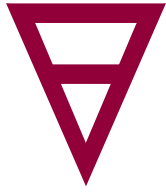


Svenska Geotekniska Föreningen
Swedish Geotechnical Society

Rapport 1:2026

CRS, DSS och Triax

Handledning för utförande,
redovisning och utvärdering



Svenska Geotekniska Föreningen
Swedish Geotechnical Society

SGF Rapport 1:2026

CRS, DSS och Triax

Handledning för utförande, redovisning och
utvärdering

Linköping 2026

SGF Rapport	Svenska Geotekniska Föreningen E-post: info@sgf.net
Beställning	Svenska Geotekniska Föreningen c/o Ernax Sveaborgsvägen 16 439 73 FJÄRÅS Tel: 031-733 47 03 E-post: info@sgf.net
ISSN	1103-7237
ISRN	SGF-R-26/1-SE
Tryckeri	Digital upplaga

Förord

Svenska Geotekniska Föreningen (SGF) ger ut metodbeskrivningar för bl.a. geotekniska undersökningar i fält och på laboratorium där motsvarande standarder inte finns.

SGF är en allsidig sammansatt ideell förening där de flesta yrkesverksamma geotekniker och företag i branschen är representerade, inklusive beställare av geotekniska utredningar. Metodbeskrivningarna har utarbetats i olika kommittéer med representanter för dessa parter och är därigenom väl förankrade i branschen. Avsikten är att metodbeskrivningarna ska utgöra underlag för upphandling och kvalitetsstyrning av geotekniska arbeten.

Denna Metodbeskrivning är utarbetad av en arbetsgrupp bestående av följande personer (huvudansvar anges inom parentes):

Nancy Bono, Ramböll (Triaxialförsök)

Martin Holmén, SGI (Triaxialförsök)

Hanna Karlström, Afry (DSS)

Per-Gunnar Lasson, Bohusgeo (CRS)

Göran Sällfors, Chalmers/GeoForce (CRS)

Tobias Thorén, Bohusgeo (DSS)

SGF:s AG-lab (Per Carlsson (Loxia), Meraf Berhe (Mitta), Anders Dahlberg (Trafikverket), Rikard Kalén (SGI), Rebekka Luring (Norconsult)) har granskat rapporten.

Rapporten har remissbehandlats av Håkan Garin (GeoVerkstan) varefter den har fastställts av SGF:s styrelse.

Svenska Geotekniska Föreningen
Linköping i maj 2026

Innehåll

1. Bakgrund	1
2. Allmänna krav/önskemål	2
2.1 Standarder	2
2.2 Hantering av prover	3
2.3 Val av provtub	4
2.4 Observationer som är av värde för beställaren	4
3. CRS-försök	5
3.1 Bakgrund	5
3.2 Utrustning	6
3.3 Utförande	6
3.3.1 Montering	6
3.3.2 Töjningshastighet	7
3.4 Redovisning	7
3.5 Utvärdering och tolkning	9
3.6 Kvalitetskontroll	9
4. Direkta skjuvförsök.....	11
4.1 Bakgrund	11
4.2 Utrustning	12
4.3 Indata	13
4.4 Odränerade respektive dränerade försök	15
4.5 Utförande	17
4.5.1 Montering	17
4.5.2 Konsolidering	18
4.5.3 Skjuvning	20
4.6 Redovisning	21
4.7 Utvärdering och tolkning	22
4.8 Kvalitetskontroll	23

5. Triaxialförsök	25
5.1 Bakgrund	26
5.2 Utrustning	27
5.3 Indata	27
5.3.1 Konsolideringsspänningar	28
5.3.2 Startspänningar	28
5.4 Odränerade respektive dränerade försök	29
5.5 Aktiva respektive passiva försök	31
5.6 Utförande	32
5.6.1 Provpreparering	33
5.6.2 Montering	33
5.6.3 Etablering av en stabil spänningssituation	35
5.6.4 Vattenmättnad	36
5.6.5 Konsolidering	38
5.6.6 Skjuvning	40
5.7 Redovisning	42
5.8 Utvärdering och tolkning	43
5.8.1 Konsolideringsfasen	44
5.8.2 Skjuvningsfasen	45
5.9 Kvalitetskontroll	46
6. Faktorer att beakta vid härledning av egenskaper	48
6.1 Inverkan av belastningshastighet	48
6.2 Inverkan av OCR på de dränerade hållfasthetsparametrarna	51
7. Referenser	53

Bilagor

A. Exempel på Redovisning CRS-försök

B. Exempel på Redovisning Direkta skjuvförsök

C. Exempel på Triaxialförsök

D. Förenklad flytyta och empiri

Kapitel 1.

Bakgrund

När det gäller utförande av CRS-, Direkta skjuv- och Triaxialförsök finns en inte helt konsekvent uppsättning av standarder, rekommendationer och erfarenheter av hur försöken bör utföras och redovisas. Samtidigt pågår framtagandet av EN-standarder för några av försökstyperna.

Det har därför tagits fram denna sammanställning av svensk ”Best Practice” för dessa typer av försök, för att verka för att det blir ett enhetligt utförande för försökstyperna vid de olika laboratorierna.

Kapitel 2.

Allmänna krav/önskemål

2.1 STANDARDS

De standarder som finns gällande i skrivande stund redovisas nedan.

Standarder CRS-försök:

- SS 027126:1991 Geotekniska provningsmetoder –
Kompressionsegenskaper – Ödometerförsök, CRS-försök - Kohesionsjord

Standarder direkta skjuvförsök:

- SS-EN ISO 17892-10:2019 Geoteknisk undersökning och provning –
Laboratorieundersökning av jord – Del 10: Provning med skjuvbox och
ringskjuvapparat
- SS 027127: 1991 Geotekniska provningsmetoder – Skjuvhållfasthet –
Direkta skjuvförsök, CU- och CD-försök - Kohesionsjord

Standarder triaxialförsök:

- SS-EN ISO 17892-8:2018 Geoteknisk undersökning och provning –
Laboratorieundersökning av jord – Del 8: Okonsoliderad odränerad
triaxialprovning
- SS-EN ISO 17892-9:2018 Geoteknisk undersökning och provning –
Laboratorieundersökning av jord – Del 9: Konsoliderad aktiv
triaxialprovning på vattenmättad jord

Utförandestandarder i sitt format är framtagna för att utgöra grund för likvärdigt arbete oberoende av utförare. Standarder är generellt inte bindande såvida de inte åberopas i regelverk, kontrakt, beskrivning eller motsvarande. Standarder

tas fram gemensamt inom bl.a. ISO med medverkan från ISO's medlemsländer där Sverige är aktiv medlem via SIS.

De standarder som är bindande är Eurokoderna, SS-EN 1990 m.fl., då dessa refereras till via nationella förordningar och nationellt byggregelverk. För flertalet av ovanstående standarder råder förhållandet att det i SS-EN 1997-2 är ett mycket starkt råd att använda dessa.

Utifrån branschpraxis kan ovanstående standarder även i andra avseenden anses styrande. Det är viktigt att förvissa sig om att den kvalitet som efterfrågas i ett projekt kan uppnås m.h.a. de aktuella standarderna. Om inte, ska man beskriva de justeringar eller tillägg som erfordras för att uppnå detta i det aktuella projektet. Vidare är det så att i de flesta standarder finns flertalet olika varianter och konfigureringar som kravställs, varför dessa måste pekats ut vid nyttjande av standarden.

På samma sätt gäller det att om en standard anses ge annan kvalitet än vad som krävs för den aktuella tillämpningen, så har man rätt att frånga standarden och ställa andra krav. Även i detta fall gäller att kraven ska vara tydliga. Det är dock viktigt att redovisa vilka eventuella avsteg man har gjort vid redovisning av provningsresultat så att mottagaren kan avgöra avstegets inverkan.

Anledningen till dessa möjligheter att frånga standarder beror på den s.k. proportionalitetsprincipen, som innebär att det ska vara en proportionalitet mellan kraven och nyttan. Det är beställaren som avgör vilken kvalitet som ska levereras.

2.2 HANTERING AV PROVER

Det är en självklarhet att ostörd provtagning förutsätter att provtuber under hela processen från att de tas i fält, transporteras till laboratoriet och övrig förvaring och hantering fram till montering, hanteras varsamt genom att inte utsättas för stötar eller plötsliga temperaturskillnader.

De får ej heller utsättas för frost och ska förvaras och provas i en temperatur som någorlunda väl överensstämmer med temperaturen in situ.

2.3 VAL AV PROVTUB

De provtuber som används för kolvprovtagning ska uppfylla de specifikationer som finns rörande kolvprovtagning. Tuber med avvikande måttoleranser eller lägre styvhet ska inte användas.

Av de tre provtuber, som erhålls vid kolvprovtagning, är det undre delen av mellantuben och övre delen av undertuben som normalt har bäst kvalitet och ska användas till de i denna rapport beskrivna försökstyperna.

2.4 OBSERVATIONER SOM ÄR AV VÄRDE FÖR BESTÄLLAREN

Laboratoriepersonalen ska notera och rapportera avvikelser, oväntade förhållanden och andra observationer som kan vara av betydelse för den fortsatta handläggningen. Det kan gälla förekomst av snäckskal, siltkörtlar, rottrådar eller andra detaljer som kan påverka resultaten såväl som icke fullt fyllda provtuber eller tecken på störningar.

Kapitel 3

CRS-försök

3.1 BAKGRUND

Under stora delar av 1900-talet genomfördes i princip alla ödometerförsök med stegvis belastning, där lasten dubblades för varje laststeg. Laststegets varaktighet var normalt 24 timmar. Metodiken innebar att man inte erhöll någon väldefinierad spännings-töjningskurva, varvid man började experimentera med mindre lastökningar i varje laststeg.

Ett genombrott kom på 1970-talet, då bl.a. ett forskningsprojekt på Chalmers resulterade i en helt ny typ av försök, CRS-försöket (Constant Rate of Strain). CRS-försöket blev svensk standard 1991 och därefter har CRS-försök varit det dominerande ödometerförsöket på marknaden.

Fördelen med den nya försökstypen var att hela spännings-töjningskurvan definierades entydigt och att utvärderingen av förkonsolideringstryck (σ'_c), modul (M) och permeabilitet (k) kunde göras på ett mer konsekvent och objektivt sätt.

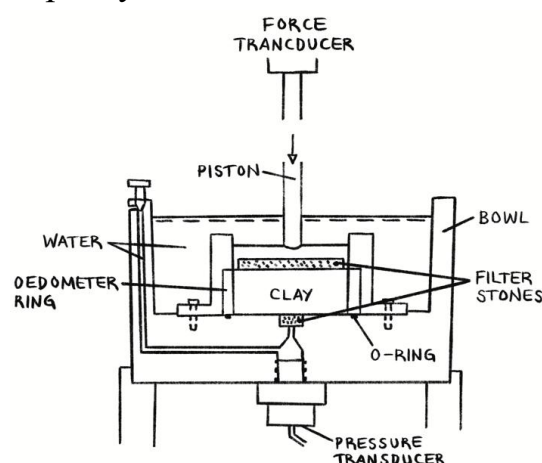
Utvärderingsmetoden för σ'_c baserades på resultat av uppföljningar av stora belastningsförsök i fält, omfattande laboratorieprovning med CRS-försök med olika hastigheter, samt jämförelse med det stegvisa ödometerförsöket. Med tiden kom CRS-försök att nästan helt ersätta det stegvisa ödometerförsöket. Dock har det stegvisa ödometerförsöket delvis kommit tillbaka när behovet av att räkna med krypning uppmärksammades och då man behövde bestämma bl.a. krypparametern α_s .

3.2 UTRUSTNING

Ödometerringen, där leran innesluts i, utgörs av en teflonring som i sin tur är placerad i en styv stålhållare placerad i en tryckpress. Provet är dränerat i övre randen och är odränerat i undre randen, där portrycket mäts.



Figur 1 CRS-utrustning i tryckpress.



Figur 2 Detalj av CRS-ödometer.

Stämpeln ska ha god styrning av den övre delen av ringhållaren. I utrustningen ingår utrustning för mätning av rörelse, vertikal kraft samt portryck i provets odränerade del.

Noggrannheten i mätningarna bör, för leror med $\sigma'_c < 100$ kPa, minst vara:

kraft ± 2 N

rörelse $\pm 0,02$ mm

portryck $\pm 0,2$ kPa

För styvare leror är kraven inte lika höga.

3.3 UTFÖRANDE

3.3.1 Montering

Ödometerringen smörjs med silikonfett. Provet pressas direkt från provtuben in i ringen. Provet skärs av längs provets bägge ränder och jämnas av. Alternativt kan provet stansas in i en något mindre ring i syfte att minska störningen.

Ringens med prov och omgivande stål placeras i ödometerskålen. Stämpeln förs på plats och med handen trycker man ned stämpeln så att överflödigt vatten i botten strömmar ut förbi portryckmätaren och så att stämpeln får god anliggning

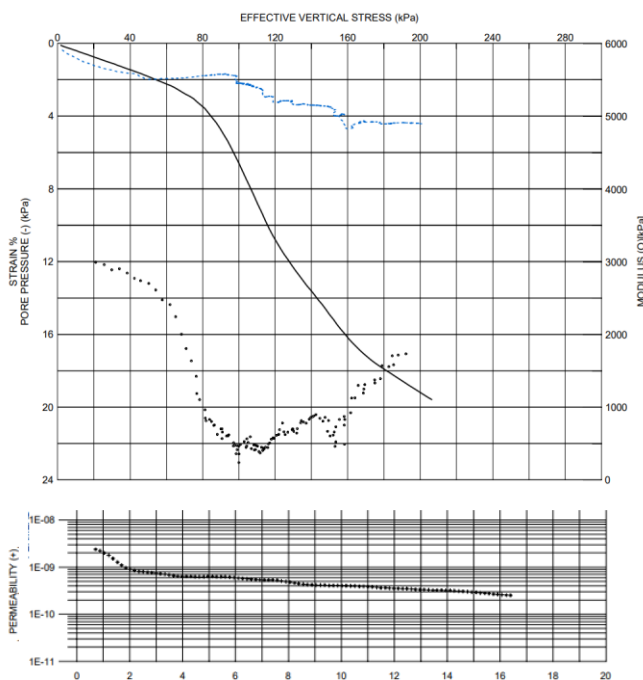
mot provet. Lämpligt tryck motsvarar ca 10–15 kPa, vilket för ett 50 mm prov motsvarar en vikt på 2–3 kg. Dräneringskranen stängs.

3.3.2 Töjningshastighet

Provet är 20 mm högt, deformeras med $0,0025 \pm 0,0002$ mm/min, vilket ger en kompression på 0,72 %/timme. Ett kompletterande krav är att portrycket i botten av provet helst inte ska överstiga 10 % av totala vertikalspänningen, i särskilda alla fall ej överstiga 15 %¹. Skälet till detta är att variationen av effektivspänningen inte ska vara för stor inom provet.

3.4 REDOVISNING

Exempel på resultatredovisning återfinns i Fig. 3.2.



Figur 3 Exempel på redovisning av resultat från ett CRS-försök. Övre delen av bilden $\sigma' = f(\epsilon)$, $u = f(\sigma')$ samt $M = f(\sigma')$ och undre delen av bilden $k = f(\epsilon)$.

Följande kurvor ska redovisas:

$$\sigma' = f(\epsilon), u = f(\sigma') \text{ samt } M = f(\sigma')$$

$$\text{dessutom } k = f(\epsilon)$$

I svensk standard för CRS-försök beskrivs även redovisning av $c_v = f(\sigma')$. Detta diagram bör utgå, då det inte är trivialt hur man korregerar denna funktion för hastighetseffekter.

För de fall man önskar göra handberäkningar av sättningar med stöd av c_v -värdet bör c_v -värdet beräknas som

$$c_v = k \cdot M / \gamma_w$$

där k = permeabilitet

$M = M_L$

γ_w = skrymdensitet för vatten

I redovisningen bör även fotodokumentation av provet ingå, för att dokumentera eventuella inhomogeniteter, vasstrån, siltkörtlar mm. Efter genomfört försök klyvs provet vertikalt och fotograferas. Fotot på provet klipps in i diagrammet, se Bilaga A, redovisning av CRS-försök.

Dessutom ska i redovisningen ingå den information som anges i texten i Bilaga A.

I redovisningen ska det finnas utrymme för laboratoriepersonalen att lämna kommentarer om försöket. Det är viktigt att kommentarerna tas på allvar, då sådana observationer utgör en viktig del i kvalitetssäkringen.

Vattenkvoten bör bestämmas på provet efter avslutat försök. Det kan ske efter fotografering genom att provet torkas av, den yttre kanten av provet, liksom en tunn skiva av övre och undre delen skärs bort. Därmed erhålls en representativ del av provet, varvid ursprunglig vattenkvot för provet kan bakräkna fram.

På protokollet redovisas även erhållen deformationshastighet (mm/min), medeltemperaturen i rummet där försöket utförts, datum när försöket utfördes, och datum när provtagningen i fält ägde rum.

3.5 UTVÄRDERING OCH TOLKNING

Utvärdering och tolkning av förkonsolideringstryck, modul och permeabilitet följer svensk standard, SS 027126.

Metoden för utvärdering av σ'_c baserades i huvudsak på undersökningar av leror med förkonsolideringstryck lägre än 100 kPa. Eftersom leror uppvisar viskösa egenskaper kommer spännings-töjningskurvan att vara beroende av töjningshastigheten, ϵ , eller snarare belastningshastigheten och för fastare leror leder det till en överskattning av förkonsolideringstrycket². Handläggaren ska därför göra en korrigering av förkonsolideringstrycket med hänsyn till den naturliga vattenkvoten enligt ekvation 3.1, under förutsättning att försöket har utförts med standardtöjningshastigheten:

$$\sigma'_c{}^{\text{kor}} = \sigma'_c{}^{\text{std}} \cdot (100/\sigma'_c{}^{\text{std}})^B \quad \text{ekv. 3.1}$$

$$\text{där } B = 0,08 \cdot w_N$$

$$\sigma'_c{}^{\text{std}} = \text{förförkonsolideringstryck utvärderat enligt standardförfarandet}$$

Det är viktigt att handläggaren uppmärksammar detta.

3.6 KVALITETSKONTROLL

Kvalitetskontroll avser inte bara korrekt utförande av försöket på laboratoriet. Det krävs även bra kommunikation mellan fältpersonal och laboratoriepersonal, lika viktig som kommunikation mellan laboratoriepersonal och handläggare som ska använda resultaten. Det är därför av yttersta vikt att laboratoriepersonalen antecknar de observationer som han/hon gör under handhavandet i laboratoriet och som kan vara relevanta för bedömningen av kvaliteten och tilltron till de resultat som försöket resulterar i.

² Anpassning av avancerade geotekniska laboratieförsök till nya användningsområden. Trv, Rapport 2022

Sådana observationer kan vara:

- Förekomst av skikt, snäckskal, organiskt material eller andra avvikelser som kan innebära att provet inte är homogent, färgskiftningar i provet.
- Kontrollera och eventuellt kommentera storleken på töjningen fram till förkonsolideringstrycket.
- Normalt ska portrycket vara i stort sett konstant till strax före förkonsolideringstrycket nås. En påtaglig ökning av portrycket för spänningar lägre än förkonsolideringstrycket tyder på en viss störning av provet.
- Är portrycksutvecklingen under försöket som förväntad?
- Notera töjningens storlek fram till förkonsolideringstrycket.
- Eventuell misstänkt störning.
- Var och i vilken del av provtuben provet togs.
- Om provtuben inte var full, eller om diametern på provet var mindre än provtubens diameter.
- Eventuella defekter hos provtuben.
- Tecken på åldring, som oxidation etc.
- Hur väl provet fyller ringen i horisontalld.
- Är portrycksutvecklingen under försöket som förväntad?

Stämp, ödometerring, filterstenar och o-ring i botten ska kontrolleras med jämna intervall. Filterstenarna bör rengöras i ultraljudsbad med jämna mellanrum för att de inte ska bli täta och vara vattenmättade. Efter utförda CRS-försök ska man alltid kontrollera att givarna återgår till sina ursprungsvärden.

Kapitel 4

Direkta skjuvförsök

4.1 BAKGRUND

För att bestämma skjuvhållfastheten i jord genom skjuvning finns olika typer av skjuvförsök. Dels finns det direkta skjuvförsöket som utförs i en skjuvbox, dels finns ringskjuvboxförsöket där provet skjuvas på mitten. Detta innebär att hållfastheten kan överskattas då detta inte nödvändigtvis är provets svagaste zon. Denna provningsmetod är internationellt standardiserad, SS-EN ISO 17892-10:2018, och används frekvent utanför Sverige. Direkta skjuvförsök enligt SS-EN ISO 17892-10:2018 avser endast härledning av dränerade egenskaper och ska inte förväxlas med den nedanstående svenska metoden.

I det direkta enkla skjuvförsöket, SS 02 71 27:1991, tillåts provet tillta och därmed skjuvas i sin svagaste zon under odränerade eller dränerade förhållanden. Det direkta enkla skjuvförsöket (DSS) utvecklades i Sverige av Kjellman under 1930-talet som då konstruerade den första skjuvapparaten (2004, Direkta skjuvförsök – en vägledning). Kapitel 4 avser att beskriva det direkta enkla skjuvförsöket men benämns i denna rapport som direkt skjuvförsök. Under 1950-talet förenklades utrustningen då SGI lanserade skjuvapparat SGI IV. Utrustningen för skjuvning av provet var en tillsats i stativet för en stegvis ödometer.

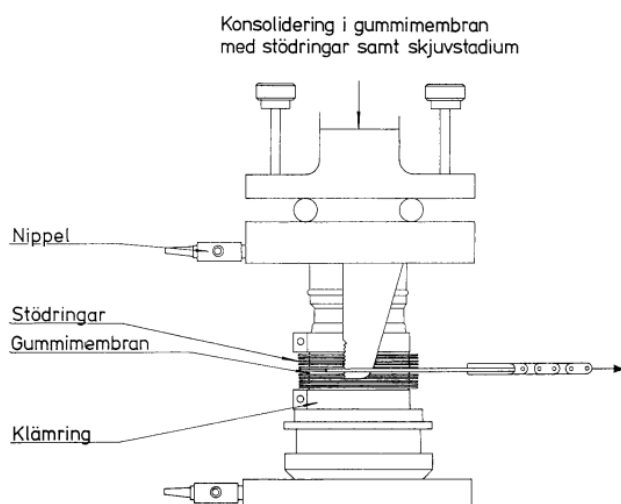
Det direkta skjuvförsöket fick internationell spridning när Geonor på uppdrag av NGI tog fram en mer avancerad apparat och forskningsresultat började publiceras i stor omfattning. I dag är det främst Geonor-apparaten eller likvärdig konstruktion som används runt om i världen.

I Sverige används fortfarande den enklare skjuvapparaten SGI IV i stor utsträckning. Även om det utvecklas nya skjuvapparater som ofta har konstruerats av det egna laboratoriet, bygger teorin och utförandet på den ursprungliga svenska metoden.

Det finns en avgörande skillnad mellan svenskt och internationellt utförande av direkta skjuvförsök. I Sverige låses provhöjden i utrustningen vid ett odränerat försök och den pålagda vertikallasten förblir i princip konstant under skjuvningen. Internationellt är det vanligast att man håller provhöjden konstant genom att justera vertikalkraften under försöket. Ur provdata som erhålls kan sedan portrycket beräknas. I Sverige mäts inte den vertikala lasten under skjuvning och därmed kan inte portrycket redovisas från ett direkt skjuvförsök.

4.2 UTRUSTNING

Utrustningen för direkta enkla skjuvförsök kan se olika ut där vissa direkta skjuvapparater trycker på provet horisontellt under skjuvning medan andra drar i provet.



Figur 4 Exempel på skjuvenheten i en direkt skjuvapparat (bild från Svensk Standard SS 02 71 27).

Vid ett direkt skjuvförsök i den enklare skjuvapparaten mäts vertikal rörelse under konsolideringsfasen och horisontell rörelse samt horisontell kraft under skjuvfasen.

Noggrannheten i mätningarna bör minst vara:

kraft ± 1 N

vertikalrörelse $\pm 0,05$ mm

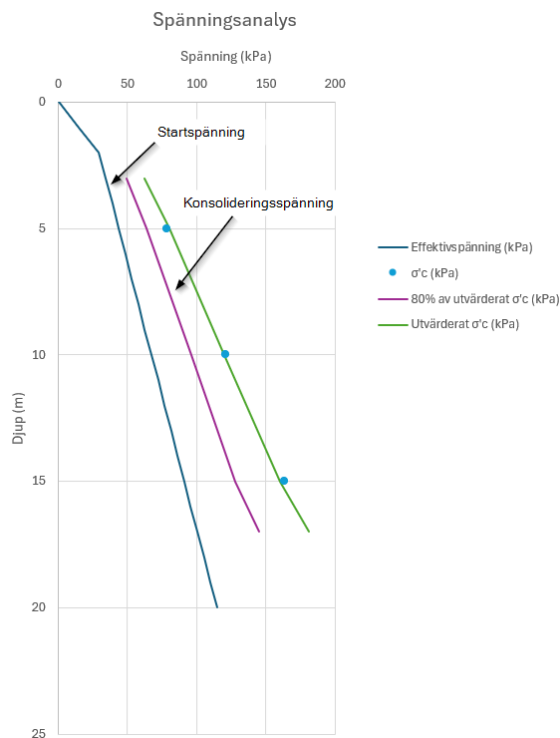
För leror med extremt till låg hållfasthet, som ofta utgör proverna i svenska laboratorier, krävs att givarna är kalibrerade inom det aktuella mätområdet för att noggrannheten ska bli fullgod. För leror med högre hållfasthet är kraven på noggrannhet inte lika höga. Ytterligare en parameter som bör beaktas är hur stor friktionskraft som uppstår när undre delen av provhållaren/glidvagnen löper på skenan. Om möjligt kontrolleras detta vid den årliga kalibreringen och vid behov åtgärdas provhållaren/glidvagnen för att ge så litet friktionstillskott till skjuvkraften som möjligt.

4.3 INDATA

Vid planering av ett direkt skjuvförsök är det avgörande att känna till de vertikala effektivspänningarna in situ och förkonsolideringstrycket för att erhålla ett korrekt försöksresultat. Effektivspänningarna erhålls dels från uppmätta skrymdensiteter på upptagna, ostörda prover, dels från uppmätta portryck i lerprofilen samt tillskott från eventuella ytlaster. I branta erosionsslänter eller vid skapade bankar bör även tillskottsspänningen beräknas av historisk avlastning eller pålastning på jorden.

Inhämtade prover ska analyseras på ett laboratorium utan onödig fördröjning efter provtagning, då lagringstiden påverkar försöksresultaten. Efter utförd rutinanalys beställer geoteknikern CRS-försök av laboratoriet i sådan omfattning att en trendlinje av utvärderade förkonsolideringstryck kan ritas upp.

Tillsammans med beräknade effektivspänningar och konsolideringsspänningar har geoteknikern all nödvändig information som krävs för att beställa/utföra ett direkt skjuvförsök, se Figur 5.



Figur 5 Spänningsdiagram

Provet ska konsolideras innan skjuvning sker för att återställa provets ursprungliga vertikala och horisontala spänningar samt för att säkerställa att provet erhåller tillräcklig kontakt med provringarna. Rekommendationen är att konsolideringsspänningen ska uppgå till mellan 80 % och 85 % av förkonsolideringstrycket, se kapitel 4.5.2 för mer utförlig beskrivning av konsolideringsfasen. Ju högre värde på konsolideringen som väljs, desto större risk finns för att kryptöjningar uppstår i provet med följden att ett för högt värde på skjuvhållfastheten slutligen erhålls. Å andra sidan kan det vid provning av överkonsoliderade prover krävas en så hög rekonsolideringsspänning för att generera den radiella expansionen av provet som krävs för att stödringarna ska få kontakt med provet. Tiden för konsolideringen styrs av att deformationskurvan planar ut.

Värdet på förkonsolideringstrycket bör utgå från en utvärderad trendlinje av erhållna förkonsolideringstryck från minst tre CRS-försök genom jordprofilen. Genom att utvärdera en trendlinje på förkonsolideringstrycket kan man utjämna den normala spridningen som erhålls vid CRS-försök och undvika att ansätta för låga eller för höga värden.

Provet ska sedan avlastas till den effektiva in situ-spänningen.

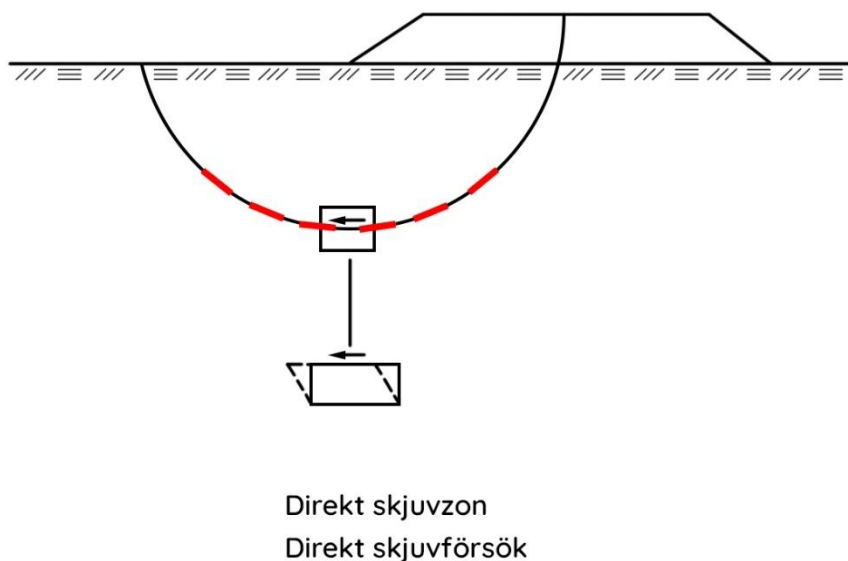
Denna startspänning är en indataparameter som inte har behandlats tillräckligt mycket i vägledande litteratur och standard trots att det är detta värde som är den viktigaste parametern för att få ett korrekt värde på skjuvhållfastheten. Ett felaktigt antaget portryck i spänningsanalysen resulterar i en felaktig effektivspänning, som i sin tur ger en utvärderad skjuvhållfasthet som inte speglar den aktuella spänningssituationen i jorden.

Vanligen körs direkta skjuvförsök i syfte att erhålla den befintliga skjuvhållfastheten i marken. Metoden kan även användas för att studera hållfastheten vid en eventuell avlastning eller pålastning av jorden vid förändrad förkonsolideringsgrad.

4.4 ODRÄNERADE RESPEKTIVE DRÄNERADE FÖRSÖK

Huruvida det direkta skjuvförsöket ska utföras dränerat eller odränerat beror på dimensionerande brotttyp och är upp till handläggaren att avgöra.

Direkta skjuvförsök utförs huvudsakligen på kohesionsjord. Försöket kan utföras både dränerat och odränerat, men det odränerade försöket är det vanligaste. Anledningen till att det odränerade försöket dominerar är att lerans odränerade skjuvhållfasthet i många fall med normalkonsoliderade eller svagt överkonsoliderade kohesionsjordar är den mest styrande egenskapen. Lerans friktionsvinkel och kohesionsandel brukar vanligen erhållas ur empiriska samband där friktionsvinkeln ansätts till 30° och kohesionsandelen till 10 % av den odränerade skjuvhållfastheten. För överkonsoliderade jordar är värdet på kohesionsandelen större.



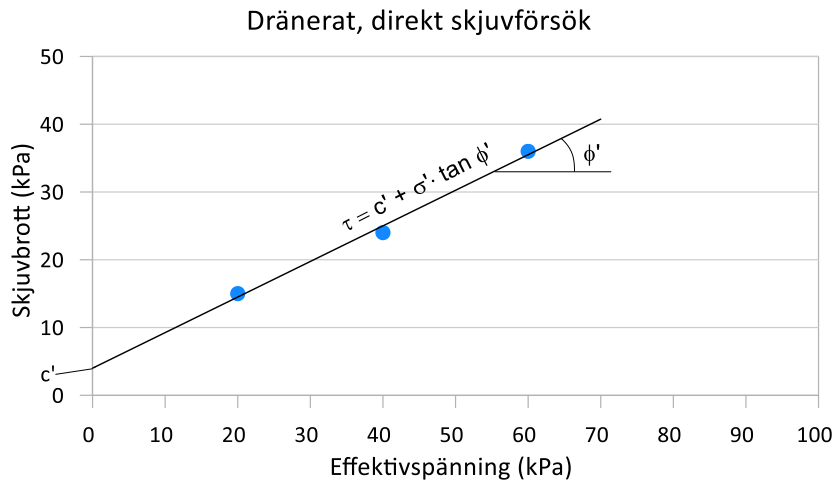
Figur 6 Röd del av glidytan motsvarar skjuvzonen vilken förenklat kan beskrivas som den del av glidytan där den odränerade skjuvhållfastheten är styrande (omarbetad bild från SGF Notat 2:2004).

Vid ett odränerat försök erhålls den odränerade skjuvhållfastheten direkt från ett skjuvspännings-töjningsdiagram, se vidare i avsnitt 4.7.

Vid ett dränerat försök utvärderas skjuvhållfastheten på samma sätt som vid ett odränerat försök. Om flera dränerade försök utförs vid olika startspänningar så kan de utvärderas med Mohr-Coulombs brottkriterium där skjuvhållfastheten beror av effektivspänning och friktionsvinkel samt kohesion hos materialet med funktionen.

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$$

Friktionsvinkeln erhålls då genom lutningen på Mohr-Coulombs brottkurva och ett eventuellt kohesionsintercept kan utläsas på y-axeln, se exempel i Figur 7. Observera att utvärderingen gäller för effektivspänningar under förkonsolideringstrycket.



Figur 7 Exempel på utvärdering av friktionsvinkeln (ϕ') och kohesionsintercept (c') från tre dränerade direkta skjuvförsök.

För en detaljerad beskrivning av hur utvärderingen görs för dränerade respektive odränerade försök, se vidare i SGF (2004, Direkta skjuvförsök – en vägledning)

Alla observationer av betydelse som noterats innan, under och efter utfört försök ska förmedlas från laboratoriepersonalen till handläggaren.

4.5 UTFÖRANDE

4.5.1 Montering

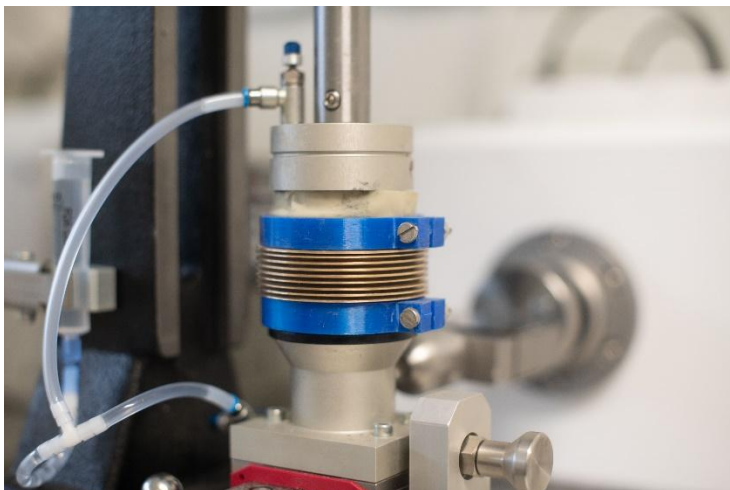
Innan provkroppen förbereds dräneras både den övre och den undre filterstenen i skjuvapparaten. De ska vara vattenmättade och avtorkade. Alla dräneringsslangar ska vara vattenfyllda och inga luftbubblor får förekomma. Kranarna hålls stängda. Se till att de 10 stödringarna hänger på plats på övre stämpan samt att gummimembranet trätts på och vikts upp. Gummimembranet kan ha varierande tjocklek trots att det kommer från samma batch. Ett medvetet val av membran med lämplig tjocklek underlättar arbetet längre fram.

Börja med att bestämma vattenkvoten på provet för att senare jämföra med vattenkvoten från rutinanalysen.

Placera en ödometerring ovan kolvuppressaren och pressa provet direkt in i ödometerringen och med 10 mm överskott. Kassera den översta centimetern och

se därefter till att överytan av provet är slät. Skär av provet under ringen och se till att även denna yta är slät. Provkroppen ska ha en höjd på 20 mm samt en diameter på 50 mm. Bestäm provets vikt och jämför densiteten med densiteten från rutinanalysen. Om densiteten från skjuvförsöket avsevärt skiljer sig bör man överväga om provet är representativt. Tryck försiktigt ut provkroppen ur ödometerringen och placera provet på den vattenmättade filterstenen. För sedan varsamt ner stämpan mot provets överyta. Anliggningen ska vara god men inte utgöra en belastning på provet.

Vik ner och trä på gummimembranet över provet och montera en klämring nertill för att sluta tätt och hålla membranet på plats. För ner den första stödringen runt provkroppen och placera en distans ovanför stödringen. Fortsätt sedan på samma sätt tills alla 10 ringarna är på plats med distans mellan varje ring. Montera en övre klämring som ser till att stödringarna hålls ihop.



Figur 8 Monterat prov vid direkt skjuvförsök.

4.5.2 Konsolidering

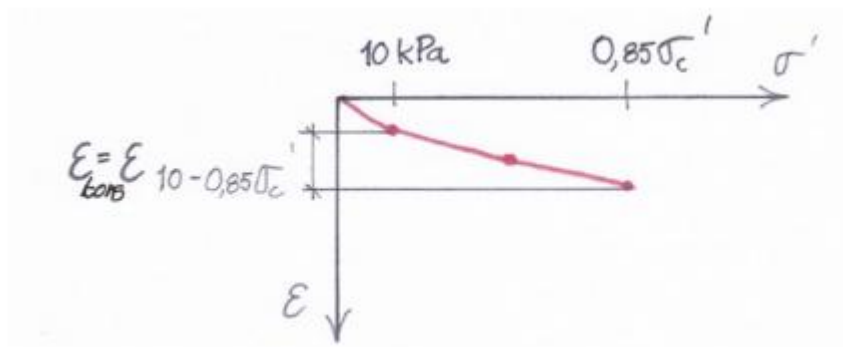
Under konsolideringsfasen ska provet vara dränerat i både övre och undre randen då det ligger an mot de vattenmättade filterstenarna och båda dräneringskranarna ska hållas öppna. Vertikal last påförs provet i steg, antingen manuellt eller via fördefinierade laststeg i en programmodul. För att erhålla kontakt med provet samt undvika svällning påförs den första lasten så snabbt som möjligt. Hur stor denna första last är beror på använd utrustning, men den

ligger oftast mellan 10 och 20 kPa. Konsolideringen kan göras på olika sätt och hur den görs varierar mellan olika laboratorier. Ofta sker en anpassning med hänsyn till provets egenskaper. Det viktiga är att konsolideringen sker i steg så att porövertrycket som uppstår vid varje pålastning hinner klinga av. Under konsolideringen ska deformationskurvan dokumenteras. En ofta använd princip är att laststegen dubblas från gång till gång och att man ”mellanlandar” vid startspänningen. Varaktigheten för varje laststeg finns inte beskriven i svensk standard, men en lämplig tid är 15–60 min/laststeg där den kortare tiden i första hand används initialt.

När startspänningen uppnåtts kan denna belastning ligga på i omkring 30 minuter och i detta skede kan även distanserna plockas bort om det inte redan gjorts. Därefter påförs själva konsolideringslasten då spänningen går från startspänning/in situ-spänning till maximalt 80-85% av förkonsolideringstrycket, se avsnitt 4.3. Detta laststeg ska maximalt ligga på i 1–2 timmar för att inte erhålla för stor konsolidering av provet och i slutändan för höga värden på utvärderad skjuvhållfasthet. Därefter lastas provet av till startspänning/in situ-spänning som får ligga på tills deformationskurvan har planat ut, vilket kan förväntas ske inom 15 timmar.

Om vald konsolideringsspänning ligger under in situ-spänningen, vilket inträffar vid $OCR < 1,25$ om 80 % konsolideringsgrad tillämpas, konsolideras provet till 80 % av förkonsolideringstrycket och startas därifrån. Startspänningen ligger då under in situ-spänningen och ingen avlastning görs. Alternativt sker konsolideringen till in situ-spänningen. I det senare fallet ligger startspänningen närmare förkonsolideringstrycket och löper större risk för plasticering. Startspänning/in situ-spänningen ska ligga på tills deformationskurvan har planat ut vilket kan förväntas ske inom 15 timmar.

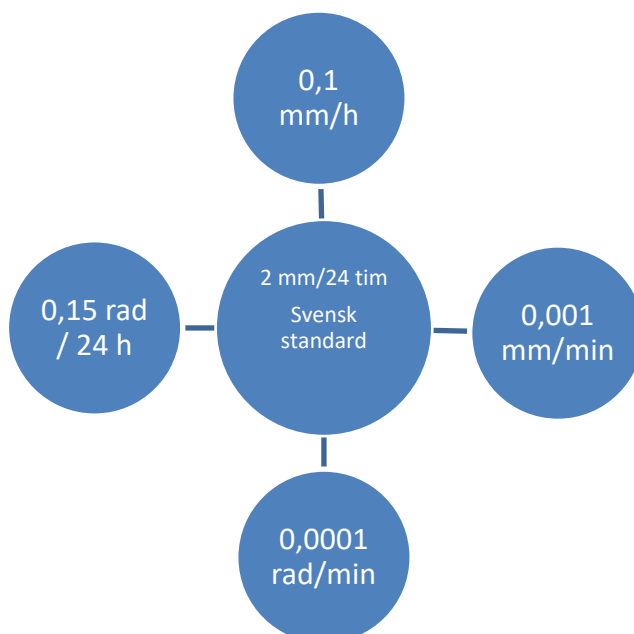
Vertikaltöjningen, under konsolideringsfasen, tenderar att bli större vid ett direkt skjuvförsök än vid CRS-försök eller triaxialförsök. Detta beror på att horisontalspänningen inte kan kontrolleras. Utvärdering av konsolideringstöjning sker enligt Figur 9.



Figur 9 Utvärdering av konsolideringstjörning. Bild från SGF (2017) .

4.5.3 Skjuvning

Vid ett odränerat direkt skjuvförsök låses provhöjden mekaniskt och dräneringskranarna stängs till skillnad från ett dränerat försök där provhöjden förblir olåst och dräneringskranarna förblir öppna. Ursprungligen var apparaterna mekaniska med hängande vikter och lasten på provet påfördes i ett antal laststeg med efterföljande skjuvningsfaser. Idag är dock de flesta skjuvapparater motoriserade så att skjuvningen sker med konstant hastighet. Skjuvningen ska utföras med en hastighet om ca 2 mm/24 tim enligt svensk standard (SS 02 71 27:1991).



Figur 10 Olika enheter på skjuvhastighet vilka alla ungefär motsvarar 2 mm/24 h.

4.6 REDOVISNING

På försöksprotokollet för det direkta skjuvförsöket redovisas projektinformation och information om provtagningsdatum, undersökningspunkt, provtagningsdjup och id-märkning på tub. En viktig information är även datum för rutinundersökning samt klassificerad jordart.

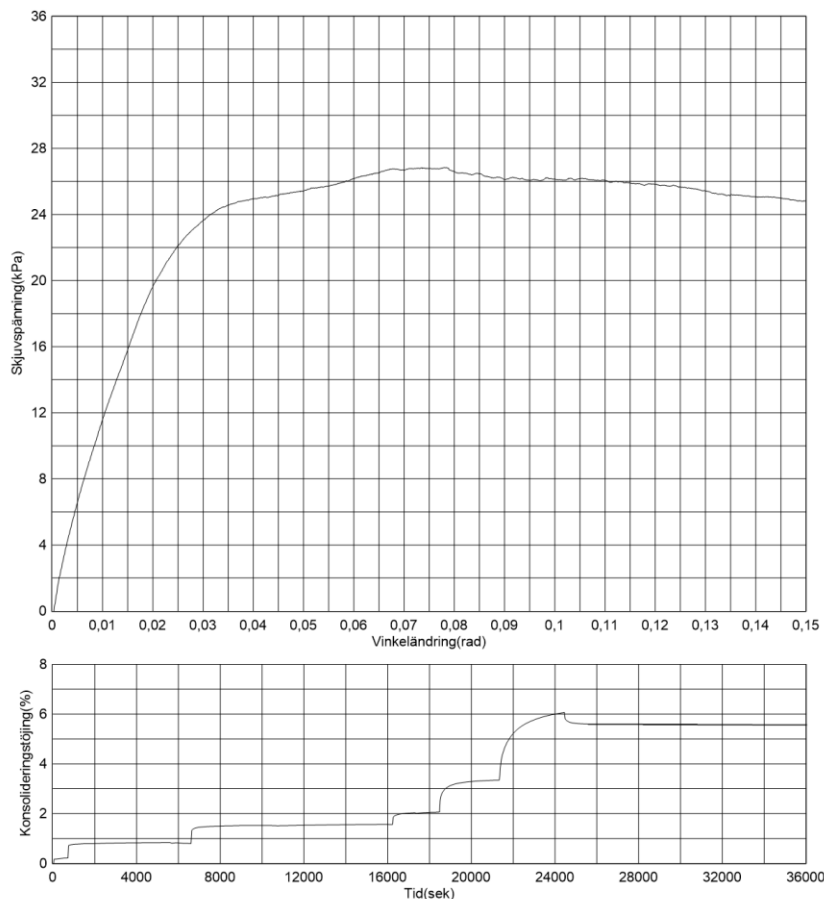
När provet förbereds för montering bestäms både skrymdensitet och vattenkvot och detta ska redovisas på försöksprotokollet. Det ska vidare framgå vilket datum som det direkta skjuvförsöket har utförts samt vilken utrustning som använts.

På försöksprotokollet ska det framgå vilken rumstemperatur försöket har utförts vid samt vilka dimensioner provkroppen haft. Vanligen har provet en diameter på 50 mm och en höjd på 20 mm. Vidare ska den horisontella hastigheten och provmetod (dränerat eller odränerat) redovisas på försöksprotokollet.

Det ska redovisas vilka styrande dokument som tillämpats samt vem som utfört försöket. Vanligen granskas resultatet före leverans och då bör även granskarens namn finnas med på protokollet.

De försöksdata som ska finnas med vid redovisningen är konsolideringsspänning och startspänning. Ur kvalitetssynpunkt redovisas även konsolideringstøjning i procent.

Den grafiska redovisningen ska utgöras av ett skjuvspännings-vinkeländringsdiagram med vinkeländringen i radianer (rad). Till diagrammet ska även konsolideringstøjningen redovisas mot tid (timmar alt. sekunder). Se Figur 11.

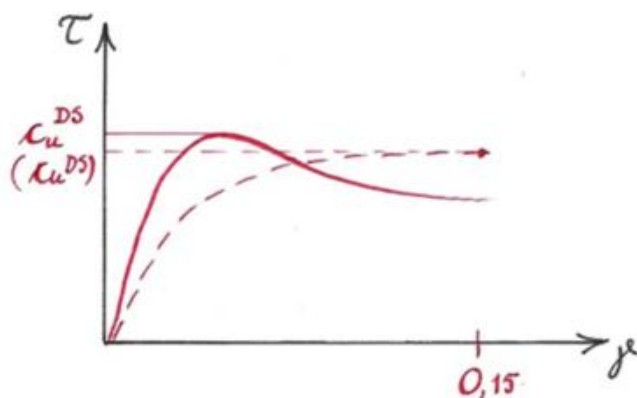


Figur 11 Diagram att redovisa i försöksprotokoll vid direkt skjuvförsök.

Försöksdata ska vara lagrad och redovisad på ett sådant sätt att den med enkelhet kan lämnas ut till beställaren.

4.7 UTVÄRDERING OCH TOLKNING

Ett direkt skjuvförsök på ostörd lera går vanligen till brott vid en skjuvtöjning om 0,02–0,04 radianer. Här erhålls då ett maxvärde på skjuvhållfastheten som kan utvärderas. Om inget tydligt brott uppstår under försöket utvärderas skjuvhållfastheten per definition vid 0,15 radianer enligt svensk standard. För påtagligt siltiga leror är motsvarande skjuvtöjning vanligen 0,01–0,02 radianer.



Figur 12 Två olika utseenden på kurvor från direkta skjuvförsök samt utvärderingskriterier. Bild från SGF (2017).

Vid mycket låga skjuvhållfastheter i lera kan en flytspänning uppstå vid relativt små deformationer för att sedan successivt öka ytterligare. Vid ett sådant fall utvärderas skjuvhållfastheten vid flytspänningen och inte vid 0,15 radianer.

Vid högt siltinnehåll i provet kan även då en flytspänning uppstå, men då med en mer markant ökande hållfasthet därefter. Detta beror på jordens egenskaper och man utvärderar då både flytspänning och brott.

4.8 KVALITETSKONTROLL

För att kunna leverera provresultat av fullgod kvalitet är det av stor vikt att försöksutrustningen är kalibrerad. Vanligen utförs en grundlig kontroll 1–2 gånger per år. I samband med detta ses även utrustningen över så att filterstenar är i god kondition, glidskenan har låg friktion m.m.

Försöken bör utföras vid en temperatur av $+7\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ som motsvarar en allmänt förekommande jordtemperatur. Temperatur är en parameter som bör beaktas då vattnets viskositet vid olika temperaturer påverkar så pass lågpermeabla jordar som vi har i Sverige.

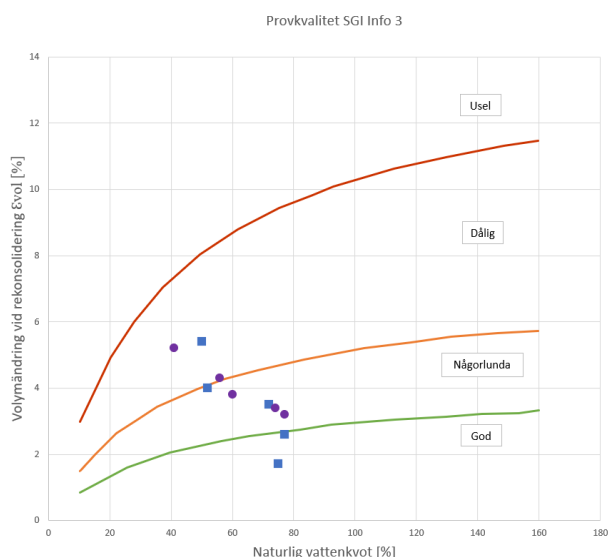
En lång lagringstid kan genom oxidering och uttorkning förändra provets mekaniska egenskaper och därför rekommenderas att direkta skjuvförsök utförs inom 1 månad från det att provet plockas upp och aldrig efter 3 månader.

Alla okulära observationer som laboratoriepersonalen gör ska förmedlas till handläggaren som tar emot resultatet. Exempel på observationer kan vara förekomst av skikt, snäckskal eller andra inhomogeniteter.

Skjuvtöjningen ger ett mått på provkvalitet där en stor skjuvtöjning generellt sett antyder en sämre provkvalitet. Om provet har ett organiskt innehåll blir skjuvtöjningen ofta större och innebär inte nödvändigtvis ett stort prov eller sämre provkvalitet.

Konsolideringstöjningen ska utvärderas enligt Figur 12. Om en hög konsolideringstöjning erhålls indikerar detta att provet kan ha konsoliderats till för hög spänning och att man i slutändan utvärderar ett för högt skjuvhållfasthetsvärde.

Provkvaliteten kan även kontrolleras mot empiriska samband där vattenkvot plottas mot konsolideringstöjning, se Larsson et al. (2007) och exempel i Figur 13. Här är det viktigt att observera att den plottade volymtöjningen är volymtöjningen vid den vertikala in-situ spänningen. Vid direkta skjuvförsök mäts enbart vertikaltöjningen och därför fås inte volymtöjningen. Därav kan något större rekonsolideringstöjningar förväntas än vad som erhålls från CRS- och triaxialförsök.



Figur 13 Exempel på bedömning av provkvalitet utifrån vattenkvot och volymtöjning vid rekonsolidering till vertikal in-situ spänning. Samband hämtat från Larsson et al. (2007).

Kapitel 5

Triaxialförsök

Den ursprungliga tanken med detta projekt var att beskriva svensk praxis när det gäller triaxialförsök, såväl utförande, som redovisning och tolkning. Som påpekades i inledningen är tanken att vi i Sverige ska fortsätta att utföra triaxialförsök, så som vi nu funnit vara bäst för våra leror, även om det kommer nya EN standarder, som föreslår andra rutiner.

De för detta kapitelansvariga författarna ansåg att det saknades mer detaljerad information rörande utförande av triaxialförsöket riktad till laboratoriepersonal. Därför har detta kapitel skrivits med större tonvikt på mer praktiska aspekter, än vad som gäller de andra försökstyperna. Därav den modifierade avsnittsindelningen.

Därför har vi i Bilaga 2 sammanställt en del teori och exempel, som ska möjliggöra för läsaren att förstå kopplingen mellan de olika försökstyperna. Det är ju samma lera som man testar, bara med andra randvillkor. Lerans egenskaper är de samma, resultaten som man får från de olika försöken är ett resultat av ”vilken fråga” man ställt, vilket är liktydigt med vilka randvillkor försöket är utfört under.

En rad faktorer medförde att flera laboratorier skaffade utrustning för utförande av triaxialförsök. Den viktigaste anledningen var förmodligen att användningen av FEM-beräkningar ökade dramatiskt och då krävdes triaxialförsök för bestämning av nya materialparametrar. En annan viktig faktor var att utvecklingen på apparatsidan tog fart. Det blev förhållandevis enkelt att mäta, styra, lagra och bearbeta försöksresultaten. För handläggare som inte har tidigare erfarenhet av metoden bör denna nya anvisning studeras noga tillsammans med

SGF Rapport 2:2012, Triaxialförsök – En vägledning, för att kunna bestämma hur deras triaxialförsök ska utföras på laboratoriet.

Syftet med denna anvisning är att beskriva hur triaxialförsöket ska utföras så att de förutsättningar och utmaningar som svenska leror har, kan hanteras på bästa sätt. Den ska ses som ett komplement till den svenska standarden SS-EN 17892-9. Fokuset är normal- till svagt överkonsoliderade leror eftersom det oftast är denna typ av material som triaxialförsök används till. Det ska dock påpekas att vägledningen gäller även mer överkonsoliderade leror. Det finns dock även viss rådgivning som gäller övriga jordarter, såsom siltiga jordarter.

Vanligtvis uppfattas ett triaxialförsök som bestående av en konsolideringsfas och därefter en skjuvningsfas. De inledande arbetsmomenten är dock mycket viktiga för slutresultatet och beskrivs i avsnitt 5.6.1 till 5.6.4. Beskrivning av konsolidering och skjuvning till brott framgår av avsnitt 5.6.5 och avsnitt 5.6.6. Efterföljande arbete som omfattar bl.a. redovisning och kvalitetskontroll är även viktiga för slutresultat. Dessa ämnen tas upp i avsnitt 5.7 till 5.9.

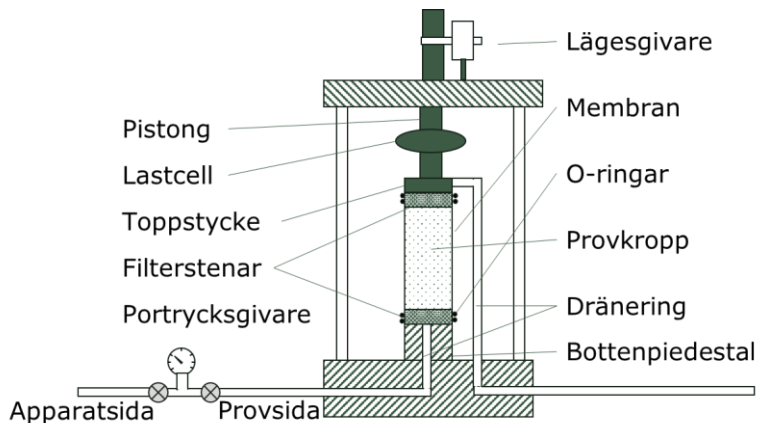
5.1 BAKGRUND

Ursprunget till triaxialförsöket krediteras vanligtvis Arthur Casagrande, ca 1930. Det var under denna tidsperiod när idéer om portryck och konsolidering började leda till konceptet för effektiva spänningar. Det sägs att Casagrandes prototyp härrörde från utrustning för ett permeabilitetsförsök när han föreslog en utveckling av denna apparat som innebar att jordprovet kunde belastas axiellt som ett sätt att bestämma skjuvhållfastheten.

Allteftersom användningen av triaxialförsök spred sig bidrog ett stort antal forskare med idéer om hur Casagrandes prototyp kunde förfinas/förädlas och förbättras.

5.2 UTRUSTNING

Triaxialutrustningar kan se ut på olika sätt och använda olika tekniker för att belasta och mäta på provet. Gemensamt för de flesta uppställningar är de delar som beskrivs i Figur 14.



Figur 14 Triaxialutrustningens olika delar.

5.3 INDATA

Indata till triaxialförsök består av konsolideringsspänningar och startspänningar. Dessa effektiva axiella och radiella spänningar beror på syftet med provningen. Här följer ett resonemang kring indata för det vanligaste syftet med provningen, att återskapa och skjuva ett prov från in-situ spänningar d.v.s. de spänningar som provet var i jämvikt med innan det togs upp ur marken. I detta fall är de vertikala och horisontella effektivspänningarna i marken nödvändiga att uppskatta. De vertikala spänningarna tas fram utifrån skrymdensiteter och grundvattennivåer, men för att få fram horisontella spänningar behöver vilojordtryckskoefficienten, K_0 bestämmas. Den definieras som:

$$K_0 = \sigma'_H / \sigma'_V$$

där σ'_H är den horisontella effektivspänningen och σ'_V är den vertikala effektivspänningen.

5.3.1 Konsolideringsspänningar

Konsolideringsspänningen är till för att rekonsolidera provet och delvis återskapa provets spänningshistoria. Detta görs genom att välja en spänning som ligger längs med den naturliga spänningsvägen som provet har utsatts för under sin historia. Denna spänningsväg bestäms av provets vertikala förkonsolideringstryck och provets vilojordstryckskoefficient vid normalkonsolidering, K_{0NC} .

Den axiella effektiva konsolideringsspänningen i triaxialapparaten motsvarar då provets förkonsolideringstryck som multipliceras med 0,8 för att undvika att stora krypningar utbildas och kompenserar för osäkerhet i uppskattning av förkonsolideringstryck.

Den radiella effektiva konsolideringsspänningen motsvarar på samma sätt den horisontella spänningen i marken vid 0,8 x förkonsolideringstrycket vid ett normalkonsoliderat tillstånd. För att beräkna denna spänning behöver K_{0NC} uppskattas för det aktuella provet, vilket normalt görs genom att koppla plasticitetsegenskaperna hos provet till parametern med ett empiriskt framtaget samband. I Sverige bestäms inte plasticitetsgränsen rutinmässigt och då får K_{0NC} kopplas till flytgränsen w_L . Det vanligaste sambandet ser ut som följer:

$$K_{0NC} = 0,31 + 0,71(w_L - 0,2)$$

Forskning under 2020-talet har gett alternativa samband som i framtiden kan komma att ersätta ovanstående samband.

5.3.2 Startspänningar

När spänningarna vid skjuvningens start ska representera provets in situ-spänningar motsvarar den effektiva axialspänningen det effektiva vertikala trycket på den nivå som provet är taget. Den tas fram genom en vertikal jordmodell där skrymdensiteter och grundvattenyta/portryck är bestämda.

Den effektiva radiella spänningen motsvarar det effektiva horisontella trycket på nivån som provet är taget på. För att beräkna denna spänning behöver K_0 uppskattas ur ett samband som är kopplat till överkonsolideringsgraden, OCR. Det vanligaste sambandet ser ut som följer:

$$K_0 = K_{0NC} OCR^{0.5}$$

Det samma gäller för detta samband, att det kan komma att omprövas i framtiden på grund av ny forskning.

5.4 ODRÄNERADE RESPEKTIVE DRÄNERADE FÖRSÖK

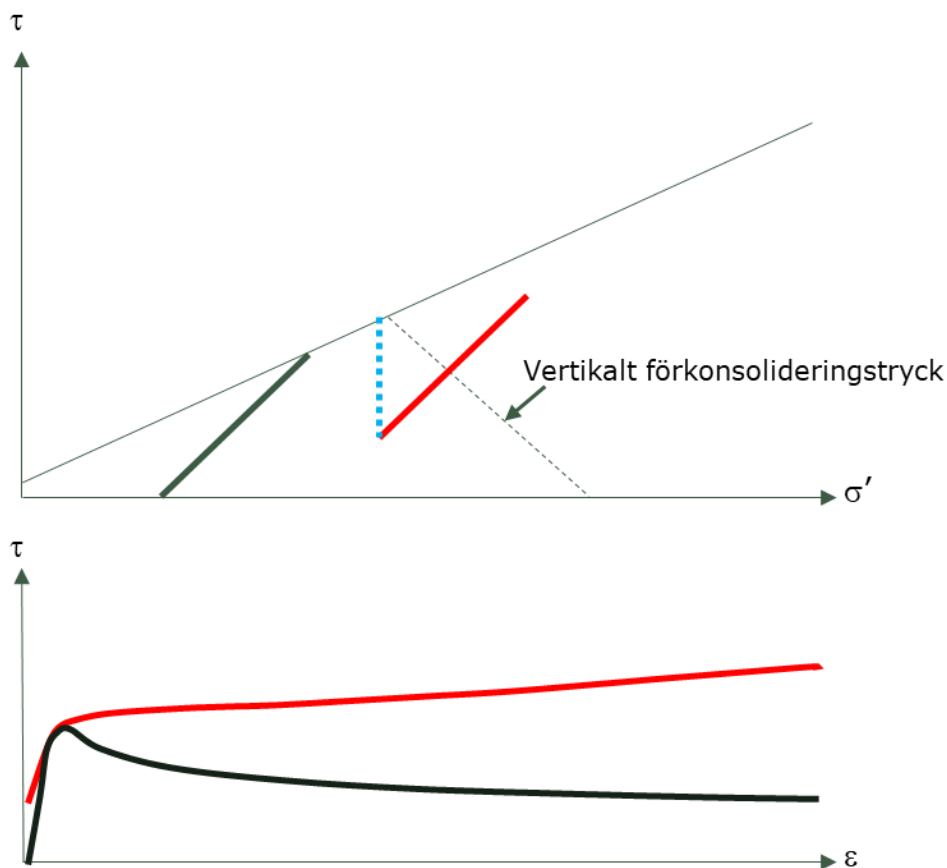
Ett odränerat försök innebär att belastningen av provet sker med stängd dränering där porttrycksgivaren sitter på provsidan och mäter porttrycket i provet under försöket. Belastningen ska ske så långsamt att man kan anta att porttrycksfördelningen i provet är utjämnad. För svenska leror är riktvärdet 0,6 %/h.

För normalt till svagt överkonsoliderade svenska leror sker brottet normalt under kontraktans med en porttrycksökning som följd. Detta ger ett distinkt maximum på skjuvspänning som är enkelt att utvärdera. För starkt överkonsoliderade leror eller silt utvecklas brottet under dilatans, med en porttrycksminskning som följd. Detta leder till ett deformationshårdnande beteende. Leror med detta beteende går ofta till ett tydligt brott efter att ha dilaterat under en del av provningen, medan silt kan ta en spänningsväg som ökar till stora deformationer. Detta gör att ett brottmaximum ej nås under rimliga deformationer. Sådana försök får geoteknikern utvärdera efter något annat brottkriterium.

En variant av ett odränerat försök är ett konstant volymförsök, vilket kan finnas anledning att använda om man inte kan eller vill vattenmätta provet. Det går till så att provets porttryck hålls konstant genom att reglera celltrycket under belastningen. Dessa försök ger en identisk spänningsväg som den för normala odränerade försök, om provet är vattenmättat.

Ett dränerat försök innebär att belastningen av provet utförs med öppen dränering och ett konstant porttryck. Under försöket mäts provets volymförändring med hjälp av in- och utströmmad mängd porvatten. För att provningen ska kunna betraktas som dränerad behöver deformationshastigheten vara tillräckligt låg för att porttrycket ska kunna betraktas som konstant genom hela provet. För vanliga svenska leror är ett lämpligt riktvärde en tiondel av hastigheten för odränerade försök, vilket blir 0,06 %/h.

Till skillnad från ett odränerat försök är det inte rekommenderat (önskvärd) att utföra dränerade försök från in-situ spänningar på svenska, normalt till svagt överkonsoliderade leror. Anledningen till detta är att spänningsvägen då kommer att korsa den vertikala förkonsolideringslinjen, som innebär plasticering av provet med stora deformationer, och att brottlinjen aldrig nås, se den röda kurvan i Figur 15.



Figur 15 Dränerade triaxialförsök på svensk lera som startas från in-situ spänningar (röd kurva) och från låga spänningar (svart kurva) Den blåa streckade linjen motsvarar spänningsvägen för ett försök där medeleffektivspänningen hålls konstant.

För att nå brott vid ett dränerat försök på svenska leror behöver startspänningarna vara så låga att spänningsvägen korsar brottlinjen innan den når den vertikala förkonsolideringslinjen, se svarta kurvan i Figur 15. Exempelvis kan startspänningar väljas så att en dränerad spänningsväg träffar en tänkt brottlinje i spänningsplanet vid en skjuvspänning som ligger vid provets in situ-spänning.

Att utföra dränerade försök på lera med låga startspänningar där spänningsvägen inte når förkonsolideringslinjen ger relativt små brottöjningar, vilket gör att försöken kan avbrytas vid lägre deformationer, vilket sparar tid.

Ett alternativt sätt att utföra det dränerade triaxialförsöket på är att belasta provet axiellt, samtidigt som radialspänningen regleras så att medeleffektivspänningen hålls konstant, se streckad vertikal spänningsväg i Figur 15. Detta förfarande kräver att den triaxialutrustning som används kan styra provningen på det sättet. Den axiella töjningshastigheten måste kunna begränsas trots att provningen är spänningsstyrd.

5.5 AKTIVA RESPEKTIVE PASSIVA FÖRSÖK

Ett aktivt försök innebär att brottet sker under vertikal kompression av provet. I normalfallet innebär detta att apparaten komprimerar provet med en konstant deformationshastighet fram till dess att brott inträffat eller att en rimlig kompression av provet uppnåtts. Detta innebär i praktiken att man kan avbryta provningen då töjningen överskrider ett tydligt maximum i skjuvspänning med 5 % eller efter 15–20 % om inget maximum uppnåtts. Anledningen till att man bryter vid 15–20 % deformation är att dessa töjningar ger en osäkerhet vid beräkningen av skjuvspänningen (provets tvärsnittsarea) som är för stor och att de flesta triaxialapparater har mekaniska begränsningar för större deformationer.

Ett passivt försök innebär att brottet sker under extension (längdutvidgning) av provet. I normalfallet innebär detta att apparaten avlastar provet axiellt med en konstant deformationshastighet fram till brott. Det som händer är att den radiella effektivspänningen driver provet till brott, vilket ofta kan observeras som en

”midja” på provet. Detta innebär också att det finns en begränsning från vilken medeleffektivspänning ett sådant försök kan startas, det måste finnas tillräckliga radialsänningar för att uppnå brott då den effektiva vertikalsänningen blir 0 kPa. Provet kan mekaniskt sett inte ta dragsänningar eftersom ändytorna inte sitter fast i något. Om passiva försök ska startas från låga effektivspänningar kan det vara nödvändigt att kombinera den axiella avlastningen med ett kontinuerligt ökande celltryck.

Provet behöver kunna påföras axiella sänningar som är lägre än celltrycket, vilket innebär att man behöver en mekanisk anordning i toppstycket som kopplar ihop den med apparatens pistong. Denna passiv-koppling kan se olika ut på olika apparater, men är nödvändig för att kunna utföra passiva triaxialförsök.

Passiva brott i lera sker normalt vid större deformationer än vid aktiva försök. Detta beror på att brottet utvecklas kring en förträngning av provets radie (en ”midja”), vilket skapar ett mindre väldefinierat brottplan än det som oftast bildas vid ett aktivt försök. Brottöjningar på 10 till 15% är inte ovanliga.

5.6 UTFÖRANDE

Det inledande arbetet är mycket viktigt för slutresultatet av ett triaxialförsök och består av momenten:

- provpreparering
- montering av prov i triaxialapparaten
- etablering av en stabil sänningssituation
- vattenmättnad

Efter detta grundarbete kan en konsolidering med efterföljande skjuvning genomföras.

Målet är att på plats i triaxialapparaten ha ett vattenmättat prov med goda dräneringsförhållanden som varken sväller eller konsoliderar när konsolideringsfasen påbörjas.

5.6.1 Provpreparering

Syftet med provpreparering är att skapa en provkropp med planparallella ändytor, en längd som är dubbla diametern (längd/diameter bör vara mellan 1,8 och 2,5) och en mantelyta som är jämn och slät.

En av de viktigaste uppgifterna i detta moment är att skapa släta och planparallella ändytor på provkroppen. Detta kräver någon typ av hjälpmedel för att kapa och jämna till provet.

I det enklaste fallet, ett kolvborrprov med hög kvalitet i en homogen lera, trycks ett lite för långt prov ut ur kolvhylsan och förs över till en provprepareringsvagg med rätt mått, se Figur 16. Det horisontellt liggande provet kapas med trådavskärare som styrs av vaggans ändar och ändytorna jämnas sedan av med en ställinjal.

Prover i material som har större kornstorlekar, exempelvis morän, kan vid trimning till rätt dimensioner få hålrum i mantel- och ändytor. Dessa lagas i första hand med borttrimmat material från provet, men i fall där större hål i fastare prover behöver lagas kan exempelvis gips användas.

Under provpreparering är det viktigt att protokollföra provets totala vikt och eventuellt vattenkvoten så att densitet, torrdensitet och vattenkvot före och efter försöket kan fastställas. Observationer av gruskorn, håligheter, växtdelar eller andra geotekniska föroreningar ska också noteras.

5.6.2 Montering

Syftet med detta moment är att ett så ostört prov som möjligt är redo för provning i triaxialapparaten. Denna kan se ut på olika sätt och därför kan momenten vid montering av ett prov se olika ut. Det här är en generell beskrivning av viktiga moment. Under detta moment är det viktigt att ta nollvärden för tryck- och lastgivare vid rätt tillfälle för den aktuella apparaten. Det är också viktigt att kontrollera provkroppens axiella position i förhållande till vilken riktning som provet ska skjuvas. Säkerställ att det finns tillräckligt

utrymme i apparaten för den deformation som behövs för skjuvningen (aktivt/passivt).

Innan provet monteras in i apparaten ska filterstenar och filterpappersremсор vara vattenmättade, vilket enklast görs genom vakuumkokning i vatten. Spola även ur några ml vatten ur bottenpiedestalen och toppstycket för att avlägsna det vatten som haft störst möjlighet att lösa luft, se 5.6.4.

Provet ställs centrerat på bottendelens filtersten och filterpappersremсор läggs i spiral på provets mantelyta, se Figur 16. Därefter monteras membran, toppstycke och O-ringar. För att minimera risken att störa provkroppen kan man med fördel använda en stödrum som fästs i cellens bottenplatta.



Figur 16 Provprepareringsvågga som används för att kapa provet till rätt mått och planparallella ändytor. Till höger visas ett prov med filterpappersremсор applicerade.

Vid montering är dräneringskranar stängda med porttrycksgivare på provsidan, se Figur 14, så att man har möjlighet att se porttrycksutvecklingen i ändytorna. Detta kan ge viktig information om provets spänningstillstånd i nästa moment (5.6.3 etablering av en stabil spänningssituation).

Resten av apparaten färdigställs och cellvätska fylls på. Kontakt mellan toppstycke och pistong för axiell lastöverföring säkerställs. För att kunna följa

de axiella töjningarnas utveckling bör apparaten ställas in att styra på en last motsvarande mellan 1 och 2 kPa i skjuvspänning.

Denna styrning av den axiella lasten innebär att fram till konsolideringens start så sker spänningsändringarna främst isotropiskt när celltrycket ökas.

5.6.3 Etablering av en stabil spänningssituation

Provet som monterats in i triaxialapparaten har en spänningssituation som beror på provets spänningshistoria, både in situ och från vägen via provtagning till apparaten. Exempelvis har ett prov som in situ är normalkonsoliderat på 40 m djup, på vägen till triaxialapparaten blivit mycket kraftigt avlastat och vill därför svälla när det får tillgång till vatten. Detta måste förhindras.

Dräneringskranar är fortfarande stängda med porttrycksgivare på provsidan. Starta med en höjning av celltrycket på exempelvis 25 kPa och observera porttrycket och den radiella effektivspänningen när dessa har stabiliserat sig (<10 min). Om effektivspänningen ligger mellan 5 och 10 kPa för en normal till svagt överkonsoliderad lera eller mellan 10 och 20 kPa för en överkonsoliderad lera kan man ställa porttrycket på apparatsidan av dräneringskranarna till samma tryck som på provsidan och sedan öppna kranarna. Om effektivspänningen är lägre än ovan angivna spänningar kan en ny ökning av celltrycket göras med storleksordningen 20 kPa. Upprepa tills en effektivspänning i angivet spann uppnåtts. Sedan öppnas kranarna med synkroniserat porttryck.

Prover som är tagna på måttliga djup (<20 m) är sällan svällningsbenägna, men för säkerhets skull ska man vara uppmärksam på fenomenet som kan hanteras på följande sätt.

Observera axiell ändring och volymändring för att avgöra om provet visar tecken på att svälla. Huvudfokus bör ligga på den axiella ändringen eftersom volymtöjningen kan vara påverkad av, den nyligen gjorda, porttrycksändringen eller luft i systemet. Om provet visar tecken på att svälla, höj celltrycket (och därmed den radiella effektivspänningen) i små steg, storleksordningen enstaka kPa, till dess provets rörelse avstannar. Observera att tillståndet är stabilt under

15 – 30 minuter. I vissa fall kan även axialspänningen behöva höjas för att stoppa en svällning.

5.6.4 Vattenmättnad

Ett vattenmättat system är en förutsättning för att uppmätta volym- och portrycksförändringar under provningen är korrekta.

Svenska leror provtagna från djup under grundvattenytan är oftast vattenmättade. Luft kan däremot finnas i systemet ändå. Exempel på luftfickor kan vara i utrustningens kopplingar eller mellan membranet och provet (ojämnheter i provets mantelyta). Om vattnet i portryckssystemet har stått en längre tid kan luft som tidigare varit löst i vattnet skapa luftbubblor som fastnar i slangkrökar och kopplingar. Det är viktigt att man regelbundet byter ut vattnet i porvattensystemet med avluftat vatten. Det vatten som befunnit sig närmast provet under provning har också löst mest luft, vilket innebär att det också har blivit mindre ”aggressivt” i sin förmåga att lösa luft. En god rutin är därför att spola ur några ml vatten som ett inledande moment före provmontering 5.6.2.

Vattenmättnad av systemet är tidsberoende och påverkas av hur väl avluftat vattnet är. När trycket höjs i systemet, minskar den fria luftens volym kraftigt och ju högre trycket är desto fortare löses luften i vattnet. På motsvarande sätt kan luften gå ur lösning och bilda luftfickor när trycket sänks, precis som när koldioxid går ur lösning när en champagneflaska öppnas. Avluftat vatten är en färskvara och vattnet strävar efter att gå i jämvikt med löst luft om det har tillgång till fri luft. Ju mer luft som löses i vattnet, desto mindre benäget blir vattnet att lösa luft. Avluftat vatten kan inte lagerhållas. Om avluftat vatten ska stå i öppna kärl kan en oljefilm på ytan förlänga dess funktion.

I föregående moment har en stabil spänningssituation etablerats, vilket innebär att provet har en axiell och en radiell spänning samt ett portryck som kan kallas för mottryck. Dräneringskranarna är öppna och eventuellt uppvisar volymändringen en falsk svällning som beror på att porvattnet löser luft, vars volym behöver ersättas.

Nu kan en ramp startas där celltryck och mottryck (portryck) höjs parallellt till önskat mottryck. För att vara på säkra sidan och behålla den stabila effektivspänningen i provet kan celltrycksökningen gärna sättas till någon enstaka kPa över mottrycksökningen så att effektivspänningen är något högre vid rampens slut. Lämplig ramptid är 60 minuter.

Svensk standard anger ett mottryck på minst 300 kPa för att säkerställa vattenmättnad, men det viktigaste är att konstatera att systemet är vattenmättat innan konsolideringen påbörjas. Kan man visa att systemet är vattenmättat, spelar det mindre roll vilket mottryck man har. Anledningar till att använda ett lägre mottryck kan vara att utrustningen har begränsningar i celltryck eller axiallast. Att välja portryck efter in-situ-förhållanden är inte rekommenderat då det fyller inte någon funktion och det riskerar att äventyra vattenmättnadsgraden.

Det internationellt sett vanligaste sättet att påvisa vattenmättnad är B-värde testet. B är en av Skemptions portrycksp parametrar och betecknar kvoten mellan ändringen i portryck och den isotropa ändringen av celltrycket i triaxialcellen.

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_r}$$

Testet genomförs genom att med stängda dräneringskranar, momentant höja celltrycket med exempelvis 20 kPa och därefter vänta till portrycket stabiliserats (<10 min). Portrycksökningen delas med celltrycksökningen och kvoten ska vara större än 0,95 för att systemet ska anses vattenmättat. Om inte villkoret är uppfyllt, höj mottrycket, invänta stabilisering av volymändringen och testa igen. Observera att detta kriterium är lågt satt och att svenska leror ofta ger värden som ligger närmare 1. Mycket styva prover, exempelvis kemiskt stabiliserade prover, kan ha svårt att komma upp till 0,95 trots att de är vattenmättade. Om B-värdet är över 1 är orsaken oftast ett läckage mellan cellvätskan och provet, antingen genom hål i membranet eller en trasig slangkoppling.

Gällande provning av kemiskt stabiliserade prover så måste utrustningen kontrolleras så att inga delar som berör portryckssystemet är tillverkade av

aluminium. Porvattnet i stabiliserade prover har ett högt pH-värde, vilket leder till korrosion av aluminium, med vätgasutveckling som följd. Gasutvecklingen gör att volymtöjningar och vattenmättnadsgrad blir felaktiga under provningen.

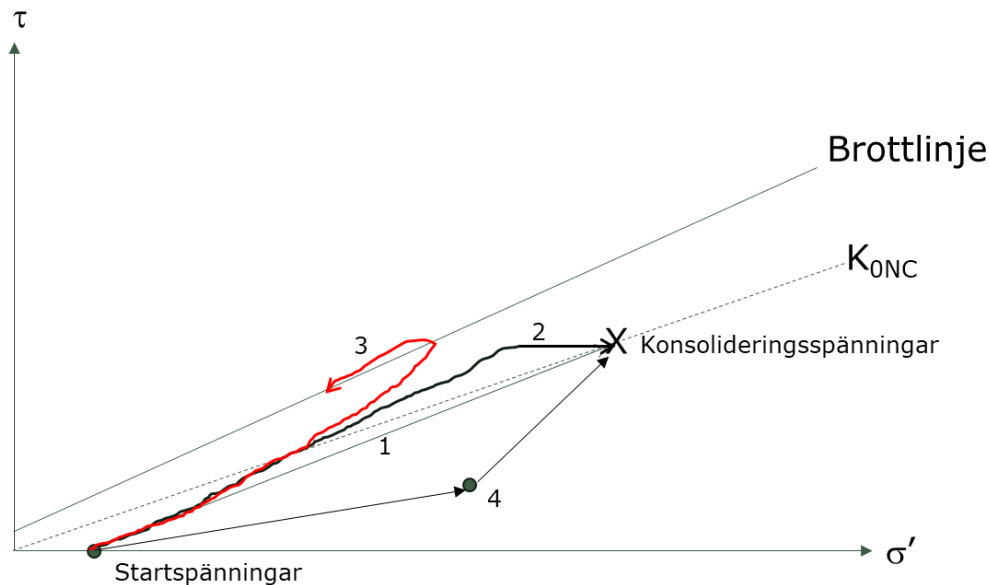
Ett annat sätt att påvisa att systemet är vattenmättat är att, efter att mottrycket och celltrycket rampats upp till valt mottryck, plotta den falska svällningen i volymändring av provet och konstatera att denna ”volymökning” planat ut med tiden. Det betyder att ingen mer vattenvolym behöver tillföras provet för att lösa kvarstående luft.

5.6.5 Konsolidering

Konsolideringen är den del av provningen där de effektivspänningar som provet ska skjuvas vid skapas. Vid tidigare moment har ett vattenmättat prov i jämvikt vid relativt låga effektivspänningar skapats. Totalspänningarna är dock ganska höga, om effektivspänningen är 9 kPa och mottrycket är 300 så blir det totala celltrycket 309 kPa. Nästa steg är att påföra konsolideringsspänningarna på ett sådant sätt att provet inte går till brott under konsolideringen. Konsoliderings-spänningarna bör tas fram av en kompetent geotekniker och motsvara syftet med provningen.

Under konsolideringsfasen är provningen spänningsstyrd, vilket innebär att om brottillstånd uppkommer i provet så går provet snabbt till brott. En idealiserad spänningsväg visas som kurva nr 1 i Figur 17, från startspänning till konsolideringsspänning. Lokala portryckshöjningar i provkroppen under konsolideringen är dock oundvikliga men i ett lyckat fall ser den verkliga spänningsvägen ut som kurva nr 2 i Figur 17.

Den vanligaste anledningen till brott under konsolideringen är att portrycksökningen i någon del av provkroppen sänker den effektiva medelspänningen så mycket att brottlinjen i spänningsplanet nås, se kurva nr 3 i Figur 17. Detta kan bero på en alltför hög spänningsökningshastighet längs med en spänningsväg med för lågt K_0 eller att spänningsvägen överskrider det vertikala förkonsolideringstrycket, med plasticering som leder till en portrycksökning.



Figur 17 Visualisering av spänningsvägar under konsolidering.

Vid provning där extra försiktighet behöver iakttas (prov har tidigare gått till brott under konsolidering eller osäkerhet råder kring provets in situ-förhållanden) kan provet med fördel konsolideras i två steg. I första steget höjs radialspränningarna till sitt slutvärde, tillsammans med en del av skjuvspänningen, varefter man i ett andra steg påför den återstående skjuvspänningen, se kurva nr 4 i Figur 17. Man kan också påföra spänningarna i en långsammare takt.

Tiden som behövs för att påföra konsolideringsspänningarna beror på hur tätt provet är. För en vanlig svensk lera är ett minimum av fyra timmar en rimlig tid, medan för en silt kan det räcka med 30 minuter.

Ett ”traditionellt” sätt att konsolidera prover till in situ-spänningar i Sverige är att först lasta upp till 80% av det vertikala förkonsolideringstrycket med ett K_0 som motsvarar ett empiriskt framräknat K_{0NC} (kring 0,5–0,7). Sedan lastas provet av till in situ-spänningar med ett K_0 som beräknats med hänsyn till provets överkonsolideringsgrad, se 5.3.

Detta sätt att, via en något riskabel spänningsväg återbelasta proverna, är ett svenskt förfarande som har sitt ursprung i hur vi normalt utför våra direkta skjuvförsök (DSS).

En anledning till att återbelasta proverna kan vara att E-modulen under skjuvningsfasen är av stort intresse, då denna blir mer rättvisande efter en av- och pålastning. En del av störningarna hos provet som beror på avlastningar under provtagning och provpreparering kan också reverseras med hjälp av att rekonsolidera provet med rimliga spänningsvägar.

Detta sätt att konsolidera provet innebär viss risk för krypdeformationer vid $>80\%$ av förkonsolideringstrycket och provet bör inte ligga mer än ett par timmar med den belastningen. Sedan görs en avlastning ner till de tänkta slutspänningarna. Denna avlastning kan göras relativt snabbt med en avlastningstid på 30 minuter som riktvärde. Dessa spänningar ska ligga på till provets konsolideringstöjningar har planat ut. Det kan ta mellan 14 och 20 timmar för en vanlig svensk lera. I den svenska standarden finns ett riktvärde som säger att volymändringen ska vara mindre än $0,1\%/h$ för att konsolideringen ska anses klar.

5.6.6 Skjuvning

När provet är i jämvikt (töjningskurvorna mot tiden har planat ut) efter konsolideringen kan skjuvning till brott påbörjas. Denna skjuvning kan utföras på flera sätt och ske under antingen dränerade eller odränerade förhållanden.

Det vanligaste och enklaste sättet att åstadkomma brott är att med en konstant axiell deformationshastighet trycka ihop provet eller avlasta det till dess att brott nås. Denna hastighet behöver vara tillräckligt långsam för att porttrycken i provkroppen ska kunna anses vara jämnt fördelade. För en vanlig svensk lera är en deformationshastighet på $0,6\%/h$ lämplig för odränerade försök och för dränerade försök är hastigheten en tiondel d.v.s. $0,06\%/h$. Dessa deformationshastigheter gäller både aktiva (kompression) och passiva (extension).

Det kan finnas anledning att välja en högre deformationshastighet i fall där proverna är mindre täta än vanliga svenska leror. Det kan röra sig om provning av exempelvis siltiga prover. Deformationshastigheten kan då beräknas utifrån tiden för primärkonsolidering (t_{90} eller t_{100}), som tas fram genom att utvärdera

stegvisa konsolideringsprovningar, antingen genom ödometerförsök eller genom att utföra isotropa konsolideringssteg som en del av konsolideringsproceduren i triaxialapparaten. Ett sätt att utföra dessa beräkningar finns i den svenska standarden. Att använda högre belastningshastigheter bör stämmas av med beställaren av försöken och motiveras av en dokumenterad beräkning.

Alternativa sätt att åstadkomma brott är att med spänningsstyrning skapa spänningsvägar som motsvarar specifika spänningssituationer. Oavsett vilken spänningsväg man använder är det svårt att utvärdera de effektiva brottparametrarna vid spänningsstyrda försök eftersom deformationshastigheten ökar exponentiellt när provets spänningar närmar sig brottillståndet. Detta leder till en ojämn portrycksfördelning i provet med stora ändringar i brottzonen som inte hinner förmedlas till ändytorna där portrycket mäts. Detta kan undvikas med avancerad utrustning som kan gå över i deformationsstyrning när deformationshastigheten överskrider sin maximala hastighet. Exempel på spänningsstyrda försök kan vara att:

- Öka den axiella spänningen med styrning av den radiella spänningen så att den effektiva axialspänningen är konstant. Detta kan motsvara en situation där horisontalspänningen minskar vid schakt.
- Minska den radiella effektivspänningen med en konstant skjuvspänning. Detta kan motsvara en portryckshöjning i en slänt.
- Öka axialspänningen med styrning av radialspeänningen så att medeleffektivspänningen är konstant. Detta kan vara användbart när man vill undvika att det vertikala förkonsolideringstrycket överskrids.

Spänningsstyrda skjuvningar i triaxialapparaten är att betrakta som specialförsök och bör planeras noggrant. Extra tanke bör läggas på spänningsökningstakten vid dessa försök där en ideal spänningsökning går från en hög takt till en låg när brottet närmas. I det enklaste fallet antas en tid till brott och en brottspänning vid deformationsstyrt brott. Från denna tid och spänning fås en spänningsökningshastighet.

5.7 REDOVISNING

Följande information ska finnas med på en redovisning av utfört triaxialförsök:

- Provets identitet (borrhål/djup)
- Provets dimensioner och densitet
- Provets vattenkvot bestämd på intilliggande material
- Provets vattenkvot efter provning om det är relevant
- Provningens miljöns temperatur
- Axiella och volymetriska konsolideringstöjningar och spänningar
- Skjuvspänning och axielltöjning vid brott (om tydligt brott uppnåts)
- Huvudspänningar vid brott (om tydligt brott uppnåts)
- Deformationshastighet under skjuvningsfasen
- Beskrivning av provkroppens geometri efter provning, exempelvis med foto.

Diagram som bör finnas med i redovisningen:

- Skjuvspänning mot axiell töjning
- Portrycksändring mot axiell töjning (odränerat)
- Volymändring mot axiell töjning (dränerat)
- Skjuvspänning eller deviatorspänning mot medeleffektivspänning

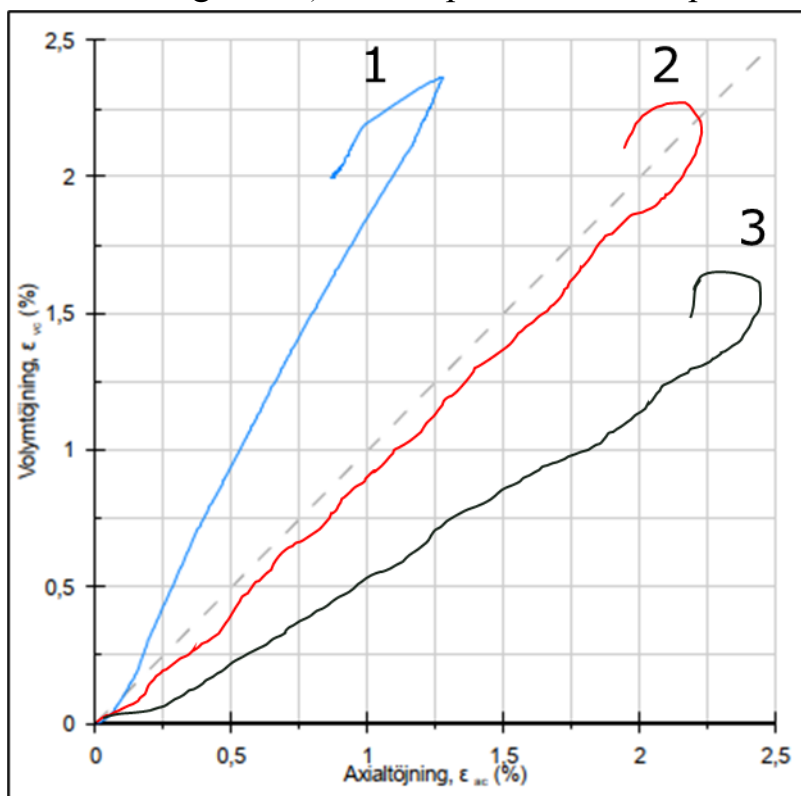
Diagram som visar volymtöjning mot axielltöjning under konsolideringsfasen kan vara till stor hjälp för geoteknikern om osäkerhet råder kring K_{0NC} och effektiva in situ-spänningar. I Figur 18 visas ett exempel på en tvåsidig redovisning av ett triaxialförsök.

beställande geoteknikern tillhandahåller. Nedan visas några olika utfall som man kan se när data plottas efter provning.

5.8.1 Konsolideringsfasen

I Figur 19 nedan visas volym- mot axialtöjningar från konsolideringsfasen för ett lerprov som konsolideras till $0,8 \times \sigma'_c$ och sedan avlastats till bedömda in situ-spänningar. I figuren visas 3 olika exempel med varierande K_0 -värden, dvs. 3 olika spänningsvägar.

Om volym- och axialtöjningar är lika stora så motsvarar det en K_{0NC} -konsolidering, vilket innebär att töjningen varit mer eller mindre endimensionell. Det betyder att geoteknikern har valt ett K_{0NC} som stämmer med lerans verkliga K_{0NC} , se exempel 2 där värdet på K_{0NC} varit väl valt.



Figur 19 Volymtöjning plottad mot axialtöjning under konsolideringsfasen där ett prov har lastats upp och sedan lastats av för tre olika kombinationer av K_0 .

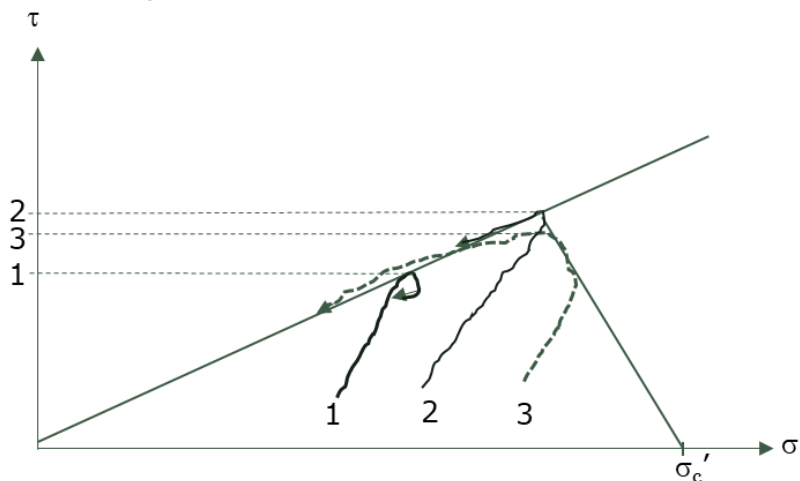
- I exempel nr. 1 kan man se att volymtöjningarna är större än axialtöjningarna under upplastningsfasen, vilket kan tolkas som att radialspanningen har varit för högt vald och därmed är valt värde på K_{0NC}

för högt. Det innebär också att man ligger på säkra sidan när det gäller risk för brott under konsolideringsfasen.

- I exempel nr. 3 är axialtöjningen större än volymtöjningen vilket innebär att valt K_{ONC} -värdet nog är lite för lågt och att man löper risk att få ett brott under konsolideringen om fler försök ska utföras i samma formation. Geoteknikern bör då se över sin geomodell.

5.8.2 Skjuvningsfasen

Data från en odränerad skjuvningsfas som ritas upp i ett spänningsplan kan ge information om hur provet reagerar på belastning, se Figur 20. Provet har ett förkonsolideringstryck som representeras av en inritad linje. En brottlinje för provet är också inritad i Figur 20. Startpunkten, i spänningsplanet, för skjuvningsfasen är i bästa fall representativ för de verkliga förhållandena i marken. Spänningsvägen kommer då att ge ett maximumvärde på skjuvspänningen som motsvarar den odränerade aktiva skjuvhållfastheten i fält. Om startspänningarna inte motsvarar de verkliga förhållandena kan den resulterande uppmätta odränerade skjuvhållfastheten bli både högre och lägre än den verkliga.



Figur 20 Exempel på tre möjliga spänningsvägar för ett jordprov som konsoliderats för olika startspänningar. Medeleffektivspänningen på x-axeln är $(\sigma'_a + \sigma'_r)/2$.

Det ställer höga krav på beställaren av triaxialförsök, d.v.s. handläggande geotekniker, som behöver uppskatta både den vertikala och den horisontella

effektivspänningen på det aktuella djupet i marken som provet är taget ifrån. Det kräver en god bild av ovanliggande jordlayers tunghet, grundvattenytans läge och en korrekt uppskattning av K_0 för att beräkna horisontalspänningen. I Figur 20 har exempel på tre möjliga spänningsvägar ritats in där startspänningarnas medeleffektivspänning skiljer sig åt.

- Startpunkt 1: Provet startar på så låga spänningar i förhållande till sitt förkonsolideringstryck att spänningsvägen träffar brottlinjen först. Vid den inledande delen av brottförloppet sjunker portrycket (provet dilaterar) och spänningsvägen svänger åt höger i diagrammet. När brottet utvecklas så stiger portrycket och spänningsvägen svänger åt vänster i diagrammet.
- Startpunkt 2: Provets spänningsväg når det vertikala förkonsolideringstrycket ungefär samtidigt som det når brottlinjen. Vid brott kontrakterar leran och spänningsvägen svänger åt vänster i spänningsplanet.
- Startpunkt 3: Provets spänningsväg träffar först det vertikala förkonsolideringstrycket och provet börjar plasticera, vilket leder till portrycksökning som tvingar spänningsvägen till en vänstersväng upp mot brottillstånd.

Alla tre värdena på odränerad skjuvhållfasthet kan vara korrekta beroende på provets spänningshistoria och den nuvarande spänningssituationen *in situ*, eller gällande spänningssituationen för projektet.

5.9 KVALITETSKONTROLL

Vid nästan varje arbetsmoment finns risk att provet blir (ännu mer) stört. Hantering av provet vid preparering och montering i triaxialcellen kan på olika sätt skada eller störa provet. Under inledande moment såsom ”etablering av en stabil spänningssituation” kan man få en svällning av provet. Felaktigt val av spänningar vid konsolideringen kan plasticera provet, vilket gör att det ej längre är representativt för den situation som råder i fält.

Om geoteknikern har bedömt in situ-spänningar och spänningshistoria korrekt och om proverna är väl tagna, i en lätt överkonsoliderad jord som lämpar sig för provtagning, så resulterar det i konsolideringstöjningar som ligger mellan 2 och 3 % för en vanlig svensk lera med lågt organiskt innehåll. En aktiv skjuvning ger en brottöjning som ligger mellan 1 och 2 %.

Laboratoriet ska genom anmärkningar i redovisningen rapportera observationer av provkroppen och avvikelser som observeras under provningen så att användaren av resultaten har så goda förutsättningar som möjligt att bedöma kvaliteten på resultaten.

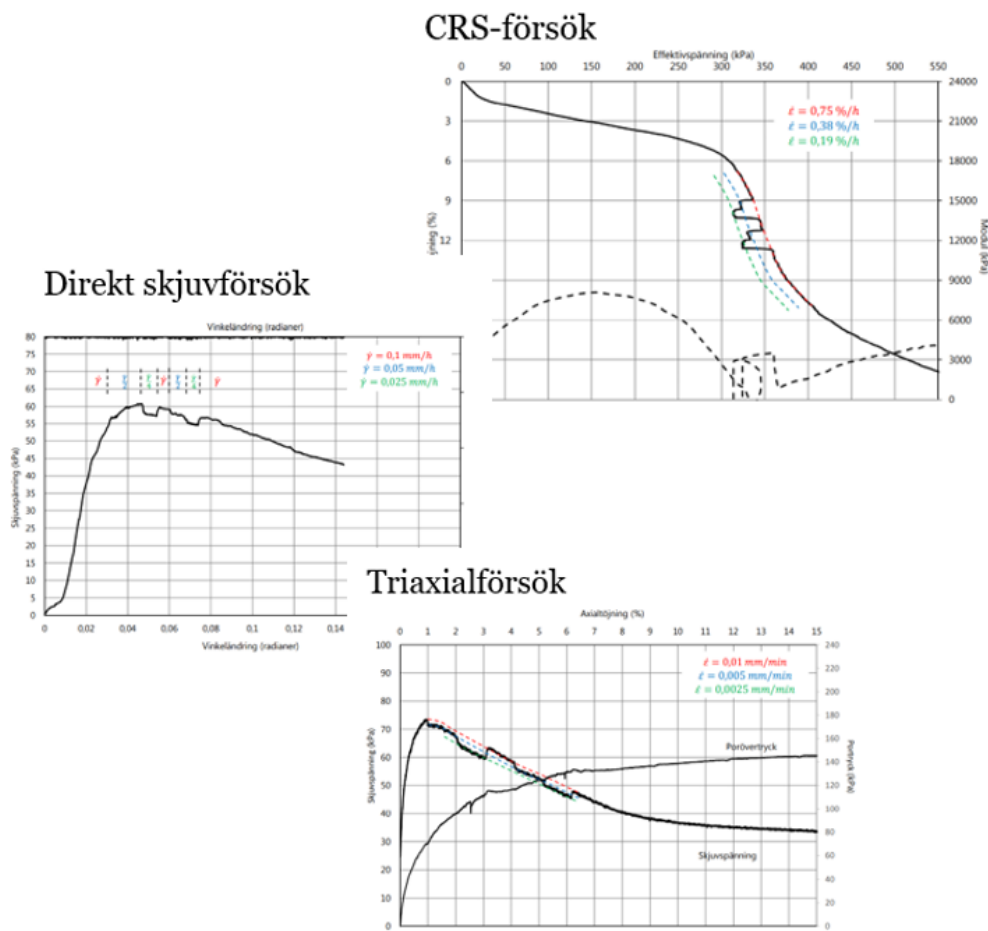
Kapitel 6

Faktorer att beakta vid härledning av egenskaper

6.1 INVERKAN AV BELASTNINGSHASTIGHET

Den praxis som utvecklats i Sverige för utförande och tolkning av såväl förkonsolideringstryck som skjuvhållfasthet, såväl från direkta skjuvförsök som från triaxialförsök, gäller leror som har haft förkonsolideringstryck upp till ca 100 kPa. Det medför att motsvarande tolkning av direkta skjuvförsök gäller för hållfasthet upp till ca 25 kPa och för triaxialförsök för hållfasthet upp till dryga 30 kPa.

För dessa försök anges deformationshastigheten i standard eller rekommendationer, egentligen ursprungligen töjningshastigheten. Det får till följd att ju fastare materialet är, desto högre blir belastningshastigheten. Egentligen är det just belastningshastigheten som är den avgörande parametern för hur spännings-töjningskurvans utseende påverkas. Exempel på detta illustreras i Fig.6.1. där deformationshastigheten ändrats under försökens gång.



Figur 21 Belastningshastighetens inverkan på spännings töjningskurvan.

I en rapport till Trafikverket (Sällfors, G. & Bengtsson, P.-E.), där just belastningshastighetens inverkan på spännings-töjningskurvan studerats, ges följande rekommendationer för justering av utvärderade förkonsolideringstryck och odränerad skjuvhållfasthet:

Justering av förkonsolideringstrycket

$$\sigma'_c{}^{\text{kor}} = \sigma'_c{}^{\text{std}} \cdot (100/\sigma'_c{}^{\text{std}})^B$$

där $B = 0,07 \cdot w_N$

$\sigma'_c{}^{\text{std}}$ är förkonsolideringstrycket enligt standard-förfarande

$\sigma'_c{}^{\text{kor}}$ är förkonsolideringstrycket korrigerat för hastighetseffekten

Justering av odränerad skjuvhållfasthet bestämd med direkt skjuvförsök:

$$c_u^{DS,korr} = c_u^{DS,std} \cdot (25/c_u^{DS,std})^B$$

$$\text{där } B = 0,06 \cdot w_N$$

$c_u^{DS,std}$ är skjuvhållfastheten enligt standardförfarande

$c_u^{DS,korr}$ är skjuvhållfastheten korrigerad för hastighetseffekten

Justering av aktiv odränerad skjuvhållfasthet bestämd med triaxialförsök:

$$c_u^{a,korr} = c_u^{a,std} \cdot (33/c_u^{a,std})^B$$

$$\text{där } B = 0,05 \cdot w_N$$

$c_u^{a,std}$ är skjuvhållfastheten enligt standardförfarande

$c_u^{a,korr}$ är skjuvhållfastheten korrigerad för hastighetseffekten

Justering av passiv odränerad skjuvhållfasthet bestämd med triaxialförsök:

$$c_{cu}^{p,korr} = c_{cu}^{p,std} \cdot (21/c_{cu}^{p,std})^B$$

$$\text{där } B = 0,05 \cdot w_N$$

$c_{cu}^{p,std}$ är skjuvhållfastheten enligt standardförfarande

$c_{cu}^{p,korr}$ är skjuvhållfastheten korrigerad för hastighetseffekten

(notera att $\log(20) = 1,3$)

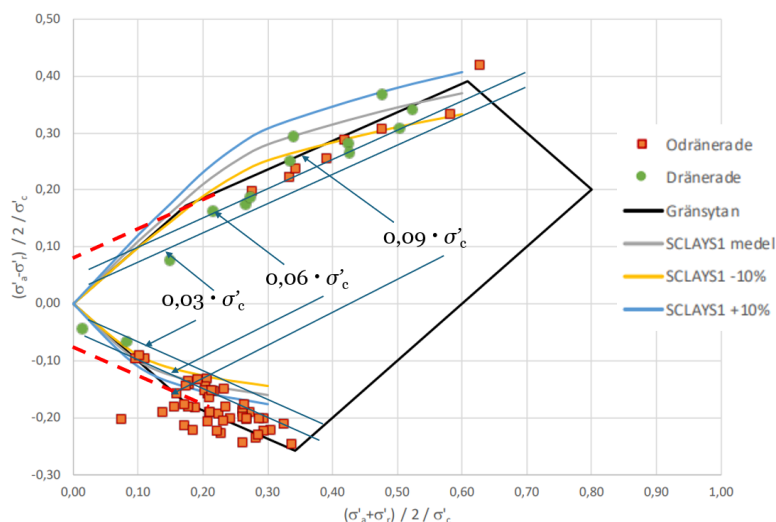
För en mer detaljerad redovisning hänvisas till följande rapport:

Anpassning av avancerade geotekniska laboratorieförsök till nya användningsområden (Sällfors, G. & Bengtsson, P.-E.)

6.2 INVERKAN AV OCR PÅ DE DRÄNERADE HÅLLFASTHETSPARAMETRARNA

När det gäller lerors dränerade hållfasthet används traditionellt en empiri, som med antagande om att $\varphi' = 30^\circ$, ansätts värdet på c' till $0,1 \cdot c_u$, alternativt $0,03 \cdot \sigma'_c$. Den rekommendationen baseras på undersökningar utförda främst i södra delen av Göta älv-området och stämmer förhållandevis väl för svagt överkonsoliderade leror.

I ett nyligen avslutat FoI-projekt för Trafikverket har omfattande studier av resultat från främst triaxialförsök på leror med högre OCR, storleksordningen 2 till 5, visat att, fortfarande med antagande om $\varphi' = 30^\circ$, erhålls ett påtagligt större värde på c' . c' torde vara i storleksordningen $0,06$ till $0,08 \cdot \sigma'_c$.



Figur 22 Sammanställning av resultat från odränerade triaxialförsök och dränerade försök, tillsammans med beräknade flytytor.

I rapporten rekommenderas dock att, för de fall där $OCR > 2$, görs en beräkning för att se vilken inverkan ett högre c' skulle ha på designen. Om denna inverkan innebär kostnadsminskningar vida överstigande kostnaden för ett par

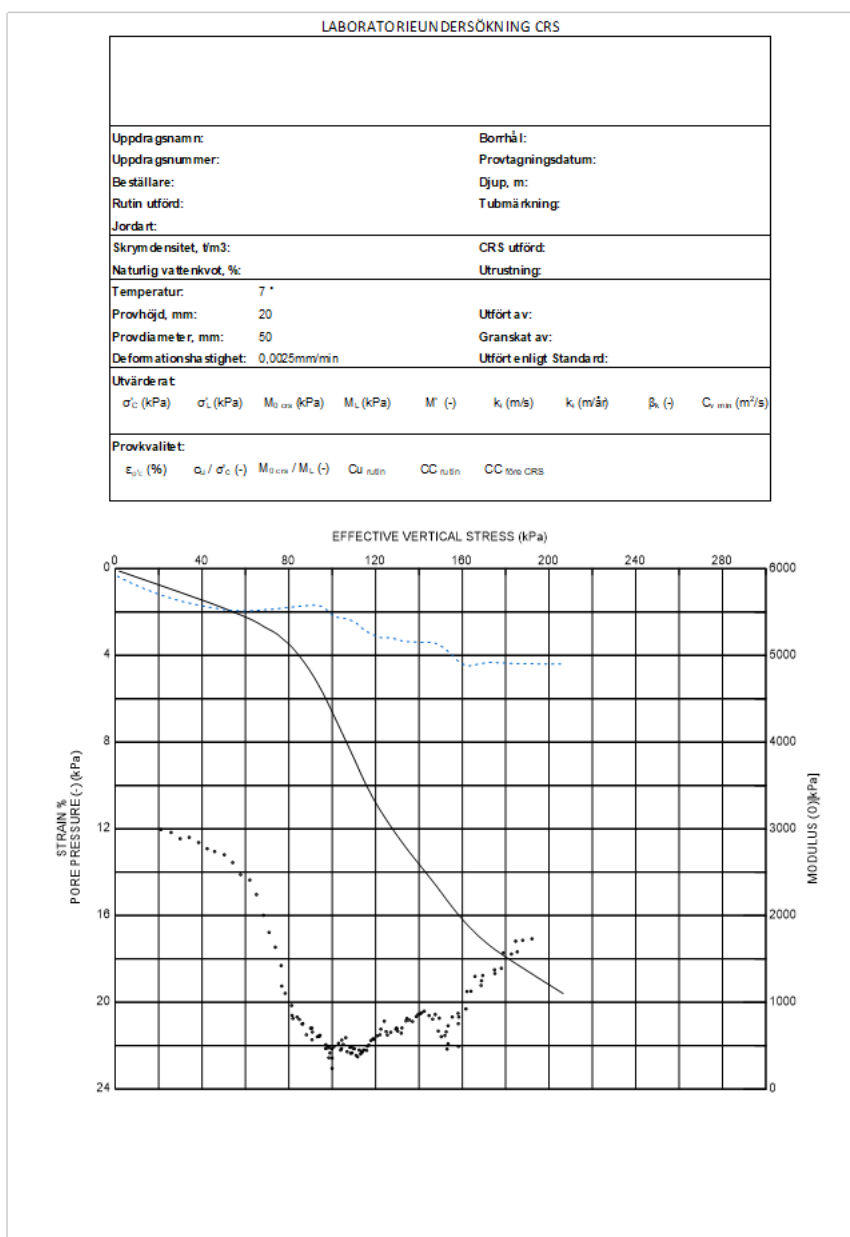
triaxialförsök, rekommenderas att dessa försök utförs. Underlaget är idag inte tillräckligt omfattande för att direkt använda de högre värdena på c' , utan att verifiera detta med några triaxialförsök.

Referenser

- Liang, L. (2019).** On the Impact of Temperature Perturbations on the Creep of Sensitive Clays. Doctoral Thesis, Chalmers University of Technology. Göteborg.
- Moritz, L. (1995).** Geotechnical Properties of Clay at Elevated Temperatures. SGI, Report 47. Linköping.
- SGF, (2004).** Direkta skjuvförsök – en vägledning (Notat 2:2004). SGF
- SGF, (2012).** Triaxialförsök – En vägledning (Rapport 2:2012). SGF
- SGF, 2017.** Metodik för bestämning av skjuvhållfasthet i lera – En vägledning (Rapport 1:2017). SGF
- SIS. (1991).** Geotekniska provningsmetoder – Skjuvhållfasthet – Direkta skjuvförsök, CU- och CD-försök – Kohesionsjord (SS 02 71 72, utg.1). SIS.
- Sällfors, G. & Bengtsson, P-E, 2022.** Trafikverket. Anpassning av avancerade geotekniska laboratieförsök till nya användningsområden.
- Tidfors, M. & Sällfors, G. (1989).** Temperature Effects on Preconsolidation Pressure. ASTM Testing Journal, Vol.12, No 1.

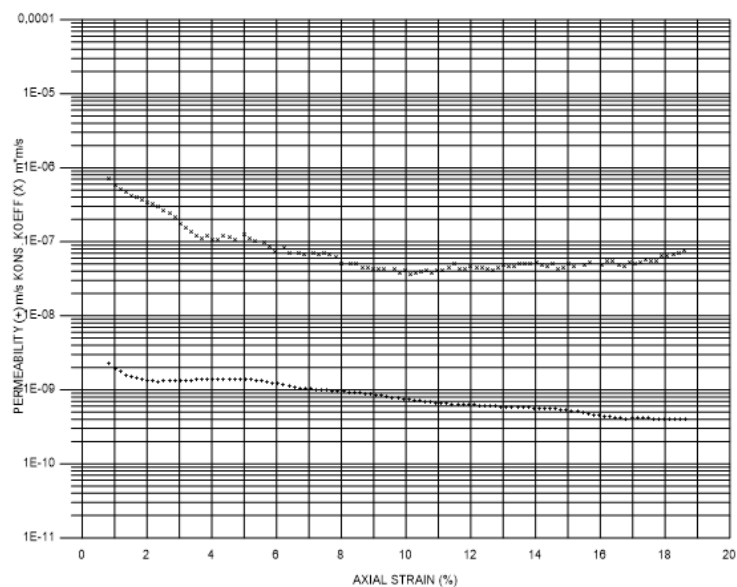
Bilaga A.

Exempel på redovisning CRS-försök



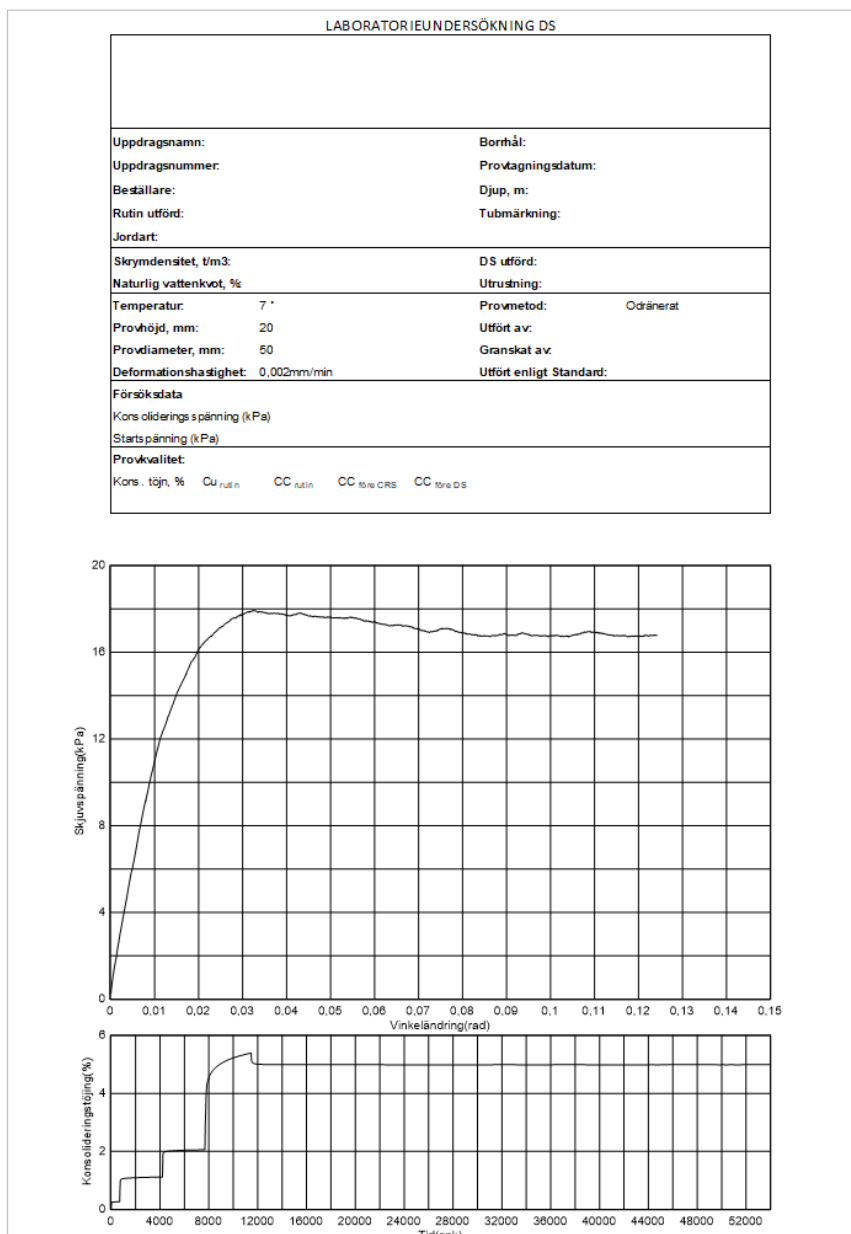
LABORATORIEUNDERSÖKNING CRS

Uppdragsnamn:		Borrhål:	
Uppdragsnummer:		Provtagningsdatum:	
Beställare:		Djup, m:	
Rutin utförd:		Tubmärkning:	
Jordart:			
Skrymde nsitet, t/m3:		CRS utförd:	
Naturlig vattenkvot, %:		Utrustning:	
Temperatur: 7 °			
Provhöjd, mm: 20		Utfört av:	
Provdiameter, mm: 50		Granskat av:	
Deformationshastighet: 0,0025mm/min		Utfört enligt Standard:	
Utvärderat			
σ'_c (kPa)	σ'_L (kPa)	$M_{0,CRS}$ (kPa)	M_L (kPa)
M' (-)	k_i (m/s)	k_i (m/år)	β_k (-)
$C_{v,CRS}$ (m ² /s)			
Provkvalitet:			
ε_{vL} (%)	α_v / σ'_c (-)	$M_{0,CRS} / M_L$ (-)	$C_{v,CRS}$
		$C_{v,CRS}$	$C_{v,CRS}$



Bilaga B.

Exempel på redovisning Direkta skjuvförsök



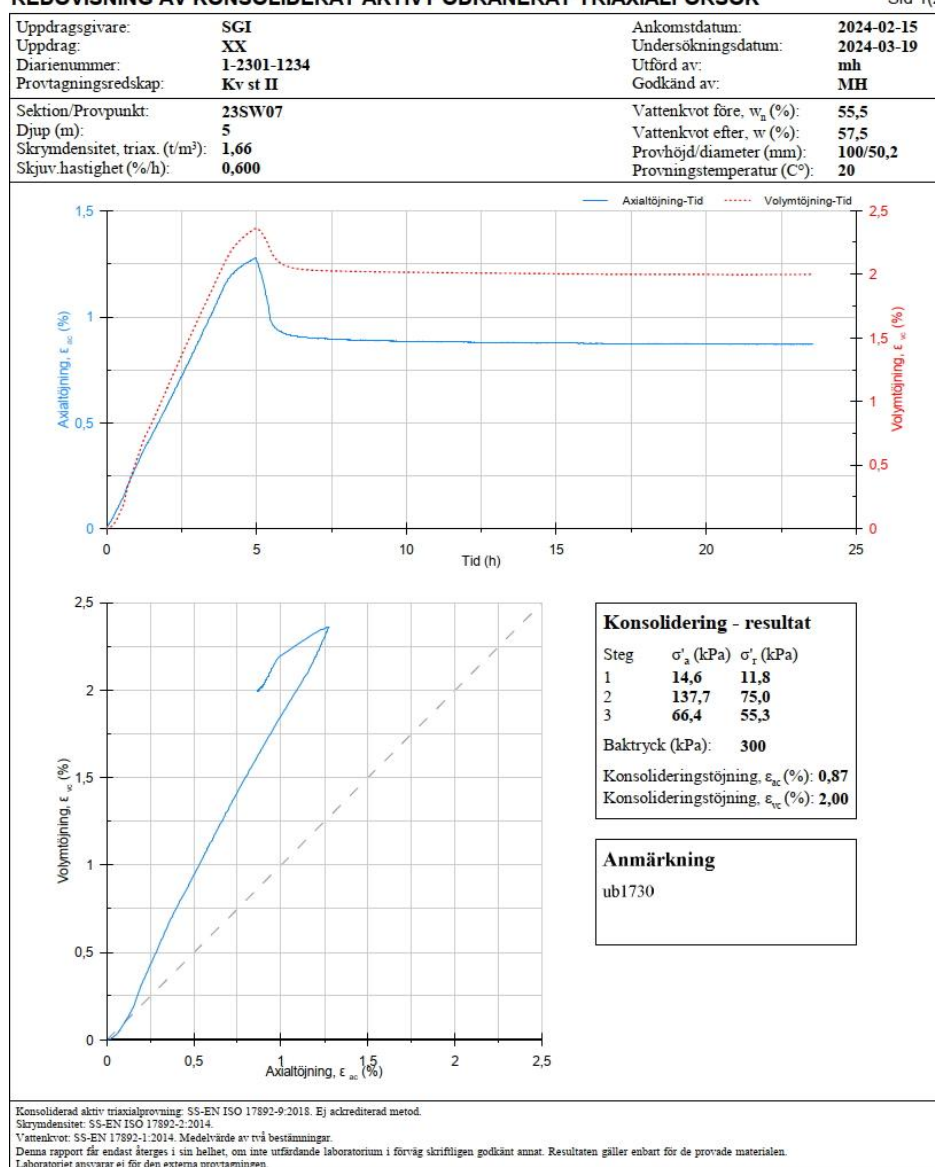
Bilaga C.

Exempel på redovisning

Triaxialförsök

REDOVISNING AV KONSOLIDERAT AKTIVT ODRÄNERAT TRIAXIALFÖRSÖK

Sid 1(2)



REDOVISNING AV KONSOLIDERAT AKTIVT ODRÄNERAT TRIAXIALFÖRSÖK

Sid 2(2)

Uppdragsgivare:	SGI	Ankomstdatum:	2024-02-15
Uppdrag:	XX	Undersökningsdatum:	2024-03-19
Diarienummer:	1-2301-1234	Utförd av:	mh
Provtagningsredskap:	Kv st II	Godkänd av:	MH
Sektion/Provpunkt:	23SW07	Vattenkvot före, w_a (%):	55,5
Djup (m):	5	Vattenkvot efter, w (%):	57,5
Skrymdensitet, triax. (t/m^3):	1,66	Provhöjd/diameter (mm):	100/50,2
Skjuvhastighet (%/h):	0,600	Provningstemperatur ($^{\circ}C$):	20

The graph shows two curves: a solid blue line for Skjuvspänning, τ (kPa) and a dashed red line for Portrycksändring, $\Delta\sigma_v$ (kPa). The x-axis is Axialtöjning, ϵ_{ax} (%) from 0 to 18. The left y-axis is Skjuvspänning, τ (kPa) from 0 to 55. The right y-axis is Portrycksändring, $\Delta\sigma_v$ (kPa) from 0 to 35. The blue curve starts at (0,0), peaks at approximately (1, 50), and then gradually decreases to about 35 kPa at 18% strain. The red curve starts at (0,0), rises sharply to about 30 kPa at 1% strain, and then continues to rise more slowly, reaching approximately 33 kPa at 18% strain.

The graph shows a single blue curve representing the relationship between Skjuvspänning, τ (kPa) on the y-axis (0 to 90) and Medeleffektivspänning $(\sigma'_a + \sigma'_r)/2$ (kPa) on the x-axis (0 to 90). The curve starts at (0,0), rises to a peak of approximately 50 kPa at a medeleffektivspänning of about 80 kPa, and then descends to about 35 kPa at a medeleffektivspänning of about 60 kPa.

Skjuvning - resultat

Skjuvhållfasthet, τ_f (kPa): **49,8**

Brottöjning, ϵ_{bf} (%): **1,05**

Brottspänning, σ'_{bf} (kPa): **132,0**

Brottspänning, σ'_{tf} (kPa): **32,3**

A photograph of a soil specimen, likely a triaxial test specimen, showing its cylindrical shape and the surrounding testing apparatus. The specimen is dark in color and appears to be made of a cohesive material.

Konsoliderat aktiv triaxialprovning: SS-EN ISO 17892-9:2018. Ej ackrediterad metod.
Skrymdensitet: SS-EN ISO 17892-2:2014.
Vattenkvot: SS-EN 17892-1:2014. Medelvärde av två bestämmingar.
Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat. Resultaten gäller enbart för de provade materialen.
Laboratoriet ansvarar ej för den externa provtagningen.

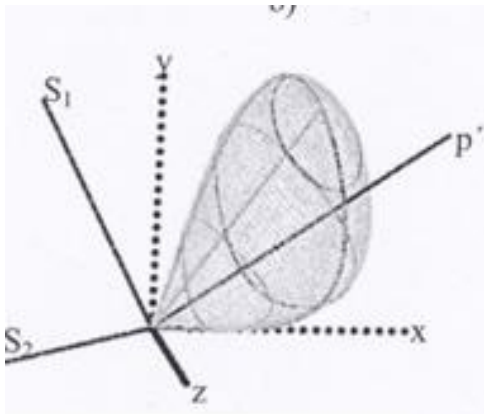
Bilaga D.

Förenklad flytyta och empiri

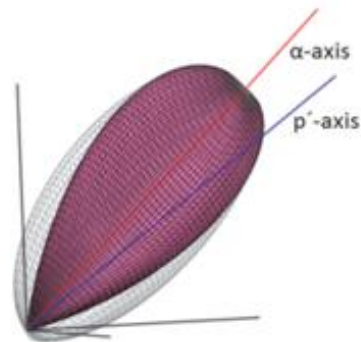
En leras hållfasthets- och deformationsegenskaper beror i huvudsak på dess sammansättning och spänningshistoria. I våra enkla modeller för hållfasthet använder vi ofta Mohr-Coulombs brottvillkor och då speciellt hållfasthetsparametrarna c' och φ' , alternativt den odränerade hållfastheten c_u . När det gäller en leras deformationsegenskaper är den absolut viktigaste parametern förkonsolideringstrycket, σ'_c .

Vi ska här visa en enkel modell, som hjälper oss att förstå de resultat som vi får från ett triaxialförsök.

Bland de konstitutiva modeller som används inom FEM-analyser, är det vanligt att man illustrerar dem i huvudspänningsrymden, σ'_1 , σ'_2 , och σ'_3 . Exempel på två sådana modeller visas i Figur B2.1.

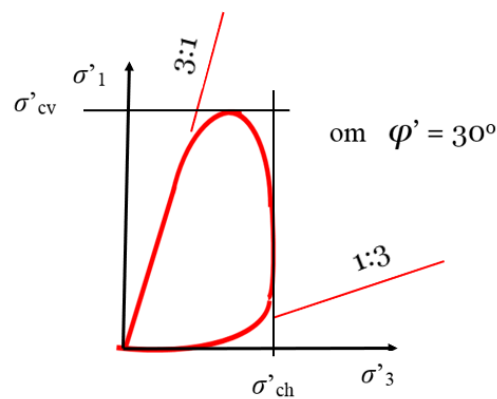
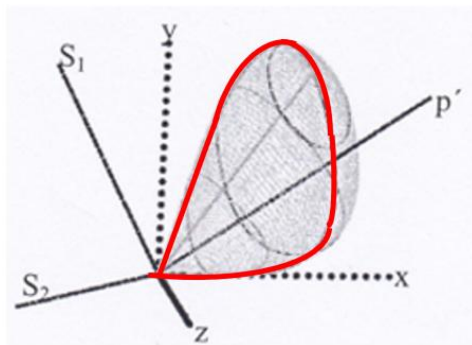


Figur B2.1. a. Modell MIT S1
(A. Kullingsjö, 2007)



b. "MAC-s" modified
anisotropic creep Model with
structure (M. Karlsson, 2013)

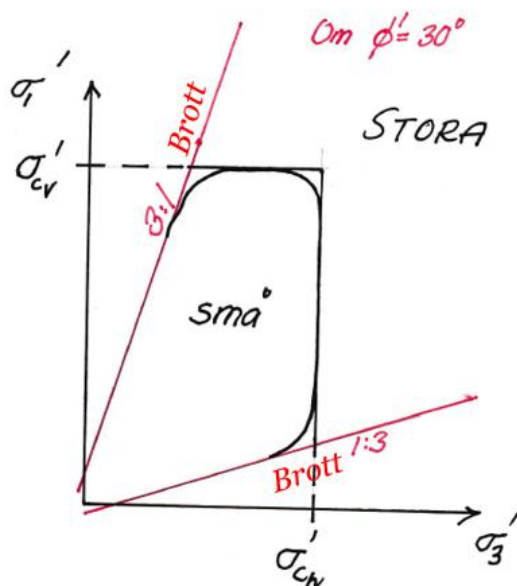
Tänker man sig ett vertikalt snitt genom Figur B2.1.a., så som illustreras i Figur B2.2. och projicerar den ytan i $\sigma'_1 - \sigma'_3$ -planet erhåller man en flytyta i planet $\sigma'_1 - \sigma'_3$.



Figur B2.2 Vertikalt snitt genom rymsdiagonalen i modell MIT S1.

I den högra delen av Figur B2.2. visas motsvarande flytyta, nu i ett $\sigma'_1 - \sigma'_3$ diagram. Där återfinns Mohr-Coulombs brottlinjer, om ϕ' antas till 30° , med det förenklande antagandet att $c' = 0$, i lutning 1:3 respektive 3:1.

I samma figur har förkonsolideringstrycken i vertikalled, σ'_{cv} , respektive i horisontalld, σ'_{ch} , lagts in. Rundar man av hörnen lite, så erhålls en förenklad flytyta, som sedan kan jämföras med dem som de mer komplicerade modellerna ger, se figur B2.3. Det principiella utseendet är snarlikt det som de avancerade modellerna ger.

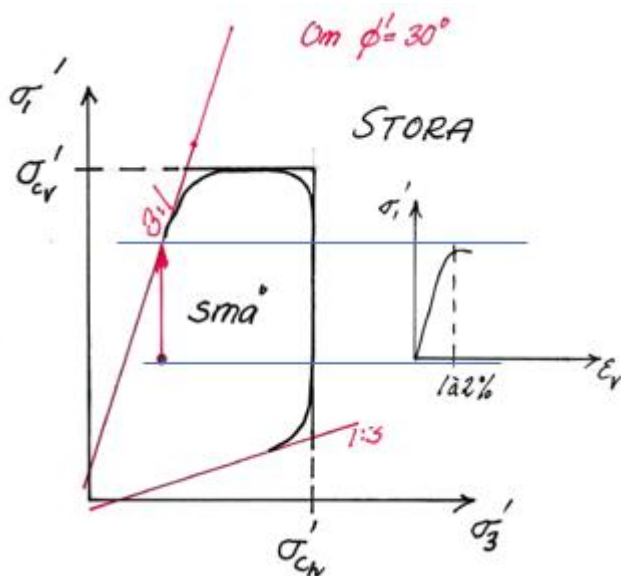


Figur B2.3. Förenklad flytyta

Spänningsförändringar inom flytytan medför små töjningar. I figur B2.3. framgår att, när spänningstillståndet når någon av de röda linjerna inträffar brott. På motsvarande sätt innebär att när spänningstillståndet förändras så att man

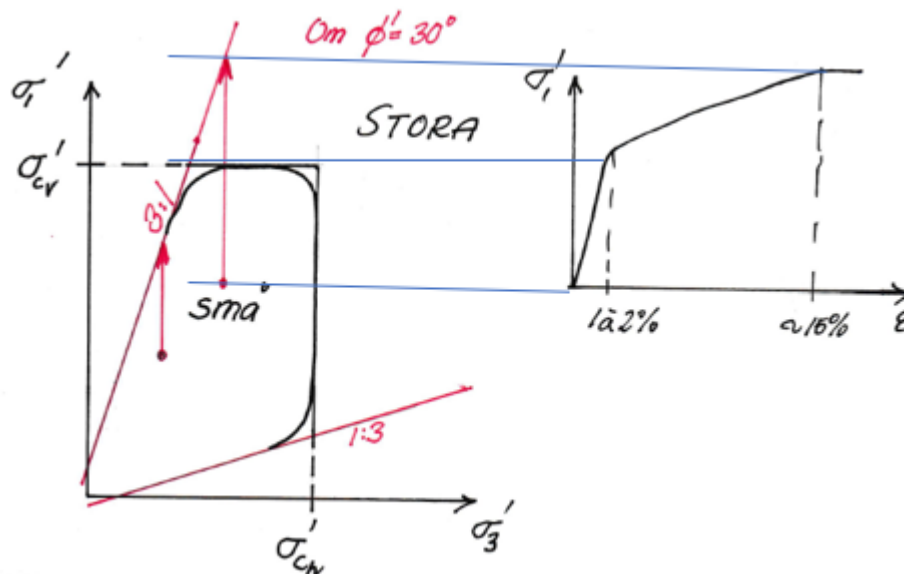
Denna förenklade flytyta, som således har en mycket god förankring i de mer avancerade modellerna, används i denna bilaga för att konceptuellt förklara hur spänningsvägarna från triaxialförsök med olika randvillkor kan förväntas se ut.

I Figur B2.4 visas spänningsvägen för ett dränerat triaxialförsök på ett lerprov som har ett OCR större än ca 2. Spänningsvägen går vertikalt uppåt och träffar brottlinjen, varvid brott inträffar. Den vertikala töjningen är då ganska liten, 1 à 2%.



Om provet däremot är normalkonsoliderat eller svagt överkonsoliderat kommer spänningsvägen, som är vertikal, att träffa linjen representerande förkonsolideringstrycket efter några procents vertikal deformation. Därefter inträder stora vertikala töjningar innan spänningsvägen så småningom når brottytan, se Figur B2.5.

Figur 2.4. Förenklad flytyta med spänningsväg för ett prov med $OCR > 2$



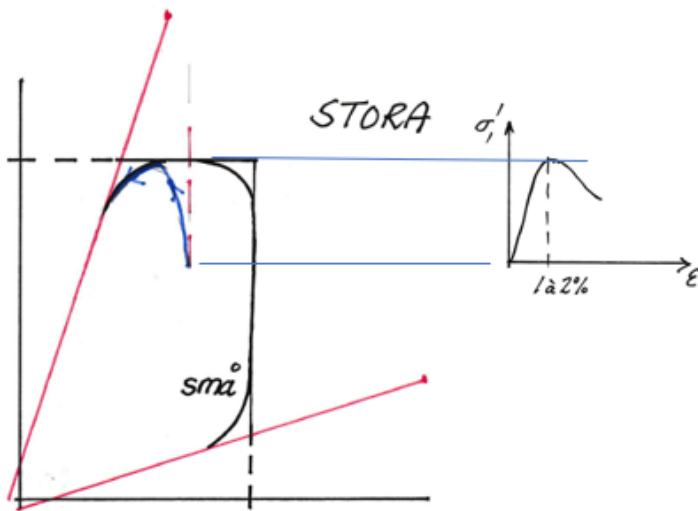
Figur B2.5. Förenklad flytyta med spänningsväg för ett prov med $OCR < 1,5$

Att från ett sådant försök utvärdera hållfasthetsparametrar, där vertikaltöjningen är i storleksordningen 15 % till brott, är inte lämpligt.

Av ovanstående blir det uppenbart att när man ska bestämma de dränerade hållfasthetsparametrarna, måste man se till att välja startspänningar och randvillkor på ett sådant sätt att spänningsvägen träffar brottlinjen först och inte förkonsolideringstryckslinjen.

Odränerat triaxialförsök

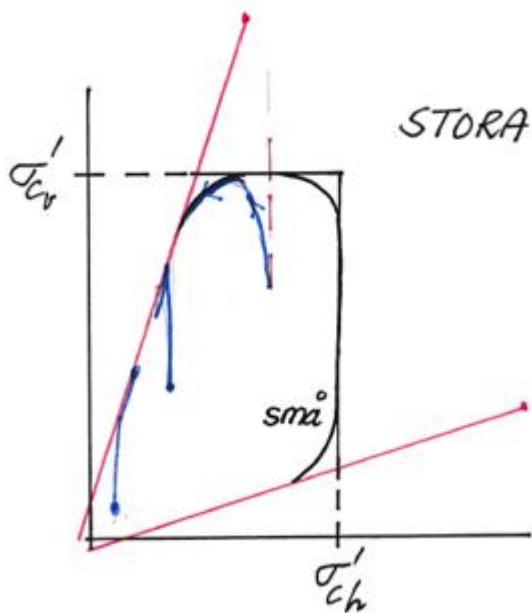
Om man däremot ska utföra ett odränerat triaxialförsök, styrs spänningsvägen av samma förenklade flytyta. Det innebär att om ett odränerat triaxialförsök utförs på en lera, som är svagt överkonsoliderad, kommer spänningsvägen inte gå vertikalt upp, utan böjer av svagt åt vänster, beroende på att det uppkommer portryck under försöket, se Figur B2.6.



Figur B2.6. Förenklad flytyta med spänningsväg för ett odränerat prov med $OCR < 1,5$

När spänningsvägen sedan närmar sig linjen för förkonsolideringstrycket utbildas stora portryck, eftersom ett vattenmättat prov inte kan minska i volym. Därmed minskar horisontalspänningarna och spänningsvägen böjer av åt vänster. Kort därefter träffar spänningsvägen brottlinjen och brott utbildas. Spänningsvägen karakteriseras av en ganska mjuk form och den maximala vertikalspänningen under försöket motsvarar förkonsolideringstrycket, som således kan utvärderas på detta sätt ur ett odränerat triaxialförsök, förutsatt att OCR för provet är mindre än ca 2.

Om provet i stället har ett OCR som är större än ca 2 kommer spänningsvägen att först träffa brottytan. Provet vill då dilatera, och eftersom volymen är konstant leder det till minskande portryck och ökande effektivspänningar. Beroende på provets OCR får spänningsvägen lite olika utseende, se vidare Figur B2.7.



Figur B2.7. Förenklad flytyta med spänningsväg för ett odränerat prov med OCR > 2

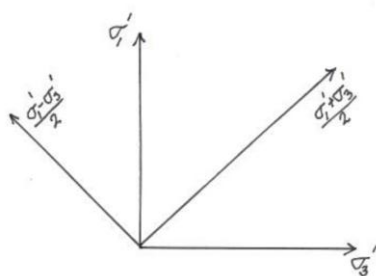
Från ett sådant försök inses att man inte kan utvärdera något förkonsolideringstryck.

Det framgår av Figur B2.7 att hållfastheten minskar med OCR, vilket det finns en förenklat uttryck för.

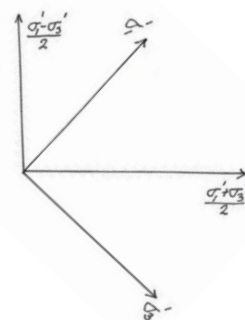
Koordinattransformation

Samtliga figurer ovan har redovisats i diagram med största och minsta huvudspänningarna, σ'_1 och σ'_3 , på axlarna. Vi är dock vana vid att, när vi studerar skjuvhållfasthet, arbeta i diagram med τ och σ' på axlarna, eller snarare $(\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$ samt $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ på axlarna.

Genom att göra en koordinattransformation kan man erhålla $(\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$ samt $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ på axlarna, se Figur B2.8.



a.



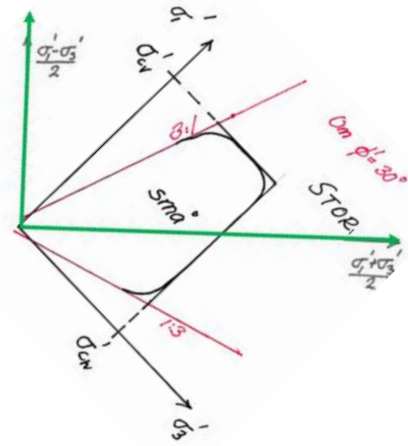
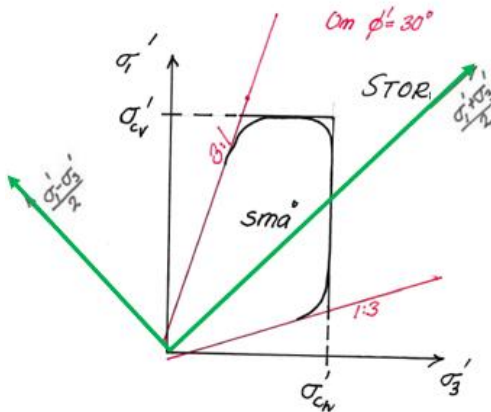
b.

Figur B2.8. Koordinattransformation

a. Före rotation

b. Efter rotation 45 grader

Om vi sedan väljer att även redovisa den förenklade flytytan i figuren, erhålls vad som återfinns i Figur B2.9.

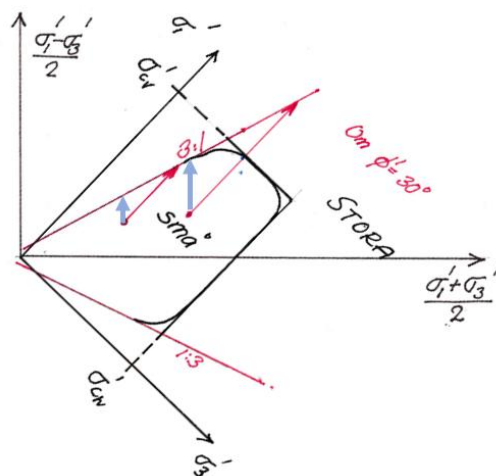
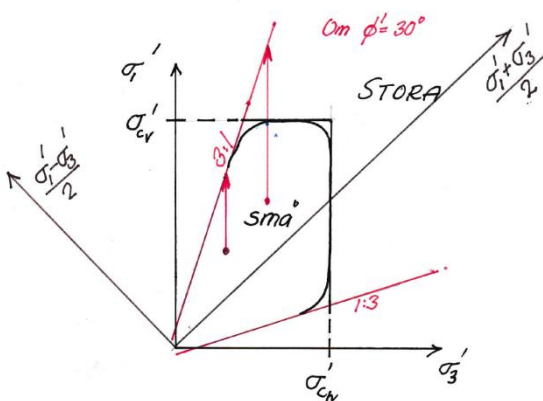


Figur B2.9. Koordinattransformation

a. Före rotation

b. Efter rotation 45 grader

Om vi dessutom tar med spänningssvågarna för de dränerade försöken, erhålls vad som presenteras i Figur B2.10.



Figur B2.10. Koordinattransformation

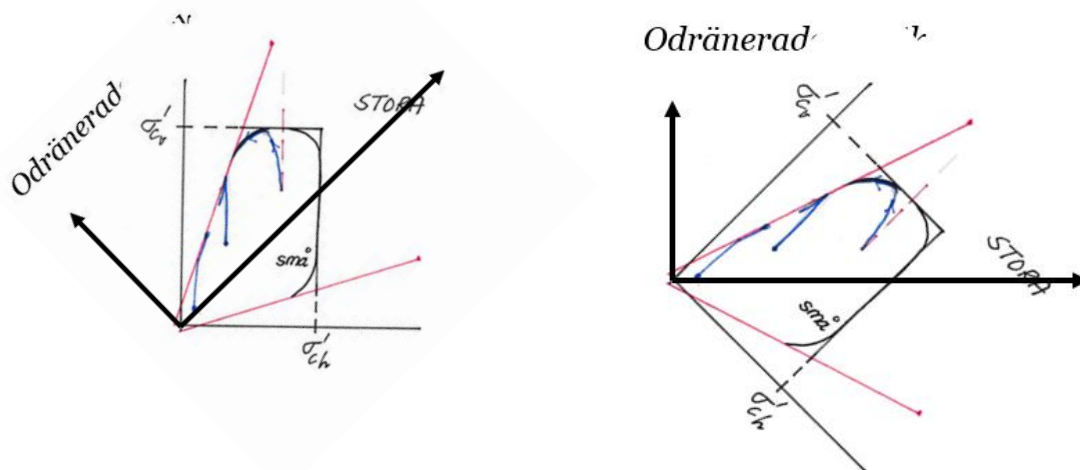
a. Före rotation

b.

Efter rotation 45 grader

Vi ser då att spänningssvågen i ett $(\sigma'_1 - \sigma'_3)/2 - (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ - diagram lutar i 45°.

Ett bättre sätt att utföra ett dränerat försök, för att minska risken att spänningsvägen träffar förkonsolideringstrycket, är att under försöket successivt justera celltrycket (σ'_3) så att det minskar lika mycket som σ'_1 ökar. Då erhålls en vertikal spänningsväg i det högra diagrammet i Figur B2.10. blå pilar. Om vi nu gör motsvarande koordinattransformation för flytytan med de odränerade spänningsvägarna fås resultat som visas i figur B2.11.

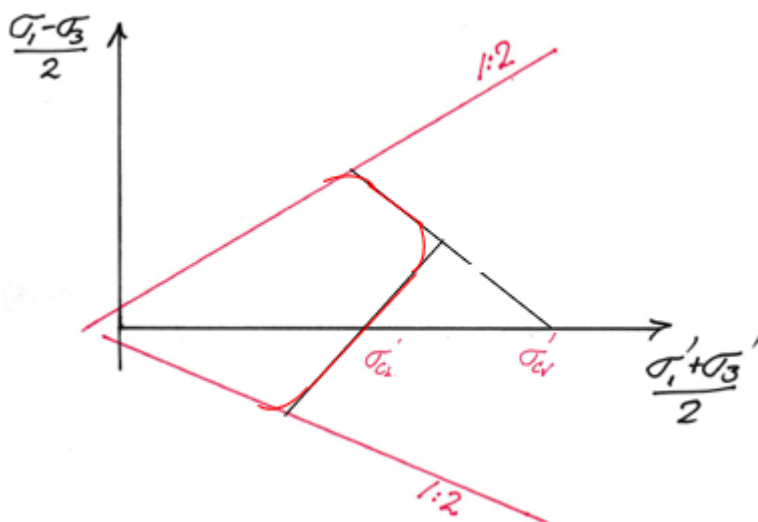


Figur B2.11. Koordinattransformation

a. Före rotation

b. Efter medsols rotation 45 grader

Det innebär att när man planerar sina triaxalförsök, så ska man först rita upp tillhörande förenklade flytyta. Det görs genom att man utgår från att $\varphi' = 30^\circ$ och att förkonsolideringstrycket, σ'_c , är känt, se Figur B2.12.

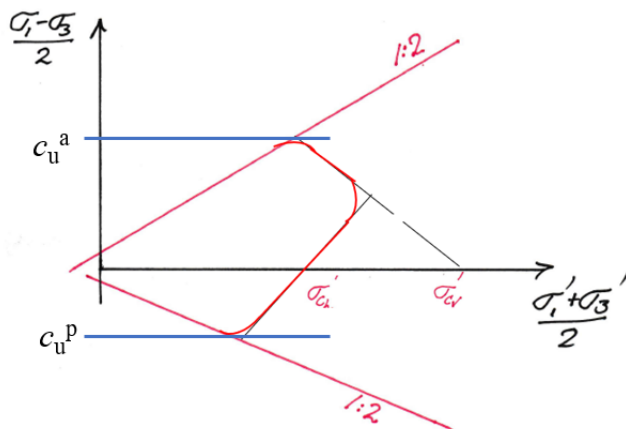


Figur B2.12 .Förenklad flytyta

Där representerar de bägge linjerna med lutning 1:2 brottlinjer motsvarande $\varphi' = 30^\circ$. Förkonsolideringstrycket har avsatts på abscissan och representeras av linjen med lutningen -1, alltså 45 grader.

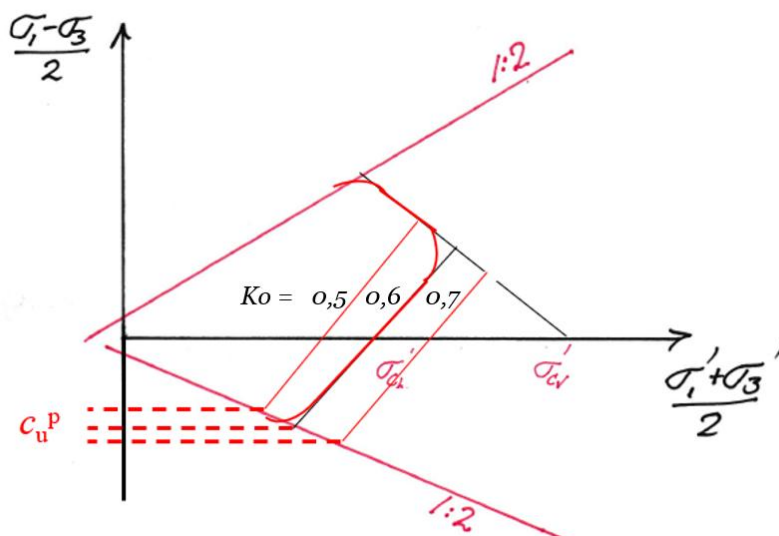
Utgående från provets OCR och tillhörande randvillkor, dränerat eller odränerat försök, kan man sedan skissa på hur spänningvägen ungefärligen kommer att se ut. Därmed erhålls ett mycket bra underlag för beslut om hur försöket skall utföras.

Av intresse är även att notera att enkel geometri resulterar i att $c_u^a = 0,33 \sigma'_c$, och att $c_u^p = K_o \cdot 0,33 \sigma'_c$, vilket stämmer mycket bra med den empiri för den odränerade skjuvhållfastheten, som vi har i Sverige.



Figur B2.13 .Förenklad flytyta med angivande av c_u^a och c_u^p

Av detta framgår också att lerans passiva skjuvhållfasthet, och därmed anisotropi, är beroende av K_o . Ju lägre K_o , desto lägre c_u^p , se Figur B2.14.



Figur B2.14 .Förenklad flytyta där anisotropins beroende av K_o framgår.

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-situ sanering. Formulering och kontroll av åtgärds mål.
1:2010	Förorenade byggnader. Provtagning och riskbedömning.
1:2011	Stimulerad reduktiv deklorering. 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 1:2014 Riskhantering 1
1:2014E	Risk Management methodology
2:2014	Riskidentifiering 2

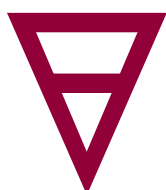
1:2016	Jordarternas indelning och benämning
2:2016	Akustisk JB Sondering
2:2016	Akustisk JB Sondering - Bilagor
1:2017	Metodik för bestämning av cu
2:2017	Fältgeoteknik Mät- och ersättningsregler
3:2017	Dynamiska miljöundersökningar
1:2019	Kvalitetskontroller för provtagning
1:2020	Riskstruktureringsverktyg
2:2020	Osäkerheter vid bestämning av organisk halt i jord
1:2021	Introduktion i bergbyggnad för geotekniker
2:2021	Maximal dynamisk modul från laboratiemätningar
3:2021	Handbok - Certifierad provtagning i praktiken
1:2022	Marksanering - Om hälsa och säkerhet vid arbete i förorenade områden
2:2022	Metodbeskrivning – Åsätta subjektiva sannolikheter i geotekniska projekt
1:2023	Provtagning av silt, sand, grus och morän
1:2024	Metodbeskrivning Jb-S
2:2024	Akvifärs referensmetod för att studera förändrade grundvattenförhållanden
1:2025	NGM2024 Volume 1
1:2025	NGM2024 Volume 2
2:2025	Marksanering Om hälsa och säkerhet vid arbete i förorenade områden

Svenska Geotekniska Föreningen (SGF) bildades 1950 och består av drygt 1750 enskilda medlemmar. Dessutom ingår cirka 10 korporativa medlemmar, myndigheter, konsult- och entreprenadföretag samt tillverkare inom det geotekniska området.

SGF har till ändamål att främja utvecklingen inom geoteknik med grundläggning 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, Sveaborgsvägen 16 439 73 FJÄRÅS Tel: 0708-137773

Internet: www.sgf.net E-post: info@sgf.net