



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

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



Rapport

R44:1989

Ödometerförsök enligt CRS- metoden

Ove Magnusson
Göran Sällfors
Rolf Larsson

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION	
År	
Plac	Ser

R
AM

Byggforskningsrådet

R44:1989

ØDOMETERFÖRSÖK ENLIGT CRS-METODEN

Ove Magnusson
Göran Sällfors
Rolf Larsson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 851036-2
från Statens råd för byggnadsforskning till SKANSKA AB,
Danderyd.

REFERAT

Vid grundläggning på lera är det av stor betydelse att veta om leran är överkonsoliderad och i så fall hur mycket. Detta påverkar såväl sättningarnas storlek och hastighet som val av grundläggningsmetod och omfattning av eventuella förstärkningsåtgärder.

Ju större överkonsolidering en lera har desto större reserv har leran att bära tillägsbelastningar utan att stora sättningar utbildas. Överkonsoliderad lera förekommer i relativt stor omfattning och många gånger kan konstruktionen grundläggas direkt på leran utan några sättningsreducerande åtgärder. Detta fordrar dock att lerans förkonsolideringstryck med säkerhet kan bestämmas.

Föreliggande undersökning har därför utförts för att få en uppfattning om vilken noggrannhet i resultaten som kan förväntas i vanliga praktiska fall med nuvarande upphandlingsförfarande och omfattning.

I Byggforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

Denna skrift är tryckt på miljövänligt, oblekt papper.

R44:1989

ISBN 91-540-5025-1

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Svenskt Tryck Stockholm 1989

INNEHÅLL	sid
1 BAKGRUND	1
2 SYFTE OCH OMFATTNING	4
3 FÄLT OCH LABORATORIEMETODER	6
3.1 Provtagning	6
3.2 Ödometerförsök CRS	7
4. UPPLÄGGNING AV FÖRSÖK	11
4.1 Områdets geologiska och geotekniska egenskaper	11
4.2 Upphandling av provtagning	12
4.3 Upphandling av ödometerförsök	13
5. RESULTAT AV ÖDOMETERFÖRSÖK	14
5.1 Flera provtagare - ett laboratorium	14
5.2 En provtagare - flera laboratorier	25
6 PROVTAGNINGENS INVERKAN PÅ ÖDOMETERRESULTATEN	30
6.1 Resultat	30
6.2 Kommentarer till erhållna resultat	30
7. LABORATORIEHANTERINGENS INVERKAN PÅ ÖDOMETERRE- SULTATEN	34
7.1 Resultat	34
7.2 Kommentarer till erhållna resultat	35
8. SÄTTNINGSBERÄKNINGAR UTFÖRDA AV KONSULTER PÅ EGNA RESULTAT	36
9. STATISTISK BEARBETNING	40
10. SÄTTNINGSUPPFÖLJNING PÅ PROVFÄLTET I BÅLSTA	43
11. SÄTTNINGSBERÄKNING FÖR PROVFÄLTET I BÅLSTA	46
12. SLUTSATSER	51
13. REFERENSER	53

FÖRORD

Vid grundläggning på lera är det av stor betydelse att veta om leran är överkonsoliderad och i så fall hur mycket. Detta påverkar såväl sättningarnas storlek och hastighet som val av grundläggningsmetod och omfattning av eventuella förstärkningsåtgärder.

Ju större överkonsolidering en lera har desto större reserv har leran att bära tilläggsbelastningar utan att stora sättningar utbildas. Överkonsoliderad lera förekommer i relativt stor omfattning och många gånger kan konstruktionen grundläggas direkt på leran utan några sättningsreducerande åtgärder. Detta fordrar dock att lerans förkonsolideringstryck med säkerhet kan bestämmas

Också för mindre känsliga konstruktioner där stora sättningar kan tolereras är det av stor betydelse att sättningarnas storlek och hastighet kan förutsägas med god noggrannhet.

Förkonsolideringstryck och övriga parametrar för sättningsberäkning bestäms i laboratorium på så kallade ostörda prover som tagits med standardkolvprovtagare i fält. Tilltron till resultaten var tidigare begränsad, främst med avseende på överkonsolideringsgraden, varför lerans egen bärförmåga ofta inte utnyttjades till fullo.

Undersökningsmetoderna har dock utvecklats på senare år och de flesta geotekniska konsulterna förfogar över modern utrustning. Forskningen har också visat att man med hjälp av noggranna undersökningar kan göra mycket goda uppskattningar av såväl förkonsolidering som sättningsförlopp.

Det är dock skillnad på omfattningen av de undersökningar som utförs i forskningssammanhang och de begränsade undersökningar som av ekonomiska skäl kan

utföras för enskilda byggnadsprojekt och där dessa dessutom utförs under en viss tidspress.

Föreliggande undersökning har därför utförts för att få en uppfattning om vilken noggrannhet i resultaten som kan förväntas i vanliga praktiska fall med nuvarande upphandlingsförfarande och omfattning av undersökningarna.

Ett stort antal "ordinära" undersökningar har därför utförts inom ett lerområde i Stockholmstrakten. Undersökningarna har utförts av olika borrarlag och laboratorier. För att provtagningar och försök skulle utföras på ett sätt som är brukligt vid geotekniska undersökningar har dessa upphandlats på sedvanligt sätt, i en del fall via bulvan, utan att undersökningarnas syfte avslöjats.

Detta har varit nödvändigt då undersökningens syfte har varit att med en systematisk undersökning klarlägga hur väl nuvarande praxis i upphandling och undersökningningar tillgodoser behovet av goda bestämmingar av lerans egenskaper men inte av konsulternas inbördes skicklighet. Olika konsulter och laboratorier symboliseras i rapporten också konsekvent endast med en bokstav vars innebörd är känd endast av författarna. Vi hoppas att alla medverkande har förståelse för detta förfarande.

Projektet har samfinansierats av Byggforskningsrådet, SKANSKA, SGI och CTH.

Till alla som mer eller mindre medvetet medverkat i genomförandet av detta projekt riktar vi vårt hjärtliga tack.

Danderyd

Göteborg

Linköping

Ove Magnusson

Göran Sällfors

Rolf Larsson

SKANSKA

CTH

SGI

1. BAKGRUND

Allt byggande på mark kräver någon form av geoteknisk utredning. Omfattningen av den geotekniska undersökningen styrs bl.a. av komplexiteten hos den konstruktion som grundläggningen avser, men även till stor del av geologin i området.

Schematiskt kan utredningen sägas bestå av fem huvuddelar, se fig. 1.1, där planering av fält- och laboratorieundersökningar och ett besök på platsen utgör en självklar första fas. Ofta görs redan då vissa överslagsberäkningar och bedömningar baserade på eventuell tidigare vunnna erfarenhet och kunskap om jordegenskaperna i området. Därefter följer fältundersökningarna, som syftar till att fastställa bl.a. jordlagerföljd, lagringstäthet och konsistens, djup till fast botten, porvatten/grundvattentryck, och i vissa fall hållfasthets-och/eller deformationsegenskaper.

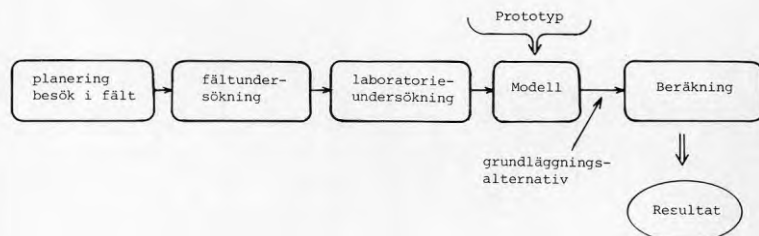


Fig. 1.1 Huvudelement ingående i en utredning.

I många fall görs även provtagning på olika djup, för att möjliggöra en tredje fas, omfattande en noggrannare klassificering av jorden och dess hållfasthets- och deformationsegenskaper.

Därmed bör tillräckligt underlag föreligga så att det aktuella området, kan förenklas till en vanligtvis tvådimensionell modell. I denna modell kan olika grundläggningsalternativ ingå, se fig. 1.2. Det är i detta skede oerhört viktigt att modellen så väl som möjligt beskriver verkligheten. Detta gäller inte minst hållfasthets- och deformationsparametrarna, som bör vara bestämda så att deformations- och brottvillkor så nära som möjligt efterliknar dem som är vid handen.

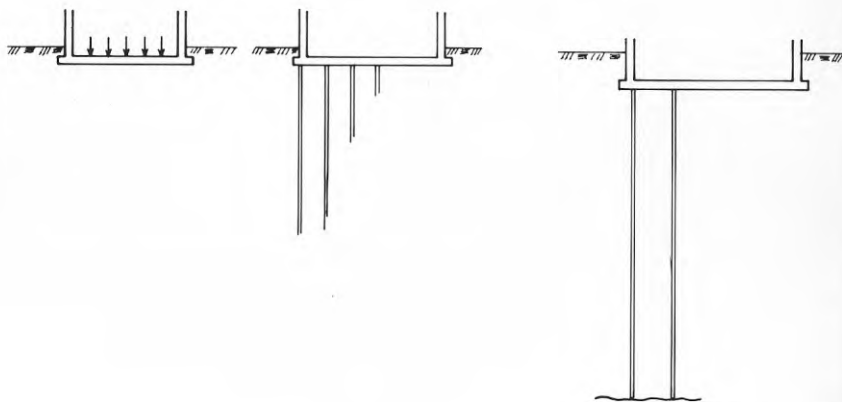


Fig. 1.2 Olika grundläggningsalternativ: Platta på mark, kohesionspålning och stödpålning.

Därefter tillämpas en beräkningsmodell omfattande spänningsberäkning och i förekommande fall deformationer. Beräkningarna ger underlag för bedömning av sä-

kerhetsfaktor, deformationer och sättningar för olika delar av den givna konstruktionen.

Under förutsättning att fältundersökningarna är representativa för hela jordvolymen och rätt tolkade

- * att proverna ej störts
- * att laboratorieförsöken utförts och tolkats korrekt
- * att den gjorda modellen väl beskriver verkligheten
- * att beräkningsmodellen beaktar alla väsentliga inverkanse faktorer på ett korrekt sätt

kan beräkningarna förväntas ge tillförlitliga resultat.

Det är angeläget att man som geotekniker i möjligaste mån följer upp gjorda geotekniska utredningar i syfte att få underlag för att förbättra prognosmetoden i sin helhet eller däri ingående delar. En viktig del är även att förbättra fält- och laboratoriemetoder för bestämning av jordarnas hållfasthets- och deformationsegenskaper, eftersom de i så hög grad påverkar beräkningsresultaten (jfr databeräkningar; resultaten är starkt beroende av de utgångsvärden som matas in). Med en ökad användning av in situ metoder kan jordars deformationsegenskaper troligen bättre utvärderas i framtiden.

En annan, med ovannämnda frågeställning sammanhängande svaghet är att geotekniker och kanske väg- och vattenbyggare i allmänhet enbart använder en deterministisk analys, dvs åsätter varje variabel ett enda värde. Det innebär att den naturliga spridningen hos de ingående variablerna inte beaktas. Det vore önskvärt med en viss kännedom om vilken spridning som kan förväntas hos resultatet. De beräknade värdena skulle då utgöra ett mycket bättre beslutsunderlag och riskerna med en viss design skulle därmed bättre kunna beräknas.

2. SYFTE OCH OMFATTNING

Detta forskningsprojekt behandlar sättningsanalys för leror och siltiga leror. Tonvikten är lagd på inverkan av, dels störning vid provtagning, dels störning vid hantering och montering av ödometerförsök. Projektet har haft två syften. Det ena syftet har varit att utreda hur stor spridning i resultaten från ödometerförsök som kan förväntas när provtagning sker rutinemässigt av olika geotekniska konsulter, i det fall själva ödometerförsöket utförs under nära nog identiska förhållanden. Det andra syftet har varit att utreda hur stor spridning i resultaten från ödometerförsök som kan förväntas när ödometerförsöken utförs rutinemässigt av olika geotekniska konsulter på nära nog identiska prover.

Det nödvändiga underlaget införskaffades genom att först infordra anbud på provtagning med kolvprovtagare i ett hål med provtagning varje meter ned till 8 m djup. Anbudsunderlaget lämnades ut till 10 geotekniska konsulter i Stockholmsregionen. 9 lämnade anbud och fick i uppdrag att ta de aktuella proverna. Konsulterna var ej medvetna om att de deltog i ett forskningsprojekt. Proverna transporterades försiktigt till SGI's laboratorium i Linköping. Under iakttagande av stor noggrannhet utfördes CRS-försök på samtliga prover, totalt ca 100 st.

I ett senare skede togs av ett enda bormanskap 9 proppar i samma område, också ner till 8 m djup. Dessa skickades ut till 6 geotekniska laboratorier i Stockholmsregionen, med en begäran att, mot tidigare uppgiven kostnad, utföra ett CRS-försök på varje prov. Ej heller dessa konsulter var då medvetna om att de deltog i detta forskningsprojekt.

På detta sätt insamlades det underlag som behövdes för att tillfredsställande utreda de uppställda frågorna.

I denna rapport behandlas först kortfattat de provtagnings- och laboriemetoder som använts samt vilka faktorer som menligt kan inverka på resultaten. Därefter redovisas resultaten från de bägge serierna av provtagningsproppar, åtföljda av en diskussion och statistisk bearbetning av resultaten.

I ett senare skede av projektet ombads ett antal konsulter att, baserade på egna laborierresultat, genomföra en sättningsberäkning för en uppfyllnad på det aktuella området.

Resultaten har sedan jämförts med den uppföljning av sättningsförloppet, som har pågått med hjälp av 12 st utplacerade markpeglar. Avläsningar har gjorts 1-2 gånger i månaden för att man skulle få en kontinuerlig sättningskurva.

3. FÄLT OCH LABORATORIEMETODER

3.1 Provtagning

I Sverige används vanligen kolvprovtagare St I, se fig. 3.1, men det förekommer även att St II används.

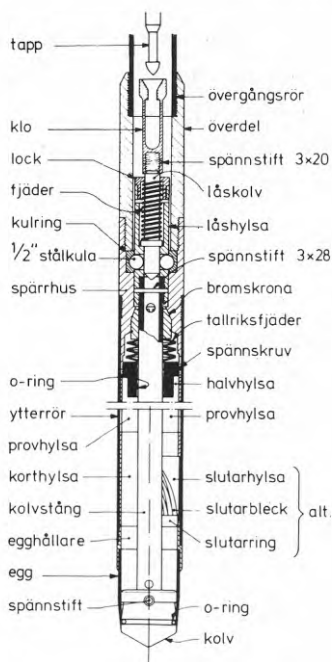


Fig. 3.1 Kolvprovtagare SGI.
Genomskärning av standardkolvborr StI.

Bägge provtagarna medför att ett 50 cm prov, uppdelat i 3 lika långa hylsor erhålls från varje provtagningsnivå. Provet i den övre hylsan är delvis stört till följd av kolvens neddrivning före utstansning av provet. Provet i undre delen av nedre hylsan är också delvis stört. Det minst störda provet återfinns således i mellanhylsan och nedre hylsans överdel. Kvaliteten på dessa prover kan dock variera högst avsevärt och nedan följer en genomgång av de faktorer som har störst betydelse.

Viktigast av allt är nog den tid som provtagningen tar. Den hastighet med vilken provtagaren drivs ned strax före provtagningen och framförallt hastigheten under själva utstansningen av provet är mycket avgörande för provets kvalitet, ju långsammare desto bättre prover. Efter utstansningen bör provtagaren lämnas ifred under en viss tidsperiod, ju sensitivare lera desto längre tid erfordras, så att vidhäftningen lera/hylsa utbildas. Upptagningen av provet måste sedan ske långsamt hela vägen, så att det undertryck som bildas under provtagaren blir så litet som möjligt.

Det är en självklarhet att provtagaren måste vara i mycket gott skick, så att t.ex. bromsanordningen på St I är tillräckligt hårt justerad, eggen ej deformerad etc. Slutarbleck bör i möjligaste mån undvikas helt.

Proverna skall sedan hanteras varsamt så att påverkan under transporten in till laboratoriet blir så liten som möjligt. Proverna får under inga omständigheter utsättas för temperaturer under 0° . Alltför höga temperaturer bör undvikas.

Provtagning är speciellt svår i skiktade jordar, när jordens fasthet avtar med ökande djup, samt när sensitiviteten är hög. I dessa fall kan en aldrig så noggrann provtagning ändå resultera i delvis störda prover. Detta bör man ha i åtanke vid tolkningen av resultaten och bedömningen av hela jordprofilens egenskaper.

3.2 Ödometerförsök, CRS

Sedan slutet av sjuttioalet har ödometerförsök, typ CRS, kommit att användas av allt fler geotekniska konsulter i Sverige. Den utrustning som vanligen används,

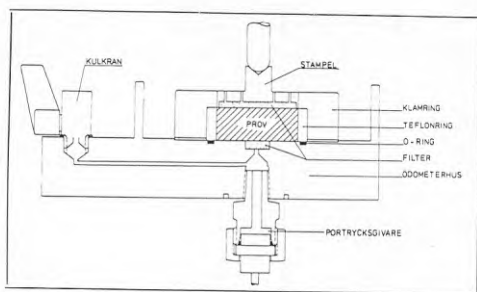


Fig. 3.2 Utrustning för ödometerförsök, typ CRS.

se fig. 3.2, består av ödometerring med portrycksmätare vid provets nedre, odränerade yta, monterad i en ödometerskål. Hela utrustningen placeras i en tryckpress och provet deformeras med konstant hastighet. Under försöket registreras med jämna mellanrum vertikalkraft, deformation och portryck. Därmed kan effektivspänningen (σ') och kompressionen (ϵ) beräknas, ekv. 1, och tillhörande ödometerkurva uppritas, se fig. 3.3.

$$\sigma' = \sigma - 2/3 \cdot u_b \quad (\text{ekv 1})$$

där u_b = portryck i botten av prov

Ur de under försöket insamlade mätvärdena kan även permeabiliteten (k), ekv. 2, konsolideringskoefficienten (c_v) ekv. 3 och kompressionsmodulen (M) ekv. 4, beräknas och exempel på detta visas i fig. 3.3.

$$k = d\epsilon/dt (g\rho_w H^2/2u_b) \quad (\text{ekv 2})$$

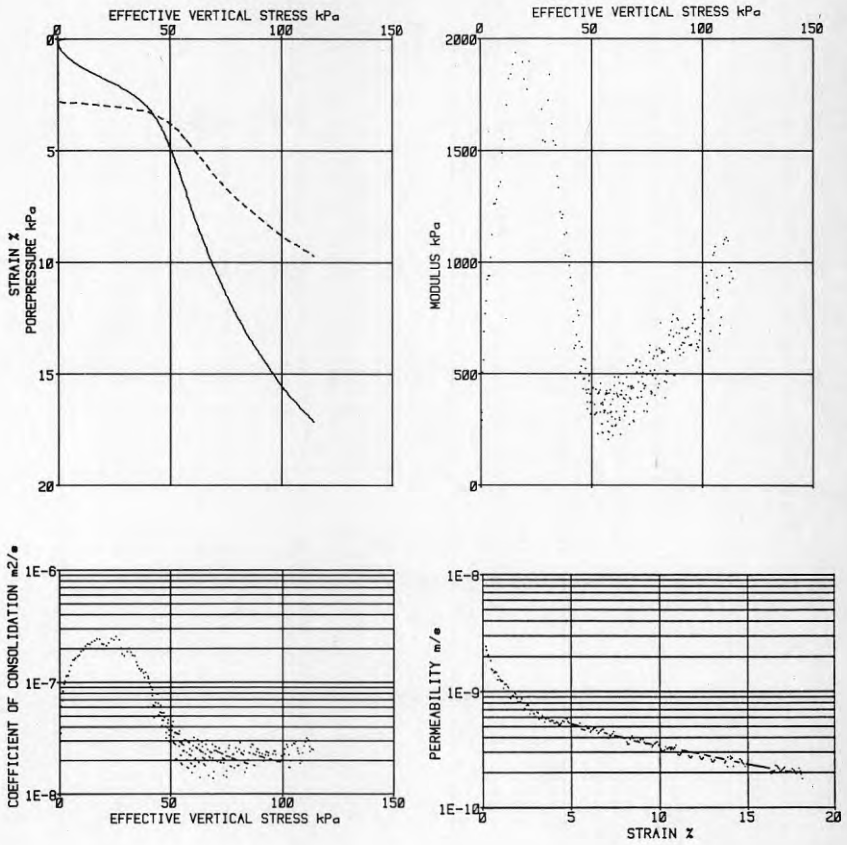


Fig. 3.3 Resultat från ödometerförsök, typ CRS.

$$c_v = k \cdot M / g \rho_w \quad (\text{ekv } 3)$$

$$M = d\sigma' / d\varepsilon \quad (\text{ekv } 4)$$

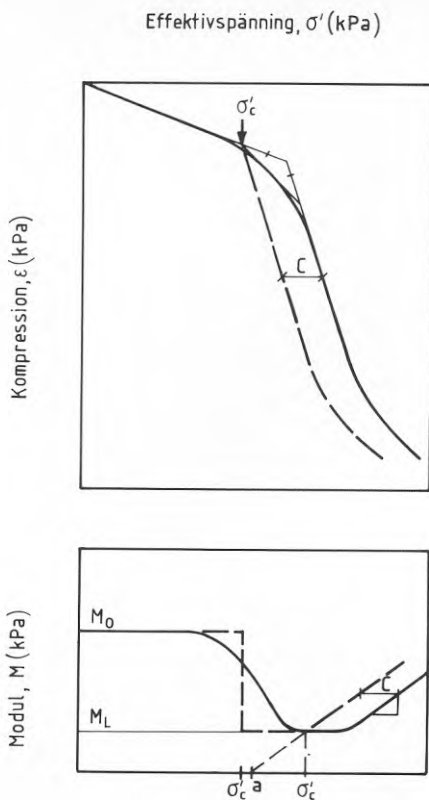


Fig. 3.4 Utvärdering av parametrar för sättningberäkning ur ett CRS-försök.

Ur σ' - ϵ kurvan utvärderas den kanske viktigaste parametern, förkonsolideringstrycket, se fig. 3.4. Övriga parametrar som används i en sättningberäkning är M_0 , M_L , M' och σ'_L . Även utvärderingen av dessa visas i fig. 3.4. För en noggrannare redogörelse av CRS-försöket och dess användning i sättningberäkning hänvisas till Larsson och Sällfors (1981), Larsson (1986) eller Sällfors, Andreasson (1986).

Den största potentiella felkällan ligger förmodligen i själva avläsningsutrustningen, som är elektronisk. Kalibreringen bör därför kontrolleras regelbundet. I övrigt är själva monteringen och val av prov mycket viktigt. Likaledes bör provet delas och granskas noga efter försökets genomförande och alla iakttagelser bör antecknas på protokollet.

4. UPPLÄGGNING AV FÖRSÖK

4.1 Områdets geologi och geotekniska egenskaper

Valet av provtagningsplats var mycket viktigt. Förutom att provtagningsplatsen skulle vara tillgänglig under en längre tidsperiod var önskemålet att de geotekniska egenskaperna skulle variera en hel del i djupled, samtidigt som variationerna i sidled skulle vara små. Totalt skulle ca 20 provtagningspunkter ingå i projektet.

Provtagningsområdet ligger i södra delen av Bålsta, vid Kalmarviken, som är en flik av Mälaren. Ca 1 km österut sträcker sig Stockholmsåsen i nord-sydlig riktning.

Jorden består överst av ca 9 m lera som överlagrar silt/sand och morän. Leran är intill ca 3 m djup postglacial med organiskt innehåll (gyttja). Torrskorpbildningen når ner till 1-2 m djup.

Den glaciala leran, som därefter följer, är relativt sensitiv med tydliga varv och med sommarskikt av gråbrun eller brunrå färg. De understa varven kan vara flera decimeter mäktiga. Högre upp i lagerföljden är varvens mäktighet högst några centimeter och överst högst en centimeter. Närheten till den stora isälvsavlagringen, Stockholmsåsen, gör att inslagen av silt- och sandskikt blir vanliga i de undre delarna av den glaciala leran och mot botten kan den också, som här, övergå i silt och sand.

Lerhalten avtar som regel från 60-70% i de övre delarna till ca 40-50% i de undre.

Den odränerade skjuvhållfastheten varierar mellan 10 och 20 kPa och vattenkvoten mellan 40 och 90 procent, se Fig. 4.1.

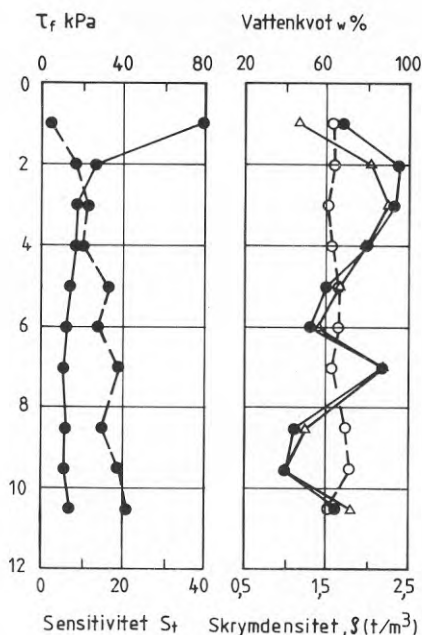


Fig. 4.1 Resultat från standardundersökning på leran från provtagningsplatsen.

4.2 Upphandling av provtagning

En skriftlig förfrågan med angivande av plats, provtagningspunkt och omfattning sändes ut till 10 företag i Stockholmsregionen. Nio företag lämnade anbud på provtagningen, ett hål med prover från nivåerna 1 till 8 m. Anbudssummorna varierade mellan 3500 och 5500 kr. Ett schema upprättades för att undvika att två borrlag stötte samman på provtagningsplatsen. Trots största försiktighet hade några grupper noterat, på grund av

spår från borrhandsvagn etc på platsen, att någon form av jämförande utvärdering pågick. I övrigt är det troligt att provtagningen skett rutinmässigt som vilket annat uppdrag som helst.

Proverna levererades till Skanska i Danderyd och där-
efter transporterades de till SGI i Linköping, där
ödometerförsöken utfördes.

4.3 Upphandling av ödometerförsök

I ett senare skede tog ett borrhanskap från Chalmers
Tekniska Högskola prover i ytterligare 9 hål inom
samma område.

Även nu togs prover ner till 8 m djup. Via en mellan-
hand skickades provserier till 6 olika geotekniska
laboratorier i Stockholmsregionen med en begäran om
ett CRS-försök på varje prov. Personalen på laborato-
rierna var då inte medvetna om att de deltog i ett
forskningsprojekt utan proverna undersöktes rutinmäs-
sigt.

5. RESULTAT AV ÖDOMETERFÖRSÖK

5.1 Flera provtagare - ett laboratorium

Ödometerförsöken utfördes under iakttagande av största försiktighet i SGIs CRS-utrustning och resultaten redovisas och diskuteras nedan nivå för nivå. I syfte att visuellt förenkla jämförelsen har förkonsolideringstrycket utvärderats och kurvorna justerats i höjddled så att samtliga försök ansetts ha samma deformation där förkonsolideringstrycket tolkats, se fig. 5.1. Det är kurvor motsvarande den heldragna kurvan i fig. 5.1 som sedan redovisas i fig. 5.2-5.7. Samtliga de parametrar som används i en sättningsberäkning har utvärderats och redovisas i tabellform.

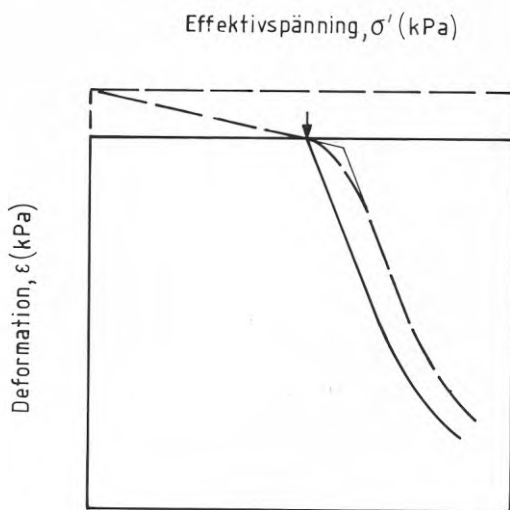


Fig. 5.1 Justering av CRS-kurva så att resultat från olika försök lättare kan jämföras.

Ödometerförsöken har i enlighet med SGIs praxis utförts på undertubens överdel. I många fall har prover körts om, dels då friktion i apparaturen befarats och dels för att se om ett bättre delprov kunde erhållas från en annan del av mellan- eller undertuben, då det första delprovet verkade stört.

5.1.1 Nivå 1 m

Jorden utgörs av grå siltig lera, som är rostfläckig och kan närmast betraktas som torrskorpelera. Vattenskivningen är 47% och den odränerade hållfastheten ca 80 kPa. Endast vid sex av tio provtagningar erhöles prover från nivå 1 m och resultaten från dessa redovisas i fig. 5.2 och tabell 5.2. Något förkonsolideringstryck kan inte utvärderas. Det är värt att notera den stora variationen i permeabilitet, som kan antas bero på den inhomogenitet som rottrådar, sprickor etc i torrskorpan kan ge upphov till. Det är inte ovanligt att, åtminstone under först delen av försöket, mycket höga värden på permeabiliteten kan erhållas.

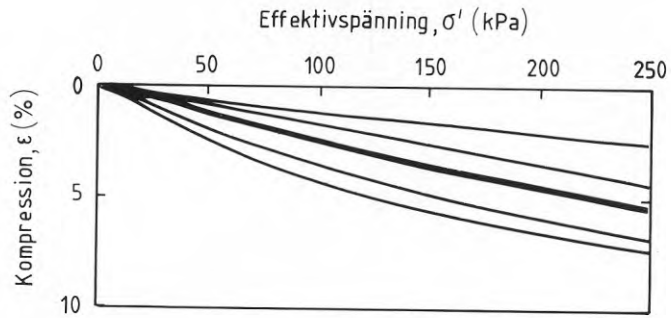


Fig. 5.2 Resultat från ödometerförsök utförda på prover från nivån 1 m.

Tabell 5.2 Sammanställning av resultat från försök från nivån 1 m.

ROD	σ'_c (kPa)	M_L (kPa)	σ'_L (kPa)	M'	A (kPa)	$k_i \cdot 10^{10}$ (m/s)	AMM
A							Inget prov
B	-	-	-	13,1	-175	20	
C	-	-	-	20,6	-380	50	
D	-	5700	250	11,2	-257	20	
E							
F	-	-	-	9,7	-330	3	
G	-	-	-	20	-75	-	
H	-	-	-	7,2	-521	2	
I							
J							
Medelvärde	\bar{X}			13,63	-289,6	19,0	
Standardavvikelse	S			5,52	157,2	19,0	
Variationskoefficient	V			0,40	-0,54	1,02	

5.1.2 Nivå 2 m

Även på denna nivå har leran torrskorpekaraktär, och utgörs av en grå postglacial lera med växtdelar (rostfläckig med roströr). Vattenkvoten är ca 82% och skjuvhållfastheten 27 kPa. Förkonsolideringstrycket har dock i de flesta fallen kunnat utvärderats. Resultatsammanställning återfinns i fig. 5.3 och tabell 5.3.

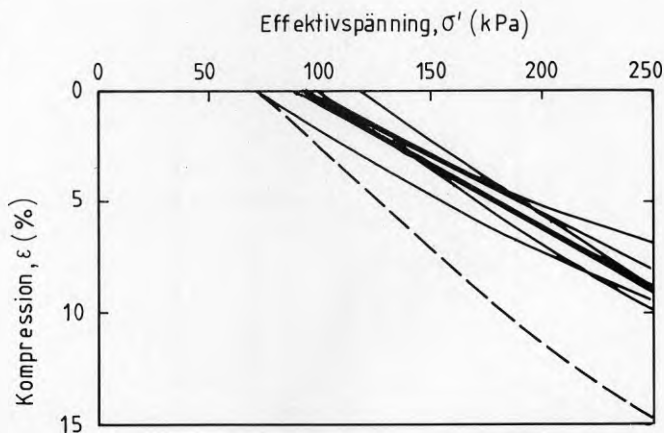


Fig. 5.3 Resultat från ödometerförsök utförda på prover från nivån 2 m.

KOD	σ'_c (kPa)	M_L (kPa)	σ'_L (kPa)	M'	A (kPa)	$k_i \cdot 10^{10}$ (m/s)	ANM
A	98	1850	249	8,7	36	7	
B	90	1890	300	9,1	92	8	
C	-	2110	162	9,1	-70	5	
D	-	1000	30	≈ 8,4	-79	4	
E	96	1725	203	6,4	-67	9	
F	99	1380	198	10	60	5	
G	88	2080	146	8,8	-90	~ 4	
H	72	1110	180	8,8	54	≈ 4	RT M
I	116	1480	266	9,6	112	4	
J	70	1630	122	6,9	-114	6	
Medelvärde	\bar{X}	93,86	1719,29	212,00	8,50	4,14	6,14
Standardavvikelse	S	13,89	243,83	64,24	1,35	92,53	1,95
Variationskoefficient	V	0,15	0,14	0,30	0,16	22,33	0,32

Tabell 5.3 Resultat från ödometerförsök utförda på prover från nivån 2 m.

5.1.3 Nivå 3 m

Jorden utgörs av grå postglacial lera i vissa fall sulfidfärgad, med enstaka tunna siltskikt, vassrör och/eller skalrester. Merparten av proverna var av god kvalitet, med undantag för A och F som var tydligt störda. Vattenkvoten var 90% och skjuvhållfastheten 19 kPa. Resultaten redovisas i fig. 5.4 och tabell 5.4. Värt att notera är den ringa spridning som permeabiliteten uppvisar.

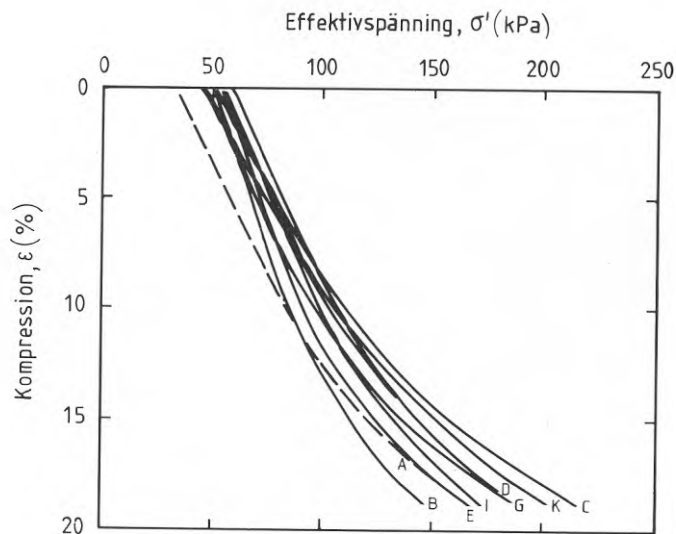


Fig. 5.4 Resultat från ödometerförsök utförda på prover från nivån 3 m.

ROD	σ_c' (kPa)	M_L (kPa)	σ_L' (kPa)	M'	A (kPa)	$k_i \cdot 10^{10}$ (m/s)	ANM
A	33	485	82	12,8	44	4	RT
B	50	335	76	11,1	46	4	
C	50	565	94	11,1	43	4	
D	47	445	80	12,8	45	4	
E	55	340	78	11,6	49	4	
F	18/39	490/580	76/90	11,4/10,1	33/33	4/3	U/M
G	54	450	88	10,9	47	2,4	φ M
H	(49)	435	95	12,3	60	3,2	
I	56	430	94	11,4	56	4	
J	46	580	93	10,2	36	5	
Medelvärde	\bar{X}	50,88	447,50	87,25	11,43	47,75	3,83
Standardavvikelse	S	3,72	89,48	8,01	0,82	7,48	0,75
Variationskoefficient	V	0,07	0,20	0,09	0,07	0,16	0,20

Tabell 5.4 Sammanställning av resultat från försök från nivån 3 m.

5.1.4 Nivå 4 m

Jorden på 4 m är relativt homogen och består av grå glacial lera med tunna siltskikt. Vattenkvoten är 78% och skjuvhållfastheten 18 kPa. Dock förekommer enstaka rothål, vilket med en gång märks på ödometerkurvan, i det att förkonsolideringstrycket då är klart högre. Resultatsammanställning återfinns i figur och tabell nedan.

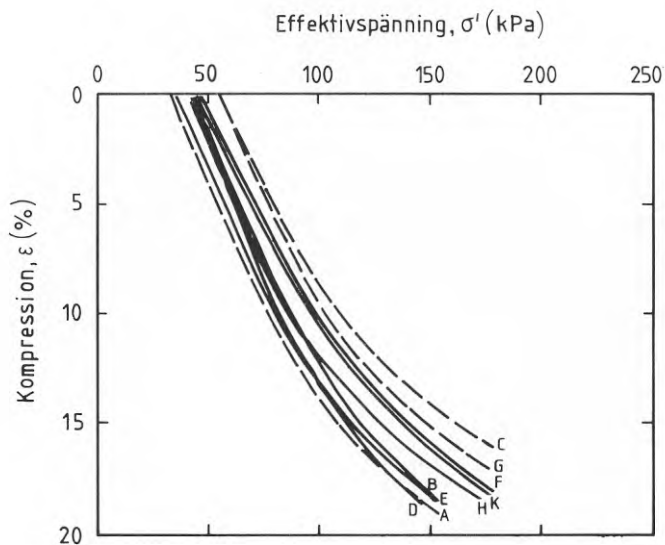


Fig. 5.5 Resultat från ödometerförsök utförda på prover från nivån 4 m.

KOD	σ'_C (kPa)	M_L (kPa)	σ'_L (kPa)	M'	A (kPa)	$k_i \cdot 10^{-10}$ (m/s)	ANM
A	33	425	68	10,3	27	4	RT
B	40	460	85	12,0	47	3,5	
C	53	535	92	13,0	51	3,5	
D	43	375	75	11,3	42	3	
E	35	435	69	10,5	28	3	
F	44	510	92	13,3	54	3	
G	54	475	92	13,3	56	5	RT
H	40	445	77	13,4	44	5	
I	29	470	71	12,2	32	5	
J	43	510	83	10,7	35	3,2	
Medelvärde	\bar{X} 40,8	457,50	81,25	12,10	43,63	3,75	
Standardavvikelse	S 3,3	50,14	10,31	1,26	11,02	0,85	
Variationskoefficient	V 0,08	0,09	0,13	0,10	0,25	0,23	

Tabell 5.5 Sammanställning av resultat från försök från nivån 4 m.

5.1.5 Nivå 6 m

Denna nivå, som verkar vara den mest homogena består av grå lera med finsandskikt och har en vattenkvot på 56%, medan skjuvhållfastheten är 13 kPa. Resultatsammanställning återfinns i fig. 5.6 och tabell 5.6.

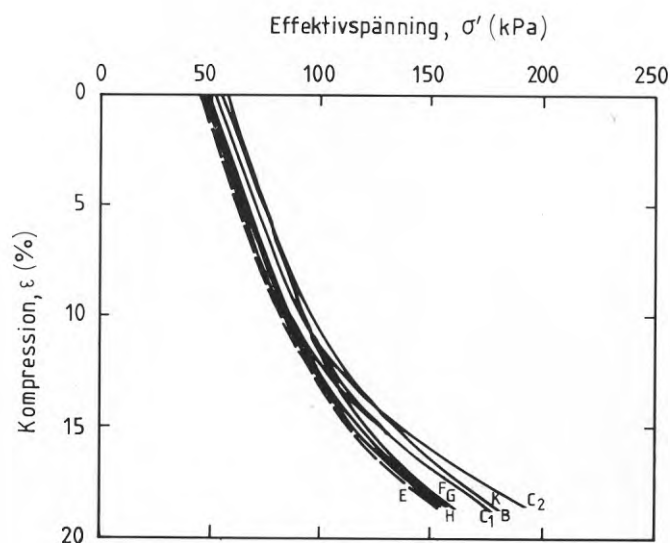


Fig. 5.6 Resultat från ödometerförsök utförda på prover från nivån 6 m.

KOD	σ_c^* (kPa)	M_L (kPa)	σ_L^* (kPa)	M^*	A (kPa)	$k_i \cdot 10^{10}$ (m/s)	AHM
A	35	320	58	12,6	33	7	
B	53	345	78	13,9	53	6	
C	53/49	315/320	71/71	14,8/14,2	50/48	4,2/7	
D	58	310	82	13,3	59	5	
E	52	335	82	14,0	58	5	
F	47	300	66	12,8	43	6	
G	41/45	320/330	66/69	13,6/12,7	42/43	6/5	U/M
H	51	335	78	13,7	54	4,5	M
I	40	410	72	14,1	43	6	
J	55	390	84	12,7	53	4,2	
Medelvärde	\bar{X}	51,44	331,11	75,67	13,57	51,22	5,21
Standardavvikelse	S	4,00	26,19	6,54	0,74	5,78	0,94
Variationskoefficient	V	0,08	0,08	0,09	0,05	0,11	0,18

Tabell 5.6 Sammanställning av resultat från försök från nivån 6 m.

5.1.6 Nivå 8 m

Denna nivå, som är betydligt svårare ur provtagnings-synpunkt, består av silt och finsandskiktad grå lera, vattenkvoten är 49% och hållfastheten 13 kPa. Endast fem prover kan anses ha givit representativa värden på förkonsolideringstrycket. Resultatsammanställning återfinns i figur och tabell nedan.

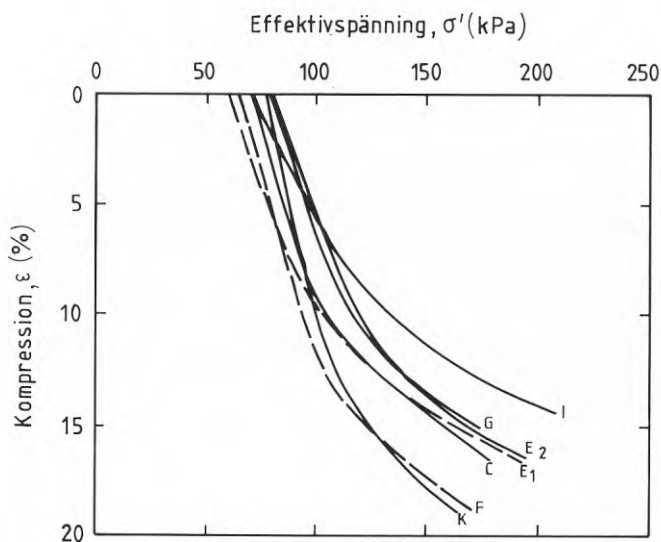


Fig. 5.7 Resultat från ödometerförsök utförda på prover från nivån 8 m.

KOD	σ'_C (kPa)	M_L (kPa)	σ'_L (kPa)	M'	A (kPa)	$k_1 \cdot 10^{-10}$ (m/s)	ANM
A							Prov på 8,5
B							Prov på 8,5
C	77	210	84	17,3	72	5	
D							Miss prov på 9 m
E	60/81	360/370	79/105	15,5/15,6	56/81	3,2/5	
F	52/65	380/293	77/89	15,9/15,4	53/70	5/4	U/M
G	57/79	325/325	74/94	17,7/15,6	56/73	4/5	U/M
H	18	50	18	15,0	15	5	Mkt stört
I	62/72	410/495	84/97	16,5/16,9	59/68	5/5	M U/M (M siltig)
J	70	305	97	13,8	75	4	
Medelvärde	\bar{x}	75,80	341,00	95,40	15,84	73,80	4,80
Standardavvikelse	S	4,66	104,01	7,57	1,37	4,76	0,45
Variationskoefficient	V	0,06	0,31	0,08	0,09	0,06	0,09

Tabell 5.7 Sammanställning av resultat från försök från nivån 8 m.

5.2 En provtagare - flera laboratorier

Resultaten redovisas enligt samma modell som i föregående kapitel. Den del av ödometerkurvan, som gäller för spänningar högre än förkonsolideringstrycket redovisas nivå för nivå. I tabellform visas sedan de utvärderade parametrarna för nivåerna 3, 4, 6 och 8 m tillsammans med beräknade medelvärden och standardavvikelser.

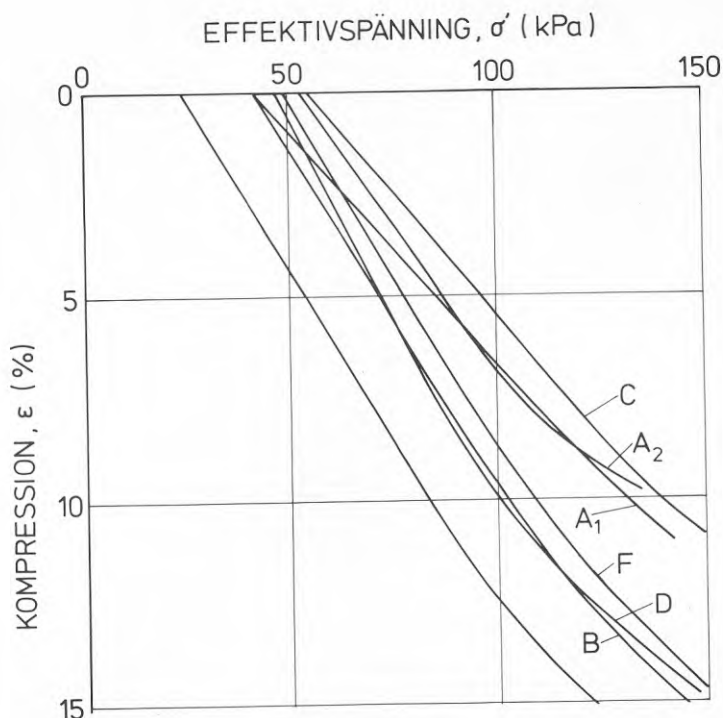


Fig. 5.8 Resultat från ödometerförsök utförda på prover från nivån 3 m.

KOD	σ'_c (kPa)	M_L (kPa)	σ'_L (kPa)	M'	A (kPa)	$k_i \cdot 10^{-10}$ (m/s)	ANM
A	45/53	650/600	106/84	11,1/19,1	47/41	6/5	
B	41	580	87	9,6	35	8	
C	54	694	113	7,8	21	14	
D	47	515	91	11,5	10	5,3	
E	(24)	(460)	(76)	(11,5)	(36)	(0,52)	
F	49	603	97	7,8	33	4,0	
G							
H							
I							
J							
Medelvärde	\bar{x} (48,33) 44,86	(607) 586	(151) 141	(10,32) 10,49	(31,17) 31,86	(7,05) 6,4	
Standardavvikelse	S (4,63) 10,12	(61) 79	(143) 134	(2,43) 2,26	(13,54) 12,5	(3,66) 4,37	
Variationskoefficient	V (10%) 23%	(10) 13	(95%) 95%	(24%) 22%	(43%) 39%	(52%) 68%	

Tabell 5.8 Sammanställning av resultat från försök från nivån 3 m.

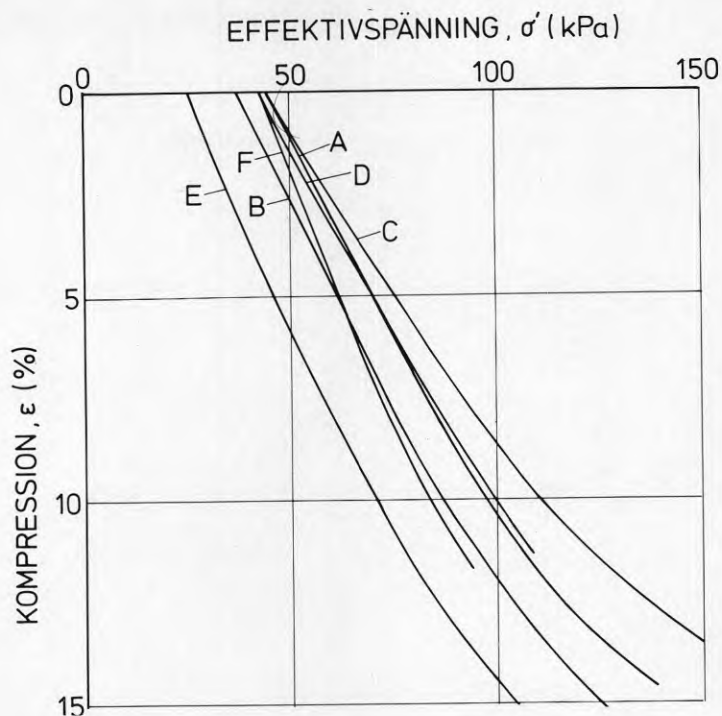


Fig. 5.9 Sammanställning av resultat från försök från nivån 4 m.

KOD	σ'_c (kPa)	M_L (kPa)	σ'_L (kPa)	M'	A (kPa)	$k_i \cdot 10^{-10}$ (m/s)	ANM
A	44	450	78	12,6	45	3,3	
B	37 (32)	489	77	11,2	28	6,3	
C	45	313	59	7,6	19	23	
D	42	565	92	9,1	0	4,2	
E	(25)	(570)	(87)	(10,0)	(29)		valt 8
F							
G							
H							
I							
J							
Medelvärde	\bar{x} (42) 39,17	(446,4) 467	(74,6) 76,76	(10,40) 10,33	(24,6) 25,33	(8,32) 8,27	
Standardavvikelse	S (3,08) 7,47	(93,11) 97,37	(12,46) 12,24	(2,01) 1,81	(16,62) 14,98	(8,28) 7,41	
Variationskoefficient	V (7%) 19%	(21%) 21%	(17%) 16%	(19%) 18%	(68%) 59%	(100%) 90%	

Tabell 5.9 Sammanställning av resultat från försök från nivån 4 m.

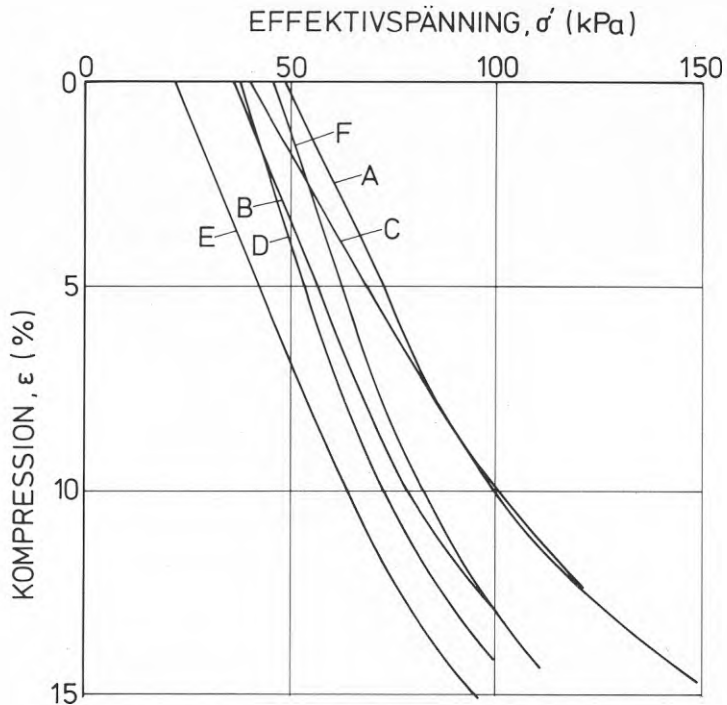


Fig. 5.10 Sammanställning av resultat från försök från nivån 6 m.

KOD	σ'_C (kPa)	M_L (kPa)	σ'_L (kPa)	M'	A (kPa)	$k_i \cdot 10^{-10}$ (m/s)	ANM
A	48	375	72	17	51	5	
B	36 (32)	426	62	12,1	36	10 ^{0,96}	
C	40	486	86	11,5	37	14	
D	38	440	77	13,7	31	7,2	
E	(22)	(415)	(64)	(11,7)	(28)	(0,8)	
F	45	350	64	9,4	27	7,4	
G							
H							
I							
J							
Medelvärde	\bar{x} (41,40) 38,17	(415) 415	(72,2) 70,83	(12,74) 12,57	(36,4) 35,0	(8,72) 7,4	
Standardavvikelse	S (4,98) 9,09	(53,88) 48,19	(9,81) 9,39	(2,84) 2,57	(9,10) 8,83	(3,44) 4,46	
Variationskoefficient	V (12%) 24%	(13%) 12%	(14%) 13%	(22%) 20%	(25%) 25%	(39%) 60%	

Tabell 5.10 Sammanställning av resultat från försök från nivån 6 m.

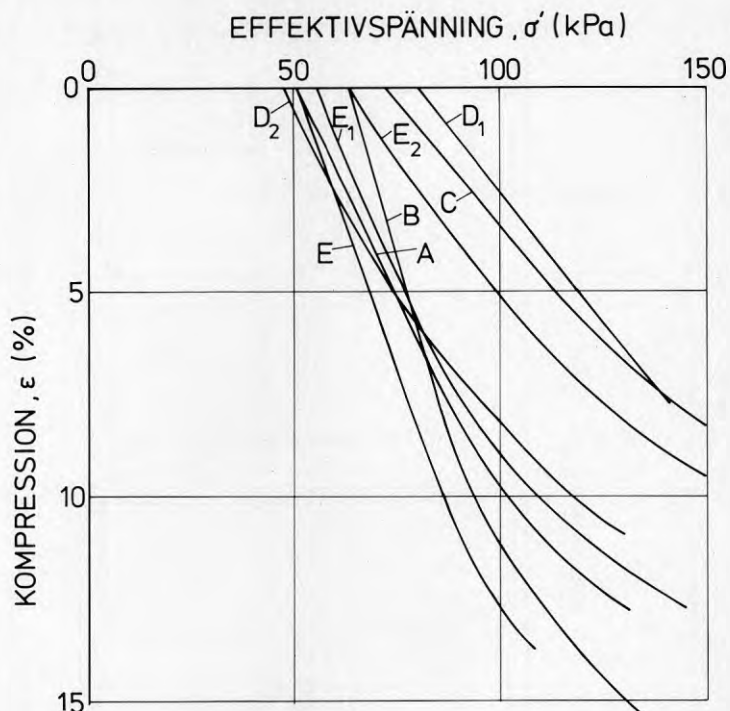


Fig. 5.11 Sammanställning av resultat från försök från nivån 8 m.

KOD	$\sigma'_{c'}$ (kPa)	M_L (kPa)	$\sigma'_{L'}$ (kPa)	M'	A (kPa)	$k_i \cdot 10^{-10}$ (m/s)	ANM
A	51	400	76	18,4	55	5	
B	64	255	76	15	59	6,3	
C	72	694	130	10,1	76	13	
D	47/80	525/780	68/152	15,7/19,5	20/102	6,5/9,1	
E	51	350	81	19,4	57	1,8	
F	55/64	450/760	80/89	16/13	53/30	7,5/6,8	
G							
H							
I							
J							
Medelvärde	\bar{x}	60,5	526,75	94,0	15,89	56,5	7,0
Standardavvikelse	S	11,5	197,69	30,18	3,26	25,37	3,22
Variationskoefficient	V	19%	38%	32%	21%	45%	46%

Tabell 5.11 Sammanställning av resultat från försök från nivån 8 m.

6. PROVTAGNINGENS INVERKAN PÅ ÖDOMETERRESULTATEN

6.1 Sammanställning av resultat

Samtliga utvärderade förkonsolideringstryck redovisas i fig. 6.1. De ofyllda cirklarna representerar värden som alltför kraftigt avviker från vad som kan anses vara det rätta värdet. Tillhörande värden på M_L ges i fig. 6.2.

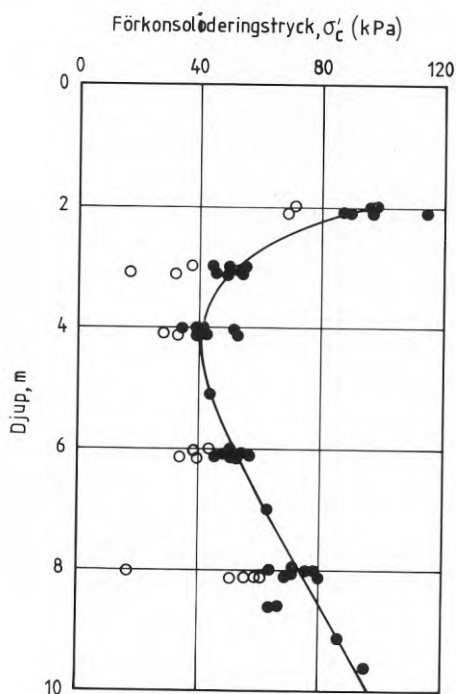


Fig. 6.1 Sammanställning av utvärderade förkonsolideringstryck.

6.2 Kommentarer till erhållna resultat

Den valda jordprofilen hade en lagerföljd som medförde en del problem vid provtagningen och får allmänt betraktas som ganska besvärlig ur provtagningssynpunkt.

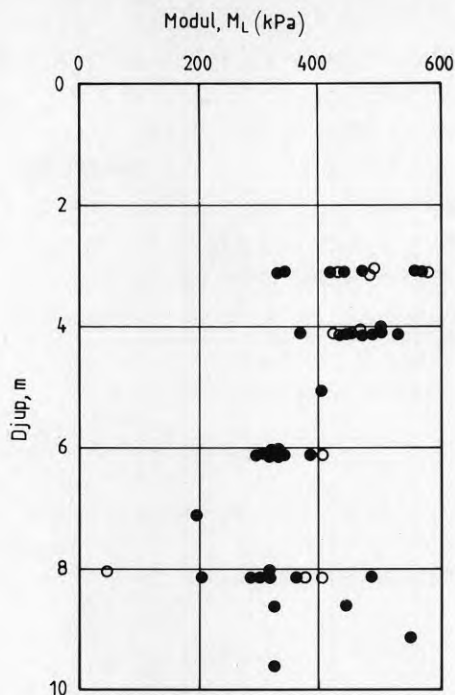


Fig. 6.2 Sammanställning av utvärderade värden på M_L .

En mycket fast torrskorpa som överlagrar en lös lera medför alltid problem att få ostörda prover närmast under torrskorpan. Det blev inte lättare genom att prover beställdes från nivåerna 1 och 2 m som var av klar torrskorpekaraktär. Helst skulle man förborrat till närmare 3 m.

Rottrådar förekommer också till och med 4 m nivån och förkonsolideringstrycken varierar beroende på var proven tagits i förhållande till dessa.

Den mest homogena leran påträffas mellan 5 och 7 m. Därunder är siltskikten markerade. Kvaliteten på proverna från 8 m nivån varierade kraftigt också inom

samma provtub beroende på om man hittade ett "lerigare" parti eller ej. Modul och modultal varierar också ganska mycket beroende på silthalten i ödometerproverna.

Sammantaget får man en god uppfattning om förkonsolideringstryckets variation med djupet, även om en förhållandevis stor andel av proverna ger värden som ej kan anses representativa för jordprofilen (markerade med ringar), se fig. 6.1 där samtliga förkonsolideringstryck visas som funktion av djupet. Den heldragna linjen representerar den mest sannolika variationen av förkonsolideringstrycket. I appendix A visas resultaten från de olika provtagningarna var för sig, tillsammans med den heldragna linjen från fig. 6.1.

En kritisk granskning av figurerna i appendix A ger vid handen att ungefär hälften av provtagningarna skulle gett resultat som påtagligt avvikit från det "rätta". En del av förklaringen kan vara att, trots att jordprofilen endast är 8 m kan det valda antalet prover vara i minsta laget.

I den sammanställning av variationen av M_L med djupet, som visas i fig. 6.2, är spridningen större, vilket är naturligt då jorden är skiktad. En större andel silt medför omedelbart en påtaglig ökning av modulen.

Normalt bör man undvika slutare, om ostörda prover önskas, eftersom slutaren stör proverna i viss mån. Det framgår av fig. 6.3, där de fyllda cirklarna avser förkonsolideringstryck bestämda på prover tagna utan slutare och ringarna avser prover tagna med slutare.

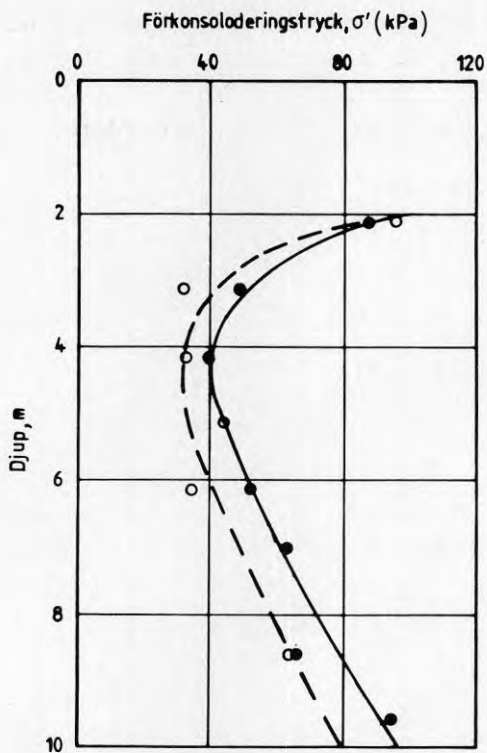


Fig. 6.3 Förkonsolideringstryck utvärderade från prover tagna utan slutare (fyllda cirklar) respektive med slutare (ofyllda cirklar).

7. LABORATORIEHANTERINGENS INVERKAN PÅ ÖDOMETERRE-SULTATEN

7.1 Sammanställning av resultat

En sammanställning av de förkonsolideringstryck som de olika geotekniska laboratorierna genomfört visas i fig. 7.1. I figuren har även medtagits den streckade linjen som erhöles vid provtagning med slutarbleck.

I fig. 7.2 redovisas modulens (M_L) variation med djupet, och det framgår vid en jämförelse mellan tabellerna i kap 5 att variationen i M_L är av samma storleksordning.

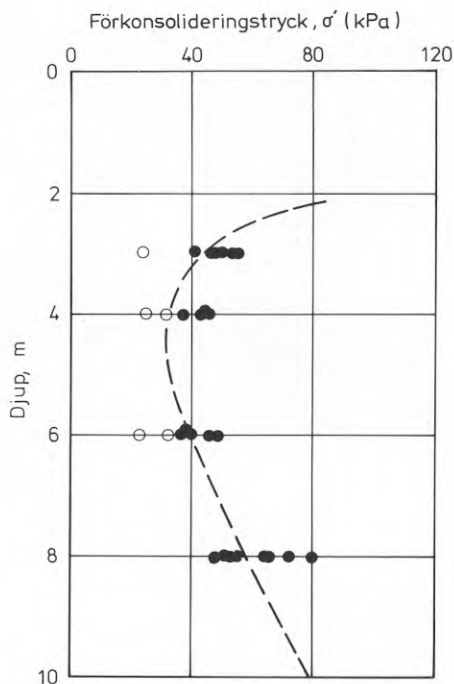


Fig. 7.1 Sammanställning av utvärderade förkonsolideringstryck.

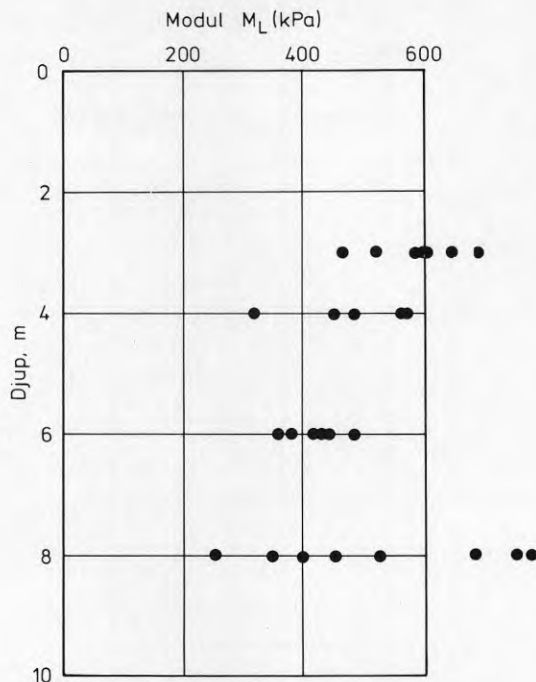


Fig. 7.2 Sammanställning av utvärderade värden på M_L .

7.2 Kommentarer till erhållna resultat

Samtliga laboratorier utom ett, har erhållit värden som ligger rimligt i förhållande till det förväntade värdet på förkonsolideringstrycket på respektive nivå. Möjligen kan ytterligare ett laboratorium anses ha värden som är något låga. Laboratoriet med de extremt låga värdena har p.g.a. sin stora avvikelse undantagits då spridningsmåttan beräknats.

Variationskoefficienterna är av samma storleksordning som erhöles då provtagningens inverkan på ödometerresultaten studerades.

8. SÄTTNINGSBERÄKNINGAR UTFÖRDA AV KONSULTER PÅ EGNA RESULTAT

Huvudsyftet med denna utredning har varit att studera hur tillförlitligheten är vid provtagning och laboratoriehantering av prover från lösa leror.

Ett annat viktigt moment är hur utvärdering och tolkning av laboratorieresultaten utförs. Vid CRS-försöken används vanligen den metod för sättningsberäkning som föreslogs av Larsson och Sällfors (1981).

Metoden är enkel att använda och ger ett mått på initiella (elastiska) sättningar och primära konsolideringssättningar.

Vid leror med organisk halt eller hög plasticitet har det visat sig att de sekundära sättningarna inte kan försummas.

De sättningar, som beror på horisontella rörelser kan i vissa fall bli stora, som påpekats av Hansbo (1960, 1973) och Holtz och Lindskög (1972). Dessa deformationer ökar med den organiska halten och lerans plasticitet. De blir också större ju lägre säkerhetsfaktorn är. Normalt beräknas dock varken sekundära sättningar eller horisontalrörelser.

När vi sålunda bad de konsultföretag, som i det andra steget hade utfört CRS-försöken, att på egna resultat göra en sättningsuppskattning för provfälten i Bålsta var det endast SGI som beaktade krypning.

På en A3 ritning angavs jordprofil och effektivspänningen baserad på en linjär portrycksfördelning mot djupet. Vidare angavs belastningens och belastningsytans storlek, Appendix C.

En beräkning av totalsättning samt sättningarnas tidsförlopp efterfrågades för en punkt i fyllningens mitt

och en i randen.

Svar erhöills från 6 företag och en sammanställning av dessa resultat visas i Fig. 8.1, för de bägge lastfallen.

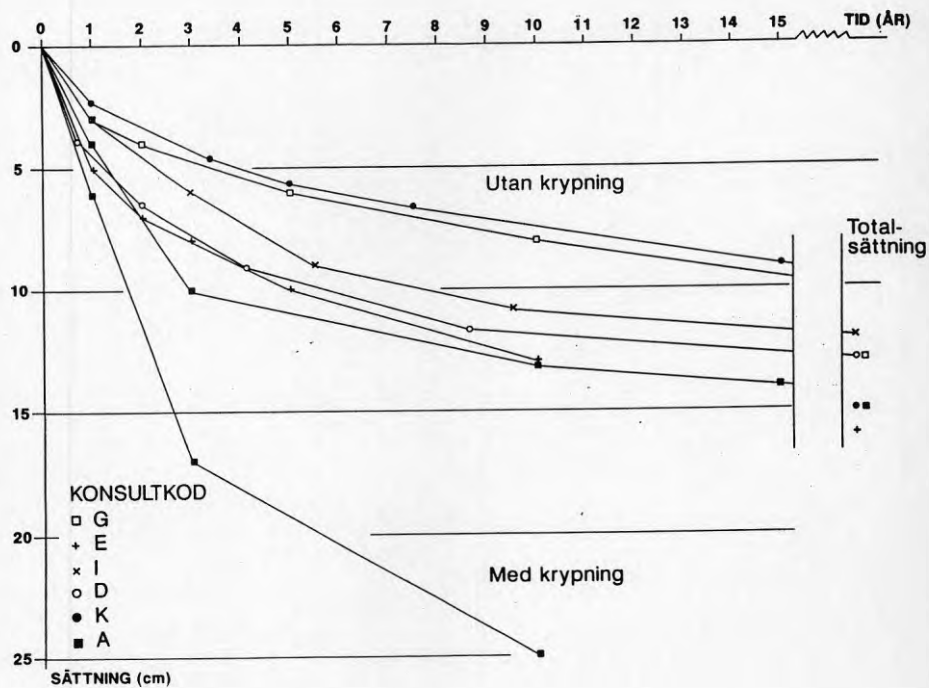


Fig. 8.1a Resultat av sättningsberäkningar utförda av konsulter. Fall 1: Belastningsyta $25 \times 40 \text{ m}^2$, $q = 15 \text{ kPa}$. Beräkningarna avser fyllningens mittpunkt.

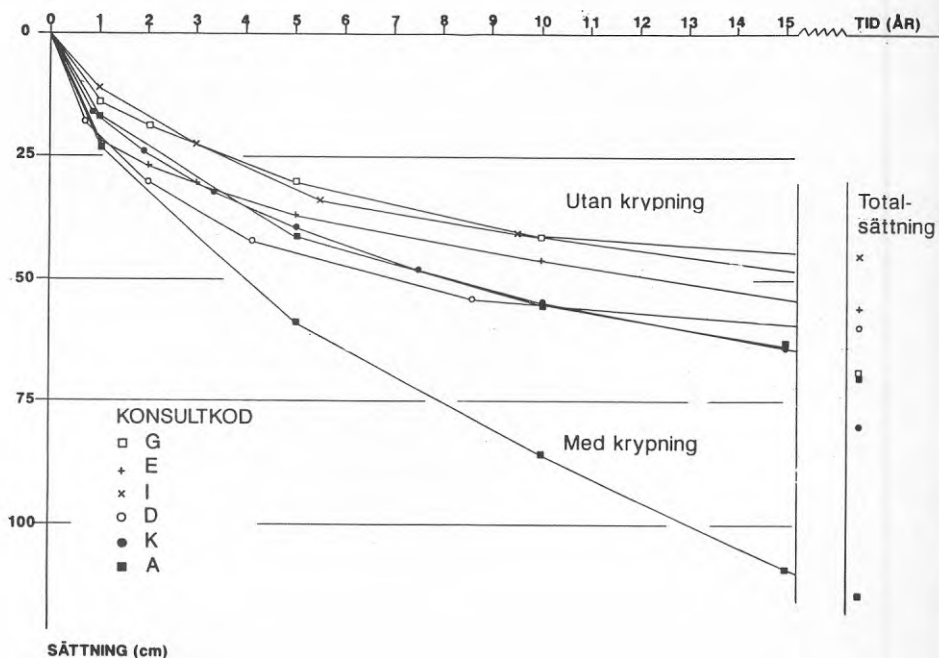


Fig. 8.1b Resultat av sättningsberäkningar utförda av konsulter. Fall 2: Belastningsyta $25 \times 40 \text{ m}^2$, $q = 50 \text{ kPa}$. Beräkningarna avser fyllningens mittpunkt.

Något förenklat har medelvärde och standardavvikelse för de beräknade sättningarna beräknats, och redovisas i Tabell 8.1. Det framgår där att spridningen som regel är störst i början av sättningsförloppet men minskar efter hand. För den beräknade slutsättningen är variationscoefficienten 10 à 20%.

Tabell 8.1 Medelvärde och standardavvikelse för de beräknade sättningarna (cm)

		1 år	5 år	10 år	Slutsättning
q=15kPa	\bar{x}	3.9	8.5	10.8	14.1
	s	1.1	2.3	2.5	1.6
	v	0.28	0.27	0.23	0.11
q=60kPa	\bar{x}	16.3	37.5	49.2	64
	s	3.8	5.7	7.1	12.5
	v	0.23	0.15	0.14	0.20

9. STATISTISK BEARBETNING

I tabell 5.1-5.11 redovisades förutom de ur ödometerförsöket utvärderade parametrarna även parametrarnas medelvärde (\bar{x}) och standardavvikelse (S). Även variationskoefficienten (V) angavs. Variationskoefficienten beräknas som standardavvikelsen dividerad med medelvärdet. Tidigare undersökningar (Harr, 1983) har visat att just variationskoefficienten är mycket användbar. Förhållandet mellan standardavvikelse och medelvärde tycks för en viss parameter vara relativt konstant för en viss typ av jord. Det innebär att om variationskoefficienten är känd och medelvärdet av parametrarna skattas från ett relativt fåtal provningar, kan därmed standardavvikelsen uppskattas. Utifrån ett fåtal provningar kan således en ganska god uppfattning om medelvärde och spridning erhållas. Därmed är det också möjligt att göra vissa bedömningar av sannolikheten för att ett beräknat värde på exempelvis sättning eller säkerhetsfaktorn skall över- eller underskridas.

Variationskoefficienten anges ofta i procent och en sammanställning av de beräknade variationskoefficienterna för de olika parametrarna visas i tabell 9.1 och 9.2.

Tabell 9.1 Variationskoefficienter (%), för värden erhållna vid undersökningen av provtagningens inverkan.

	$V_{\sigma'_C}$	V_{M_L}	$V_{\sigma'_L}$	$V_{M'}$	V_k
1m					100
2m	15	14	30	16	32
3m	7	20	9	7	20
4m	8	9	13	10	23
6m	8	8	9	5	18
8m	6	31	8	8	9

Tabell 9.2 Variationskoefficienter (%), för värden erhållna vid undersökningen av laboratoriehanteringens inverkan.

	$V_{\sigma'_C}$	V_{M_L}	$V_{\sigma'_L}$	$V_{M'}$	V_k
3m	10	10	95	22	52
4m	7	21	16	18	90
6m	12	12	13	20	60
8m	19	38	32	21	46

Man kan ur tabell 9.1 och 9.2 dra slutsatsen att variationskoefficienten för förkonsolideringstrycket är 7-10% om man är kritisk och sorterar bort tveksamma resultat. Om alla erhållna värden används okritiskt blir variationskoefficienten större, cirka 15%. Beträffande M_L kan variationskoefficienten anses vara ca 10% för relativt homogen lera medan 20% är troligare för en kraftigt skiktad lera och för lera av torrskorpekaraktär.

Av tabell 9.1 och 9.2 framgår att överlag erhöles något högre variationskoefficienter för den del av undersökningen som avsåg laboratoriehanteringens inverkan. Då bör man dock komma ihåg att de värden som redovisas i tabell 9.1 erhöles efter det att "dåliga" prover sorterats bort, då de bedömts som störda. Om samtliga resultat från de ödometerförsök som gjorts på prover tagna av olika konsulter medtagits hade variationskoefficienterna i tabell 9.1 varit klart högre än de i tabell 9.2.

Rimliga värden på variationskoefficienten för övriga parametrar är 10 till 15% för σ'_L och 5 till 15% för M' med ännu högre värden för skiktade leror.

Variationskoefficienten för k är för tabell 9.1 ca 20%, vilket kan betraktas som ett lågt värde. I tabell 9.2 ligger motsvarande värden i intervallet 46-90%! Permeabiliteten påverkas inte nämnvärt av en viss grad av störning av ett vattenmättat prov och de höga värdena på variationskoefficienten måste tillskrivas brister i utrustningen. Det vanligaste felet torde vara fel 0-värde och/eller kalibreringsfel. I viss mån kan slitage av ödometerring leda till läckage.

Eftersom konsolideringskoefficienten $c_v = k \cdot M_g \rho_w$ kan dess variationskoefficient beräknas till drygt 20% vilket får betraktas som en mycket liten spridning i det fall värdena i tabell 9.1 används. Frågan kvarstår dock hur pass representativt det värdet är för en större jordvolym. Makrostrukturens inverkan är många gånger mycket betydelsefull.

10. SÄTTNINGSUPPFÖLJNING AV PROVFÄLTET I BÅLSTA

Uppfyllningen av provfältet i Bålsta utfördes under cirka två veckor i april 1985. I ett första steg uppfylldes markytan till en nivå, som skulle motsvara en framtida industriplan. Fyllningshöjden var cirka 1,3 m, Fig. 10.1.

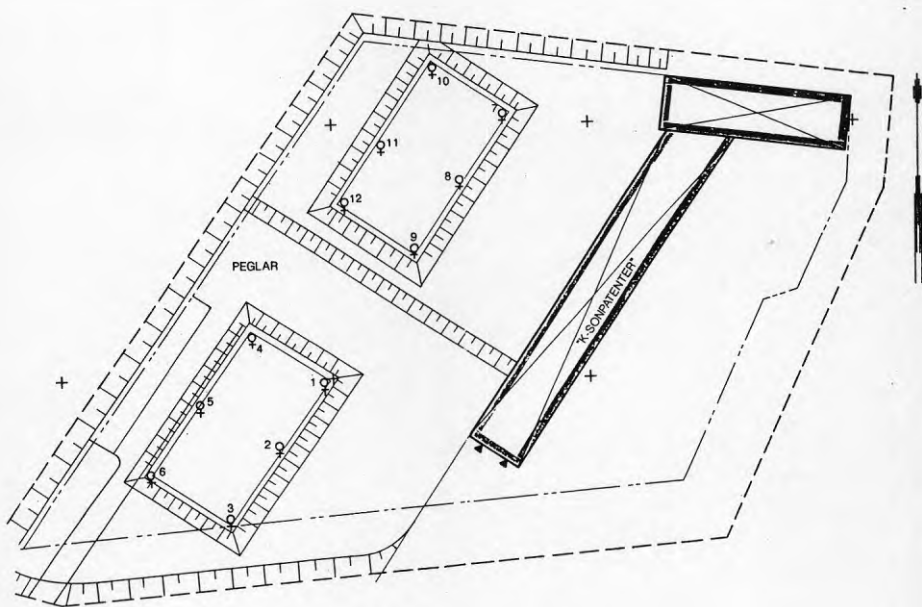


Fig. 10.1 Provfältet i Bålsta.

På mindre ytor utlades därefter ytterligare fyllning så att totala fyllningshöjden på dessa ytor blev cirka 3 m.

Tanken med uppfyllningen är att förbelasta leran dels för en industriplan dels för framtida byggnader. Fyllningsmassorna bestod av sprängsten.

I maj 1985 påbörjades avvägningen av de sammanlagt 12 markpeglarna, som var placerade med sina plattor på markytan under fyllningen. Resultatet av sättningsuppföljningen framgår av Fig. 10.2 och 10.3.

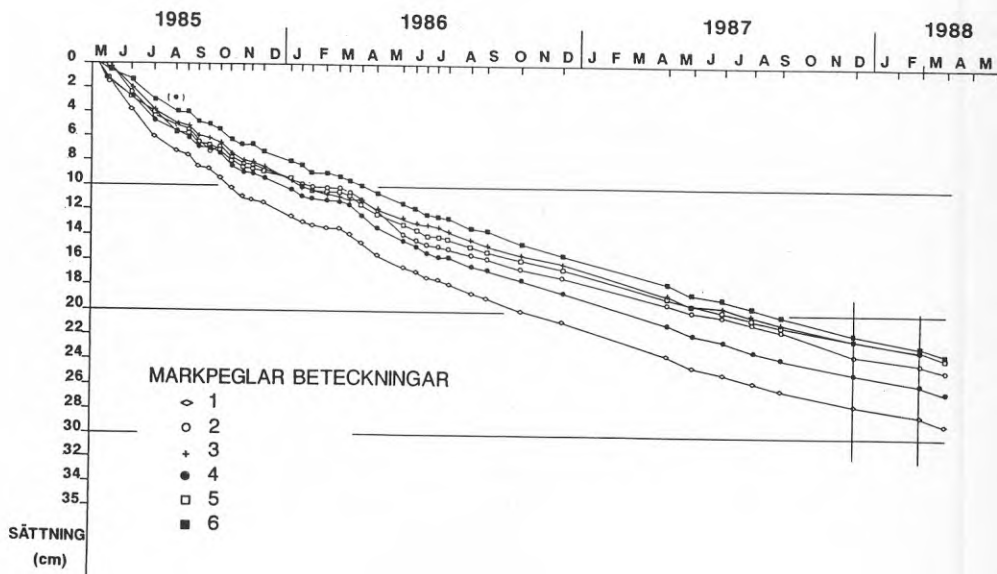


Fig. 10.2 Diagram som visar sättningsförloppet för peglarna 1-6 vid provfältet i Bålsta.

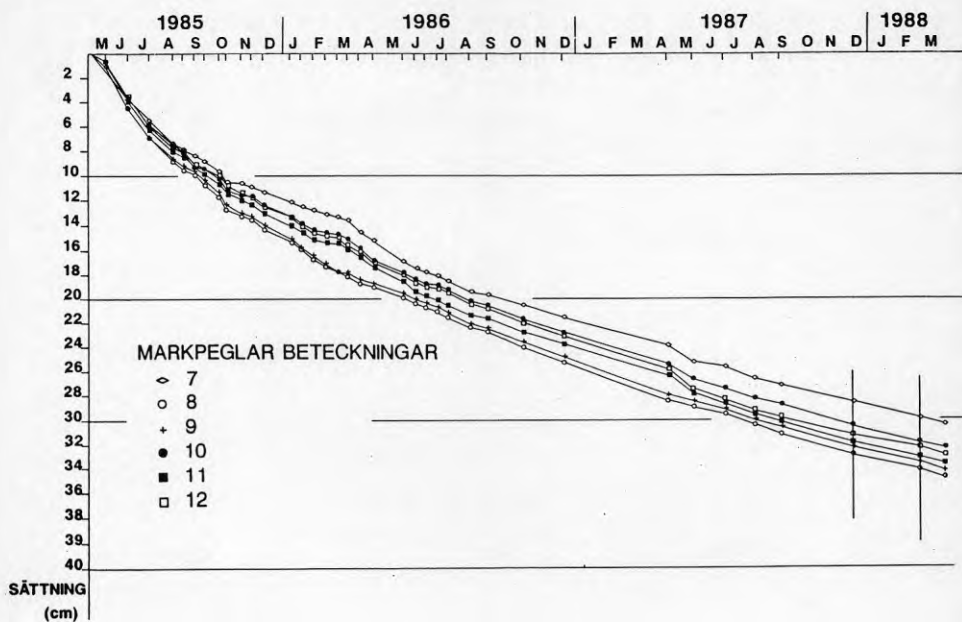


Fig. 10.3 Diagram som visar sättningsförloppet för peglarna 7-12 vid profältet i Bålsta.

11. SÄTTNINGSBERÄKNING FÖR PROVFÄLTET I BÅLSTA

11.1 Allmänt

För beräkning av sättningar vid spänningsändringar i jord krävs kännedom om hur jordens deformationsegenskaper och dräneringsförhållanden varierar i djupled. För beräkningen krävs dessutom kännedom om det spänningstillstånd som rådde före spänningsändringen; det vill säga jordens egenvikt, eventuella laster samt rådande porvattentryck.

Spänningsändringen på olika djup orsakad av en ytlast med begränsad utbredning beräknas som regel med hjälp av elasticitetsteori. Man kan då beakta inverkan av faktorer som påverkar lastspridningen t.ex. torrskorpa och begränsat djup till fast botten.

Sättningarnas förlopp bestäms i finkorniga jordar bl.a. av dräneringsvägarna. Förekomsten av dränerande skikt, fria dräneringsytor, två- eller tredimensionell vattenströmning och eventuella vidtagna dränerande åtgärder typ vertikaldränering måste således vara kända. Sättningsförloppet inom den lågpermeabla jorden bestäms sedan av dess permeabilitet, kompressionsmodul och krypegenskaper.

För att sättningar som beror på konsolidering, skall kunna uppstå i ett vattenmättat material, fordras att motsvarande vattenmängd avgår. I finkorniga material är detta en mycket långsam process som styrs av det porvattenövertryck och tillhörande gradient som skapas vid spänningsökningen samt jordens permeabilitet och kompressionsmodul.

Konsolideringsekvationen för endimensionell konsolidering med porvattenströmning endast i vertikalled brukar skrivas enl. ekvation 11.1.

$$\frac{\delta u}{\delta t} = \frac{M}{g\rho_w} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (11.1)$$

Denna ekvation förutsätter att såväl kompressionsmodul som permeabilitet är konstant med djupet, åtminstone under den tidsperiod som beräkningarna avser. Jordens kompressionsegenskaper är dock starkt tidsberoende och under varje tidsperiod sker ofta en i sammanhanget ej försumbar krypning. För att krypdeformationer skall kunna uppstå krävs, liksom för all annan volymminskning, motsvarande vattenutpressning. Konsolideringsekvationen för endimensionell konsolidering med beaktande av krypning kan därför skrivas enl ekvation 11.2.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{M}{g\rho_w} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial u_{ct}}{\partial t} \quad (11.2)$$

$\delta u_{ct}/\delta t$ är det extra porövertryck som skapas på grund av de krypeffekter som uppstår under det aktuella tidssteget. Det kan beräknas med kännedom om jordens krypegenskaper, vanligen angivna som en koefficient för sekundär konsolidering.

Då jordens egenskaper liksom spänningstillstånd och spänningsökning varierar med djupet delas jorden som regel in i flera skikt. Såväl kompressionsmodul, permeabilitet, krypegenskaper som den yttre lasten ändras påtagligt under sättningsförloppet då sättningarna i sig är stora. Sättningsberäkningarna utförs därför ofta i begränsade tidssteg. Härvid beaktas kontinuitetsvillkoret att vattenströmningen på ömse sidor om en skiktgräns måste vara lika. Efter varje tidssteg beräknas hur kompressionsmodul, permeabilitet och krypegenskaper i de olika skikten samt den yttre lasten förändrats varpå beräkningarna för nästa tidssteg utförs under dessa nya förutsättningar. Detta kan göras grafiskt men utförs med fördel i dator med hjälp av program baserade på finita differenser.

Då belastningsytan är liten i förhållande till det kompressibla lagrets tjocklek eller då vertikala dräner installerats måste den horisontella vattenströmningen beaktas. I icke vattenmättad jord tillkommer inverkan av gasblåsornas kompression och senare expansion vilket också kan beaktas.

11.2 Kommentarer till sättningsuppföljningen i Bålsta

Sprängstensfyllning på tomten i Bålsta utlades 1985, se föregående kapitel. Peglar för sättningsobservationer installerades vid belastningsytornas hörnpunkter innanför krönkanten och ungeför mitt på belastningskrönens långsidor.

Ur jämförelsesynpunkt är peglarnas placering något olycklig då de är placerade där lastspridningseffekterna är som störst och den exakta placeringen är av betydelse. Vidare är inte förbelastningen så regelbunden som antyds i figuren utan fyllningarnas form och tjocklek varierar i verkligheten något mer. Detta avspeglas i mätresulteten som uppvisar en påtaglig spridning, speciellt mellan de två fyllningarna, och också på så vis att en del hörnpunkter har erhållit större sättning än mittpunkterna.

Föreliggande projekt var ej planerat vid fyllningens utläggning och avsikten med den utförda uppföljningen har aldrig varit att utgöra facit för jämförande sättningsberäkningar. Uppföljningen har endast skett för att få ett underlag för bedömning av erhållna förkonsolideringseffekter och framtida sättningar.

11.3 Jämförande sättningsberäkningar för aktuella uppfyllnader i Bålsta

Som tidigare nämnts är beräkningsförutsättningarna inte helt renodlade. I de jämförande beräkningar som utförts har belastningsfallet förenklats till en lång-

sträckt bank med krönbredden 18 m och 3 m breda slän-
ter ned till tryckbankarna, som antas sträcka sig
ytterligare 17 m ut; varav 4 m som slänt till
ursprunglig markyta. Belastningen av tryckbanken har
antagits vara 20 kPa och belastningen under mittbanken
ytterligare 37 kPa. Lastreduktionen på grund av sätt-
ning har antagits vara 10 kPa per meter sättning då
det är del av den översta metern lera som pressas ned
under grundvattenytan. Sättningen har sedan beräknats
för en punkt vid bankens krönkant, och redovisas i
Fig. 11.1.

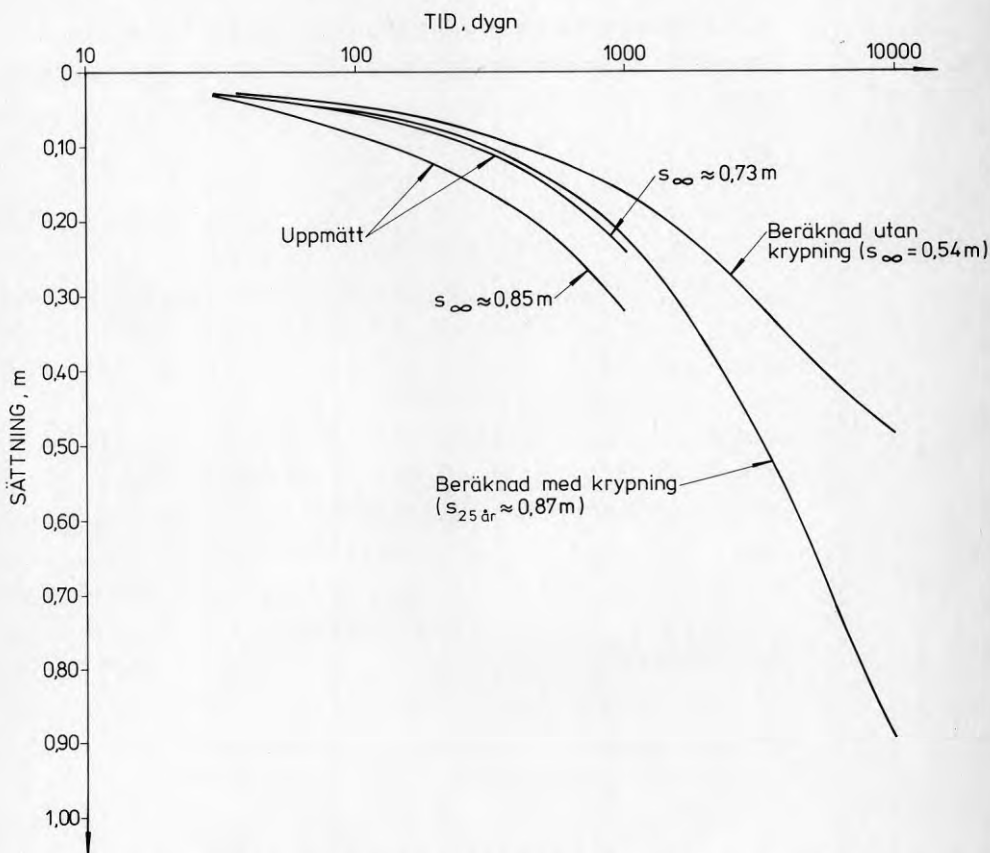


Fig. 11.1 Resultat av beräknade sättningar, jämfört med uppmätta sättningar för provfyllningarna i Bålsta.

Beräkningarna har utförts på SGI i dator med ett program för finita differenser kallat CONMULT. De har utförts dels utan beaktande av krypeffekter dels med insättande av empiriska värden för krypegenskaper valda med ledning av jordtyp och vattenkvoter.

I beräkningarna har använts medelvärden av de permeabilitets- och deformationsegenskaper som uppmätts för de olika nivåerna i ödometerförsöken.

De sättningar som beräknats utan beaktande av krypeffekter ligger för båda fyllningarna avsevärt under de uppmätta. Beaktas krypning blir överensstämmelsen mellan beräknad och uppmätt sättning bättre för den ena fyllningen men de uppmätta sättningarna är avsevärt större för den andra fyllningen.

Utan beaktande av krypning blir den beräknade slutsättningen cirka 0,54 m. Beaktas krypningen erhålls ingen direkt slutsättning men den beräknade sättningen efter 25 år då ungefär 90% av porövertrycken utjämnats är cirka 0,87 m.

Nuvarande sättning för fyllningarna är cirka 0,26 m respektive 0,34 m. Används den metod som föreslagits av Asaoka för att förutsäga slutsättningarna ur tidiga sättningsobservationer i fält erhålls uppskattade slutsättningar av cirka 0,73 m respektive 0,85 m för krönkanterna av de två fyllningarna. Asaokas metod förutsätter dock att ingen krypning sker varför dessa "slutsättningar" kan antas ungefär motsvara att större delen av porövertrycken utjämnats men att krypsättningarna fortsätter.

Den utförda jämförelsen mellan beräknade och uppmätta sättningar är grov men pekar ändå på behovet att beakta krypdeformationer vid all slags sättningsberäkning.

SLUTSATSER

Den föreliggande undersökningen har belyst och givit värdefull kunskap om kvaliteten på dagens rutinmässiga utförande av ostörd provtagning och ödometerförsök. Den visar också på en del områden där omedelbara insatser för förbättring bör göras.

Nedan anges i punktform en del slutsatser samt författarnas uppfattning och synpunkter på den del av dagens geoteknik som utgörs av provtagning, ödometerförsök och sättningsberäkning i lera.

Provtagning

- * "Ostörda" prover med godtagbar kvalitet för en god bestämning av sättningsparametrarna i lera kan erhållas med dagens standardkolvprovtagare.
- * Endast drygt hälften av de anlidade konsulterna levererade prover av godtagbar kvalitet.
- * Provtagning måste alltid utföras med största noggrannhet. Utrustningarna måste fungera perfekt och underhållas väl. Slutarbete skall undvikas utom i de fall de är absolut nödvändiga. Det rekommenderade förfarandet för provtagning måste följas. Provtagningen kan inte påskyndas utan måste få ta den tid som erfordras för att ostörda prover av godtagbar kvalitet skall erhållas.
- * Större intresse bör ägnas åt instruktion och vidareutbildning av fältpersonalen.

Laboratorieförsök

- * Vid väl genomförda undersökningar på ostörda prover i någorlunda homogen lera är variationskoefficienten för såväl förkonslideringstryck som kom-

pressionsmodul 10% eller lägre.

Detta kan betraktas som ett mycket gott resultat. Vid mer skiktade jordar ökar variationskoefficienten för kompressionsmodulen.

- * De anlidade laboratorierna levererade med några undantag tillfredsställande förkonsolideringstryck och kompressionsmoduler.
- * Permeabiliteten för den studerade homogena leran hade en variationskoefficient på cirka 20% vilket är normalt för denna typ av jord. På grund av brister hos ett flertal av de anlidade laboratorierna ökade variationskoefficienten från cirka 20 till 40 - 90%.
- * Större noggrannhet krävs på laboratorierna vad avser mätning av portryck och utvärdering av permeabilitet. De beräknade sättningarnas tidsförlopp beror helt på permeabiliteten och dess variation med kompressionen.
- * Redovisningen av resultaten kan förbättras för samtliga laboratorier.

Sättningsberäkning

- * Metoderna för sättningsberäkning måste förbättras. De uppskattningar som gjordes av olika konsulter för en och samma lerprofil och samma lastfall visade i detta fall en spridning på cirka 60%.
- * Större uppmärksamhet måste ägnas åt de så kallade krypsättningarna. Dessa måste beaktas i beräkningarna.

REFERENSER

Bergentål, L., Rogbeck, Y. och Eskilsson, S., 1988. Sättningsuppföljningar i lera - jämförelse mellan beräkningar med och utan krypning. NGM 1988, pp. 320-323. Oslo.

Eriksson, L. och Fallsvik, J., 1984. Metoder för kontroll av sättningsförlopp. NGM 1984, Vol. 1, pp. 461-470. Linköping.

Handboken Bygg, Band Geoteknik. Stockholm.

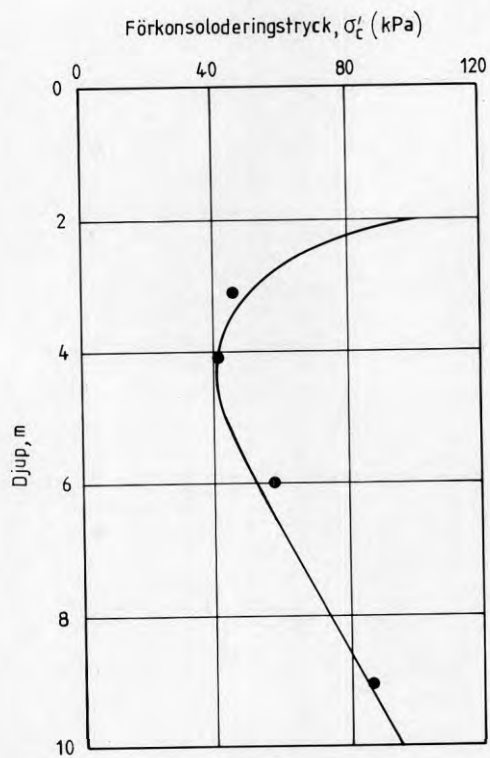
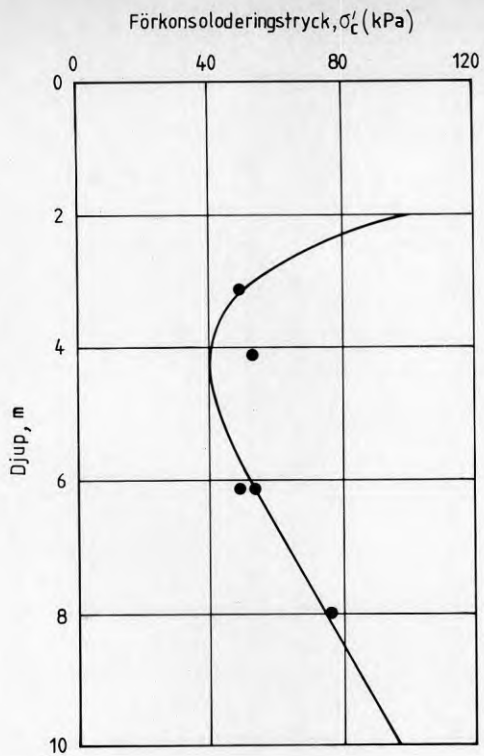
Larsson, R. och Sällfors, G., 1981. Beräkningar av sättningar i lera. Väg- och vattenbyggaren nr 3, pp. 39-42, Stockholm.

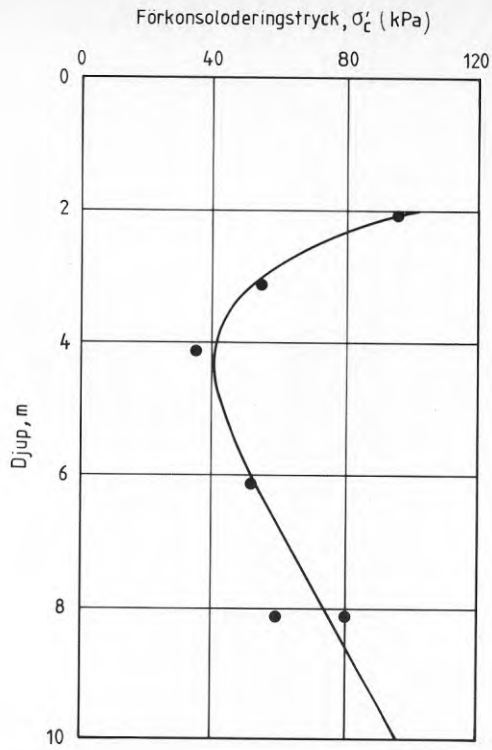
Larsson, R., 1986. Consolidation of Soft Soils. Statens geotekniska institut. Rapport No 29. Linköping.

Sällfors, G. och Andreasson, L., 1985. Kompressions-egenskaper. Geoteknisk laboratorieanvisning, del 10. Byggeforskningsrådet. T2:1985, Stockholm.

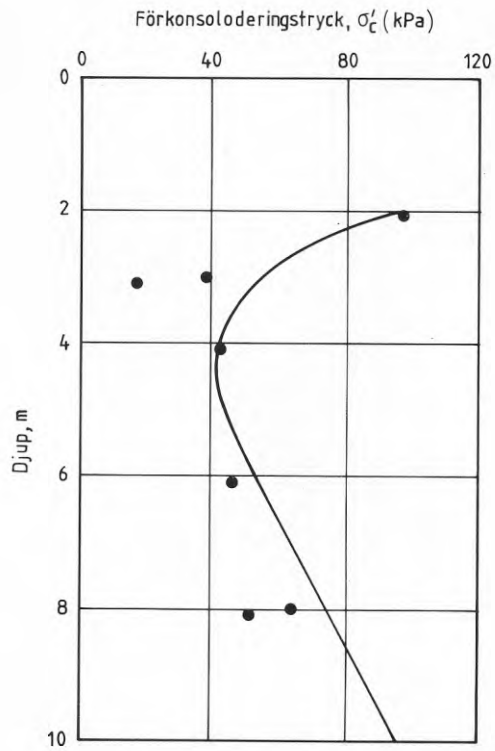
Appendix A

Resultat från CRS-försök utförda på prover tagna av olika konsulter. Den heldragna linjen representerar den mest troliga variationen av förkonsolideringstrycket med djupet. Bokstäverna betecknar de olika konsulterna och är de samma som i tabell 5.2-5.7.

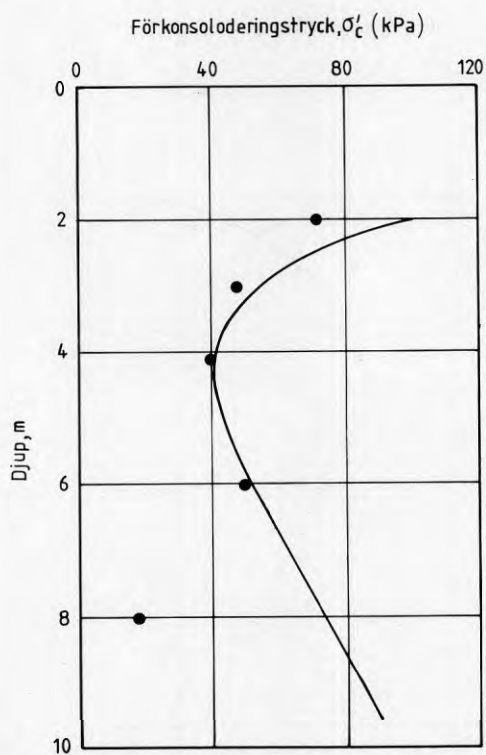
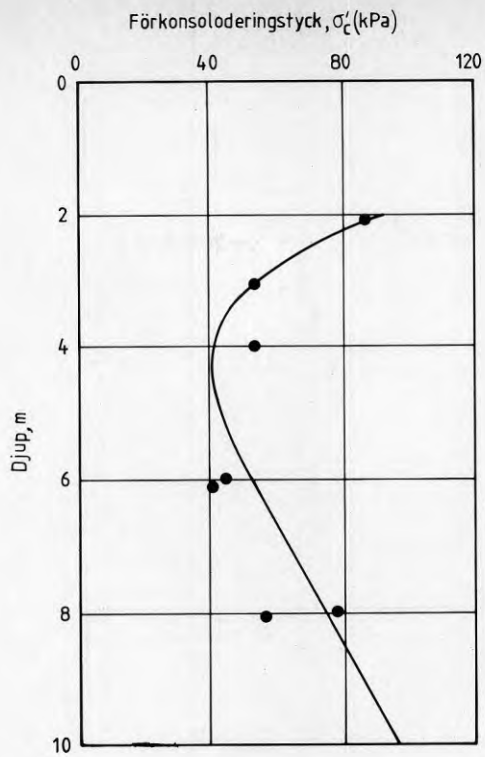


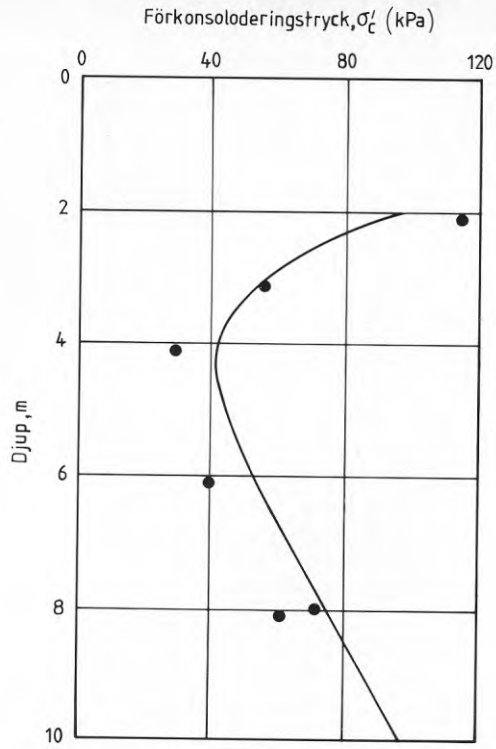


E

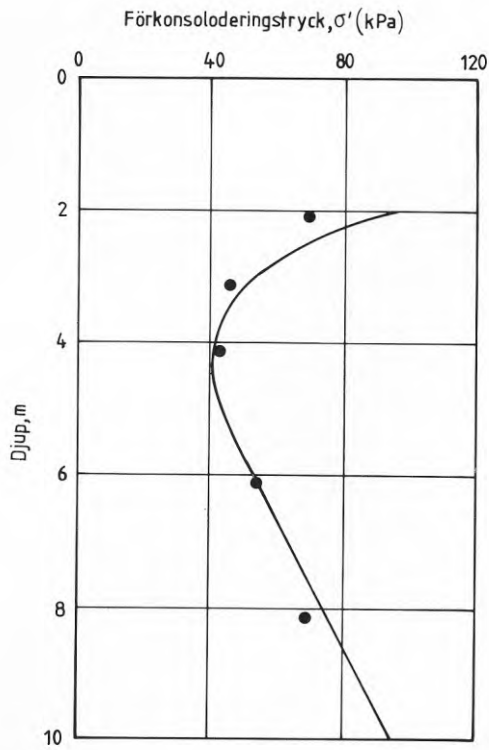


F





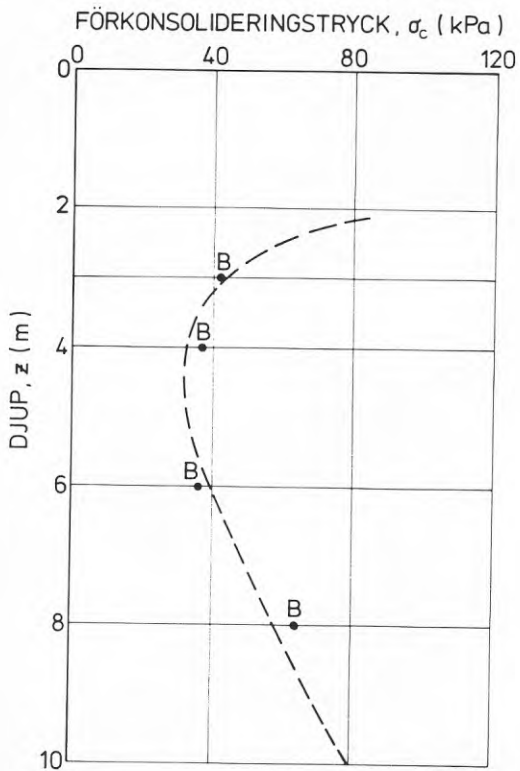
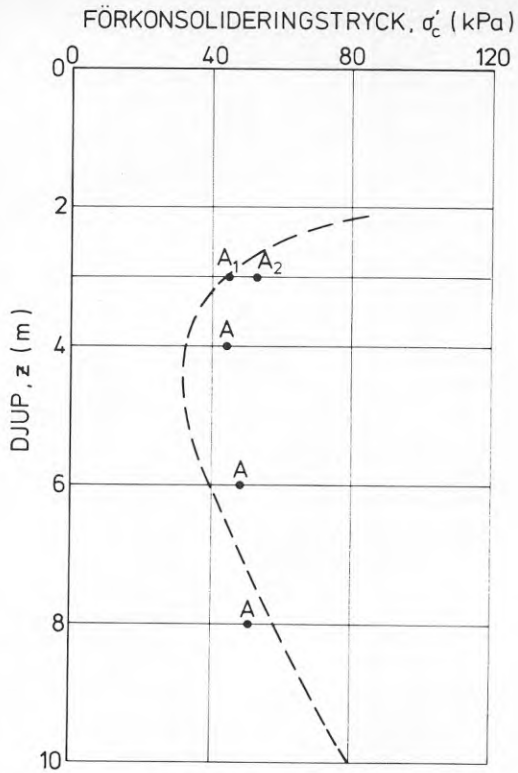
I

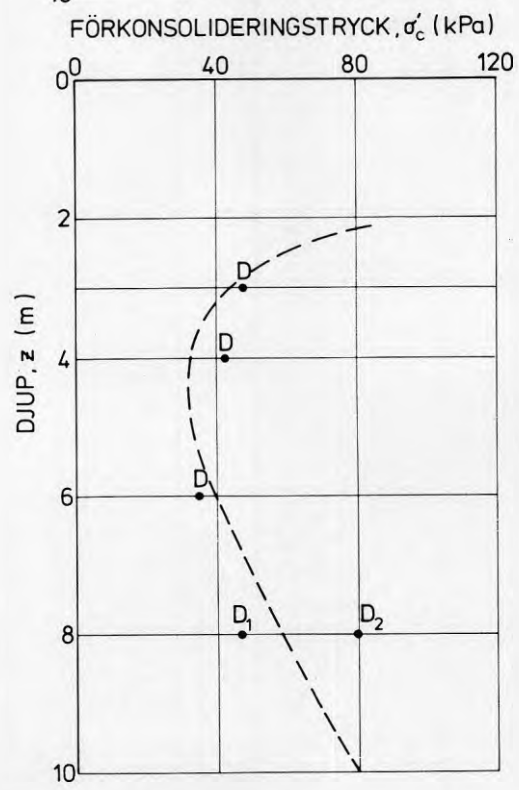
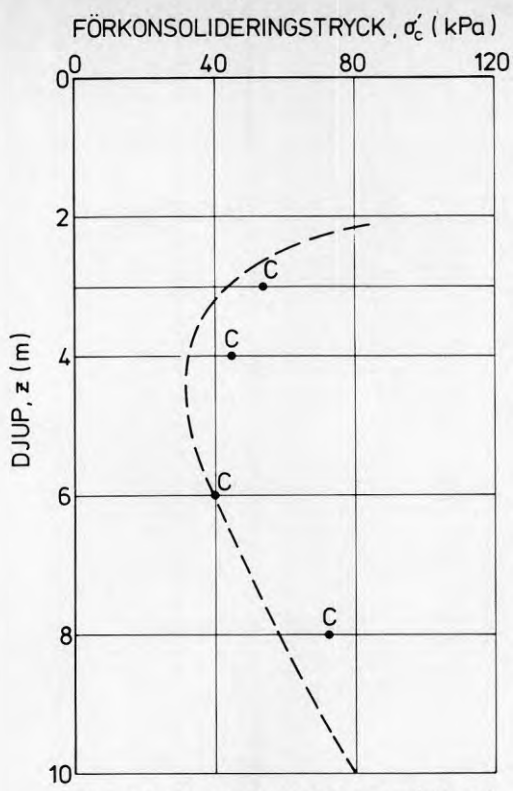


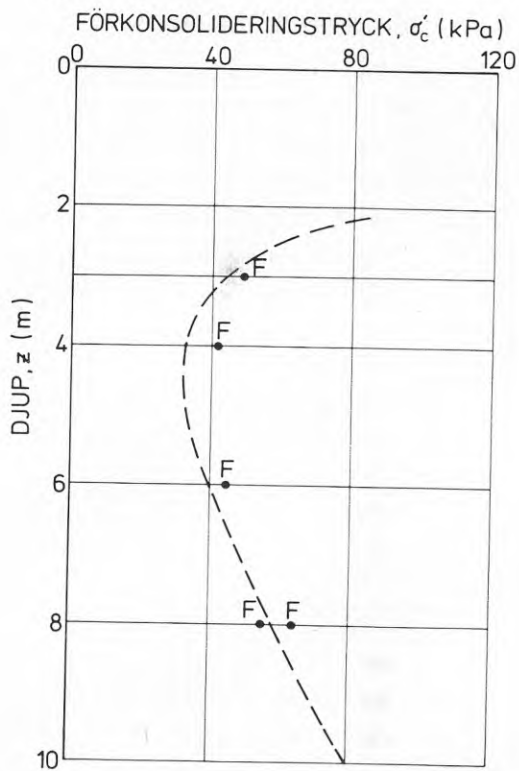
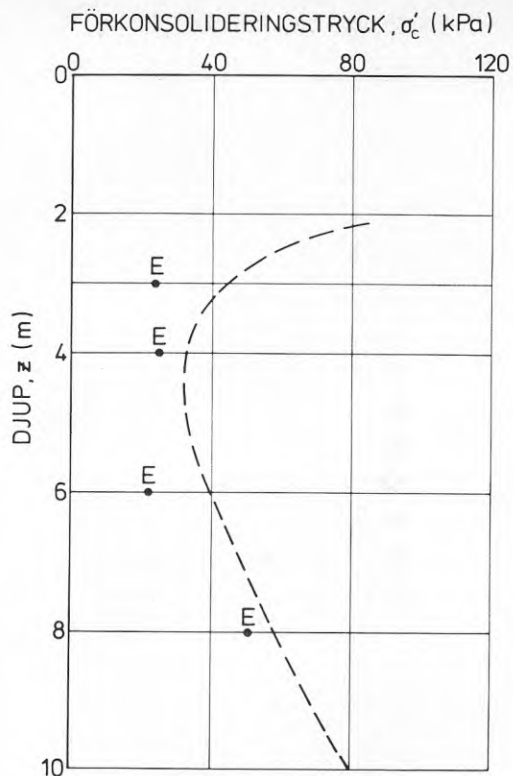
K

Appendix B

Resultat från CRS-försök utförda av olika laboratorier. Den streckade linjen representerar de värden som erhöles vid provtagning med slutare. Bokstäverna är identiska med vad som används i fig. 5.8-5.11.







Appendix C

Underlag som, utöver egna CRS-försök, tillställ-
des berörda konsulter.



**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 851036-2
från Statens råd för byggnadsforskning till SKANSKA AB,
Danderyd.**

R44: 1989

ISBN 91-540-5025-1

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6709044

**Abonnemangsgrupp:
V. Anläggningsteknik
Z. Konstruktioner och material**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst
171 88 Solna**

Cirkapris: 43 kr exkl moms