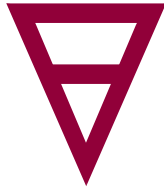




Svenska Geotekniska Föreningen
Swedish Geotechnical Society

Rapport 1:2017

**Metodik för
bestämning av
skjuvhållfasthet i lera**
En vägledning



Svenska Geotekniska Föreningen
Swedish Geotechnical Society

SGF Rapport 1:2017

Metodik för bestämning av skjuvhållfasthet i lera

En vägledning

Linköping 2017

SGF Rapport	Svenska Geotekniska Föreningen E-post: info@sgf.net
Beställning	Svenska Geotekniska Föreningen c/o Ermax Sveaborgsvägen 16 439 37 Fjärås Tel: 070-813 77 73 E-post: info@sgf.net
ISSN	1103-7237
ISRN	SGF-R-17/1-SE
Upplaga	Digital utgåva
Tryckeri	www.sgf.net

Förord

Denna rapport är en del i ett större utvecklingsprojekt som Trafikverket har beviljat medel för. Projektet fokuserar på bestämning och val av odränerad skjuvhållfasthet för lös lera.

Följande delar ingår i projektet:

- Enkät avseende vilka metoder som används för bestämning av den odränerade skjuvhållfastheten, c_u , i olika länder där lös lera förekommer (<http://fudinfo.trafikverket.se/fudinfoexternwebb/pages/PublikationVisa.aspx?PublikationId=3084>)
- Upprättande av en rapport med detaljerade anvisningar för genomförande, redovisning och tolkning av specialiserade laboratorieförsök (Direkta skjuvförsök, triaxialförsök och CRS-försök). (Denna rapport)
- Sammanställning av ett stort antal ”case records” där såväl traditionella metoder (vingförsök, konförsök och CPT) som specialiserade metoder (direkta skjuvförsök, triaxialförsök samt CRS-försök och empiri) använts för bestämning av c_u . (<http://fudinfo.trafikverket.se/fudinfoexternwebb/pages/PublikationVisa.aspx?PublikationId=3127>)
- Ett systemprojekt där en ny vinge tillverkas och testas där rotation och mätning av torsion sker nere vid vingen.
- Rekommendation för val av c_u . (Publiceras våren 2017 på Trafikverkets hemsida)

För att genomföra projektet tillsatte Trafikverket en arbetsgrupp bestående av:

- Anders Kullingsjö, Skanska
- Torbjörn Edstam, Skanska
- Tara Wood, NCC
- Per-Evert Bengtsson, SGI
- Rolf Larsson, SGI
- Urban Högsta, Golder Associates
- Göran Sällfors, Chalmers och GeoForce
- Jan Ekström, Trafikverket
- Anders Hansson, Trafikverket

I denna rapport lämnas kompletterande rekommendationer för hur specialiserade försök (direkta skjuvförsök, triaxialförsök och CRS-försök) bör utföras, tolkas och redovisas.

Följande medlemmar av SGFs Laboratoriekommitté har lämnat värdefulla synpunkter på rapporten: Rebecca Bertilsson (SGI), Nancy Bono (Golder), Sölve Hov (GeoMind) och Tobias Thorén (Bohusgeo).

Göteborg, december 2016

Göran Sällfors

Rolf Larsson

Innehåll

1. Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
2. Arbetsgång vid bestämning av c_u	3
2.1 Första ansats baserad på lokalkännedom	3
2.2 Vilken typ av hållfasthet ska bestämmas var	4
2.3 Antagen hållfasthet baserad på lokalkännedom och empiri	4
2.4 Uppdatering av diagram med resultat från fält-och laboratorieundersökningar	6
2.5 Avvikelser mellan förväntade och bestämda hållfastheter	7
3. Provtagning och planering.....	9
3.1 Planering	9
3.2 Upphandling av fältförsök	10
3.2.1 Allmänt	10
3.2.2 Kontroll	11
3.2.3 Återföring	11
3.3 Upphandling av laboratorieförsök	11
3.3.1 Kvalitetskrav	11
3.3.2 Framförhållning och tidsaspekter	11
3.3.3 Omfattning	12
3.3.4 Val av försökstyp	13
3.3.5 Kvalitetskontroll	13
3.3.6 Kompletterande försök	13
3.4 Några ord om utförande av fältundersökningar	14
3.4.1 Sondering	14
3.4.2 Vingförsök	14
4. Direkta skjuvförsök.....	17
4.1 Utförande	17
4.1.1 Utrustning och montering	17
4.1.2 Konsolidering	17
4.1.3 Avlastning	18
4.1.4 Skjuvning	18

4.1.5	Registrering under försök	19
4.2	Redovisning	19
4.3	Utvärdering	20
4.4	Värdering	21
4.4.1	Tid mellan provtagning och provning	21
4.4.2	Töjning under konsolideringsfasen	21
4.4.3	Skjuvtöjning till brott	21
5.	Triaxialförsök.....	23
5.1	Utförande	23
5.1.1	Utrustning och montering	23
5.1.2	Backpressure	23
5.1.3	Konsolidering	24
5.1.4	Avlastning	24
5.1.5	Skjuvning – aktiva försök	25
5.1.6	Skjuvning – passiva försök	26
5.1.7	Registrering under försöket	27
5.2	Redovisning	27
5.3	Planering av konsolideringsspänningar	28
5.3.1	Odränerade försök	28
5.3.2	Dränerade försök	29
5.4	Utvärdering	30
5.4.1	Odränerade försök	30
5.4.2	Dränerade försök	31
5.4.3	Tid mellan provtagning och provning	33
5.4.4	Volymändring under konsolideringsfasen	33
5.4.5	Töjning fram till brott	33
6.	CRS-försök	35
6.1	Utförande	35
6.2	Redovisning	36
6.3	Tolkning och utvärdering	36
6.4	Värdering	37
7.	Referenser	39

Bilagor

A. Arbetsgång vid bestämning av c_u	41
B. Direkta skjuvförsök.....	47
C. Triaxialförsök.....	49
D. CRS-försök	53

Kapitel 1.

Inledning

1.1 BAKGRUND

De laboratorieförsök som behandlas i denna rapport är främst direkta skjuvförsök, triaxialförsök och CRS-försök och rapportens tyngdpunkt ligger på beskrivning av utförande, redovisning och tolkning av dessa försök. Men, eftersom kvaliteten på resultaten från dessa försök är starkt avhängig av provkvalitén, ägnas visst utrymme inledningsvis åt krav när det gäller provtagning, hantering och övrigt handhavande under transport och i laboratoriet. Alla delar i kedjan fram till att man valt ett värde på skjuvhållfastheten är lika viktiga och det är den geotekniska handläggaren som är ansvarig för planering, genomförande och tolkning av de undersökningar som görs.

Rapporten syftar till att förtydliga de kvalitetskrav som rimligen kan/bör/skall ställas på geotekniska undersökningar som syftar till att bestämma den odränerade skjuvhållfastheten för en lera.

Kort beskrivning av vad de olika avsnitten innehåller:

1. Inledning
2. Arbetsgång vid bestämning av c_u
Ett förslag till systematisering av hur arbetet med att bestämma c_u successivt skall bedrivas.
3. Provtagning och planering
Hela kedjan från planering och styrning till upphandling och genomförande av fält- och laboratorieundersökningar skärskådas och råd ges för vilka krav som bör ställas och hur dessa skall beaktas och kontrolleras, allt med syftet att erhålla högsta möjliga kvalitet på slutprodukten, c_u . Omfattningen på undersökningarna liksom

tillhörande krav är beroende av uppdraget och beställarens speciella önskemål.

Det finns förvisso SIS standarder för de specialiserade laboratorieförsöken (direkta skjuvförsök, SS 02 71 27, triaxialförsök, triaxialförsök, CEN ISO/TS 17892 – 9:2004 (teknisk specifikation), CRS-försök, SS 02 71 26), men det är önskvärt med en uppstramning kring planering, genomförande och inte minst förståelse och utvärdering av dessa försök. Kapitlen 4, 5 och 6 utgör ett angeläget komplement till de existerande standarderna.

4. Direkta skjuvförsök

Kompletterande råd vid utförande, tolkning och redovisning.

5. Triaxialförsök

Kompletterande råd vid utförande, tolkning och redovisning.

6. CRS-försök

Kompletterande råd vid utförande, tolkning och redovisning.

Kapitel 2.

Arbetsgång vid bestämning av c_u

Att bestämma c_u med stor noggrannhet för ett större område kan vara kostsamt och omfattning och detaljeringsgrad skall därför anpassas i varje enskilt fall så att de insatser som görs, görs på rätt sätt och med en successivt anpassad detaljeringsgrad. I det följande beskrivs den hierarki som lämpligen bör följas i utredningsarbetet.

2.1 FÖRSTA ANSATS BASERAD PÅ LOKALKÄNNEDOM

Bestämning av den odränerade hållfastheten, c_u^1 , ingår i dimensionering/analys främst när det gäller:

- Släntstabilitet
- Schakter och stödkonstruktioner
- Pålar
- Stabilitet av bankar och tryckbankar
- Stabilitet av bankar på K/C-pelare

Baserat på allmän lokalkännedom om geologin i området och empiriska värden på ingående parametrar görs en överslagsmässig analys/dimensionering. En känslighetsanalys med antaget karaktäristiskt värde på $c_u \pm 20\%$ visar på konstruktionens ”känslighet” för c_u . Enkla överslag ger en antydning om betydelsen av c_u .

För de olika problemställningarna kan följande förenklade antaganden och förenklade beräkningar göras med antagna värden på c_u . Observera dock att vid dessa analyser skall påtagligt större säkerhetsfaktorer användas, jmf IVA Skredkommissions anvisningar för stabilitetsutredningar:

¹ Egentligen avses ett rimligt värde på medelvärdet på den mobiliserbara odränerade skjuvhållfastheten längs den tänkta brottytan. Värdet kan således vara beroende av brottmod.

- vid stabilitetsanalys används lämpligen direktmetoden
- vid jordtrycksberäkningar och stödkonstruktioner används jordtryck enligt Rankines teori, $p_a = \sigma_v - 2c_u$, respektive $p_p = \sigma_v + 2c_u$ som i sin tur ger spontlängd och moment för enklare spontkonstruktioner.
- kohesionspålasters bärförmåga kan överslagsmässigt beräknas som omkrets * längd * c_u * α .
- bankar kan dimensioneras baserat på antagandet att $q_b = 5,5 c_u$ (ofta dominerar sättningar, varvid c_u är av mindre intresse).

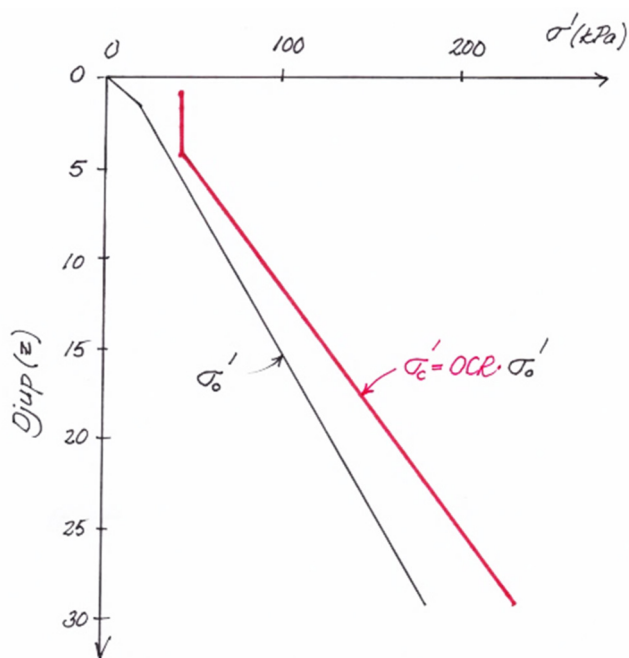
2.2 VILKEN TYP AV HÅLLFASTHET SKA BESTÄMMAS VAR

Med de beräkningar som angetts i föregående stycke fås en fingervisning om hur centralt det är med att bestämma c_u med stor noggrannhet. Beroende på problemställningen antyder överslagsberäkningarna också vilken typ av hållfasthet som är central och var den främst bör bestämmas med god noggrannhet.

2.3 ANTAGEN HÅLLFASTHET BASERAD PÅ LOKALKÄNNEDOM OCH EMPIRI

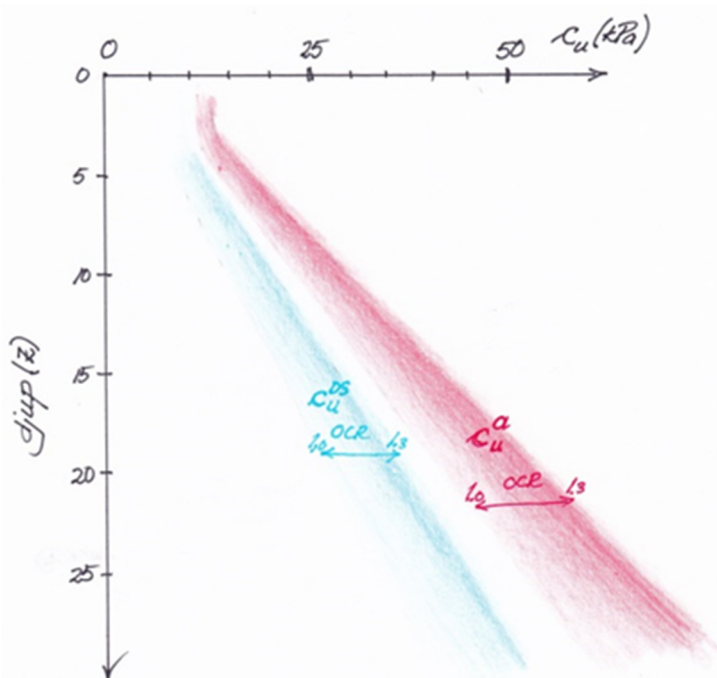
I de undersökningspunkter där c_u skall bestämmas görs antaganden om totalspänningens och portryckets variation med djupet. Därmed kan variationen av σ'_{vo} med djupet ritas i diagram. Beroende på geologin och tidigare belastningshistoria kan ett värde på OCR antas² och den förväntade variationen med djupet för förkonsolideringstrycket kan ritas in i samma diagram. Därvid skall jordprofilens bildningshistoria beaktas. Särskild uppmärksamhet ägnas huruvida egenskaperna skall kopplas till djup under markytan eller nivå i höjdsystemet.

² I västra Sverige är OCR för tidigare ej belastad terräng ofta 1,25 à 1,3, medan man på östkusten i motsvarande fall kan anta OCR till 1,1 à 1,2. Lägre värden förekommer ofta i de fall området har fyllts ut i modern tid eller då en grundvattensänkning skett och högre främst om området tidigare varit belastat.



Figur 1 Förkonsolideringstryck som funktion av OCR och σ'_o .

Med stöd av empiriska samband kan då också den förväntade variationen av c_u^a , c_u^{DS} och c_u^p ritas in i ett diagram över hållfastheten, se Bilaga A för detaljer avseende antaganden, bearbetning och redovisning.

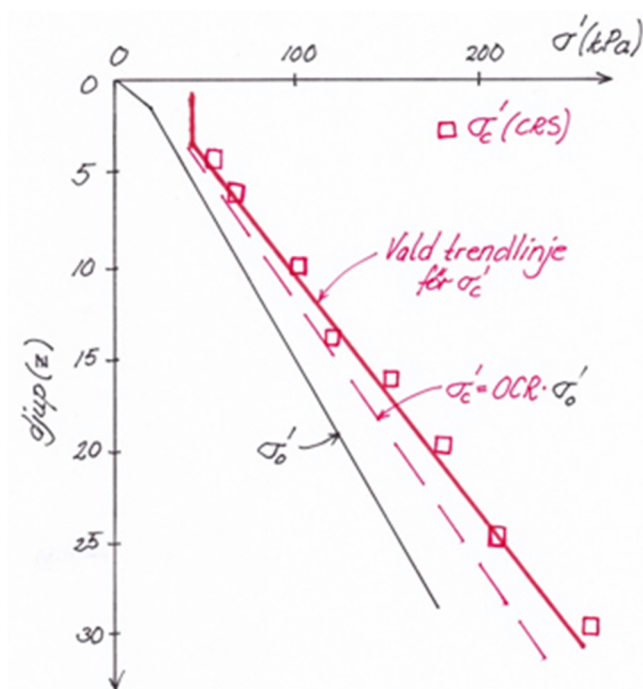


Figur 2 Förväntade värden på c_u^{DS} och c_u^a

2.4 UPPDATERING AV DIAGRAM MED RESULTAT FRÅN FÄLT- OCH LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR

Allteftersom resultat från fält- och laboratorieundersökningarna blir tillgängliga uppdateras diagrammet som visar förkonsolideringstryckets variation med djupet.

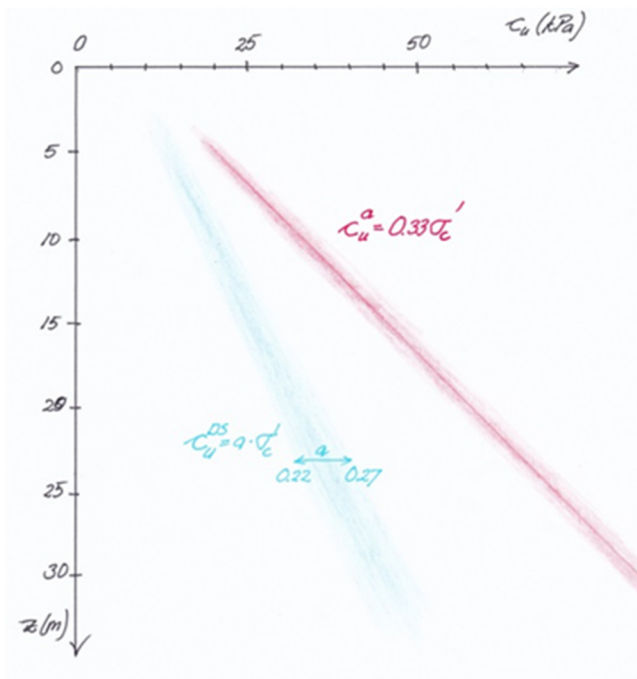
En tolkning av trenden för σ'_c mot djupet görs. Det är viktigt att överväga en indelning av jordprofilen i olika lager inom vilka σ'_c kan antas variera linjärt.



Figur 3 Val av trendlinje för σ'_c

Baserat på dessa resultat, trenden för σ'_c , uppdateras även diagrammet med skjuvhållfasthetens variation med djupet och erhållna värden på skjuvhållfastheten från fält- och laboratieförsök ritas in.

Ett detaljerat exempel visas också i Bilaga A. I de fall val av odränerad skjuvhållfasthet är av avgörande betydelse för dimensioneringen är det viktigt att inte bara skjuvhållfastheten bestäms med olika metoder utan att även ett större antal CRS-försök utförs så att en god bild av jordprofilens konsolideringsförhållanden erhålls. Därmed kan variationen i OCR med djupet bestämmas, vilket också är viktigt då detta påverkar utvärderingen av hållfastheten.



Figur 4 Förväntade värden på c_u^{DS} och c_u^a

2.5 AVVIKELSER MELLAN FÖRVÄNTADE OCH BESTÄMDA HÅLLFASTHETER

I de flesta fall fås en relativt god överensstämmelse mellan förväntade och bestämda hållfastheter och valet av hållfasthetsvärden är då tämligen okomplicerat. Emellanåt händer det dock att de med vingförsök, konförsök och CPT bestämda hållfastheterna är klart lägre, och stundom faktiskt högre, än vad man kunnat förvänta. Det kan då finnas anledning att göra fördjupade studier av om det verkligen förhåller sig så eller om det kan vara orsakat av brister i utförandet av undersökningarna. Innan man går vidare bör man dock skaffa sig en uppfattning om vilka konsekvenser den noterade skillnaden får för design och ekonomi i projektet. Det är viktigt att betona att det inte får bli ett självändamål att bestämma hållfastheten med så stor noggrannhet som möjligt utan det måste hela tiden vägas mot nyttan av eventuellt mer representativa hållfastheter.

En fördjupning kan innebära att man gör direkta skjuvförsök och i många fall triaxialförsök. I de allra flesta fall stämmer de så bestämda hållfastheterna c_u^a , c_u^{DS} och c_u^p med empirin. Då skall värdena från de specialiserade försöken väga mycket tungt vid val av värde på den odränerade skjuvhållfastheten.

I de fall man accepterar och väljer en hållfasthet som klart avviker från vad man kunde förvänta sig, trots att det innebär påtagliga ekonomiska konsekvenser, bör man tydligt motivera varför man väljer att göra så.

Kapitel 3.

Provtagning och planering

Avsikten med detta avsnitt är att ge vägledning för geoteknikerns planering av hur de geotekniska fält- och laboratorieundersökningarna ska genomföras.

3.1 PLANERING

Planeringen av de geotekniska undersökningarna i ett projekt skall göras med ledning av projektets syfte och vad som redan i förväg är känt om jordförhållandena på den aktuella platsen. Om en tillräckligt god kännedom saknas bör ett antal CPT-sonderingar och eventuellt trycksonderingar göras för att kartlägga jordprofilen.

I undersökningarna ingår att bestämma rådande effektiva vertikalktryck och därmed också portrycksprofilen. Portrycksmätningar i kohesionsjord bör utföras med slutna system. Mätningar av utjämnade portryck vid tillfälliga stopp i permeabla lager och avslutande sonderingsdjup vid CPT-sondering kan också vara till stor hjälp.

Om specialiserade laboratorieförsök skall utföras, krävs ostörda prover av högsta möjliga kvalitet. Provtagning skall därför ovillkorligen utföras i enlighet med de rekommendationer som finns för ostörd provtagning och transport.

Innan provtagning skall laboratoriet bokas upp och provning skall göras på relativt färska prover. Att transportera prover mellan olika laboratorier bör undvikas på grund av den ökade störningsrisken och icke helt fyllda provhylsor skall absolut inte skickas runt.

I planeringen skall också ingå en plan för kvalitetskontroll.

3.2 UPPHANDLING AV FÄLTFÖRSÖK

3.2.1 Allmänt

Vid upphandlingen är det viktigt att ställa detaljerade kvalitetskrav och att försäkra sig om att de uppgifter som behövs för att kontrollera att dessa uppfylls tillhandahålls.

För fältundersökningarna gäller som ett minimum att de krav på utrustning, utförande och rapportering som finns i gällande standarder (och SGF rekommendationer) uppfylls. Ytterligare krav på noggrannhet och redovisning kan ställas, inte minst gäller detta vid t.ex. vid CPT-sondering.

För vingförsök finns sedan gammalt en av SGF rekommenderad standard. Denna är så kortfattad och allmänt hållen att detaljerade krav bör ställas av beställaren med ledning av lokal erfarenhet och förhållandena i det aktuella fallet. Här kan t.ex. krav ställas på inpumpning av vatten eller borrhätska för att reducera stågfriktionen i sonderingshål djupare än cirka 15 m eller att använda vingutrustning med foderrör. När sådan finns kommersiellt tillgänglig kan krav ställas på att, som anges i den noggrannaste användningsklassen i den internationella standard som är på väg, att använda utrustning där såväl kraft som rotation mäts nere vid vingen.

För ostörd provtagning med standardkolvprovtagare gäller att rekommendationerna i SGF Rapport 1:2009 skall följas till alla delar. Provkvaliteten kontrolleras i den efterföljande laboratorieundersökningen och det bör i upphandlingen ställas krav på att proverna skall uppfylla kraven för god (eller åtminstone någorlunda) provkvalitet enligt SGI Info 3, Skjuvhållfasthet – utvärdering i kohesionsjord, Fig. 4.a.

För eventuell annan ostörd provtagning med större provdimensioner skall de handledningar som utarbetats för respektive metod följas. Kraven på provkvalitet och kontrollen av denna motsvarar de för kolvprovtagning.

3.2.2 Kontroll

Att kvalitetskraven är uppfyllda skall kontrolleras. Vid CPT-sonderingar finns omfattande krav på rapportering så att kalibrering, sonderingshastighet, nollvärden m.m. är uppfyllda. Att detta är uppfyllt skall framgå av redovisningen.

För vingförsök skall möjlighet att kontrollera kalibrering ges. Typ av utrustning och installationsmetod samt väntetid från vingens installation till försökstart liksom tid till brott skall anges i rapporteringen. Hela kraft-rotationskurvan skall rapporteras i form av registrerade diagram eller datafiler.

Utöver ovanstående kontroll är det av stort värde om beställaren/handläggaren åtminstone vid något tillfälle (och vid större projekt helst regelbundet) uppsöker undersökningsplatsen och bildar sig en uppfattning om undersökningarnas utförande och eventuella svårigheter i samband med detta.

3.2.3 Återföring

Resultatet av kvalitetskontrollen skall återföras till utföraren av fältarbetena. Detta skall utgöra ett kvitto på att allt har utförts enligt uppställda krav, alternativt ett underlag för krav på förnyade och kompletterande undersökningar som uppfyller dessa.

På detta vis får fältpersonalen ett kvitto på att den använda metodiken fungerat och att man gjort ett bra jobb alternativt ges en möjlighet att analysera vad som blivit fel och att förbättra utförandet.

3.3 UPPHANDLING AV LABORATORIEFÖRSÖK

3.3.1 Kvalitetskrav

Det anlitate laboratoriet skall ha den utrustning och kompetens som fordras för att utföra de planerade undersökningarna. Erfarenhet av dessa undersökningar i den aktuella typen av jord samt kalibreringar av utrustningarna skall kunna verifieras. Av betydelse är också laboratoriets geografiska läge, så att alltför långa och tidskrävande transporter kan undvikas.

3.3.2 Framförhållning och tidsaspekter

Laboratoriet skall vara inbokad innan provtagningen görs och vara berett på att starta provningen utan onödigt dröjsmål. Vissa parametrar påverkas starkt och snabbt av lagringstiden. Den tid under vilken relevanta försök kan utföras på

proverna påverkas av lagringstemperatur, luftfuktighet vid lagring och provernas förslutning. Prov i öppnade provhylsor, där delprov tagits ut, påverkas snabbare än i helt fyllda oöppnade hylsor.

Rutinanalys bör således utföras direkt efter att proverna anlant till laboratoriet, vilket i praktiken normalt innebär inom en vecka. Samtidigt med rutinförsöken eller så snart som möjligt därefter startas ödometerförsöken, normalt CRS-försök. Resultaten från ödometerförsöken ligger till grund för val av konsolideringsspänningar i efterföljande hållfasthetsprovningar som direkta skjuvförsök och triaxialförsök.

Om det i ett senare skede visar sig att kompletterande specialiserade hållfasthetsbestämningar måste utföras, måste en bedömning göras av provets relevans efter den tid det lagrats och en kompletterande provtagning bör normalt övervägas. Som ett minimum bör en kompletterande rutinundersökning utföras för att kontrollera om provets egenskaper uppenbarligen förändrats under lagringstiden.

3.3.3 Omfattning

Omfattningen av den specialiserade provningen bestäms av dess syfte och av den aktuella jordlagerföljden. Syftet med provningen är som regel att prova jorden under ett spänningstillstånd och i ett belastningsfall som så väl som möjligt efterliknar de förhållanden som råder eller kommer att uppstå in situ. De försök som normalt är aktuella är aktiva och passiva triaxialförsök samt direkta skjuvförsök. Beroende på det aktuella fallet kan en, två eller alla tre försökstyperna bli aktuella.

Provningens omfattning beror också på om den avser att verifiera den empiriska erfarenhet som finns, om man vill kunna visa att högre hållfastheter än de empiriska kan användas, eller om tidigare provning visar att hållfastheten i det aktuella fallet är lägre än vad empirin anger. För att verifiera empiri behövs normalt endast enstaka försök på ett fåtal nivåer, medan det i de andra fallen krävs betydligt mer omfattande provning.

3.3.4 Val av försökstyp

Valet av försökstyp beror på det aktuella belastningsfallet. Det vanligaste lite mer specialiserade försöket är direkt skjuvförsök. Detta är det försök som antas ge ett medelvärde på hållfastheten utefter en glidyta under relativt flacka slänter samt de glidytor som kan uppstå vid t.ex. bankar på plan mark. Eftersom resultaten från direkta skjuvförsök normalt också ligger nära, om än något lägre än medelvärdet av de som fås ur aktiva och passiva triaxialförsök samt direkta skjuvförsök, får det också ofta representera hållfastheten i andra fall där de aktiva och passiva skjuvzonerna är ungefär lika stora. Resultaten från direkta skjuvförsök motsvarar också de hållfastheter som normalt utvärderas ur vingförsök och CPT-sonderingar. Utvärderingarna av dessa fältförsök är kalibrerade mot resultat från direkta skjuvförsök.

I andra fall, som i mycket branta slänter där den aktiva skjuvhållfastheten³ dominerar, är det aktiva triaxialförsöket det mest relevanta, eventuellt i kombination med direkta skjuvförsök.

Den passiva skjuvhållfastheten är mest relevant för hållfastheten i en passivzon för glidytor.

3.3.5 Kvalitetskontroll

I kapitlen 4, 5 och 6 återfinns detaljerade beskrivningar av vad kvalitetskontrollen av proverna/försöken skall omfatta. Det skall dock här påpekas att i kvalitetskontrollen ingår uppgifter om provtagningsdatum, provningsdatum, vilken provhylsa som använts, provningshastighet och temperatur vid provningen samt provningsutrustningens kalibrering. I fall med stegvisa belastningar skall laststeg och deras varaktighet anges.

3.3.6 Kompletterande försök

Om det senare visar sig att kompletterande provning behöver utföras, måste provernas kvalitet och relevans efter den gångna lagringstiden bedömas, se ovan. Är denna för dålig eller den kvarvarande provmängden för liten måste kompletterande provtagning utföras på utvalda nivåer. Det skall speciellt observeras att kompletterande provning på resterande material i provburkar som

³ Skjuvhållfastheten vid aktiv respektive passiv skjuvning betecknas normalt aktiv-respektive passiv skjuvhållfasthet.

öppnats för uttagning av delprover och sedan lagrats under lång tid är mycket osäker.

3.4 NÅGRA ORD OM UTFÖRANDE AV FÄLTUNDERSÖKNINGAR

3.4.1 Sondering

Sonderingar bör helst utföras som CPT-sonderingar, som är den metod som ger en detaljerad bild av jordlagerföljden tillsammans med en kontinuerlig bild av hållfasthetsvariationen i jorden. Sonderingarna och rapporteringen skall utföras enligt Internationell standard och svensk tillämpning med högsta möjliga noggrannhetskrav. För utrustningens handhavande bör rekommendationerna i SGI Information Nr 15 följas.

Om jordförhållandena inte är väl kända kan en inledande sondering med lägre noggrannhetskrav utföras för att undersöka torrskorpans mäktighet, djupet till fast botten och om det finns några grövre och/eller fastare skikt i jordprofilen. Resultaten från denna används sedan till att bestämma vilken sond som kan användas i de följande sonderingarna, erforderligt förborrningsdjup samt en indikation för när en känsligare sond kan förväntas närma sig fast botten.

CPT-sondering ger en omfattande information om jorden i profilen. Rätt utförd kan den också ge hållfasthetsbestämningar av ungefär samma noggrannhet som de från bra vingförsök. Hållfasthetsbestämningen är dessutom kontinuerlig mot djupet. Varje sondering fordrar omfattande förberedelse med vätskemättnad av filter, temperaturstabilisering och nollavläsningar vilket tar tid. Själva sonderingen går dock relativt snabbt och speciellt för sonderingar till större djup är metoden rationell trots förberedelsetiden, även om det då kan krävas vattenspolning för att minska mantelmotståndet under neddrivningen.

3.4.2 Vingförsök

Vingförsök är den hittills mest beprövade metoden att bestämma odränerad skjuvhållfasthet i kohesionsjord i fält. Metoden ger punktvisa värden på skjuvhållfastheten. Varje bestämning av hållfastheten tar en viss tid eftersom stipulerade väntetider och rotationshastigheter skall följas. Speciellt vid undersökningar till större djup blir metoden därmed tidskrävande och det är därför vanligt att djupintervallen mellan bestämningarna ökas med djupet från

som regel ca 1 m överst till ibland upp till 5 m på stora djup. Detta sker dock på bekostnad av detaljeringsgraden i hållfasthetsvariationen och ökande risk för att enstaka missvisande värden skall få stor betydelse.

Erfarenheten av vingförsök är dock stor och även i många fall med omfattande CPT-sondering utförs ofta vingförsök i några punkter för att verifiera att metoderna ger samma resultat.

De utrustningar som används idag är oftast av den lätta typen utan skyddsrör för vridstängerna och med en glappkoppling för att separera stångfriktion från vridmoment på vingen. Denna utrustning har i stort visat sig fungera bra i lösa leror ned till 15 à 20 m djup. Osäkerheten i utvärderingen ökar dock med djupet eftersom stångfriktionen hastigt ökar liksom korrektionen för denna. Detta medför att det utvärderade vridmomentet på vingen minskar i förhållande till det totala vridmomentet och korrektionen. Friktionen mot stängerna mäts dessutom först och vid en begränsad rotation av stängerna varefter man bara kan anta att den är oförändrad under den fortsatta vridningen av stängerna.

För att komma tillrätta med detta problem kan man använda sig av smörjning av stängerna genom inpumpning av vatten eller borrhätska en bit ovanför vingen, vilket reducerar stångfriktionen, en tyngre utrustning med skyddsrör som nästan helt eliminerar stångfriktionen eller en utrustning där vridmomentet mäts nere i omedelbar anslutning till vingen.

Kapitel 4.

Direkta skjuvförsök

Direkta skjuvförsök på kohesionsjord skall utföras enligt SGF Notat 2:2004 och Svensk Standard SS 02 71 27, dock med vissa förtydliganden och kompletteringar enligt nedan.

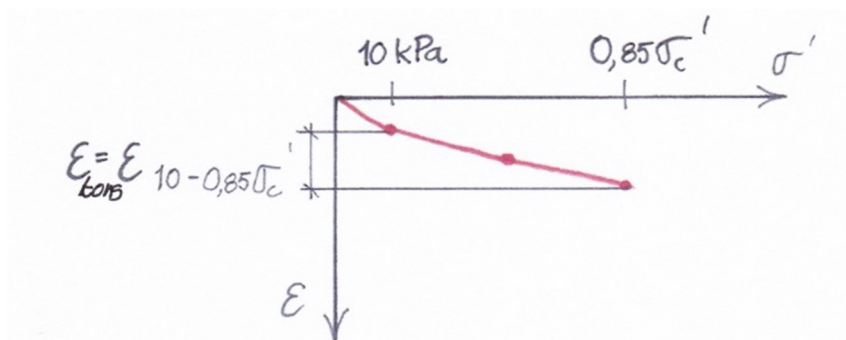
4.1 UTFÖRANDE

4.1.1 Utrustning och montering

Det cylindriska provet, normalt 20 mm högt, monteras mellan filterstenar som ska vara vattenmättade, men avtorkade, så att inget fritt vatten förekommer. Gummimembran med inbyggd metalltråd, alternativt utvändiga stålringar med distansbrickor anbringas. Övrig kringutrustning monteras och provet belastas vertikalt så snabbt som möjligt för att undvika att provet sväller. Detta är extra viktigt för prover från större djup. Den initiala lasten måste också vara tillräckligt stor för att förhindra svällning.

4.1.2 Konsolidering

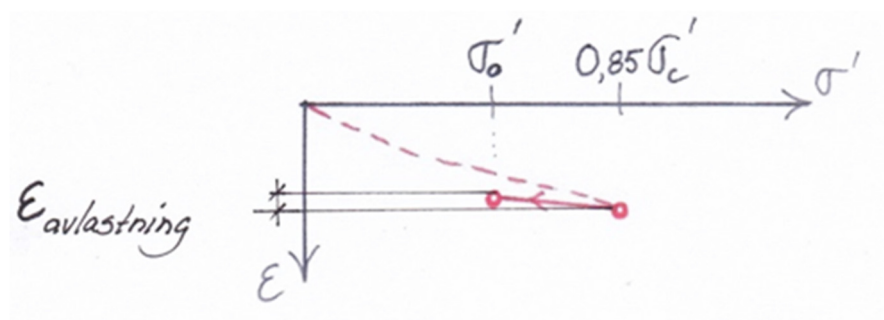
Upplastning görs under dränerade förhållanden till ca 85 % av provets förkonsolideringstryck i ett par laststeg, som vardera får verka någon timma. Denna konsolideringsfas följs genom registrering av vertikaldeformationerna mot tiden. Speciellt noteras töjningen från initiallast till $0,85 \sigma'_c$.



Figur 5 Direkt skjuvförsök, konsolidering före skjuvning

4.1.3 Avlastning

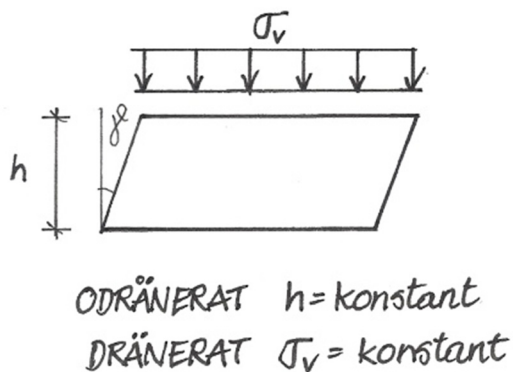
Provet avlastas därefter, under dränerade förhållanden, till rådande vertikal effektivspänning in situ och provet får anpassa sig till detta spänningstillstånd, vanligen under natten. Andra spänningstillstånd kan vara aktuella, men också då krävs tillräcklig tid så att tillhörande konsolidering eller svällning hinner utbildas. Deformationen som sker under avlastningsfasen dokumenteras.



Figur 6 Direkt skjuvförsök, avlastning före skjuvning

4.1.4 Skjuvning

Provet skjuvas därefter antingen under dränerade eller odränerade förhållanden. Vid odränerade förhållanden bör hastigheten sättas till ca 0,0001 rad/min (motsvarar en förskjutning av övre stämpeln på ca 2 mm/dygn) och provhöjden skall då vara låst. Vid dränerade förhållanden skall vertikallasten hållas konstant och hastigheten ej överstiga 0,0001 rad/min och provets vertikala deformation registreras. Om skjuvning sker genom stegvis belastning bör den förväntade brottlasten delas upp i minst 10 steg och varje laststeg verka 30 minuter. För att säkrare kunna utvärdera brottlasten halveras laststegen normalt efter att 50 % av förväntad brottlast uppnåtts och samtidigt halveras liggtiden. För dränerade försök används ofta en mindre provhöjd för att tillförsäkra full dränering.



Figur 7 Randvillkor vid ett direkt skjuvförsök

I de fall proverna kommer från stort djup, eller om förkonsolideringstrycket är högre än ca 250 kPa (och leran därmed vid konsolideringen fått ett relativt lågt portal och en relativt låg permeabilitet) kan det vara motiverat att välja en lägre belastningshastighet, ungefär hälften.

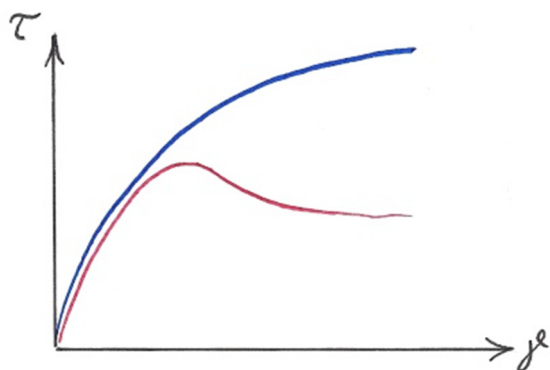
4.1.5 Registrering under försök

Det är viktigt att vertikaldeformationerna under konsolideringsfasen och avlastningen följs och redovisas. Under skjuvfasen mäts den horisontella förskjutningen, erforderlig skjuvkraft och vid dränerade försök även eventuell vertikaldeformation. Det är en fördel om provets vattenkvot bestäms efter avslutat försök.

4.2 REDOVISNING

Resultaten från ett skjuvförsök redovisas i diagram där skjuvspänningen ritas som funktion av vinkeländringen.

I diagrammet skall, utöver gängse data om borrhål djup, belastningssekvens, vilken tub provet tagits ur etc. även anges datum för provtagningen och när försöket utfördes, samt temperaturen i laboratoriet. Dessutom anges hur stora deformationerna var under konsolideringsfasen. Exempel på diagram återfinns i Bilaga C.

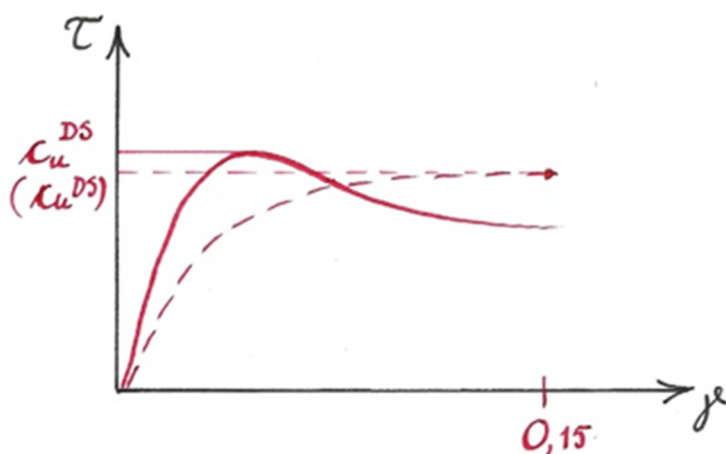


Figur 8 Typiska resultat från ett direkt skjuvförsök

4.3 UTVÄRDERING

Den odränerade skjuvhållfastheten, c_u^{DS} , utvärderas som den största uppnådda skjuvspänningen under försöket. Skjuvningen är begränsad till 0,15 radianers vinkeländring. Har inte brott inträffat dessförinnan utvärderas traditionellt skjuvspänningen vid denna deformation som brott. För fullgoda prover inträffar dock brott normalt långt dessförinnan och en hållfasthet utvärderad ur deformationskriteriet skall speciellt anges och detta skall beaktas vid den slutliga hållfasthetsbedömningen.

I de fall försöken utförts dränerade görs utvärderingen enligt sid 9 i SS 02 71 27.



Figur 9 Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet ur resultat från ett direkt skjuvförsök

4.4 VÄRDERING

Speciellt bör laboratoriepersonalen göra en värdering, alternativt lämna en kommentar kring provkvalitet, samt redovisa observationer som gjorts under montering och utförande.

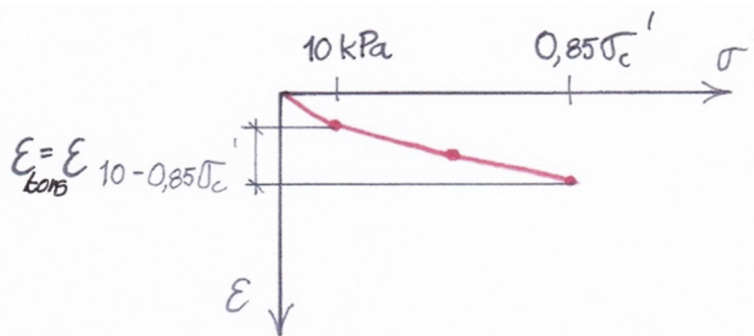
Vid bedömning av kvalitén på resultaten är det viktigt att studera och beakta:

4.4.1 Tid mellan provtagning och provning

Om denna tid är alltför lång (>1 mån) kan provets hållfasthet ha ändrats till följd av uttorkning, oxidation, andra kemiska förändringar mm.

4.4.2 Töjning under konsolideringsfasen

Det är svårt att få perfekt anliggning mellan prov och stämpel direkt efter montering, varför en viss initialsättning sker. Om en initial belastning först sker för att förhindra svällning (och eliminera större kontaktproblem), och får verka några minuter, fås en relativt god anliggning och deformationen därefter fram till dess att belastningen är ca $0,85 \sigma'_c$. noteras. Den så uppmätta töjningen ger en indikation på provets kvalitet. Denna töjning bör normalt inte överstiga 3 à 4 % för oorganiska leror. I övrigt görs en bedömning av provkvaliteten enligt SGI Information 3.



Figur 10 Töjning under konsolideringsfasen

4.4.3 Skjuvtöjning till brott

Ett relativt ostört prov går normalt till brott vid en ganska begränsad skjuvtöjning, typiskt 0,02 à 0,04 radianer, för påtagligt siltiga leror är motsvarande skjuvtöjning 0,01 à 0,02 radianer. Ju sämre provkvalitet desto större blir som regel skjuvtöjningen. Om provet är gyttjigt blir dock skjuvtöjningen ofta större och indikerar inte nödvändigtvis ett stört prov.

Det står i SGF Notat 2:2004, och i avsnitt 4.3 i denna rapport, att om inget brott uppstår innan skjivtöjningen blivit 0,15 radianer skall detta värde anges som c_u . Det skall i så fall anges att c_u utvärderats vid 0,15 rad skjivtöjning så att detta kan beaktas vid den slutliga bedömningen och val av hållfasthet. I sammanställningen skall sådana värden sättas inom parentes för att markera att hållfastheten har utvärderats vid 0,15 rad skjivtöjning.

Kapitel 5.

Triaxialförsök

Triaxialförsök på kohesionsjord bör utföras enligt den tekniska specifikationen CEN ISO/TS 17892-9:2004, dock med vissa kompletteringar och förtydliganden enligt nedan.

Rekommendationer finns även i SGF Rapport 2:2012 Triaxialförsök – En vägledning.

5.1 UTFÖRANDE

5.1.1 Utrustning och montering

Det cylindriska provet bör vara dubbelt så högt som dess diameter. Ett radiellt filter, tillskuret som ett spiralformat galler (eller liknande) och fuktat anbringas runt provet. Därefter placeras provet på piedestalens filter och övre filtersten och topp monteras. Filterstenarna ska vara vattenmättade, men avtorkade, så att inget fritt vatten förekommer. Därefter monteras gummimembranen och o-ringar med speciell utrustning. Cellen sätts på plats och fylls med vätska och celltrycket ökas så att provet belastas så snabbt som möjligt för att undvika att det sväller. Detta gäller speciellt för prover från större djup.

5.1.2 Backpressure

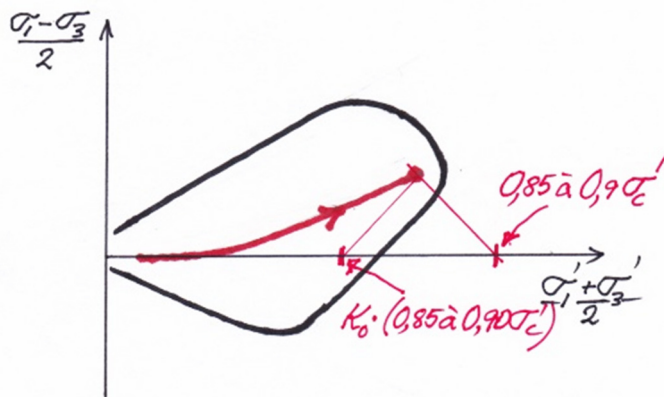
I vattenmättad svensk lera används normalt ett backpressure som motsvarar portrycket in situ. För vissa jordar kan det vara aktuellt att använda ett förhöjt backpressure. Skillnaden mellan celltrycket och vattentrycket i porerna skall motsvara det effektiva horisontaltryck som eftersträvas vid konsolideringen (och vid dränerade försök under hela försöket).

För prover från stora djup kan använt backpressure behöva begränsas till 200-300 kPa för att begränsningar i provutrustningen inte skall överskridas.

5.1.3 Konsolidering

Upplastning görs under dränerade förhållanden normalt med effektivt vertikalt tryck till 85 % av provets vertikala förkonsolideringstryck och ett effektivt horisontalt tryck som beräknas med hjälp av uppskattat värde på K_0 . K_0 är enligt empiri beroende av främst flytgräns w_L och överkonsolideringsgrad OCR .

Denna konsolideringsfas följs genom registrering av utpressad vattenmängd samt vertikal deformation mot tiden. Speciellt noteras volyms- och vertikal töjningarna från den initiala vertikalspänningen (ca 10 kPa) till 0,85 av σ'_c . I redovisningen nedan skall σ_1 tolkas som vertikalspänning och σ_3 som horisontalspänning.

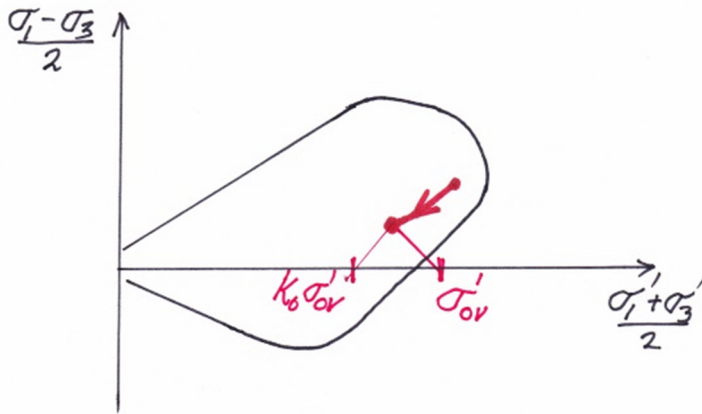


Figur 11 Spänningsväg vid konsolidering av provet inför ett triaxialförsök

5.1.4 Avlastning

Därefter avlastas provet under dränerade förhållanden till rådande spänningar in situ och provet får anpassa sig till detta spänningstillstånd, vanligen under natten. Celltrycket väljs med ledning av empiriska relationer för K_0 så att provet utsätts för ett spänningstillstånd som ungefärligen motsvarar spänningarna in situ (eller, om sådana finns, med ledning av direkt uppmätta värden på horisontaltrycket i fält). Andra spänningstillstånd kan vara aktuella, men också då krävs tid så att tillhörande konsolidering eller svällning hinner utbildas. Se vidare avsnitt 5.3.

För dränerade försök krävs speciella överväganden som behandlas i avsnitt 5.3.



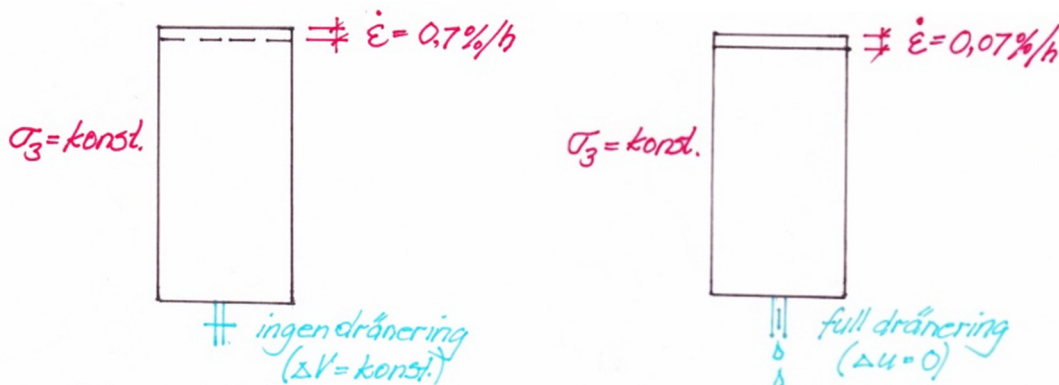
Figur 12 Spänningsväg vid avlastning

5.1.5 Skjuvning – aktiva försök

Provet skjuvas antingen under dränerade eller odränerade förhållanden. I aktiva försök görs detta normalt genom att vertikallasten ökas genom att provet deformeras vertikalt med en konstant hastighet.

Vid odränerade förhållanden deformeras provet vertikalt med en konstant hastighet som sätts till ca 0,7 %/tim.

Celltrycket skall då hållas konstant och dräneringskranarna skall vara stängda (=volymen konstant för ett vattenmättat prov).



Figur 13 Randvillkor vid under skjuvningsfasen vid odränerat respektive dränerat aktivt triaxialförsök

Vid dränerade förhållanden deformeras provet vertikalt med en konstant hastighet som sätts till 0,07 %/tim.⁴

⁴ Angivna hastigheter medför erfarenhetsmässigt att kravet på portrycksutjämning och dränering uppfylls i svenska leror med angivna provdimensioner och dräneringssystem.

Celltrycket hålls då konstant och dräneringskranarna skall vara öppna (innebär normalt att volymändringen då är så långsam att inga påtagliga porövertryck uppkommer i provet).

5.1.6 Skjuvning – passiva försök

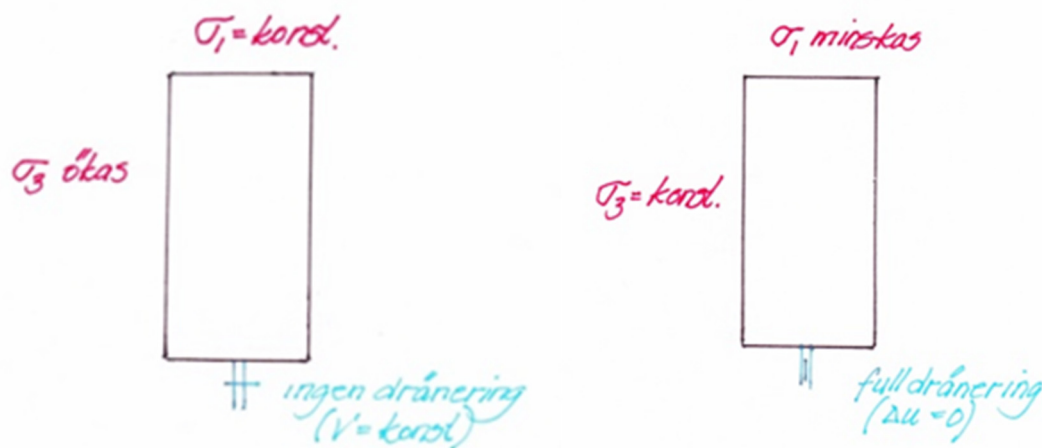
Passiva försök kan utföras på två alternativa sätt. Det vanligaste är att vertikallasten minskas samtidigt som horisontaltrycket hålls konstant.

Deformationshastigheten är då densamma som för aktiva försök.

Alternativt ökas horisontallasten genom att celltrycket ökas successivt med en konstant spänningsökning så att förväntad brottspänning nås efter ca 4 timmar.

Vertikalspänningen skall då hållas konstant och dräneringskranarna skall vara stängda (=volymen konstant för ett vattenmättat prov).

Dränerade passiva försök utförs sällan men kan utföras på motsvarande sätt som de passiva odränerade försöken men med öppna dräneringskranar och 10 ggr lägre deformationshastighet respektive 10 ggr längre tid till brott. Denna typ av försök beskrivs inte här.

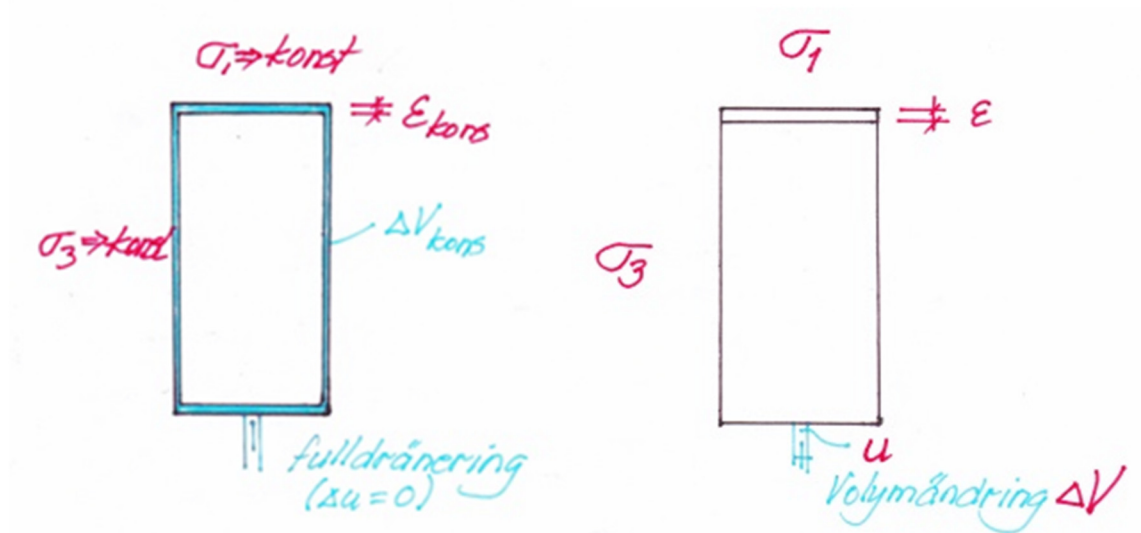


Figur 14 Alternativa randvillkor under skjuvningsfasen vid odränerat respektive dränerat aktivt respektive passivt triaxialförsök

5.1.7 Registrering under försöket

Det är viktigt att vertikaldeformationen samt volymändringen registreras under konsolideringsfasen och redovisas samt beaktas vid utvärderingen av försöket.

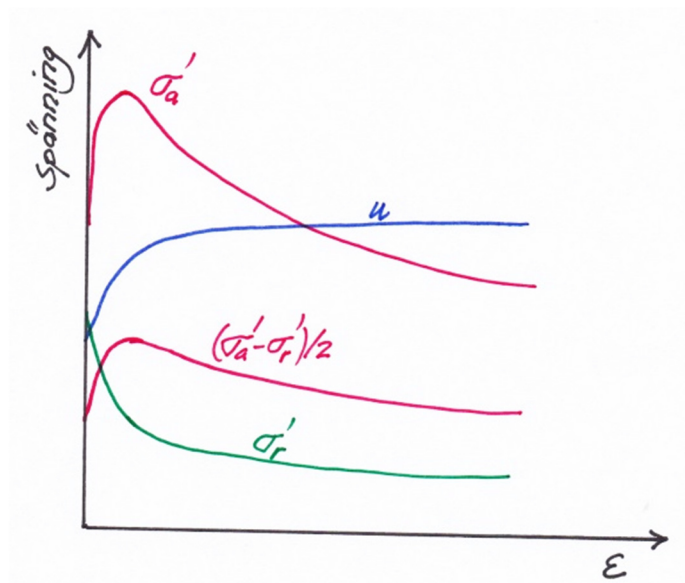
Under skjuvningsfasen mäts vertikallast, celltryck, portryck, vertikaldeformation och volymändring (volymen antas vara konstant vid odränerade försök).



Figur 15 Illustration av mäta parametrar under et triaxialförsök

5.2 REDOVISNING

Resultaten från ett triaxialförsök redovisas för samtliga försökstyper i två diagram, ett där σ'_a , σ'_r , u och skjuvspänningen τ , $((\sigma_a - \sigma_r)/2)$ ritas som funktion av vertikaltöjningen ϵ_a .

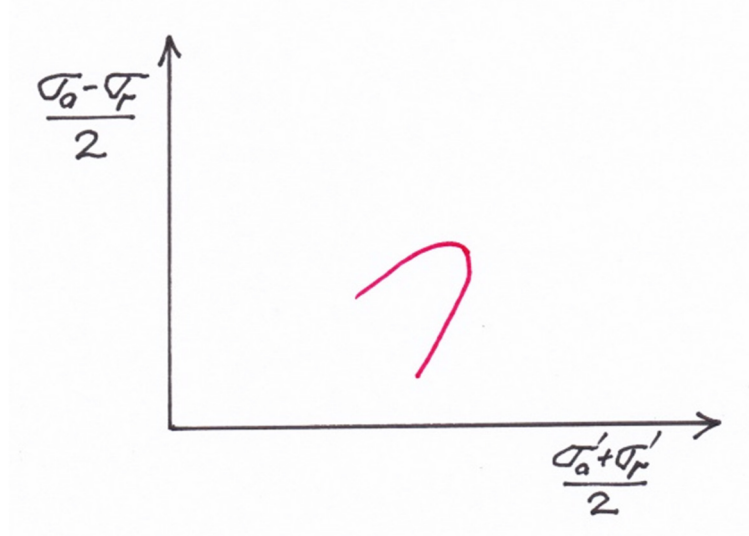


Figur 16 Spänning/töjnings-diagram

I det andra ritas den effektiva spänningsvägen som provet följt under försöket, normalt i ett $s' - t$ diagram, där:

$$s' = (\sigma'_a + \sigma'_r)/2 \quad (\text{Ekv 1})$$

$$t = (\sigma_a - \sigma_r)/2 \quad (\text{Ekv 2})$$



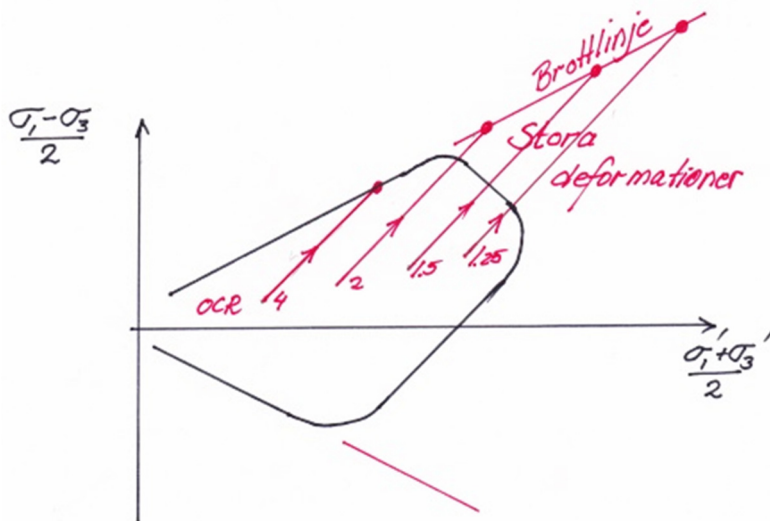
Figur 17 Spänningsväg för ett odränerat aktivt triaxialförsök

I diagrammet skall, utöver gängse data om borrhål djup etc. även anges datum för provtagningen och när försöket utfördes, samt temperaturen i laboratoriet. Dessutom anges hur stora töjningarna var under konsoliderings- och svällningsfasen. Det är även en stor fördel om man till diagrammet fogar ett foto på provet efter demontering. Exempel på diagram återfinns i Bilaga D.

5.3 PLANERING AV KONSOLIDERINGSSPÄNNINGAR

5.3.1 Odränerade försök

Den aktiva, odränerade skjuvhållfastheten, c_u^a är i stort oberoende av OCR för ett jordprov, så länge OCR är $< 1,5$. Om provet däremot kommer att avlastas, så att OCR påtagligt ökar, minskar c_u^a något. Detta kan beaktas på två sätt, antingen genom att provet konsolideras till de nya förväntade spänningarna med det högre värdet på OCR , alternativt genom att c_u^a i efterhand justeras med hänsyn till OCR . Det senare kan främst bli aktuellt för att bedöma vad som sker med hållfastheten om jorden under byggskedet avlastas och då eller senare kan konsolidera och svälla för den nya spänningssituationen.



Figur 19 Spänningsvägar vid dränerade triaxialförsök utförda för olika OCR

5.4 UTVÄRDERING

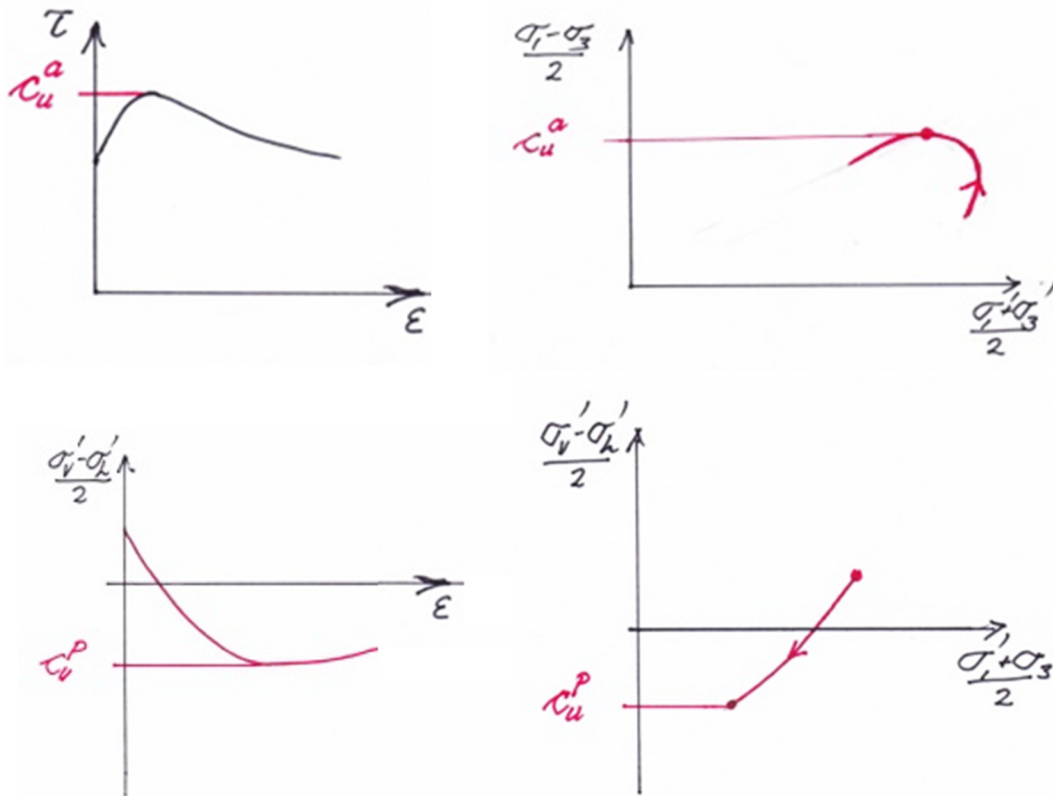
5.4.1 Odränerade försök

Den odränerade, aktiva skjuvhållfastheten, c_u^a , utvärderas som den största uppnådda skjuvspänningen under försöket. För leror där proverna är av god kvalitet, inträffar brott vanligen efter 1 à 2 % vertikal kompression.

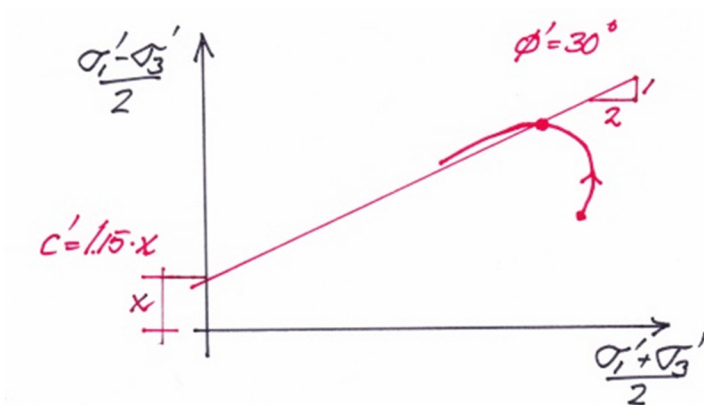
Den odränerade, passiva skjuvhållfastheten, c_u^p , utvärderas som den största uppnådda skjuvspänningen, efter det att skjuvspänningen passerat 0 under försöket. För leror där proverna är av god kvalitet, inträffar brott vanligen efter 3 à 5 % vertikal töjning.

Ett ungefärligt värde på c'^5 kan erhållas genom att anta att φ' är 30° . Då drar man en linje i lutning 1:2 genom toppunkten på spänningsvägen. Denna linjes skärningspunkt med ordinatan utgör ett värde på c' (egentligen är $c' = \text{detta värde} * \tan \varphi' / \sin \varphi' = \text{avläst värde} / \cos \varphi'$). Om $\varphi' = 30^\circ$ så är $c' = 1,15 * \text{avläst värde}$).

⁵ Observeras bör att c' och φ' i detta fall utvärderas ur försök med konstant volym och att detta c' är hastighetsberoende. Erfarenhetsmässigt har det visat sig att de värden som utvärderas på så vis ur aktiva odränerade försök med normal deformationshastighet är relativt lika de värden som utvärderas ur dränerade försök med vertikala effektiva brottspänningar under förkonsolideringstrycket.



Figur 20 Utvärdering av c_u^a och c_u^p



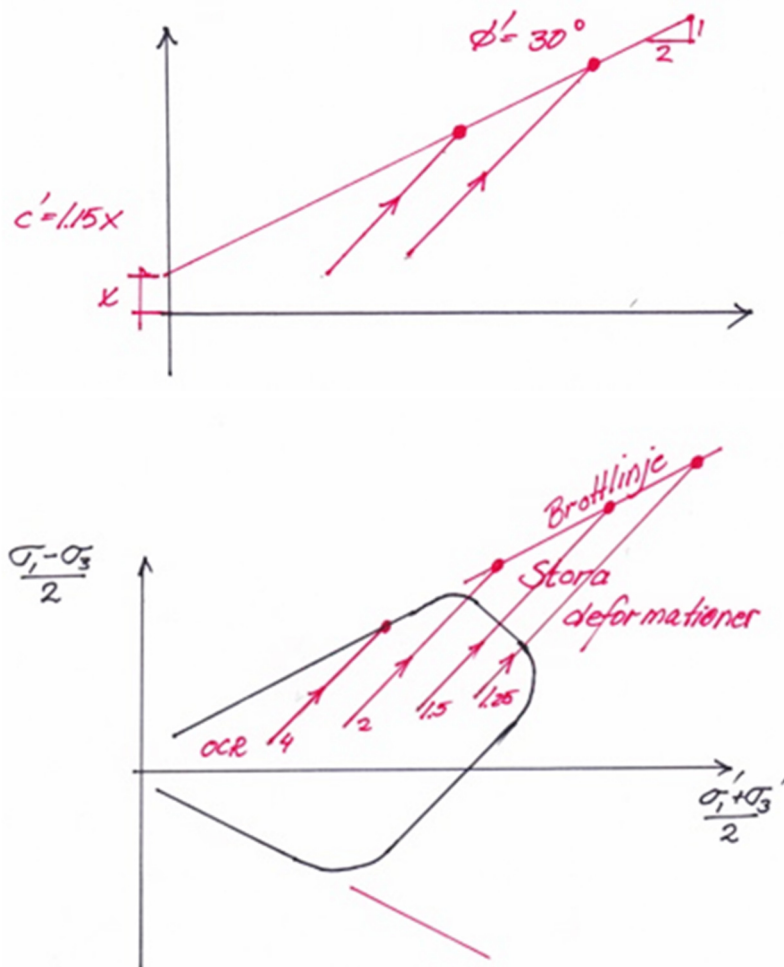
Figur 21 Utvärdering av c' , med antagandet att $\phi' = 30^\circ$

5.4.2 Dränerade försök

c' och ϕ' kan utvärderas om minst två till brott hörande Mohr's spänningscirklar ritas. Brottlinjen utgör då den gemensamma tangenten till cirklarna. Alternativt märks toppunkten på spänningvägarna ut och en rät linje dras genom dessa.

Lutningen hos denna linje för svenska leror är, i ett $s' - t$ -diagram normalt runt $26,6^\circ$ om verkligt brott inträffat, vilket motsvarar $\varphi' = 30^\circ$.

Notera särskilt vad som sades i föregående avsnitt om val av startpunkt. Om stora volymstörningar skett p.g.a. att förkonsolideringstrycket överskridits, kan det vara svårt att avgöra vilka spänningar som egentligen representerar brott.



Figur 22 Utvärdering av c' , och $\varphi' = 30^\circ$ ur dränerade triaxialförsök.

Speciellt skall laboratoriepersonalen göra en värdering, alternativt lämna en kommentar kring provkvalitet, samt redovisa observationer som gjorts under montering och utförande.

Vid bedömning av kvalitén på resultaten är det viktigt att studera och beakta:

5.4.3 Tid mellan provtagning och provning

Tiden mellan provtagning skall helst ej överstiga 1 vecka, och absolut inte vara mer än 1 månad. Om denna tid är alltför lång (>1 mån) kan provets hållfasthet ha ändrats till följd av uttorkning, oxidation mm.

5.4.4 Volymändring under konsolideringsfasen

Om upplastningen först sker till ca 10 kPa, som får verka några minuter innan en avläsning sker, fås en god anliggning och deformationen därefter fram till dess att belastningen är 0,85 % av σ'_c noteras. Den så uppmätta töjningen skvallrar om provets kvalitet. Den bör inte överstiga 3 à 4 %. Den initiala belastningen kan behöva varieras med lägre värden för extremt lösa leror och högre för leror med höga förkonsolideringstryck. Ingen påtaglig konsolidering efter den första anliggningstillpassningen och absolut ingen svällning bör observeras.

5.4.5 Töjning fram till brott

Ett relativt ostört prov går till brott vid en ganska begränsad skjuvtöjning, runt 1 till 2 % för aktivförsök och 3 till 5 % vid passivförsök. Ju större töjningen är desto sämre är som regel provkvaliteten. Om provet är gyttjigt blir dock töjningen ofta större och indikerar inte nödvändigtvis ett stört prov.

Töjningen fram till brott för ett dränerat försök är oerhört beroende av hur spänningvägen går i förhållande till förkonsolideringstrycket. Om förkonsolideringstrycket överskrids kan töjningen bli väldigt stor, annars i princip inte påtagligt större än för ett motsvarande odränerat försök. För passiva försök blir töjningen ofta något större än för ett odränerat försök, men inte påtagligt så.

Kapitel 6.

CRS-försök

CRS-försök på kohesionsjord skall utföras enligt Svensk Standard SS 02 71 26, dock med vissa förtydliganden och kompletteringar enligt nedan.

I samband med hållfasthetsprovning utförs CRS-försök främst för att bestämma förkonsolideringstrycket, vilket i sin tur används för att uppskatta den odränerade skjuvhållfastheten ur befintliga empiriska relationer samt att bedöma konsolideringsspänningarna vid efterföljande direkta skjuvförsök och/eller triaxialförsök. De används också för att bedöma provernas kvalitet vilket, som ovan nämnts, görs med ledning av kompressionskurvans initiala del före förkonsolideringstrycket enligt de rekommendationer som anges i t.ex. SGI Info 3, Skjuvhållfasthet – utvärdering i kohesionsjord, Fig. 4.a.

Resultat ur stegvisa ödometerförsök kan i princip användas för samma ändamål, men bedömningarna blir då, som regel, osäkrare. Stegvisa ödometerförsök krävs dock om krypningsparametrar skall kunna utvärderas.

6.1 UTFÖRANDE

För detaljerade anvisningar hänvisas till SS 02 71 26 och Laboratoriekommitténs anvisningar nr 10, Kompressionsegenskaper.

Det cylindriska provet, ca 20 mm högt, monteras i den med silikonfett insmorda ringen och monteras i sin hållare av stål. Stämpel placeras och belastas så snart som möjligt för att förhindra eventuell svällning vid kontakt med vatten. Detta gäller speciellt vid prover med högt förkonsolideringstryck.

Provet deformeras sedan med konstant hastighet, normalt ca 0,0025 mm/min (= 0,7 %/h).

För prover med högt förkonsolideringstryck, > ca 250 kPa, minskas hastigheten till ca hälften, 0,0012 mm/min. Detta kan även bli aktuellt för gyttjig lera.

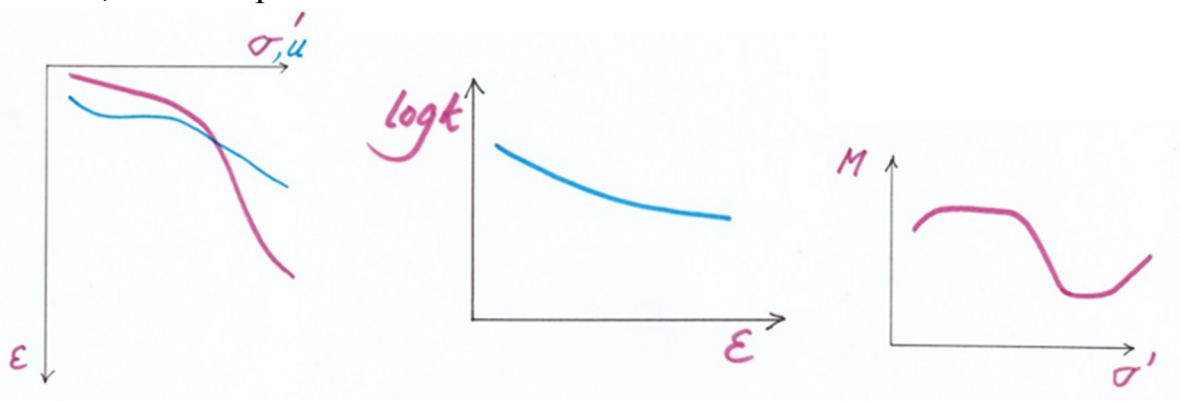
6.2 REDOVISNING

Ur de genomförda mätningarna beräknas effektivspänning, modul, konsolideringskoefficient och permeabilitet och följande diagram redovisas:

$\sigma' - \varepsilon$, $u - \sigma'$, $c_v - \sigma'$, $M - \sigma'$ och $\log(k) - \varepsilon$.

Exempel på kompletta diagram visas i Bilaga E.

I diagrammen skall, utöver gängse data om undersökningspunkt, djup, ur vilken hylsa provet tagits etc. även anges datum för provtagningen och när försöket utfördes, samt temperaturen i laboratoriet.



Figur 23 Redovisning av resultat från CRS-försök

6.3 TOLKNING OCH UTVÄRDERING

De parametrar som normalt tolkas från ett CRS-försök är:

σ'_c - förkonsolideringstryck

σ'_L - spänning då modulen börjar öka

M_o - modul då $\sigma' < \sigma'_c$ ⁶

M_L - modul då $\sigma'_c < \sigma' < \sigma'_L$

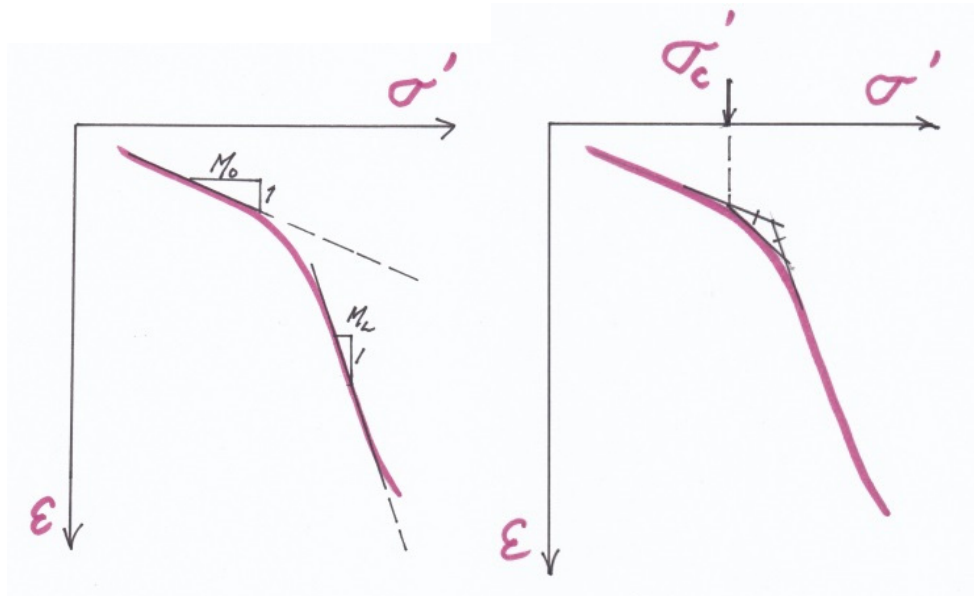
M' - anger ökning av modulen för $\sigma' > \sigma'_L$

k_i - permeabilitet vid $\varepsilon = 0$

β - förändring av permeabiliteten med töjningen

⁶ Detta värde används inte för sättningsberäkningar eller andra töjningar utan endast för bedömning av provkvalitet.

För en detaljerad beskrivning av utvärderingen av ovanstående parametrar hänvisas till SS 02 71 26.



Figur 24 Utvärdering av moduler och förkonsolideringstryck

6.4 VÄRDERING

Speciellt skall laboratoriepersonalen göra en värdering alternativt lämna en kommentar kring provkvalitet samt redovisa observationer som gjorts under montering och utförande.

Vid bedömning av kvalitén på resultaten är det viktigt att studera och beakta följande:

Tid mellan provtagning och provning

Om denna tid är alltför lång (>1 mån) kan provets deformationsegenskaper ha ändrats till följd av uttorkning, oxidation mm.

Töjning under konsolideringsfasen

Det är svårt att få perfekt anliggning mellan prov och stämpel direkt efter montering, varför en viss initialsättning sker. Denna kan minskas om man direkt efter det att stämpeln bringats på plats, trycker ganska hårt med handen på stämpeln (2 kg på stämpeln motsvarar 10 kPa) under några sekunder, så att fritt vatten strömmar ut genom stämpelns filter. Anliggningsfelet kan vidare minimeras genom att man vid utvärderingen av M_0 (för bedömning av provkvaliteten) väljer det maximala värdet på modulen för spänningar under förkonsolideringstrycket.

Kapitel 7.

Referenser

Larsson, R. (1977). Basic behavior of Scandinavian soft clays. SGI, Rapport 4. Linköping.

Larsson, R. (1981). Drained behavior of Swedish clays. SGI, Rapport 12. Linköping.

SGF (1986). Laboratoriekommitténs anvisningar nr 10.
Kompressionsegenskaper. Sällfors, G. & Andreasson, L.
Byggforskningsrådet T23:1986

SGF (1993a). Rapport 1:93. Rekommenderad standard för CPT-sondering.
Svenska Geotekniska Föreningen, SGF. Rapport 1:93

SGF (1993b). Rekommenderad standard för vingförsök i fält. Svenska Geotekniska Föreningen, SGF. Rapport 2:93

SGF (2004). Direkta skjuvförsök – en vägledning. Svenska Geotekniska Föreningen, SGF. Notat 2:2004.

SGF (2007). Laboratorieprovning för geotekniska utredningar. En vägledning. Svenska Geotekniska Föreningen, SGF. Notat 3:2007.

SGF (2009). Metodbeskrivning för provtagning med standardprovtagare. Ostörd provtagning i finkornig jord. Svenska Geotekniska Föreningen, SGF. Rapport 1:2009.

SGF (2012). Triaxialförsök – En vägledning. Svenska Geotekniska Föreningen, SGF. Rapport 2:2012

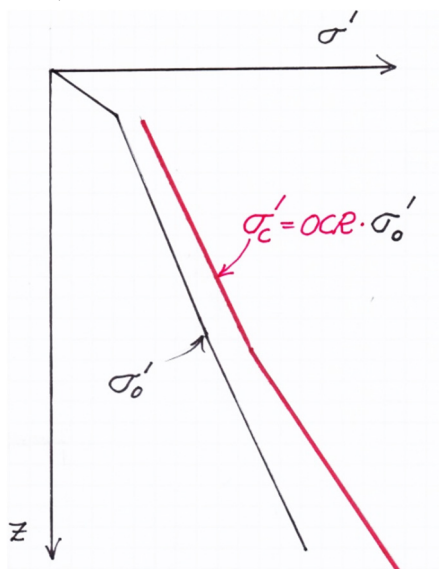
SIGI (2007). Skjuvhållfasthet – utvärdering i kohesionsjord. Statens geotekniska institut, SGI. Larsson, R., Sällfors, G., Bengtsson, P-E., Alén, C., Bergdahl, U. & Eriksson, L. SGI Information 3.

- SGI (2008).** Jords egenskaper. Statens geotekniska institut, SGI. Larsson, R. SGI Information 1.
- SGI (2015).** CPT-sondering utrustning – utförande – utvärdering. En in-situ metod för bestämning av jordlagerföljd och egenskaper i jord. Statens geotekniska institut, SGI. Rolf Larsson. SGI Information 15
- SIS (1991a).** Svensk standard SS 02 71 26. Geotekniska provningsmetoder – Kompressionsegenskaper - Ödometerförsök, CRS-försök – Kohesionsjord.
- SIS (1991b).** Svensk standard SS 02 71 27. Geotekniska provningsmetoder – Skjuvhållfasthet – Direkta skjuvförsök, CU- och CD-försök – Kohesionsjord.
- SIS (2004).** Svensk standard SIS-CEN/ISO/TS 17892–9:2004. Geoteknisk undersökning och provning – Laboratorieundersökning av jord – Del 9: Konsoliderat triaxialförsök på vattenmättad jord.
- Sällfors, G och Larsson, R. (2016).** Resultat från en internationell enkätundersökning.
<http://fudinfo.trafikverket.se/fudinfoexternwebb/pages/PublikationVisa.aspx?PublikationId=3084>
- Sällfors, G och Larsson, R. (2016).** Bestämning av odränerad skjuvhållfasthet med specialiserade metoder i praktiska tillämpningar. Sammanställning av ”Case Records”.
<http://fudinfo.trafikverket.se/fudinfoexternwebb/pages/PublikationVisa.aspx?PublikationId=3127>

Bilaga A.

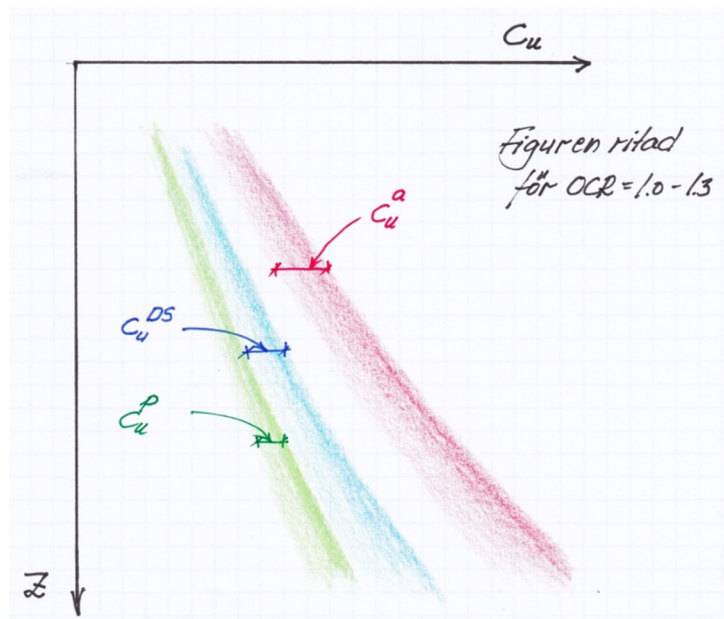
Arbetsgång vid bestämning av c_u

Antaganden baserade på empiri ger förväntade värden på c_u^a , c_u^{DS} och c_u^p .



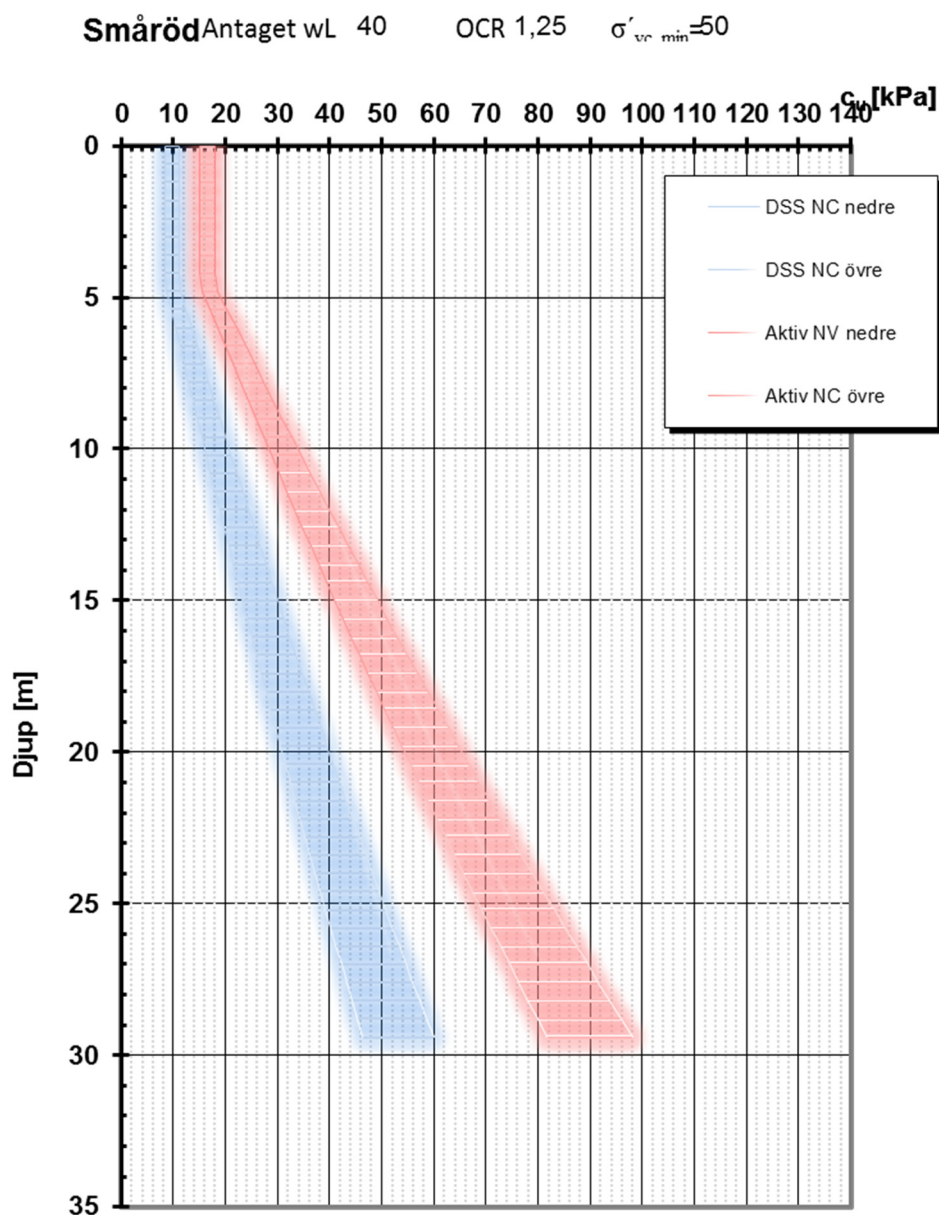
Antag:

$$c_u^p = 0.18 \cdot \sigma'_c$$
$$c_u^{DS} = 0.22 \cdot \sigma'_c$$
$$c_u^a = 0.33 \cdot \sigma'_c$$

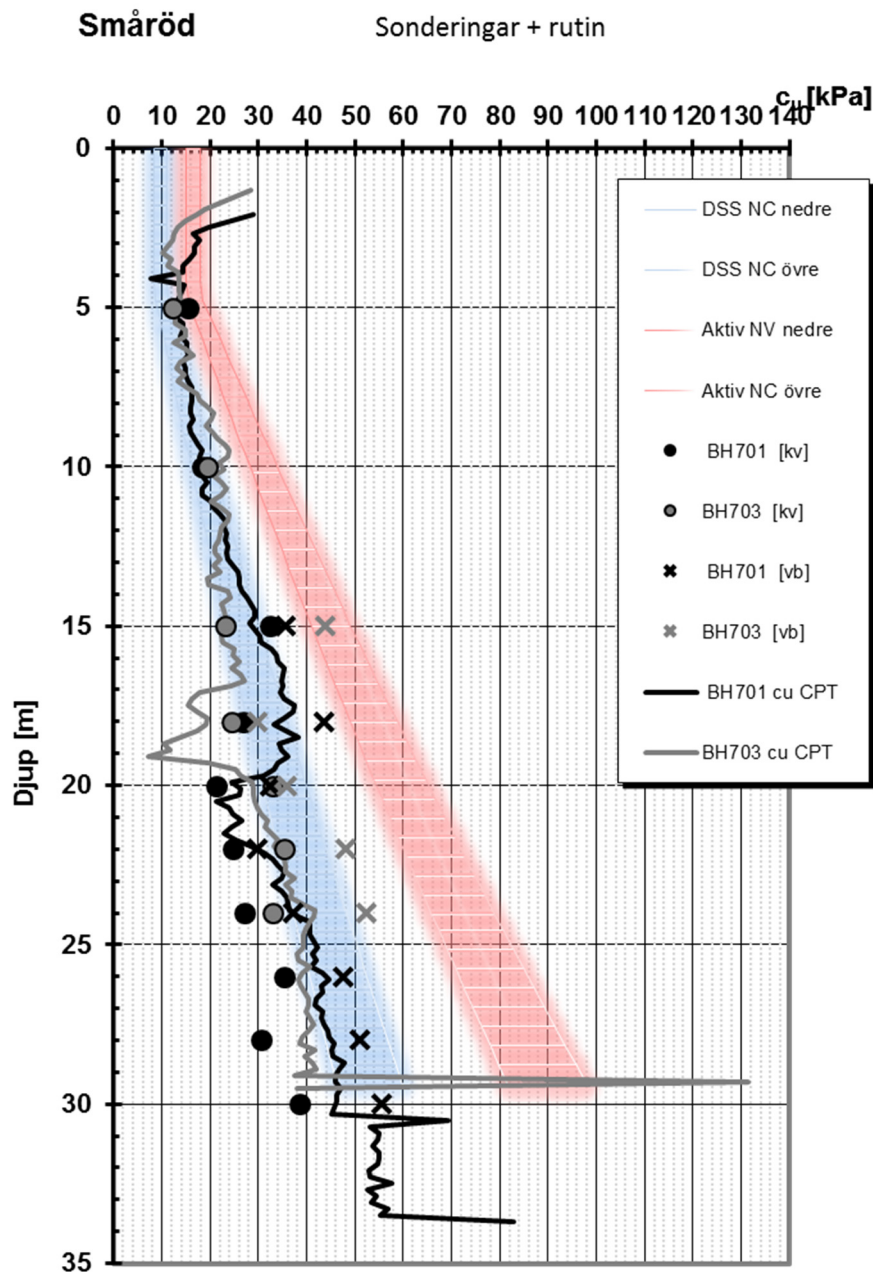


Successiv uppdatering av resultat – odränerad skjuvhållfasthet

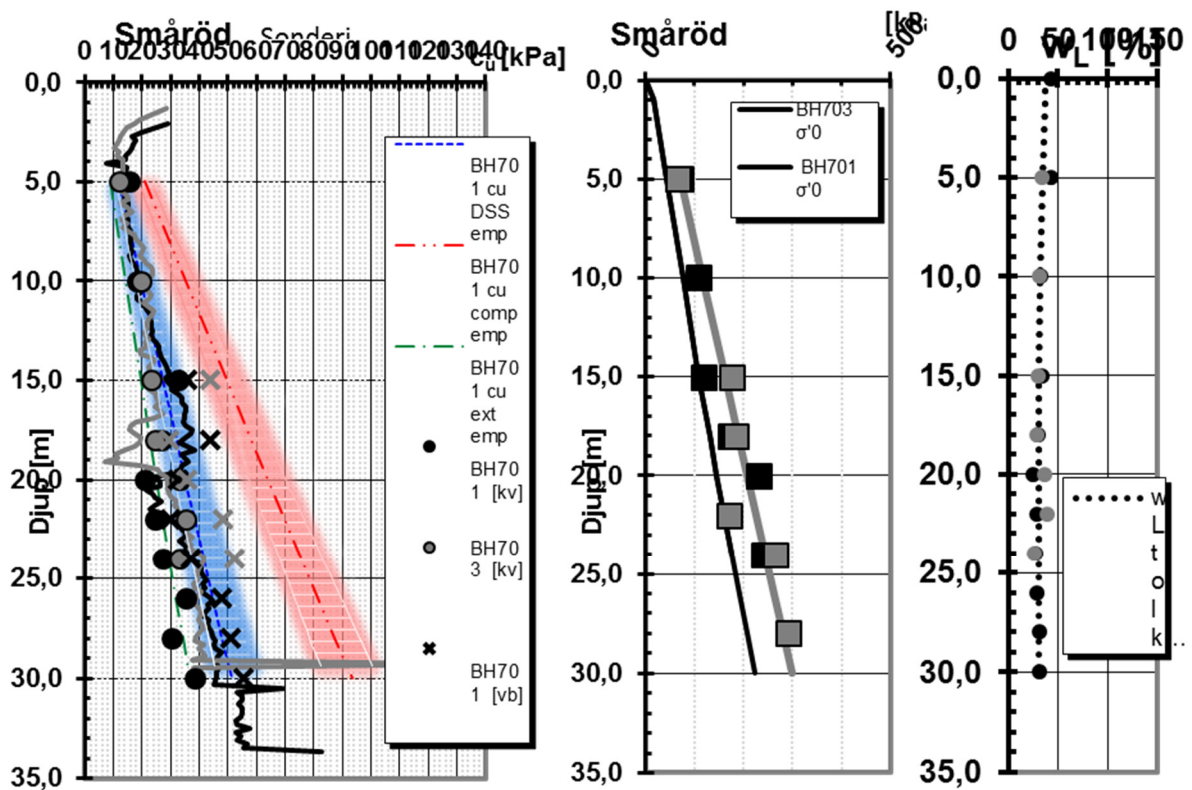
Baserat på erfarenheter från området väljs ett representativt värde på w_L , och OCR , samt minsta förkonsolideringstryck. Med hjälp av de empiriska sambanden för c_u^{DS} , c_u^a och c_u^p beräknas förväntade värden och ett intervall på $\pm 10\%$ ritas in, rött för c_u^a , grönt för c_u^p och blått för c_u^{DS} .



När resultaten från laboratorie- och fältundersökningar erhålls, läggs detta in i diagrammet.



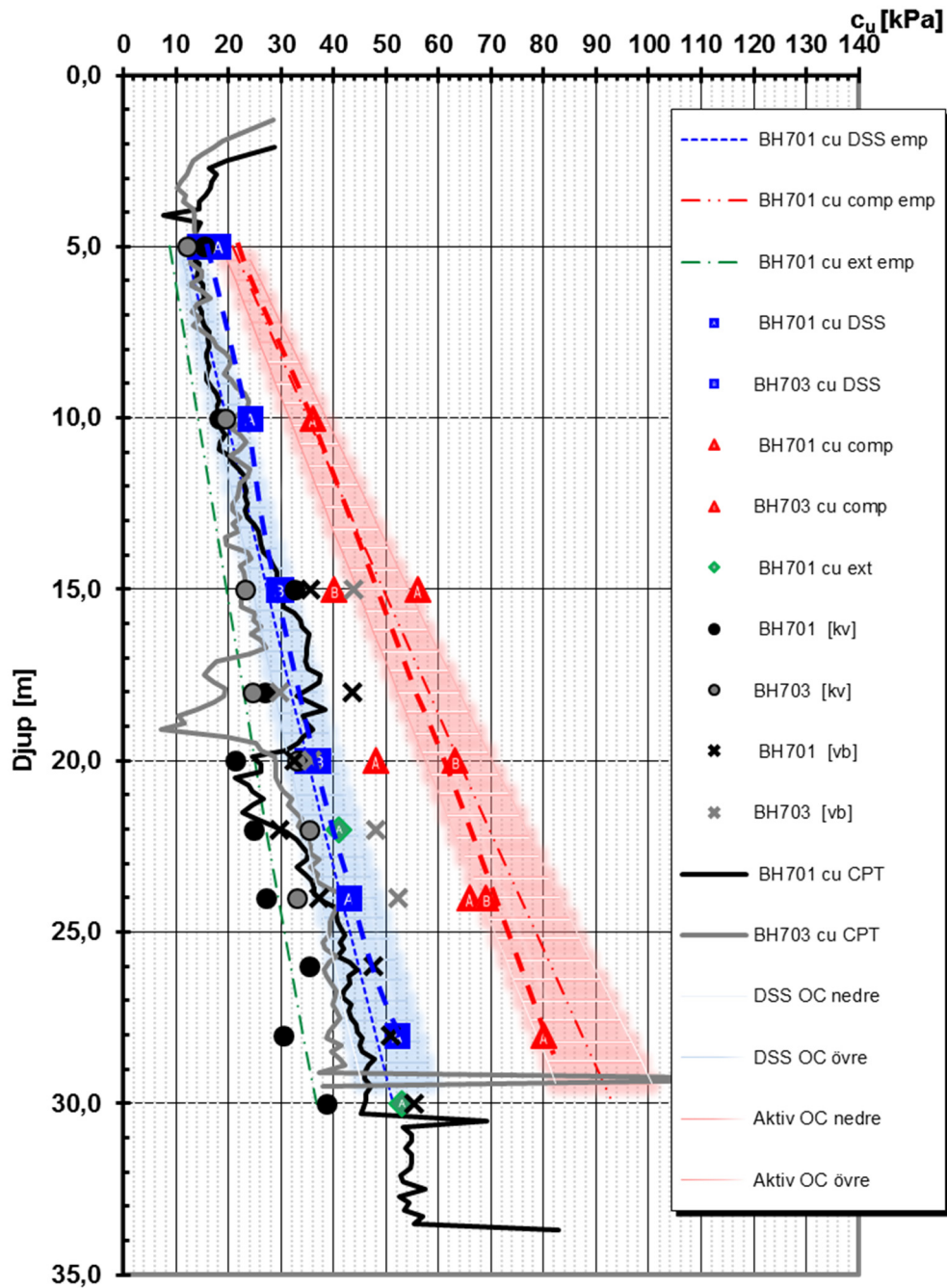
När sedan utvärderade förkonsolideringstryck blir tillgängliga, redovisas dessa i ett spänningsdiagram tillsammans med rådande effektivspänningar. Då kan *OCR* utvärderas och de enligt empirin förväntade hållfastheterna justeras och redovisas.



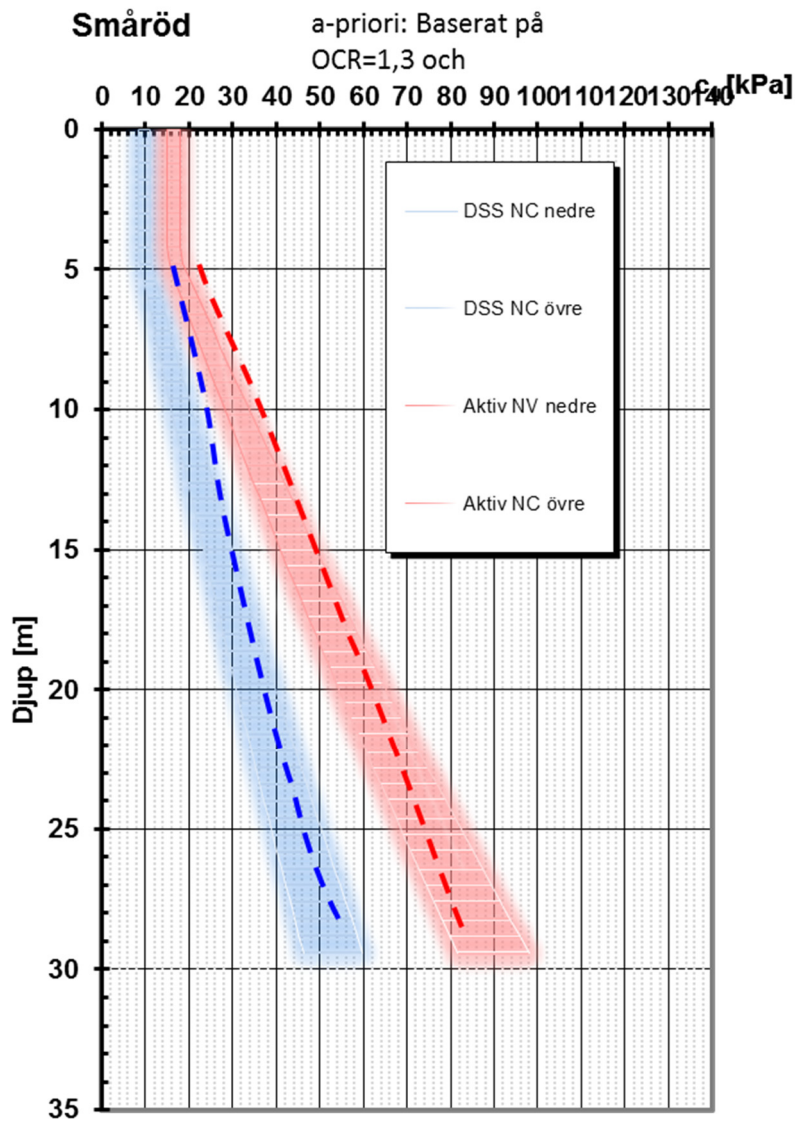
För de fall där direkta skjuvförsök och eventuellt även triaxialförsök utförs läggs dessa resultat in i motsvarande diagram. Därmed kan en trend mot djupet för de olika hållfastheterna tolkas. Därvid skall stor vikt läggas vid de direkta skjuvförsöken när trenden för c_u väljs.

Småröd

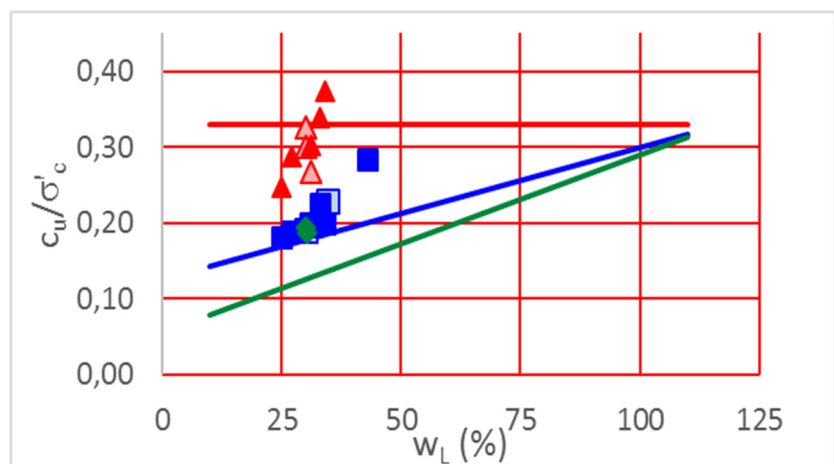
Vald hållfasthet



Det är sedan av stort intresse att se hur de valda hållfastheterna förhåller sig till de som man inledningsvis skattade, baserade på tidigare erfarenheter.



Här visas samspelet för kvoten mellan odränerad skjuvhållfasthet och vertikalt förkonsolideringstryck för de tre brottmoderna direkt (c_u^{DS}), aktiv (c_u^a) och passiv (c_u^p) skjuvning.



Bilaga C.

Triaxialförsök

K_0 -konsoliderat, aktivt, odränerat triaxialförsök. Spänningsväg.

Sidhuvud att fylla, Logotyp + namn

Triaxialförsök

Projektnamn:	Jordart:	Tub nr:
Beställare:	Provdiameter (mm):	Tubdel:
Uppdragsnummer:	Provhöjd (mm):	Densitet (t/m ³):
Apparat:	Def. Hast. (%/h):	Vattenkvot (%):
Sektion/borrhål:	Försökstyp:	Provningsdatum:
Djup (m):	Konsoliderings- $\sigma_{v'}$:	Utfört av:
Provtagningsdatum:	spänning: $\sigma_{v'}$:	Godkänt av:
Försökstemp. (°C):	Avkastat till: $\sigma_{v'}$:	Datum:

Ö	
M	
U	

Anmärkning:

Borrhål **Djup**

$c_u^a = \quad kPa$ $c_u^p = \quad kPa$

Försöket är utfört och utvärderat enligt
 Svensk Standard SS 027126 samt redovisat
 enligt SGF:s Laboratoriekommittés rekommendationer. 2016-02-02

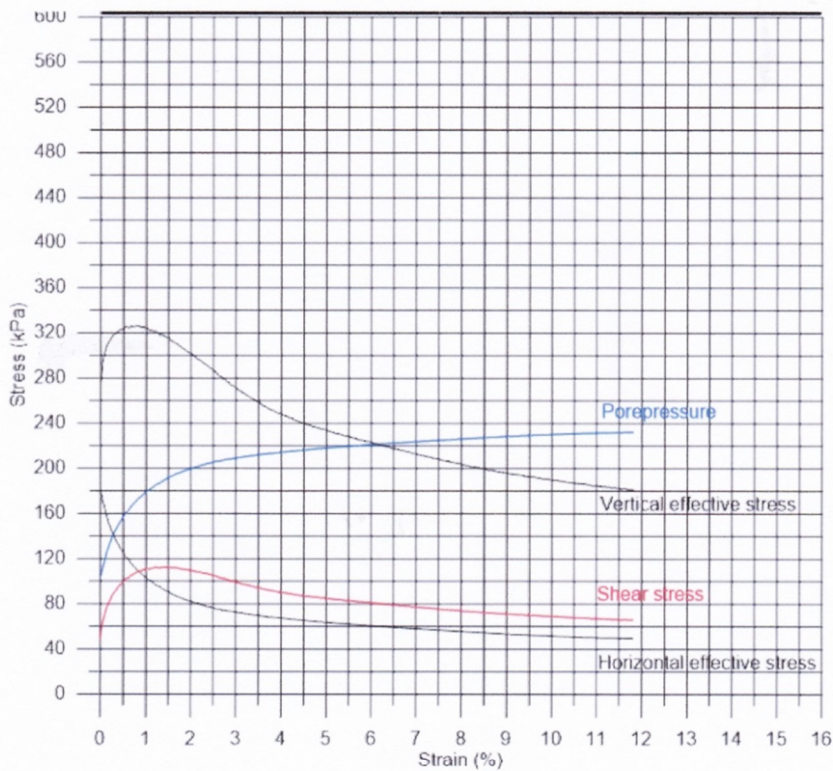
K_0 -konsoliderat, aktivt, odränerat triaxialförsök. Spännings-töjningsdiagram.

Sidhuvud att fylla, Logotyp + namn

Triaxialförsök, konsoliderat, odränerat

Projektnamn:	Provdiameter (mm):	<table border="1"> <tr><td>M</td></tr> <tr><td>U</td></tr> </table>	M	U	Tub nr:
M					
U					
Beställare:	Provhöjd (mm):	Tubdel:			
Uppdragsnummer:	Def. Hast. (%/h):	Densitet (t/m ³):			
Apparat:	Konsoliderings- spänningar: σ'_v :	Vattenkvot (%):			
Sektion/borrhål:	Avkastat till: σ'_v :	Provningsdatum:			
Djup (m):	σ'_v :	Utfört av:			
Provtagningsdatum:	σ'_v :	Godkänt av:			
Försökstemp. (°C):	Volymändring vid konsolidering:	Datum:			
Jordart:	Bedömd provkvalitet:				
Anmärkning:					

Borrhål Djup



$$c_u^a = \quad kPa$$

$$c_u^p = \quad kPa$$

Försöket är utfört och utvärderat enligt
Svensk Standard SS 027126 samt redovisat
enligt SGF:s Laboratoriekommittés rekommendationer.

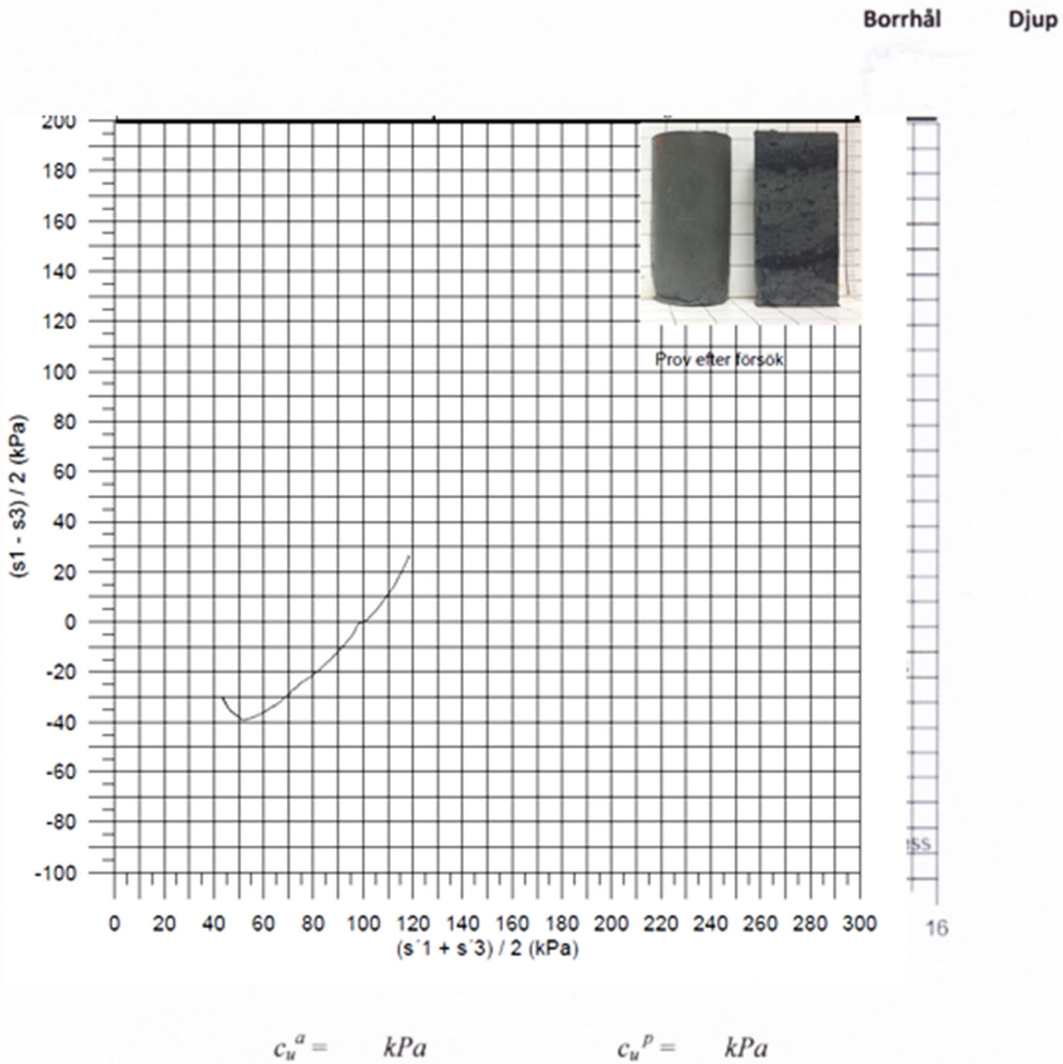
2016-02-02

K_0 -konsoliderat, passivt, odränerat triaxialförsök. Spänningsväg.

Sidhuvud att fylla, Logotyp + namn

Triaxialförsök, konsoliderat, odränerat

Projektname:	Provdiameter (mm):	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>M</td></tr> <tr><td> </td></tr> <tr><td>U</td></tr> <tr><td> </td></tr> </table>	M		U		Tub nr:
M							
U							
Beställare:	Provhöjd (mm):		Tubdel:				
Uppdragsnummer:	Def. Hast. (%/h):		Densitet (t/m ³):				
Apparat:	Konsoliderings- spänningar: σ'_{1c}		Vattenkvot (%):				
Sektion/borrhål:	Avkastat till: σ'_{1c}		Provningsdatum:				
Djup (m):	σ'_{1c}		Utfört av:				
Provtagningsdatum:	Volymändring vid konsolidering:		Godkänt av:				
Försöktemp. (°C):	Bedömd provkvalitet:		Datum:				
Jordart:							
Anmärkning:							



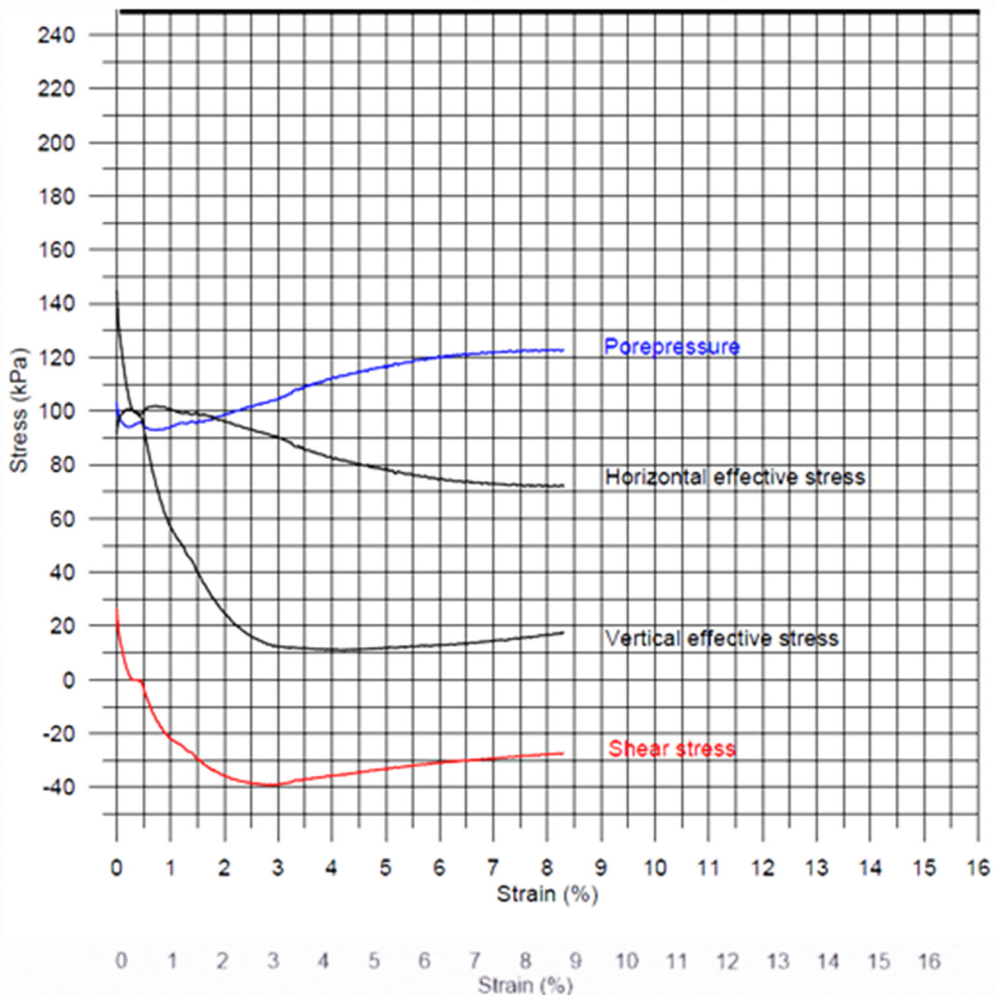
K_0 -konsoliderat, passivt, odränerat triaxialförsök. Spännings-töjningsdiagram.

Sidhuvud att fylla, Logotyp + namn

Triaxialförsök, konsoliderat, odränerat

Projektnamn:	Provdiameter (mm):	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>M</td><td></td></tr> <tr><td>U</td><td></td></tr> </table>	M		U		Tub nr:
M							
U							
Beställare:	Provhöjd (mm):	Tubdel:					
Uppdragsnummer:	Def. Hast. (%/h):	Densitet (t/m ³):					
Apparat:	Konsoliderings- spänningar: σ'_a :	Vattenkvot (%):					
Sektion/borrhål:	Avkastat till: σ'_a :	Provningsdatum:					
Djup (m):	Volymändring vid konsolidering:	Utfört av:					
Provtagningsdatum:	Bedömd provkvalitet:	Godkänt av:					
Försökstemp. (°C):		Datum:					
Jordart:							

Anmärkning:



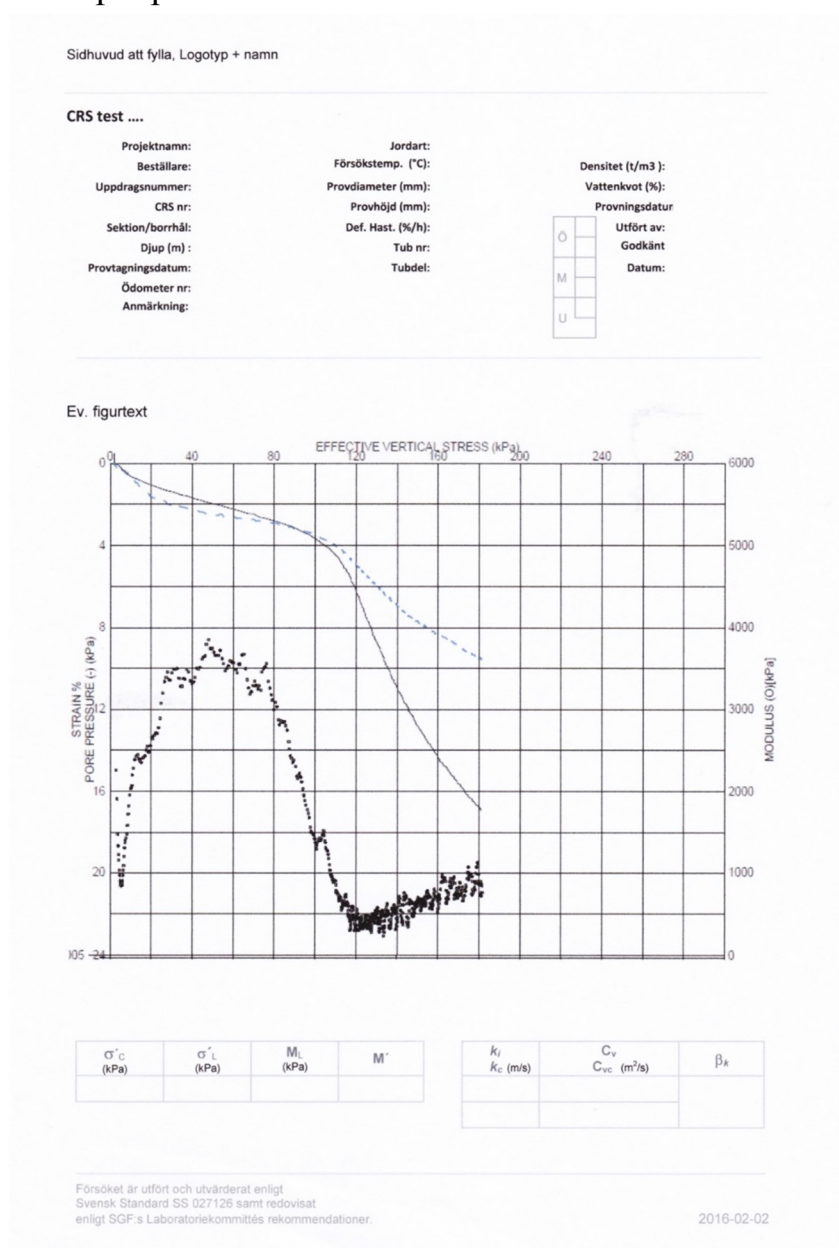
$$c_u^a = \quad kPa$$

$$c_u^p = \quad kPa$$

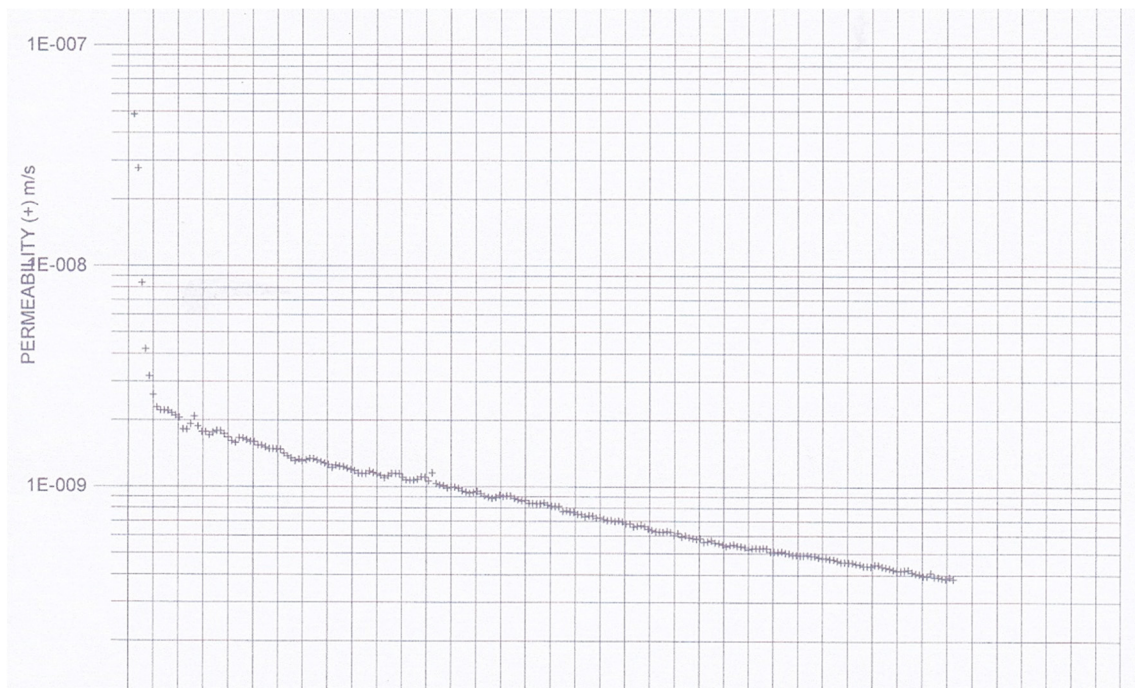
Bilaga D.

CRS-försök

Exempel på resultat från CRS-försök.



CRS-försök, spänning-töjningsdiagram, samt redovisning av portryck och c_v -värde. CRS-försök, $\log(k) -$ töjning.



SGF Rapport/Report

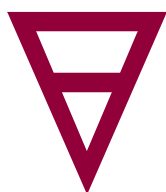
- 1:93 Rekommenderad standard för CPT-sondering.
- 1:93E Recommended Standard for Cone Penetration Tests.
- 2:93 Rekommenderad standard för vingförsök i fält.
- 2:93E Recommended Standard for Field Vane Shear Test.
- 1:95 Rekommenderad standard för dilatometerförsök.
- 1:95E Recommended Standard for Dilatometer Tests.
- 2:95 Några pionjärprofiler i svensk geoteknik. SJ Geotekniska Kommission 1914–1922.
- 3:95 Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT'95.
- 4:95 Kalk- och kalkcementpelare. Vägledning för projektering, utförande och kontroll.
- 4:95E Lime and Lime Cement Columns. Guide for Project Planning, Construction and Inspection.
- 1:96 Geoteknisk fälthandbok. Allmänna råd och metodbeskrivningar.
- 1:99 Tätskikt i mark. Vägledning för beställare, projektörer och entreprenörer.
- 2:99 Metodbeskrivning för Jord-bergsondering.
- 3:99 Metodbeskrivning för Viktsondering.
- 1:2000 Geotekniken i Sverige 1920–1945.
- 2:2000 Kalk- och kalkcementpelare. Vägledning för projektering, utförande och kontroll.
- 1:2001 Fälthandbok – Miljötekniska markundersökningar (ersätts av 1:2004).
- 1:2003 Att bygga med avfall. Miljörättsliga möjligheter och begränsningar för återvinning av avfall i anläggningsändamål
- 1:2004 Fälthandbok – Miljötekniska markundersökningar.
- 2:2004 Armerad jord och fyllning – Nordisk vägledning.
- 3:2004 NGM 2004 – XIV Nordic Geotechnical Meeting. May 19th – 21th 2004.
- 1:2006 Metodbeskrivning för Jb-totalsondering
- 2:2006 Metodbeskrivning för installation av inklinometerrör
- 1:2008 Användning av restprodukter inom EU
- 1:2009 Metodbeskrivning för provtagare med standardkolvprovtagare. - Ostörd provtagning i finkornig jord
- 2:2009 Åtgärds mål vid in-situsanering. Formulering och kontroll av åtgärds mål.
- 1:2010 Förorenade byggnader. Provtagning och riskbedömning.
- 1:2011 Stimulerad reaktiv deklorerings. En praktisk handledning
- 2:2011 Klorerade lösningsmedel i mark och grundvatten – Att tänka på inför provtagning och upphandling
- 3:2011 Hantering och analys av prover från förorenade områden - Osäkerheter och felkällor
- 1:2012 EYGEC 2012 - Setting the scene for future European geotechnical research
- 2:2012 Triaxialförsök – en vägledning
- 3:2012 SGF:s dataformat
- 4:2012 Metodbeskrivning för jord- bergsondering
- 1:2013 Fälthandbok – Geoteknik
- 2:2013 Fälthandbok – undersökningar av förorenade områden
- 1:2014 Hantering av geotekniska risker i projekt – krav. Metodbeskrivning
- 2:2014 Riskidentifiering - Metoder för att hitta hot och möjligheter. Metodbeskrivning
- 1:2015 Förbättrad utvärdering av resultat från jord-bergsondering/MWD
- 1:2016 Jordarters indelning och benämning

Svenska Geotekniska Föreningen (SGF) bildades 1950 och består av drygt 1400 enskilda medlemmar, med minst två års praktisk erfarenhet av geoteknik. Dessutom ingår ca 30 korporativa medlemmar i form av institutioner, högskolor, myndigheter, konsult- och entreprenadföretag samt tillverkare inom det geotekniska området.

SGF har till ändamål att främja utvecklingen inom geoteknik med grundläggning, ingenjörsgéologi och miljöteknik i ett nationellt och internationellt perspektiv.

Föreningen företräder i Sverige den internationella föreningen, the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE).

I SGF:s Rapport- och Notatserie utges föreningens metodbeskrivningar, monografier och dokumentation från konferenser, temadagar m.m.



Svenska Geotekniska Föreningen
Swedish Geotechnical Society

c/o Ermax, 439 37 Fjärås Tel: 070-813 77 73
Internet: www.sgf.net E-post: info@sgf.net