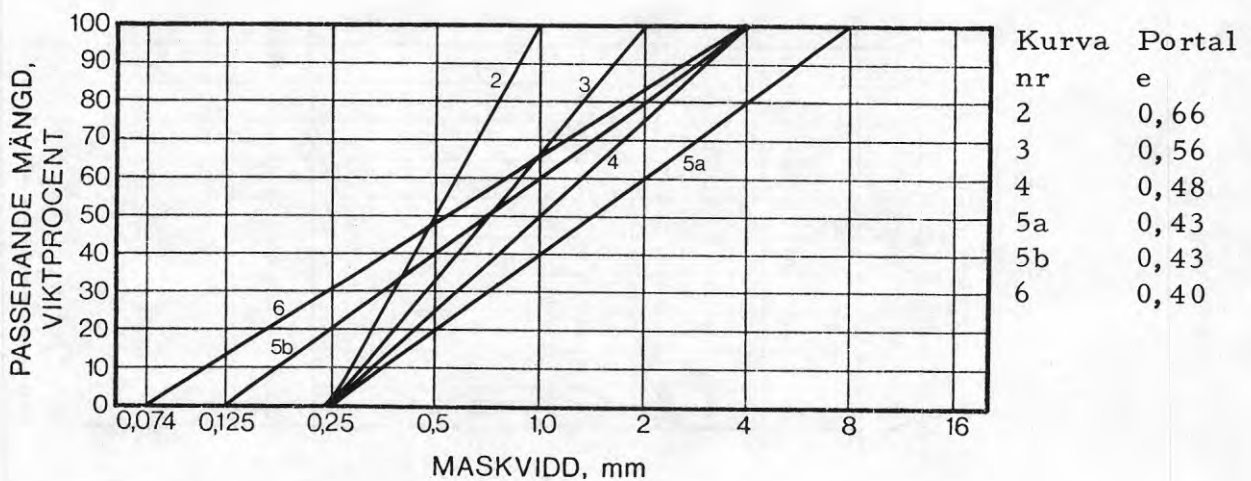


FIG. 51a. Kornkurvor i form av räta linjer.

Grain size curves represented by straight lines.

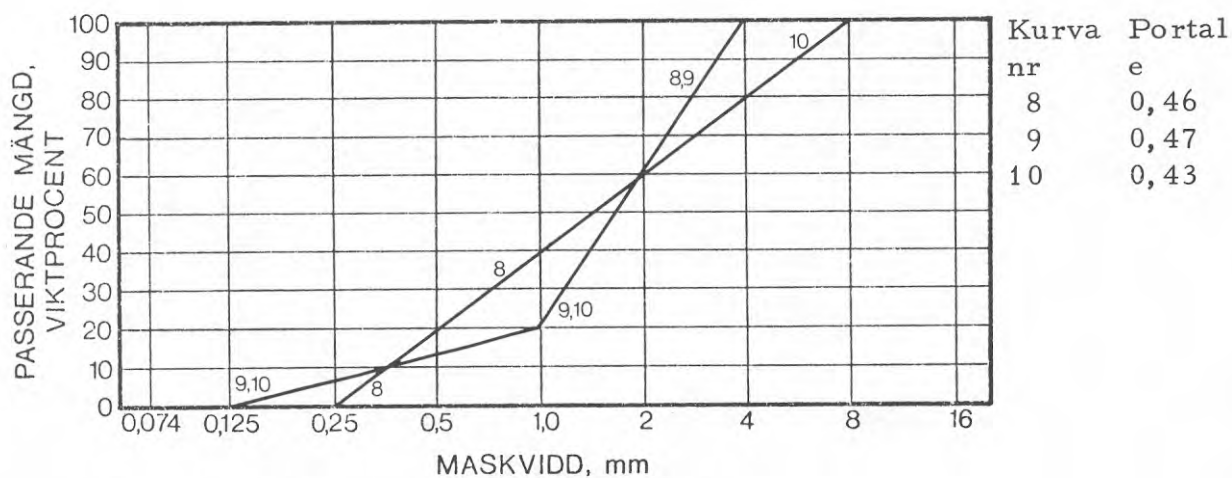


FIG. 51b. Kornkurvor med samma graderingskoefficient C_u .

Grain size curves with the same coefficient of uniformity C_u .

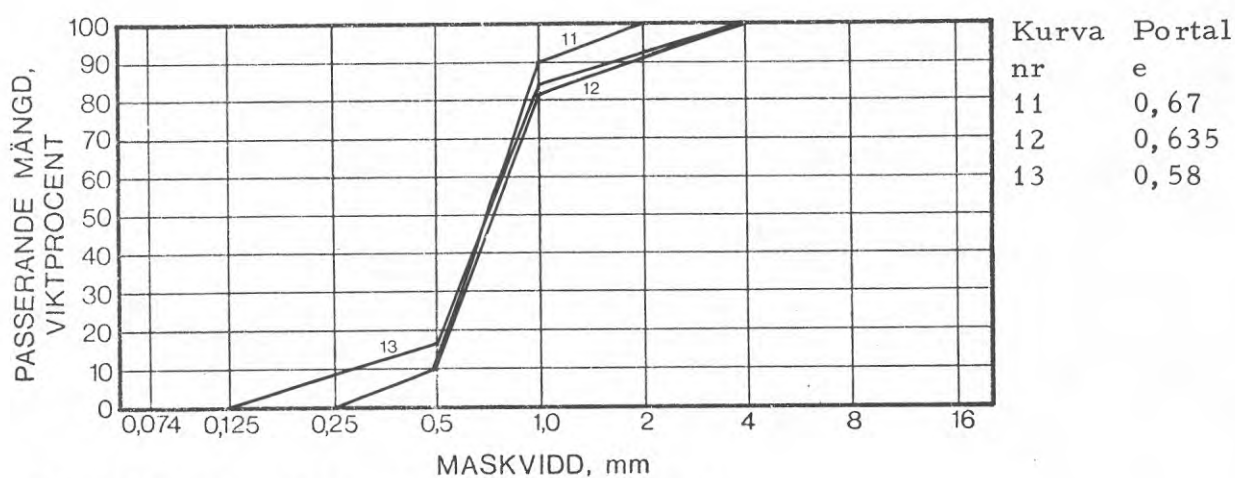


FIG. 51c. Kornkurvor med smärre skillnader endast vid ändarna.

Grain size curves which differ at the end parts.

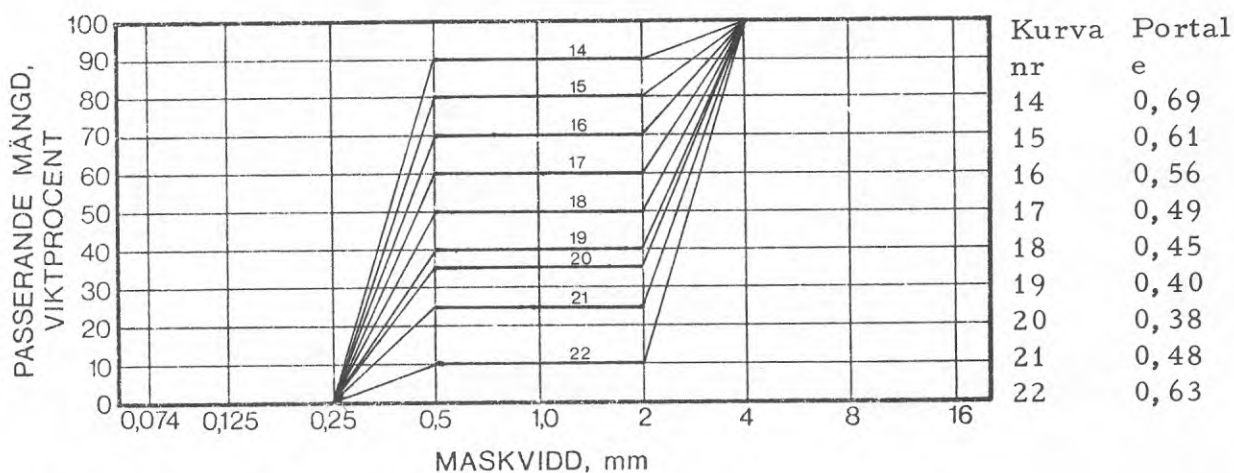


FIG. 51d. Kornkurvor med partikelsprång.

Grain size curves with discontinuous distributions.

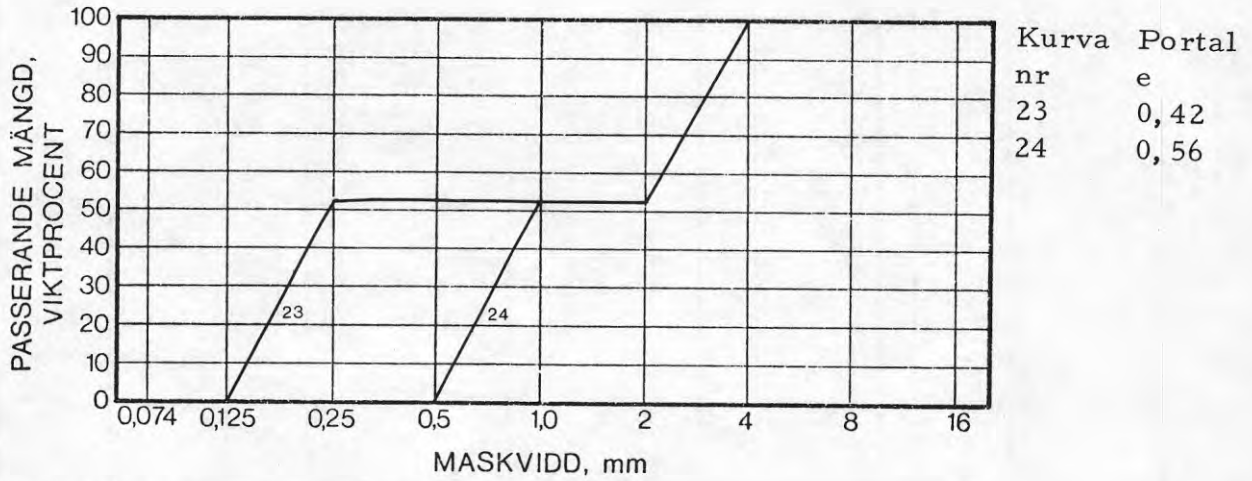


FIG. 51e. Kornkurvor med olika stora partikelsprång.

Grain size curves with small and large discontinuities.

Om man på de undersökta blandningarna applicerar den gängse metoden att beskriva kornkurvan med graderingskoefficienten C_u finner man att denna ej är tillräcklig för att beskriva materialets egenskaper, se fig. 52. Inte heller någon annan av de vanligen förekommande metoderna är tillräcklig för att beskriva alla de undersökta blandningarna.

Som framgår av fig. 52 visar kurvorna 1-6 ett entydigt samband mellan e och C_u , vilket är helt rimligt eftersom dessa kurvor utgöres av rätta linjer och C_u är en fullgod beskrivning av lutningen hos en rät linje. Kurvorna med partikelsprång (14-24) går däremot ej att beskriva med hjälp av C_u . Dessa blandningar kan vara värda ett närmare studium.

För att få en enkel bild av hur blandningar av fint och grovt material fungerar kan man tänka sig två modeller:

1. Finmaterial med grova partiklar "svävande" i det fina materialet. Om finmaterialets portal är e_0 och viktsandelen finmaterial a så är blandningens portal $e_1 = ae_0$.

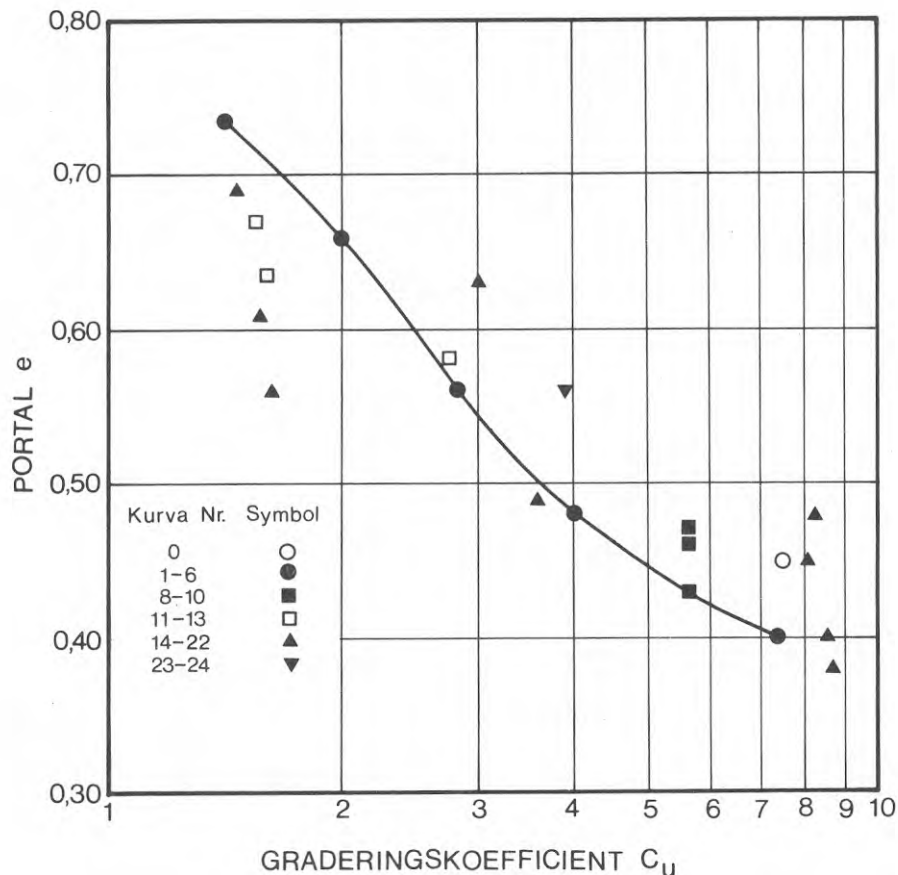


FIG. 52. Portalet vid fast lagring som funktion av graderingskoefficienten C_u .
Minimum void ratio in relation to the coefficient of uniformity C_u .

2. Grovmaterial med fint material i porerna utan att det grova materialet rubbas. Om grovmaterialets portal är e_0 , viktsandelen finmaterial a och andelen grovmaterial $b (= 1-a)$ så är blandningens portal $e_2 = be_0 - a$.

Blandningens minimiportal enligt detta resonemang fås när $e_1 = e_2$ eller $ae_0 = be_0 - a$, dvs då blandningens finmaterialhalt $a = e_0 / (2e_0 + 1)$. För vårt material är $e_0 = 0,74$, och a blir då 30% samt $e_{\min} = 0,22$. De teoretiska kurvorna är inlagda i fig. 53, där de jämförs med uppmätta värden (kornkurvorna 14 - 22). Som framgår av figuren avviker de empiriska värdena från de teoretiska. Orsaken härtill är att villkoren under 1 och 2 ovan inte är helt uppfyllda. Då finmaterialhalten är större än 30% antas de grova kornen sväva i finmaterialet utan

att dess portal påverkas, men rimligare är att anta att finmateriallets portal ökar genom randeffekter vid anliggningen mot de grova kornen. Då finmaterialhalten är mindre än 30% antas de grova kornen inta lägen som inte påverkas av de finare kornen, men mycket mera sannolikt är att finare korn tränger in också mellan de grova kornen, särskilt med hänsyn till att inpackningen skedde under vibrering. Enligt detta resonemang skall också för ett och samma blandningsförhållande mellan fint och grovt material portalet minska ju större skillnaden i kornstorlek är. Detta visar sig också vara fallet, jämför blandningarna 23, 18 och 24, som har ungefär samma blandningsförhållande och portalen 0,42, 0,45 resp. 0,56 samt förhållandet mellan grova och fina kornens diametrar = 16, 8 resp. 4.

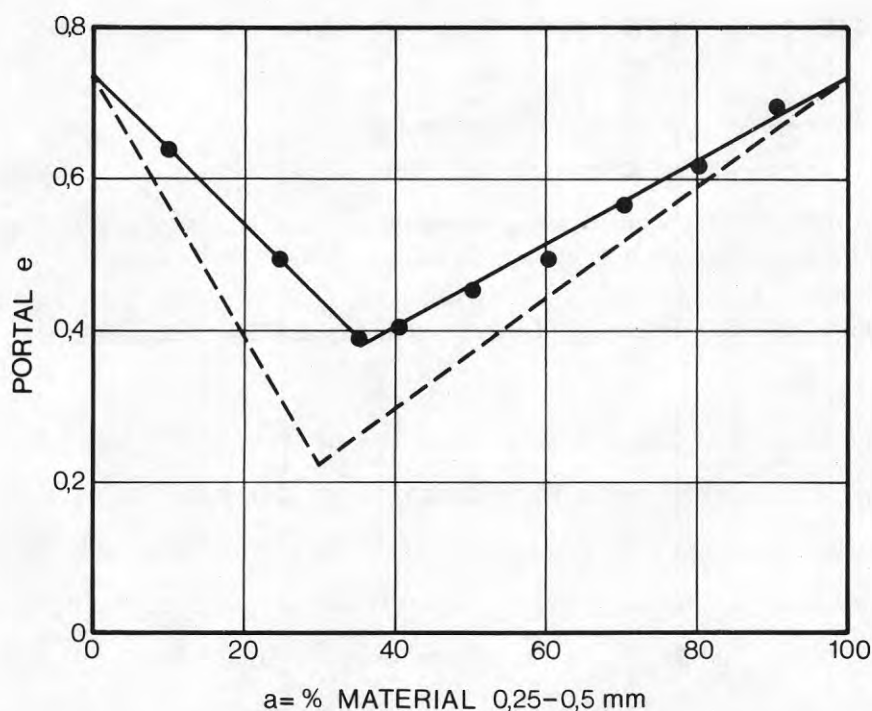


FIG. 53. Portal hos blandningar av fraktionerna 0,25–0,5 och 2–4 mm. ● uppmätta värden; --- teoretiska värden enligt formlerna $e_1 = a e_0$ resp. $e_2 = (1 - a)e_0 - a$.

Void ratio for mixtures of the fractions 0.25–0.5 and 2–4 mm. ● measured values; --- theoretical values computed from the formulas $e_1 = a e_0$ and $e_2 = (1 - a)e_0 - a$.

Man kan i fig. 53 se att portalsminimum fås då halten av fint material är mellan 30 och 40%. Detta gäller även andra jordar än de här undersökta, vilket framgår av fig. 54, där en undersökning av Floss, Siedek & Voss (1969) redovisas.

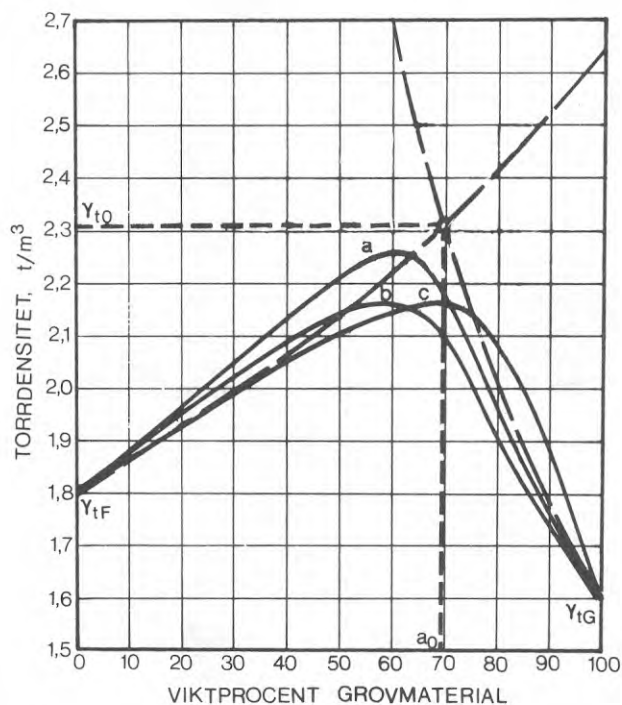


FIG. 54. Torrdensiteten som funktion av grovmaterialhalten hos blandningar av a) lera och grovsand b) lera and finsand c) silt och krossad kalksten (Floss *et al.*, 1969).

The dry density in relation to the amount of coarse material for mixtures of a) clay and coarse sand b) clay and fine sand c) silt and crushed limestone (Floss *et al.*, 1969).

När det nu gäller att välja ett representativt mätetal för kornkurvan, så är kravet på detta mätetal att det skall vara enkelt att bestämma, vara oberoende av kornkurvans läge och för jordar med partikelsprång ha ett extremvärde då partikelsprånget ligger vid d_{30} à d_{40} . Ett studium av de i fig. 51 redovisade resultaten visar att ingen av de gängse metoderna med karakteristiska diametrar är tillräcklig - någon form av "ytmått" måste användas. Ett ytmått, som någorlunda fyller de uppställda kraven, visas i fig. 55. Om man av de visade ytorna A_1 och A_2 bildar ytmåttet $A = A_1 + 0,5 A_2$, så fås ett tämligen bra mätetal för kornkurvan, se fig. 56 där detta mätetal ställs i relation till de uppmätta portalen.

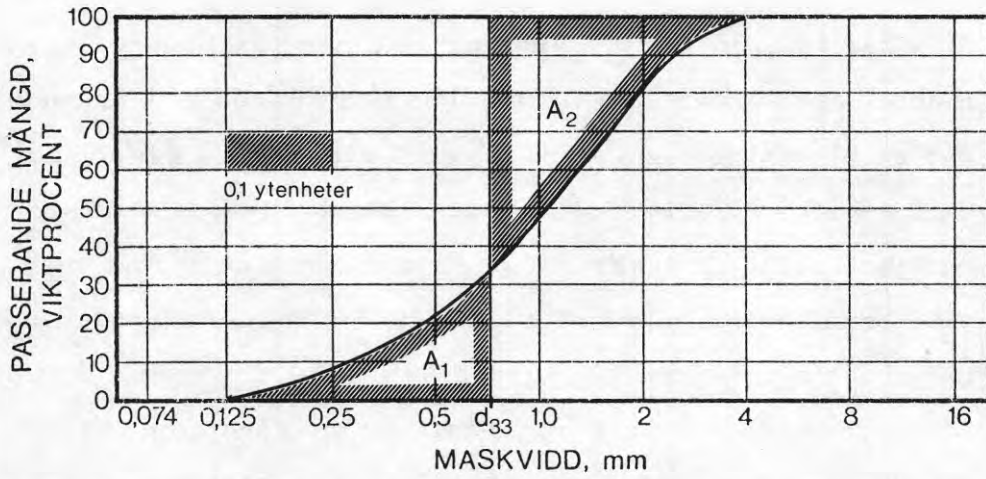


FIG. 55. Mätetal för kornkurvan: $A = A_1 + 0,5 A_2$. 1 ytenhet = den fulla stapeln (100 %) som bildas mellan d_0 och $2 d_0$.

Measure of the grain size curve: $A = A_1 + 0.5 A_2$. 1 area unit = the whole column (100 %) between d_0 and $2 d_0$.

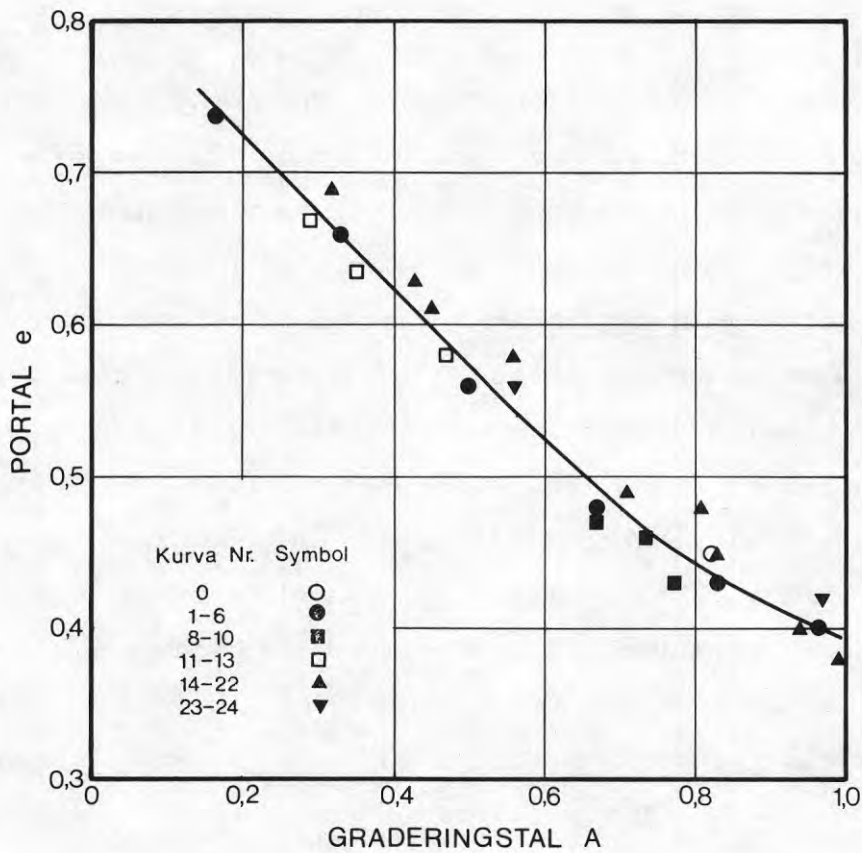


FIG. 56. Portalet vid fast lagring som funktion av graderingstalet $A = A_1 + 0,5 A_2$, jfr FIG. 55.

Void ratio in a dense state in relation to the grading number $A = A_1 + 0.5 A_2$, compare FIG. 55.

Man kan i fig. 56 se att blandningarna med partikelsprång i allmänhet ger värden som ligger över den inlagda linjen, medan övriga blandningar ger värden som i allmänhet ligger under. Till en del kan detta förklaras med att det vid blandningar med partikelsprång var svårt att få ett homogent jordprov, men avvikelserna beror också på att inte heller graderingstalet A är något perfekt måttetal för kornkurvan. Det är fullt möjligt att konstruera ett måttetal som är bättre, men bestämningen av ett sådant blir då betydligt besvärligare än bestämningen av det valda graderingstalet A .

För jordar med likartad form på kornkurvan råder ett logaritmiskt samband mellan graderingstalet A och graderingskoefficienten C_u . För kornkurvor i form av rätta linjer gäller sålunda att $\lg C_u = 0,9 \cdot A$.

När det sedan gäller kornfördelningens inverkan på kompressionsmodulen, så kan man direkt säga, att om man jämför jordar med samma portal så finner man att kompressionsmodulen minskar ju mer välgraderad jord är. Detta beror på att såväl e_{min} som e_{max} minskar ju mer välgraderad jorden är, så att medan ett visst portal för en ensgraderad jord kan betyda en fast lagring, så kan samma portal för en välgraderad jord betyda en lös lagring. Jämför man däremot jordar med samma lagringstäthet I_D så har kornfördelningen inte så stor inverkan på kompressionsmodulen. I litteraturen finner man olika uppgifter om kompressionsmodulen och dess beroende av kornfördelningen. Så t. ex. uppgav Lee och Farhoomand (1967) liksom Kjaernsli (1968) att kompressionsmodulen ökar ju mer välgraderat materialet är. Jänke (1968) jämförde olika blandningar av krossad kvarts och fann att kompressionsmodulen minskade ju mer välgraderat materialet var, och skillnaden var större vid jämförelse mellan fast än mellan löst lagrade jordar. Går man till Moussa (1961) och Tammirinne (1969) som båda utförde försök

på sand, finner man att ingen av dem funnit något samband mellan kompressionsmodul och gradering vid samma lagringstäthet. Ur Tammirinnens fylliga redovisning kan man finna, att sambandet mellan modultal m och graderingskoefficienten C_u är mycket vagt då jämförelsen sker vid samma lagringstäthet. Tammirinne redovisar nämligen för var och en av sina 22 undersökta sandsorter sambandet mellan modultalet m och lagringstätheten I_D . Detta samband har formen $m = X + Y I_D$, och ur Tammirinnens siffror kan man således bestämma $\log m$ för $I_D = 100\%$ genom att addera X och Y . I fig. 57 redovisas $\log m$ för $I_D = 100\%$ som funktion av C_u . Även om det här är fråga om olika jordar, så är det i alla fall sand med någorlunda lika kornstorlek, och hade graderingen någon klar inverkan, så borde denna inverkan ge en tydlig tendens när så många sandsorter är medtagna.

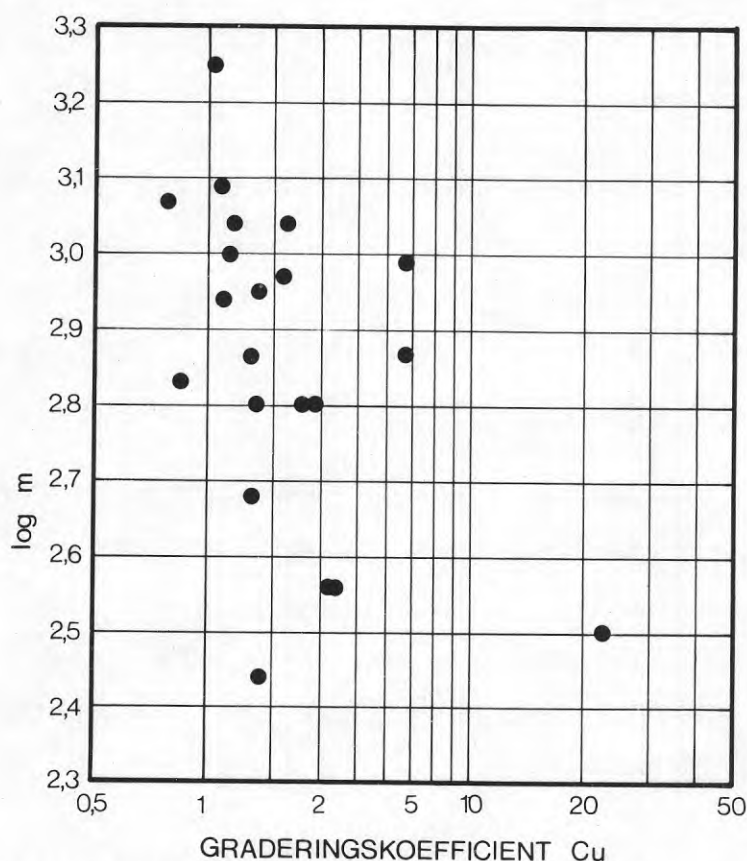


FIG. 57. Samband mellan modultalet m och graderingskoefficienten C_u för sand med lagringstätheten $I_D = 100\%$. Värdena har hämtats från Tammirinne (1969).

Relation between the modulus number m and the coefficient of uniformity C_u for sand with the relative density $D_r = 100\%$. The values are taken from Tammirinne (1969).

Man kan alltså konstatera att det är något osäkert hur kompressionsmodulen påverkas av graderingen vid jämförelser mellan jordar med samma lagringstäthet. Det är betydligt lättare att jämföra kompressionsmodulerna vid samma portal, eftersom graderingen då har en dominerande inverkan.

Relationen mellan modultalet m och graderingen visas i fig. 58 för fem olika sandblandningar vid samma portal. Två försök på varje sand utfördes i den vanliga sandödometern. Sanden packades genom slag mot ödometern till portalet 0,67.

I fig. 58 visas sambandet mellan modultalet m och graderingsstalet A . Den empiriska relationen blir $m = 180 - 400 \lg A$. Korrelationen är som framgår av figuren god och det torde vara klart att graderingsstalet A är ett bra mått på kornkurvas form. Framställningen i fig. 58 är emellertid inte helt lyckad - extrapolerar man exempelvis den räta linjen åt vänster så växer m oavbrutet då A går mot 0.

I fig. 58 visas sambandet mellan m och graderingskoefficienten C_u . Detta samband är nästan lika påtagligt som det i fig. 58b visade. Den empiriska relationen blir $m = 130 + 520/C_u$, och här kan man utan att få orimliga värden på m extrapolera den räta linjen, eftersom $1/C_u$ varierar mellan 0 och 1.

Tyvärr kan man inte utan vidare godta de empiriska relationerna. Försöken utfördes som nämnts i den vanliga sandödometern, och de vanliga felkällorna (främst dålig stämpelanliggning) påverkar naturligtvis resultatet. Försöken visar emellertid att vid samma kornform och ungefär samma kornstorlek bestäms modultalet m av portalet och graderingen.

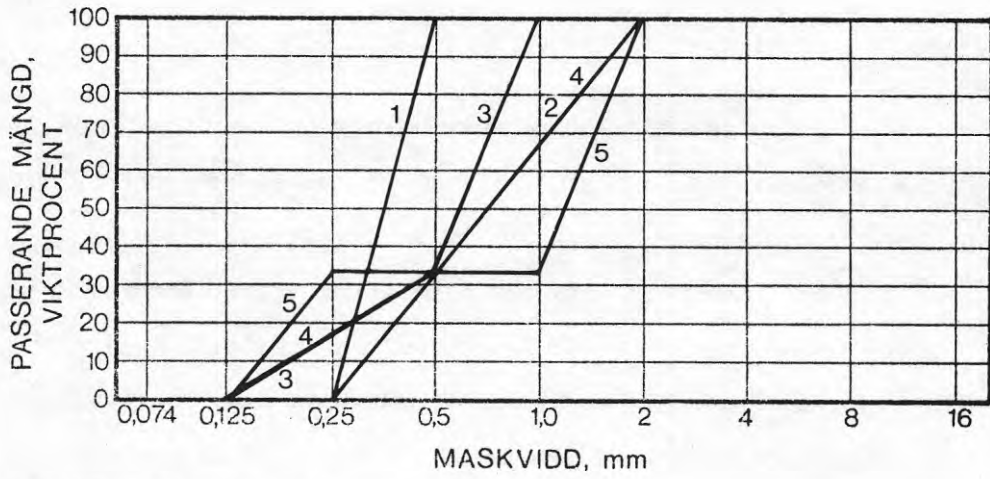


FIG. 58a. Sandblandningar, framställda av Gråbo-sand.
 Sand mixtures used to find the influence of the grading on the modulus number m .

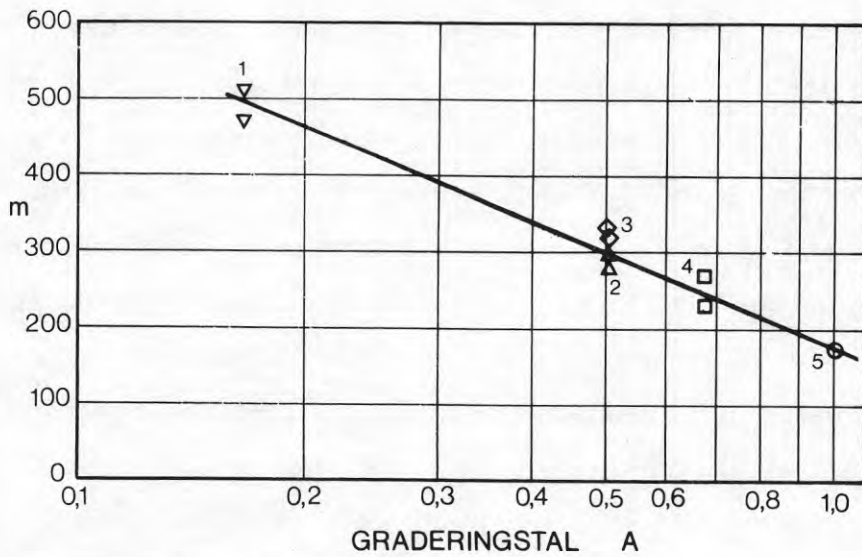


FIG. 58b. Relation mellan modultalet m och graderingstalet A .
 Relation between the modulus number m and the grading number A .

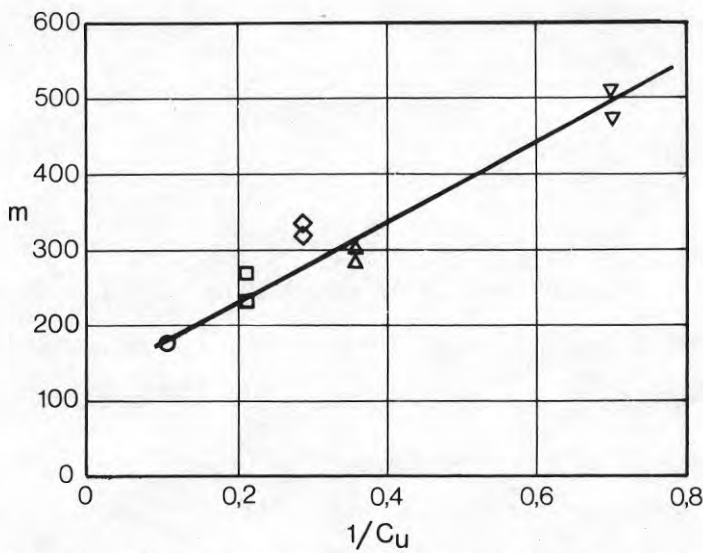


FIG. 58c. Relation mellan modultalet m och graderingskoefficienten C_u .
 Relation between the modulus number m and the coefficient of uniformity C_u .

3.2.3 Kornstorleken

När man inom geotekniken klassificerar en jord utgående från kornstorleken brukar man benämna den efter den kvantitativt största fraktionen. Denna metod är tillräcklig för vanligt bruk, men när det gäller att jämföra olika jordar med avseende på någon speciell egenskap är exaktare metoder ofta önskvärda. När det gäller kompressibiliteten och dess beroende av kornstorleken förekommer olika metoder för bestämning av ett måttetal för kornstorleken. Som regel utgår man från siktcurvan, dvs man använder kornens b-mått (jämför fig. 46) för bestämning av kornstorleken. Vanligt är sedan att använda någon karakteristisk korndiameter, t. ex. d_{50} , som måttetal för kornstorleken. Om man emellertid skall undersöka någon kornstorleksberoende egenskap, t. ex. krossningen under statisk last, så räcker det inte med att använda d_{50} som relationstal vid jämförelse mellan olika jordar, eftersom krossningen också påverkas av graderingen. Därför förekommer också mer avancerade metoder för bestämning av ett måttetal för kornstorleken. Som exempel kan nämnas att Ohde (1950) definierade "verk samma kornstorleken" d_w utgående från totala kornytan hos en kornmassa: d_w är den korndiameter som, om samtliga korn har denna diameter, ger samma totala kornyta per massenhet som den verkliga kornmassan har. Enligt definitionen gäller formeln

$$\frac{1}{d_w} = \int_0^1 \frac{dG}{d} = \sum \frac{\Delta G_i}{d_i} \quad (3:5)$$

där ΔG_i är den viktsandel korn, som har diametern d_i . Beräkningen av d_w enligt denna allmänna formel blir naturligtvis lite besvärlig. Antar man att kornkurvan har en viss bestämd form kan beräkningen underlättas. Om man antar att kornfördelningskurvan är normalfördelad fås enligt Ohde uttrycket:

$$\lg \frac{d_{50}}{d_w} = 0,701 \lg^2 \frac{d_{90}}{d_{50}} \quad (3:6)$$

Det är naturligtvis i princip riktigt att använda en metod sådan som Ohdes för bestämning av verksamma kornstorleken. När det gäller jämförelser mellan kompressionsförsök på olika jordar kan man emellertid kanske finna ett ännu bättre måttetal för kornstorleken. Om man nämligen utgår från att det är antalet kontaktpunkter per volymenhet som påverkar kompressionsmodulen snarare än kornstorleken i och för sig, så bör man söka den korndiameter som ger en ensgraderad jord med samma antal kontaktpunkter per volymenhet som den verkliga jorden. Detta är möjligt att göra tack vare att medelantalet kontaktpunkter per partikel visat sig vara i stort sett oberoende av graderingen vid ett och samma portal. Mätningar med detta resultat har utförts av Marsal (1963) och Field (1963). Field skriver om detta: "It was interesting to note, however, that, while the distribution of contact points varied with varying size and grading, the mean number of contact points per particle was to a large extent independent of these variables". Problemet har även tagits upp av Lindblom (1972), som sammanställde Marsals och Fields mätningar, se fig. 59. Problemet blir då att finna den korndiameter, som ger samma antal korn per massenhet som den verkliga jorden har, och detta är relativt enkelt.

I en jord med massan 1 är antalet korn

$$\frac{1}{\sum_0^1} \frac{\Delta G_i}{\alpha d_i^3 \cdot \rho_s} \quad (3:7)$$

där ΔG_i är den massandel korn som har diametern d_i , α beror

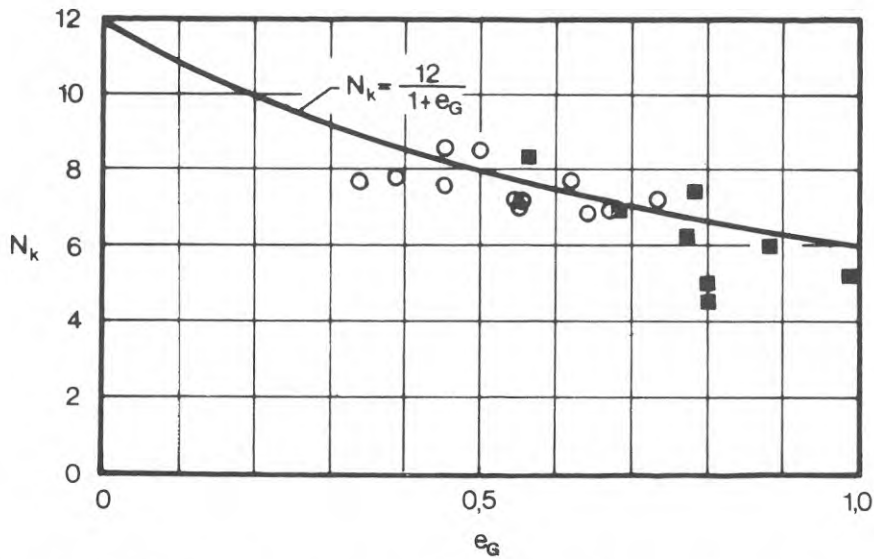


FIG. 59. Resultat av uppmätning av medelantalet kontaktpunkter per korn i välgraderade och ensgraderade fyllningar. Kantiga och rundade korn upp till 11 cm storlek. ■ mätningar av Marsal (1963), ○ mätningar av Field (1963). N_k = antalet kontaktpunkter per korn, e_G = por-talet hos den del av kornskelettet som är aktivt lastupptagande. Den inlagda kurvan är base-rad på teoretisk beräkning av antalet kontaktpunkter. (Efter Lindblom, 1972).

Measurement of the mean number of contact points per particle in well graded and uniformly graded soils. Sharp-edged and rounded particles up to 11 cm in diameter. ■ measurements by Marsal (1963), ○ measurements by Field (1963). N_k = number of contact points per particle, e_G = void ratio of the load carrying part of the grain skeleton. The curve is based on a theoretic calculation of the number of contact points (from Lindblom, 1972).

av kornformen och ρ_s är korndensitet. Om den "aktiva korn-diametern" betecknas med d_a så är antalet korn med denna diameter $1/(\alpha d_a^3 \rho_s)$ per massenhet. Således är

$$\frac{1}{d_a^3} = \sum_0^1 \frac{\Delta G_i}{d_i^3} \quad (3:8)$$

eller

$$\frac{1}{d_a^3} = \int_0^1 \frac{dG}{d^3} \quad (3:9)$$

Korndiametern d_a skulle alltså vara användbar som mätetal för kornstorleken, då det gäller jämförelser mellan olika jordars kompressionsmodul, under förutsättning av att det är antalet kornkontakter per volymsenhet som påverkar kompressionsmodulen. Bakom detta antagande ligger att kontaktpunkternas utseende förutsättes vara lika oberoende av kornstorleken.

Korndiametern d_a är ungefär lika besvärlig att bestämma som d_w . Antar man att kornfördelningskurvan är normalfördelad (vilket approximativt brukar gälla för sedimenterade jordar) kan man bestämma d_a med hjälp av exempelvis d_{50} och C_u :

$$\lg d_a = \lg d_{50} - 1,466 \lg^2 C_u \quad (3.10)$$

Värdet av denna ekvation prövas i kapitel 4. Analysen där visar att ekvationens värde är högst diskutabelt.

Kornstorlekens inverkan på kompressionsmodulen är ett tämligen komplicerat problem. En del undersökningar finns redovisade i litteraturen. Nedan är en sammanställning gjord.

Referens	Försöksmaterial	Slutsats
Ohde (1951)	Sand	Modultalet m och exponenten β ökar båda med ökande kornstorlek.
Kjellman & Jacobson (1955)	Singel och makadam	Kompressionsmodulen ökar med ökande kornstorlek
Schmidt (1967)	Sand	Exponenten β ökar med ökande kornstorlek
Lee & Farhoomand (1967)	Sand och grus	Kompressionsmodulen minskar med ökande kornstorlek
Jänke (1968)	Sand och grus	m och β har maxvärde för verksamma kornstorleken $d_w \approx 0,4$ mm.

Man får som synes inte någon klar bild av kornstorleken inverkan. Det är heller inte så egendomligt att det inte går att säga om kompressionsmodulen ökar eller minskar med kornstorleken. Kompressionsmodulen är ju spänningsberoende, och just spänningsberoendet beror i hög grad av kornstorleken. Detta kan illustreras med några enkla försök.

I fig. 60 visas resultat av ödometerförsök på tvättade sandfraktioner. Försöken utfördes i CTH:s sandödometer, se fig. 34. Vid tolkningen av parametrarna m och β användes den något omständliga metoden att modulen M först beräknades för varje laststeg ($M = \Delta\sigma/\Delta\epsilon$), sedan ritades M som funktion av σ i log-log-skala varpå m och β bestämdes ur detta diagram. Denna metod användes på grund av att den är objektivare än direkt tolkning av m och β ur σ - ϵ -kurvan, där det finns risk för att man omedvetet manipulerar kurvan i önskad riktning.

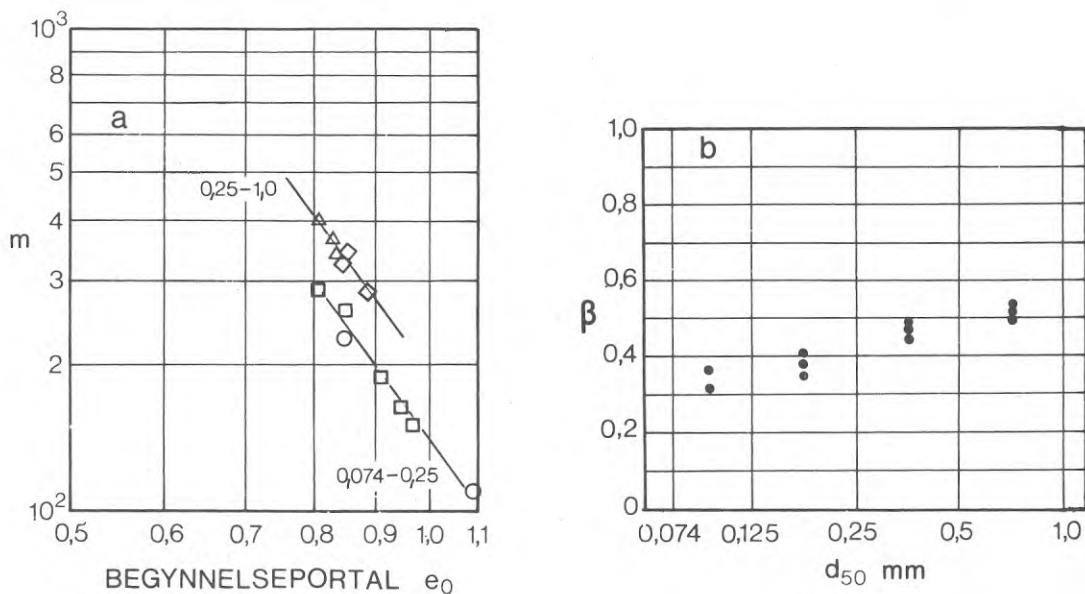


FIG. 60. Modultalet m och exponenten β vid olika kornstorlek. Ödometer: CTH:s sandödometer. Beteckningar, se FIG. 61a.

Modulus number m and stress exponent β for different grain sizes. Oedometer: The CTH sand oedometer. Symbols, see FIG. 61a.

Av fig. 60a framgår att modultalet varierar i viss utsträckning med kornstorleken, men det är svårt att skilja de båda finaste respektive de båda grövsta sandsorterna åt. Tendensen är emellertid att m ökar med ökande kornstorlek. Exponenten β visar ett klarare beroende av kornstorleken: β ökar med ökande kornstorlek, fig. 60b.

Tyvärr tillåter inte den låga provhöjden hos CTH-ödometern (33 mm) provning av ensgraderade jordar med större korndiameter än ca 1,5 mm, dvs $h/d > 20$ om försöket skall vara relevant (h = provets minsta mått, d = kornens största mått). Detta påvisades t. ex. av Marachi (1969), och stämmer väl med mina egna erfarenheter. För att få med större variation hos kornstorleken än som redovisas i fig. 60 har därför i fig. 61 resultaten av fler försök samlats. Förutom de försök som redovisas i fig. 60 har försöken på singel i jättekompresometer $\varnothing 50$ cm medtagits samt försök på grus 2-4 mm i ödometer med $h = D = 83$ mm.

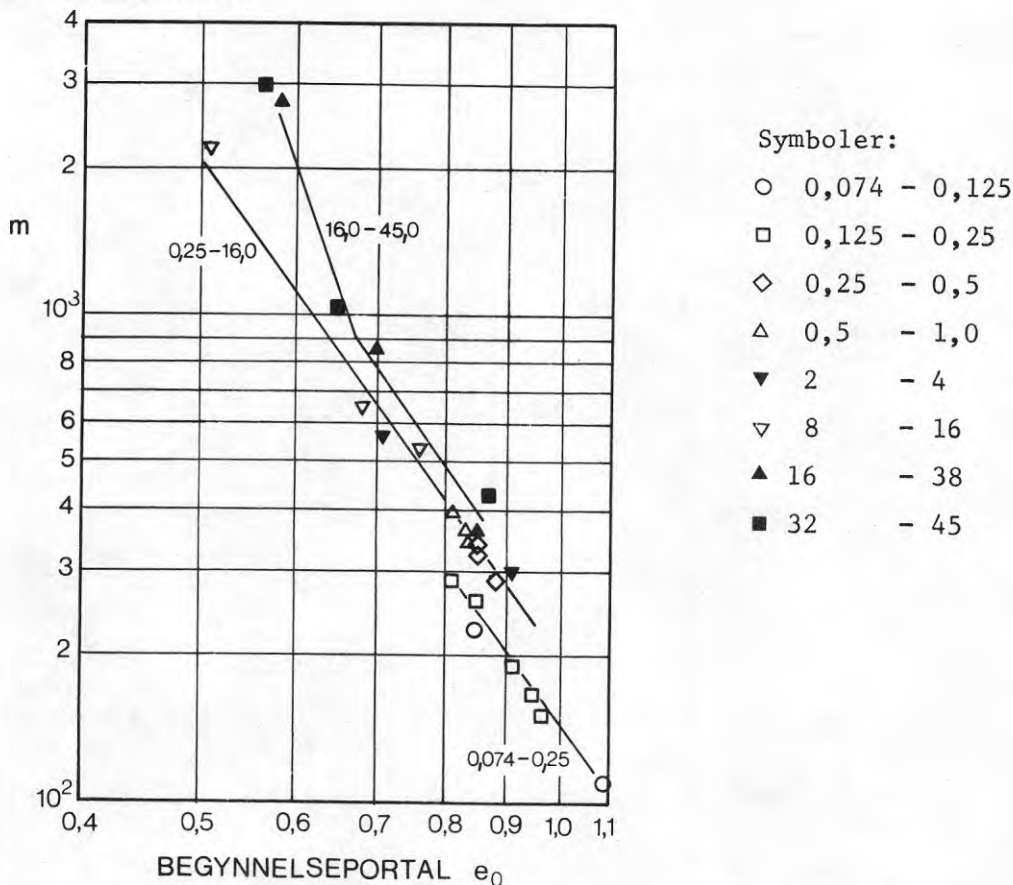


FIG. 61a. Modultalet m som funktion av portalet. 8 olika kornstorlekar, ungefär samma graderingskoefficient.

The modulus number m in relation to the void ratio. 8 different grain sizes. The grading is approximately the same.

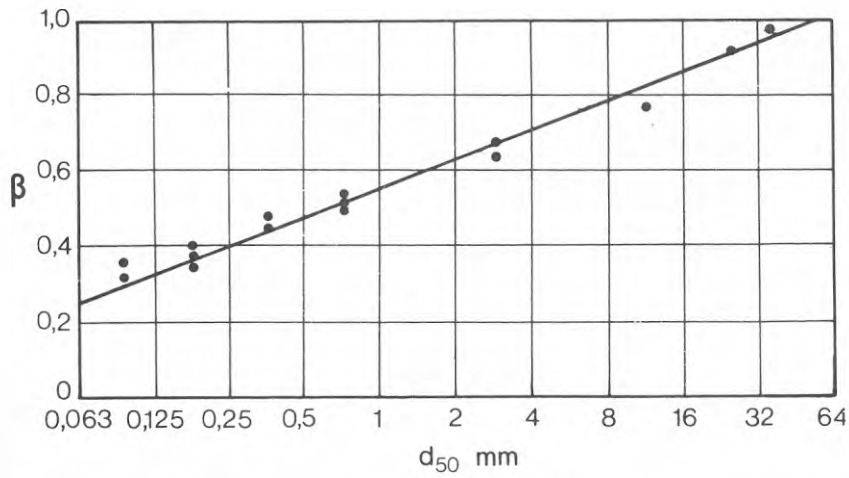


FIG. 61b. Spänningsexponenten β som funktion av kornstorleken. Den inlagda räta linjen har ekvationen $\beta = 0,25 \lg \frac{d_{50}}{0,006}$, där d_{50} uttrycks i mm

The stress exponent β in relation to the grain size. The equation of the straight line is $\beta = 0,25 \lg \frac{d_{50}}{0,006}$, where d_{50} is expressed in mm

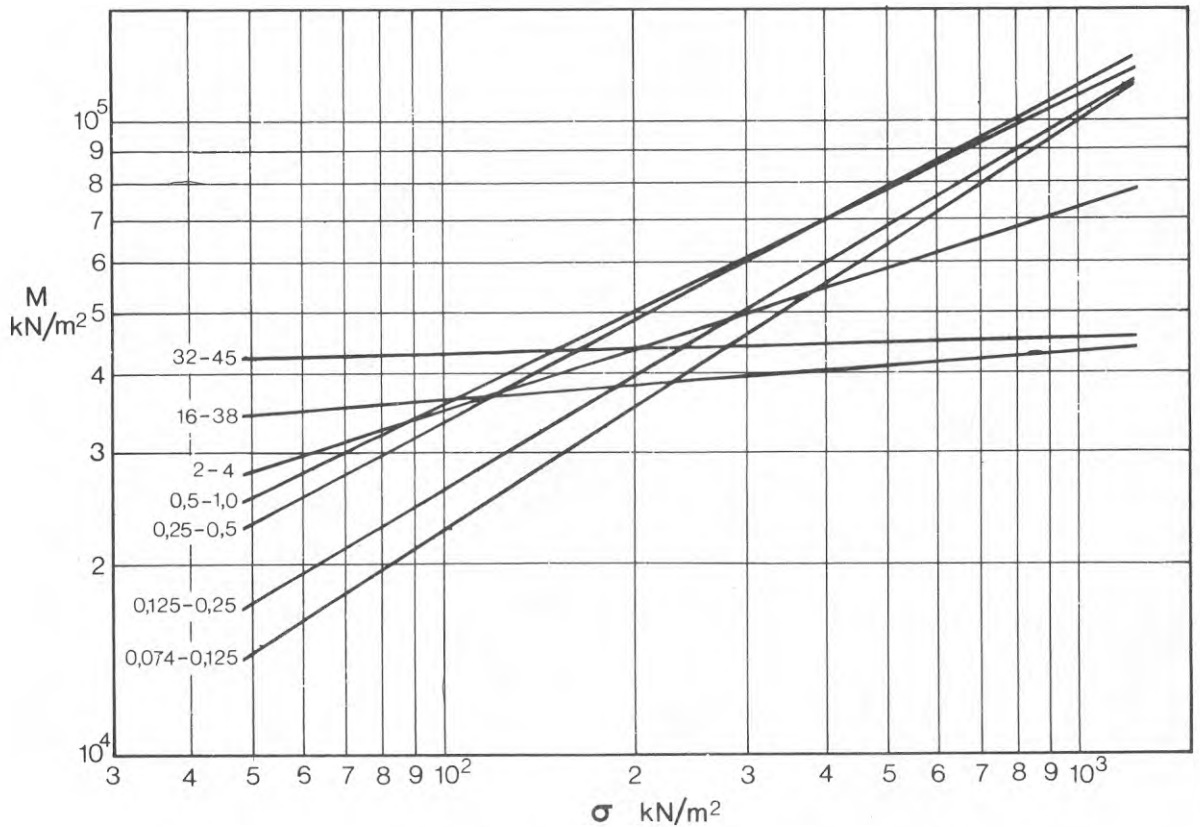


FIG. 61c. M som funktion av σ vid portalet ca 0,85 för 7 av de försök som redovisas i FIG. a och b.

Compression modulus M as a function of σ at the void ratio 0,85 for 7 of the soils shown in FIG. a and b.

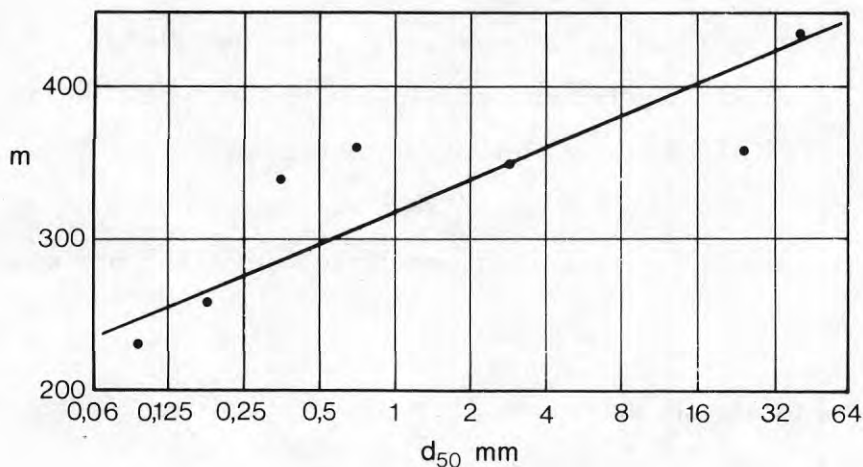


FIG. 61d. m som funktion av d_{50} för de försök som redovisas i FIG. c. $\sigma_j = 100 \text{ kN/m}^2$.
Modulus number m in relation to d_{50} for the tests shown in FIG. c. $\sigma_j = 100 \text{ kN/m}^2$.

Gemensamt för samtliga material är att de är ensgraderade med C_u cirka 1,4; d_{50} kan därför användas som måttal för kornstorleken.

Av fig. 61a framgår att m har en viss men inte helt regelbunden ökning med kornstorleken. Däremot synes β ha ett tydligt samband med kornstorleken, fig. 61b.

I fig. 61c visas några $M - \sigma$ -kurvor för e_0 cirka 0,85, och i fig. d visas för dessa kurvor m som funktion av d_{50} . Av fig. c framgår tydligt att modultalets kornstorleksberoende i hög grad beror på valet av σ_j . Om σ_j väljs till 10 kN/m^2 , så blir m i hög grad kornstorleksberoende - m ökar med ökande kornstorlek. Mest oberoende av kornstorleken blir m om σ_j väljs till omkring 200 kN/m^2 . Då finner man också för de kurvor som visas i fig. 61c ungefär samma förhållande som Jänke (1968) fann (han hade dock $\sigma_j = 100 \text{ kN/m}^2$): m är störst då kornstorleken är omkring 0,5 mm.

Önskvärt vore att få m så oberoende av kornstorleken som möjligt. Det är emellertid inte rimligt att endast av detta skäl välja σ_j till något värde mellan 100 och 1000 kN/m² - dels är det flera fördelar med att ha σ_j som en jämn 10-potens, dels beror m också av kornformen och dennas inverkan bör också minimeras.

Den fysikaliska förklaringen till β -värdets tydliga kornstorleksberoende torde vara följande:

Ytan hos ett mineralkorn är skrovlig. Detta illustreras av fig. 62, som visar kornytor fotograferade genom Scanningmikroskop. Kontaktpunkterna mellan kornen kan därför vid låg kontaktryck (nära 0) antas ha samma utseende, oberoende av kornstorleken. Antar man nu två kornmassor med olika kornstorlek men i övrigt lika, så kan man också anta att antalet kontaktpunkter per korn är lika. Om kornmassorna utsätts för samma tryckspänning, så blir tryckkraften per kontaktpunkt proportionell mot kvadraten på korndiametern. Krossningen i kontaktpunkterna ökar då också med ökande kornstorlek. För



FIG. 62. Mikrofotografi av en sand från Upplands Väsby, fotograferad genom Scanningmikroskop.

Microphotograph of a sand from Upplands Väsby. Photograph taken with a scanning microscope.

såväl finkorniga som grovkorniga massor gäller att kornen vid ökande spänning genom glidningar och deformationer omlagras så att kornmassans motstånd mot deformation (kompressionsmodulen är ett mått på motståndet mot deformation) ökar - exponenten $(1 - \beta) > 0$. Med ökande kornstorlek motverkas emellertid detta förhållande av den ökande krossningen i kontaktpunkterna - $(1 - \beta)$ minskar med ökande kornstorlek, β ökar. Till den ökande krossningen vid ökande kornstorlek bidrar också det förhållandet att kornens hållfasthet minskar då kornvolymen ökar.

Praktiskt kan effekten av ökande kornstorlek på krossningen lätt visas genom försök. Sådana försök har bl. a. utförts av Kjaernsli och Sande (1963). Deras försök visar också en markant skillnad mellan välgraderade och ensgraderade jordar, vilket är naturligt - den aktiva korndiametern är mindre för en välgraderad jord än för en ensgraderad med ungefär samma kornstorlek. Också teoretiskt är det lätt att påvisa krossning i kontaktpunkterna. För att börja med de elastiska förhållandena, som kan antas råda vid låga spänningar, så kan man härleda spänningarna i kontaktpunkterna med hjälp av Herz formler (se Timoshenko & Goodier, 1951). I litteraturen finns studier av granulära materials egenskaper under elastiska förhållanden redovisade i ganska stort antal, och det torde därför vara överflödigt att närmare gå in på detta. Här skall därför endast ett fall tas upp: sfäriska korn i lösaste (kubisk) lagring. I kontaktpunkterna uppkommer brott då dragbrottngränsen överskrides (detta gäller för spröda material som kvarts och liknande bergartsbildande mineral). Maximala dragspänningen är radiell i förhållande till den cirkulära kontaktytan och uppkommer i randen av denna samt har storleken.

$$p_d = 0,13 \sigma^{1/3} E^{2/3}$$

om $\nu = 0,3$. Enligt Bishop (1966) gäller för kvarts att $E = 10^5$ MN/m² och $p_{Bd} = 83$ MN/m², och då fås brott i kontaktpunkterna för $\sigma = 26$ kN/m². För små korn formade av enkristaller torde erforderlig spänning vara högre, medan den för stora korn, sammansatta av olika mineral, bör vara lägre.

I en verklig jord är emellertid kornen inte sfäriska, och som tidigare nämnts är kornytorna så ojämna att man kan anta att kontaktpunkterna har samma utseende (vid samma kontaktryck) oberoende av kornstorleken.

Medelkraften per kontaktpunkt kan då skrivas

$$P = \alpha \sigma d^2$$

där α beror av antalet kontaktpunkter per korn och av kornformen.

d = korndiametern, exempelvis kornens b-mått

α är konstant så länge antalet kontaktpunkter är konstant. I en kornmassa ökar emellertid antalet kontaktpunkter när spänningen ökar, och α är då hela tiden avtagande.

Spänningarna i varje kontaktpunkt beror av kraften P och kontaktytornas utseende. Om man antar att kontaktytorna initieilt är sfäriska med radie R (egentligen borde man anta två olika värden på R ; detta ändrar emellertid inte det principiella utseendet hos ekvationerna), så blir dragspänningen p_d i randen av varje kontaktyta (enligt Herz formler och med $\nu = 0,3$):

$$p_d = 0,082 \left(\alpha \sigma E^2 \frac{d^2}{R^2} \right)^{1/3}$$

Man ser av denna ekvation att om α och R antas relativt konstanta beror p_d i hög grad av d , dvs brott i kontaktpunkterna uppkom-

mer tidigare ju större kornen är.

Det är möjligt att gå vidare och härleda ett teoretiskt uttryck för kompressionsmodulen, som visar att denna är beroende av korndiametern. Härför måste man emellertid formulera uttryck för α och R , och dessa uttryck kan inte bli annat än antaganden. Dessutom beror kompressionsmodulens storlek endast till en del av deformation i kontaktpunkterna - kornskelettet deformeras genom glidningar, hela korn spräcks osv. Också dessa deformationer beror av kornstorleken.

Sammanfattningsvis kan man om kornstorlekens inverkan på kompressionsmodulen säga följande: ökande kornstorlek medför att exponenten β ökar, medan modultalet m påverkas i ganska ringa grad om σ_j väljs till 100 kN/m^2 .

3.2.4 Kornformen

Kornformen kan mätas på många olika sätt. Man kan skilja på i princip två olika metoder. Enligt den ena mäter man direkt ett antal korn, enligt den andra mäter man någon kornformsberoende egenskap hos kornmassan.

Den första metoden, direkt mätning av kornen, lämpar sig naturligtvis bäst för grovkorniga material. Bland många förekommande metoder (se Pusch, 1962) kan nämnas sfäriciteten (Krumbein, 1941) och rundningsgraden (Wadell, 1932).

Sfäriciteten är ett mått på hur nära partikeln ansluter till en sfär

$$\text{Sfäriciteten} = \sqrt[3]{\frac{(\pi/6)abc}{(\pi/6)a^3}} = \sqrt[3]{\frac{bc}{a^2}}$$

där a , b och c är partikelns tre mått enligt fig. 46.

Rundningsgraden är ett mått på hörnens rundning.

$$\text{Rundningsgraden} = \frac{\sum \frac{r}{R}}{N}$$

där r = hörnens krökningsradie i observationsplanet
 R = radien hos inskrivna cirkeln i observationsplanet
 N = antalet hörn

Såväl sfäricitet som rundningsgrad beräknas som medelvärdet av mätningar på något hundratal korn.

Likvärdigt med sfäriciteten är ett annat mått, som förtjänar att omnämnas, nämligen formfaktorn. Denna har bl. a. använts av Fumagalli (1969):

$$\text{Formfaktorn } C_f = \frac{\sum_1^n \frac{W_i}{\rho}}{\sum_1^n \frac{\pi}{6} a_i^3}$$

där W_i = massan av ett korn med densiteten ρ och största måttet a_i . n är antalet korn (ca 100). Eftersom $\sum_1^n W_i$ utgör massan av samtliga korn och ρ kan anses konstant innebär metoden att man blott behöver göra en mätning per korn och sedan väga kornen tillsammans - således mindre arbete än som behövs för bestämning av sfäriciteten.

Ett mått på kornformen som innebär en förenkling i jämförelse med att mäta varje korn för sig utgör flisigheten, som används mycket inom vägbyggnadsområdet. Flisigheten utgör kvoten mellan partiklarnas mellanmått och minsta mått (b/c), och bestäms genom siktning med dels kvadratiska maskor, dels harpsikt. För de båda siktkurvorna betraktas sedan d_{50} som medelvärdet av partiklarnas mellanmått (kvadratiska maskor) respektive minsta mått (harpsikt).

Ingen av de ovan beskrivna metoderna ger något mått på kornytans skrovlighet. Rundningsraden ger visserligen ett mått på hur spetsiga de iakttagna hörnen är, men säger ingenting om kornytan i övrigt - denna kan vara skrovlig som borstklöven hos granit eller slät som hos en välutbildad kristall. Därför används ofta någon indirekt metod för mätning av kornformen, eftersom man då har möjlighet att få med inverkan också av kornytans skrovlighet.

Många metoder för indirekt mätning av kornformen finns redovisade. En vanlig metod är att använda portalet vid tätaste eller lösaste lagring som mätetal för kornformen - metoden kräver emellertid att de jämförda jordarnas kornkurvor är lika, dvs man måste som regel använda sorterade fraktioner för bestämningen. Ohde (1950) uppgav att man får ett bättre mätetal för kornformen genom att i stället utgå från permeabiliteten k . Han bestämde råhetsgraden r enligt formeln

$$r = 405 \tau \frac{e^3}{1 + e} \frac{d_w^2}{k}$$

där τ beror av vattnets viskositet (τ = viskositeten vid 10°C/aktuell viskositet), e är portalet och d_w verksam korndiameter.

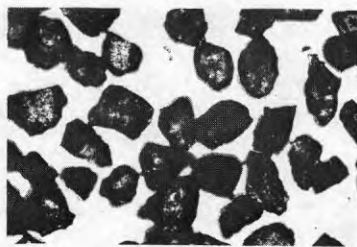
Rex och Peck (1956) använde metoden att bestämma den tid det tar för en viss materialmängd att rinna genom en standardtratt. Råhetsgraden bestämdes som kvoten mellan den uppmätta tiden och den tid det tog för en mycket rundkornig standardsand att rinna genom samma tratt. Metoden utvecklades vidare av Jänke (1968), som använde krossad kvartsit som jämförelsematerial och satte $r = 1$ för detta material och $r = 0$ för helt runda, glatta korn. Vid bestämning av råhetsgraden för ett graderat material delade han upp detta i fraktioner och jämförde varje fraktion med motsvarande fraktion krossad kvartsit.

Vallerga *et al.* (1957) använde en intressant metod för att bestämma skrovligheten hos kornytan. Det vägda provet placerades i en centrifug, täcktes med kerosine, dränerades och centrifugerades i 2 minuter varpå provet vägdes på nytt så att den kvarstannade mängden kerosine kunde bestämmas. Mängden adsorberad kerosine användes som mått på skrovligheten.

Notabelt är att det undersökta materialet utgjordes av solida glaskulor, som genom etsning erhållit varierande ytstruktur; skall man göra samma undersökning på naturlig mineraljord bör någon annan vätska än kerosine användas. Naturliga korn har nämligen mikrosprickor och mikroporer, och vätskan bör ej tränga in i dessa.

Gemensamt för de ovan beskrivna indirekta metoderna för kornformsbestämning är att användningsområdet är begränsat till i stort sett sandfraktionen. Dessutom är bestämningarna ganska omständliga och besvärliga. Den enklaste och snabbaste metod som för närvarande står till buds är den okulära bestämningen av kornformen efter en skala, helt enkelt genom att jämföra kornformen med vissa standardkornformer (se t. ex. Russel & Taylor, 1937). I övrigt synes det vara så att någon enkel, objektiv mätmetod inte finns för närvarande. Vid okulär jämförelse av kornformen kan man göra så att man fotografiskt framställer bilder av kornen i samma storlek. Exempel på detta visas i fig. 63, där de sandfraktioner som använts för undersökningarna beträffande graderingen och kornstorleken återges. Dessutom visas en bild av rundkornigt Simrishamns-grus. Det kantiga materialet från Gråbo synes ha samma kornform oberoende av kornstorleken.

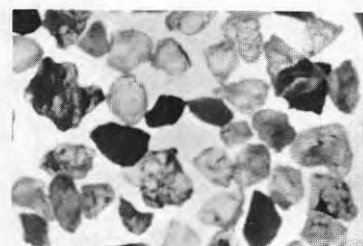
Simrishamnsgruset och gruset från Gråbo har mycket olika kornform. För att jämföra kompressionsmodulen hos dessa båda material gjordes ödometerförsök. Ödometern hade diametern = höjden = 83 mm, och enligt undersökningen i avsnitt



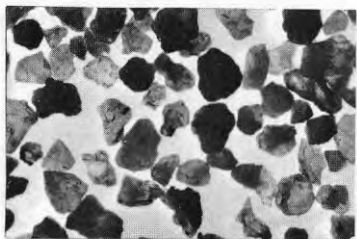
a. 0,074-0,125 mm



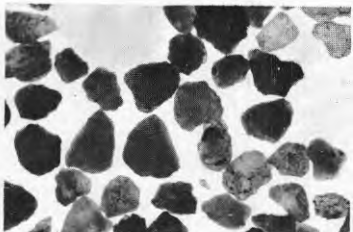
b. 0,125-0,25 mm



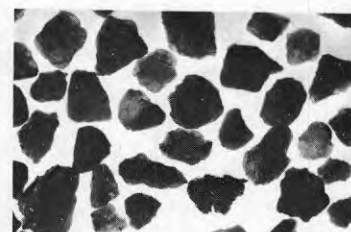
c. 0,25-0,5 mm



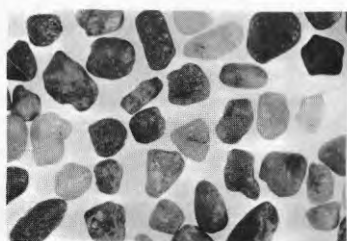
d. 0,5-1,0 mm



e. 1-2 mm



f. 2-4 mm



g. Simrishamns-grus 2-4 mm

FIG. 63. Korn av olika storlek, återgivna så att kornen är ungefär lika stora. material från Gråbo utanför Göteborg.

a-f visar

Grains of different sizes, photographed in order to compare the grain shape. material from a site close to Gothenburg,

a-f show

g a rounded Baltic gravel.

3.1 skall man med en sådan ödometer få ungefär korrekt värde på kompressionsmodulen. Vid försöken mättes också väggfriktionen; denna visade sig vara så gott som lika för båda materialen. Båda grussorterna provades dels i fast, dels i lös lagring. Fast lagring åstadkoms genom att gruset siktades genom 4 mm sikt med 20 cm fallhöjd ned i ödometern. Vid lös lagring hölls gruset genom en tratt med mynningen omedelbart över ytan av det ifyllda materialet.

Försöksresultaten redovisas i fig. 64. Kompressionsvärdena har ej justerats för att falla på en rät linje, utan det är de direkt avlästa värdena som redovisas.

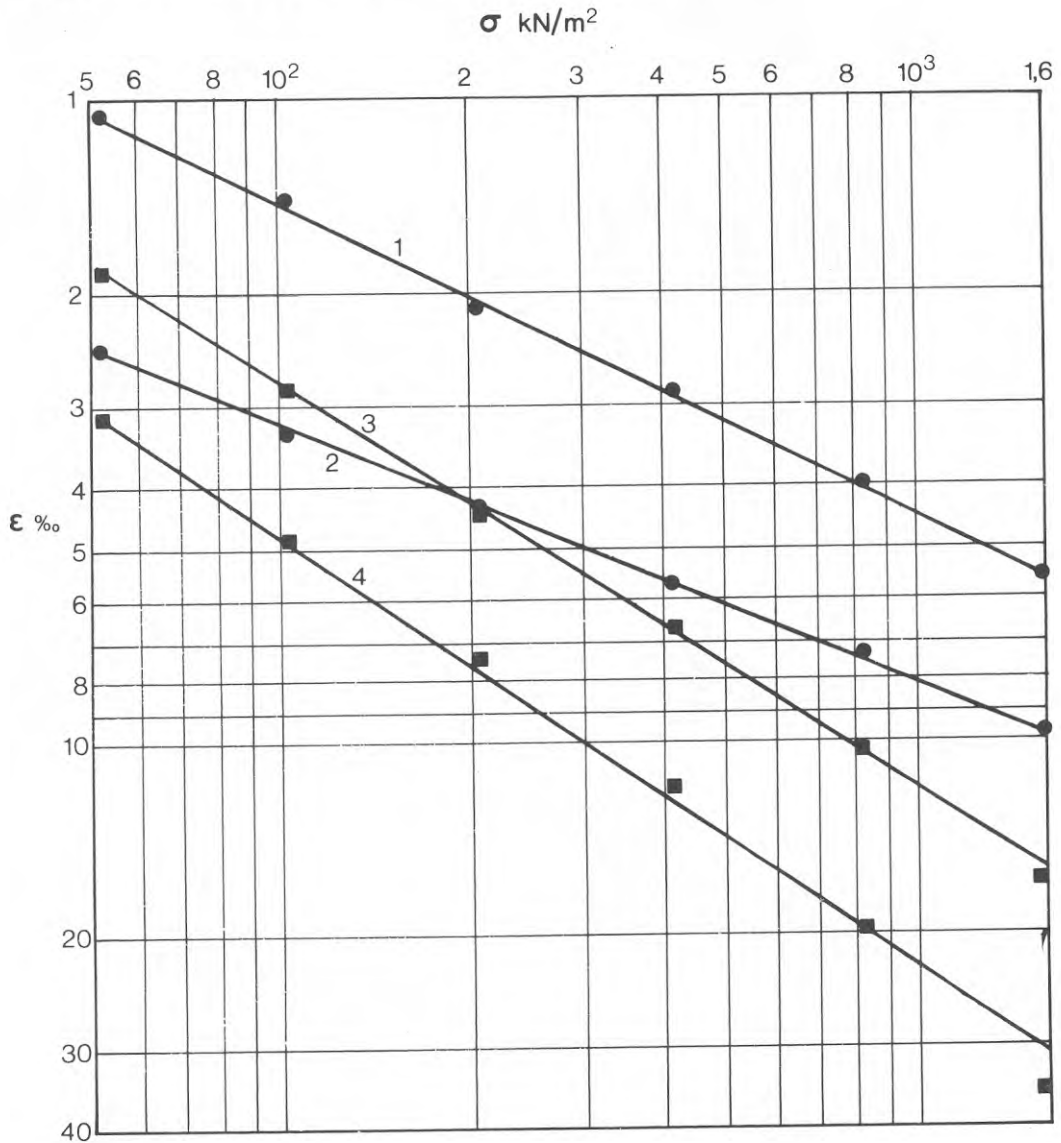


FIG. 64. Ödometerförsök på grus 2–4 mm.

Oedometer tests on gravel 2–4 mm.

Kurva	Material	e_0	m	β
1	simrishamnsgrus	0,54	1390	0,49
2	"	0,73	763	0,41
3	gråbogrus	0,71	565	0,64
4	"	0,905	307	0,68

Det torde vara fullständigt klart att det rundkorniga gruset har en högre kompressionsmodul än det skarpkantiga vid samma lagringstäthet. Gör man däremot jämförelsen vid samma portal så avgör spänningsnivån vilket material som har den högsta kompressionsmodulen. Man kan jämföra försök 2 och 3, som har ungefär samma portal. I fig. 65 är M ritat som funktion av σ för dessa båda försök. Om σ_j valts till 30 kN/m^2 så skulle dessa försök givit till resultat att m är oberoende av kornformen vid jämförelser mellan jordar med samma portal.

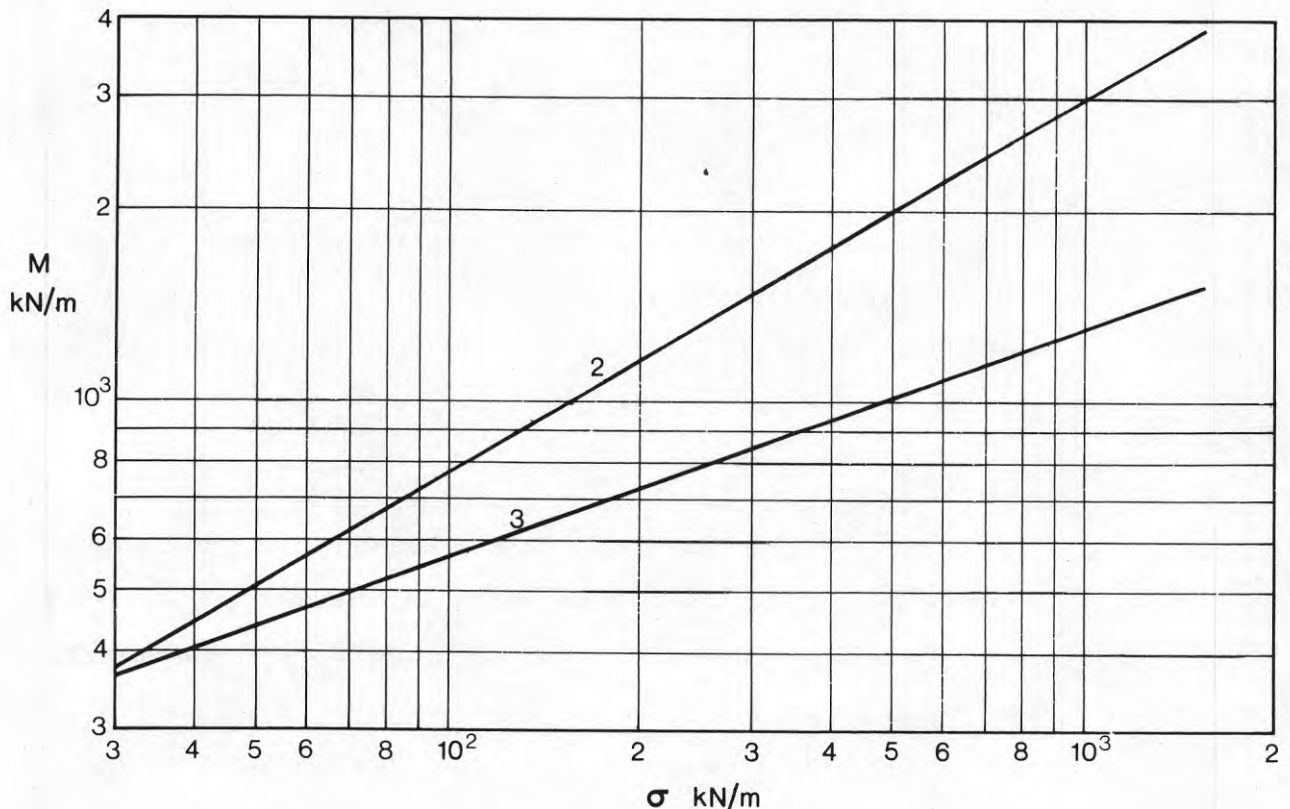


FIG. 65. Kompressionsmodul som funktion av spänningen för försök 2 och 3 (jfr texten till FIG. 64).

The modulus of compression as a function of the stress for test No. 2 and 3 in FIG. 64.

Modultalet m bestämt på vanligt sätt med $\sigma_j = 100 \text{ kN/m}^2$ synes dock inte i någon högre grad bero av kornformen. I fig. 66 visas sambandet mellan m och e_0 . Avvikelsen mellan de båda materialen är inte större än att den ryms inom felmarginalen.

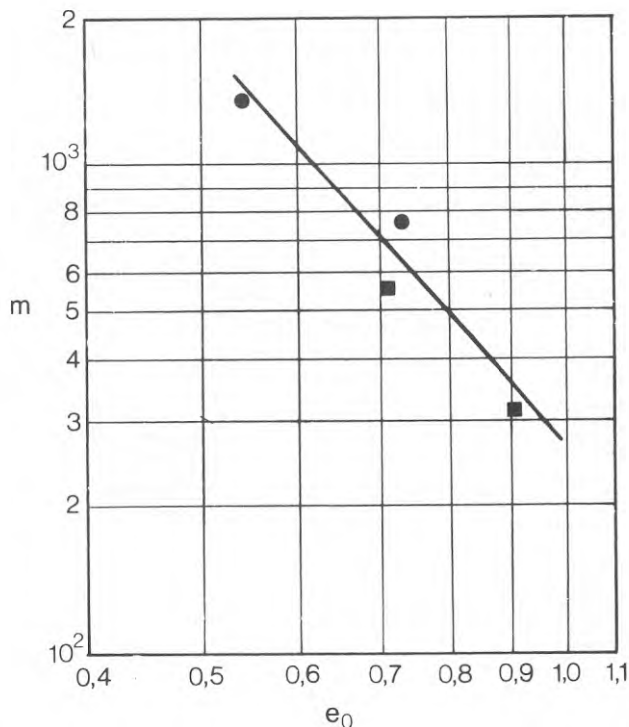


FIG. 66. Sambandet mellan m och e_0 för Simrishamns-grus (●) och Gråbo-grus (■). Den inlagda räta linjen har ekvationen $m = 270 e_0^{-2,75}$

Relation between m and e_0 for gravel from Simrishamn (●) and gravel from Gråbo (■). The equation of the straight line is $m = 270 e_0^{-2.75}$

Modultalet m synes alltså inte vara beroende av kornformen i särskilt hög grad. Förutom de i detta avsnitt redovisade resultaten tyder resultaten i avsnitt 2.5 samma sak. Spänningsexponenten β synes däremot vara beroende av kornformen i ganska hög grad: β minskar då rundningsgraden ökar. I fig. 64 har som nämnts ingen justering av kurvorna gjorts, och då brukar man också få någon variation också för ett och samma material. Ingenting hindrar emellertid att man justerar kurvorna så att Simrishamns-gruset får $\beta = 0,45$ och Gråbo-gruset $\beta = 0,66$. Differenser av samma storleksordning erhöles också vid försöken på makadam och singel, se fig. 26b.

Sammanfattningsvis kan man alltså om kornformens inverkan säga att modultalet m påverkas i ganska ringa grad om man jämför jordar med samma portal och använder $\sigma_j = 100 \text{ kN/m}^2$.

Jämför man däremot jordar med samma lagringstäthet så ökar m markant då rundningsgraden ökar. Spänningsexponenten β minskar markant då rundningsgraden ökar.

3.3 Slutsatser

Som sammanfattning av de undersökningar som redovisats i detta kapitel kan följande sägas:

Ödometern är användbar för bestämning av kompressionsmodulen, men ödometrar med vanligen använda diameter/höjd-förhållandet 2,5 ger för låga värden på modultalet vid hög lagringstäthet. Om inga speciella åtgärder vidtas för att motverka effekten av dålig anliggning mellan stämpel och prov syns diameter/höjd-förhållandet 1:1 vara lämpligast. Ringkompressometern med mätning av kompressionen utan inverkan av anliggningen mellan provet och stämpeln eller botten torde vara den apparat som bäst lämpar sig för mätning av kompressionsmodulen.

Lagringen hos en jord inverkar i hög grad på kompressionsmodulen. Vid jämförelser mellan jordar med olika kornstorlek och kornform är det fördelaktigt att använda portalet som mått på lagringen, eftersom modultalet m då blir tämligen oberoende av dessa faktorer.

Graderingen brukar beskrivas med graderingskoefficienten C_u , men denna har betydande brister när det gäller att beskriva kornfördelningskurvor av olika utseende. Det är möjligt att med enkla metoder finna ett bättre mått på formen hos kornfördelningskurvor. För praktiskt bruk är emellertid i de flesta fall användningen av C_u tillfyllest. Vid jämförelser mellan jordar med samma portal synes modultalet m vara i stort sett en linjär funktion av $1/C_u$.

Kornstorleken synes i första hand påverka spänningsexponenten β . Denna ökar med ökande kornstorlek. Modultalet m synes påverkas i ganska ringa grad. Tendensen är att m ökar då kornstorleken ökar (då $\sigma_j = 100 \text{ kN/m}^2$).

Kornformen är mycket besvärlig att mäta på ett enkelt och entydigt sätt. Inverkan på kompressionsmodulen är främst att spänningsexponenten β minskar då rundningsgraden ökar. Modultalet m påverkas i ganska ringa grad vid jämförelser mellan jordar med samma portal och med $\sigma_j = 100 \text{ kN/m}^2$. Vid jämförelser mellan jordar med samma lagringstäthet ökar modultalet markant då rundningsgraden ökar.

4 EMPIRISK HÄRLEDNING AV KOMPRESSIONSMODULEN

Kompressionsmodulen $M = m \sigma_j \left(\frac{\sigma'}{\sigma_j}\right)^{1-\beta}$ kan som tidigare nämnts beskrivas med hjälp av parametrarna m och β . Med en sammanfattning av resonemangen i kapitel 3 kan man säga följande:

- Modultalet m kan beskrivas med hjälp av portalet och någon parameter som beskriver kornfördelningskurvan. En relativt bra sådan parameter är grade-ringskoefficienten C_u . Dessutom inverkar kornstorleken och kornformen på m , men i ganska ringa grad om σ_j väljs till 100 kN/m^2 .
- Spänningsexponenten β kan betraktas som en materialkonstant. β påverkas främst av kornstorleken och kornformen.

Många mätningar av kompressionsmodulen finns redovisade i litteraturen. En sammanställning av dessa kan ge en bild av hur kompressionsmodulen beror av jordens olika egenskaper. En sådan sammanställning skall göras i detta kapitel.

Vid sammanställningar av detta slag måste man hålla i minnet att försöken utförts av flera olika personer. Enbart av denna anledning brukar man få varierande försöksresultat - detta påvisas bl. a. i en undersökning av Johnston (1969) (han lät 9 olika laboratorier utföra några standardundersökningar på identiska jordprover och erhöll ganska stor spridning i resultaten). Även om försöken är identiskt genomförda så kan resultaten från kompressionsförsök tolkas på olika sätt. Vidare är ödometerförsöket (flertalet redovisade försök utgörs av ödometerförsök) inte helt tillförlitligt på grund av sina felkällor, jämför avsnitt 3.1.

När man således bearbetar en större mängd försöksresultat, som är behäftade med en del felaktigheter, för att få fram en gemensam formel är det naturligt om avvikelserna mellan formelvärdena och de verkliga värdena ibland är ganska betydande. Om man emellertid har många värden att utgå från, får god signifikans och hög korrelationskoefficient, så innebär inte enstaka avvikelser att formeln är felaktig - avvikelserna kan bero på felaktigheter i tolkning och utförande av försök (men kan givetvis också bero på att vissa variabler saknas i formeln).

De försöksresultat, som bearbetas i det följande, utgörs till stor del av resultat hämtade ur litteraturen. Endast försök där författaren har tolkat resultaten enligt tangentmodulteorin (dvs värderat ut m och β) har medtagits. Samtliga resultat gäller förstagångsbelastad jord. Det bearbetade materialet redovisas i tabell 4.1.

Tabell 4.1. Redovisning av bearbetat material.

Referens	Antal försök	Beskrivning och anmärkningar
Moussa (1961)	207	Sand i 100 cm ² ödometer. Samtliga försöksserier utom en (sand nr 7a enligt Moussas beteckning) har medtagits - den uteslutna sanden hade en viss halt av finmaterial, och Moussa fann själv att den markant avvek från de övriga.
Schmidt (1967)	73	Sand i ϕ 6 cm ödometer. Schmidt tolkade försöken med $\sigma_j = 10 \text{ kN/m}^2$, men redovisningen är så utförlig att försöken med lätthet kunnat om-tolkas med $\sigma_j = 100 \text{ kN/m}^2$.
Tammirinne (1969)	103	Sand i 100 cm ² ödometer. Tammirinne har välvilligt ställt en tabellrisk sammanställning av sina försöksresultat till mitt förfogande.

Tabell 4.1. fortsättning

Referens	Antal försök	Beskrivning och anmärkning
Fumagalli (1969)	9	Krossmakadam (kalksten) i ϕ 10 cm ringkompressometer. Endast de resultat där Fumagalli redovisar kurvans lutning och läge i log-log-diagrammet har medtagits.
Lindblom (1972)	4	Sprängsten (sorterat modellmaterial) i CTH:s ϕ 70 cm ringkompressometer, m och β har utvärderats av mig.
Egna försök I	19	Singel och krossmakadam i ϕ 50 cm ringkompressometer, se kapitel 2.
Egna försök II	45	Sand i CTH:s ϕ 8,3 cm sandödometer. Försöken har redovisats i kapitel 3.

Vid den följande bearbetningen har antagits att m och β beror av vissa variabler i enlighet med de slutsatser som kan dras av resultaten i kapitel 2 och 3. Bearbetningen - regressionsanalys enligt minsta kvadratmetoden - har utförts med BMD:s program för multipel regressionsanalys (BMD 03R) på Göteborgs Universitets datacentral.

4.1 Modultalet m

Modultalet m för en jord kan beskrivas med hjälp av begynnelseportalet e_o , i princip på formen ae_o^b . Jordar med olika kornfördelning men samma portal syns enligt figur 58c ha ett linjärt samband mellan m och $1/C_u$. Det är då lämpligt att göra antagelsen

$$m = \frac{k_1}{C_u} e_o^{k_2} \quad (4:1a)$$

För att slippa göra ett program speciellt för denna tämligen enkla ansats är det emellertid lämpligt att skriva ansatsen med $m \cdot C_u$ som funktion av e_o , således

$$m \cdot C_u = k_1 e_o^{k_2} \quad (4:1b)$$

Eftersom de procentuella skillnaderna mellan verkligt och beräknat m -värde är intressantare än avvikelsernas absolutbelopp är det lämpligt att logaritmera ekv. (4:1b). Datorbehandlingen utfördes alltså med ansatsen

$$\lg (m C_u) = k_2 \lg e_o + \lg k_1 \quad (4:1c)$$

Vid analys av samtliga jordar i tabell 4:1 erhöles sambandet

$$m \cdot C_u = 297 e_o^{-3,23} \quad (4:2)$$

med multipla korrelationskoefficienten $R = 0,91$

signifikans $> 97,5 \%$

Det är relativt enkelt att grafiskt åskådliggöra $m \cdot C_u$ som funktion av e_o , och sambandet visas i fig. 67. Av figuren framgår att Lindbloms (1972) värden och mina värden för grovt material skiljer sig något från den övriga gruppen av punkter. Dessa båda grupper representerar försök utförda i ringkompressometer med mätning av kompressionen mellan två ringar, och korndiametern d_{50} är större än 10 mm. Alla andra värden representerar försök där kompressionen mätts mellan stämpel och botten och där $d_{50} < 5$ mm. Det är därför lämpligt att göra en uppdelning och behandla material med $d_{50} > 10$ mm (23 värden) för sig och det fina materialet (443 värden) för sig.

För det grova materialet enbart fås då

$$m \cdot C_u = 209 e_o^{-4,72} \quad (4:3)$$

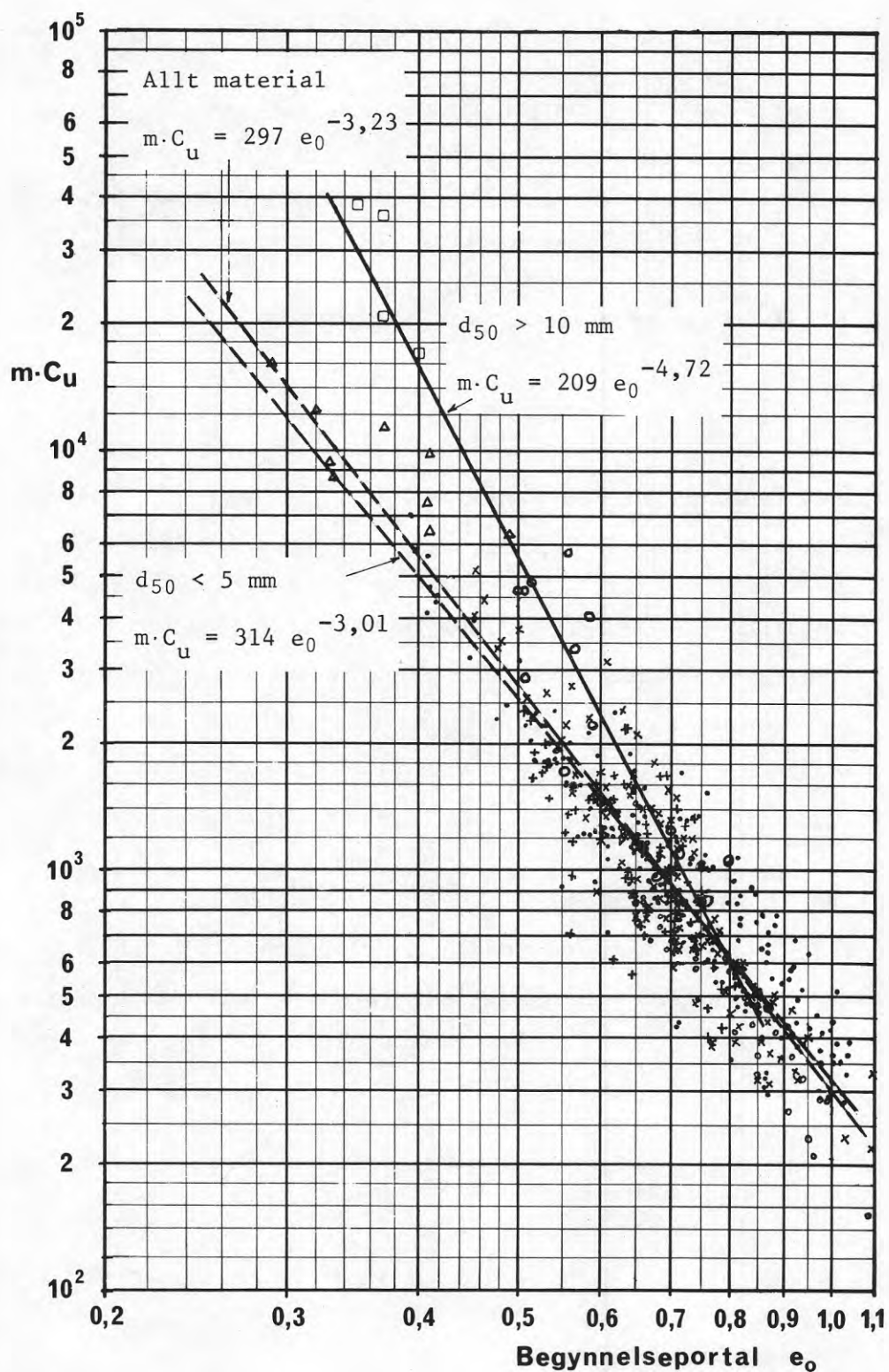


FIG. 67. Produkten $m \cdot C_u$ som funktion av begynnelseportalet e_0 .

The product $m \cdot C_u$ in relation to the initial void ratio. 466 different tests on 80 different soils.

Symboler: • Moussa (1961)
 + Schmidt (1967)
 × Tammirinne (1969)
 △ Fumagalli (1969)
 □ Lindblom (1972)
 ○ Egna försök I
 ◦ Egna försök II

} jämför tabell 4.1.

med multipla korrelationskoefficienten $R = 0,96$
signifikans $> 95 \%$

Ekvation (4:3) är inlagd i figur 67.

För det finare materialet enbart fås

$$m \cdot C_u = 314 e_o^{-3,01} \quad (4:4)$$

med multipla korrelationskoefficienten $R = 0,96$
signifikans $> 97,5 \%$

Ekvation (4:4) skiljer sig inte mycket från ekvation (4:2) - det finare materialet dominerar genom mängden av mätvärden vid bearbetning av båda grupperna. Korrelationen är emellertid bättre för såväl ekv. (4:3) som (4:4) än för ekv. (4:2), vilket visar att uppdelningen medför förbättrade samband.

Det är emellertid inte självklart att m beror av C_u upphöjt till -1 , vilket antogs i ansatsen (4:1), utan C_u kanske bör upphöjas till någon annan exponent. Detta kan provas genom ansatsen

$$m = k_1 C_u^{k_2} e_o^{k_3} \quad (4:5a)$$

Denna ansats bearbetas på formen

$$\lg m = k_2 \lg C_u + k_3 \lg e_o + \lg k_1 \quad (4:5b)$$

För samtliga jordar fås

$$m = 282 C_u^{-0,77} e_o^{-2,83} \quad (4:6)$$

med multipla korrelationskoefficienten $R = 0,87$
signifikans $> 99,5 \%$

Korrelationskoefficienten är här lägre än den var för ekv. (4:2). R-värdena är emellertid inte direkt jämförbara. I ekv. (4:2), (4:3) och (4:4) fås $m \cdot C_u$ som funktion av e_o , medan i ekv. (4:6) m fås som funktion av C_u och e_o , och av rent matematiska orsaker kan då R bli lägre i det senare fallet även om den relationen bättre beskriver m . När C_u -exponenten tillåts variera så bör detta medföra en förbättring av ekvationen. För att konstatera förbättringen får man emellertid tillgripa andra kriterier än att enbart studera R. Detta redovisas nedan i samband med uppdelningen på fint och grovt material.

För jordar med $d_{50} > 10$ mm fås

$$m = 271 C_u^{-0,71} e_o^{-3,72} \quad (4:7)$$

med multipla korrelationskoefficienten $R = 0,88$

signifikans $> 97\%$

Sambandet mellan uppmätt m och m beräknat enligt ekv. (4:7) visas grafiskt i fig. 68. Korrelationskoefficienten är lägre för ekv. (4:7) än för ekv. (4:3), där $m \cdot C_u$ beräknades som funktion av e_o . Dessa båda ekvationer kan emellertid jämföras på så sätt att man undersöker hur många värden som har en felfaktor understigande ett visst värde. För ekv. (4:3) gäller att felfaktorn är mindre än 1,5 för 17 av de 23 värdena (74 %) och mindre än 1,3 för 14 (61 %) av värdena. För ekv. (4:7) gäller att felfaktorn är mindre än 1,5 för 20 av de 23 värdena (87%) och mindre än 1,3 för 16 (70 %) av värdena. Ekv. (4:7) är alltså överlägsen ekv. (4:2) för bestämning av m .

För det finare materialet enbart fås

$$m = 295 C_u^{-0,78} e_o^{-2,64} \quad (4:8)$$

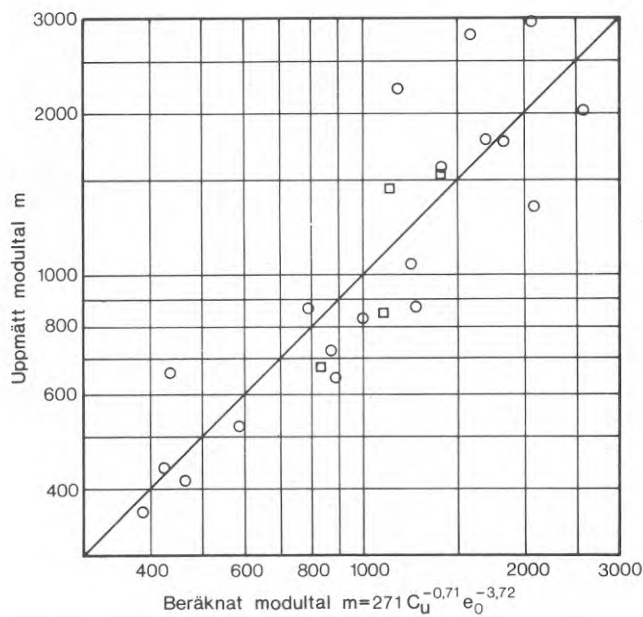


FIG. 68. Samband mellan uppmätt modultal m och m beräknat enligt ekv. (4:7) för grovt material. Symboler, se FIG. 67.

Relation between measured values of the modulus number m and m computed from eq. (4:7). Coarse materials. ($d_{50} > 10$ mm). Symbols, see FIG. 67.

med multipla korrelationskoefficienten $R = 0,88$

signifikans $> 99,5\%$

Uppmätta värden i relation till beräknade redovisas i fig. 69.

Trots att R -värdet för ekv. (4:8) är lägre än för ekv. (4:4) ger ekv. (4:8) bättre överensstämmelser. Med ekv. (4:4) fås en felfaktor som är mindre än 1,5 för 375 av de 443 värdena (85 %) och mindre än 1,3 för 300 (68 %) av värdena. För ekv. (4:8) gäller att felfaktorn är mindre än 1,5 för 400 av de 443 värdena (90 %) och mindre än 1,3 för 322 (73 %) av värdena.

Som framgår av fig. 69 är emellertid spridningen relativt stor.

Till en del beror spridningen på att de vid beräkningen medtagna variablerna e_0 och C_u är otillräckliga för att helt förklara variationerna hos m , men spridningen beror också på mätningarnas ofullkomlighet. Som exempel kan nämnas att Schmidt (1967) för en av sina sandsorter redovisar två försök som ger samma mo-

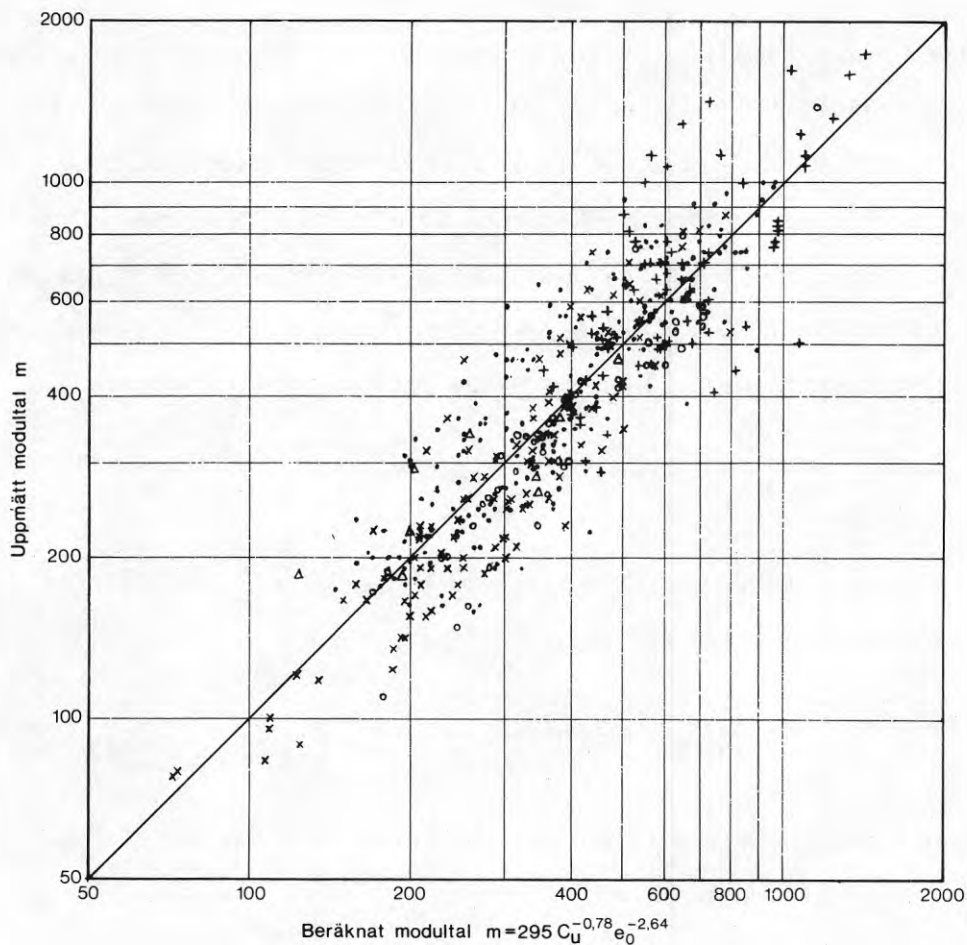


FIG. 69. Uppmätta m -värden i relation till m -värden beräknade enligt ekv. (4:8). Fint material. Symboler, se FIG. 67.

Measured m -values in relation to m -values computed from eq. (4:8). Fine materials ($d_{50} < 5$ mm). Symbols, see FIG. 67.

dultal men där portalen är 0,56 och 0,66; kvoten mellan $0,56^{-2,64}$ och $0,66^{-2,64}$ blir 1,6, dvs med samma sand och samma ödometer kan mätresultaten variera så mycket att avvikelserna blir större än 50 %. Avvikelser av samma storleksordning konstaterades också i avsnitt 3.1, där ödometerhöjdens inverkan undersöktes. Eftersom mätresultaten således kan vara behäftade med avsevärda felaktigheter är det naturligtvis inte möjligt att med en formel erhålla fullgod korrelation även om man lyckas få fram fullgoda variabler.

Regressionsanalysen visar emellertid att mellan det grova och fina materialet finns en ganska stor avvikelse. Det är därför lämpligt att undersöka vilken inverkan kornstorleken har. De tidigare redovisade relationerna mellan m och kornstorleken d_{50} (fig. 26a och fig. 61) har inte givit helt entydigt resultat, men man kan misstänka att m är en linjär funktion av logaritmen för kornstorleken. För samtliga jordar görs ansatsen

$$m = k_1 C_u^{-0,77} e_o^{-2,83} + k_2 \lg d_{50} + k_3 \quad (4:9)$$

Exponenterna i ekv. (4:9) har tagits direkt från ekv. (4:6). Efter regressionsanalys fås för samtliga jordar

$$m = 340 C_u^{-0,77} e_o^{-2,83} + 165 \lg d_{50} + 25 \quad (4:10)$$

med multipla korrelationskoefficienten $R = 0,81$

signifikans $> 99,5 \%$

Korrelationskoefficienten har sjunkit något om man jämför med ekv. (4:6). Detta beror på att ansatsen skiljer sig från de föregående genom att m nu är en funktion av de två variablerna $(C_u^{-0,77} e_o^{-2,83})$ och $\lg d_{50}$; i förra ansatsen var $\lg m$ en funktion av de två variablerna $\lg C_u$ och $\lg e_o$. R -värdena är därför inte direkt jämförbara. Jämförelsen kan emellertid göras på samma sätt som tidigare genom att man undersöker hur många värden som ligger inom en viss felmarginal. Detta görs nedan i samband med uppdelningen på grovt och fint material.

För enbart det grova materialet görs ansatsen

$$m = k_1 C_u^{-0,71} e_o^{-3,72} + k_2 \lg d_{50} + k_3 \quad (4:11)$$

Exponenterna är hämtade från ekv. (4:7). Regressionsanalysen ger för det grova materialet enbart

$$m = 281 C_u^{-0,71} e_o^{-3,72} + 859 \lg d_{50} - 1149 \quad (4:12)$$

med multipla korrelationskoefficienten $R = 0,79$

signifikans $> 90 \%$

Uppmätta värden som funktion av beräknade redovisas grafiskt i fig. 70. Jämför man fig. 68 och 70 ser man att spridningen är ungefär densamma. Vid användning av ekv. (4:12) blir fel-faktorn mindre än 1,5 för 20 av de 23 värdena och mindre än 1,3 för 15 av värdena. Användningen av d_{50} som variabel har alltså inte medfört någon förbättring. Av en del speciella orsaker torde det också vara svårt att avsevärt minska spridningen. Som exempel kan nämnas att Lindbloms (1972) värden på m uppvisar en avsevärd variation för en blygsam ändring av portalet. Hans försök utfördes dels på handstampat material, dels på material packat med en 65 kg plattvibrator, och han förklarar själv avvikelserna med att den tunga vibratorn åstadkom nedkrossning i kontaktpunkterna mellan kornen och sålunda orsakade en förbelastningseffekt. Detta förefaller troligt.

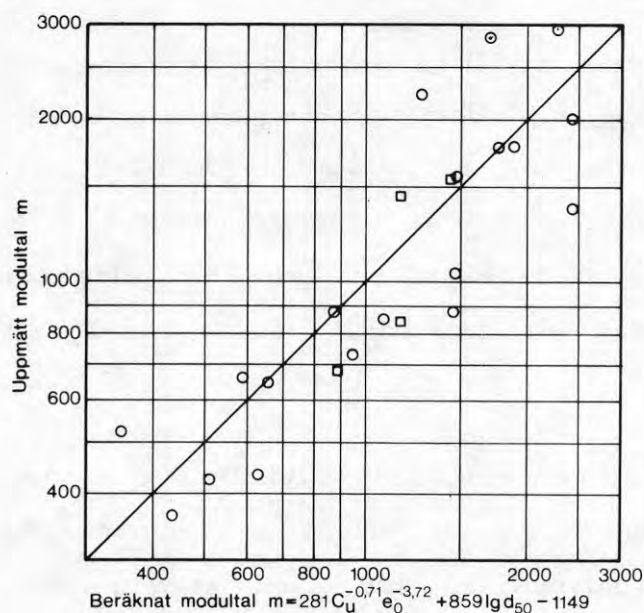


FIG. 70. Uppmätta m -värden i relation till m -värden beräknade enligt ekv. (4:12). Grovt material. Symboler, se FIG. 67.

Measured m -values in relation to m -values computed from eq. (4:12). Coarse materials ($d_{50} > 10$ mm). Symbols, see FIG. 67.

För det finare materialet enbart görs ansatsen

$$m = k_1 C_u^{-0,78} e_o^{-2,64} + k_2 \lg d_{50} + k_3 \quad (4:13)$$

Efter regressionsanalys fås

$$m = 260 C_u^{-0,78} e_o^{-2,64} - 44 \lg d_{50} + 15 \quad (4:14)$$

med multipla korrelationskoefficienten $R = 0,85$

signifikans $> 99,5 \%$

Ekv. (4:14) uppvisar en egendomlighet i jämförelse med (4:12) och (4:10): k_2 är negativ, -44. Detta innebär att modultalet m sjunker när d_{50} ökar, vilket strider mot det resultat som redovisas i fig. 61. Sambandet mellan uppmätt m och m beräknat enligt ekv. (4:14) redovisas i fig. 71. En undersökning av inom vilka felmarginaler värdena ligger ger att felfaktorn är mindre än 1,5 för 89 % av värdena och mindre än 1,3 för 72 % av värdena - således något sämre resultat än som erhöles med ekv. (4:8).

Någon direkt förbättring fås alltså ej när d_{50} tas med i analysen på så sätt som ovan gjorts. Som tidigare påpekats (i avsnitt 3.2.3) är det emellertid inte sannolikt att d_{50} är något bra måttetal för kornstorleken. Här är nu en möjlighet att med regressionsanalysens hjälp undersöka om den aktiva korndiametern d_a (se ekv. 3:10) är att föredra framför d_{50} som måttetal för kornstorleken.

I ansatserna (4:9), (4:11) och (4:13) byts därför d_{50} ut mot $d_a \approx \lg d_{50} - 1,466 \lg^2 C_u$ - detta innebär att kornfördelningskurvorna antas vara normalfördelade. Detta stämmer inte för alla jordar, men eftersom antalet jordar är stort (totalt 80 st) bör analysen ändå ge en anvisning om ifall d_a är att föredra framför d_{50} .

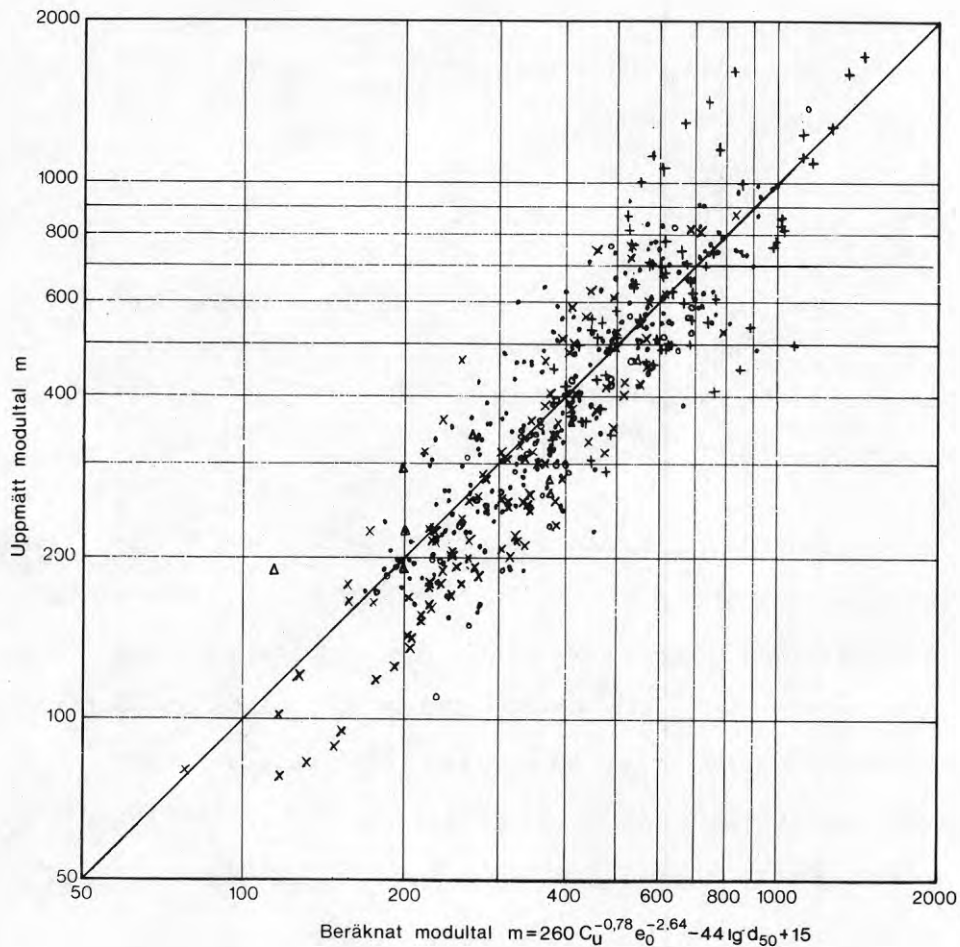


FIG. 71. Uppmätta m -värden i relation till m -värden beräknade enligt ekv. (4:14). Fint material. Symboler, se FIG. 67.

Measured m -values in relation to m -values computed from eq. (4:14). Fine materials ($d_{50} < 5$ mm). Symbols, see FIG. 67.

För allt material fås

$$m = 329 C_u^{-0,77} e_o^{-2,83} + 82 (\lg d_{50} - 1,466 \lg^2 C_u) + 47 \quad (4:15)$$

med korrelationskoefficienten $r = 0,79$

signifikans $> 99,5 \%$

För grovmaterialet enbart fås

$$m = 274 C_u^{-0,71} e_o^{-3,72} + 25 (\lg d_{50} - 1,466 \lg^2 C_u) + 36 \quad (4:16)$$

med korrelationskoefficienten $r = 0,78$

signifikans $> 90\%$

För enbart det finare materialet fås

$$m = 259 C_u^{-0,78} e_o^{-2,64} + 17 (\lg d_{50} - 1,466 \lg^2 C_u) + 46 \quad (4:17)$$

med korrelationskoefficienten $r = 0,85$

signifikans $> 99,5\%$

För samtliga tre grupper gäller att $(\lg d_{50} - 1,466 \lg^2 C_u)$ är ett sämre måttal för kornstorleken än d_{50} - korrelationskoefficienten är lägre och koefficienten k_2 har ett mindre belopp. Slutsatsen av detta blir att den teoretiskt härledda aktiva korn-diametern d_a är sämre än d_{50} vid jämförelser mellan jordar med olika kornstorlek. Detta är glädjande såtillvida som att d_{50} är mycket lättare att bestämma än d_a .

4.2 Spänningsexponenten β

Som tidigare angivits kan spänningsexponenten β betraktas som en materialkonstant, till sin storlek beroende av kornstorleken och kornformen. Kornstorleken har vi måttal för men däremot ej för kornformen. Detta gör att den följande analysen endast kan avse kornstorleken.

För de jordar som undersökts av Moussa (1961), Tammirinne (1969) och Fumagalli (1969) har β ej utvärderats som en materialkonstant. I den följande analysen betraktas emellertid också för dessa jordar β som en materialkonstant. Därvid har för Moussas och Tammirinnes försök utvärderats medelvärdet av β för varje jord. De nio försök av Fumagalli som medtagits representerar tre jordar med samma kornfördelning men med olika kornform. För dessa jordar har antagits $\beta = 0,63$, vilket värde erhöles vid fem av de nio försöken.

Totalt analyseras 80 olika β -värden, representerande lika många olika jordar. I enlighet med de resultat som redovisas i fig. 61b är det lämpligt att göra ansatsen

$$\beta = k_1 \lg d_{50} + k_2 \quad (4:18)$$

Med denna ansats erhöles med regressionsanalys

$$\beta = 0,28 \lg d_{50} + 0,55 \quad (4:19a)$$

med multipla korrelationskoefficienten $R = 0,88$

signifikans $>95\%$

Ekv. (4:19a) kan omskrivas på formen

$$\beta = 0,28 \lg \frac{d_{50}}{0,01} \quad (4:19b)$$

Den kommer då mycket nära den linje som lagts in "på fri hand" i fig. 61b. d_{50} är uttryckt i mm.

Med $R = 0,88$ utgör naturligtvis ekv. (4:19) ett mycket starkt samband. Det är närmast att betrakta som märkligt att β i så hög grad beror av enbart kornstorlekn, uttryckt enbart med korndiametern d_{50} .

Avvikelserna mellan de uppmätta β -värdena och de värden som erhålls med ekv. (4:19) är inte stora. Sambandet mellan β och d_{50} för samtliga jordar visas i fig. 72, där också den härledda kurvan är inlagd. Kurvans lutning bestäms naturligtvis i hög grad av de grova jordarna längst upp till höger, men kurvan förefaller stämma även om man extrapolerar den nedåt; för $d_{50} = 0,01$ mm blir $\beta = 0$, och en jord med $d_{50} = 0,01$ torde vara en lera och lerorna brukar ha $\beta = 0$. Kurvan stämmer också bra med det β -värde som Hansbo och Torstensson (1968) fann som resultat av 90 ödometerförsök på siltig sand från en deltaavlagring: d_{50} låg inom finsandfraktionen och β bestämdes till 0,37. Däremot stämmer inte kurvan riktigt överens med Schmidts (1967)

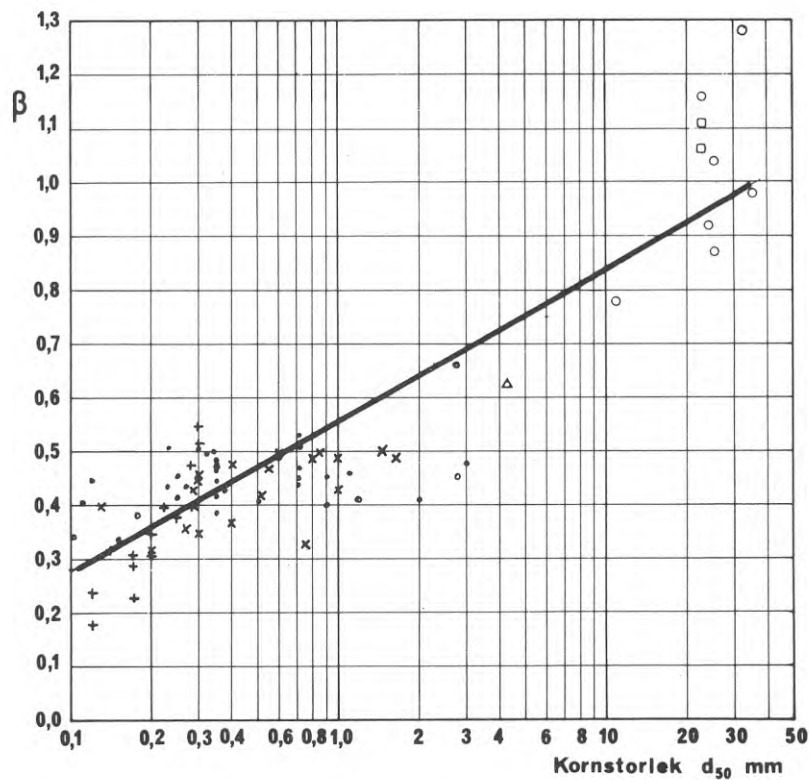


FIG. 72. Spänningsexponenten β som funktion av korndiametern d_{50} . Symboler, se FIG. 67.

The stress exponent β in relation to the grain diameter d_{50} . Symbols, see FIG. 67.

samband (jämför fig. 14).

De största avvikelserna från den inlagda kurvan i fig. 71 uppvisar de grova jordarna längst upp till höger samt några jordar med d_{50} mellan 0,75 och 3 mm. För de grova jordarna kan avvikelserna nästan helt förklaras med variationerna i rundningsgrad (jämför fig. 26b). De jordar som har d_{50} mellan 0,75 och 3 mm och uppvisar stora avvikelser måste studeras var för sig. Två av mina egna jordar ligger i detta område avsevärt under den inlagda kurvan. Den ena jorden ($d_{50} = 2,8$ mm) är mycket rundkornig (Simrishamns-grus) och har därför ett lågt β -värde,

jämför fig. 64. Den andra av mina jordar i området är språnggraderad (kornkurva 5 i fig. 58a), och för denna jord är sannolikt d_{50} ett dåligt mått på kornstorleken; det finare materialet fyller i stort sett ut hålrummen mellan de grova kornen och de fina kornen deltar därför aktivt i lastöverföringen. Kornstorleken hos finmaterialet påverkar därför β -värdet men påverkar inte alls d_{50} . Fyra av Tammirinnens jordar hör också till den lilla punktsvärm som ligger nedanför kurvan. Tre av dessa jordar (med $d_{50} = 1, 0, 1, 45$ och $1, 6$ mm) har höga C_u -värden, 6,5 till 22, och d_{50} ger sannolikt för dessa jordar ett för stort värde på kornstorleken, eftersom övriga jordar i stort sett är ensgraderade. För den jord som har $d_{50} = 0, 75$ mm och $\beta = 0, 33$ kan emellertid ingen förklaring lämnas varför β -värdet ligger så lågt. Moussas jordar med d_{50} mellan 0,9 och 3 mm har också låga β -värden, men dessa jordar är rundade och ett par av dem har relativt högt C_u -värde (7,2).

Större delen av avvikelserna från den inlagda kurvan kan alltså förklaras med hjälp av egenskaper hos jorden som ej beaktats vid härledningen av ekv. (4:19). Det finns då ingen anledning att gå ifrån det härledda sambandet till förmån för exempelvis en krökts linje, som skulle kunna följa värdena i fig. 72 mera exakt.

Eftersom en del av avvikelserna i fig. 72 förklarats med hänvisning till höga C_u -värden finns det skäl att pröva om aktiva korndiametern d_a är ett bättre måttetal för kornstorleken än d_{50} vid bestämningen av β . Om man emellertid i ansatsen (4:18) byter ut d_{50} mot $(\lg d_{50} - \lg^2 C_u)$ så blir resultatet mindre bra: korrelationskoefficienten $R = 0, 53$. Detta innebär att d_a är ett dåligt måttetal för kornstorleken också vid bestämningen av β . Därmed kan den aktiva korndiametern d_a förklaras vara olämplig som måttetal för kornstorleken när det gäller kompressibiliteten.

För att ändå pröva om kornfördelningen har någon större betydelse när d_{50} används som måttetal för kornstorleken kan man emellertid göra en ansats, där C_u inte betyder lika mycket som vid beräkningen av d_a enligt ekv. (3:10). Följande ansats används:

$$\beta = k_1 \lg d_{50} + k_2 \lg C_u + k_3 \quad (4:20)$$

Regressionsanalysen ger

$$\beta = 0,29 \lg d_{50} - 0,065 \lg C_u + 0,58 \quad (4:21a)$$

med korrelationskoefficienten $R = 0,89$

signifikans $> 99 \%$

Ekvationen kan lämpligen omformas så att man direkt kan se vid vilken kornstorlek β går mot 0.

$$\beta = 0,29 \lg \frac{d_{50}}{0,01} - 0,065 \lg C_u \quad (4:21b)$$

d_{50} är uttryckt i mm.

Ekv. (4:21) är något bättre än ekv. (4:19) för bestämning av β . Sambandet mellan uppmätt β -värde och β beräknat enligt ekv. (4:21) redovisas grafiskt i fig. 73. Vid en jämförelse med fig. 72 kan man konstatera att de β -värden som ligger mellan 0,4 och 0,5 nu är bättre samlade. En del stora avvikelser finns fortfarande, men större delen av dessa torde som tidigare nämnts bero av kornformen.

4.3 Slutsatser

Av de utförda regressionsanalyserna framgår att det för sand och grus är möjligt att på ett någorlunda tillförlitligt sätt beräkna kompressionsmodulen med användande av portalet och de enkla materialegenskaperna C_u och d_{50} .

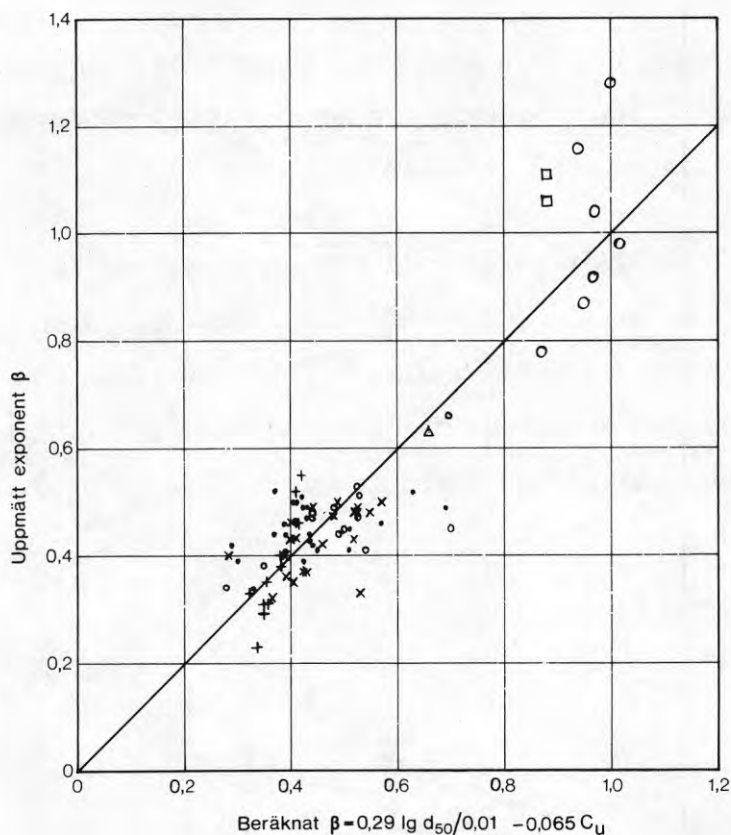


FIG. 73. Uppmätta β -värden i relation till β -värden beräknade enligt ekv. (4:21). Symboler, se FIG. 67.

Measured β -values in relation to β -values computed from eq. (4:21). Symbols, see FIG. 67.

Vid beräkning av modultalet m visade det sig fördelaktigt att göra en uppdelning i material med $d_{50} < 5$ mm (provat i ödometer) och grovt material med $d_{50} > 10$ mm (provat i ringkompresmeter). Material med d_{50} mellan 5 och 10 mm har inte undersökts. För fint material kan m beräknas enligt formeln

$$m = 295 C_u^{-0,78} e_o^{-2,64} \quad (4:8)$$

För grovt material kan m beräknas enligt formeln

$$m = 271 C_u^{-0,71} e_o^{-3,72} \quad (4:7)$$

Spänningsexponenten β kan för såväl grovt som fint material beräknas enligt formeln

$$\beta = 0,29 \lg \frac{d_{50}}{0,01} - 0,065 \lg C_u \quad (4:21)$$

med d_{50} i mm.

Vid beräkningen av β bör man också ta hänsyn till kornens rundningsgrad. Vid rundade korn bör det beräknade β -värdet minskas och vid skarpkantiga ökas med upp till 30 %.

De angivna formlerna gäller material som inte i väsentlig grad avviker från de undersökta jordarna. Dessa hade d_{50} mellan 0,1 och 35 mm samt C_u mellan 1,1 och 34. Såväl naturliga jordar som krossprodukter har undersökts. Vertikalspänningen i provet har i allmänhet inte överskridit 1600 kN/m^2 .

LITTERATUR.

- Andréasson, 1971:
Friktionsjordars kompressibilitet. Byggmästaren nr 4, Stockholm.
- Bishop, 1966:
The Strength of soils as engineering materials. Geotechnique, vol 16, no 2, London.
- Chaplin 1961 a:
An experimental study of the settlement of footings in sand. Thesis, Univ. of Birmingham.
- Chaplin 1961 b:
Compressibility of sands and settlements of model footings and piles in sand. 5th Int. Conf. on Soil Mech. a. Found, Eng., vol. II, Paris.
- Chaplin 1961 c:
Soil properties and their measurements, discussion, 5th Int. Conf. on Soil Mech. a. Found. Eng., vol. III, Paris.
- Field, 1963:
Towards the statistical definition of a granular mass. Proc., 4th Australia - New Zealand Conf. on Soil Mech. a. Found. Eng., Adelaide.
- Floss, Siedek & Voss, 1969:
Verdichtungs- and Verformungseigenschaften grosskörniger, bindiger Mischböden. Bundesanstalt f. Strassenwesen, Wiss. Berichte, nr 6, Berlin.
- Hansbo, 1970:
Provisoriskt kompendium i geoteknik, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
- Hansbo & Torstensson, 1968:
Sättningar under oljecisterner i Karlstad. Väg- och Vattenbyggaren nr 8, Stockholm.
- Hansen, J. Brinch, 1966:
Stress-strain relationships for sand. DGI Bulletin nr 20, Köpenhamn.
- Hazen, 1920:
Hydraulic-fill dams. ASCE Transactions, vol. 83.
- Janbu, 1963:
Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. Proc., European Conf. o. Soil Mech. a. Found. Eng., vol. I., Wiesbaden.

Janbu, 1965:

Consolidation of clay layers based on non-linear stress-strain. Proc., 6th Int. Conf. on Soil Mech. a. Found. Eng., vol. 1, Montreal.

Janbu & Hjeldnes, 1965:

Principal stress ratios and their influence on the compressibility of soils. Proc., 6th Int. Conf. on Soil Mech. a. Found. Eng., vol. 1, Montreal.

Janbu, 1970:

Grunnlag i geoteknikk. Trondheim 1970.

Johnston, 1969:

Laboratory comparison tests using compacted fine-grained soils. Proc., 7th Int. Conf. on Soil Mech. a. Found. Eng. Mexico.

Jänke, 1968:

Zusammandrückbarkeit und Scherfestigkeit nichtbindiger Erdstoffe - ihre quantitative Ermittlung mit Hilfe einfacher Kennwerte und Feststellung der sie bestimmenden Einflussfaktoren. Baumaschine und Bautechnik, Heft 3 und 4.

Kjaernsli & Sande, 1963:

Compressibility of some coarse-grained materials. Proc., Europ. Conf. on Soil Mech. a. Found. Eng., Wiesbaden.

Kjaernsli, 1968:

Fundamentering på grus- og steinfyllinger. NGI publikasjon nr 73, Oslo.

Kjellman & Jakobson, 1955:

Some relations between stress and strain in coarse-grained cohesionless materials. SGI Proc., no. 9, Stockholm.

Kolbuszewski & Frederick, 1963:

The significance of particle shape and size on the mechanical behavior of granular materials. Proc., Europ. Conf. on Soil Mech. a. Found. Eng., Wiesbaden.

Kotzias, 1963:

Die Zusammendrückbarkeit von Schluff. Mitt. Inst. f. Verkehrswasserbau, Grundbau u. Bodenmech., Heft 28, Aachen.

Krumbein, 1941:

Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. Journ. Sedim. Petr., vol. 2, no. 2.

Lee & Farhoomand, 1967:

Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression. Canadian Geotechnical Journal, vol. IV. nr 1.

Lindblom, 1972:

Kompressionsegenskaper hos traktorutbredda sprängstensfyllningar. Doktorsavhandling, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.

Marachi, 1969:

Strength and deformation characteristics of rockfill materials. Thesis, Univ. of California.

Moussa, 1961:

Die Zusammandrückbarkeit von Sand. Mitt. Inst. f. Verkehrswasserbau, Grundbau u. Bodenmechanik., Heft 23, Aachen.

Muhs & Kany, 1954:

Einfluss von Fehlerquellen bei Kompressionsversuchen. Grundbau Vorschriften und Versuche, Teil I, Stuttgart (Fortschr. u. Forsch. im Bauwesen, Reihe D, 17).

Muhs, 1957:

Die Prüfung des Baugrundes und der Böden. Mitt., DEGEBO, Heft 11, Berlin.

Ohde, 1939:

Zur Theorie der Druckverteilung im Baugrund. Bauingenieur vol. 14 nr 33 och 34.

Ohde, 1950:

Neue Erdstoff-Kennwerte. Die Bautechnik, vol. 27, Heft 11.

Ohde, 1951:

Grundbaumechanik. Hütte Bd III. Berlin.

Pusch, 1962:

Clay particles. Statens Råd för Byggnadsforskning, Handlingar nr 40, Norrköping.

Pusch, 1972:

Jords uppbyggnad. Manuskript till SGF:s laboratoriekommittés laboratorieanvisningar del 3.

Rex & Peck, 1956:

A laboratory test to evaluate the shape and surface texture of fine aggregate particles. Public Roads, Bd. 29, no. 5.

Russell & Taylor, 1937:

Roundness and shape of Mississippi river sands. *Journal Geologie*, vol 45, no. 3.

Schmidt, 1967:

Uniaxial primary compression of sands. *DGI Bulletin nr 23*, Köpenhamn.

Schulze & Moussa, 1961:

Factors affecting the compressibility of sand. *Proc., 5th Int. Conf. on Soil Mech. a. Found. Eng., vol. 1*, Paris.

SGF:s laboratoriekommitté, 1971 (huvudförf. Hans Fagerström):

Packningsegenskaper - förslag till geotekniska laboratorieanvisningar, del 5. *Byggforskningens informationsblad B2:1971*. Stockholm.

Siedek & Voss, 1955:

Über die Lagerungsdichte und den Verformungswiderstand von Korngemischen. *Strasse und Autobahn nr 6*, Bielefeld.

Tammirinne, 1969:

Kitkamaalajien rakenne ja kokoonpuristuvuus (The structure and compression of cohesionless soils). *Statens Tekniska Forskningsanstalt, serie III nr 136*, Helsingfors.

Terzaghi, 1925 a:

Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage. *Denticke, Leipzig/Wien*.

Terzaghi, 1925 b:

Modern conceptions concerning foundation engineering. *Boston Soc. of Civ. Engrs Journal, Vol 12. No 10*.

Timoshenko & Goodier, 1951:

Theory of elasticity. Mc Graw-Hill, New York.

Vallerga, Seed, Monismith and Cooper, 1957:

Effekt of shape, size, and surface roughness of aggregate particles on the strength of granular materials. *ASTM, Special Technical Publication, nr 212*.

Wadell, 1932:

Volume, shape and roundness of rock particles. *Journal Geologie vol 40*.

Wagner, 1957:

The use of the unified soil classification system by the Bureau of Reclamation. *Proc., 4th Int. Conf. on Soil Mech. a. Found. Eng., vol. 1*, London.

R36: 1973

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: 25 kronor