

Byggforskningsrådet



Kompressions- egenskaper

Geotekniska laboratorieanvisningar, del 10

Göran Sällfors & Leif Andréasson

Kompressionsegenskaper

Göran Sällfors & Leif Andréasson i samarbete med
Svenska geotekniska föreningens (SGF) laboratoriekommitté

Geotekniska laboratorieanvisningar, del 10

Byggforskningsrådet

Kompressionsegenskaper

Geotekniska laboratorieanvisningar, del 10

Svenska Geotekniska Föreningens (SGF) laboratoriekommitté har utarbetat föreliggande förslag till anvisningar som ingår i en serie på tio delar. Av dessa har samtliga utom del 1 och 10 tidigare kommit ut.

Kompressionsegenskaperna är ofta avgörande för vilken grundläggningsmetod som skall väljas och vilka grundförstärkningsåtgärder som erfordras. En

felaktig bestämning av kompressions-egenskaperna leder ofta till stora ekonomiska konsekvenser.

I anvisningarna beskrivs hur man bestämmer kompressionsegenskaperna för kohesionsjord, friktionsjord, silt och blandkorniga jordarter.

SGFs laboratoriekommitté räknar med att de rekommenderade metoderna prövas praktiskt och är tacksam för synpunkter. Synpunkter skickas till Göran Sällfors, Institutionen för geoteknik med grundläggning, Chalmers Tekniska Högskola, 412 96 Göteborg.

Omslagsbilden:

Låg hållfasthet och stor deformation kännetecknar Mexico Citys leriga jord, uppbyggd som den är av vulkanaska sedan miljoner år tillbaka. På sina ställen har marken sjunkit 8 m. Genom en ny metod, beskriven vid den tionde internationella

geoteknikkongressen i Stockholm 1981, har man lyckats rädda den gamla Capuchinas-katedralen i Mexico City från 1787. Den låga sidobyggnaden till höger, vägande drygt 13 000 ton, har sedan bilden togs lyfts upp 3,5 m till normal nivå på bara två och en halv månad.

Innehållet har remissbehandlats av

Toralv Berre, Norges Geotekniske Institutt
Lennart Börjesson, Tekniska Högskolan i Luleå
Jorma Hartikainen, Uleåborgs Universitet, Finland
Bernt Jakobson, Bro
Ture Olofsson, Statens Vägverk
Sven Olofsson, Scandiaconsult
Erik Sandegren, Statens Järnvägar
Markku Tamminne, Statens Tekniska Forskningscentral, Finland
vilka samtliga har utsetts av SGFs styrelse.

Synpunkter har dessutom lämnats av Rolf Larsson, Statens geotekniska institut.

SGFs laboratoriekommitté:

Sven Hansbo, ordförande, CTH och J&W
Göran Sällfors, sekreterare, CTH
Hans Fagerström, VBB
Rudolf Karlsson, konsult
Roland Pusch, LuH
Torbjörn Stål, SGI
Carl-Eric Wiesel, SGI

Adj ledamöter:

Nils Flodin, KTH
Bengt Steen, Byggnadsforskningsrådet
Redaktör: Bengt Steen
Omslagsfoto: Bengt Steen (1969)

T2:1985

ISBN 91-540-4303-4

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Spångbergs Tryckerier AB, Stockholm 1986

Förord

Utarbetandet av föreliggande laboratorieanvisning påbörjades av SGFs laboratoriekommitté på sjuttioalet. Uppdraget att utarbeta manus tilldelades ursprungligen Leif Andréasson. På grund av växande arbetsbörda, speciellt sedan han utnämnts till chef för SGI, kunde Andréasson emellertid inte finna tid att ensam genomföra uppgiften, varför Göran Sällfors fick i uppdrag av SGFs laboratoriekommitté att vara medförfattare. Efter Leif Andréassons död har slutmanus utarbetats av Göran Sällfors i samarbete med laboratoriekommittén.

Kompressionsegenskaper utgör den näst sista delen av den serie laboratorieanvisningar om totalt tio delar som är avsedda att tryckas. Den återstående, sista delen - Del 1. Allmänt - kommer sannolikt att skjutas på framtiden till dess samtliga hittills utgivna delar slutreviderats.

I denna handling bör följande punkter särskilt uppmärksammas.

- o En ny typ av ödometerförsök, CRS (Constant rate of strain), redovisas. CRS-försöket kan genomföras på relativt kort tid och ger en noggrannare bestämning av deformationsegenskaperna än försök med stegvis pålastning. Det ger emellertid ej information om de sekundära konsolideringsegenskaperna.
- o Ödometerförsök med stegvis pålastning bör, liksom tidigare, redovisas på sedvanligt sätt i halvlogaritmiska diagram ($\log \sigma'/\epsilon$), men vid sidan därav också i rent linjära diagram (σ'/ϵ). Sistnämnda redovisning

visar mycket tydligare om det undersökta provet är stort.

- o Vid ödometerförsök på lera skall filterstenarna vara vattenmättade, men något vatten skall i övrigt ej fyllas på innan vertikal belastning påförts.
- o Ödometerringens höjd/diameterkvot bör vara < 0.4 . Endast för lösa leror kan ett högre värde accepteras.

Innehåll

1	INLEDNING	5	BESTÄMNING AV KOMPRESSIONSEGENSKAPER HOS FRIKTIONSJORD
2	BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER	5.1	Bakgrund
2.2	Definitioner	5.2	Ödometerförsök
2.2.1	Moduler	5.2.1	Utrustning
2.2.2	Modulernas spänningsberoende	5.2.2	Montering
2.2.3	Konsolidering	5.2.3	Provning
2.2.4	Förkonsolideringstrycket σ'_c	5.2.4	Utvärdering och redovisning
		5.2.5	Tillförlitlighet
3	INVERKANDE FAKTORER	5.3	Ringkompressometerförsök
3.1	Jords sammansättning	5.4	Triaxialförsök
3.2	Jords spänningshistoria	5.5	Kompressionens tidsförlopp
3.3	Inverkan av spänningsväg		
4	BESTÄMNING AV KOMPRESSIONSEGENSKAPER HOS KOHESIONSJORD	6	BESTÄMNING AV KOMPRESSIONSEGENSKAPER HOS SILT OCH BLANDKORNIGA JORDARTER
4.1	Allmänt	6.1	Bakgrund
4.2	Ödometerförsök med stegvis pålastning	6.2	Utrustning och montering
4.2.1	Utrustning	6.3	Provning
4.2.2	Montering	6.4	Utvärdering
4.2.3	Provning	6.5	Tillförlitlighet
4.2.4	Redovisning		
4.2.5	Utvärdering	7	LITTERATUR
4.2.6	Tillförlitlighet		
4.2.7	Sekundär konsolidering		
4.2.8	Snabbförsök		
4.3	Ödometerförsök med konstant deformationshastighet		
4.3.1	Utrustning		
4.3.2	Montering		
4.3.3	Provning		
4.3.4	Redovisning		
4.3.5	Utvärdering		
4.3.6	Tillförlitlighet		
4.4	Triaxialförsök		
4.4.1	Utrustning		
4.4.2	Montering		
4.4.3	Provning		
4.4.4	Redovisning		
4.4.5	Utvärdering		
4.4.6	Felkällor		
4.5	Jämförelse av resultat från olika typer av ödometerförsök		

1 Inledning

Resultaten från kompressionsförsök utgör i regel det huvudsakliga underlaget för sättningsberäkningar. Eftersom sättningarna ofta är avgörande för val av grundläggningsmetod, utgör bestämningen av kompressionsegenskaperna hos jord en mycket viktig del inom geotekniken.

Vid bestämning av jords kompressionsegenskaper är kompressionsförsök med förhindrad sidodeformation standard. En för sådana försök specialgjord apparat är ödometern, i vilken provet innesluts i en ring av stål (ofta invändigt klädd med teflon) eller keramiskt material. För försök på kohesionsjord används endast denna apparat. Den kan även användas för friktionsjord, men det är vanligare att då använda triaxialapparat eller ringkompressometer.

Ödometerförsök utförs oftast på ostörda prover av lera. Med ostörda prover avses här prover tagna främst med kolvprovtagare och sedan hanterade och förvarade på ett sådant sätt att egenskaperna ej menligt påverkas. Kompressionsegenskaperna hos en jord beror starkt på dess spänningshistoria och då främst förkonsolideringstrycket. Att bestämma förkonsolideringstrycket är därför bland det viktigaste vid en laboratorieundersökning. Huvuddelen av denna laboratorieanvisning avser ödometerförsöket. Vid ödometerförsök på lera är den klassiska metoden med stegvis pålastning fortfarande allmänt brukad. Detta försök, som tar ca en vecka att genomföra, beskrivs här utförligt. Krav på snabbare ödometerförsök på lera och noggrannare bestämning av förkonsolideringstrycket har medfört att alternativa försöksrutiner utvecklats.

Ett alternativ, innebärande en pålastning som leder till konstant deformationshastighet, har visat sig särskilt lämpligt. Även denna försökstyp beskrivs därför utförligt.

För friktionsjordar brukar kompressionsegenskaperna bestämmas på laboratoriepackade prover. På grund av störningseffekter vid provtagning är det normalt inte möjligt att på laboratoriet bestämma förkonsolideringstrycket. Eftersom kompressionsegenskaperna påverkas av störningen relateras de istället ofta till jordens portal eller lagringstäthet.

Förkonsolideringstrycket hos friktionsjord bör om möjligt bestämmas genom provbelastning av jorden i fält.

Kompressionsegenskaperna för spänningar under förkonsolideringstrycket bör på laboratoriet utvärderas från återbelastningskurvan. Detta innebär att provet först skall belastas till spänningar motsvarande förkonsolideringstrycket, sedan avlastas och slutligen belastas på nytt.

Kompressionsförsök på moräner, som i regel är starkt överkonsoliderade, utförs på laboratoriepackade prover. Kompressionsegenskaperna utvärderas även här ur återbelastningskurvan. Detta gäller fasta moräner. Lösa ytmoräner och svallade moräner bör behandlas som sedimentära friktionsjordar.

Vid kompressionsförsök på grus och grövre jordar krävs en stor kompressionsapparat. En lämplig sådan apparat är ringkompressometern. Ödometerringen ersätts här med ringar, placerade med visst mellanrum. Härigenom elimineras inverkan av sidofriktion. Ringkompressometrar finns

för närvarande endast på vissa forskningslaboratorier, t ex på CTH (Chalmers tekniska högskola) och SGI (Statens geotekniska institut). En detaljerad beskrivning av provningsförfarandet har därför ej tagits med i denna anvisning.

2 Beteckningar och definitioner

2.1 Beteckningar

C_c	kompansionsindex
c_v	konsolideringskoefficient
CRS	ödometerförsök med konstant deformationshastighet (Constant Rate of Strain)
CHG	ödometerförsök med konstant portrycksgradient (Constant Hydraulic Gradient)
E	elasticitetsmodul
e	portal
e_o	begynnelseportal
h_o	provhöjd vid försökets början
h_{50}	provhöjd vid 50% av den primära konsolideringen
K	tryckmodul
K_o	$\alpha'_{ho} / \alpha'_{vo}$
k_m	tryckmodultal
M	kompansionsmodul
M'	kompansionsmodultal ($dM/d\sigma'$)
m	kompansionsmodultal
m_v	kompansibilitet
OCR	överkonsolideringsgrad (Over Consolidation Ratio)
p_j	jämförelsespänning
s	sättning
t_p	tid för primär konsolidering
t_{50}	tid för 50% av den primära konsolideringen

t_{90}	tid för 90% av den primära konsolideringen
T_v	tidsfaktor
α	spänningsexponent
α_s	koefficient för sekundär kompression
β	spänningsexponent
γ	vinkeländring
ϵ	relativ kompression
ϵ_2	kompansionsindex ($=\epsilon_{10} \lg 2$)
ϵ_{10}	$C_c / (1+e_o) = C_R$
ϵ_v	volymkompression
ϵ_1	kompansions i största huvudspänningens riktning
ϵ_2	kompansions i mellersta huvudspänningens riktning
ϵ_3	kompansions i minsta huvudspänningens riktning
ϕ	inre friktionsvinkel
v	kontraktionstal
σ	spänning
σ'	effektivspänning
σ'_c	förkonsolideringstryck (alt. σ'_p)
σ_j	jämförelsespänning
σ'_L	spänning där modulen upphör att vara konstant
σ_1	största huvudspänning
σ_2	mellersta huvudspänning
σ_3	minsta huvudspänning
α'_{ho}	horisontell effektivspänning in situ
α'_{vo}	(σ'_o) vertikal effektivspänning in situ
$\Delta\sigma'$	tilläggsbelastning
$\Delta\sigma'_v$	vertikal belastningsökning
$\Delta\sigma'_h$	horisontell belastningsökning
τ_{fu}	odränerad skjuvhållfasthet

2.2 Definitioner

2.2.1 Moduler

För jord liksom för andra material finns flera moduler definierade. Nedan lämnas en definition av de moduler som är aktuella i samband med kompressionsförsök.

Varje modul kan bestämmas som antingen tangent- eller sekantmodul, fig 1. Båda dessa definitioner förekommer, men om ej annat anges i denna skrift gäller tangentmodulen.

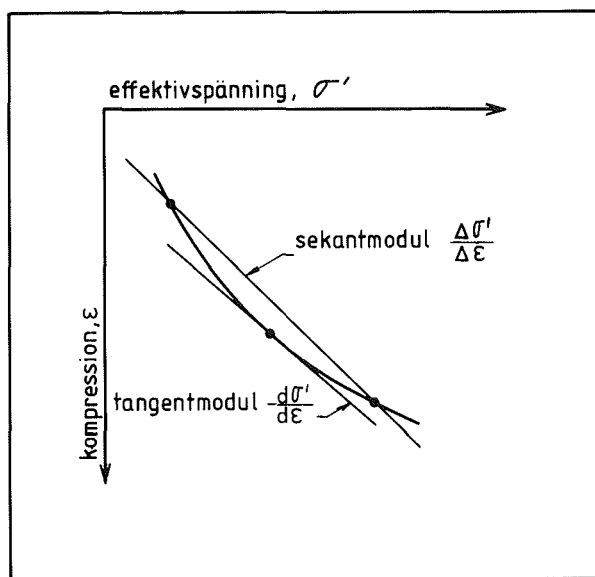
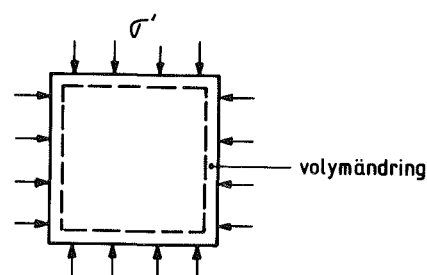


Fig. 1 Definition av sekant- och tangentmodul

Tryckmodulen K

Isotrop (allsidigt lika) spänningsändring

$$K = d\sigma'/d\varepsilon_v = d\sigma'/(d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 + d\varepsilon_3) \quad (1)$$

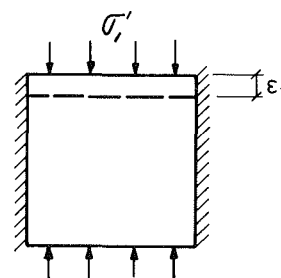


Tryckmodulen kan bestämmas genom dränerade triaxialförsök med isotrop belastningsökning

Kompressionsmodulen M

Enaxlig deformationsändring ($\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$)

$$M = d\sigma'_1/d\varepsilon_1 \quad (2)$$

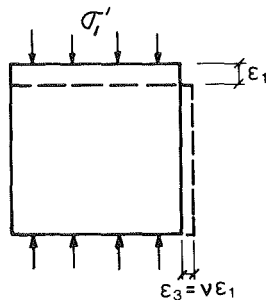


Inom geotekniken förekommer att man i stället för kompressionsmodulen använder kompressibiliteten $m_v = 1/M$. Med hänsyn till att man inom de flesta andra vetenskaper använder modulerna och ej deras inverser rekommenderas att man i första hand använder kompressionsmodulen.

Kornskelettets elasticitetsmodul E

Enaxlig spänningsändring ($\alpha_2' = \alpha_3' =$ konstant)

$$E = d\sigma_1' / d\varepsilon_1 \quad (3)$$



Kontraktionstalet ν

I anslutning till elasticitetsmodulen definieras också

$$\nu = d\varepsilon_3 / d\varepsilon_1 \quad (4)$$

Elasticitetsmodulen E och kontraktionstalet ν används ofta, beroende på att elasticitetsteorin är matematiskt väldefinierad och att beräknings-exempel baserade på elasticitetsteorin finns lösta för ett stort antal belastningsfall. Storleken på E och ν bestäms genom dränerade triaxial-försök med konstant celltryck.

För friktionsjord antas ofta $\nu = 1/3$. ν kan även beräknas enl. den approximativa formeln $\nu = (1 - \sin\phi) / (2 - \sin\phi)$.

Vanligen uttrycks sambandet mellan de olika modulerna med hjälp av kontraktionstalet. Sambandet mellan E, K och M blir då

$$E = 3(1-2\nu)K = (1-2\nu)(1+\nu)M / (1-\nu) \quad (5)$$

2.2.2 Modulernas spänningsberoende

För jord gäller som allmän regel att modulerna till sin storlek beror av spänningen. Tryckmodulen K och kompressionsmodulen M kan approximativt skrivas som

$$K = k_m p_j (p'/p_j)^{1-\alpha} \quad (6)$$

$$M = m \sigma_j (\sigma'/\sigma_j)^{1-\beta} \quad (7)$$

där

k_m = tryckmodultalet

m = kompressionsmodultalet

p_j = isotrop jämförelsespänning

σ_j = jämförelsespänning (som regel 100 kPa)

α och β = spänningsexponenter

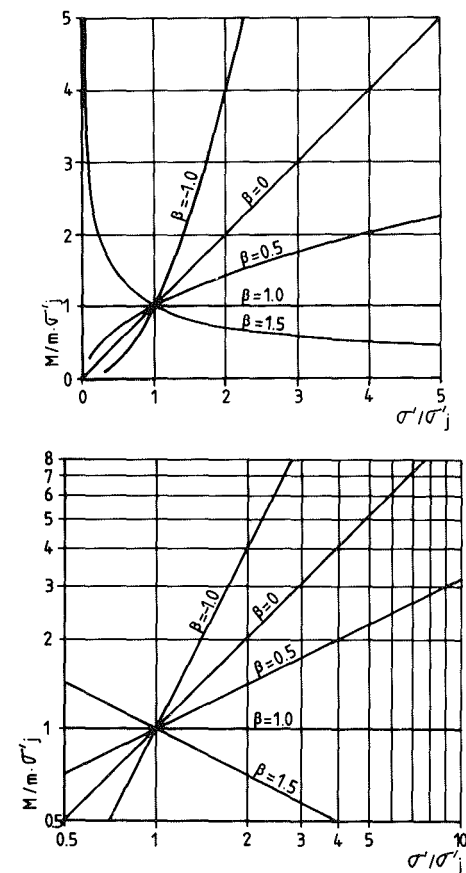


Fig. 2 Spänningsberoendet hos kompressionsmodulen

Modultalen är dimensionslösa men beror till sin storlek på jämförelsespänningen. Jämförelsespänningen är nödvändig för att formeln skall bli dimensionsriktig. Värdet på σ_j kan ej väljas godtyckligt. Flera skäl (Andréasson, 1973) talar dock för att man bör välja $\sigma_j = 100$ kPa.

Spänningsexponenterna är dimensionslösa tal. Uttrycken $(1-\alpha)$ och $(1-\beta)$ representerar kurvans lutning i ett dubbellogaritmiskt diagram, fig. 2b.

Det angivna spänningsberoendet har teoretisk bakgrund men bör ändå betraktas som empiriskt. Man kan t.ex. nöjaktigt beskriva kompressionsmodulen hos de flesta jordar med det givna sambandet. Dock kan man inte beskriva en s-formad kurva, och således är det inte möjligt att använda samma värden på m och β såväl under som över förkonsolideringstrycket.

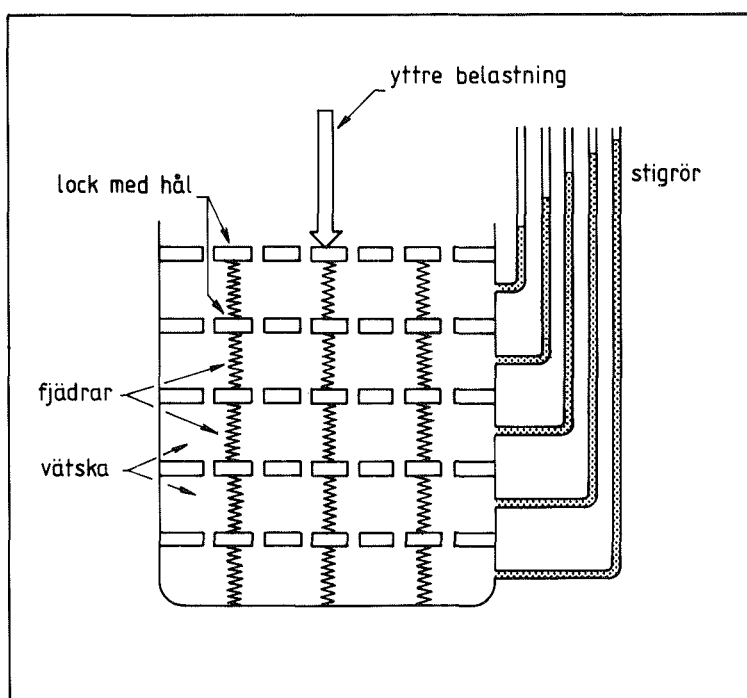


Fig 3. Reologisk modell för den klassiska konsolideringsteorin. Vattennivån i stigrören representerar portrycken i behållarens skilda delar.

Kompressionsegenskaperna hos friktionsjord beskrivs normalt enligt ekv.(7), dvs med utnyttjande av såväl modultalet m som spänningsexponenten β . För lera vars kompressionsegenskaper bestäms med stegvisa ödometerförsök brukar man anta $\beta=0$. Däremot brukar man vid CRS-försök, som ger en kontinuerlig kompressionskurva, ej anta $\beta=0$ eftersom detta skulle innebära en onödig justering av kurvan. Allmänt gäller att man skall utvärdera kompressionsegenskaperna enligt ekv.(6)-(7) endast om det medför fördelar - ofta är en sekantmodul tillfyllest.

2.2.3 Konsolidering

Med konsolidering menas en volymminskning (kompression) till följd av vattenutpressning. Volymminskningen är tidsberoende. Den indelas normalt i två faser: primär konsolidering och sekundär konsolidering.

Med primär konsolidering menas den del av volymminskningen som fördröjs på grund av jordmaterialets låga permeabilitet. För friktionsjordar (sand och grövre jordar) är denna fördröjning utan praktisk betydelse. Principen brukar illustreras med hjälp av en reologisk modell, fig 3. För enklart kan man säga att den primära konsolideringen pågår tills de av belastningen orsakade porvattenövertycken har utjämnats.

Med sekundär konsolidering menas efterföljande krypning. Den åtföljs också av vattenutpressning, men deformationen går så långsamt att jordens permeabilitet ej påverkar tidsförloppet. Vid ödometerförsök särskiljs den primära konsolideringen från den sekundära konsolideringen

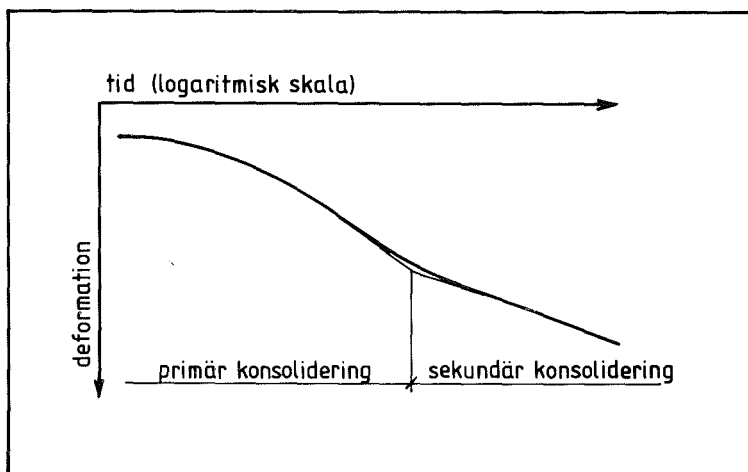


Fig 4. Klassisk definition av primär respektive sekundär konsolidering.

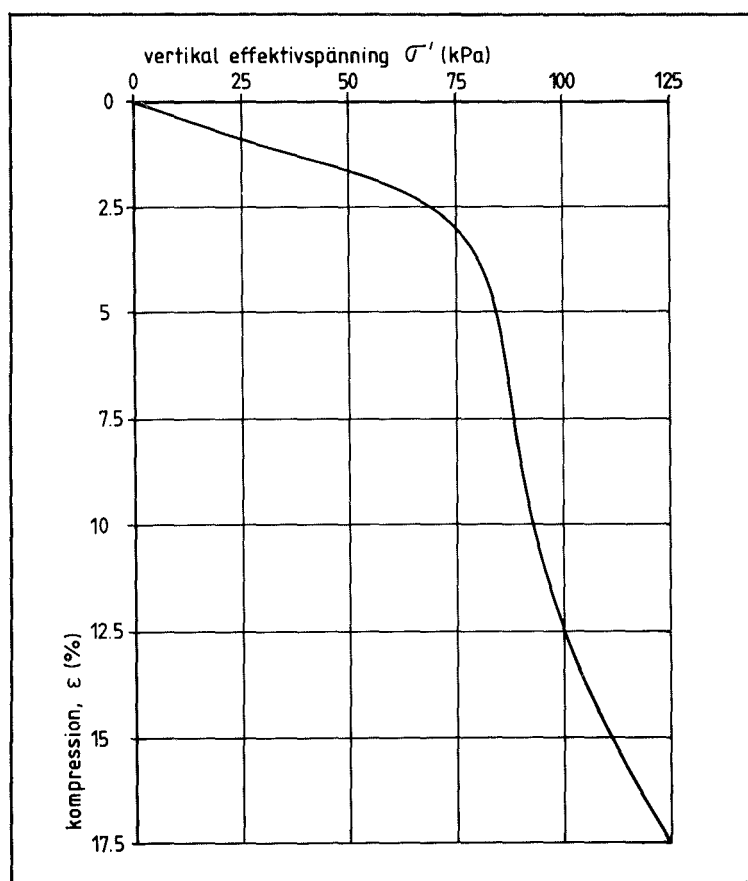


Fig 5. Ödometerförsök på lös lera. Förkonsolideringstrycket är ca 70 kPa. Den stora skillnaden i kompressionsmodul över och under förkonsolideringstrycket framgår tydligt.

så som visas i fig 4. I praktiken pågår båda dessa förlopp samtidigt under den så kallade primära konsolideringsfasen.

2.2.4 Förkonsolideringstrycket σ'_c

Av resultaten från ödometerförsök på ostörda prover av sedimentär jord finner man i regel att kompressionen vid låg last blir ganska måttlig. När vertikalspänningen överskrider en viss nivå ökar emellertid kompressionen i regel kraftigt (kompressionsmodulen minskar kraftigt). Den vertikalspänning, vid vilken jordens kompressionsmodul plötsligt minskar, kallas förkonsolideringstrycket σ'_c . Förhållandet illustreras av fig 5.

Av spänningar under förkonsolideringstrycket uppkommer relativt små sättningar med liten tidsfördröjning. Av spänningar över förkonsolideringstrycket uppkommer relativt stora sättningar, ofta med stor tidsfördröjning (i finkornig jord).

Bestämningen av förkonsolideringstrycket är således ett av de viktigaste momenten i en undersökning av kompressionsegenskaperna.

Om en jord har ett förkonsolideringstryck som är lika med det rådande effektiva överlagringstrycket sägs den vara normalkonsoliderad. Om förkonsolideringstrycket är högre än rådande effektiva vertikalspänning sägs jorden vara överkonsoliderad.

3 Inverkande faktorer

3.1 Jords sammansättning

Kompressibiliteten hos jord påverkas av dess sammansättning och struktur. Främst är det jordens lagringstäthet, kornfördelning, kornform, cementering och vattenmättnadsgrad som inverkar. Den kemiska sammansättningen av såväl mineralkorn som porvatten är även väsentlig för kompressionen.

För friktionsjord bryts cementeringen i regel ned vid provtagning. Även ytspänningen i porvinkelvattnet kan inverka på kompressibiliteten.

Strukturen hos kohesionsjord har stor betydelse för kompressibiliteten och beror bl a av kornens mineralsammansättning och porvattnets kemi (främst avsättningsmiljö). Förekomst av organiskt material medför i regel en kraftig ökning av kompressibiliteten hos såväl friktions- som kohesionsjord.

3.2 Jords spänningshistoria

Den belastning som verkat på jorden sedan den bildades påverkar starkt jordens kompressibilitet. En historiskt sett högre belastning än den för tillfället rådande, t ex genom att grundvattennivån tidigare varit lägre eller genom att överlagrade massor sedermera eroderats bort, medför en överkonsolidering av jorden. Det innebär att jorden kan bära en viss tillskottsbelastning utan att nämnvärt deformeras. Även sekundärsättningar under konstant last kan leda till en överkonsolidering (av pseudokarakter).

Jordens ytliga lager är, åtminstone vad gäller kohesionsjord (torrskorpan), i regel överkonsoliderade beroende på uttorkning, porvattenundertryck vid tjälning, kemisk påverkan, påverkan av vegetation eller infiltration m m.

Då modulerna vanligen har ett icke-linjärt samband med spänningen blir detta också fallet med kompressionen. Man kan grovt beskriva olika jordars kompressionsegenskaper på följande sätt:

Lera har för spänningar under förkonsolideringstrycket en kompressionsmodul som beror på avlastningen: ju större avlastning desto lägre kompressionsmodul. Approximativt är $M = 500$ till 1500 ggr τ_{fu} .

För spänningar närmast över förkonsolideringstrycket är kompressionsmodulen i det närmaste konstant och i regel 3 till 30 ggr σ'_c . Vid högre spänningar ökar M linjärt med σ' .

Friktionsjords kompressionsmodul vid förstagångsbelastning beskrivs bäst med hjälp av m och β . Kompressionsmodultalet m varierar i hög grad med lagringstätheten, medan spänningsexponenten med god approximation kan betraktas som en materialkonstant. För sand är β ca 0,3 och för grus ca 0,5. Exponenten växer med kornstorleken och för makadam och sprängsten kan β vara större än 1, vilket innebär att kompressionsmodulen minskar med ökande spänning. För starkt förbelastade jordar (exempelvis bottenmorän) är β ca 1, dvs kompressionsmodulen är då konstant.

3.3 Inverkan av spänningsväg (försöksmetodik)

Det spänningstillstånd som råder i jorden in situ har stor betydelse för hur jorden deformeras vid en spänningsförändring. Mot varje vertikal belastningsökning ($\Delta\sigma'_V$) svarar en viss förändring av horisontalspänningen. Den vid ett försök påtvingade successiva förändringen av vertikal- och horisontalspänningarna, med de rådande in situ-spänningarna σ'_{V0} och σ'_{h0} som utgångspunkt, kallas vanligen spänningsväg. Spänningsvägen vid belastning kommer således att bero på djupet och läget i förhållande till lastcentrum.

Av avgörande betydelse för huruvida resultaten från ett ödometerförsök är relevanta är om spänningsvägen vid ödometerförsöket överensstämmer med vad som kan förväntas in situ.

Därför krävs

att horisontaltrycket i ödometern är lika med σ'_{h0} då vertikalspänningen är lika med aktuellt effektivt överlagringstryck (σ'_{V0});

att ökningen av horisontalspänningen ($\Delta\sigma'_h$) i ödometern vid en viss belastningsökning ($\Delta\sigma'_V$) ungefär motsvarar den i fält.

Allmänt kan sägas att den spänningsväg jordprovet följer i ödometern i regel stämmer väl med den i fält förväntade spänningsvägen för normalt konsoliderade och svagt överkonsoliderade leror under förutsättning att:

- o markytan är horisontell
- o provet är taget nära belastningsytans centrum
- o säkerheten mot brott är så stor att jordens formförändring (skjuvdeformationerna) kan försummas vid sidan av volymändringen.

4 Bestämning av kompressionsegenskaper hos kohesionsjord

4.1 Allmänt

Kompressionsegenskaperna hos kohesionsjord bestäms rutinmässigt på laboratoriet genom ödometerförsök. Ofta används den metod som Terzaghi föreslog på 1920-talet. Därvid påförs lasten stegvis och fördubblas för varje nytt steg. Varje laststeg får verka i ett dygn. Resultaten redovisas med en s k ödometerkurva, vilken visar den relativa kompressionen som en funktion av effektivspänningen i log-skala.

Enligt svensk praxis utförs ödometerförsök i regel på prover tagna med standardkolvprovtagare St I eller St II. Vid provtagning och efterföljande hantering kan provet störas, vilket menligt inverkar på resultatens tillförlitlighet. Varviga leror och jordar med låg lerhalt samt kvickleror är känsligare för yttre påverkan än homogena, vattenmättade leror med hög lerhalt.

För lermorän, som också är en kohesionsjord, kan endast i undantagsfall ostörda jordprover erhållas. Kompressionsegenskaperna kan med fördel bestämmas, även om ostörda prover ej finns, på ett i ödometern inpackat prov. Eftersom lermoränen ofta har varit förbelastad av landisen är de kompressionsegenskaper som gäller för spänningar lägre än förkonsolideringstrycket av störst intresse. Det laboratoriepackade provet förbelastas därför i ödometern och kompressionsegenskaperna för provet bör tolkas ur ödometerkurvan vid förnyad pålastning (Hartlén 1974).

Det traditionella ödometerförsöket är

fortfarande vanligt och beskrivningen av detta har därför gjorts detaljerad. Två olika typer av ödometrar beskrivs.

I syfte att minska försökstiden och få ett säkrare underlag för uppritningen av ödometerkurvan har försöksrutiner införts med mindre och kortare laststeg, s k snabbförsök. Dessutom har på senare år ödometerförsök använts där lasten påförs kontinuerligt. Två typer av försök har speciellt uppmärksamats:

1. Portrycksstyrt ödometerförsök (CHG). Provet är ensidigt dränerat och portrycket mäts i den odränerade undre ytan. Pålastningen sker i sådan takt att portrycket i denna yta hålls konstant. Försökstypen behandlas ej i denna laboratorieanvisning.
2. Deformationsstyrt ödometerförsök (CRS). Provet deformeras med konstant vertikal hastighet under mätning av påförd vertikallast, deformation och portryck vid provets undre, odränerade yta.

För ett rationellt utnyttjande av dessa båda metoder krävs automatisk registrering av försöksvärdena under försökets gång. Resultaten bör där efter bearbetas i dator. Av de båda nämnda metoderna är deformationsstyrt ödometerförsök (CRS-försöket) den typ som lämpar sig bäst för praktiskt bruk. Denna försöksmetod redovisas utförligt i avsnitt 4.3. Med ett CRS-försök kan man på ett till två dygn erhålla fullständigare information om en leras kompressionsegenskaper än vad standardförsöket ger på 5-8

dygn. CRS-försöket ger emellertid, i motsats till standardförsöket med stegvis pålastning, ingen information om sekundära kompressionsegenskaper. Metoden bedöms bli allt vanligare i framtiden.

Kompressionsegenskaperna kan även bestämmas genom triaxialförsök. Denna försökstyp är mer komplicerad och används i Sverige mest i samband med forskning. Någon detaljerad beskrivning av triaxialförsöket har därför ej tagits med här (se avsnitt 4.4).

4.2 Ödometerförsök med stegvis pålastning

I marknaden finns ett flertal ödometrar för olika provhöjd och olika diameter. I Sverige är provhöjden vanligen 20 mm och diametern 40 eller 50 mm (kolvprovtagare St I och St II har diametern 50 mm). I regel påförs lasten med vikter, antingen genom direktbelastning eller via en hävarm. Vertikallasten är således känd medan deformationen läses av på en indikatorlocka. Resultaten blir erfarenhetsmässigt jämförbara för de här två ödometertyperna.

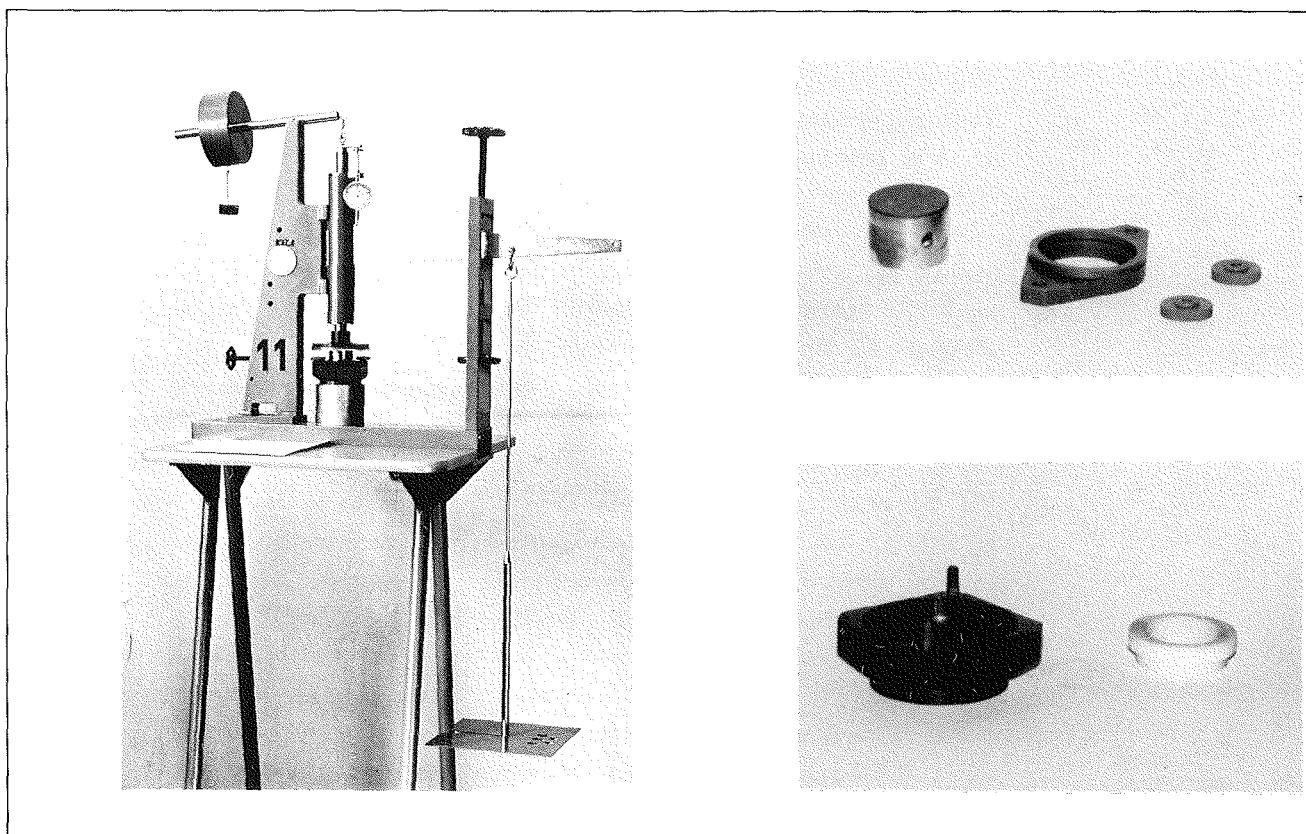


Fig. 6a Ödometer typ SGI X: med belastningsstativ samt vikter och indikatorlocka.

Fig. 6b Ödometer typ SGI X: skål, ring, stämpel, ringhållare och muttrar för fastpressning av ringhållaren.

4.2.1 Utrustning

Ödometer med belastningsstativ enligt ettdera av följande utföranden:

Ödometer typ SGI X:

- o Stativ, vikter och indikator-klocka, fig 6a
- o Ödometerring av keramiskt material, innerdiameter 50 mm, höjd 20 mm, fig 6b
- o Stämpel med filter
- o Bottenplatta av korrosionsbeständigt material
- o Bottenfilter
- o Provuttryckare (fig 7)
- o Trådavskärare
- o Silikonfett
- o Tidur (kronometer)

Stativet har hävarm för påförande av belastning.

Vid försök på lera används vanligen ödometer ϕ 50 mm. Belastningsstången skall då hänga i det inre hålet på hävarmen. Vikten 1 kg motsvarar vertikalktrycket 20 kPa i provet. På hävarmen finns dessutom en tareringsvikt för balansering vid nollast.

Stativet kan även användas för 60 mm ödometer. Därvid används det yttre hålet. Vikten 1 kg ger även då vertikalspänningen 20 kPa i provet.

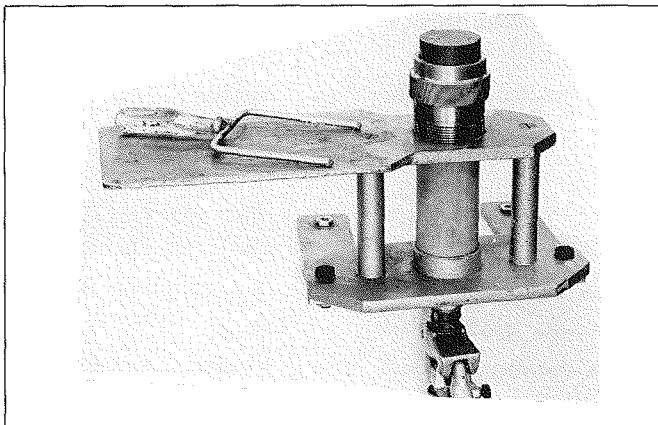


Fig. 7 Provuttryckare, typ CTH

Ödometer typ CTH:

(Denna konstruerades ursprungligen vid Göteborgs hamningenjörskontor och har sedermera modifierats vid Institutionen för geoteknik med grundläggning, CTH).

- o Stativ, vikter och indikator-klocka, fig 8a
- o Stansapparat, fig 8b
- o Ödometerring av syrafast stål, diameter 40 mm, höjd ca 50 mm, nedtill utformad som en egg för instansning av prov, fig 8b
- o Stämpel av syrafast stål med keramiskt filter, fig 8b
- o Skål av plexiglas med keramiskt bottenfilter, fig 8b
- o Provuttryckare (fig 7)
- o Trådavskärare
- o Ring med 51 mm invändig diameter, höjd 20 mm. Används som styrning vid avskärning av provet i rätt höjd
- o Teflonbricka
- o Tidur (kronometer)

Stativet har låsbar vertikal laststång som verkar centriskt på stämpeln. Lasten påförs direkt med vikter och utan hävarm.

Enbart ok och lasthållare ger vertikalspänningen 10 kPa i provet. Belastningen 1,25 kg ger även 10 kPa i provet, således 20 kPa inklusive lasthållare.

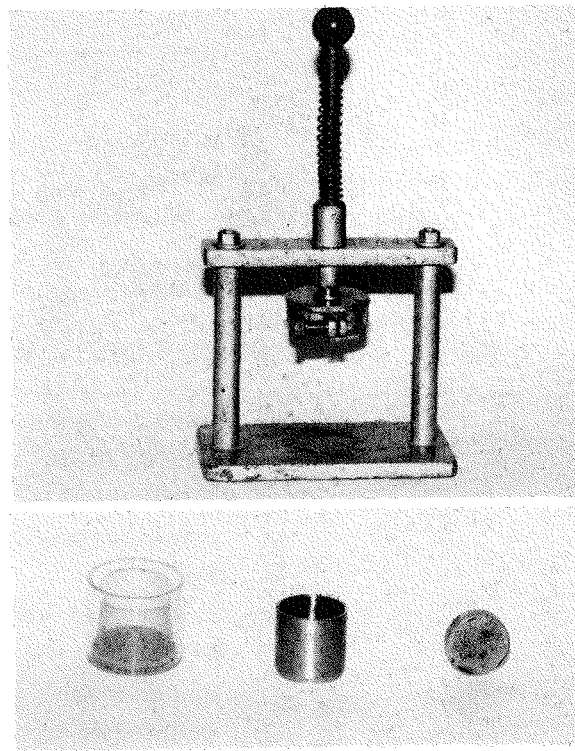
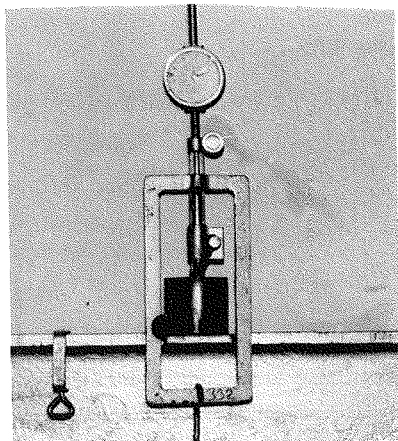


Fig. 8a Ödometer, typ CTH med belastningsstativ och indikatorklocka.

Fig. 8b Ödometer, typ CTH med stansapparat.

4.2.2 Montering

För ödometerförsök på jordprover tagna med standardkolvprovtagare används vanligen proven i nedre delen av mitthylsan eller övre delen av underhylsan. Allmänt gäller att ödometerförsöket skall utföras på den del av ett prov som bedöms vara minst stört.

Gummilocken på provhylsan avlägsnas och provhylsan placeras i provuttryckaren, fig 7. Jordprovet granskas okulärt. Förekomst av organiska lämningar (rottrådar), maskspår, etc, antecknas. Om en störning av provet kan befaras (exempelvis genom förekomst av snäckskal) bör en annan del av provhylsans innehåll användas. Förfaringssättet därefter beror av vilken utrustning som används.

Ödometer typ SGI X:

- o Ödometerringen i fig 6b, smörjs invändigt med silikonfett.
- o Ödometerringen placeras på provuttryckaren och centreras omsorgsfullt (fig 7).
- o Provet trycks ut med provuttryckaren och in i ödometerringen så långt att ca 15 mm sticker ut på ringens ovansida (för prov med färsk snittyta räcker det med ca 5 mm).

Ödometer, typ CTH:

- o Cirka 35 mm av provet trycks ut med provuttryckaren.
- o Ringen med 51 mm invändig diameter och 20 mm höjd träs försiktigt över provet.
- o Den utskjutande delen skärs av med tråдавskäraren och avlägsnas. Ringen tjänstgör som styrning.
- o Ringen avlägsnas och provet skärs av med tråдавskäraren, varvid provuttryckaren (eller ev. hylsan) tjänstgör som styrning.

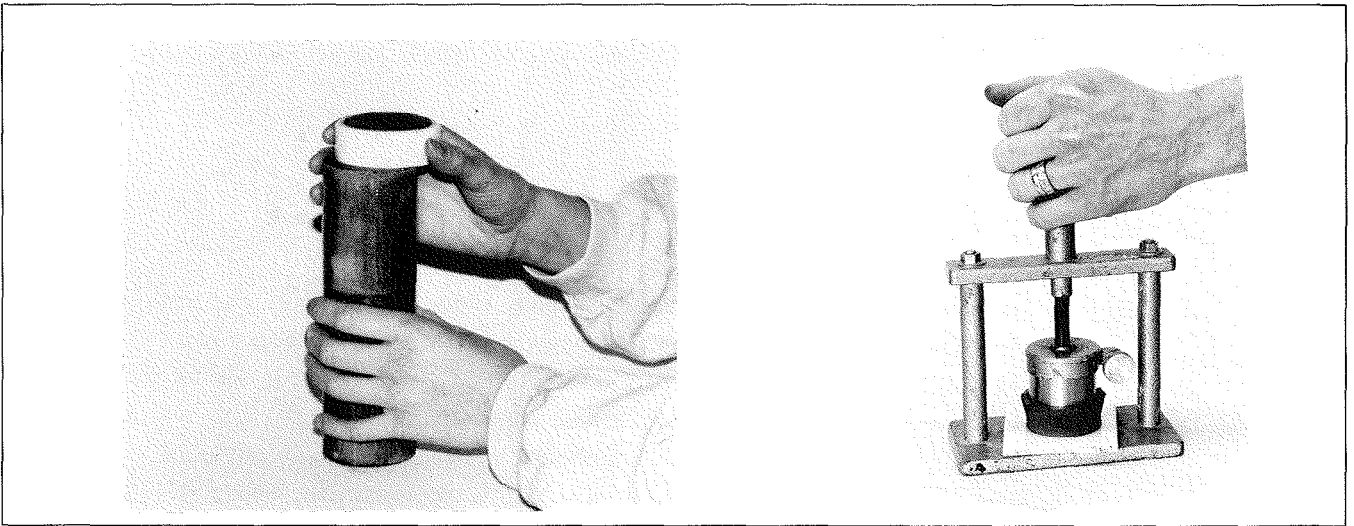


Fig 9. Efter snittning av provet med trådavskärare, roteras ringen försiktigt av, så att provet ej deformeras, från leran i provhylsan.

(Ödometer typ SGI X, forts)

- o Provet skärs av mellan ödometer-ring och provuttryckare med trådavskärare och med ödometer-ringens som styrning.
- o Ödometer-ring med prov roteras av åt sidan, fig 9.
- o Utskjutande material på ringens översida skärs av med trådavskärare. Provets yta planas med sickel.
- o Provets underyta planas av med sickel med ringen som styrning.
- o Ringen torkas av (med fingret) så att ingen lera kan komma "i kläm" och förorsaka friktion mellan stämpel och ring och så att ringens anliggning mot bottenfiltret blir god.
- o Ringen med prov vägs för bestämning av skrymdensiteten.
- o Ring med prov placeras försiktigt i ödometerskålen. Filtret skall vara vattenmättat.
- o Ringhållaren placeras i sitt rätta läge och pressas fast med hjälp av två muttrar.
- o Stämpeln placeras i läge.
- o Skål med prov placeras i läge i stativet.
- o Belastningsplattan fås med hjälp av skruv A (fig 6a) att nått och jämt vidröra stämpeln.

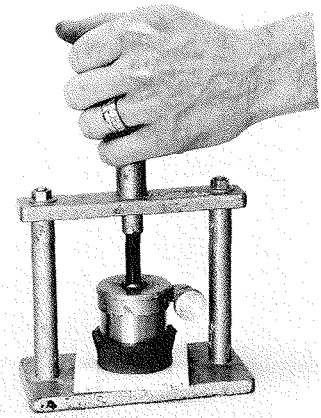


Fig 10. Instansning av prov i ödometer-ring.

(Ödometer typ CTH, forts)

- o Provet placeras på en skiva av akrylplast med ett fuktat filterpapper som mellanlägg och sätts på plats i stansapparaten.
- o Ödometer-ring smörjs invändigt med silikonfett.
- o Provet stansas försiktigt in i ödometer-ring, fig 10.
- o Ödometer-ring lösgörs från hållaren.
- o Jorden utanför ödometer-ring avlägsnas. Ödometer-ring placeras försiktigt på filterstenen i ödometerskålen. Skålen skall därvid vara delvis fylld med vatten.
- o Den vattenmättade stämpeln placeras ovanpå provet. (Stämpeln förvaras i vattenbad tills den skall användas.) Stämpeln skall löpa så friktionsfritt att den av sig själv intar rätt läge.
- o Anliggningen kontrolleras genom en lätt tryckning med fingret på stämpeln.
- o Ödometerskål med innehåll placeras på plats och centreras i belastningsstativet.

4.2.3 Provning

Ödometerförsöket kan utföras med eller utan registrering av kompressionens tidsförlopp. Syftet med undersökningen avgör om tidsförloppet skall registreras eller ej. Slopas man registrering av tidsförloppet innebär detta vid manuell registrering en icke obetydlig inbesparing av personaltid, men å andra sidan har man då inte möjlighet att bestämma c_v -värdet, vilket används vid beräkningen av sättningarnas tidsförlopp. Slutsättningen kan emellertid bestämmas, likaså förkonsolideringstrycket. De båda ödometertyperna och deras handhavande skiljer sig något åt vad avser pålastning.

ÅTGÄRD FÖRE FÖRSÖK

Ödometer typ SGI X

Hävvarmen tareras så att den är balanserad vid nollast. Belastningsstången skall hänga i hävvarmens inre hål vid ödometerring $\varnothing 50$ mm. Vid behov tareras hävvarmen genom att tareringsvikten flyttas. Finjustering kan göras genom att skålen under tareringsvikten (fig 6a) belastas med blyhagel.

Skyddsplattan av plast som täcker nedre delen av stativets stämpel skall vara borttagen. Hävvarmens undre ställskruv skruvas ner så långt att stativstämpeln nått och jämt vidrör ödometerstämpeln. Indikatorklockan monteras så att slaglängden blir ca 10 mm (vid högkompressibla jordar kan ännu större slaglängder behövas). Klockan nollställs därefter med stativstämpeln så nära ödometerstämpeln som möjligt.

Ödometer typ CTH

Ödometern centreras under laststången (därvid skall pistongen vara obelastad) varefter den låses i läge (låsarmen i läge B), fig 8a.

Belastningsok och belastningsstång placeras i läge och indikatorklockan nollställs (grovjustering skruv a, finjustering skruv b). Ok och stång ger tillsammans vertikalspänningen 10 kPa i provet. Om begynnelselasten 20 kPa önskas, läggs en 1,25 kg vikt på laststången. Försöket startas genom att låsarmen förs till läge A. Tidregistrering vidtar på sätt som beskrivs under Avläsning.

PÅLASTNING

Ödometer typ SGI X

Innan lasten påförs skall ställskruv A, fig 6a, ställas in så att indikatorklockan nätt och jämt rör sig. (Däri- genom utsätts inte provet för vibrationer i samband med att lasten påförs hävarmen.) Vikter läggs på så att belastning motsvarar aktuellt laststeg. (Slitsarna i vikterna får ej sammanfalla.) Varje efterföljande laststeg påbörjas genom att ställskruv A snabbt skruvas ner. Klockan startas när skruven lämnar hävarmen. Belastning och motsvarande spänningar i provet framgår av tabell 1.

TABELL 1

Vertikalspänning i prov (kPa) för olika vikter (kg) på belastningsstången för ödometer, typ SGI X och $\phi 50$ mm och $\phi 60$ mm

	Massa på belastningsstång (kg)							
	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	32,0	64,0
Ökning från föregående belastningssteg	-	0,5	1	2	4	8	16	32
	Vertikalspänning (kPa)							
50 mm diam; laststång i inre hål på hävarmen	10	20	40	80	160	320	640	1280
60 mm diam; laststång i yttre hål på hävarmen	10	20	40	80	160	320	640	1280

PÅLASTNING

Ödometer typ CTH

Innan lasten påförs skall låsarmen föras till läge B. Lasten läggs på laststången. Slitsarna i vikterna skall ej sammanfalla (lasten kan annars tippa av). Låsarmen förs till läge A, varefter tiduret omedelbart startas. Belastning och motsvarande spänningar i provet framgår av tabell 2.

TABELL 2

Vertikalspänning i prov (kPa) för olika vikter (kg) på belastningsstången för ödometer, typ CTH

Massa i kg på stång	enbart bel.st	1,25 + bel.st	3,75 + bel.st	8,75 + bel.st	18,75 + bel.st	38,75 + bel.st	78,75 + bel.st
kg på prov	1,25	2,5	5	10	20	40	80
Vertikal- spänning i kPa	10	20	40	80	160	320	640
Ökning av massa på belastnings- stång från föregående laststeg	-	1,25	2,5	5	10	20	40

För lösa leror är det ofta tillräckligt med 320 kPa som högsta spänning. För fasta leror kan det vara aktuellt att lasta till 640 kPa eller 1280 kPa (1280 kPa används ej vid CTH-ödometern). Om ett ödometerförsök tar mer än en arbetsvecka och pålastning ej kan ske på lördag-söndag så skall laststången vara låst under denna tid.

Noggrannheten i avläsningarna bör vara 0.002 mm för laststeg med spänningar under förkonsolideringstrycket, medan noggrannheten 0.01 mm vanligen är tillräcklig för spänningar över förkonsolideringstrycket.

AVLÄSNING

Vid standardförsök är belastningstiden 1 dygn/laststeg och belastningsstegen är 10 kPa (utgår vid fastare leror) 20, 40, 80, 160, 320, 640 (utgår vid lösare leror).

Vid försök på gyttja bör påföljande laststeg ej påföras förrän man med Casagrandes metod konstaterat att full primär konsolidering uppnåtts. Detta kan ta 2 à 4 dygn (för laststeget omedelbart efter σ'_c).

Tidavläsningar

c_v -värdet bestämt enligt Casagrandes metod:

Deformationen avläses normalt enligt följande tidschema 4s, 10s, 20s, 40s, 1 min 20s, 2 min 40s, 5 min, 10 min, 20 min, 40 min, 1 h 20 min, 2 h 30 min, 5 h, 9 h, 24 h.

9-timmars-avläsningen utgår oftast eftersom den i regel infaller utanför ordinarie arbetstid.

c_v -värdet bestämt enligt Taylors metod:

Deformationen avläses enligt samma tidsschema som gäller för Casagrandes metod.

AV- OCH PÅLASTNING

Om en av- och pålastning önskas, bör avlastningen göras efter det laststeg som just överskridit förkonsolideringstrycket. Avlastningen bör göras i tre, ungefär lika stora steg, ner till den vertikalspänning som provet hade in situ (σ'_0). Förnyad pålastning görs med samma laststeg som vid avlastningen. Tiden för varje laststeg bör vara ett dygn såväl under pålastning som avlastning.

Om provet in situ tidigare avlastats till en spänning $\sigma'_V < \sigma'_0$ så avlastas provet till σ'_V i stället för σ'_0 .

4.2.4 Redovisning

Den uppmätta deformationen under varje laststeg ritas som funktion av tiden i logaritmisk skala, blankett B. (Gäller då c_v -värdet skall bestämmas med Casagrandes metod.) Därvid bör delningen 1/1000 mm i diagrammet användas för laststegen under förkonsolideringstrycket, medan skalan 1/100 används för laststegen över förkonsolideringstrycket. Alternativt kan resultaten redovisas på blankett C. (Gäller då c_v -värdet skall bestämmas med Taylors metod.) Deformationen avsätts där som funktion av tiden i kvadratrotskala, se blankett C.

Deformationen efter varje laststeg, i procent av ursprunglig provhöjd som funktion av lasten i logaritmisk skala ritas på blankett A. Därvid skall det värde som erhålls 24 timmar efter lastens påförande användas. Vid gyttna skall dock det värde användas som uppnåtts sedan man med Casagrandes metod konstaterat att full

primär konsolidering uppnåtts. Om full primär konsolidering uppnåtts innan 24 timmar gått efter lastens påförande används dock värdet vid 24 timmar.

4.2.5 Utvärdering

Parametrar för bestämning av sättningarnas storlek

I de formler som normalt används vid sättningsberäkning används beteckningarna förkonsolideringstryck (σ'_c), kompressionsmodultalet (m) och spänningsexponenten (β). I stället för m och β används stundom ϵ_2 respektive C_c^*). För spänningar under förkonsolideringstrycket används kompressionsmodulen (M).

*) Samband mellan kompressionsmodultalet och kompressionsindex (ϵ_2) respektive kompressionsindex (C_c) är
 $\epsilon_2 = 0,69/m$
 $C_c / (1 + e_0) = \epsilon_2 / 1g2$
 under förutsättning att $\beta = 0$.

A. Förkonsolideringstryck σ'_c

På blankett A skall deformationen, i procent av ursprunglig provhöjd, ritas som funktion av effektiva vertikalspänningen i logaritmisk skala. Därvid används 1-dygnsvärdena (beträffande gyttja, se avsnitt 4.2.4). Förkonsolideringstrycket bestäms enl. Casagrandes metod (fig 11):

Den punkt där ödometerkurvan har sin minsta krökningsradie väljs. En tangent till kurvan samt en linje parallell med abscissan dras genom denna. Den punkt, där bissektrisen till vinkeln mellan dessa linjer skär förlängningen av jungfrukurvas (kurvan efter förkonsoliderings trycket) räta del, anses representera förkonsolideringstrycket (fig 11).

I vissa fall kan den enkellogaritmiska framställningen av ödometerkurvan ge ett vilseledande intryck av en förkonsolidering som ej existerar i verklig-

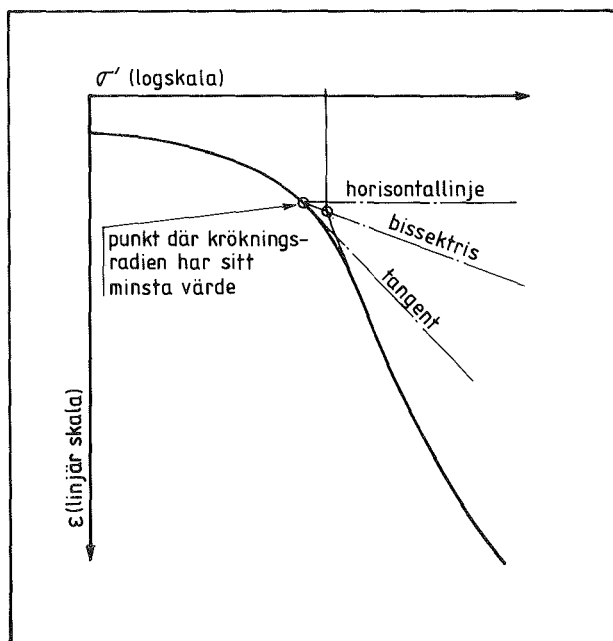


Fig 11. Konstruktion av förkonsolideringstrycket σ'_c enligt Casagrande

heten. Värdet på σ'_c bör därför i tveksamma fall alltid kontrolleras genom att deformation avsätts mot effektiv spänning i linjär skala,

En uppskattning av förkonsolideringstrycket kan erhållas med hjälp av följande empiriska samband

$$\sigma'_c = \tau_{fu} / 0,45w_L \quad (\text{Hansbo, 1957})$$

där

τ_{fu} = är odränerad skjuvhållfasthet, okorrigerad

w_L är konflytgränsen.

Det skall dock poängteras att felet i det här skattade förkonsolideringstrycket stundom kan bli betydande.

B. Kompression för $\sigma' > \sigma'_c$

Ödometerkurvan skattas ofta till en rät linje i det halvlogaritmiska diagrammet. Om man utan större fel kan ansätta en rät linje så kan kurvan beskrivas med en parameter: kompressionsmodultalet m (utöver förkonsolideringstrycket).

Relativa kompressionen $\Delta\epsilon$ vid en lastökning från σ'_j till $2,7 \sigma'_j$ bestäms, varvid σ'_j bör väljas till 100 kPa, se fig 12a. Observera att om $\sigma'_c > 100$ kPa förlängs jungfrukurvan, och σ'_j avsätts på jungfrukurvas förlängning. Därmed kan m beräknas som

$$m = 1/\Delta\epsilon$$

Sättningarna beräknas ur

$$s = \sum_i \delta_i$$

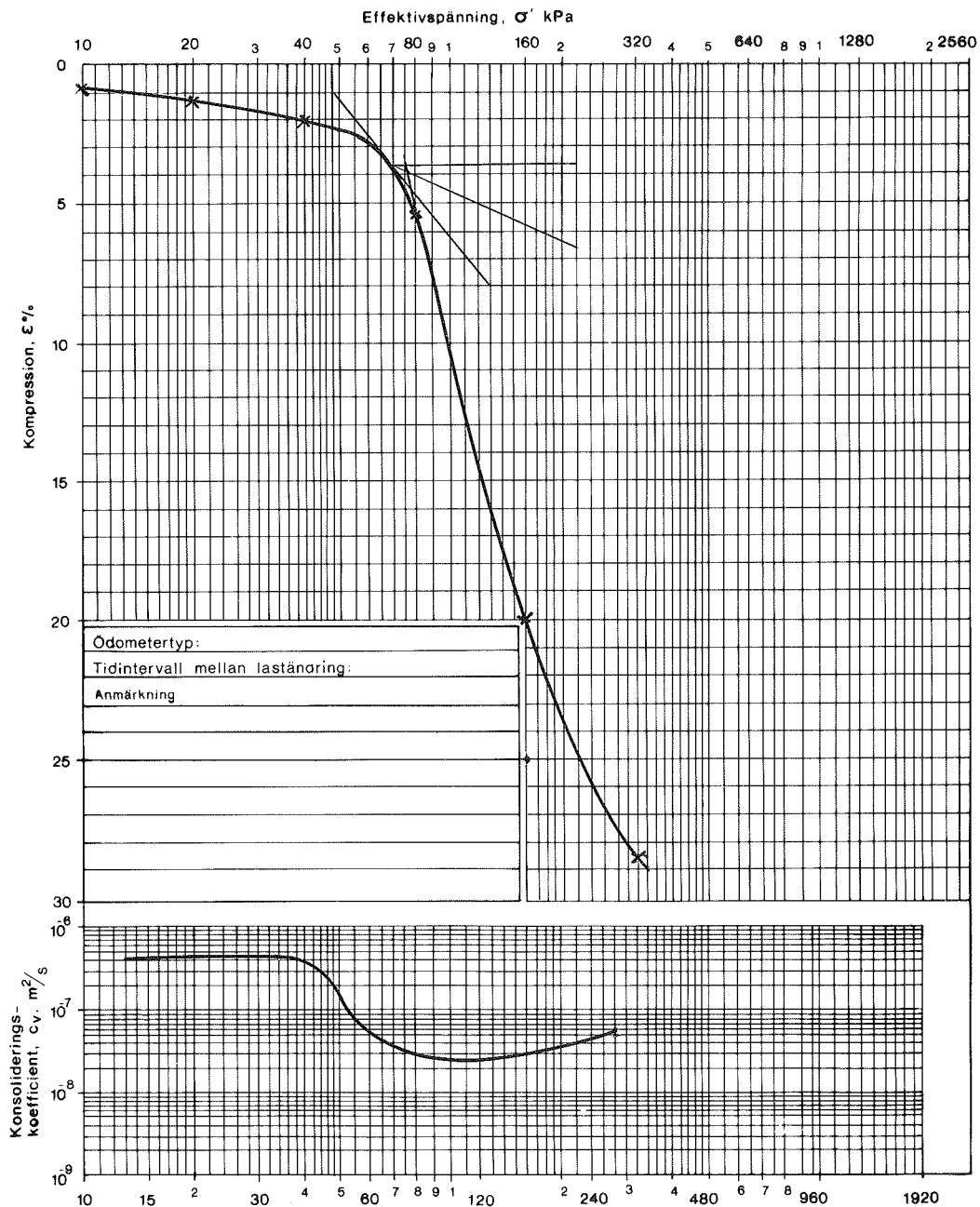
där kompressionen δ_i för ett skikt med tjockleken h_i är

$$\delta_i = (h_i/m) \ln \left[(\sigma'_0 + \Delta\sigma') / \sigma'_c \right]$$

SGFs LABORATORIEKOMMITTÉ
Laboratorieänvisningar, del 10

ÖDOMETERFÖRSÖK
A. Tryck / kompression

Ärende <i>C439, spec</i>					
Prov nr	Diup Nivå m	Beteckn.	Sektion/Borrhål	σ'_c kPa	Jordart
<i>ETH 30B</i>	<i>13,0</i>	<i>GAS</i>	<i>A13</i>	<i>76</i>	<i>lera</i>



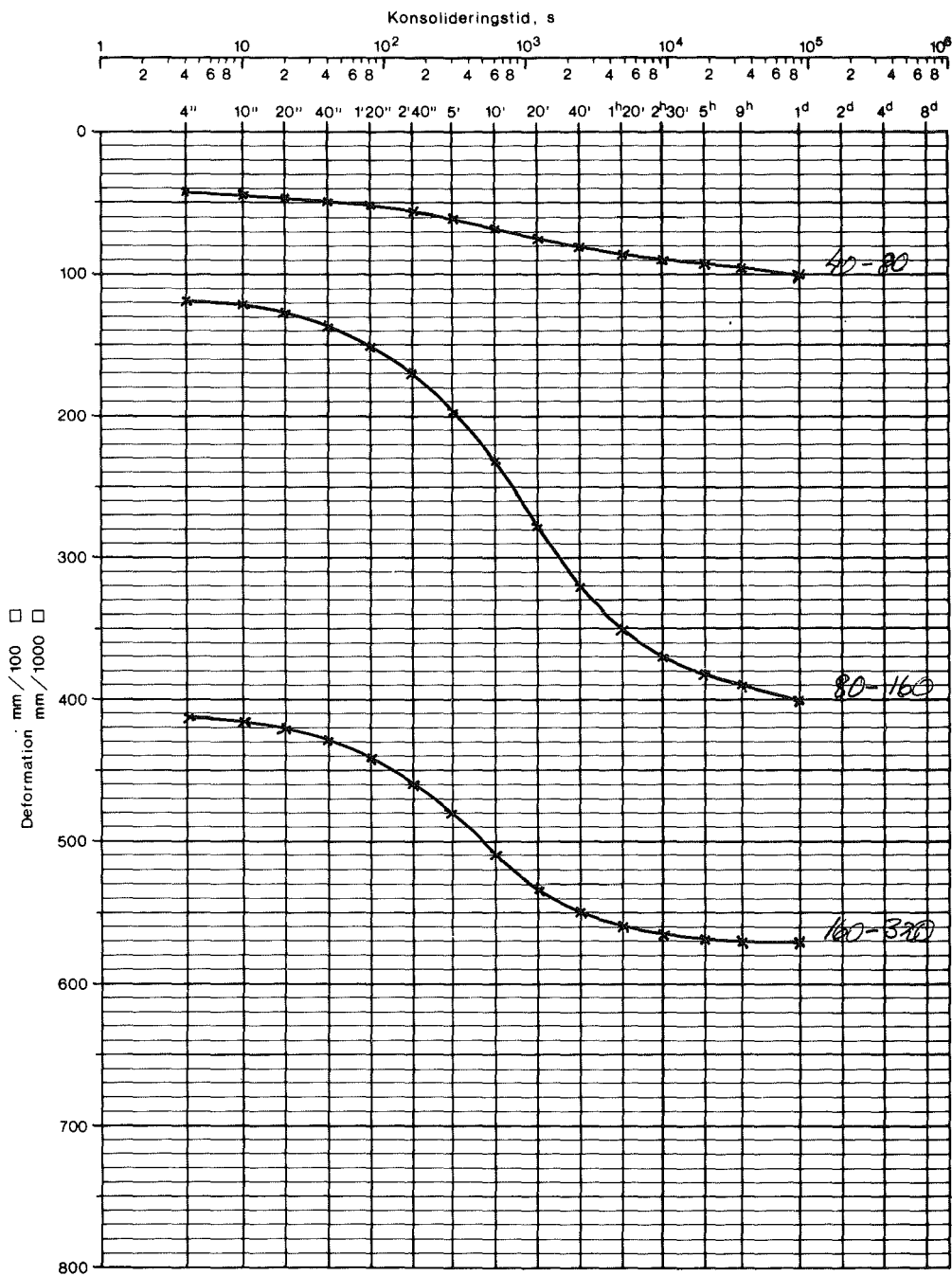
Ödomertertyp:
 Tidintervall mellan lastanöring:
 Anmärkning

Ort och datum	Signatur
---------------	----------

SGF:s LABORATORIEKOMMITTÉ
Laboratorieleanvisningar, del 10

ÖDOMETERFÖRSÖK
B. log t / deformation

Ärendenr <i>C439, spec</i>	Prov nr <i>CTH308</i>	Sid <i>2</i>
Anmärkning		

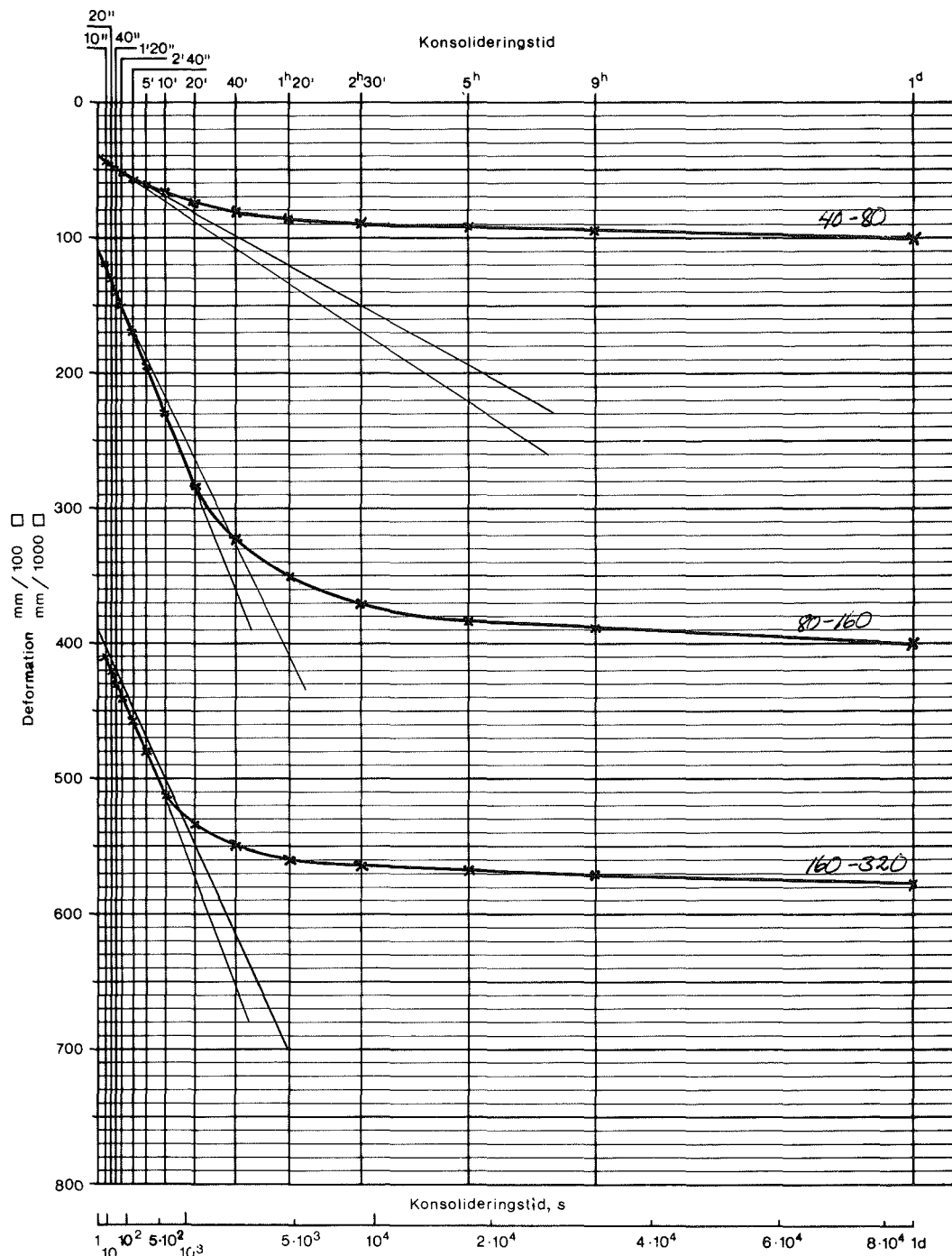


Ort och datum	Signatur
---------------	----------

SGF:s LABORATORIEKOMMITTÉ
Laboratorieanvisningar, del 10

ÖDOMETERFÖRSÖK
C. \sqrt{t} /deformation

Arende <i>C 439, spec</i>	Prov nr <i>CTH 308</i>	Sid <i>3</i>
Anmärkning		



Ort och datum	Signatur
---------------	----------

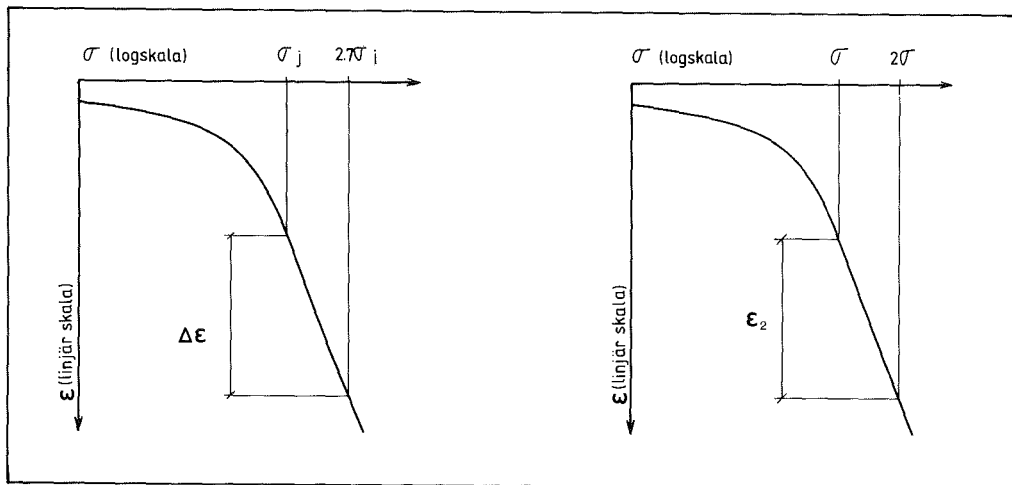


Fig 12a. Bestämning av kompressionsmodulalet m då $\beta=0$.

Fig 12b. Bestämning av ϵ_2 ur ödometerkurva

I de fall ödometerkurvan ej kan sägas vara rät i det halvlogaritmiska diagrammet för spänningar större än förkonsolideringstrycket blir spänningsexponenten $\beta \neq 0$. Då måste således såväl m som β användas.

β fås genom passningsberäkning av följande ekvation

$$\Delta\epsilon_2 = (2,7^\beta - 1)/m\beta$$

där $\Delta\epsilon_2$ definieras i fig 13a.

m och β utvärderas såsom visas i fig 13a. Tangenten till ödometerkurvan i punkten σ'_0 dras från σ_j till $2,7\sigma_j$ ($\sigma_j = 100$ kPa). Därefter beräknas m ur sambandet

$$m = 1/\Delta\epsilon_1$$

där $\Delta\epsilon_1$ = kompressionen för en lastökning från σ_j till $2,7\sigma_j$ räknat för tangenten.

Tidigare antogs alltid ödometerkurvan vara rätlinjig i $\log \sigma' - \epsilon$ diagrammet för spänningar över förkonsolideringstrycket. ϵ_2 utvärderades då som den kompression vilken erhöles vid en fördubbling av lasten, jämför fig 12b. Kompressionen δ för ett skikt med tjockleken h beräknas härvid som

$$\delta = h(\epsilon_2 / \lg 2) \lg [(\sigma'_0 + \Delta\sigma) / \sigma'_0]$$

där $\Delta\sigma$ är aktuell lastökning.

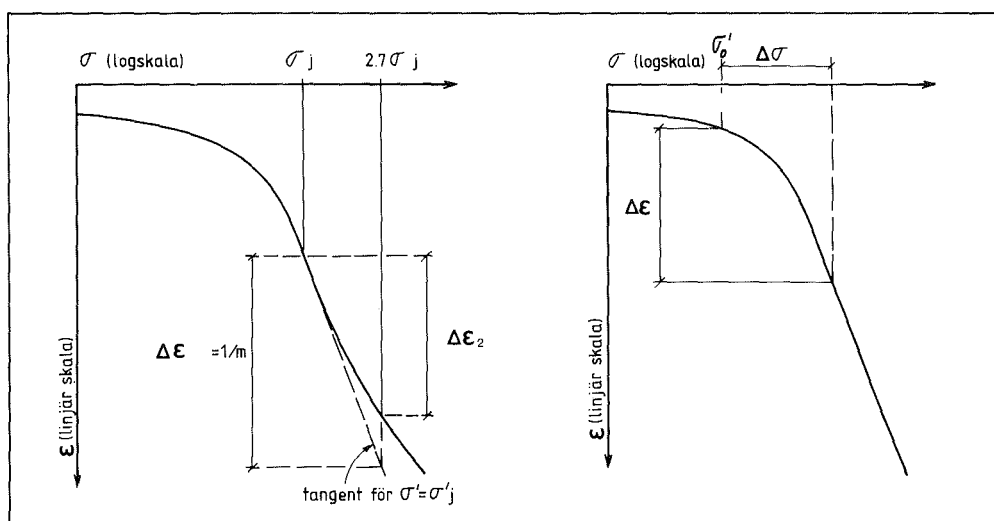


Fig 13a. Bestämning av m och β . Sedan m bestämts kan β beräknas ur sambandet $\Delta\epsilon_2 = (2,7^\beta - 1)/m\beta$.

Fig 13b. Bestämning av $\Delta\epsilon$ ur ödometerkurva vid förenklad beräkningsmetod.

C. Kompression för $\sigma' < \sigma'_c$

Kompressionsmodulen M bestäms som lutningen $d\sigma'/d\varepsilon$ av σ' - ε kurvan för aktuellt lastintervall. Denna bestämning görs lämpligen i ett diagram där ödometerkurvan ritas i linjär skala.

För de flesta material ger kurvan från förstagångsbelastningen en alltför låg modul, varför modulen bör bestämmas på återbelastningsgrenen efter det att avlastning gjorts till jordens spänning *in situ*, σ'_0 , eller den lägre spänning jorden tidigare varit avlastad till.

D. En alternativ metod är att direkt i ödometerkurvan avläsa vilken kompression en viss belastningsökning ger, se fig 13b. Då måste man dock observera vad som tidigare sagts under C om modulens storlek för spänningar lägre än förkonsolideringstrycket.

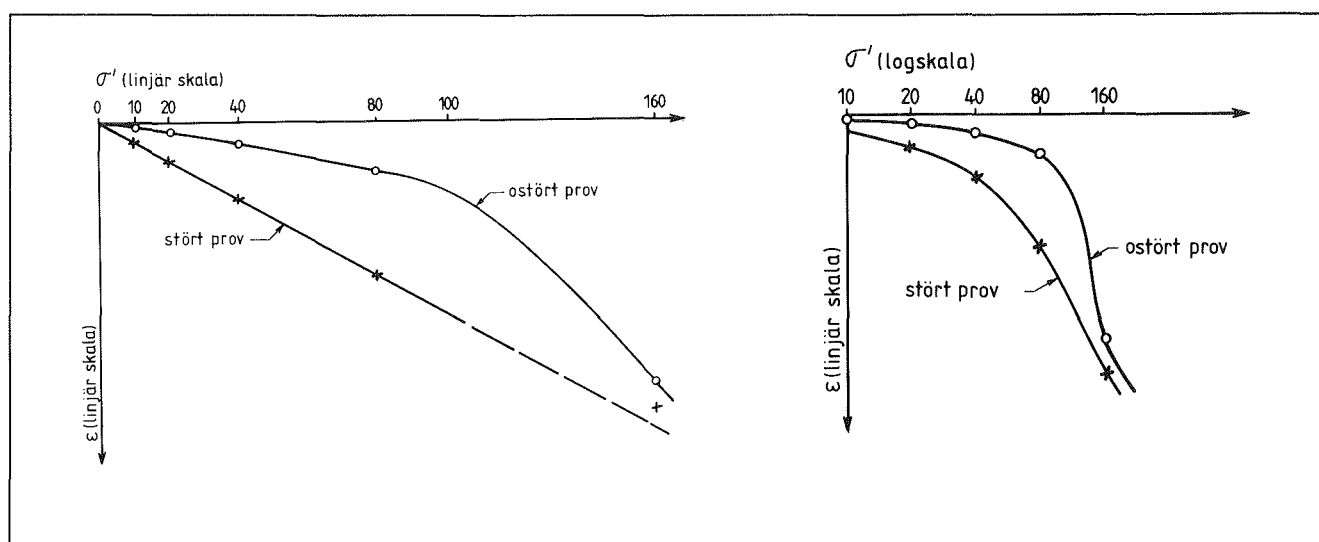


Fig 14a. Ödometerkurvor i linjär skala för kontroll av provets störningsgrad.

Fig 14b. Ödometerkurvorna i Fig 14a ritade i diagram med σ' i logskala.

OBS! Om provet befaras vara stört, bör ödometerkurvan ritas linjärt, se fig 14a. Om provet är stört blir då spännings/deformationskurvan i stort sett en rät linje eller t o m konkav

uppåt (kompressionsmodulen är då oförändrad över och under förkonsolideringstrycket). Förkonsolideringstrycket kan då ej utvärderas ur ödometerkurvan.

Sättningars tidsförlopp

Konsolideringskoefficienten c_v används för beräkning av sättningarnas tidsförlopp och utvärderas ur ödometerförsöket för varje laststeg. Vanligen används två metoder för bestämning av c_v , nämligen Casagrandes metod respektive Taylors metod.

A. c_v enligt Casagrandes metod

Deformationen avsätts mot tiden i logaritmisk skala, fig 15a. 100% primär konsolidering (U_{100}) erhålls som skärningspunkten mellan tangenten till konsolideringskurvan i dess inflexionspunkt och sekundära konsolideringslinjens förlängning. $\bar{U}=0\%$ bestäms genom en konstruktion grundad på att ϵ är proportionell mot \sqrt{t} för kurvans

första del. δ_{50} och t_{50} utvärderas enligt fig 15a. Därefter erhålls provhöjden vid 50% primär konsolidering h_{50} ur sambandet

$$h_{50} = h_i - \delta_{50}$$

där h_i = ursprunglig provhöjd för laststeget ifråga

h_{100} = provhöjd vid 100% primär konsolidering

c_v beräknas som

$$c_v = 0,197 (h_{50}/2)^2 / t_{50}$$

Det erhållna c_v -värdet representerar effektivspänningen före belastningsökningen ökad med 50% av effektivspänningsökningen vid aktuellt laststeg.

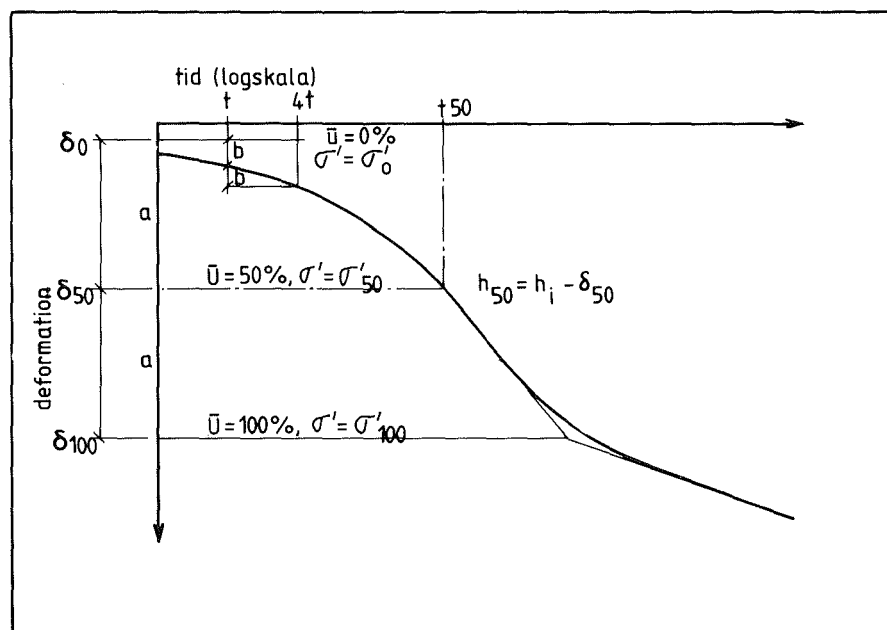


Fig 15a. Bestämning av c_v enligt Casagrande

I samband med provtagningen utsätts jordprovet för betydande spänningsförändringar. Horisontalspänningarna förblir i stort sett oförändrade under utstansningen av provet. Vid uppdragning av provtagaren förändras vertikalspänningarna och övergår från tryckspänningar till dragspänningar (undertryck vid överytan, dragspänning vid provtagningspetsen). Denna förändring av vertikaltrycket medför en förändring av skjuvspänningarna i provet. Storleken av skjuvspänningarna beror på dels provtagningsdjupet, dvs det rådande överlagringstrycket, dels förhållandet mellan horisontal- och vertikalspänningar in situ.

Vid stora förändringar av skjuvspänningarna kan stora skjuvdeformationer uppstå. Såsom också tidigare nämnts kan dessa påverka strukturen, vilket i sin tur kan påverka förkonsolideringstrycket. Av denna orsak kan representativa prover ej tas i lera på större djup. Effekten blir påtaglig i lösa leror vid provtagningsdjup större än 20-25 m.

Vid utstansning under provtagning av lerprover störs en tunn zon längs provets periferi. Därvid minskar horisontaltrycket i provet och en viss svällning i horisontalled kan ske i den ostörda delen av provet.

Vid lagring av jordprover på laboratoriet kan jorden påverkas kemiskt, vilket kan förändra såväl hållfasthets- som deformationsegenskaperna, även om provet förvaras i den tillslutna provhysan. Man bör därför sträva efter att utföra kompressionsförsök innan jordproverna lagrats alltför länge. Vid lagring kan provet dessutom svälla något på grund av den förändrade spänningsbilden.

Apparatur

Egendeformationen hos de vanligen förekommande ödometrarna är i regel försumbar vid kompressionsförsök på kohesionsjordar. Vid försök på fastare jordar måste den emellertid beaktas. Vidare skall ödometerringens tjocklek vara så stor att horisontaldeformationerna blir försumbara.

Vid ödometerförsök på lera bör provets diameter vara minst 40 mm. Kvoten höjd/diameter bör ej vara mindre än 0,4.

Sidofriktion och stämpelanliggning

Sidofriktionens storlek beror av jordart, ringmaterial och strukturen på ringens insida. (Ödometerringen skall vara polerad invändigt.) Friktionen minskas ytterligare genom att ödometerringen invändigt smörjs med silikonfett. Ring med kraftiga repor skall bytas ut.

Det är viktigt att provets båda ändytor är parallella och vinkelräta mot provets längdaxel. God anliggning mellan stämpel och prov är nödvändig för att man skall få tillförlitliga kurvor även vid små laster.

Vid ödometerförsök på lera används normalt ödometerring $\varnothing 50$ mm och lerprovet pressas direkt in i ringen. Provet skärs sedan av med ödometerringen som styrmedel. Alternativt kan mindre ödometerring användas och provet stansas därvid direkt in i ödometerringen med hjälp av en egg. Den senare metoden har den fördelen att bättre anliggning erhålls mellan prov och ring samt att den yttre, delvis störda, randzonen avlägsnas. Den störning som instansningen på laboratoriet orsakar torde vara liten

jämfört med den som sker vid stansningen under provtagningen in situ.

Lerproverna kan knappast svälla under lagring dels på grund av inneslutning i provcylindern, dels genom att lerans höga kapillaritet hindrar att porvattnets menisker dras in i provet. När provet monteras i ödometerringen och kommer i kontakt med fritt vatten kan dock viss svällning uppstå. Detta kan undvikas genom att torra filterstenar används. Nackdelen är då att man ej känner till de verkliga effektivspänningarna i provet vid de första laststegen. Därför rekommenderas det att man använder vattenmättade filterstenar och accepterar den svällning som sker. Om man önskar bestämma modulen noggrant under förkonsolideringstrycket bör en av- och pålastning utföras (se 4.2.3).

De parametrar som behandlas i avsnitt 4.2.4 är samtliga mycket känsliga för om provet är stört. En störning framgår, som tidigare framhållits, bäst om spännings/deformationskurvan ritas i aritmetisk skala. Ur denna kurva framgår klart om modulen ($M=d\sigma'/d\epsilon$) minskar när förkonsolideringstrycket passeras.

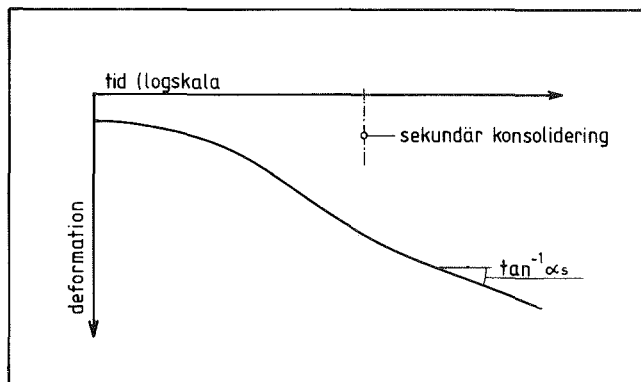


Fig 16. Klassisk definition av sekundärkonsolidering

Den viktigaste parametern, förkonsolideringstrycket, är tidsberoende så tillvida att ett snabbare försök ger ett något högre värde än ett långsammare. Utvärderingsmetodiken är dessutom subjektiv.

c_v -värdena uppvisar i regel en ganska kraftig spridning, vilken emellertid minskas genom att deformationen läses av och ritas upp med noggrannheten 0,002 mm för laster under förkonsolideringstrycket. Det bör poängteras att utvärderade c_v -värden för spänningar under förkonsolideringstrycket i regel är för låga. Detta beror på att kompressionsmodulen vid förstagångsbelastningen är för låg.

Vidare kan någon relevant utvärdering av c_v -värdet ej göras för det laststeg vid vilket förkonsolideringstrycket passeras. Så är ej heller fallet när belastningsökningen är liten i förhållande till aktuell effektivspänning. Detta beror på att de förutsättningar på vilka härledningen av c_v -värdet baseras ej är uppfyllda.

4.2.7 Sekundär konsolidering

Med sekundär konsolidering menas den sättning som följer efter det att den primära konsolideringen är avslutad, se fig 16. Deformationen avsatt mot tiden i logaritmisk skala uppvisar då oftast ett linjärt samband. Den sekundära sättningen δ_s kan skrivas som

$$\delta_s = \alpha_s \lg t/t_p$$

α_s och t_p definieras i fig 16.

Speciellt för organiska jordar kan den sekundära sättningen vara dominerande.

4.2.8 Snabbförsök

I syfte att minska tiden för ett ödometerförsök och öka tillförlitligheten i det utvärderade förkonsolideringsstrycket kan ödometerförsöket utföras med ett belastningsprogram med fler laststeg och med kortare verknings-tid. Följande rutin rekommenderas:

Belastningssteg

Fas 1

Tre steg om vardera $\approx \sigma'_0/3$. Om $\sigma'_0 < 50$ kPa kan två belastningssteg om vardera $\sigma'_0/2$ användas.

Fas 2

Tre steg (eller fler om så behövs för att förkonsolideringstrycket skall uppnås) om vardera

$$(\sigma'_{cest} * - \sigma'_0)/3$$

Fas 3

2-3 steg där lastökningen är 50% för högplastisk lera och 100% för lågplastisk lera.

Belastningstid

Fas 1. 100% primär konsolidering

Fas 2. 100% primär konsolidering

Fas 3. 24 h

Tidavläsning

Fas 1 och 2: 4s, 10s, 20s, 40s, 1 min 20s, etc.

Parallellt ritas deformationen som funktion av tiden i kvadratrotisk skala. Nästa laststeg påförs när 100% primär konsolidering (enligt Taylors metod) uppnåtts, se fig 15b).

Fas 3: som vid standardförsök.

* σ'_{cest} = ett i förväg skattat (estimerat) förkonsolideringstryck

Kommentarer

1. Den sammanlagda tiden för Fas 1 och 2 överstiger knappast en arbetsdag.
2. Normalt kan 2, max 3, snabbförsök skötas parallellt av en person. Ifall laststegen ej tar lika lång tid för två parallella försök kan nästa laststeg påföras samtidigt om deformationen för de snabbare försöken låses efter det att 100% primär konsolidering uppnåtts.
3. Övergången till Fas 3 bestäms med hänsyn till tidåtgång för 100% primär konsolidering samt last/deformationskurvans utseende. Fas 3 påbörjas när den tid som krävs för att uppnå 100% primär konsolidering markant ökar jämfört med föregående laststeg. Samtidigt ritas deformationen som funktion av effektiva vertikalspänningen i arismetisk skala. Det framgår att förkonsolideringsstrycket uppnåtts när spännings/-deformationskurvan böjer av nedåt.

Utvärdering

Eftersom förkonsolideringstrycket till sin storlek beror av belastningshastigheten bör ej Casagrandes utvärderingsmetod användas för dessa relativt snabba ödometerförsök. Karlsson & Viberg (1978) anger att spänningen där ödometerkurvans krökningsradie är minst representerar förkonsolideringstrycket.

För utvärdering av c_v -värdet bör Taylors metod användas.

4.3 Ödometerförsök med konstant deformationshastighet

I detta avsnitt behandlas den försökstyp som anses bli mest frekvent i framtiden, nämligen ödometerförsök med konstant deformationshastighet. Lasten påförs då så att provet deformeras med konstant hastighet i en tryckpress. Provet dräneras endast uppåt mot en filtersten med samma diameter som provet. Portrycket mäts vid provets undre, odränerade yta. Under försökets gång registreras automatiskt vertikal kraft, vertikal deformation och portryck vid provets nedre, odränerade yta.

Avlastning bör normalt ej utföras med konstant deformationshastighet.

4.3.1 Utrustning

- o Ödometer för CRS-försök med ödometerskål, fig 17
- o Tryckpress
- o Kraftgivare
- o Lägesgivare
- o Portrycksmätare (monterad i botten av ödometerskålen)

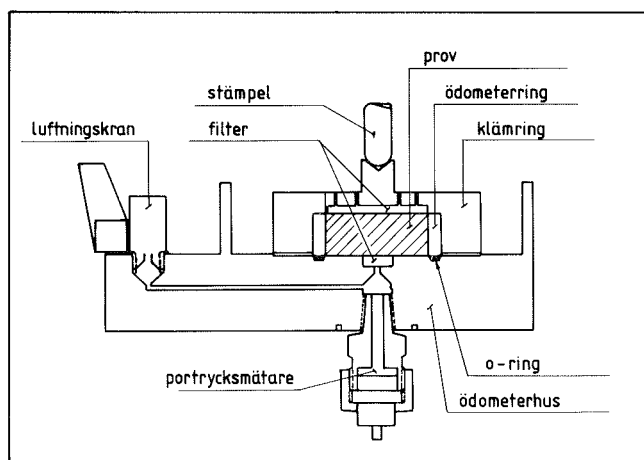


Fig 17. Ödometer för CRS-försök

- o Utrustning för registrering av försöksdata (dator eller datalog)
- o Sprutflaska, trådavskärare, silikonfett
- o Provuttryckare

4.3.2 Montering

Vid monteringen skall

- o filtret vara vattenmättat,
- o vattennivån i ödometerskålen stå några mm över filtret,
- o filtret i stämpeln vara fuktigt,
- o givarnas kalibrering kontrolleras.

Monteringen sker genom att

- o gummilocken på provhylsan avlägsnas och provhylsan med sitt lerprov placeras i provuttryckaren,
- o ödometerringen smörjs invändigt med silikonfett,
- o ödometerringen placeras i sitt rätta läge på provuttryckaren. Leran pressas sedan in i ödometerringen så att ca 5-15 mm sticker ut på ringens ovansida,
- o utskjutande material på översidan skärs av med trådavskärare,
- o provet skärs sedan av mellan ödometerring och provuttryckare med ödometerringen som styrmedel,
- o ödometerringen med prov roteras försiktigt av åt sidan,
- o med sickel eller liknande plant verktyg planas såväl provets över- som underyta av med ringen som styrning,
- o ringen torkas av (med fingret) mycket noga och vägs för bestämning av skrymdensitet,
- o luffningskranen öppnas,

- o ödometerring med prov förs försiktigt i sitt rätta läge i den yttre ödometerringen (klämringar),
- o hela ödometern med prov sänks ned i ödometerskålen,
- o muttrarna dras åt,
- o luftningskranen stängs,
- o stämpeln placeras i sitt rätta läge, luftningskranen öppnas. Anläggningen mellan stämpel och prov kontrolleras genom en lätt och försiktig tryckning med fingret på stämpeln,
- o luftningskranen stängs.

Under monteringen granskas provet med avseende på eventuell förekomst av organiska inhomogeniteter, t ex inlagring och rottrådar samt maskspår som antecknas. Detta är speciellt viktigt eftersom sådana inhomogeniteter kraftigt kan påverka portrycket vid provets odränerade yta. Om en störning kan befaras bör en annan del av provhylsans lerprov användas.

4.3.3 Provning

Försöket utförs som tidigare nämnts genom att provet deformeras med konstant hastighet. Under försökets gång registreras vertikal kraft, vertikal deformation och portryck (i provets odränerade yta).

Vid försökets början justeras tryckpressen så att laststången nått och jämt vidrör kraftgivaren. Lämplig deformationshastighet väljs på pressen och denna startas. Samtidigt kopplas registreringsapparaturen in. Normalt används deformationshastigheten ca 0,0025 mm/min. Då erhålls på 24 timmar ca 18% deformation.

Vid mycket lösa eller gyttjiga leror bör deformationshastigheten väljas lägre. Det uppmätta portrycket bör vara lägre än 10% av totaltrycket. Portrycket kan emellertid under någon del av försöket få vara högre, dock ej högre än 20%. Vid kraftigt överkonsoliderade leror bör deformationshastigheten väljas ännu lägre.

Registreringsutrustning ställs in så att ca 200 avläsningstillfällen erhålls av vertikal kraft, deformation och portryck (ca 25% deformation förutsätts).

Eftersom de elektriska givarna kan ändra 0-värde med tiden, eller vad värre är, genom att någon person av misstag ändrar inställningen på en förstärkare, så måste givarnas kalibrering regelbundet kontrolleras.

4.3.4 Redovisning

Resultaten av ett ödometerförsök med konstant deformationshastighet skiljer sig från dem som erhålls från ett försök med stegvis belastning så tillvida att spänning, deformation och portryck registreras för ett stort antal punkter. Resultaten bearbetas lämpligen i dator (Sällfors, 1974) och redovisas i följande diagram.

$$1. \quad \epsilon = f(\sigma'), \text{ fig 18}$$

σ' beräknas enligt formeln

$$\sigma' = P/A - (2/3)u_b$$

där

P = registrerad kraft

A = provets area

u_b = portryck i provets odränerade yta

$$2. \quad c_v = f(\sigma'), \text{ fig 18}$$

c_v beräknas enligt formeln

$$c_v = (d\sigma'/dt)(h^2/2u_b)$$

där

$d\sigma'/dt$ = belastningshastigheten

h = aktuell provhöjd

Beroende på upplösningens graden hos givarna kan värdet på $d\sigma'/dt$ uppvisa stor spridning om belastningsökningen beräknas utifrån mätresultat från två på varandra följande avläsningar. Linjär regression för 5–10 på varandra följande mättillfällen bör därför användas (Sällfors, 1974).

$$3. \quad M = f(\sigma'), \text{ fig 18}$$

Vid beräkning av kompressionsmodulen ($M=d\sigma'/d\varepsilon$) används linjär regression på samma sätt som beskrivits under punkt 2. I fig 18b redovisas även $u=f(\sigma')$.

$$4. \quad k = f(\varepsilon)$$

k beräknas enligt formeln

$$k = (d\varepsilon/dt)(g\rho_w h^2/2u_b)$$

där

$d\varepsilon/dt$ = deformationshastighet
(konstant)

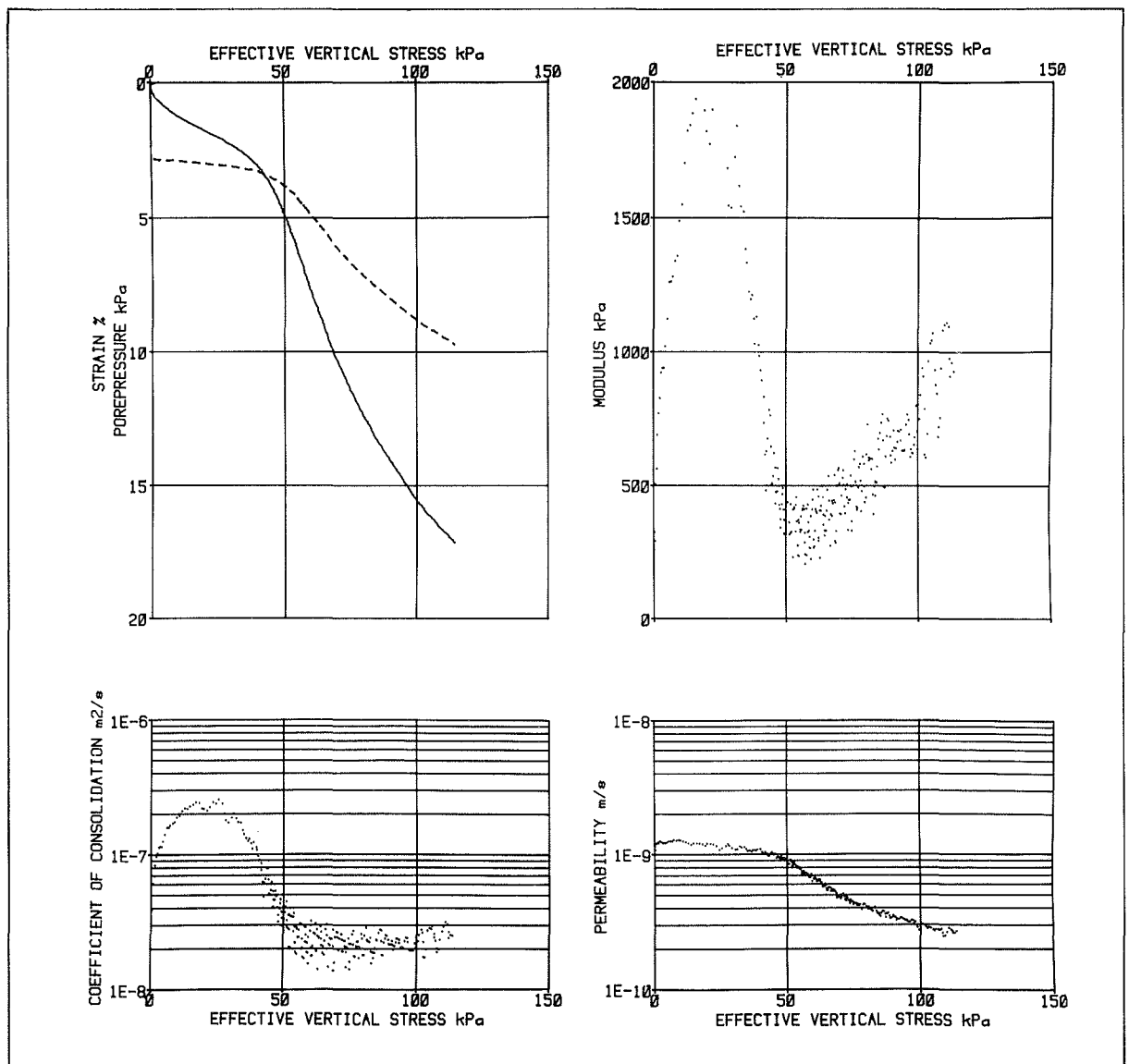


Fig 18. Resultat från CRS-försök på lera

4.3.5 Utvärdering

Utvärderingen av förkonsolideringsstrycket enligt Casagrandes metod görs empiriskt och hänger samman med sättet att genomföra försöket. Casagrandes metod kan därför inte användas för att utvärdera σ'_c från ett CRS-försök.

Sambandet spänning/kompression är tidsberoende därför att försök med högre deformationshastighet ger högre värde på förkonsolideringstrycket.

Därför rekommenderas följande metod (Sällfors, 1975). Observera att utvärderingen görs i ett diagram där ödometerkurvan redovisas i linjär skala.

Kurvans första rätlinjiga del förlängs, se fig 19. Tangenten till jungfrukurvans inflexionspunkt dras ut. I det så bildade utrymmet mellan de båda

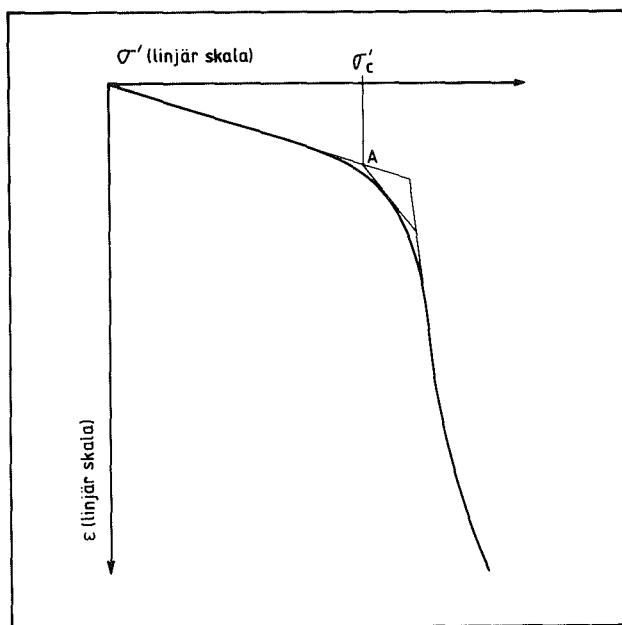


Fig 19. Utvärdering av förkonsolideringstrycket ur resultat från CRS-försök

räta linjerna och ödometerkurvan dras en tangent till ödometerkurvan så att en likbent triangel med basen mot kurvan bildas. Skärningspunkten vid A representerar förkonsolideringsstrycket.

Denna konstruktion ger, liksom Casagrandes konstruktion, något olika resultat beroende på vilken delning som väljs på axlarna. Som standard rekommenderas att delningen på abskissan, 10 kPa, motsvaras av 1% på ordinatan.

Utvärdering av M_L , σ'_L , M' och a visas i fig. 20a och b. För en redogörelse för hur dessa parametrar används i en sättningsberäkning hänvisas till Larsson & Sällfors, 1981.

Konsekvenser vid sättningsberäkning

Konstruktionen av σ'_c ger ett värde som antyder att ödometerkurvan, vid de låga deformationshastigheter som gäller i verkligheten, bör följa den streckade linjen i fig 20a och inte den heldragna uppmätt under laboratorieförhållanden. (Jungfrukurvan har parallellförflyttats sträckan c kPa åt vänster.)

Användningen av ϵ_2 , som beskrivits i avsnitt 4.2.5, förutsätter att kompressionsmodulen ökar linjärt för spänningar högre än förkonsolideringstrycket. Modulen är emellertid i realiteten konstant inom ett visst begränsat spänningsintervall (upp till $\sigma'_L = \sigma'_c$) över förkonsolideringstrycket, för att sedan öka linjärt. Att modulen är konstant innebär att σ' - ϵ -kurvan är en rät, horisontell linje. Förenklat antas modulen variera så som visas i fig 20b.

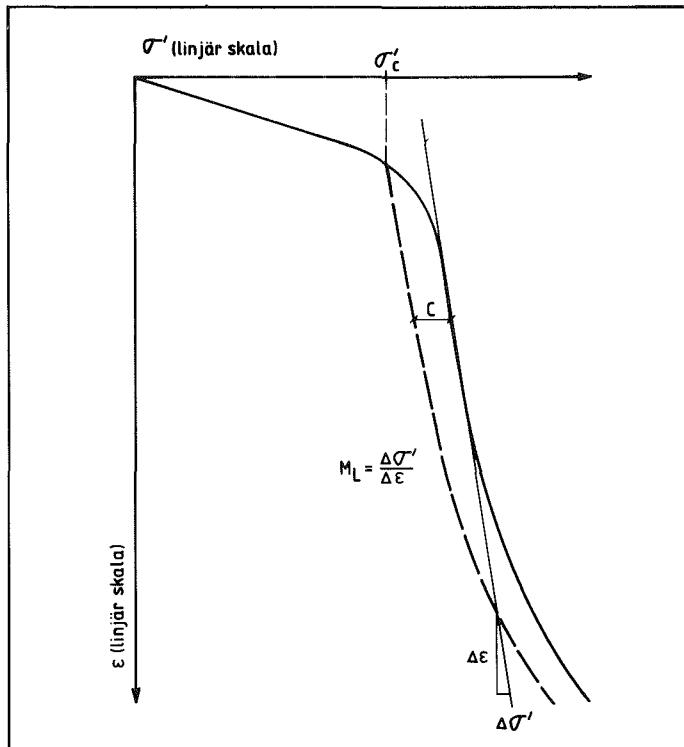


Fig 20a. Parallell förskjutning av ödometerkurvan sträckan c ger den kurva som anses representera förhållandena in situ.

Det innebär att

$$\begin{aligned} M &= M_0 && \text{för } \sigma' < \sigma'_c \\ M &= M_L && \text{för } \sigma'_c < \sigma' < \sigma'_L \\ M &= M'(\sigma' - a) && \text{för } \sigma' > \sigma'_L \end{aligned}$$

De ingående storheterna definieras i fig 20b. Av figur 20b framgår att kurvan parallellförflyttas sträckan c kPa åt vänster för att motsvara den streckade kurvan i fig 20a.

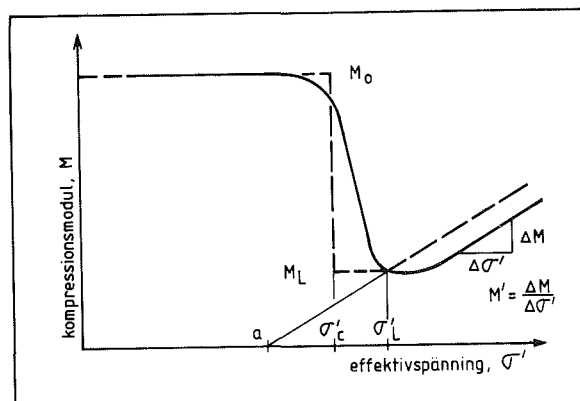


Fig 20b. Kompressionsmodulens variation med effektivspänningen.

Kompressionen av ett skikt med tjockleken h kan därefter beräknas som

$$s/h = (\sigma'_c - \sigma'_0) / M_0 + (\sigma'_0 + \Delta\sigma - \sigma'_c) / M_L \\ \text{om } \sigma'_0 + \Delta\sigma < \sigma'_L$$

$$s/h = (\sigma'_c - \sigma'_0) / M_0 + \\ (\sigma'_L - \sigma'_c) / M_L + \\ + (1/M') \ln [(\sigma'_0 + \Delta\sigma - a) / (\sigma'_L - a)] \\ \text{om } \sigma'_0 + \Delta\sigma > \sigma'_L$$

4.3.6 Tillförlitlighet (se även avsnitt 4.2.5 och 4.2.6)

Förkonsolideringstrycket, utvärderat enligt den nyss beskrivna utvärderingsmetoden, är relativt okänsligt för en måttlig störning hos provet. Vad som tidigare sagts om förkonsolideringstryckets tidsberoende gäller även här.

De största riskerna till felkällor finns hos den elektroniska delen av utrustningen. Därför måste kalibreringskontroll av givare utföras med jämna mellanrum för att man skall kunna konstatera att förstärkningsfaktorn eller 0-värdet ej har förändrats.

4.4 Triaxialförsök

Kompressionsegenskaperna kan även bestämmas med K_0 -försök i triaxialcell. Därvid varieras celltrycket så att provets medeldiameter hålls konstant.

4.4.1 Utrustning

Utförligare beskrivning finns i laboratorieanvisningsdel 9, skjuvhållfasthet, avsnitt 4.2.3.2.

4.4.2 Montering

Utförligare beskrivning finns i laboratorieanvisningsdel 9, skjuvhållfasthet, avsnitt 4.2.3.3.

4.4.3 Provning (jfr del 9, 4.2.3.41)

Efter montering återförs provet till det spänningstillstånd som rådde in situ genom att celltrycket och vertikallasten ökas. Konsolideringsförloppet följs genom att man mäter den utpressade porvattenmängden. Erforderlig konsolideringstid beror av materialets permeabilitet men torde inte för något material överstiga 1 dygn.

Försöket utförs med konstant deformationshastighet i vertikalled. Celltrycket ökas så att den utpressade porvattenmängden kontinuerligt svarar mot produkten av provets vertikaldeformation och tvärsnittsarea. Därvid hålls provets medeldiameter konstant och deformationsförhållandena blir nära nog identiska med ödometerfallet (förhindrad sitoutvidgning).

Vid högpermeabla material kan deformationshastigheten väljas så hög att försöket ej tar mer än någon timme. Celltrycket kan då lämpligen justeras manuellt. Vid lågpermeabla material, exempelvis högplastisk lera, kan försöket ta upp till 14 dygn. Försöket styrs då lämpligen av minidator.

4.4.4 Redovisning

Se avsnitt 4.3.4.

4.4.5 Utvärdering

Samma utvärderingsmetod som beskrivits i avsnitt 4.3 rekommenderas. Försöket visar hur vertikalspänningen

inverkar på deformationen och hur horisontalspänningarna förändras för att motverka den radiella deformationen under försökets gång. Därigenom kan förändring av skjuvspänningarna i provet under försöket beräknas. Ofta ökar skjuvspänningarna relativt snabbt i provet till dess förkonsolideringstrycket nås. Därefter krävs i regel för lera stora deformationer innan provet förmår uppta ytterligare skjuvspänningar. Denna förändring av uppbyggnaden av skjuvspänningar utgör ytterligare en indikation på att förkonsolideringstrycket passeras.

4.4.6 Felkällor

Vad som tidigare sagts under 4.3.5 gäller även här.

Med den försöksmetod som här rekommenderas hålls provets medeldiameter konstant. Diametern kan variera något utefter provets höjd, men detta är av underordnad betydelse.

4.5 Jämförelse av resultat från olika typer av ödometerförsök

De kompressionsegenskaper som ett ödometerförsök visar beror som nämnts av deformationshastigheten; ju högre deformationshastighet, desto längre åt höger i diagrammet förskjuts ödometerkurvan. Detta innebär att ett CRS-försök vid användning av Casagrandes konstruktion för utvärdering av förkonsolideringstrycket skulle ge högre förkonsolideringstryck än ett standardödometerförsök. Därför har olika utvärderingsmetoder för de olika försökstyperna föreslagits så att de i görligaste mån ger samstämmiga resultat.

Övriga storheter, med undantag av α'_1 , påverkas ej nämnvärt av måttliga variationer i deformationshastigheten.

5 Bestämning av kompressionsegenskaper hos friktionsjord

5.1 Bakgrund

Laboratorieförsök för bestämning av friktionsjordars kompressionsegenskaper utförs i regel på inpackade prover eftersom jorden ofta blir helt eller delvis störd vid provtagningen. Endast när friktionsjorden innehåller silt och ler är det möjligt att ta till synes ostörda prover. Härvid är det en fördel att undersöka proverna i sitt ursprungliga skick eftersom ett bibehållande av portal och struktur kan ha stor betydelse för försöksresultatet. Även i de fall jorden håller samman relativt väl är det emellertid mycket svårt att bibehålla friktionsjord så ostörd att förkonsolideringstrycket kan bestämmas.

Den vanligaste apparaturen för bestämning av friktionsjords kompressionsegenskaper är ödometern, såsom vid försök på lera, främst därför att den är lätta att hantera. Kompressibiliteten hos friktionsjord är dock vanligen så låg att de felkällor som den vanliga ödometern har allvarligt kan påverka resultatet. De viktigaste felkällorna är apparaturens egendeformation, sidofriktion och dålig stämpelanläggning. Dessa problem kan delvis elimineras genom att man använder ringkompressometer som mäter deformationen mellan två ringar, vanligen den näst översta och den näst nedersta. Alternativt kan en ödometer med stor diameter i förhållande till höjden användas. Den stela stämpeln ersätts då med ett gummimembran som belastas med tryckluft. Rowe-ödometern t ex fungerar enligt denna princip. Det finns ej någon standardapparat för kompressionsförsök på friktionsjord.

Här lämnas en utförlig beskrivning endast av ödometerförsöket. Ringkompressometerförsök beskrivs kortfattat liksom kompressionsförsök i triaxialapparat.

5.2 Ödometerförsök

Om man vid ödometerförsök på friktionsjord använder en ödometer med kvoten provhöjd/provdiameter = 0,4, dvs samma ödometer som för lera, får man stor inverkan av dålig anläggning mellan stämpel och prov vid försök på fast lagrade jordar (se 5.2.5, Tillförlitlighet). Det enklaste sättet att minimera inverkan av stämpelanläggningen är att använda en ödometer som är så hög att inverkan av ringfriktion och stämpelanläggning upphäver varandra. Valet av kvoten h/d blir emellertid svårt eftersom den relativa inverkan av felkällorna är olika vid första pålastning, avlastning och återbelastning. En god kompromiss är att välja $h/d = 0,67$. Exempel på en sådan utrustning beskrivs i nästa avsnitt.

Ödometers storlek avgör hur grova jordar som kan undersökas. Normalt bör ödometers minsta mått vara ca 10 gånger större än största kornstorlek. Om jorden är ensgraderad bör minsta måttet vara ca 20 gånger större än största kornstorleken.

Som ödometer kan även användas den vanliga packningscylindern för laboratoriepackning (se Laboratorieanvisningar, del 5, fig 6). Denna cylinder har höjden 122,5 mm och diametern 102 mm. Kvoten h/d är således för stor. Vid första pålastning påverkas emellertid ej resultatet i nämnvärd

grad. Eftersom kompressionsegenskaperna vid en lag- ringstäthet som åstadkoms i pack- ningscylindern ofta efterfrågas är det fördelaktigt att kunna utföra kompressionsförsök med hjälp av denna utrustning som dessutom finns på de flesta geotekniska laboratorier.

Beskrivningen i avsnitt 5.2.1 är till större delen allmänt hållen och kan användas för flertalet ödometrar. För speciella ödometrar kan vissa detalj- anvisningar behöva modifieras.

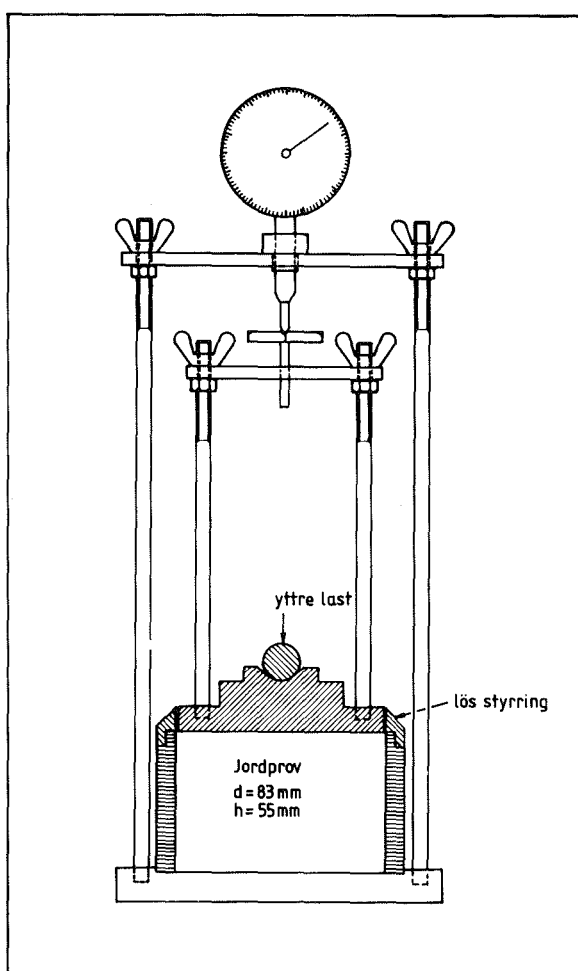


Fig 21. Exempel på ödometer för friktionsjord, typ CTH. Ringen är av syrafast stål med vägg tjockleken 8 mm. Bottenplattan är av lättmetall. Stämpeln är svagt konad för att tillåta en viss snedställning. Egenelasticiteten är försumbar även vid försök på mycket fasta jordar - mät- klockan mäter direkt mellan bottenplatta och stämpel. Vid försök på låg- kompressibel jord rekommenderas en mät- klocka med mätnoggrannhet 1/1000 mm.

5.2.1 Utrustning

- o Ödometer enligt fig 21.
- o Belastningsstativ. Ödometern är avsedd för lastpåföring med vikter. Belastningsstativ av olika ut- formning kan användas.
- o Vikter. Eftersom ödometerförsök på friktionsjord mer sällan före- kommer än på lera brukar man använda de vikter som finns för standardödometrar, se avsnitt 4.
- o Våg med mätnoggrannhet 0,01 g.
- o Styrlinjal.
- o Liten borste eller pensel.

5.2.2 Montering

Ödometern är avsedd för prover inpackade på laboratorium. Sand utan finjord kan provas antingen helt torr eller helt vattenmättad. Dock bör man observera att ett vattenmättat prov kan bli delvis stört under själva ödometerförsöket till följd av de stora gradienterna som uppstår vid lastpå- läggning. Detta kan leda till att kom- pressionsmodulen underskattas. Prov- ning i torrt tillstånd rekommenderas därför.

Korn större än 8 mm siktas bort. Vid ensgraderad jord skall korn större än 4 mm siktas bort.

1. Den lösa styrringen sätts på ödometerringen (se fig 21).
2. Materialet hålls i ödometern. Observera att separation lätt kan uppkomma vid mellan- och mång- graderade jordar. Jordprovet bör då ösas i med sked. Eftersträvas lös lagring bör fallhöjden vara låg (beträffande metodik för lös ifyllning, se Laboratorieanvisnin- gar del 5, avsnitt 4.4).

3. Jordprovet packas genom försiktiga slag mot ödometerns sidor. Slagen skall anbringas mot olika delar av ödometerringen för att undvika en orientering av kornen. Instampningsredskap kan användas under förutsättning att kornen ej krossas. Således bör varken tung eller lätt laboratoriestampning användas vid ensgraderad grövre jord. Efter packningen bör jordprovets överyta ligga över ödometerringens överkant.
4. Den lösa styrningen tas bort och jordprovets överyta avplanas med linjal. Avplaningen skall göras med stor försiktighet. Om kraftig råge kvarstår efter packningen bör avplaningen ske i etapper så att vid den sista avstrykningen, då linjalen vilar på ödometerringens kant, endast ett tunt lager återstår.
5. Avplanat material borstas bort. Ödometer med innehåll vägs. (Ödometerns nettovikt förutsätts vara känd.) Provets skrymdensitet beräknas.
6. Den lösa styrningen sätts tillbaka. Ödometern placeras på plats i belastningsstativet.
7. Stämpeln sänks försiktigt ned mot jordprovets överyta. Mätklockan monteras och nollställs med justeringskruven.

5.2.3 Provnings

Normalt används en lastserie som ger spänningar i närheten av följande värden: 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1280, 2560 kPa.

Första pålastning

- o Hävarens ställskruv skall vara inställd så att lastoket ej når ödometerstämpeln. Vikter motsvarande spänningen 10 kPa läggs på. Hävarens ställskruv skruvas försiktigt ned så att lasten förs på ödometern.
- o Efter avslutad krypning (se nedan) registreras mätklockans utslag.
- o Hävarens stoppskruv skruvas upp till dess mätklockan börjar ge utslag. Nya vikter, motsvarande vad som fordras för att nå nästa laststeg, läggs på. Hävarens stoppskruv skruvas försiktig ned så att lasten förs på.
- o Lastpåläggningen fortsätts på samma sätt som angetts ovan tills önskad spänningsnivå uppnåtts i provet.

En viss krypning förekommer alltid. Storleken av denna är avgörande för hur lång tid varje laststeg skall verka. Krypningen avtar i regel snabbt och kan för praktiskt bruk anses avslutad när den gått ned till mindre än $1\mu\text{m}$ per minut. Detta värde används som bedömningsgrund för hur länge ett laststeg skall få verka. När det gäller registrering av krypning, se avsnitt 5.5.

Avlastning

Förfaringsättet vid avlastning beror av vilken form av information man önskar få av ödometerförsöket. I de fall avlastningsdelen eller en andra pålastning är viktigast, kan försöket avbrytas när önskad spänningsnivå är uppnådd. Skall jordens kompressibilitet i överkonsoliderat tillstånd undersökas, görs avlastning ner till den

effektivspänning som verkade in situ på jordprovet. Avlastningen kan lämpligen göras med samma laststeg som vid pålastningen. Resultatet förändras inte om andra laststeg väljs, vilket kan ske om man vill uppnå korrekt spänningsnivå.

Viktigt: kompressionsmodulen vid återbelastning beror av vid vilken spänning avlastning sker.

Återbelastning

Återbelastningen görs för att undersöka jordprovets egenskaper i överkonsoliderat tillstånd. Spänningsnivån vid återbelastningens början väljs som ovan beskrivits. Pålastningen i övrigt utförs som vid den första pålastningen.

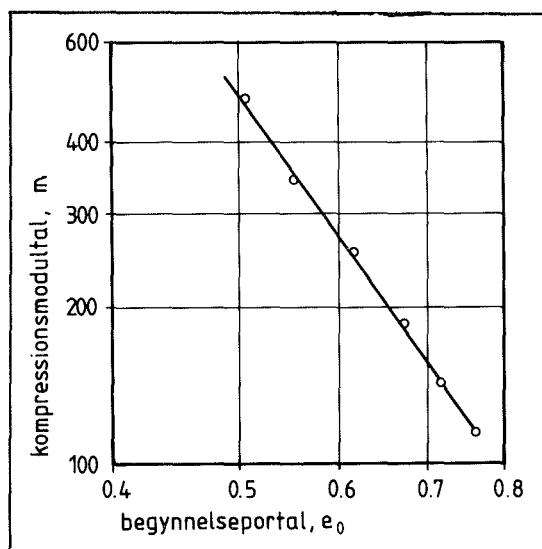


Fig 22. Sambandet mellan m och e_0 är linjärt i ett dubbellogaritmiskt diagram.

5.2.4 Utvärdering och redovisning

Kompressionen ϵ beräknas enligt formeln $\epsilon = \Delta h/h_0$, där Δh är sättningen och h_0 provets höjd vid försökets början.

Redovisning av kompressionsförsöket och utvärdering av parametrarna, kompressionstalet m och spänningsexponenten β görs vanligen i dubbellogaritmiskt diagram, åtminstone för första pålastningsgrenen och avlastningsgrenen, se fig 22.

Utvärderingen av m och β görs på följande sätt:

- o De registrerade kompressionsvärdena justeras med ett konstant värde $\Delta\epsilon$ så att de nya punkterna faller på en rät linje i det dubbellogaritmiska diagrammet (sker genom passning). Justeringen är vanligtvis nödvändig för att få en rät linje. Detta beror bl a på att man ej har möjlighet att nollställa mätklockan vid lasten 0. Avlastningsgrenen brukar däremot bilda en rät linje.
- o Modultalet m och spänningsexponenten β utvärderas enligt fig 22.

Inverkan av en gjord approximation framgår bättre i ett linlindiagram än i ett loglogdiagram, och det är även lättare att göra den approximativa tolkningen i ett linlindiagram.

Utvärdering av kompressionsmodulen i linlindiagram visas i fig 24.

Portalet hos friktionsjorden in situ är svårt att bestämma. Därför brukar kompressionsförsök utföras med en sådan lagringstäthet hos den undersökta jorden att portalet ligger vid

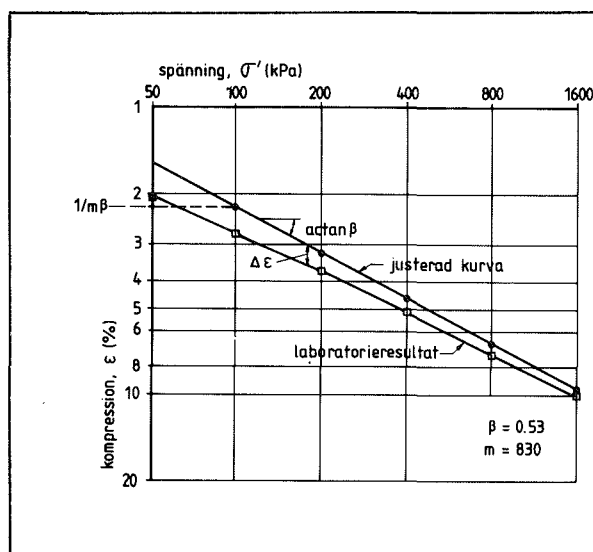


Fig 23. Utvärdering av modultalet m och spänningsexponenten β . $1/m\beta$ utvärderas som den kompression som motsvarar spänningen 100 kPa (=jämförelsespänningen σ_j)

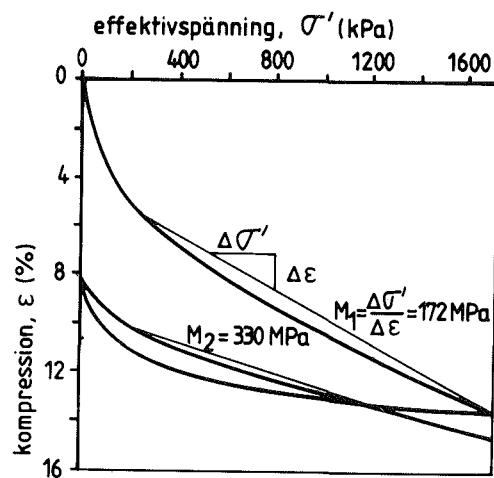


Fig 24. Tolkning av kompressionsmodulen i ett linjärt diagram. Kompressionsmodulen är tolkad som sekantmodul mellan spänningarna 200 och 1600 kPa för förstabelastningskurvan och återbelastningskurvan.

övre respektive undre gränsen av ett troligt portalsintervall. Spänningsexponenten β varierar endast obetydligt med lagringstätheten och kan för praktiskt bruk betraktas som en materialkonstant (β beror främst av kornstorlek och kornform). Modultalet m varierar emellertid kraftigt med lagringstätheten. Mellan modultalet och portalet råder ett samband där $m = ae^b$, där a och b är konstanter. Detta innebär att sambandet blir en rät linje i ett dubbellogaritmiskt diagram, se fig 23. Diagram av denna typ kan användas för att bestämma m -värdet för mellanliggande portal.

Återbelastningsgrenen redovisas och utvärderas vanligen i ett diagram med linjära skalor. I regel är återbelastningsgrenen i stort sett rät i ett sådant diagram, åtminstone om avlastning ej gjorts ner till alltför låga spänningar.

Det är lämpligt att redovisa även en första pålastning och avlastning i

diagram med linjära skalor. Särskilt för grövre jord och högre spänningar brukar kompressionsmodulen vara nära nog konstant, vilket underlättar beräkningarna.

5.2.5 Tillförlitlighet

De för ödometerförsöket allvarligaste felkällorna är apparaturens egendeformation, dålig stämpelanläggning och sidofriktion.

Apparaturens egendeformation måste beaktas vid försök på jordar med låg kompressibilitet. I en ödometer av typ SGI X mäter man förutom jordens kompression också de små deformationer som uppkommer mellan ödometer och bottenplatta samt mellan stämpel och lastöverföringsplatta. Dessa deformationer kan ha allvarligt störande inverkan, se fig 25a. Apparaturens egendeformation kan emellertid till stor del elimineras. Deformationen bör mätas direkt mellan stämpel och

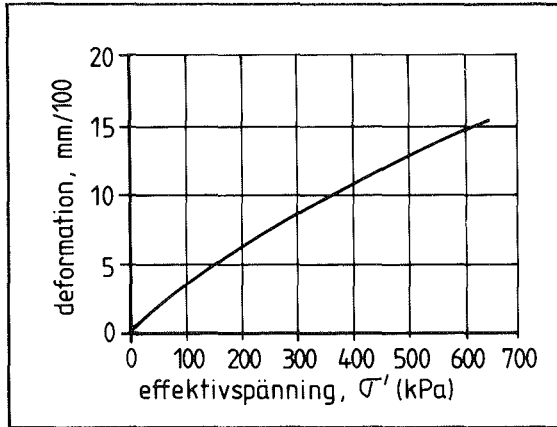


Fig 25a. Egenelasticitet hos ödometer typ SGI X. Provet är ersatt med en mässingsattrapp, i övrigt är ödometern monterad som vanligt. Spänningen är beräknad på den vanliga provytan $19,64 \text{ cm}^2$.

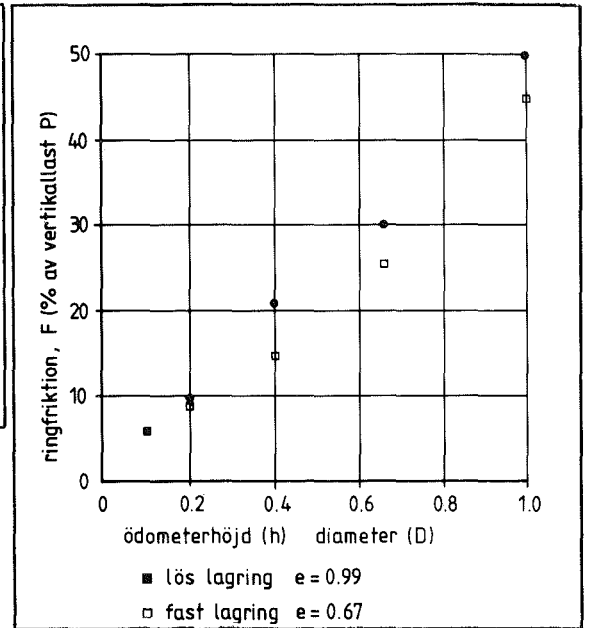


Fig 25b. Ringfriktionen som funktion av förhållandet h/d . Exemplet avser ödometer med diametern 83 mm och sand med kornstorlek 0,5-1,0 mm.

bottenplatta som visas i fig 21. Bottenplatta och stämpel bör också vara så styva att deformationen i dessa kan försummas.

Sidofriktionen (friktionen mellan jord och ödometerring) beror främst på kvoten mellan ödometers höjd och diameter, medan jordens lagringstäthet inverkar i ganska ringa grad, se fig 25. Använder man en ödometer med $h/d = 0,4$ (dvs samma som för den vanliga ödometern) inverkar knappast sidofriktionen; medelspänningen i provet förändras ca 10%. Den totala sidofriktionen ökar ungefär proportionellt mot ödometerhöjden, en effekt som är svår att eliminera. Kontaktrycket mellan mineralkornen och ödometerringen är så högt att man inte når samma effekt vid användning av smörjmedel som vid försök på lera.

Inverkan av dålig anliggning mellan stämpel och prov beror i hög grad på jordens lagringstäthet. Vid lös lagring blir inverkan obetydlig, medan inverkan vid fast lagring blir högst betydande. Vid små ödometerhöjder re-

gistreras ett för lågt värde på kompressionsmodulen.

Dålig kontakt mellan stämpel och prov vid fast lagring kan elimineras exempelvis genom att ett hårdplastskikt appliceras mellan stämpel och prov. Detta är emellertid omständligt. Enklare är att välja ett sådant värde på ödometers höjd/diametervkot att inverkan av stämpelanliggning och sidofriktion tar ut varandra. För fast lagrade jordar har försök visat att de båda effekterna vid första pålastning har ungefär lika stor men motsatt inverkan när höjden = diametern (för löst lagrad jord fås ganska ringa effekt av ändrad h/d). Vid dessa proportioner på ödometern medför emellertid den stora sidofriktionen felaktigheter i den uppmätta kompressionsmodulen vid avlastning och återbelastning. Som ett rimligt medelvärde rekommenderas här därför användning av ödometer med $h/d=2/3$.

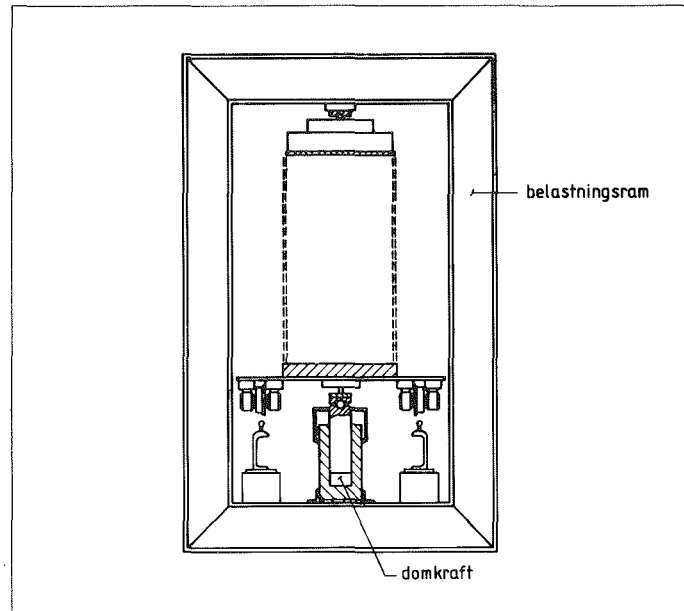


Fig 26. SGI ringkompressometer. Provet är 50 cm i diameter och 100 cm högt

5.3 Ringkompressometerförsök

Genom användning av ringkompressometer kan två felkällor hos ödometerförsöket elimineras: sidofriktion och dålig stämpelanläggning. Sidofriktionen elimineras genom att ringarna följer med jorden i dess rörelser. Inverkan av dålig stämpelanläggning kan elimineras på två sätt. Det bästa är att mäta kompressionen mellan två ringar, i regel den näst översta och den näst

nedersta. Detta är emellertid praktiskt möjligt endast på större kompressometrar. En annan möjlighet är att ge kompressometern så stor höjd att inverkan av den dåliga stämpelanläggningen blir försumbar.

Ringkompressometrar används huvudsakligen i forskningssammanhang. Någon detaljerad beskrivning av apparaturen görs därför ej.

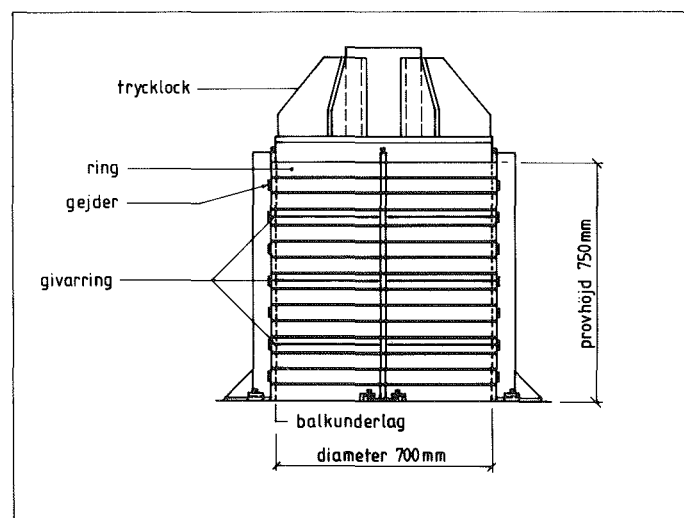


Fig 27. CTH ringkompressometer

Som ovan nämnts behövs för att uppnå påtagliga fördelar stora ringkompressometrar. Som exempel på ringkompressometrar visas därför (fig 26 och 27) endast de båda stora kompressometrar som för närvarande finns i landet. Båda är avsedda för grovt material (maximal kornstorlek ca 1/10 av ödometerdiametern) men kan även användas för material med finare fraktioner. För att hindra små partiklar att tränga ut mellan ringarna kläds i sådana fall kompressometern invändigt med två lager 0,05 mm polyuretanfilm. Eftersom försök i stor kompressometer tar lång tid och kräver stor provmängd används normalt utrustningen endast för material som är så grovt att det ej kan provas i utrustning med mindre dimensioner.

5.4 Triaxialförsök

För att bestämma kompressionsegenskaperna vid andra spänningsförhållanden än dem som råder i ödometern används vanligen utrustningen för triaxialförsök. I triaxialcellen kan

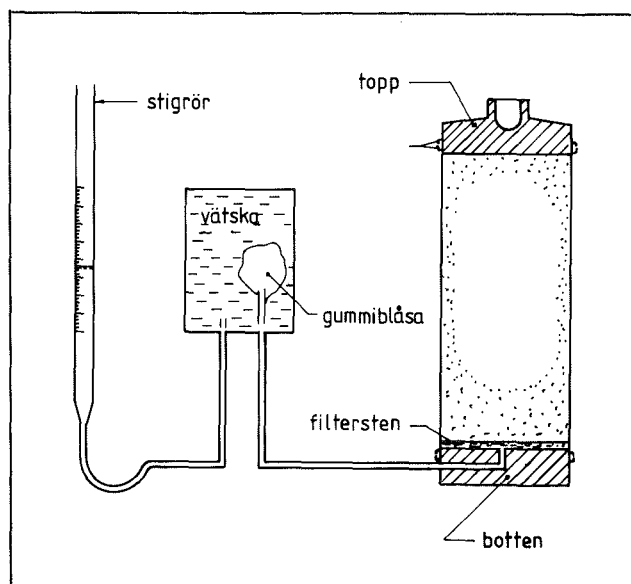


Fig 28. Princip för mätning av porvolymförändringen vid triaxialförsök på torr sand

man välja det spänningstillstånd som gäller i varje specialfall.

Triaxialförsöket beskrivs utförligt i Geotekniska laboratorieanvisningar, del 9, och därför hänvisas till denna del när det gäller försökets utförande. Här behandlas endast mätning av volymförändringar.

Försök på vattenmättad jord rekommenderas i första hand eftersom man då i största möjliga utsträckning efterliknar förhållandena in situ. (Även jord över grundvattenytan kan momentant bli vattenmättad.) När jorden är vattenmättad mäts volymförändringen genom mätning av utpressad porvattenmängd. Försökstekniska skäl kan dock medföra att försöken måste utföras på torr jord. I sådana fall kan i stället den utpressade luftmängden mätas, se fig 28.

5.5 Kompressionens tidsförlopp

Den tidsberoende krympningen i friktionsjord kan jämföras med den sekundära konsolideringen i lera. För friktionsjord är krympningens inverkan på kompressionsmodulen liten varför den ofta förbises. Vidare kan vibrationer ha större inverkan på modulen än krympningen. I synnerhet för grövre jordar kan dock krympningens inverkan bli stor.

Den tidsberoende deformationen kan bestämmas med hjälp av den utrustning som beskrivs i föregående avsnitt. Vid användning av små ödometrar krävs emellertid en mycket noggrann avläsning och en vibrationsfri uppställning av apparaturen för att värdena skall bli tillförlitliga. Vid försök på grovt material i stor kom-

pressometer är krypdeformationerna emellertid stora och de kan därför relativt enkelt registreras.

Krypningen under konstant last är som regel proportionell mot logaritmen för tiden. Registrering av tidkurvan görs för varje laststeg med början omedelbart efter lastens påförande. Avläsningarna skall fortgå tills en rät linje erhålls i ϵ -logt-diagrammet, se fig 29.

Den krypning som uppmäts i ödometerfallet är relevant endast vid motsvarande belastningsfall i fält. Krypdeformationerna kan bli av en helt annan storleksordning när förhållandet mellan huvudspänningarna ändras, t ex vid sättning under en begränsad lastyta.

För varje spänningsnivå kan en kryptkoefficient α_s utvärderas. α_s definieras av sambandet

$$\delta_s = \alpha_s \lg(t/t_p)$$

där δ_s = kompression till följd av krypning (sekundärkompression)

t_p = den tidpunkt vid vilken tidkurvan övergår till en rät linje (primära kompressionens avslutning).

α_s = sekundära kompressionen som inträffar när belastningstiden ökar med en tiopotens.

α_s ökar med spänningen. Redovisning av krypegenskaperna görs med α_s som funktion av spänningen.

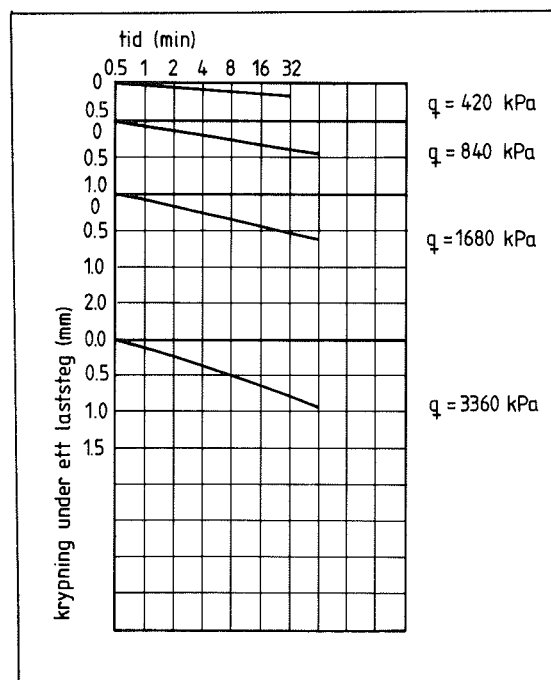


Fig 29. Registrering av tidsberoende krypning

6 Bestämning av kompressionsegenskaper hos silt och blandkorniga jordarter

6.1 Bakgrund

I regel blir prover av silt och blandkorniga jordarter, s.k. mellanjord, mer eller mindre störda vid provtagningen och resultaten av ödometerförsök blir då mindre tillförlitliga. Allmänt gäller att samma försöksmetodik som för kohesionsjord (kap 4) kan användas om lerhalten är hög (15-20%), medan samma försöksmetodik som för friktionsjord (kap 5) kan användas om lerhalten är låg och grovsiltfraktionen dominerar. I tveksamma fall bör materialet behandlas som en kohesionsjord under beaktande av vad som sägs under 6.2-6.5.

6.2 Utrustning och montering

De ödometrar och metoder som beskrivits i kap 4 kan samtliga användas för mellanjord. Ovarsam hantering av provet kan dock helt förändra strukturen och montering bör därför ske direkt från provhylsa in i ödometeringen. CTH-ödometern är därför mindre lämplig på grund av att stansningen kan medföra omlagring av materialet.

- o Efter det att provet förts direkt in i ödometeringen skärs provet av med trådavskärare längs underytan samt (Obs!) längs överytan med någon förhöjning.
- o Provet roteras försiktigt av åt sidan och ödometering med provförs försiktigt på plats i ödometerskålen. Endast filterstenen skall då vara täckt med vatten.

- o Provet roteras försiktigt på filterstenen så att anläggningen mellan provet och filterstenen blir god.
- o Därefter skrapas överytan försiktigt plan med en spatel. (Om provets ändtytor ej är parallella kan stämpeln bli fastkilad.) I protokollet noteras om hylsan i provtagaren var helt fylld, om vattenseparation skett samt i vilken mån provet behållit ursprunglig form vid hanteringen. Om vattenseparation ägt rum och lerhalten är låg bör man försöka packa in provet i ödometern till det portal som provet kan anses ha haft i sitt ursprungliga tillstånd.

6.3 Provning

Permeabiliteten hos en mellanjord beror starkt på kornfördelningen och det är därför svårt att ge entydiga rekommendationer om belastningsrutin. I regel bör små laststeg användas (20-30 kPa) och i de flesta fall torde 1-2 timmars varaktighet per steg vara tillräckligt. För CRS-försök torde hastigheten 0,002-0,003 mm/min vara lämplig. Om lerhalten är låg bör deformationshastigheten väljas högre för att mätbara porövertryck skall uppstå och därmed en beräkning av c_v -talet skall bli möjlig. (Obs! Modulen ökar ofta snabbt med ökande vertikalspänning varför man noga måste tillse att kraftgivare vid CRS-försök ej överbelastas.) CRS-försöken ger automatiskt beräkningsunderlag

för såväl c_v -värden som permeabilitet. För stegvis belastade ödometerförsök är det tillräckligt att göra tidavläsningar på vart annat eller vart tredje laststeg eftersom c_v -värdet och permeabiliteten varierar måttligt med deformationen.

Eftersom ostörda prover sällan kan erhållas för en mellanjord är det ofta svårt att avgöra hur väl den erhållna ödometerkurvan representerar egenskaperna in situ. Det är därför lämpligt att göra en avlastning med åtföljande pålastning enligt följande:

1. Pålastning till de framtida av byggande etc uppkomna vertikalspänningarna i jorden (σ'_v). Om dessa är obetydligt större än de ursprungliga vertikalspänningarna skall pålastning i ödometern ske till $1,25 \sigma'_0$; dock minst $\sigma'_0 + 20$ kPa.
2. Avlastning till σ'_0 , eller till det effektivtryck som antas råda efter utförda schaktarbeten, om detta är lägre än σ'_0 .
3. Förnyad pålastning till $\sigma' > 3\sigma'_v$ (enligt 1.).

6.4 Utvärdering

För mellanjord skall kompressionsegenskaperna i första hand studeras i diagram med linjära skalor. Därvid framgår klart om provet uppvisar något förkonsolideringstryck eller ej. Den för det aktuella lastintervallet giltiga modulen kan utläsas direkt ur diagrammet. Om lastintervallet är stort kan m och β utvärderas ur ett dubbellogaritmiskt diagram (kap 5).

Av- och pålastningen resulterar ofta i en modul som är 3-6 gånger större än

jungfrukurvans modul. Modulen vid förstagångsbelastning kan vara påverkad av störning, dålig anliggning mellan stämpel och prov etc.

6.5 Tillförlitlighet

Vad som sagts under 4.2.6 och 4.3.6 är tillämpligt även här. Likaså vad som berörts under 5.2.5.

7 Litteratur

- Andréasson, L. Kompressibilitet hos friktionsjord. Laboratiestudium. CTH, Inst för geoteknik. Göteborg 1973.
- Fagerström, H & SGFs laboratoriekommitté, 1973. Packningsegenskaper. Byggforskningsinformati-
onsblad B2:1971, Rev. 1984, Stockholm.
- Hansbo, S. A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test. SGI, Proc No 14. Stockholm 1957.
- Hansbo, S. Jordmateriallära. AWE/-
Gebers, J&W. Uppsala 1975.
- Hartlén, J. Skånska moränlerors hållfasthets- och bärighetsegenskaper. CTH, Inst för geoteknik. Göteborg 1974.
- Karlsson, R & Viberg, L. Snabba ödometerförsök. SGI, Rapport nr 5. Linköping 1978.
- Larsson, R. SGI, Internrapport. Linköping 1978.
- Larsson, R & Sällfors, G. Beräkningar av sättning i lera. Väg- & Vattenbyggaren nr 3. Stockholm 1981.
- Sällfors, G. Datorbearbetning av ödometer- och triaxialförsök. CTH, Inst för geoteknik. Göteborg 1974.
- Sällfors, G. Preconsolidation pressure of soft, high-plastic clays. CTH, Inst för geoteknik. Göteborg 1975.
- Terzaghi, K. Theoretical soil mechanics. John Wiley & Sons. New York 1936.
- Wiesel, C-E, Hansbo, S, Broms, B & SGFs laboratoriekommitté, Skjuvhållfasthet. Byggforskningsrådet, T2:1985, Stockholm

Art.nr. 6703623

Abonnemangsgrupp:
X. Samhällsplanering

Distribution:
Svensk Byggtjänst
Box 7853, 103 99 Stockholm
Telefon: 08-734 50 00

Cirkapris: 60 kr exkl moms

T23:1986
ISBN 91-540-4651-3
Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm