



Svenska Geotekniska Föreningen
Swedish Geotechnical Society

Rapport 2:2012

Triaxialförsök -

En vägledning



Svenska Geotekniska Föreningen
Swedish Geotechnical Society

SGF Rapport 2:2012

Triaxialförsök -

En vägledning

Linköping 2012

SGF Rapport	Svenska Geotekniska Föreningen E-post: info@sgf.net
Beställning	Svenska Geotekniska Föreningen c/o Arokad Plejadgatan 3 417 57 Göteborg Tel: 031-733 47 03 E-post: info@sgf.net
ISSN	1103-7237
ISRN	SGF-R-12/2-SE
Upplaga	Digital utgåva
Tryckeri	www.sgf.net

Förord

Det har inte funnits någon samlad information på svenska om triaxialförsök. Det som skrivits tidigare i Sverige om dessa försök är spritt i olika skrifter samt i regel på lite mer avancerad nivå. Triaxialförsök kommer framöver sannolikt att användas alltmer i geoteknisk projektering i Sverige, bl.a. i takt med att ökade och nya krav ställs på indata till beräkningsmodeller för geotekniska tillämpningar. Det har således funnits ett behov av att sammanställa information om triaxialförsök i en vägledning för att öka och sprida kunskapen om dessa försök och därigenom möjliggöra en bättre användning av försöken i geoteknisk projektering. I föreliggande vägledning har valts att sammanställa relativt kortfattat information om triaxialförsök. De parametrar som utvärderas ur laboratorieförsök som exempelvis triaxialförsök används ofta i beräkningsmetoder för geotekniska tillämpningar, till exempel avseende bärförmåga hos plattor, släntstabilitet, deformationer kring sponter eller sättningar av uppfyllnader.

Författare av rapporten är Bo Westerberg (SGI/LTU), Sölve Hov (Atkins) och Martin Holmén (SGI). Vägledningen är utarbetad inom ramen för SGF:s laboratoriekommittés verksamhet och har finansierats av SGF, SGI (Statens geotekniska institut) och Trafikverket. Rapporten har remissbehandlats i olika skeden av totalt ungefär tioalet geotekniker med olika erfarenheter av jordmekanik och geoteknik i praktiken.

Författarna och Svenska Geotekniska Föreningen (SGF)

Linköping i december 2012

Symboler

Grekiska bokstäver

α	Lutning brottlinje i s' - t -plan	
ΔV	Volymändring	$\Delta V = V_1 - V_0$
Δu	Portrycksändring	
$\frac{\Delta \varepsilon_a}{\Delta t}$	Töjningshastighet	
ε	Töjning	
	$\varepsilon_a =$ axialtöjning	$\varepsilon_a = \frac{-(h_1 - h_0)}{h_0}$
	$\varepsilon_r =$ radialtöjning	$\varepsilon_r = \frac{-(d_1 - d_0)}{d_0}$
	$\varepsilon_{vol} =$ volymtöjning	$\varepsilon_{vol} = \frac{\Delta V}{V_0}$
ν	Tvärkontraktionstal	
σ	Totalspänning, normalspänning	
	$\sigma_a =$ axialspänning	
	$\sigma_r =$ radialsänning	
	$\sigma_v =$ vertikalspänning	
	$\sigma_h =$ horisontalspänning	
	$\sigma_1 =$ största huvudspänning	
	$\sigma_3 =$ minsta huvudspänning	
σ'	Effektivspänning, normalspänning	$\sigma' = \sigma - u$

	σ'_a = effektiv axialspänning
	σ'_r = effektiv radialsplänning
	σ'_v = effektiv vertikalsplänning
	σ'_h = effektiv horisontalsplänning
	σ'_1 = största effektiva huvudspänning
	σ'_3 = minsta effektiva huvudspänning
σ'_c	Förkonsolideringstryck
	σ'_{vc} = vertikalt förkonsolideringstryck
	σ'_{hc} = horisontellt förkonsolideringstryck
τ	Skjuvspänning
ϕ'	Friktionsvinkel, baserad på effektivspänningar

Romerska bokstäver

c_u	Odränerad skjuvhållfasthet	
c'	Kohesionsintercept, baserad på effektivspänningar	
d	Skärning med t -axeln för brottlinje i s' - t -plan	
d	Provets diameter	(d_0 ursprungsdiameter)
E	Elasticitetsmodul E_{ini} = initialmodulen E_{50} = elasticitetsmodul vid halva maximala deviatorspänningen	
G	Skjuvmodul	
h	Provets höjd	(h_0 ursprungshöjd)
k	Skärning med q -axeln för brottlinje i p' - q -plan	
K_0	Viljordtryckskoefficienten	

K_{0nc}	Viljordtryckscoeffcienten i normalkonsoliderat tillstånd	
M	Lutning brottlinje i p' - q -plan	$p' = (\sigma'_a + 2\sigma'_r)/3$
p'	Effektiv medelspänning	
q	Deviatorspänning	$q = \sigma'_a - \sigma'_r$
s'	Effektiv medelspänning	$s' = (\sigma'_a + \sigma'_r)/2$
t	Skjuvspänning	$t = (\sigma'_a - \sigma'_r)/2$
u	Porvattentryck	
V	Provets volym	$(V_0 \text{ ursprungsvolym})$
w_L	Flytgräns	

Innehåll

Förord	I
Symboler	III
Innehåll	VII
1. Introduktion	1
1.1 Syfte – En vägledning om Triaxialförsök	1
1.2 Exempel – Triaxialförsök i praktiken	2
2. Triaxialförsöket - grunder	5
2.1 Inledning	5
2.2 Basdata	5
2.3 Triaxialcell	7
2.4 Standard triaxialförsök	8
2.5 Aktiva och Passiva Triaxialförsök	10
3. Indata till laboratoriet	12
3.1 Inledning	12
3.2 Dialog beställare och laboratorietekniker	12
3.2.1 Syfte med försök	12
3.2.2 Konsolidering	13
3.2.3 Skjuvning	14
4. Utdata – presentation av resultat	15
4.1 Inledning	15
4.2 Presentation av utdata	15
4.2.1 Redovisning	15
4.2.2 Odränerade försök	17
4.2.3 Dränerade försök	18
4.2.4 Spänningsvariabler	19
4.2.5 Presentation av spänningstillstånd	20

4.2.6	Hållfasthetsparametrar	21
5.	Tolkning och utvärdering av parametrar	22
5.1	Inledning	22
5.2	Generell tolkning av resultat	24
5.2.1	Inledning	24
5.2.2	Konsolideringsfas	24
5.2.3	Skjuvningsfas	26
5.3	Utvärdering av parametrar	27
5.3.1	Inledning	27
5.3.2	Odränerad skjuvhållfasthet - c_u	27
5.3.3	Effektiva hållfasthetsparametrar - ϕ' och c'	29
5.3.4	Deformationsmoduler - E och G	32
5.3.5	Uppskattning av förkonsolideringstryck - σ'_c	32
5.3.6	Sammanfattning	35
6.	Triaxialförsöket som en del av geoteknisk projektering	36
6.1	Inledning	36
6.2	Sondering, provtagning och rutinanalys	37
6.3	Krav på provkvalitet	39
6.4	Detaljplanering av triaxialförsök	40
7.	Referenser	44
Bilagor		
A.	Mohr-Coulombs brottvillkor och samband mellan hållfasthetsparametrar i olika spänningsplan.....	47
B.	Exempel på utvärdering av effektiva (dränerade) parametrar c' och ϕ' från fem odränerade triaxialförsök	50
C.	Exempel på utvärdering av effektiva ... (dränerade) parametrar c' och ϕ' från två odränerade triaxialförsök	52
D.	Exempel på utvärdering av effektiva(dränerade) parametrar c' och ϕ' från två odränerade triaxialförsök	54

Kapitel 1.

Introduktion

1.1 SYFTE – EN VÄGLEDNING OM TRIAXIALFÖRSÖK

Syftet med vägledningen är att:

- sammanställa och sprida relativt kortfattad information om triaxialförsök
- underlätta för branschen att diskutera triaxialförsöks förutsättningar, möjligheter och begränsningar
- underlätta dialogen mellan handläggande geotekniker och laboratoriepersonal avseende triaxialförsök
- göra hantering av data och resultat mera enhetlig i Sverige
- harmonisera med Europeiska regelverk, rekommendationer och beteckningar
- visa på möjligheter att kunna bidra till att effektivisera samhällsbyggandet genom nyttjande av triaxialförsök.

Huvudmålgruppen för vägledningen är handläggande geotekniker. Detta är en relativt kortfattad vägledning med avsikten att innehålla det viktigaste och vanligaste avseende triaxialförsöket och dess användning i geoteknisk projektering.

Triaxialförsöket är generellt den mest lämpliga och allmänt tillgängliga försöksmetoden för att undersöka jords hållfasthets- och deformationsegenskaper. Detta för att man kan återskapa spänningar och portryck liknande fältförhållandena samt att försöket ger mer omfattande och oftast tillförlitligare resultat än andra vanliga metoder. Triaxialförsök kan ge parametrar till numeriska och klassiska beräkningsmetoder.

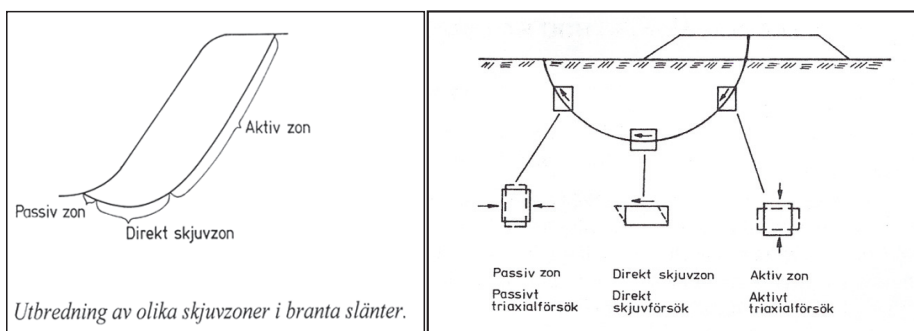
Under förutsättning att triaxialförsöken utförs och resultaten utvärderas ändamålsenligt kan i förekommande fall resultaten innebära möjligheter att geokonstruktioner dimensioneras med högre tillförlitlighet avseende säkerhet mot brott samt göras ekonomiskt optimerad, ofta med en lägre totalkostnad för aktuellt projekt.

1.2 EXEMPEL – TRIAXIALFÖRSÖK I PRAKTIKEN

Nedan ges några kortfattade exempel då det kan vara lämpligt att nyttja triaxialförsök i geoteknisk projektering.

Släntstabilitet

Fall då anisotropi av odränerad skjuvhållfasthet har en viktig roll. Med anisotropi menas att jordens egenskaper är olika i vertikal- respektive horisontalled. Ofta är den vertikala hållfastheten högre än den horisontella vilket gör att beräknad säkerhetsfaktor kan bli högre när hållfasthetsanisotropi beaktas. Detta kan innebära mindre behov av förstärkningsåtgärder alternativt att schakt kan utföras med brantare slänter vilket ger mindre schaktmassor och mindre yta i anspråk. Se Figur 1.



Figur 1 Illustration av olika skjuvzoner och aktuella laboratorieförsök (från Skredkommissionen, 1995).

Spontkonstruktioner

Ett annat exempel är när det passiva jordtrycket är viktigt att beakta. Hållfasthetsanisotropi ger normalt ett lägre passivt mothåll och triaxialförsöket kan användas för att undersöka den horisontella hållfastheten och därmed få en tillförlitligare geokonstruktion avseende säkerhet mot brott. Mer representativa och tillförlitliga parametrar för hållfasthet och styvhet kan exempelvis innebära

undvikande av spont alternativt en optimerad konstruktion med avseende på säkerhet och deformationer.

Undersökning av representativa parametrar

Triaxialförsöket är den mest tillförlitliga och oftast endast möjliga metoden då vissa parametrar ska utvärderas, t.ex. friktionsvinkel, aktiv och passiv odränerad skjuvhållfasthet, horisontellt förkonsolideringstryck, vilojordtryckskoefficienten, m.fl.

Utvärdering av friktionsvinkel

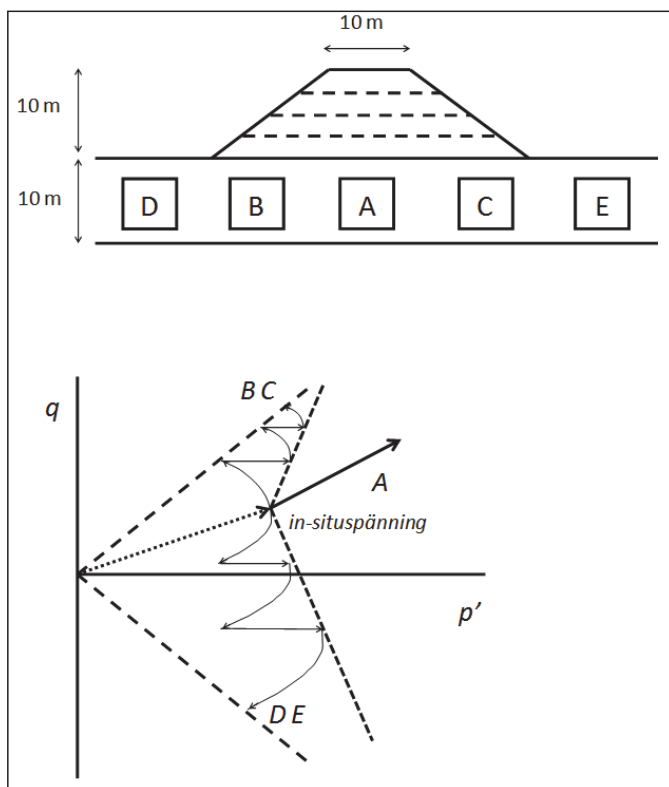
Triaxialförsöket ger normalt en högre tillförlitlighet vid utvärdering av friktionsvinkel i jämförelse med andra försöksmetoder eller empiri. Användbart exempelvis för silt och sand, stabiliserade prover och vid odränerade förhållanden.

Användning av numeriska beräkningar (ex. FEM)

För att kalibrera/kontrollera en materialmodell och utvärdera vissa parametrar till materialmodellen (exempelvis E-modul, friktionsvinkel, tvärkontraktionstal).

Avancerade utredningar

Exempelvis när man önskar undersöka jordens beteende och utvärdera parametrar för aktuella spänningsvägar i fält, se exempel i Figur 2 (kopplat till bl.a. exempel i avsnitt 2.5).



Figur 2 Förväntade effektiva spänningvägar (nederst) för olika zoner av jord (överst) vid stegvis uppbyggnad av en bank (baserat på Muir Wood, 2004).

Flera av ovanstående exempel kan i förekommande fall leda till ekonomiskt fördelaktiga tekniska lösningar avseende aktuella geotekniska problemställningar, utöver relevantare och/eller säkrare bedömning av tekniska egenskaper och parametrar. Notera i sammanhanget att för tillförlitligare bedömningar av parametrar för aktuell geoteknisk problemställning krävs generellt bl.a. hög provkvalitet, ”tillräckligt många” försök representativa för aktuella spänningstillstånd och ibland stöd från empiriska jämförelser eller resultat från andra försöksmetoder.

Kapitel 2.

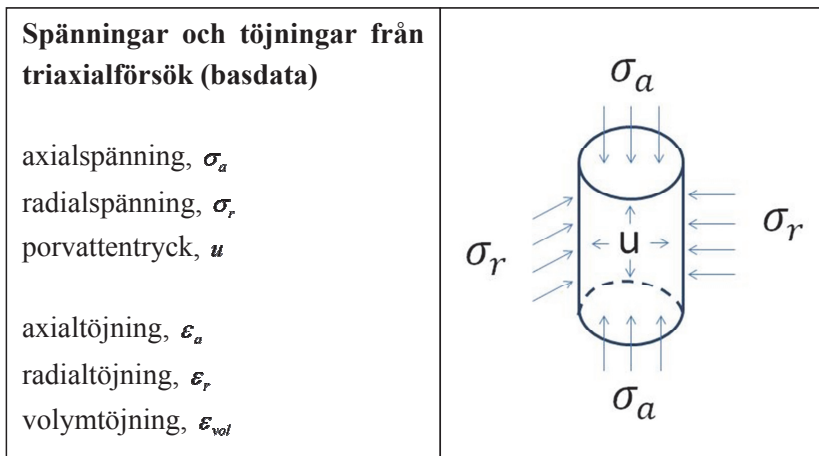
Triaxialförsöket - grunder

2.1 INLEDNING

I detta kapitel presenteras kortfattat triaxialförsöket och grunderna bakom tolkning och utvärdering av resultat från triaxialförsök.

2.2 BASDATA

Vid triaxialförsök belastas en cylindrisk provkropp med tryck i axialriktningen (vertikalriktningen) och radialriktningen (horisontalriktningen). Det är tre spänningar (eller tryck), två töjningar (deformationer) och volymtöjning (volymändring) som utgör basdata vid triaxialförsök, Figur 3.



Figur 3 Spänningar och töjningar i ett prov vid triaxialförsök.

Vid belastning av det cylindriska jordprovet sker deformationer i axial- och radialriktningen, och i Figur 4 illustreras ett prov som komprimeras i axialriktningen och expanderar i radialriktningen.

Deformationer vid triaxialförsök

$$\text{axialtöjning, } \varepsilon_a = \frac{-(h_1 - h_0)}{h_0}$$

$$\text{radialtöjning, } \varepsilon_r = \frac{-(d_1 - d_0)}{d_0}$$

$$\text{volymtöjning, } \varepsilon_{vol} = \frac{\Delta V}{V_0}$$

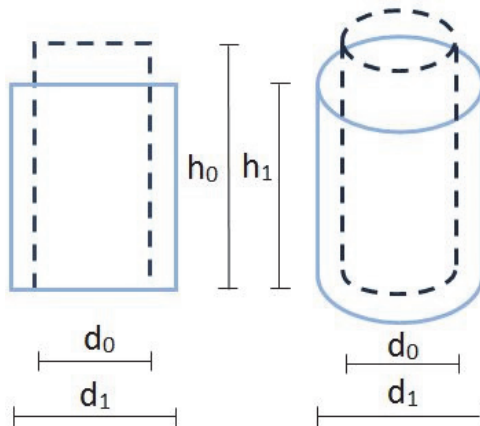
$$\text{volymändring, } \Delta V = V_1 - V_0$$

h = provets höjd (h_0 ursprungshöjd)

d = provets diameter (d_0 ursprungsdiameter)

V = provets volym (V_0 ursprungsvolym)

Töjning är en enhetslös storhet och anges ofta i form av %. Notera att här har valts det internationellt vedertagna generella begreppet "strain", dvs. "töjning", för att definiera deformationer. Inom jordmekaniken räknas kompressionstöjning (hoptryckning) som en *positiv* storhet och dragtöjning (utdragning) som en negativ storhet.



Figur 4 Deformationer av ett prov vid triaxialförsök.

De spänningar som verkar på provets yta är *totalspänningar*. Det tryck som verkar i porvattnet i jordprovet är *porvattentryck*. De spänningar som verkar på provets jordskelett är *effektivspänningar*. För att kunna beräkna effektivspänningar måste totalspänningar och porvattentryck vara kända, se Figur 5.

Effektivspänningar och totalspänningar vid triaxialförsök

$\sigma'_a = \sigma_a - u$, effektiv axialspänning

$\sigma'_r = \sigma_r - u$, effektiv radialsppänning

där

σ_a = total axialspänning

σ_r = total radialsppänning

u = porvattentryck

Effektivspänningar enligt ovan kommer från effektivspänningsekvationen:

$$\sigma' = \sigma - u$$

eller med ord

effektivspänning = totalspänning – portryck

Porvattentryck benämns ofta kortare som *portryck* och med detta avses normalt ett tillstånd med jord som är mättad med vatten (och så även i denna vägledning). Inom jordmekaniken räknas *tryckspänning* som *positiv* storhet (och *dragspänning* som *negativ* storhet).

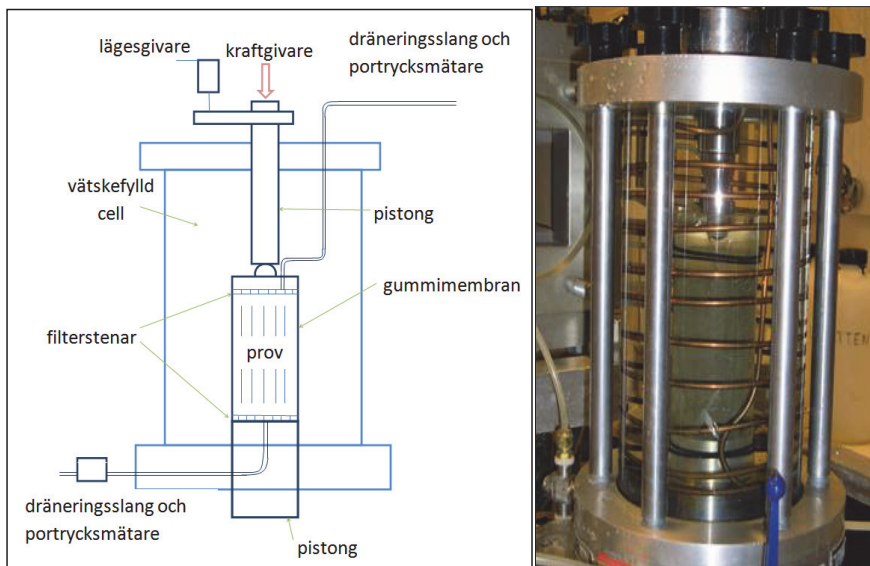
Figur 5 Effektivspänningar och totalspänningar vid triaxialförsök.

2.3 TRIAXIALCELL

I Figur 6 visas en enkel principskiss samt ett fotografi av en triaxialcell. Provet belastas med en horisontalspänning genom det vätsketryck som påförs i cellen och med en vertikalspänning genom belastning via en pistong.

Horisontalspänningar, vertikalspänningar och porvattentryck kan appliceras oberoende av varandra. I vertikalriktningen kan provet antingen belastas genom kontroll av last (tryck) eller deformation och i horisontalriktningen med tryck. Provets deformation i vertikalriktningen mäts med en lägesgivare kopplad till en pistong. Provets deformation i horisontalriktningen mäts normalt inte utan räknas ut baserat på resultat av mätning av vertikaldeformationen och volymändring hos provet. Tryck, laster och deformationer som appliceras (eller mäts) på provet styrs av tryckregulatorer som i sin tur styrs av en dator. Normalt används ett tunt och flexibelt gummimembran för att skilja jordprovet från cellvätskan och i vardera ändytan av provet placeras filterstenar. Via dräneringsslangar kopplade till den övre och nedre filterstenen finns möjlighet

för porvatten att ”flöda” ut från eller in till provet. Detta gäller vid ett dränerat försök. Alternativt kan dräneringsslangarna stängas och därmed förhindra porvattenflöde och istället mäts då porvattentrycket. Detta gäller vid ett odränerat försök.



Figur 6 Principskiss respektive fotografi av en triaxialcell.

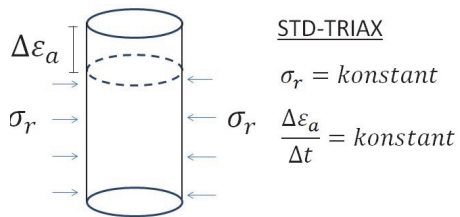
2.4 STANDARD TRIAXIALFÖRSÖK

Standardutförandet av ett triaxialförsök består för ett och samma prov först av en konsolideringsfas och därefter en skjuvningsfas. Vid *konsolideringsfasen* utsätts provet för ett önskat tillstånd av effektivspänningar i radial- och axialriktningen. Normalt försöker man återskapa det spänningstillståndet som bedöms råda i fält. Vid *skjuvningsfasen* påförs vid standardutförandet av ett triaxialförsök en konstant deformationshastighet i axialriktningen under ett konstant celltryck på provet i radialriktningen, Figur 7a. Skjuvningsfasen sker antingen som ett *odränerat* eller ett *dränerat* försök, Figur 7b. Vid *odränerat* försök stängs dräneringsledningarna och porvatten kan inte lämna provet med påföljd att porvattentrycket kommer att ändras under skjuvningsfasen. Vid *dränerat* försök är dräneringsledningarna öppna och porvatten kan lämna eller komma till provet med påföljd att porvattentrycket inte ändras under skjuvningsfasen.

Skjuvningsfasen – Standard triaxialförsök

Styrs vid försök

- ⇒ Radialspänningen hålls konstant
- ⇒ Konstant deformationshastighet i axialriktningen
- ⇒ Dränering:
 - stängd (odränerat försök)
 - öppen (dränerat försök)



a)

Skjuvningsfasen – Standard triaxialförsök

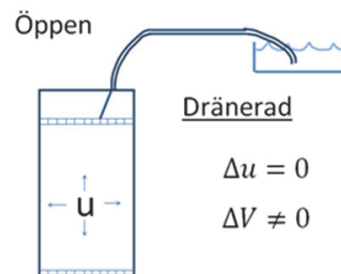
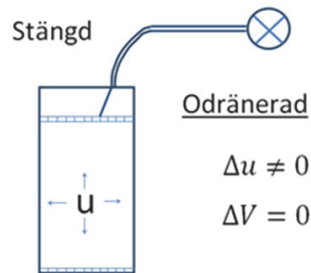
Odränerad skjuvning

- ingen dränering av porvatten
- porvattentrycket ändras
- provets volym ändras inte

Dränerad skjuvning

- porvattenmängden i provet ändras
- porvattentrycket ändras inte
- provets volym ändras

Notera: Portrycket hålls konstant vid dränerad skjuvning och hålls då av triaxialapparaten vid önskat värde (s.k. mottryck, på eng. back pressure), vilket ex. kan vara rådande portryck på aktuellt djup i fält.



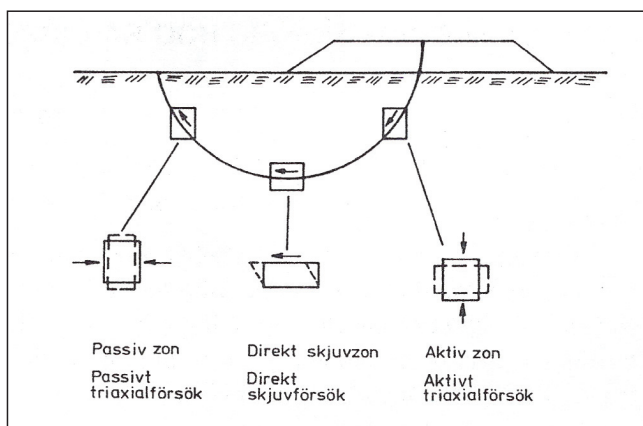
b)

Figur 7 a-b) Skjuvningsfasen vid standardutförande av triaxialförsök.

2.5 AKTIVA OCH PASSIVA TRIAXIALFÖRSÖK

Triaxialförsök enligt standardförfarandet kan utföras som aktiva eller passiva försök. Vid aktiva triaxialförsök påförs en högre belastning i vertikalriktningen jämfört med horisontalriktningen och vid passiva försök är det tvärtom.

Försöken utförs på exakt samma sätt vid konsolideringsfasen och skjuvningsfasen med enda skillnaden att provet får tryckas ihop axiellt vid aktivt försök och utvidgas axiellt vid passivt försök, se Figur 8 och Figur 9.



Figur 8 Exempel på aktiv och passiv belastning i fält och tillhörande laboratorieförsök för bestämning av hållfasthetsegenskaper (från Skredkommissionen, 1995).



Figur 9 I figuren visas ett prov som har utsatts för aktiv belastning (axiell hoptryckning, det vänstra) och ett prov för passiv belastning (axiell expansion, det högra). Bilden visar lerprov som har torkats ut efter utförd försök. Notera "tunnformen" respektive "timglasformen" som uppstår vid skjuvning till större deformationer

Idén med aktiva respektive passiva triaxialförsök är att efterlikna de belastningssituationer som kan vara aktuella i fält, exempel ges i Figur 8. Mitt under banken är de vertikala spänningarna högre än de horisontella och på sidan om banken blir de horisontella spänningarna högre än de vertikala (jämför och se lärobok med antaget brottmönster med aktiv, övergångs- och passiv brottzon vid bärförmågebrott). De olika typerna av försök illustrerade för fallet i Figur 8 ger normalt olika värden på odränerad skjuvhållfasthet, vilket motiverar att representativ typ av försök utförs.

Kapitel 3.

Indata till laboratoriet

3.1 INLEDNING

I detta kapitel presenteras kortfattat den information som behöver tas fram och den dialog som bör föras innan triaxialförsök utförs. I Kapitel 6 finns en längre beskrivning av triaxialförsöket som en del av geoteknisk projektering och där beskrivs mer detaljerat delar av nedanstående innehåll.

3.2 DIALOG BESTÄLLARE OCH LABORATORIETEKNIKER

3.2.1 Syfte med försök

För att triaxialförsöken i laboratoriet ska ge *största möjliga utbyte* (teknisk tillämpbarhet) är det viktigt med en *dialog* mellan laboratoriepersonal och beställare av försök, dvs. den handläggande geoteknikern, när försöket planeras. Detta kan även gälla när försöksserien pågår.

Inledningsvis bör *beställaren* redogöra för syftet med försöken och ange:

- För vilken geoteknisk tillämpning resultaten skall användas?
- Vilket/vilka belastningsfall är aktuellt/aktuella i fält och skall tillämpas i triaxialapparaten?
- Är det odränerat eller dränerat tillstånd som är relevant för fältsituationen?
- Vilka parametrar eller egenskaper som huvudsakligen är av intresse att bestämma?
- Vilka spänningar skall appliceras under konsolideringsfasen, dvs. vertikal- och horisontalspänningar och porvattentryck?
- Vad är det för typ av jord, dvs. andra egenskaper och var den är provtagen?
- Aktuell provtagningsmetod i fält eller vilken metod som skall användas för att eventuellt tillverka en provkropp i laboratoriet?

- Förväntad provkvalitet vid provningstillfället i laboratoriet skall också tas upp, Kapitel 6

Denna information bör i samråd med ansvarig på laboratoriet ge svar på vilken (/vilka) typ av försök som skall utföras. Detta kan då innebära standardförsök dvs. prover konsoliderade för bedömda in-situ spänningar och skjuvade under dränerade eller odränerade förhållanden som aktiva eller passiva, och antalet försök som skall utföras. Samrådet om antalet försök är bland annat kopplat till aktuell jordvolym och jorddjup som berörs av aktuell geoteknisk frågeställning, förekommande jordlager och tidigare erfarenheter av den aktuella jordtypen. Frågan om omfattningen av utvärderingen som skall göras på laboratoriet bör även tas upp samt hur beställaren önskar att redovisningen av resultaten skall göras.

3.2.2 Konsolidering

Att beakta vid planering av konsolideringsfasen för provet i triaxialapparaten:

- rådande spänningar i fält (vertikalt, horisontellt, portryck)
- förkonsolideringstryck
- anisotrop konsolidering
- önskade slutspänningar vid konsolideringsfasen.

Under konsolideringsfasen anpassas provkroppen under dränerade förhållanden till det spänningstillstånd varifrån den efterföljande skjuvningsfasen skall utgå. Detta spänningstillstånd kan exempelvis motsvara de bedömda rådande effektiva vertikala- och horisontalspänningarna i fält på det djupa provkroppen har tagits. De kan också väljas för att svara mot ett spänningstillstånd i en jordmodell som parametrar skall tas fram för. Val av storlek på portryck vid slut av konsolideringsfas (eller start av skjuvningsfas), exempelvis in-situ portryck eller annat portryck, skall göras. Innan konsolideringsfasen sker en så kallad förfas, vilken består av en stegvis anpassningsfas för provet för att skapa en startpunkt (spänningstillstånd) för konsolideringsfasen. Konsolideringen består i sin enklaste form av att en isotrop (lika i alla riktningar) spänning läggs på med ett ökat celltryck under dränerade förhållanden, men kan även innefatta anisotrop (olika i axial och radialled) pålastning och en eventuell avlastning där radialsänning och axialspänning inte behöver vara lika. Som ett exempel kan

nämnas att prover från svenska leror normalt vid konsolideringsfasen först utsätts för ett effektivtryck axiellt upp till ca 0,85 gånger förkonsolideringstrycket varefter avlastning sker till in-situ spänningarna, se avsnitt 0. De applicerade effektiva horisontalspänningarna styrs normalt av ansatta värden på vilojordtryckscoefficienten K_0 , se avsnitt 6.4

3.2.3 Skjuvning

Under skjuvningsfasen drivs provet till en viss axialdeformation så att önskat beteende kan fångas in, exempelvis att brott uppstår, med en konstant axiell deformationshastighet vars storlek kan väljas utifrån resultaten från konsolideringsfasen. Baserat på erfarenheter finns dock standardiserade deformationshastigheter som används vid exempelvis odränerad eller dränerad skjuvning av leror. Deformationsstyrd skjuvning är vanligast men även spänningsstyrd skjuvning kan förekomma. Det är viktigt att välja en lämplig deformationshastighet eftersom jordars hållfasthets- och deformationsegenskaper, och därmed utvärderade parametrar, generellt är beroende av vilken belastningshastighet som appliceras. En lämplig deformationshastighet för aktuellt försök tas fram av laboratoriepersonal i samråd med beställaren.

Kapitel 4.

Utdata – presentation av resultat

4.1 INLEDNING

I detta kapitel ges rekommendationer avseende vilka resultat, och hur resultaten lämpligen bör redovisas från laboratoriet till beställaren. Dessa rekommendationer baseras på den europeiska tekniska specifikationen för triaxialförsök, CEN ISO/TS 17892-9 (2004), och på tidigare svensk praxis.

4.2 PRESENTATION AV UTDATA

4.2.1 Redovisning

Enligt CEN ISO/TS 17892-9 (2004) skall följande uppgifter redovisas från ett (standard) triaxialförsök (ex. K_0 -konsoliderat odränerat aktivt triaxialförsök):

- typ av försök
- providentitet
- benämning av jorden i provet
- provkroppens tillverkningsmetod (ex. om kolvprov; ex. om och hur provet har packats i laboratoriet)
- vattenkvot före och efter försök
- skrymdensitet
- konsolideringsspanningar (vertikalt, horisontellt, portryck)
- konsolideringstid
- konsolideringstjörning, både axiell och volymetrisk
- vilket brottkriterium som använts
- skjuvspänning eller deviatorspänning vid brott
- minsta huvudspänning vid brott eller medeleffektivspänning vid brott antingen som s' eller p'
- brotttjörning
- volymetrisk brotttjörning (vid dränerade försök)

- relativ portrycksändring vid brott (vid odränerade försök)
- töjningshastighet (normalt axielltöjningshastighet)
- effektiva brottparametrar, c' och ϕ' , (om dessa har utvärderats av laboratoriet)
- figur som visar provkroppen efter brott (eller efter avslutat försök).

Ovanstående gäller för standardförsök. Vid skräddarsydda specialförsök bör beställare och laboratoriepersonal komma överens om vad som ska redovisas. Om beställaren önskar redovisning även av konsolideringsfasen bör laboratoriet bistå med detta. Om beställaren önskar få data från provningen i digital form bör laboratoriet kunna tillhandahålla detta. Dessa data bör då tillhandahållas i ett format som går att öppna med normala kalkylbladsprogram. Det enklaste formatet är då en textfil med tab-separerade data i s.k. ASCII-format. I sitt enklaste utförande bör filen innehålla ett filhuvud med uppgifter om provningsdatum, providentitet och typ av provning. De storheter som mäts elektroniskt under provningen ska finnas med i filen tillsammans med tidsangivelser för mätvärdena, se exempel i Figur 10.

Project:XXXXX.....					
Dn.:1-0804-XXX					
Operator.:mh					
Remarks:sp 2-3					
Site:XXX					
Depth:5m					
Soil type:Le					
Specimen:X1-5m					
Mass:288,760000					
Height:100,000000					
Diameter:50,000000					
Height after consolidation:98,607966					
Volume after consolidation:201248,124739					
TestCU					
s'1:53					
s'3:44					
u:44					
Time	Axial Load	Cell Pressure	Pore Pressure	Axial Def.	Vol. Change
(min)	(N)	(kPa)	(kPa)	(mm)	(cc)
0,000050	17,860144	86,927223	44,997394	0,000021	0,050229
0,500167	19,913912	86,759078	45,114100	0,006652	0,050229
1,000200	21,790623	86,783111	45,265734	0,011185	0,050229
1,500233	22,856057	86,888421	45,421302	0,016108	0,050229

Figur 10 Exempel på formatet på en datafil med uppmätta storheter.

Exempel på sådana storheter är deformation, volymändring, axiell last, celltryck och portryck. Om laboratoriets triaxialutrustning eller programvara för

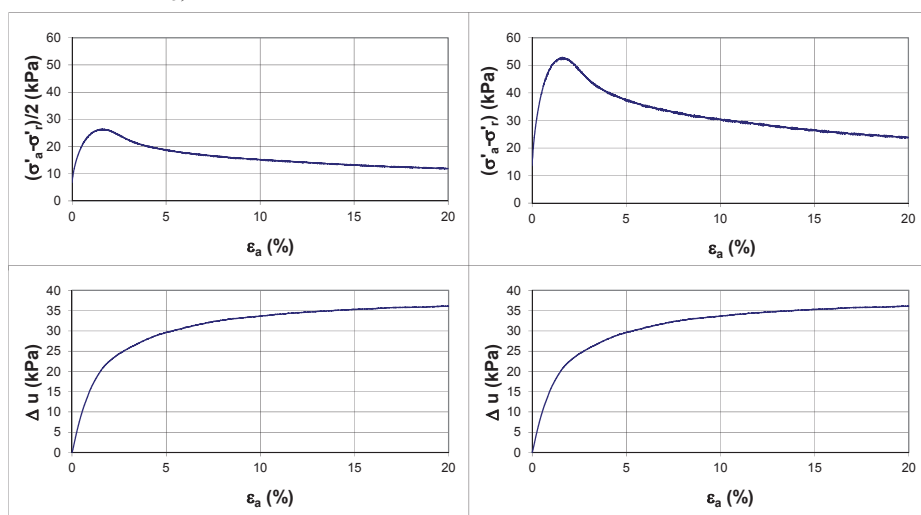
utvärdering genererar filer med andra beräknade storheter bör även sådana filer göras tillgängliga för beställaren om den så önskar. Exempel på beräknade storheter är effektiva axial- och radialspänningar, skjuvspänning, axiell töjning och radiell töjning.

4.2.2 Odränerade försök

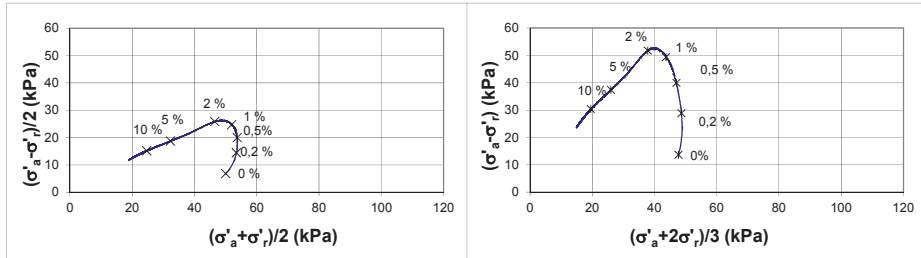
Vid odränerade triaxialförsök presenteras som regel resultaten grafiskt i diagram med:

- en spänningvariabel mot axielltöjning (q - ε_a eller t - ε_a)
- portrycksändring mot axielltöjning (Δu - ε_a)
- spänningsväg med effektivspänningar (t - s' eller q - p'), se Figur 11 och Figur 12.

Varianter av ovanstående kan förekomma avseende benämning eller val av variabler vid redovisning av resultat. Exempelvis kan benämnas vertikal töjning istället för axielltöjning, portryck istället för portrycksändring eller andra spänningvariabler nyttjas vid redovisning av spänningsväg (t.ex. σ'_1 som funktion av σ'_3).



Figur 11 De två diagrammen till vänster i figuren visar skjuvspänning $\tau = (\sigma'_a - \sigma'_r)/2$ respektive portrycksändring mot axielltöjning, medan de till höger visar en alternativ redovisning med deviatorspänning $q = (\sigma'_a - \sigma'_r)$ respektive portrycksändring. Plottarna kommer från ett aktivt odränerat försök på en lera



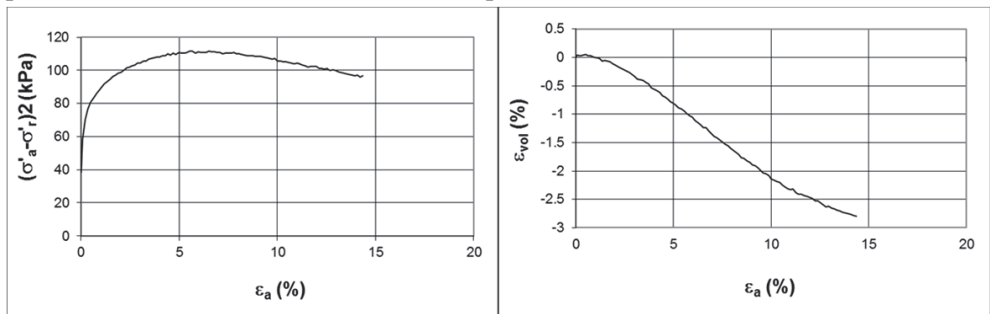
Figur 12 Diagrammet till vänster visar skjuvspänning $\tau = (\sigma'_a - \sigma'_r)/2$ plottad mot medeleffektivspänningen $s' = (\sigma'_a + \sigma'_r)/2$. Diagrammet till höger visar deviatorspänning $q = (\sigma'_a - \sigma'_r)$ plottad mot medeleffektivspänningen $p' = (\sigma'_a + 2\sigma'_r)/3$. På plottarna finns även markeringar som anger axialtöjningen i procent. Data är från samma försök som plottats i Figur 11.

4.2.3 Dränerade försök

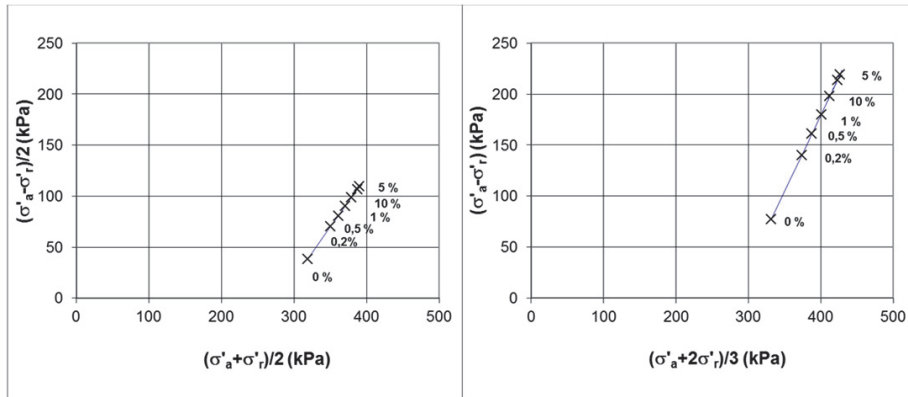
Vid dränerade triaxialförsök presenteras som regel resultaten i diagram med:

- en spänningvariabel mot axialtöjning ($q - \epsilon_a$ eller $t - \epsilon_a$)
- volymändring eller volymtöjning mot axialtöjning ($\Delta V - \epsilon_a$ eller $\epsilon_{vol} - \epsilon_a$)
- spänningsväg med effektivspänningar ($t - s'$ eller $q - p'$), se figur 4.4 och 4.5.

Vid dränerade triaxialförsök är (antas) portrycket konstant under skjuvningsfasen och provets volym tillåts ändras. Detta brukar redovisas som en volymtöjning plottad mot den axiella töjningen som i figur 4.4. Eftersom portrycket är (antas) konstant blir spänningsvägen i spänningsplanet en rät linje, som i detta exempel ökar till maximal deviator-/skjuvspänning för att sedan minska längs samma spänningsväg. I Figur 13 och Figur 14 redovisas exempel på resultat från ett aktivt dränerat försök på en silt.



Figur 13 Diagrammen i figuren visar skjuvspänning $\tau = (\sigma'_a - \sigma'_r)/2$ och volymtöjning ϵ_{vol} mot axialtöjning ϵ_a från ett aktivt dränerat försök på en silt



Figur 14 Diagrammet till vänster visar skjuvspänning $\tau = (\sigma'_a - \sigma'_r)/2$ plottad mot medeleffektivspänningen $s' = (\sigma'_a + \sigma'_r)/2$. Diagrammet till höger visar deviatorspänning $q = (\sigma'_a - \sigma'_r)$ plottad mot medeleffektivspänningen $p' = (\sigma'_a + 2\sigma'_r)/3$. På plottarna finns även markeringar som anger axialtöjningen i procent. Data är från samma försök som plottats i Figur 13.

4.2.4 Spänningsvariabler

Vid *aktiva* triaxialförsök påförs största belastningen i axialriktningen, dvs.

$\sigma'_a > \sigma'_r$, och för detta fall används som regel följande spänningsvariabler:

$$\begin{aligned}
 q &= \sigma'_a - \sigma'_r && \text{deviatorspänning} \\
 t &= (\sigma'_a - \sigma'_r)/2 && \text{skjuvspänning} \\
 p' &= (\sigma'_a + 2\sigma'_r)/3 && \text{effektiv medelspänning} \\
 s' &= (\sigma'_a + \sigma'_r)/2 && \text{effektiv medelspänning}
 \end{aligned}$$

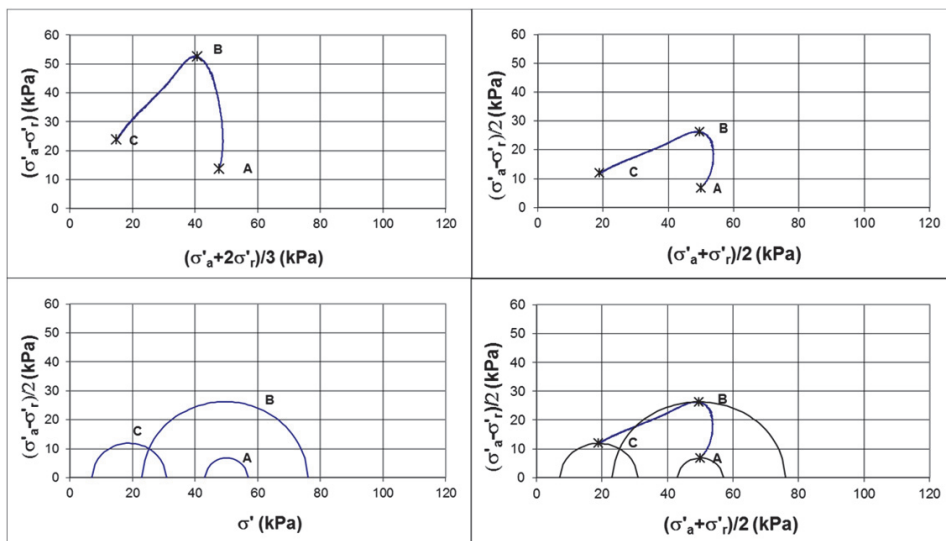
Vid *passiva* triaxialförsök är vid brott största effektivspänningen i radialriktningen (dvs. $\sigma'_r > \sigma'_a$), se vidare i avsnitt 5.3.2 för passiva försök.

Som teoretisk bakgrund kan nämnas att i triaxialfallet är axial- respektive radialsپänningen så kallade huvudspänningar eftersom ytorna de verkar mot antas vara fria från skjuvspänningar. Beroende på försökstyp, dvs. aktivt eller passivt försök, är de antingen största eller minsta huvudspänningen. Vid aktiv belastning är axialspänningen lika med den största huvudspänningen $\sigma'_1 = \sigma'_a$, och radialsپänningen lika med den minsta huvudspänningen $\sigma'_3 = \sigma'_r$. Vid passiv belastning är istället $\sigma'_1 = \sigma'_r$ och $\sigma'_3 = \sigma'_a$. Notera att deviatorsپänningen q

respektive skjuvspänningen t får samma numeriska värden om de uttrycks i totalspänningar ($q = \sigma'_a - \sigma'_r = \sigma_a - \sigma_r$).

4.2.5 Presentation av spänningstillstånd

Spänningstillståndet i ett jordprov under ett triaxialförsök presenteras oftast i grafisk form i ett valt spänningsplan där spänningsvägen för hela försöket eller spänningstillståndet vid ett visst tillstånd illustreras. Spänningsvägen är då baserad på värdena för effektiv axial- och radialspänning under försöket. Vid triaxialförsök redovisas spänningsvägar oftast i ett $t - s'$ -plan eller ibland i ett $q - p'$ -plan. Vanligt är också att åskådliggöra spänningar vid brottillstånd i form av spänningsskärningar i Mohrs spänningsplan ($\tau - \sigma'$ -planet), med en cirkel per prov. I Mohrs spänningsplan är τ skjuvspänning och σ' effektiv normalspänning. I Figur 15 åskådliggörs dessa olika sätt att presentera de spänningar som verkar på ett prov i ett triaxialförsök. Notera att det är endast de två variablerna σ'_a och σ'_r som utgör indata i dessa olika spänningsplan.



Figur 15 Representation av spänningstillstånd i tre olika spänningsplan ($q - p'$, $t - s'$, $\tau - \sigma'$). I $q - p'$ - och $t - s'$ -planet visas en och samma spänningsväg, från skjuvningsfasen från ett odränerat triaxialförsök, från start (A) till slut (C) försök. I $\tau - \sigma'$ -planet visas spänningstillståndet vid tillstånden A, B respektive C i form av spänningsskärningar (Mohr-cirklar).

Om resultaten av triaxialförsök redovisas i $q - p'$ -planet eller i $t - s'$ -planet, Figur 15, fås en kontinuerlig spänningsväg som beskriver hur spänningarna ändras under hela försöket, normalt från start till slut av skjuvningsfasen. Istället för att rita ut en mängd Mohr-cirklar kan förändringarna i spänningstillstånd enklare illustreras med dessa spänningsvägar.

Spänningsplanet representerat av $t - s'$ benämns ofta som MIT-planet och av $q - p'$ ofta som Cambridge-planet. I geoteknisk projektering i allmänhet nyttjas ofta representation enligt MIT-planet och vid nyttjande av avancerade materialmodeller, ex. vid FEM-beräkningar, nyttjas ofta Cambridge-planet.

4.2.6 Hållfasthetsparametrar

Eftersom det är samma indata (σ'_a och σ'_r alternativt σ'_1 och σ'_3) till de olika diagrammen (planen), Figur 15, finns det teoretiska samband mellan de olika hållfasthetsparametrarna som kan utvärderas. Normalt brukar man göra utvärderingen under antagandet att Mohr-Coulombs brottvillkor är tillämpligt. Detta innebär att hållfasthetsparametrarna kan utvärderas från ett diagram och sedan via teoretiska samband räknas om till motsvarande hållfasthetsparametrar i ett annat diagram. I Bilaga A presenteras dessa teoretiska samband samt förklaras Mohr-Coulombs brottvillkor ($\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$)

Kapitel 5.

Tolkning och utvärdering av parametrar

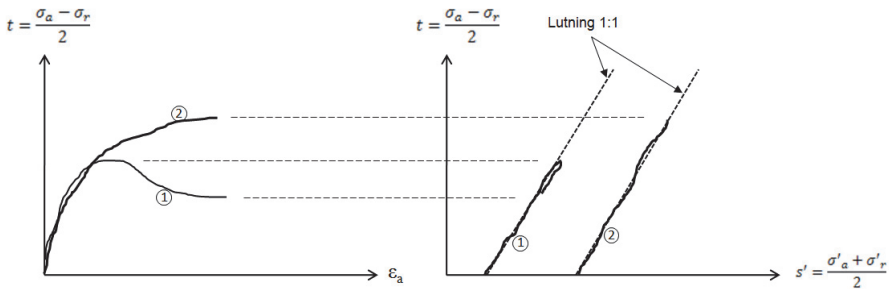
5.1 INLEDNING

Tolkning av resultat och utvärdering av parametrar från triaxialförsök görs normalt genom att analysera både spännings-töjningsvägar och spänningsvägar. Det kan generellt vara lämpligt att rita spänningsvägar istället för att rita en mängd Mohrs spänningscirklar. Då kan jordens mekaniska beteende under hela försöket studeras, och inte bara i enstaka punkter, vilket ger värdefull information. På detta sätt kan till exempel portrycksutveckling och brott analyseras och utvärderas. I Sverige används oftast det så kallade MIT-diagrammet för uppritning av spänningsvägar (se Kapitel 4). Med spänningsvägar avses normalt spänningsvägar baserade på effektivspänningar om inte annat anges.

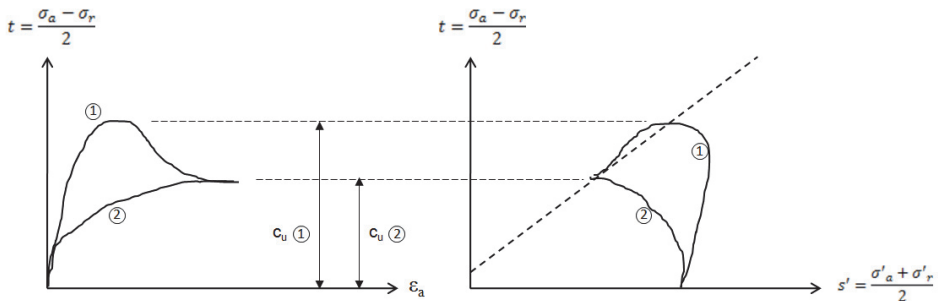
För finkorniga jordarter som exempelvis lera och lerig silt utförs försök normalt på ”ostörda” prover konsoliderade för antagna effektivspänningar in-situ för att komma så nära som möjligt jordens förhållanden i fält. Grovkorniga jordarter som exempelvis sand och siltig sand kan normalt inte provtas som ”ostörda” prover utan att stora förändringar sker av jordens struktur och lagringstäthet. För dessa jordar utförs ofta försök på prover som packas i laboratoriet till önskade förhållanden. Parametrar från grovkorniga jordarter som exempelvis sand utvärderas normalt som funktion av lagringstäthet eller densitet.

I detta kapitel ges läsaren en kort vägledning huvudsakligen avseende tolkning av det mekaniska beteendet som kan förväntas från typiska svenska leror, samt utvärdering av de vanligast använda parametrarna. De parametrar som utvärderas ur laboratorieförsök används ofta i beräkningsmetoder för

geotekniska tillämpningar, till exempel avseende bärförmåga hos plattor, släntstabilitet, deformationer kring sponter eller sättningar av uppfyllnader.



Figur 16 Principskiss för aktiva *dränerade* triaxialförsök som visar samband mellan axielltöjning och skjuvspänning och spänningsvägar i MIT-diagrammet. Portrycket ändras inte och därför är lutningen på den effektiva spänningsvägen lika den för den totala spänningsvägen, dvs. med lutning 1:1. Prov (1) är överkonsoliderat, medan prov (2) är normalt konsoliderat.



Figur 17 Principskiss för aktiva *odränerade* försök som visar samband mellan axielltöjning och skjuvspänning och spänningsvägar i MIT-diagrammet (prov från sensitiv normalt konsoliderad eller svagt överkonsoliderad lera). Figureerna visar även skillnad på ett högkvalitativt prov (1) och ett kraftigt stört prov (2); det störda provet (2) har en störd struktur och kan således inte bygga upp lika hög skjuvspänning och är inte längre lika sensitiv. Det störda provet avviker även tidigt i skjuvningsfasen från den effektiva spänningsväg som det "ostörda" provet följer. Notera att c_u för prov 2 inte alltid utvärderas från högsta skjuvspänningen, utan exempelvis kan utvärderas vid en maximal töjning, se vidare i avsnitt 5.3.2.

Vid tolkning och utvärdering av parametrar studeras normalt såväl spännings-töjningsdiagram som spänningsvägar, beroende på vilken parameter som utvärderas. Vid utvärdering av brott exempelvis bör normalt också töjningarnas storlek beaktas. I Figur 16 och Figur 17 illustreras två försök med såväl spännings-töjningssamband som spänningsvägar.

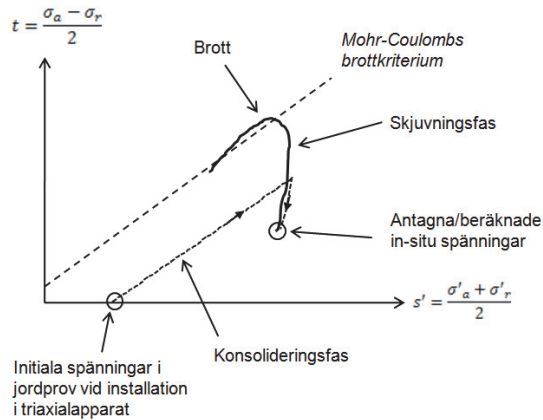
5.2 GENERELL TOLKNING AV RESULTAT

5.2.1 Inledning

Grundläggande för tolkning av försöksresultat och utvärdering av parametrar är att förstå jordens mekaniska beteende (spännings-töjningsegenskaper). Detta avsnitt syftar till att kortfattat ge en bild av de kanske viktigaste jordbeteendena kopplat till utvärdering av egenskaper/parametrar. Beteenden som kan förväntas från triaxialförsök beror av till exempel jordart, spänningstillstånd innan skjuvningsfasen, överkonsolideringsgrad eller lagringstäthet och typ av försök som exempelvis dränerat eller odränerat.

5.2.2 Konsolideringsfas

Konsolideringsfasen i triaxialförsök, se Figur 18 och Kapitel 3, redovisas normalt inte eftersom konsolideringen är till för att återskapa önskade spänningsförhållanden (ex. jordens in-situ spänningar), och har således normalt ingen praktisk betydelse. Dock kan de töjningar som uppstår vid konsolidering till in-situ effektivspänningar ge en indikation på ett ”östört” jordprovs kvalitet. Stora volymtöjningar under konsolideringen indikerar ett stört prov, eftersom dessa töjningar ändrar jordens struktur och vattenkvot. Stora volymändringar i senare delen av konsolideringsfasen i triaxialapparaten kan också bero på att förkonsolideringstrycket har överskridits, vilket normalt skall undvikas. Hur en störning påverkar utvärderade parametrar varierar, men ofta påverkas både absoluta värden och spridning inom en försöksserie. Ett stört prov kan i extremfall i triaxialförsök och i direkta skjuvförsök exempelvis visa icke-konservativa värden då man efter konsolideringsfasen erhållit lägre vattenkvot och högre hållfasthet jämfört med fältförhållanden. Det vanligaste är dock att ett stört prov ger lägre hållfasthet. Tabell 1 kan användas som ett mått på provkvalitet. Volymtöjning vid konsolideringsfasen bör redovisas av laboratoriet.



Figur 18 Principskiss av triaxialförsökets olika faser. Den streckade linjen illustrerar konsolideringsfasen och heldragna linjen skjuvningsfasen, där konsolideringsfasen slutar vid och skjuvningsfasen börjar vid spänningstillståndet motsvarande antagna/beräknade in-situ spänningar. Konsolideringsfasens spänningsväg kan utföras på flertalet sätt, dvs. olika vägar till exempelvis in-situ spänningar. För avancerade försök med mätning av små töjningar har spänningsvägar och töjningsvägar under konsolideringsfasen betydelse för exempelvis initial styvhet vid skjuvningsfasen, vilket dock inte behandlas i denna vägledning.

Tabell 1 Tabell för bedömning av provkvalitet vid konsolidering till in-situ spänningar för normalkonsoliderade och svagt överkonsoliderade leror (Andresen & Kolstad 1979). För leror med organiskt innehåll kan tabellvärdena höjas något medan för siltiga leror bör värdena sänkas något (tabellen kan även användas vid utvärdering av ödometerförsök).

Volymtöjning (%)	Provkvalitet
< 1	Mycket god
1 – 2	God
2 – 4	Någorlunda
4 – 10	Dålig
> 10	Mycket dålig

Störning av ett jordprov kan uppkomma under provtagning, hantering, transport och laboratorieförberedelser, och det är ofta svårt att hitta en direkt orsak till en

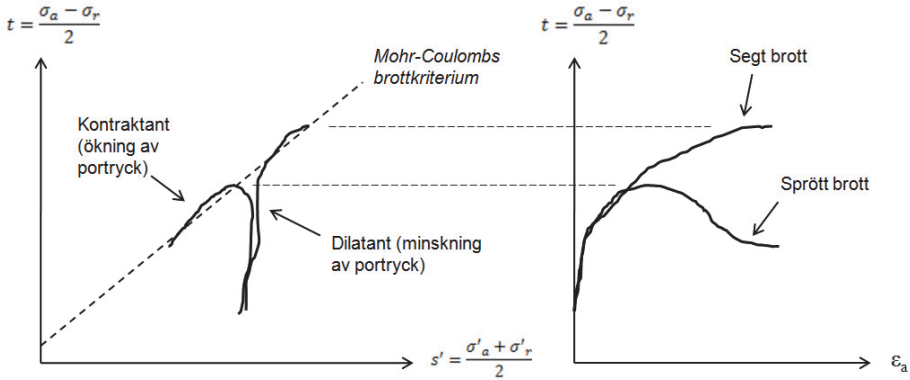
störning. Det är därför mycket viktigt att hålla hög kvalitet genom hela provkedjan, vilket kan göras möjligt genom att följa de rekommendationer som finns, se bl.a. SGF Notat 3:2007 (SGF, 2007) och SGF Rapport 1:2009 (SGF, 2009).

Generellt kan sägas att lågplastiska leror och leror med högt siltinnehåll och silt/sandskikt är mer störningsbenägna.

5.2.3 Skjuvningsfas

Utifrån resultaten från skjuvningsfasen utvärderas och tolkas deformations- och hållfasthetsparametrar hos jordprovet. Grundläggande för utvärdering och tolkning vid skjuvningsfasen är kontraktant och dilatant beteende under skjuvningsfasen. Kontraktans innebär för dränerade försök att jordvolymen minskar i volym vid skjuvning på grund av att jordpartiklarna är löst lagrade (alt. provet normalkonsoliderat eller svagt överkonsoliderat) jämfört med rådande effektivspänningar i provet. Dilatans innebär att volymen ökar vid skjuvning eftersom jordpartiklarna är fast lagrade (alt. provet kraftigt överkonsoliderat) jämfört med rådande effektivspänningar i provet. För friktionsjord ”rullar jordpartiklarna över varandra” vid skjuvningen, med volymökning som följd. För odränerade försök, dvs. försök med konstant volym, innebär ett kontraktant beteende att portrycket ökar (normal- och svagt överkonsoliderad lera) medan ett dilatant beteende innebär att portrycket minskar under skjuvning (kraftigt överkonsoliderad lera).

Figur 19 illustrerar dessa beteenden vid odränerade förhållanden. För kraftigt överkonsoliderad jord viker den effektiva spänningvägen av mot höger, dvs. effektiva medelspänningen ökar, eftersom en minskning av portrycket sker. Skjuvspänningen, dvs. skjuvhållfastheten, kan således fortsätta öka och ett ”seg” brott fås. I normalkonsoliderad och svagt överkonsoliderad jord sker en portrycksökning och spänningvägen viker av mot vänster, dvs. effektiva medelspänningen minskar. Skjuvspänningen minskar och ett ”sprött” brott uppstår.



Figur 19 Principskiss av effektivspänningsvägar och tillhörande spännings-töjningssamband vid kontraktant respektive dilatant beteende vid odränerade försök

5.3 UTVÄRDERING AV PARAMETRAR

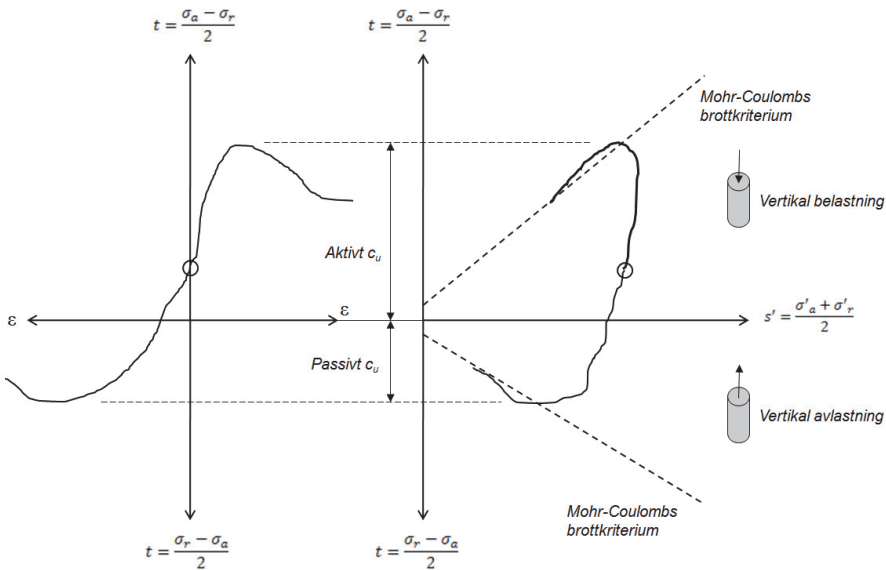
5.3.1 Inledning

I detta avsnitt ges en vägledning över hur de vanligaste förekommande parametrarna lämpligen kan utvärderas ur triaxialförsök. Metodiken för utvärdering av parametrar beror generellt på om försöket utförts under dränerade eller odränerade förhållanden.

5.3.2 Odränerad skjuvhållfasthet - c_u

För odränerade förhållanden hos finkorniga jordar används ofta odränerad skjuvhållfasthet (c_u) som beskrivning av skjuvhållfasthet. Det finns inte någon unik odränerad skjuvhållfasthet för en viss jord. Den beror av bland annat applicerade effektivspänningar före skjuvningsfasen, överkonsolideringsgrad, portrycksutveckling, belastningssituation och anisotropa egenskaper. Exempel på belastningssituationer som påverkar c_u är om aktivt eller passivt triaxialförsök utförs och val av storlek på töjningshastigheten (ju snabbare jorden belastas desto högre c_u). Konventionella odränerade triaxialförsök för leror utförs enligt svensk praxis med en axiell töjningshastighet av 0,6-0,7 % per timme.

Två ytterlighetsfall i normalfallet av skillnader i odränerad skjuvhållfasthet c_u fås hos triaxialförsök utförda som aktiva respektive passiva försök, se Figur 20.

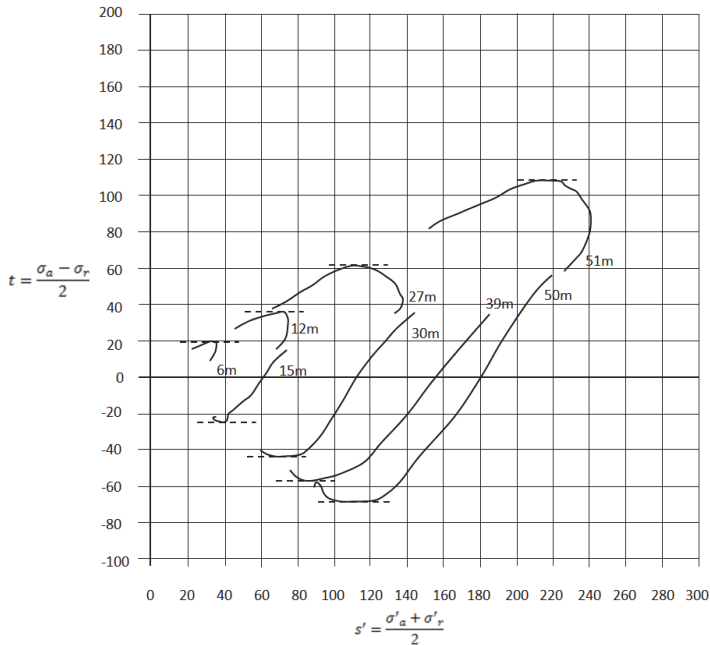


Figur 20 Principalskiss av odränerade *aktiva* respektive *passiva* triaxialförsök i töjning-skjuvspänningsdiagram (vänster) och spänningsvägsdiagram (höger). Den aktiva odränerade skjuvhållfastheten är större än den passiva. Notera även att större töjningar krävs för att nå passivt brott jämfört med aktivt.

Vid utvärdering av c_u används den högsta skjuvspänning som uppnåtts under försöket, vilket i aktiva försök som regel sker inom 1-2 % axialtöjning för prover av god kvalitet. Denna töjning till brott ökar generellt med ökande innehåll av organiskt material. Även siltiga jordar uppvisar normalt större töjningar till brott. För passiva försök är axialtöjningen till brott markant större. Om brottet är segt och inget tydligt ”peakvärde” erhålls, dvs. skjuvspänningen ökar under hela skjuvningsfasen, rekommenderas att c_u från aktiva försök utvärderas vid högst 15 % axialtöjning eller vid en lägre töjning som anses representativ för den specifika tillämpningen. Figur 21 visar ett verkligt exempel med utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet.

Odränerad skjuvhållfasthet c_u utvärderas från skjuvspänningen vid antaget brottillstånd, dvs.:

$$c_u = t = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$



Figur 21 Exempel på utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet c_u baserat på maxvärden (minvärden för passiva försök) på skjuvspänning från aktiva försök, markerade med streckade horisontella linjer, från triaxialförsök utförda på prover av en västsvensk lera. Notera de olika provtagningsdjupen och den ökande skjuvhållfastheten mot djupet samt den anisotropi i odränerad skjuvhållfasthet som finns på de olika djupen, dvs. högre aktiv än passiv skjuvhållfasthet. Spänningsvägar från aktiva försök i övre delen och passiva försök i nedre delen av diagrammet.

5.3.3 Effektiva hållfasthetsparametrar - ϕ' och c'

För utvärdering av skjuvhållfasthet baserat på studier av effektivspänningar, dvs. de effektiva hållfasthetsparametrarna friktionsvinkel (ϕ') och kohesionsintercept (c') används spänningsvägsdiagram och med stöd av spännings-töjnings samband för att bestämma brottillstånd för respektive prov. Effektiva hållfasthetsparametrar kan principiellt utvärderas från såväl dränerade försök som odränerade försök under förutsättning att portrycket är känt under det odränerade försöket. Figur 22 och Figur 23 visar exempel på utvärderade effektiva brottparametrar från dränerade försök (Figur 22) och odränerade försök (Figur 23). Den dragna brottlinjen i Figur 22 motsvarar hållfasthetsparametrarna $\phi' = 35,6^\circ$ och $c' = 4,1$ kPa. Det bör alltid göras en

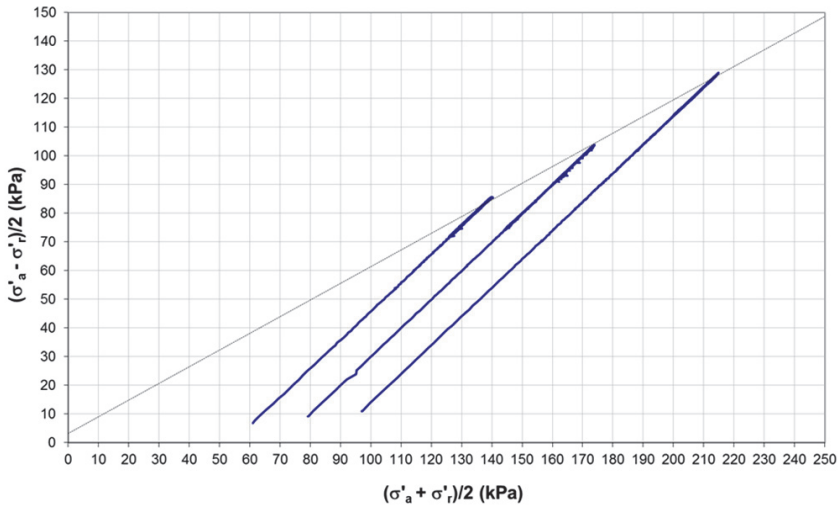
bedömning av relevans och tillförlitlighet av effektiva hållfasthetsparametrar utvärderade från odränerade triaxialförsök. Erfarenheterna avseende detta skiljer en hel del beroende på vilken jordtyp som provas. Ofta utvärderas en gemensam brottlinje baserat på effektivspänningsanalys för jord med lika egenskaper och inom samma geologiska formation. Provresultat från olika djup kan då sammanställas, se Figur 23. Tre eller flera försök av god kvalitet bör sammanställas för att säkra en tillförlitlig utvärdering.

En rät linje dras normalt baserat på topparna (maxvärde på skjuvspänning) av de effektiva spänningsvägarna och därefter kan linjens lutning och intercept (skärning) med skjuvspänningsaxeln avläsas. För MIT-diagrammet betecknas lutningen på linjen α och interceptet betecknas d . Mellan parametrarna för brottlinjen i Mohr-planet, lutning ϕ' och intercept c' , och korresponderande brottlinje i $t-s'$ -planet råder (i både aktiv och passiv belastning)

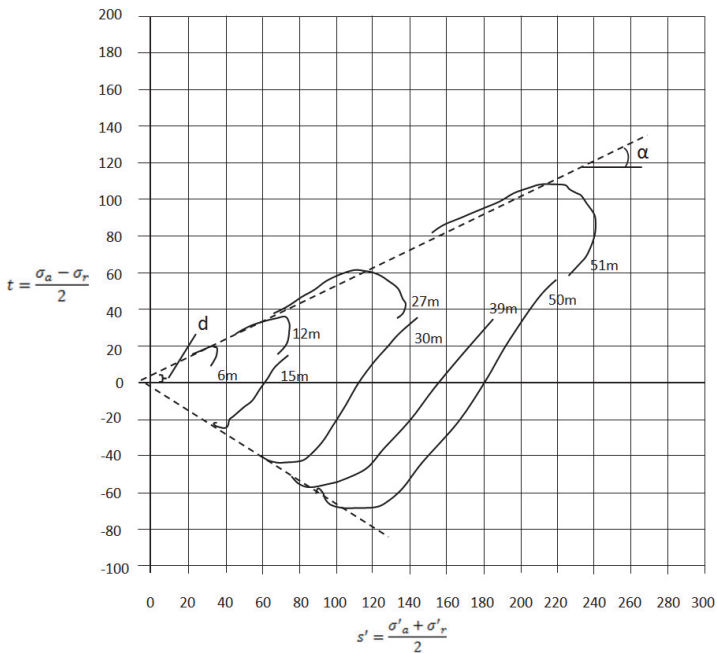
$$\sin \phi' = \tan \alpha$$

$$c' = \frac{d}{\sqrt{1 - \tan^2 \alpha}}$$

Se Bilaga A för utförligare beskrivning av samband mellan lutning och intercept i olika spänningsplan.



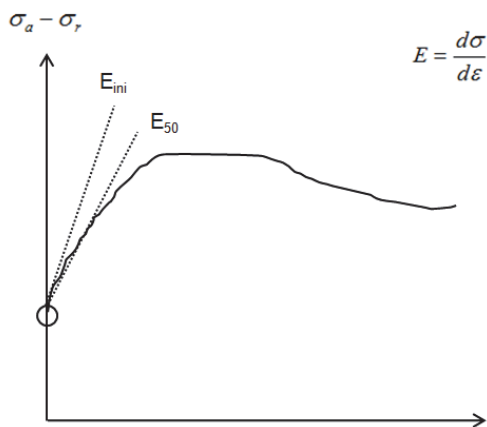
Figur 22 Exempel på dragning av brottlinje, dvs. utvärdering av effektiva brottparametrar från skjuvningsfasen från tre dränerade triaxialförsök, konsoliderade för olika spänningsnivåer, på en silt från 8 m djup.



Figur 23 Exempel på utvärdering av effektiva brottparametrar, brottlinjens lutning α och brottlinjens skärning med t -axeln d , från odränerade försök utförda på lera (samma försöksresultat som presenteras i figur 5.5).

5.3.4 Deformationsmoduler - E och G

Styvhetsmoduler såsom elasticitetsmodulen E och skjuvmodulen G kan utvärderas utifrån töjnings-spänningsdiagram. Vanligtvis utvärderas initialmodulen (E_{ini}) eller modulen vid halva maximala deviatorspänningen (E_{50}), eftersom dessa är mest intressanta/lämpliga för normalt nyttjade beräkningsmodeller och tillhörande geotekniska tillämpningar i fält. Figur 24 illustrerar principiellt utvärderingen av E_{ini} och E_{50} .



Figur 24 Principiell utvärdering av E-modul.

Skjuvmodulen G uppskattas ofta utifrån ett samband mellan den utvärderade E-modulen och ett antaget eller uppmätt tvärkontraktionstal ν . Sambandet bygger på elasticitetsteorin enligt:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

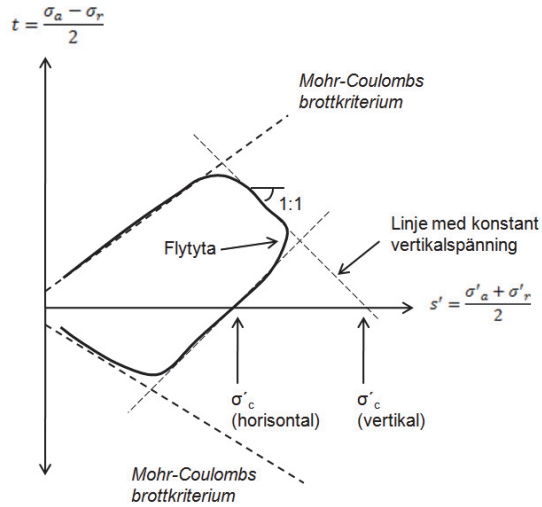
För nära odränerade förhållanden är tvärkontraktionstalet nära 0,5 vilket ger $E = 3G$. För dränerande förhållanden kan tvärkontraktionstalet exempelvis i grovkornig jord som sand normalt antas vara 0,3-0,35.

5.3.5 Uppskattning av förkonsolideringstryck - σ'_c

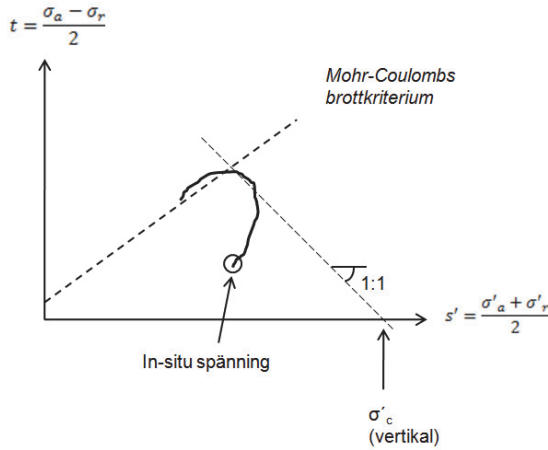
För en typisk svensk lera kan en förenklad flytytemodell underlätta arbetet med att förstå och bygga upp en modell för lerans beteende och utvärdering av förkonsolideringstryck. Den förenklade flytytemodellen bygger på omfattande

svensk forskning och erfarenhet kring lerors beteende och kan användas både vid tolkning och vid planering av triaxialförsök (se Larsson & Sällfors, 1981). Med flytyta menas här den yta i det effektiva spänningsplanet (spänningsdiagrammet) där en jords töjningar är relativt små vid spänningsändringar innanför ytan. Beroende på att i princip alla svenska leror är överkonsoliderade, där de flesta är svagt överkonsoliderade, är in-situ spänningstillståndet innanför flytytan. Om ett prov belastas från in-situ spänningstillståndet och spänningarna ökas så mycket att nya spänningstillståndet hamnar på eller utanför den ursprungliga flytytan uppstår stora deformationer (plastiska töjningar). Då ökar portrycket och spänningvägen följer flytytan åt vänster och uppåt mot brottlinjen. Principen med denna förenklade flytyta visas i Figur 25. Linjer med konstant vertikal- eller horisontal-spänning har en vinkel av 45° (lutning 1:1) i spänningsdiagrammet om skalan är densamma på x- och y-axeln, se Figur 25. Genom att rita en sådan linje med lutning 1:1 som tangerar högsta vertikalspänningen då flytning (plastiska töjningar) uppstår, antas att detta motsvaras av förkonsolideringstrycket (σ'_c) där den korsar s'-axeln. Figur 26 visar ett exempel på en sådan utvärdering.

Detta värde skall därför normalt motsvara det förkonsolideringstryck som kan utvärderas utifrån CRS-försök. Notera att inga ödometermoduler direkt kan utvärderas ur triaxialförsöket eftersom det normalt inte utförs under förhållandet förhindrad sidorörelse medan ödometerförsök utförs under förhållandet förhindrad sidorörelse. Triaxialförsöket utförs under 3-dimensionella förhållanden (axialsymmetri) och ödometerförsök utförs under 1-dimensionella förhållanden (K_0 -förhållanden).



Figur 25 Principskiss utvärdering av förkonsolideringstryck med hjälp av förenklad modell för flytyta (se Larsson & Sällfors, 1981).



Figur 26 Principskiss – exempel på utvärdering av förkonsolideringstryck med hjälp av förenklad modell för flytyta.

5.3.6 Sammanfattning

I Tabell 2 ges en sammanställning över de parametrar som beskrivits i kapitlet.

Tabell 2 Sammanställning över parametrar vars utvärdering beskrivits i Kapitel 5.

Parameter	Typ av triaxialförsök	Utvärdering
Odränerad skjuvhållfasthet, c_u (aktiv)	Aktivt odränerat	$c_u = (\sigma_a - \sigma_r)/2$ vid brott
Odränerad skjuvhållfasthet, c_u (passiv)	Passivt odränerat	$c_u = (\sigma_r - \sigma_a)/2$ vid brott
Effektiva hållfasthetsparametrar, friktionsvinkel ϕ' och kohesionsintercept c'	Dränerat / odränerat	Grafisk utvärdering från effektiva spänningsvägar
Deformationsmodul, E	Dränerat / odränerat	$E = \sigma / \varepsilon$
Skjuvmodul, G	Dränerat / odränerat	Samband med E-modul $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$
Uppskattning av vertikalt förkonsolideringstryck, σ'_{vc}	Aktivt odränerat	Grafisk utvärdering från effektiva spänningsvägar
Uppskattning av horisontalt förkonsolideringstryck, σ'_{hc}	Passivt odränerat	Grafisk utvärdering från effektiva spänningsvägar

Kapitel 6.

Triaxialförsöket som en del av geoteknisk projektering

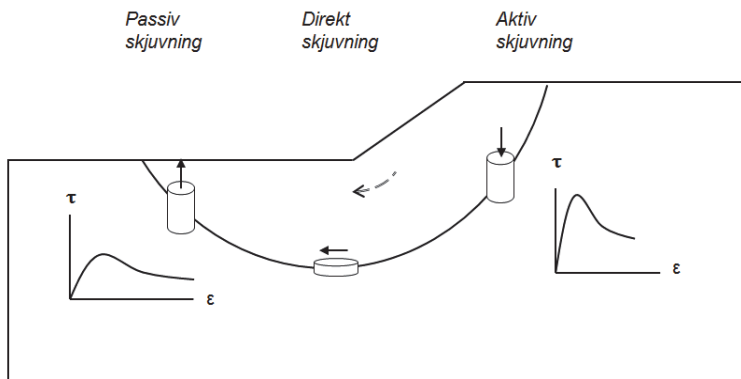
6.1 INLEDNING

Planering av fält- och laboratorieundersökningar utförs normalt i ett tidigt skede i en geoteknisk utredning eller projektering. Ett väl genomtänkt undersökningsprogram bestående av fält- och laboratorieundersökningar kan innebära stor nytta i efterföljande geotekniskt utredningsarbete och ge mervärde för projektet. Triaxialförsöket syftar inte till att ersätta andra laboratorieförsök. Triaxialförsöket bör i relevanta fall utföras som ett komplement för att ge möjlighet till en lämplig bestämning av eftersökt parameter, eller parametrar, och kanske även för en bättre förståelse av jordens beteende. Detta kapitel syftar till att vägleda läsaren kring praktiska frågor om planering och utförande av triaxialförsök för att öka möjligheterna att bättre kunna nyttja försökets potential.

Val av triaxialförsök, liksom alla andra laboratorieförsök och fältundersökningar, bör planeras med utgångspunkt från aktuell geoteknisk frågeställning och kan exempelvis variera med belastningssituation och jordart. Det vill säga att försöken bör planeras och utföras baserat på vilka jordparametrar, eller egenskaper, som är mest representativa för aktuell frågeställning och tillhörande beräkningar. Typ av triaxialförsök kan därefter väljas.

Triaxialförsöket är grundläggande i så kallade ADP-analyser. Det innebär beräkningar med beaktande av anisotropi för odränerad skjuvhållfasthet, se Figur 27. Triaxialförsöket är det idag mest lämpliga försöket, med vilket aktiv och passiv belastning kan utföras. Andra skjuvhållfasthetsvärden erhållna från

till exempel ving- och fallkonförsök samt direkta skjuvförsök antas normalt ge ett representativt medelvärde av den odränerade skjuvhållfastheten, dvs. storleksmässigt ligga mellan aktiv och passiv odränerad skjuvhållfasthet. I de flesta fall ger beräkningar med beaktande av hållfasthetsanisotropi en högre säkerhetsfaktor, till exempel avseende släntstabilitet eller spontdimensionering. Det är viktigt att *både* aktiv och passiv odränerad skjuvhållfasthet används för att undvika risk för missvisande beräkningsresultat.



Figur 27 ADP-analys (aktiv-direkt-passiv) med aktiv skjuvning (aktiva triaxialförsök), direkt skjuvning (t ex direkta skjuvförsök), samt passiv skjuvning (passiva triaxialförsök).

Oberoende av om utredningen avser stabilitetsberäkningar eller deformationsberäkningar bör försök utföras på jordprover tagna i de olika identifierade zoner i jordvolymen i fält som har koppling till planerade beräkningar. Till exempel så bör aktiva och passiva försök utföras på jord inom de områden som utsätts för huvudsakligen vertikala respektive horisontella belastningar.

6.2 SONDERING, PROVTAGNING OCH RUTINANALYS

Val av provtagningsdjup för ostörd provtagning bör göras efter att sonderingar har utförts, dvs. då information om lagerföljder, mäktigheter, dränerande skikt etc. kan utläsas. Med fördel används resultat från CPTu-sondering eftersom det normalt är den mest lämpliga sonderingsmetoden att undersöka hållfasthetsvariationer i finkorniga jordlager, och därmed också underlättar skapandet av en jordmodell.

Antalet prov som tas upp i fält bör vara större än antalet planerade triaxialförsök för att minimera risken att försök utförs på prover som inte är lämpliga för ändamålet, exempelvis skiktade, eller är störda. Triaxialförsök utförs oftast i Sverige på prover tagna med standardkolvprovtagare StII, eller möjligen StI, och har därför en diameter av 50 mm (och normalt vid provning med höjden på provet två gånger diametern). Jordprover trycks ut ur provtuben varpå det försiktigt skärs av och sedan monteras i triaxialapparaten. Andra provdimensioner kan vara möjliga beroende på laboratoriets resurser. Försök kan även utföras på trimmade provkroppar från större provdimensioner, till exempel från blockprover. I jordar som är särskilt känsliga för störningar, exempelvis högsensitiv lera eller en jord med stort siltinnehåll, bör detta övervägas med tanke på tillförlitlighet till utvärderade parametrar och möjlig nytta i aktuellt projekt.

Den handläggande geoteknikern bör invänta resultat från laboratoriets rutinanalys innan detaljerat program för triaxialförsök bestäms, som med fördel upprättas i samråd mellan handläggare och laborietekniker, se Kapitel 3. Uppenbart störda prover eller prover med stor heterogenitet, till exempel grova skikt som kan påverka försöksresultaten, skall undvikas.

För en tillförlitlig utvärdering av en specifik parameter, exempelvis friktionsvinkel, från en jordvolym med ungefär samma geotekniska basegenskaper och inom samma geologiska formation bör normalt minst tre försök av god kvalitet utföras. Det gäller även när den odränerade skjuvhållfasthetens ökning mot djupet skall undersökas.

Jordlagrens portrycksförhållanden bör undersökas med hjälp av portrycksmätare installerade på lämpliga nivåer för att ge underlag för att kunna bedöma in-situ effektivspänningar med tillräcklig noggrannhet. De annars relativt grova antagandena om portryck och effektivspänningar som kanske görs och som är underlag till genomförandet av triaxialförsöket, kan i förlängningen resultera i osäkerhet i tillförlitlighet till utvärderade parametrar från triaxialförsöket och således exempelvis påverka säkerhetsnivån avseende den dimensionerade geokonstruktionen. Detta bör den handläggande geoteknikern bedöma från fall till fall.

6.3 KRAV PÅ PROVKVALITET

Triaxialförsök skall utföras på prover av tillfredsställande kvalitet om representativa parametrar och egenskaper skall kunna utvärderas. Eurokoderna SS-EN 1997-1:2004 och SS-EN 1997-2:2007 samt SS-EN ISO 22475-1:2006 ställer krav på att triaxialförsök skall utföras på prover tagna enligt provtagningskategori A samt med kvalitetsklass 1 (se också SGF Notat 3:2007 (SGF, 2007)).

Provtagningskategori A specificerar vilka provtagare och provtagningsmetoder som kan användas. Provtagningskategori A motsvarar oftast väl tagna och hanterade prover med standardkolvprovtagaren.

Kvalitetsklass 1, som är den högsta kvalitetsklassen, innebär att provet ej förändrats från provtagning till laborieförsöket avseende kemisk sammansättning och vattenkvot/portal samt att ingen eller endast obetydlig störning av jordens struktur ska ha skett. Detta för att representativa parametrar ska kunna utvärderas. En bedömning av provkvalitet ska göras av ansvarig handläggande geotekniker (se SGF Notat 3:2007 (SGF, 2007)). Ett bidrag till bedömningen av provkvalitet kan till exempel vara att studera volymtöjningen som uppkommer under konsolideringsfasen, se vidare i avsnitt 5.2. Vanligtvis utförs CRS-försök för att få indata till konsolideringspänningarna vid triaxialförsök. Utifrån töjningen till förkonsolideringstrycket vid CRS-försöket kan en bedömning av provets kvalitet göras.

Mer information om provtagningskategori och kvalitetsklass och planering av försöksprogram finns i, SGF Notat 3:2007 ”Laborieprovning vid geotekniska utredningar” (SGF, 2007).

6.4 DETALJPLANERING AV TRIAXIALFÖRSÖK

Då prover av förväntad tillfredsställande kvalitet och antal har erhållits och genomgått rutinanalys kan ett program för triaxialförsök upprättas som alltid måste innehålla (se utförligare i Kapitel 3):

- Information om vilka spänningar man önskar konsolidera proven till innan skjuvning påbörjas (vertikala och horisontella spänningar samt portryck).
- Information om typ av försök som önskas utföras, det vill säga aktivt eller passivt samt dränerat eller odränerat (eller om annat triaxialförsök är aktuellt).

Speciella försöksutföranden kan specificeras och kan till exempel vara:

- specifika spänningsvägar – t.ex. vid etappvisa belastningar i fält
- en serie försök med olika konsolideringsspänningar – t.ex. för att undersöka den odränerade skjuvhållfasthetens variation med ökande konsolideringsspänningar (kan även utföras med direkta skjuvförsök)
- cykliska försök – t.ex. motsvarande trafikbelastningar eller liknande (kan även utföras med direkta skjuvförsök)
- försök med mätningar av små töjningar – t.ex. för noggrann modellering av deformationer med exempelvis FEM-analys.

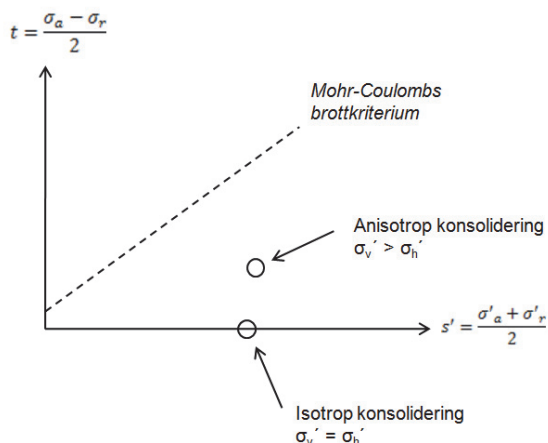
Tabell 3 ger exempel på typ av försök och några vanligt använda parametrar (se Kapitel 5) som kan utvärderas från respektive försök. Det bör noteras att en del andra parametrar än nedan angivna också kan utvärderas från triaxialförsök, exempelvis grundläggande jordmekaniska parametrar såsom tvärkontraktionstal, permeabilitet och kompressionsmodul. Många jordmodeller i FEM-program baseras på modellspecifika parametrar varav en del kan utvärderas ur triaxialförsök.

Tabell 3 Exempel på triaxialförsök och parametrar vars utvärdering beskrivs i Kapitel 5.

Typ av försök	Dränerat <i>Långsam belastningssituation / snabba dräneringsförhållanden/ långtidsstabilitet</i>	Odränerat <i>Snabb belastningssituation / långsamma dräneringsförhållanden/ korttidsstabilitet</i>
Aktivt <i>Vertikal belastning (alt. horisontell avlastning)</i>	c' och ϕ' Dränerad E-modul	c_u (aktiv) c' och ϕ' Odränerad E-modul
Passivt <i>Vertikal avlastning (alt. horisontell belastning)</i>	c' och ϕ'	c_u (passiv) c' och ϕ'

Konsolideringsspänningar väljs av handläggande geotekniker. Oftast konsolideras jordproven till in-situ spänningar, men kan även konsolideras till andra valda spänningar om så önskas (se vidare i kapitel 3). Konsolidering kan utföras isotropt, det vill säga med vertikala och horisontella spänningar lika, eller anisotropt, se Figur 28. Vid anisotrop konsolidering är den ena spänningen högre än den andra, normalt vertikalspänningen högre.

Normalt utförs anisotrop konsolidering för att efterlika fältförhållanden eftersom den vertikala effektivspänningen oftast är högre än den horisontella. Detta gäller för leror som är normal- till svagt överkonsoliderade. Starkt överkonsoliderade leror har normalt högre horisontalspänning än vertikalspänning.



Figur 28 Principskiss över spänningssituation för prover konsoliderade isotropt respektive anisotropt

Det är viktigt att inte konsolidera jordprovet alltför nära förkonsolideringsstrycket σ'_c då lerans struktur riskeras att börja brytas ner innan skjuvningsfasen påbörjas och representativa jordparametrar kan då oftast inte utvärderas. I Sverige konsolideras normalt leror för effektivspänningar vertikalt till 0,85 gånger förkonsolideringstrycket, varpå provet avlastas till in-situ spänningar vertikalt och horisontellt. Vid planering av konsolideringsspanningar kan i förekommande fall den förenklade flyttemodellen användas för en tidig bedömning av lerans spänningstillstånd i förhållande till förkonsolideringsstrycket och brottlinjen (se Figur 25 och Figur 26 i Kapitel 5). Indata till denna bedömning kan fås från rutinförsök (flytgränsen, $w_L \rightarrow K_{0nc}$) och från CRS-försök ($\sigma'_c \rightarrow OCR$). Om man till exempel misstänker att leran har ett porövertryck under pågående konsolidering i fält kan med fördel ett ödometerförsök utföras, alternativt att portrycksmätningar på aktuellt djup utförs in-situ.

Effektivspänningar uppskattas genom resultat från densitetsbestämningen och genom uppskattning eller mätning av in-situ portryck. Från den vertikala effektivspänningen kan jordens effektiva horisontalspänning beräknas:

$$\sigma'_h = \sigma'_v K_0$$

Viljordskoefficienten K_0 kan för friktionsjord ofta antas vara $1 - \sin \phi'$, och för normalkonsoliderad lera:

$$K_{0nc} \approx 0,31 + 0,71(w_L - 0,2)$$

För leror med högt siltinnehåll och siltjordar kan K_{0nc} antas till 0,5 medan för organiska jordar kan K_{0nc} antas till 0,6. För överkonsoliderade leror ($OCR = \sigma'_c / \sigma'_v$) kan följande samband användas:

$$K_0 \approx K_{0nc} OCR^{0,5a'0,6}$$

Se SGI Information 3 (2007) för mer information om ovan angivna samband

Kapitel 7.

Referenser

- Andresen, A. & Kolstad, P. (1979).** NGI 54-mm samplers for undisturbed sampling of clays and representative sampling of coarser materials, State of the art on current practice of soil sampling. Proceedings of the international symposium of soil sampling, Singapore, July 1979, s 13-21.
- CEN ISO/TS 17892-9 (2004).** Geoteknisk undersökning och provning - Laboratorieundersökning av jord - Del 9: Konsoliderat triaxialförsök på vattenmättad jord, SIS, Stockholm.
- Larsson, R. & Sällfors, G. (1981).** Hypothetical yield envelope at stress rotation. International conference on soil mechanics and foundation engineering, 10, Stockholm, June 1981. Proceedings, Vol. 1, s 693-696.
- Muir Wood, D. (1990).** Soil behaviour and critical state soil mechanics, (Cambridge University Press), 1991 (rev.), 462 s, Cambridge.
- Muir Wood, D. (2004).** Geotechnical modelling, (Spon Press), 2004, 488 s, Oxfordshire.
- SGF (2007).** Laboratorieprovning för geotekniska utredningar. Svenska geotekniska föreningen. SGF Notat 3:2007, Linköping.
- SGF (2009).** Metodbeskrivning för provtagning med standardprovtagare – ostörd provtagning i finkornig jord. Svenska Geotekniska Föreningen. SGF Rapport 1:2009, Linköping.
- SGI Information 3 (2007).** Skjuvhållfasthet - utvärdering i kohesionsjord, Larsson, R, Sällfors, G, Bengtsson, PE, Alén, C, Bergdahl, U, Eriksson, L, Statens geotekniska institut, SGI. Information 3, 2007, 2 rev utg, 63 p, Linköping.

Skredkommissionen (1995). Anvisningar för släntstabilitetsutredningar, Ingenjörsvetenskapsakademien, IVA. Skredkommissionen. Rapport 3:95, 1995, Linköping.

SS-EN 1997-1:2004 (2004). Eurocode 7 – Geotechnical design – Part 1: General rules, CEN 2004, SIS, Stockholm.

SS-EN 1997-2:2007 (2007). Eurocode 7 – Geotechnical design – Part 2: Ground investigation and testing, CEN 2007, SIS, Stockholm.

SS-EN ISO 22475-1:2006 (2006). Geoteknisk undersökning och provning - Provtagning genom borrhings- och utgrävningsmetoder och grundvattenmätningar - Del 1: Tekniskt utförande (ISO 22475-1:2006), SIS, Stockholm

Mer att läsa

Här ges några exempel, bland många, på ytterligare informationskällor avseende triaxialförsök. Utöver nedan exempel finns inslag av triaxialförsök exempelvis i olika forskningsrapporter, doktorsavhandlingar, informationsskrifter, artiklar och anvisningar nationellt och internationellt, läroböcker inom jordmekanik och geoteknik, kursmaterial som berör numeriska beräkningar (FEM), m.m.

Berre, T. (1981). Triaxial testing at the Norwegian Geotechnical Institute, nr 134, Norges geotekniske institutt, Oslo.

Chalmers tekniska högskola (2005). ”En kortkurs om Triaxialförsök på främst normalkonsoliderade och svagt överkonsoliderade leror” (kompetenscentrum infrastruktur, CTH, www.kcentrum-infra.chalmers.se).

Head, K. H. (1986). Manual of Soil Laboratory Testing, vol. 3, Effective stress tests. Pentech Press, London.

Holmén, M. (2003). Advanced triaxial testing of clay till. Licentiatuppsats, Lunds tekniska högskola, LUTVDG/TVGT-1012, Lund.

Kullingsjö, A. (2007). Effects of deep excavations in soft clay on the immediate surroundings, Analysis of the possibility to predict deformations and reactions against the retaining systems. Doktorsavhandling, Chalmers tekniska högskola, nr 2683, Göteborg.

Larsson, R. (1990). Behaviour of organic clay and gyttja. Statens geotekniska institut, SGI Rapport 38, Linköping.

- Larsson, R. (2001).** Investigations and load tests in clay till. Statens geotekniska institut, SGI Rapport 59, Linköping.
- Larsson, R., Åhnberg, H. och Holmén, M. (2012).** Bestämning av dränerad skjuvhållfasthet med olika laboratorieförsök. Statens geotekniska institut, SGI Varia 630, Linköping.
- SGI (2007).** Triaxialförsök. Informationsblad (www.swedgeo.se).
- TK Geo (2011).** Trafikverket, Borlänge.
- Westerberg, B. (1995).** Lerors mekaniska egenskaper, experimentell bestämning och kvalitativ modellering med tillämpning på lera från Norrköping. Licentiatuppsats, 1995:02L, Luleå tekniska universitet, Luleå.
- Westerberg, B. (1999).** Behaviour and modelling of a natural soft clay - Triaxial testing, constitutive relations and finite element modelling. Doktorsavhandling, 1999:13D, Luleå tekniska universitet, Luleå.
- Wiesel, C. E., Hansbo, S., Broms, B. och SGF:s laboratoriekommitté (1985).** Skjuvhållfasthet, SGF:s Geotekniska Laboratieanvisningar, del 9, Byggeforskningsrådet, Stockholm.
- Åhnberg, H. (2006).** Strength of stabilised soils. A laboratory study on clays and organic soils stabilised with different types of binder. Doktorsavhandling, Lunds tekniska högskola, LUTVDG/TVSM-06/1020 / Statens geotekniska institut, SGI Rapport 72 / Svensk djupstabilisering, Rapport 16, Lund.
- Åhnberg, H. och Larsson, R. (2012).** Strength degradation of clay due to cyclic loadings and enforced deformation. Statens geotekniska institut, SGI Rapport 75, Linköping.

Bilaga A.

Mohr-Coulombs brottvillkor och samband mellan hållfasthetsparametrar i olika spänningsplan

Hållfasthetsparametrarna friktionsvinkeln ϕ' och kohesionsintercept c' i Mohr-Coulombs brottvillkor utvärderas traditionellt från i Mohr-planet uppritade spänningscirklar, Mohr-cirklar, figur B1.1 c, där ϕ' utgör lutningen (vinkeln) av brottlinjen och c' skärningen med τ -axeln. Denna så kallade Mohr-Coulombs brottlinje beskriver sambandet mellan skjuvspänning och normalspänning i ett antaget brottplan enligt ekvation

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

där

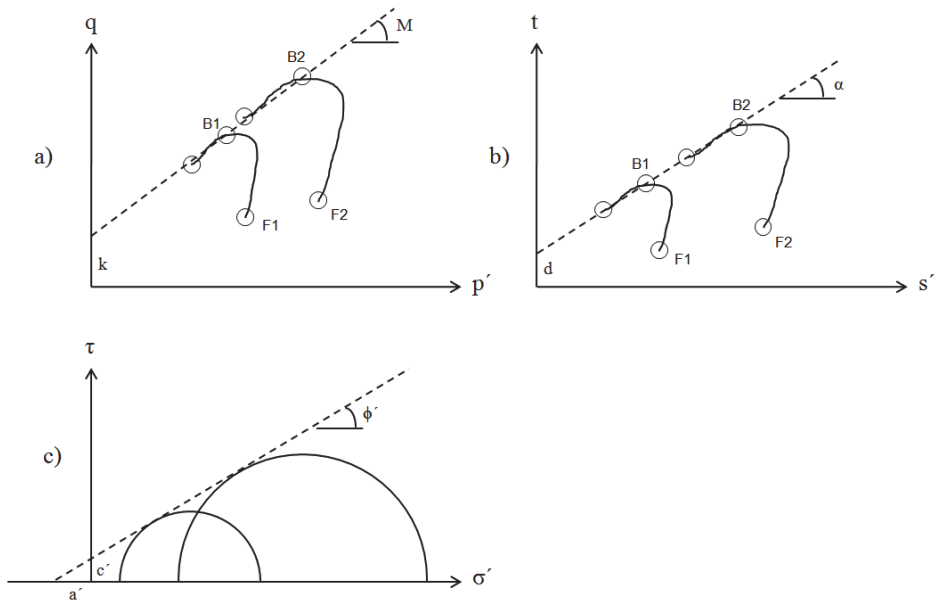
τ = skjuvspänning i brottplanet

σ' = normalspänning (effektivspänning) i brottplanet

Genom att rita upp en eller flera Mohr-cirklar baserat på effektivspänningar, vardera cirkeln representerande *brottillstånd* för ett jordprov, och dra en rät linje som på bästa möjliga sätt tangerar dessa cirklar, kan hållfasthetsparametrarna ϕ' och c' utvärderas. I figur Figur 29c har två cirklar ritats in som representerar brott för två olika försök (punkten B i Figur 29 a och b). I Figur 29c har också parametern a' ritats in, som bestäms som skärningen med σ' -axeln, vilken kan användas vid rapportering och nyttjande av resultat.

Om resultaten av triaxialförsök istället redovisas i $q - p'$ -planet eller i $t - s'$ -planet, Figur 29 a och b, fås en kontinuerlig spänningsväg som beskriver hur

spänningarna ändras under hela försöket, normalt från start till slut av skjuvningsfasen. Istället för att rita ut en mängd Mohr-cirklar kan förändringarna i spänningstillstånd enklare illustreras med dessa spänningvägar. I Figur 29 a och b har skisserats två spänningvägar från två olika försök (exempel på resultat av *odränerade* försök på leror). Båda spänningvägarna har en maxpunkt (största erhållen deviatorspänning / skjuvspänning) som har markerats med en ring och för dessa maxvärden (brottvärden) har en rät linje dragits som anger (antas motsvara) brotttillstånd.



Figur 29 a-c Illustration av brottlinjer med tillhörande hållfasthetsparametrar i tre olika spänningsplan ($q-p'$, $t-s'$, $\tau-\sigma'$) för odränerade triaxialförsök.

Brottlinjens lutning representeras av parametern M i $q-p'$ -planet och av parametern α i $t-s'$ -planet. Brottlinjens (eventuella) intercept definieras av parametern k i $q-p'$ -planet och d i $t-s'$ -planet.

Eftersom det är samma indata (σ'_a och σ'_r alternativt σ'_1 och σ'_3) till de tre olika diagrammen (planen) finns det teoretiska samband mellan de olika

hållfasthetsparametrarna som kan utvärderas. Detta innebär att hållfasthetsparametrarna kan utvärderas från ett diagram och sedan via teoretiska samband räknas om till motsvarande hållfasthetsparametrar i ett annat diagram.

Mellan parametrarna för brottnlinjen i Mohr-planet (Figur 29 c) och korresponderande brottnlinje i $t-s'$ -planet (Figur 29 b) råder (i både aktiv och passiv belastning)

$$\sin \phi' = \tan \alpha$$
$$c' = \frac{d}{\sqrt{1 - \tan^2 \alpha}}$$

Mellan parametrarna för brottnlinjen i Mohrplanet (Figur 29 c) och korresponderande brottnlinje i $q-p'$ -planet råder vid *aktivt* brottillstånd sambanden

$$\sin \phi' = \frac{3M}{6 + M}$$
$$c' = k \frac{(3 - \sin \phi')}{6 \cos \phi'}$$

och för passiva försök kan exempelvis Muir Wood (1990) studeras.

Bilaga B.

Exempel på utvärdering av effektiva (dränerade) parametrar c' och ϕ' från fem odränerade triaxialförsök

Brottvärden på σ'_1 och σ'_3 från odränerade försök körda vid olika spännings-tillstånd plottas mot varandra och en trendlinje tas fram som uttrycker sambandet mellan huvudspänningarna som:

$$\sigma'_1 = a\sigma'_3 + b$$

Sedan utnyttjas Mohr-Coulombs brottkriterium:

$$\sigma'_{1f} = \sigma'_{3f} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) + 2c' \tan \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right)$$

där

$$a = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) \text{ och } b = 2c' \tan \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right)$$

Sätt in värdena från trendlinjen i ekvationen:

$$a = 2,6 \dots \rightarrow \tan \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) = \sqrt{2,6 \dots} = 1,6 \dots$$

Detta ger:

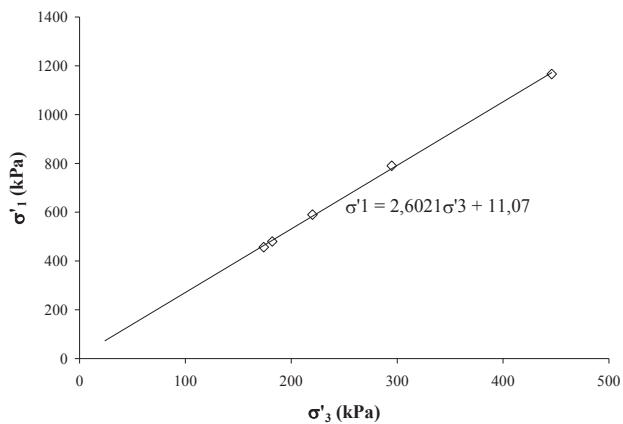
$$\left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) = \arctan(1,6 \dots) = 58,2^\circ \rightarrow \phi' = (58,2 - 45) \cdot 2 = 26,4^\circ$$

och

$$c' = \frac{11,07}{(2 \cdot 1,6 \dots)} = 3,4 \text{ kPa}$$

Tabell 4 Brottspänningar från fem odränerade triaxialförsök på en lermorän från Tornhill utanför Lund. I detta exempel är σ'_1 lika med σ'_a och σ'_3 lika med σ'_r .

σ'_{3f}	σ'_{1f}
182	480
446	1166
220	590
174	457
295	790



Figur 30 Brottspänningar från fem odränerade triaxialförsök på en lermorän från Tornhill utanför Lund.

Bilaga C.

Exempel på utvärdering av effektiva (dränerade) parametrar c' och ϕ' från två odränerade triaxialförsök

Brottvärden på σ'_1 och σ'_3 från två odränerade försök utförda vid olika spänningstillstånd kan med hjälp av liksidiga trianglar användas för att beräkna c' och ϕ' .

Radierna till de två cirkelarna blir:

$$R_1 = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2} = \frac{(480 - 182)}{2} = 149 \text{ kPa}$$

$$R_2 = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2} = \frac{(1166 - 446)}{2} = 360 \text{ kPa}$$

Centrum för cirkelarna ligger vid:

$$O_1 = \sigma'_3 + R_1 = 182 + 149 = 331 \text{ kPa}$$

$$O_2 = \sigma'_3 + R_2 = 446 + 360 = 806 \text{ kPa}$$

Likformighet ger:

$$\frac{R_1}{(a + O_1)} = \frac{R_2}{(a + O_2)}$$

$$\frac{149}{(a + 331)} = \frac{360}{(a + 806)} \rightarrow 149(a + 806) = 360(a + 331) \rightarrow 211a = 934$$

$$\rightarrow a = 4,34$$

Friktionsvinkeln ges då av:

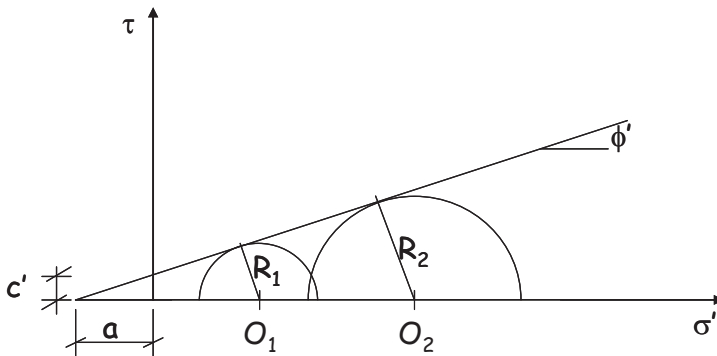
$$\sin\phi' = \frac{R_1}{(a + O_1)} = \frac{360}{(4,43 + 331)} = 0,44 \rightarrow \phi' = \arcsin(0,44) = 26,4^\circ$$

Kohesionen ges av:

$$c' = a \cdot \tan\phi' = 4,43 \cdot \tan(26,4^\circ) = 2,2 \text{ kPa}$$

Tabell 5 Brottspänningar från två odränerade triaxialförsök på en lermörän från Tornhill utanför Lund. I detta exempel är $\sigma'1$ lika med $\sigma'a$ och $\sigma'3$ lika med $\sigma'r$.

Prov	σ'_{3f}	σ'_{1f}
1	182	480
2	446	1166



Figur 31 Mohrs spänningscirklar med beteckningar som används i utvärderingsexemplet

Bilaga D.

Exempel på utvärdering av effektiva (dränerade) parametrar c' och ϕ' från två odränerade triaxialförsök

Brottvärden på σ'_1 och σ'_3 från två odränerade försök utförda vid olika spänningstillstånd kan med hjälp Mohr-Coulombs brottkriterium uttryckas som två ekvationer med två obekanta.

Tabell 6 Brottspänningar från två odränerade triaxialförsök på en lermorän från Tornhill utanför Lund. I detta exempel är σ'_1 lika med σ'_a och σ'_3 lika med σ'_r .

Prov	σ'_{3f}	σ'_{1f}
1	182	480
2	446	1166

$\sigma'_{1f} = \sigma'_{3f} \tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) + 2c' \tan\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right)$ Mohr-Coulombs brottkriterium

$$1166 = 446 \cdot \tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) + 2c' \tan\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right)$$

$$480 = 182 \cdot \tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) + 2c' \tan\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right)$$

$$\text{Sätt } \tan\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) = A$$

$$1166 = 446 \cdot A^2 + 2c'A$$

$$480 = 182 \cdot A^2 + 2c'A$$

Subtraktion av ekvationerna ger:

$$686 = 264 \cdot A^2$$

$$A = \sqrt{686/264} = 1,61 = \tan\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right)$$

och insatt i ekvation blir det:

$$480 = 182 \cdot 1,61^2 + 2c' \cdot 1,61$$

$$7,08 = 2c' \cdot 1,61 \rightarrow c' = \frac{7,08}{(2 \cdot 1,61)} = 2,2 \text{ kPa}$$

$$45 + \frac{\phi'}{2} = \arctan(1,61) = 58,2$$

$$\phi' = (58,2 - 45) \cdot 2 = 26,4^\circ$$

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 fikornig jord
- 2:2009 Åtgärds mål vid in-situsanering. 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

Svenska Geotekniska Föreningen (SGF) bildades 1950 och består av drygt 1000 enskilda medlemmar, med minst två års praktisk erfarenhet av geoteknik. Dessutom ingår ca 30 korporativa medlemmar i form av institutioner, högskolor, myndigheter, konsult- och entreprenadföretag samt tillverkare inom det geotekniska området.

SGF har till ändamål att främja utvecklingen inom geoteknik med grundläggning 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 Notat- och Medlemsartikelsier utges föreningens metodbeskrivningar, monografier och dokumentation från konferenser, temadagar m.m.



Svenska Geotekniska Föreningen
Swedish Geotechnical Society

c/o Arokad, 417 57 Göteborg Tel: 031-773 47 03
Internet: www.sgf.net E-post: info@sgf.net