

Svenska Geotekniska Föreningen
Swedish Geotechnical Society

SGF Notat 2:2004

Direkta skjuvförsök – en vägledning

SGF:s Laboratoriekommitté

Linköping 2004

Direkta skjuvförsök – en vägledning från SGF:s Laboratoriekommitté

Allmänt

Svenska Geotekniska Föreningens laboratoriekommitté arbetar med att informera om laboratorieverksamhet och utförande av geotekniska laboratorieförsök samt tolkning och användning av resultaten. Denna vägledning är ett led i detta arbete.

Utöver de geotekniska rutinförsöken finns ett antal försök som används vid noggrannare bestämningar av olika parametrar, och vars användning emellanåt föreskrivs i olika anvisningar. Det direkta skjuvförsöket är ett sådant försök som exempelvis används för bestämning av skjuvhållfasthet i samband med stabilitetsutredningar för såväl bankar som naturliga slänter. Det används också ofta för kalibrering av andra metoder som t.ex. vingförsök, fallkonförsök och CPT-sondering.

Syfte

Syftet med denna vägledning är att relativt kortfattat informera om det direkta skjuvförsöket och dess användning. Vägledningen ska göra det lättare för framförallt geotekniska konsulter och beställare att förstå metodens möjligheter och begränsningar och att därmed kunna beställa rätt typ av försök med rätt försöksförutsättningar och att sedan kunna tolka och använda resultaten på rätt sätt.

Syftet är också att göra utförande, redovisning och tolkning av försöksresultaten mer enhetlig inom landet.

Vägledningens uppläggning

Vägledningen är indelad i ett antal underavdelningar:

- En summering av fördelar och begränsningar för försöket och jämförelser med andra typer av försök.
- En avgränsning för vilka typer av försök som metoden är lämplig för med hänsyn till jordart, spänningssituation och dräneringsförhållanden.
- En beskrivning av de befintliga utrustningarna enligt en skala med ökande komplexitet.
- En beskrivning av försöksutförandet vid olika förutsättningar.
- En presentation av de utdata som erhålls ur försöket samt uppritning av resultaten och utvärdering av de vanligen använda parametrarna.

Denna skrift har tagits fram av SGF:s laboratoriekommitté med Rolf Larsson, SGI, som huvudförfattare.

Kommitténs övriga ledamöter är:

Lars Bjerin	Vägverket
Lars G Eriksson	MRM Konsult AB
Bo Westerberg	Luleå tekniska universitet
Christer Åkerman	SWECO VBB AB

Ett stort antal medlemmar i SGF har också bidragit med värdefulla synpunkter.

INNEHÅLL

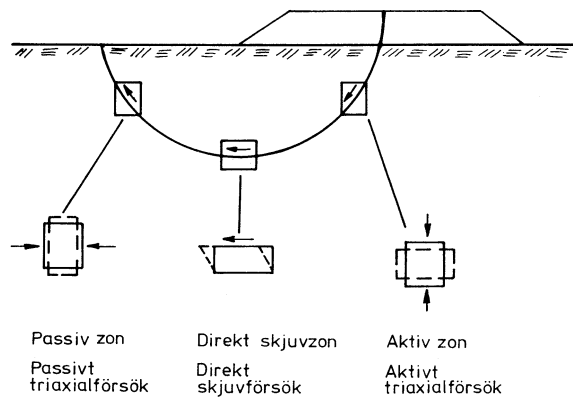
Förord

1. Fördelar och begränsningar med direkta skjuvförsök	4
1.1 Fördelar	4
1.2 Begränsningar	5
2. Användningsområden för försöket och olika försökstyper	5
3. Det direkta skjuvförsöket	7
3.1 Allmänt	7
3.2 Den direkta skjuvapparaten	7
3.2.1 Den enkla apparaten	7
3.2.2 Den avancerade utrustningen	10
3.3 Försöksutförande	12
3.4 Försöksresultat, uppritning och utvärdering av parametrar	13
3.4.1 Odränerade försök	13
3.4.2 Dränerade försök	19
3.4.3 Cykliska försök	23
4. Mer att läsa	25

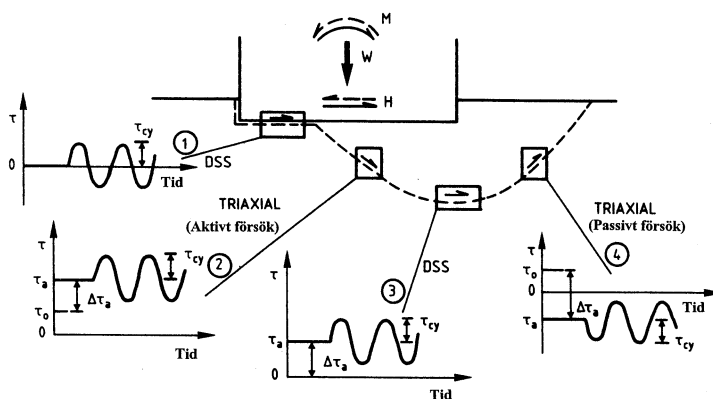
1 FÖRDELAR OCH BEGRÄNSNINGAR MED DIREKTA SKJUVFÖRSÖK

1.1 Fördelar

- Den största fördelen med det odränerade direkta skjuvförsöket är att det direkt simulerar ett av de vanligaste belastningsfallen i jord, Fig. 1.
- Den uppmätta skjuvhållfastheten i odränerade direkta skjuvförsök utgör ofta ett relevant medelvärde för den odränerade skjuvhållfastheten i de olika belastningsfall som uppträder i en glidyta vars medellutning inte starkt avviker från en horisontell riktning. I jord med anisotrop odränerad skjuvhållfasthet ger det direkta skjuvförsöket därmed ofta den mest relevanta odränerade skjuvhållfastheten för dimensionering.
- I försöket kan jordens naturliga spänningstillstånd återskapas innan skjuvprovningen utförs. En stor del av störningseffekterna från provtagningen kan därmed elimineras.
- Resultaten kan användas direkt, utan korrektion för jordens konsistensgränser eller andra faktorer, och relevansen för den odränerade skjuvhållfastheten vid beräkning av stabiliteten för bankar på lös lera är väl dokumenterad.



a)



b)

Fig. 1. Primär relevans för odränerade direkta skjuvförsök vid olika belastningsfall.

- a) bankstabilitet
- b) fundament utsatta för cyklisk horisontalbelastning

- Det odränerade direkta skjuvförsöket kan användas för kontroll och kalibrering av den odränerade skjuvhållfasthet som fås ur olika vanligen använda försök som vingförsök och CPT-sondering i fält och fallkonförsök i laboratoriet. I utvärderingen av de senare använder man sig av empiriska korrektionsfaktorer. Dessa faktorer kan variera avsevärt mellan olika jordar och är inte alltid relevanta i jordar med en annan sammansättning än hos dem för vilka faktorerna framtagits.
- Direkta skjuvförsök, såväl odränerade som dränerade, kan användas för organisk jord och andra material med utpräglad horisontell skiktning eller partikelorientering, i vilka andra försökstyper tenderar att ge missvisande resultat.
- Försöket är väl lämpat för att prova hållfasthetstillväxten då jorden får konsolidera för högre spänningar än de rådande in-situ spänningarna liksom eventuell hållfasthetsnedsättning vid avlastning.
- De vanligaste typerna av direkta skjuvförsök kan utföras med en relativt enkel utrustning. Med ostörda prover tagna med standardkolvprovtagare är monteringen och försöksutförandet också relativt enkelt. Kostnaden för sådana försök är därmed måttlig och försöket tar två dagar att utföra. (För mer avancerade försök stiger kostnaden kraftigt. De direkta skjuvförsöken kan dock inte ersättas med någon annan typ av försök om samma belastningsfall skall simuleras.)

1.2 Begränsningar

- Direkta skjuvförsök är inte relevanta för alla belastningsfall i jord med skjuvhållfasthetsanisotropi. (Behöver man bestämma jordens egenskaper vid aktiva och/eller passiva belastningsfall, se t.ex. Fig. 1, måste aktiva respektive passiva triaxialförsök utföras.)
- Dränerade direkta skjuvförsök ger en friktionsvinkel som ofta skiljer mot den som utvärderas ur det vanligare triaxialförsöket. Skillnaden varierar med lagringstäthet och friktionsvinkel. I silt och sand, där egenskaperna är starkt beroende av lagringstätheten, medför de relativt små proverna, och speciellt den låga provhöjden, att det dessutom är svårt att hålla kontroll på jordens portal. (För dränerade försök i denna typ av jord rekommenderas därför främst andra försökstyper, t.ex. triaxialförsök.)

2. ANVÄNDNINGSSOMRÅDEN FÖR FÖRSÖKET OCH OLIKA FÖRSÖKSTYPER

Det direkta skjuvförsöket är främst tillämpligt för finkorniga jordar i vilka ostörda prover kan tas. Det används också främst för odränerade försök. I dessa försök rekonsolideras proverna normalt till spänningstillståndet in situ innan skjuvningen utförs. Detta fordrar kännedom om såväl förkonsolideringstryck som rådande effektiva överlagringstryck. Alternativt kan proverna konsolideras till ett förutbestämt spänningstillstånd som avser att efterlikna ett kommande belastningsfall. Försöken kan också utföras som försöksserier med olika konsolideringsspänningar för ett och samma jordmaterial för att bygga upp en modell för hur dess egenskaper varierar med spänningstillståndet.

Dränerade försök utförs främst i lera och i skiktad eller varvig jord med låga vertikalktryck i förhållande till förkonsolideringstrycket. Överkonsolideringsgraden skall helst vara större än 2. I annat fall erhålls inget brott under försöket utan skjuvkraften ökar kontinuerligt samtidigt som provet komprimeras och konsolideras. Dränerade försök utförs också emellanåt på torv eftersom det för denna jord är den enda försökstyp (bortsett från ringskjuvförsök) som medger en tolkning av en dränerad skjuvhållfasthet. Något brott erhålls då normalt inte, men med ledning av kraft-deformations- och volymändringskurvorna kan man utvärdera det värde på friktionsvinkeln resultaten asymptotiskt närmar sig. Ibland används brottkriterier som att brott utvärderas vid 0,15 radianers vinkeländring, men detta är sedan mycket svårt att omsätta i praktiken.

I grövre jord, som silt och sand, ger de dränerade direkta skjuvförsöken friktionsvinklar som skiljer från de som uppmäts i triaxialförsök. Rowe (1969) har angivit att den friktionsvinkel som erhålls i direkta skjuvförsök förhåller sig till den som utvärderas i triaxialförsök som

$$\tan \phi'_{DIREKTSKJUVNING} = \tan \phi'_{PLANE STRAIN} \cos \phi'_{cv TRIAX}$$

vilket för friktionsvinkeln vid konstant volym, ϕ'_{cv} , ger

$$\sin \phi'_{cv TRIAX} = \tan \phi'_{cv DIREKTSKJUVNING}$$

Den senare relation har också uppmäts i försök på silt och sand i Sverige, (Börgesson 1981).

Resultaten från försök på silt, sand och grövre jord är också starkt beroende av lagringstätheten i provet och det är avsevärt lättare att skapa det önskade portalet och att hålla kontroll på detta i triaxialförsök. Direkta skjuvförsök på siltig och sandig jord bör därför i princip begränsas till ostörd lerig silt samt samt siltig och sandig lera. Odränerade dynamiska försök på grövre jord som silt och finsand utförs dock också för att bestämma jordens egenskaper vid cyklisk belastning med detta belastningsfall. Dessa resultat är också beroende av jordens spänningshistoria och avsättningsförhållanden och för naturligt avsatta jordar bör endast ostörda prover användas.

Det huvudsakliga användningsområdet för direkta skjuvförsök kan därmed summeras enligt tabell 1. Tabellen avser försök där belastningsfallet direkt skjuvning i horisontella glidytor skall simuleras eller då en medelskjuvhållfasthet skall provas.

Tabell 1: Huvudsakliga användningsområde för direkta skjuvförsök

Jordart	Odränerade försök	Dränerade försök	Cykliska försök
lera	X	X	X
silt	X		X
finsand			X
grövre jord			
organisk jord	X	X	X
varvig jord och jord med tunna skikt	X	X	X

3. DET DIREKTA SKJUVFÖRSÖKET

3.1 Allmänt

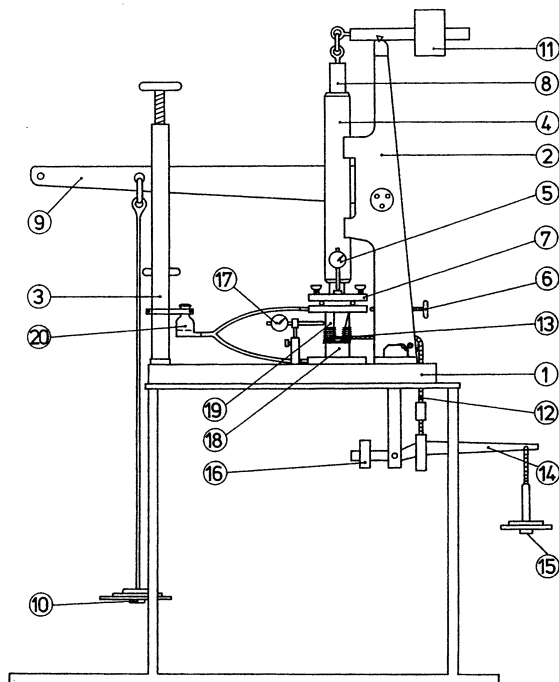
Det direkta skjuvförsöket, ”Direct Simple Shear test – DSS test”, introducerades i Sverige av Walter Kjellman, som konstruerade den första direkta skjuvapparaten på 1930-talet. En förenklad modell av denna apparat, SGI IV från 1950-talet, utgör en tillsatsutrustning i stativet för stegvisa ödometerförsök och är den utrustning som fortfarande normalt används i Sverige. Metoden fick sitt internationella genombrott när Norges Geotekniske Institutt (NGI) utvecklade en betydligt mer avancerad utrustning och började publicera forskningsresultat i stor skala. Denna version av utrustningen har flera namn, men vi känner den normalt som Geonor- eller NGI-apparaten. Utrustningen har sedan utvecklats vidare och används numera i stor utsträckning även för dynamiska försök.

Metoden är spridd över hela världen, men användningen varierar lokalt. Den enklare svenska utrustningen finns på ett antal laboratorier runt om i landet och också på några ställen i de nordiska grannländerna. Den mer avancerade norska utrustningen finns på ett stort antal universitet och på många större laboratorier runt om i världen, men priset för inköp och handhavande av denna utrustning har hittills gjort att den sällan återfinns på mindre företag. Ytterligare ett antal utrustningar har konstruerats och tillverkats i enstaka exemplar, främst vid universitet.

3.2 Den direkta skjuvapparaten

3.2.1 Den enkla apparaten

Den enkla skjuvapparaten består av ett stativ för utförande av stegvisa ödometerförsök med tillsatsutrustning för utförande av skjuvförsök. Tillsatsutrustningen består av en provhållare med över- och underdel, en vattenbehållare, en planslipad stämpelplatta, en kulvagn, gummi-membran, klämringar och ett antal tunna stödringar för att hålla provdiametern konstant. Dessutom finns anordningar för påförande och registrering av horisontallast och horisontaldeformation, se. Fig. 2.



- | | |
|-----------------------------|----------------------------|
| 1. Bottenplatta | 12. Kedja |
| 2. Ståndare | 13. Skjuvvarm |
| 3. Hållare för låsskrivar | 14. Hävarm för skjuvkraft |
| 4. Styrhysla | 15. Vikthållare |
| 5. Indikatoroklocka | 16. Motvikt |
| 6. Låsskruv | 17. Indikatoroklocka |
| 7. Stämpelplatta | 18. Provhållare, undre del |
| 8. Stämpelskaft | 19. Provhållare, övre del |
| 9. Hävarm till tryckstämpel | 20. Vattenflaska |
| 10. Vikthållare | |
| 11. Motvikt | |

Fig. 2a.

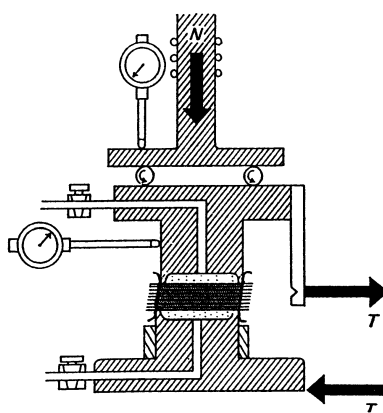
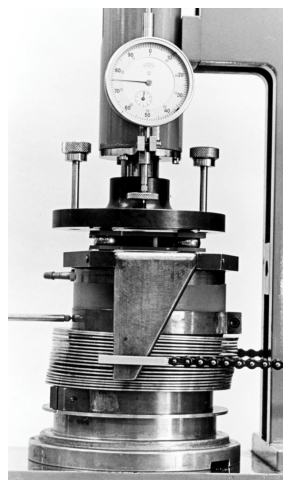
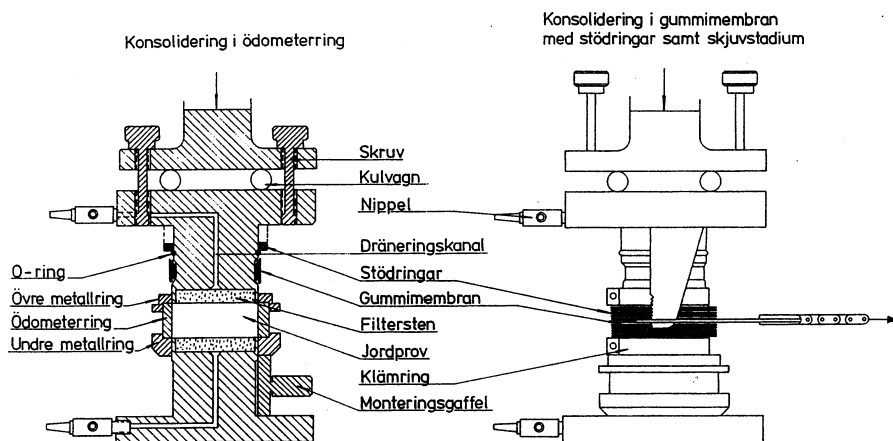


Fig. 2b.

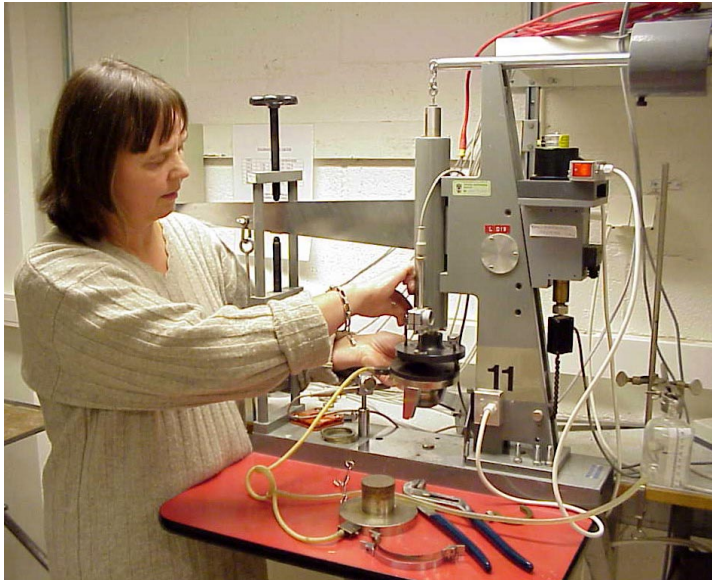


Fig. 2c.

Fig. 2. Enkel modell av direkt skjuvapparat, typ SGI IV.

- a) **översikt av apparaturen**
- b) **detaljer av tillsatsutrustningen för skjuvförsök**
- c) **förberedelse av skjuvapparat med elektrisk motor för applicering av skjuvkraft och givare för automatisk dataregistrering**

För montering och konsolidering av proverna i apparaten finns också extra utrustning i form av vanliga ödometerringar och olika stödanordningar.

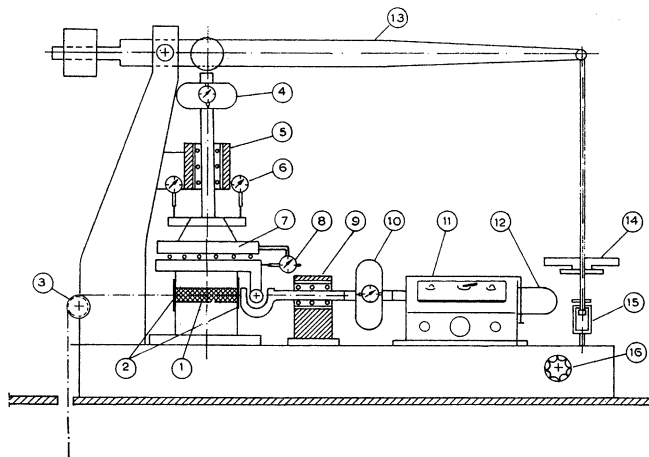
Den vertikala lasten läggs på med hjälp av vikter på en momentarm och vertikaldeformationen mäts med indikatorlocka eller en elektrisk lägesgivare. Vid utförande av odränerade försök stängs dräneringsledningarna och provhöjden låses innan skjuvningen startas. Vid dränerade försök behålls dräneringsledningarna öppna och provhöjden får utvecklas fritt under skjuvningens gång. Skjuvspänningen kan läggas på stegvis med vikter på en momentarm kopplad till en draganordning. Numera utförs försöken ofta med hjälp av en elektrisk motor som skapar en kontinuerlig skjuvning med konstant deformationshastighet samtidigt som skjuvkraften registreras med en elektrisk kraftgivare. Toppstyckets horisontella rörelse registreras med en indikatorlocka eller en elektrisk lägesgivare. Ett manuellt utförande med stegvis pålastning och registrering är relativt arbetsintensivt medan utrustningen för automatisk pålastning och registrering är dyrare i inköp men avsevärt mindre arbetskrävande. Det senare förfarandet möjliggör också en förbättrad utvärdering eftersom de uppmätta spänningsdeformationssambanden är mer kontinuerliga.

Utrustningen är i sitt standardutförande avsedd för prover med 50 mm diameter, vanligen tagna med standardkolvborr. Specialversioner med provdiametrar på 100 mm för främst torvprover tagna med speciell torvprovtagare finns också.

Den lägsta vertikalspänning som normalt kan användas vid försöken är 20 kPa, beroende på egenvikten hos toppstycket och rullagret.

3.2.2 Den avancerade utrustningen

Den avancerade skjuvapparaten är i princip uppbyggd på samma sätt. Den är dock konstruerad speciellt för direkta skjuvförsök och försedd med detaljer som möjliggör utförande av mer avancerade försök och mätningar, Fig. 3.



- | | |
|--|--|
| 1 Jordprov | 9 Kulbussning |
| 2 Armerat gummimembran | 10 Kraftmätare för horisontalkraft |
| 3 Anordning för horisontallast från vikter | 11 Växellåda |
| 4 Kraftmätare för vertikallast | 12 Utbytbar elektrisk motor |
| 5 Kulbussning | 13 Momentarm |
| 6 Mätare för vertikalförändring | 14 Vikter |
| 7 Stämpelplatta med rullager | 15 -16 Lås- och regleringsutrustning för försök med konstant volym |
| 8 Mätare för horisontalförändring | |

Fig. 3. Avancerad utrustning för direkta skjuvförsök typ Geonor.

I denna utrustning har gummihuden och de lösa ringarna runt provet ersatts med ett speciellt spiralarterat gummimembran. Spiralarteringen består av en tunn koppartråd som i täta varv gjutits in i gummimembranet. Detta medför en förbättrad kontroll av att provets tvärsnittsytta hålls konstant under försöket. Som en extra option kan det elektriska ledningsmotståndet i koppartråden också kalibreras mot det inre trycket i membranet (egentligen dragspänningen i tråden). På detta vis kan den genomsnittliga horisontalspänningen i provet mätas under konsolidering och försöksutförande.

Vid odränerade försök är inte provhöjden mekaniskt låst under skjuvningsfasen utan den vertikala kraften justeras normalt kontinuerligt för att motverka tendenser till kompression eller dilatans hos provet. Denna förändring i vertikalspänningen, $\Delta\sigma$, registreras kontinuerligt, och på detta vis erhålls ett indirekt mått på den portrycksförändring, Δu , som skulle uppträda under försöket om provet varit fullständigt vattenmättat och odränerat och den totala vertikallasten varit konstant. Portrycksförändringen beräknas som $\Delta u = -\Delta\sigma$. Jämförande försök med bibehållen konstant vertikallast och portrycksmätning har visat att resultaten blir likvärdiga (Dyvik et al. 1987). Den senare metoden kan därmed också användas som ett alternativ.

Försöket kan utföras med stegvis pålastning och manuell kontroll. Numera sker dock skjuvförsöket oftast med konstant deformationshastighet, elektronisk registrering av försöksdata samt automatisk justering av vertikallasten via en datastyrd elektrisk motor, Fig. 4.



Fig. 4. Geonor-utrustning med automatisk styrning och registrering på NGI .

Vid provning av material för vilka vidhäftningen mellan provet och filterstenarna i provets ändtor är otillräcklig för att överföra skjuvkraften till provet, kan filterstenarna förses med piggår för att förbättra kraftöverföringen.

Utrustningen används också i stor utsträckning för dynamiska försök, speciellt på NGI. Den horisontella skjuvkraften läggs då på med en bestämd intensitet och får växla riktning med förutbestämd frekvens och antal lastcykler. Amplituden för lastväxlingarna kan vara konstant eller varieras för att simulera en viss typ av belastningssekvens. Också dessa försök kan utföras manuellt med mekaniska anordningar för lastväxling men är numera oftast helt datastyrd med hydraulisk eller pneumatisk styrning av horisontallasten.

De vanligaste provdiametrarna är 47,5 och 80 mm och proverna trimmas då normalt från större prover ned till dessa diametrar. Utrustningen har dock utvecklats vidare, Fig. 5, och tillverkas numera för flera olika provdiametrar mellan 50 och 114 mm.

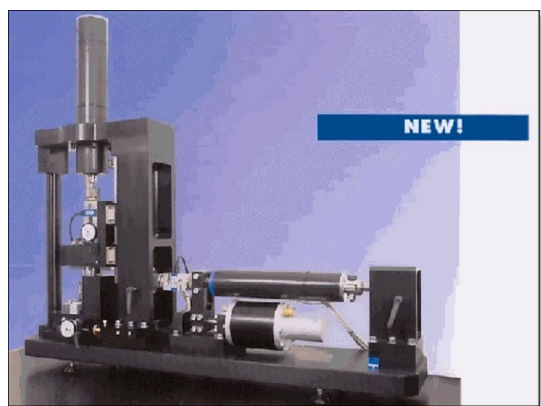


Fig. 5. Den senaste direkta skjuvapparaten från Geonor.

3.3 Försöksutförande

Före försöken vattenmättas normalt alla filter, kanaler och slangar. Speciellt för prover från mycket stora djup med stora negativa porvattentryck, som uppkommit i samband med provtagningen, kan det bli aktuellt att istället se till att filterstenarna är torra. Gummimembranet och eventuella ringar förbereds. Det ostörda provet trycks ut från provtuben och skärs av till önskad provhöjd, normalt 20 mm för 50 mm prover. Alternativt kan det trimmas ut från ett större prov med lämplig trimningsutrustning. Därefter flyttas det till att vila på filterstenen på provhållarens underdel och överdelen förs ned så att det kommer i kontakt med provet. I detta läge skall såväl över- som underdel vara låsta i sidled.

Prover som inte skall konsolideras för spänningar över förkonsolideringstrycket monteras direkt på filterstenen på provhållarens underdel utan någon ödometering. Om provet däremot skall konsolideras för högre spänningar än dess naturliga förkonsolideringstryck trycks det in i en fast ödometering, som vid ett vanligt ödometerförsök, varpå ändytorna skärs av och ringen med provet förs över till filterstenen på provhållarens underdel. Provhållarens överdel bringas sedan i kontakt med provet och detta konsolideras sedan med stegvis lastökning till ett tryck strax under det slutliga konsolideringstrycket. Därefter låses provhöjden och den fasta ödometeringen trycks ned över provhållarens underdel så att provets periferi friläggs.

Gummimembranet förs ned över provets sidor och tätas i över- och underkant med klämringar mot provhållarens över- och underdelar. Lösa stödringar förs ned på utsidan av gummimembranet och fixeras med inbördes lika avstånd med hjälp av distansbrickor. Den slutliga maximala lasten påförs sedan försiktigt, normalt i steg, och provet får konsolidera för denna. Den slutliga vertikallasten då det naturliga förkonsolideringstrycket inte skall överskridas brukar begränsas till cirka 85 % av detta. Annars riskerar man att den förnyade belastningen skall medföra en extra konsolidering, med ett lägre portal och en förhöjd fasthet som följd. Distansbrickorna avlägsnas så fort horisontaltrycket är tillräckligt stort för att stödringarna skall vara fixerade.

För den avancerade apparaturen används en speciell monteringsutrustning för att direkt vid monteringen föra in provet i det armerade gummimembranet. I övrigt är konsolideringsproceduren i princip densamma.

Efter konsolideringen för den påförda maximala lasten avlastas proverna till vertikaltrycket in situ eller den spänning som på andra kriterier valts ut att utgöra det effektiva vertikaltrycket vid försökets start. Provet ges sedan tid för att svälla och anpassa sig till detta vertikaltryck. Efter avslutad konsolideringsfas tas låsningen av provhållarens övre, horisontellt rörliga del bort och mätutrustningen för horisontalrörelser anbringas.

Vid **odränerade skjuvförsök** i den enkla apparaturen stängs sedan kranarna och provhöjden låses. I den mer avancerade utrustningen förblir dräneringsledningarna öppna och reglering av vertikaltrycket för att bibehålla konstant provhöjd förbereds. Skjuvspänningen kan sedan läggas på. Detta görs vid manuella försök normalt genom att laststeg som motsvarar cirka 10 % av den beräknade brottpåkänningen läggs på upp till halva denna spänning. Varje laststeg får verka i 30 minuter. Laststegen halveras därefter men får verka under 15 minuter. Eftersom brottpåkänningen är svår att uppskatta på förhand väljs enligt svensk standard laststeg som motsvarar 5 % av den vertikala konsolideringsspänningen upp till en horisontalrörelse av 0,025 radianer, vilken sedan halveras. Belastningstiderna motsvarar de ovan nämnda.

Horisontal deformationen under varje laststeg läses efter en tidskala och deformationen vid slutet av varje laststeg plottas mot skjuvspänningen. I den avancerade utrustningen regleras vertikallasten kontinuerligt så att ingen vertikalrörelse uppstår och vertikallasten avläses samtidigt med horisontalrörelsen.

Vid automatiserade försök kopplas registreringsutrustningen in och vid avancerade försök också den automatiska regleringen av vertikaltrycket. Den elektriska motorn för skjuvkraftspåläggning startas och provet skjuvas med en konstant deformationshastighet samtidigt som skjuvkraft, horisontalrörelse och eventuellt vertikalkraft registreras. Deformationshastigheten skall enligt svensk standard vara 2 mm/dygn.

Dränerade försök utförs på så sätt att i den enkla apparaturen förblir dräneringsledningarna öppna och provhöjden olåst och i den avancerade utrustningen sker ingen reglering av vertikaltrycket. Det effektiva vertikaltrycket skall därmed förbli konstant och provhöjden får utvecklas fritt allteftersom provets volym tenderar att ändras. Skjuvningen utförs på samma sätt som för de odränerade försöken men med registrering av skjuvkraft, horisontalrörelse och vertikaldeformation. För att tillförsäkra fullständig dränering används normalt en mindre provhöjd.

Vid **cykliska försök** ersätts den successivt ökande skjuvspänningen respektive den konstanta deformationshastigheten med växlande lastcykler med bestämd vågform, amplitud och antal. Lastcyklerna kan bestå av lika stora lastväxlingar åt båda sidor om ett neutralläge eller utgå från en viss skjuvspänning och växla i förhållande till denna. Alternativt kan man simulera typiska lastcykler för en vågbelastning vid storm eller accelerationskrafter vid en jordbävning genom att variera amplitud och antal cykler efter ett bestämt schema. Försöken får pågå tills man kan konstatera att provet är stabilt för den påverkan det utsätts för eller att man väl passerat den gräns där portrycken börjar stiga (vertikallasten måste minskas) dramatiskt och såväl deformationerna inom lastcykeln som de ackumulerade kvarstående deformationerna ökar på motsvarande sätt.

3.4 Försöksresultat, uppritning och utvärdering av parametrar

3.4.1 Odränerade försök

Ur de odränerade skjuvförsöken erhålls parametrarna skjuvkraft och horisontalrörelse som basdata. Ur skjuvkraften beräknas skjuvspänningen, τ , som kvoten mellan skjuvkraften och provets tvärsnittsarea. Skjuvdeformationen, γ , beräknas ur horisontalrörelsen Δs och den konstanta provhöjden h under skjuvningsfasen som

$$\gamma = \arctan \frac{\Delta s}{h}, \quad \text{radianer}$$

Skjuvspänningen plottas mot skjuvdeformationen och den odränerade skjuvhållfastheten, τ_{lu} , utvärderas som den maximala skjuvspänningen, Fig. 6. Normalt erhålls brott inom 0,15 radianers skjuvdeformation, där försöken oftast avslutas. Vid mycket låga hållfastheter i lera kan

man få en flytspänning vid relativt små deformationer och sedan en svagt ökande skjuvspänning för ytterligare deformationer. Detta kan bero på att dragspänningar i gummimembranet, som man normalt bortser ifrån, spelar in. Skjuvhållfastheten utvärderas då vid flytspänningen, Fig. 7.

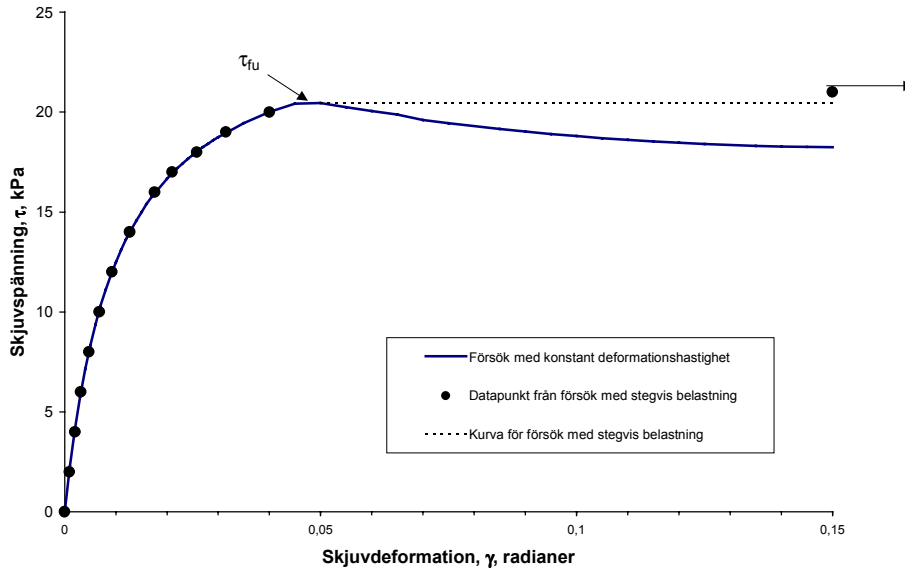


Fig. 6. Upprättning av ett odränerat direkt skjuvförsök och utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet, τ_{fu} .

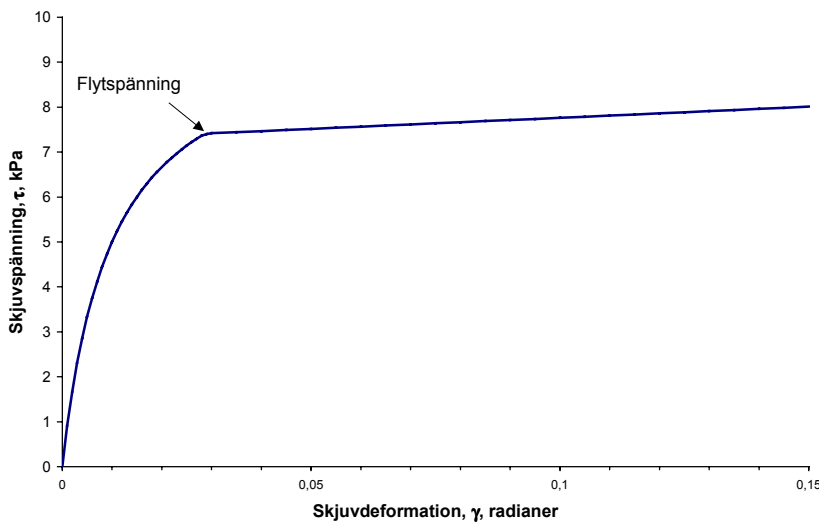


Fig. 7. Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet i lera vid markant flytspänning utan efterföljande brott.

I silt kan man få en motsvarande kurva, men med en mer markant ökande skjuvspänning efter flytningen. Detta beror dock på jordens uppträdande och här utvärderas såväl flytspänning som efterföljande brottspänning, Fig. 8.

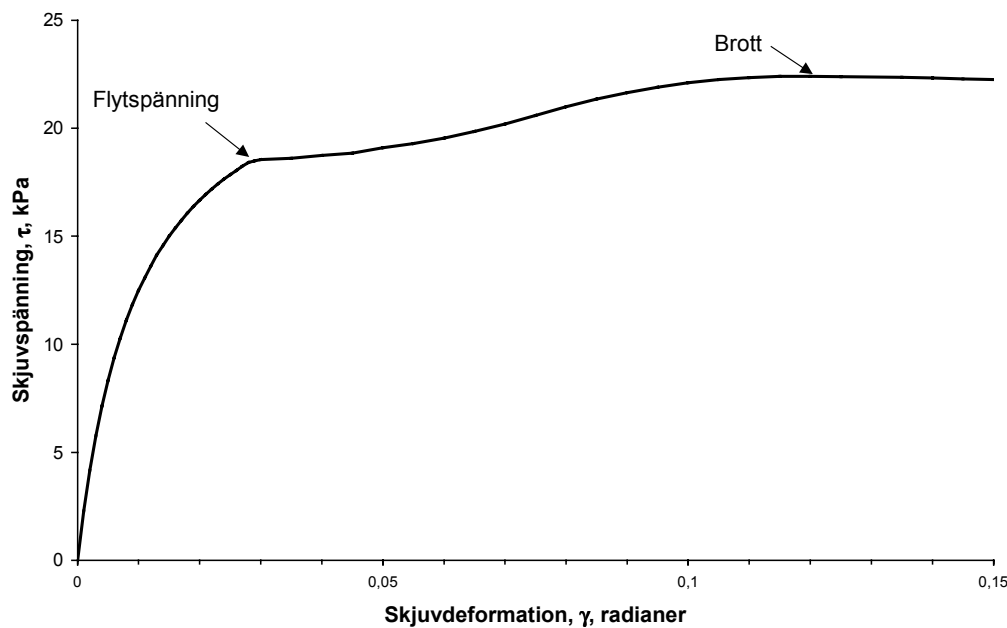


Fig. 8. Utvärdering av flytspänning och brott i silt.

För mycket seiga brott kan skjuvningen utsträckas något längre, brott utvärderas vid 0,15 radianers deformation eller ur kurvans extrapolerade form. Skillnaden mellan de olika utvärderingarna är normalt utan större praktisk betydelse, men utvärderingskriteriet måste anges. Enligt svensk standard utvärderas brott vid 0,15 radianers vinkeländring om inget brott inträffat dessförinnan. Det bör dock i samtliga dessa fall observeras att mycket stora skjuvdeformationer erfordras för att mobilisera den utvärderade skjuvhållfastheten. Dessa kan ofta inte accepteras vid dimensionering av konstruktioner eller då jorden skall samverka med andra material.

Då flera försök utförts på samma material redovisas den odränerade skjuvhållfastheten ofta mot konsolideringsspänningen. Det skall då observeras att sambandet mellan dessa parametrar förändras vid förkonsolideringstrycket, σ'_c . För spänningar vid eller över det naturliga förkonsolideringstrycket, dvs. då proverna vid skjuvförsökets start är normalkonsoliderade för spänningstillståndet i försöket och överkonsolideringsgraden $OCR = 1$, råder oftast ett linjärt samband mellan konsolideringstryck, σ'_c , och odränerad skjuvhållfasthet, τ_{iu} , Fig. 9,

$$\tau_{fu} = a \sigma'_c \quad OCR = 1$$

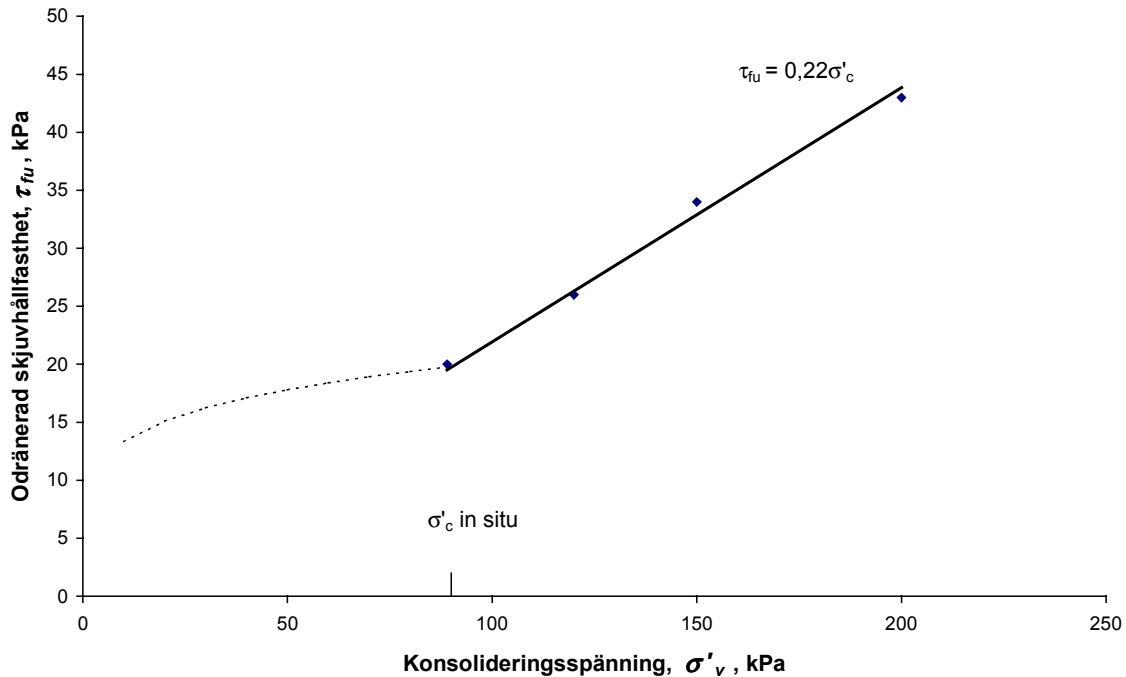


Fig. 9. Relation mellan odränerad skjuvhållfasthet och konsolideringsspänning i normalkonsoliderad jord.

Parametern a är en materialfaktor som ofta uppskattas empiriskt men kan kalibreras på detta vis. Den används bland annat för att uppskatta hållfasthetstillväxten under bankar och andra belastningar efter konsolidering för påförd last. För mycket lös jord, där belastningen medför mycket stor kompression och att förkonsolideringstrycket mångdubblas, dvs främst organisk jord, kan faktorn a minska något med ökande konsolideringsspänningar.

För spänningar under förkonsolideringstrycket, dvs $OCR > 1$, följer den odränerade skjuvhållfastheten normalt sambandet

$$\tau_{fu} = a \sigma'_v OCR^b = a \sigma'_c OCR^{b-1}$$

där σ'_v är det rådande effektiva vertikalktrycket vid skjuvningens start, Fig. 10.

Faktorn b , som normalt är i storleken 0,8, är liksom a en materialparameter vilken kan kalibreras genom ett antal direkta skjuvförsök på prover av den aktuella jorden som konsoliderats för olika spänningstillstånd. Resultaten plottas som kvoten τ_{fu}/σ'_v mot OCR i ett dubbellogaritmiskt diagram och därefter utförs en linjär regression för sambandet, Fig.11.

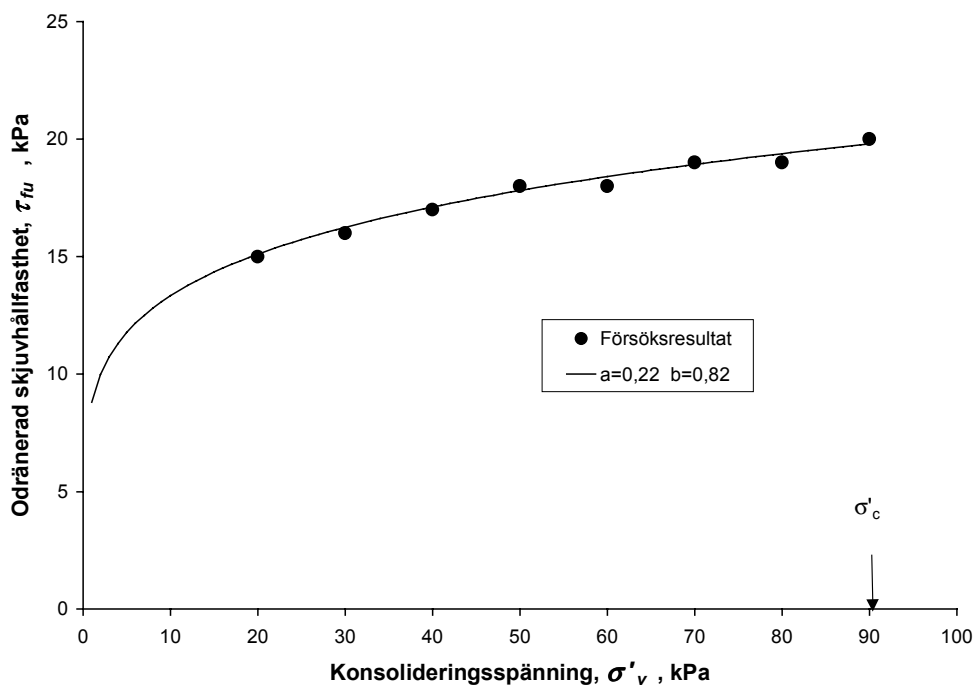


Fig. 10. Relation mellan odränerad skjuvhållfasthet, konsolideringsspänning och överkonsolideringsgrad.

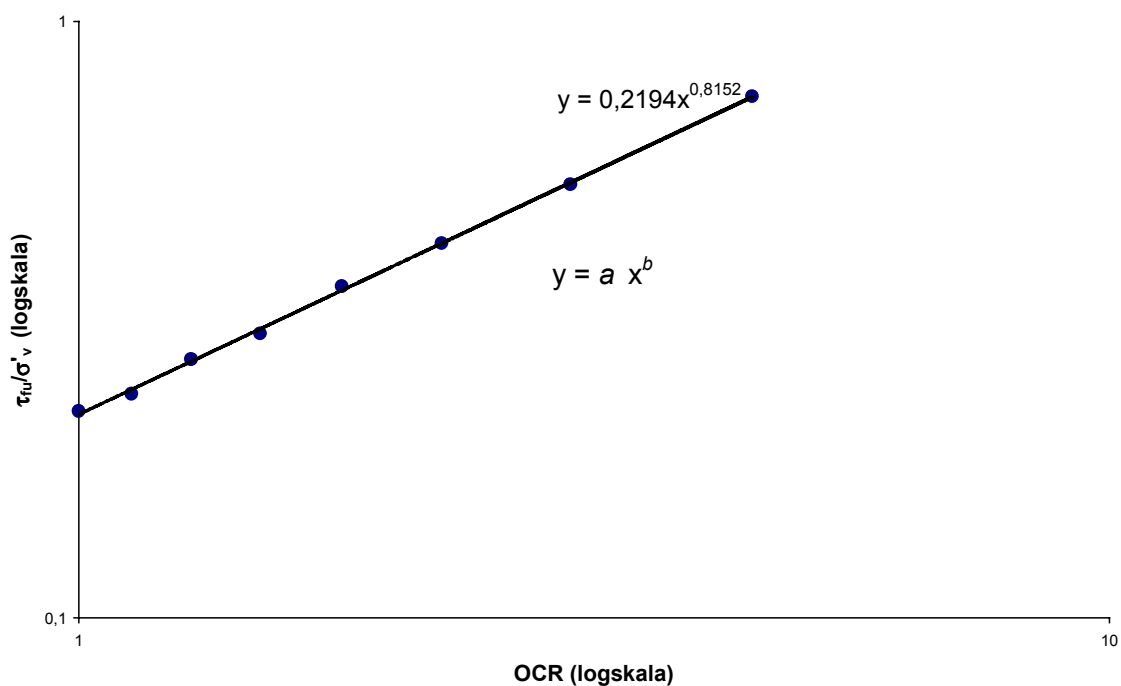


Fig. 11. Upprättning av resultat från odränerade direkta skjuvförsök för utvärdering av parametrarna a och b.

Det uppritade sambandet mellan skjuvspänning τ och skjuvdeformation γ kan användas för att utvärdera skjuvmodulen G och dess variation med deformationen.

Denna kan utvärderas enligt Fig. 12 som tangentmodulen

$$G = \delta\tau / \delta\gamma$$

eller som sekantmodulen

$$G = \Delta\tau / \Delta\gamma$$

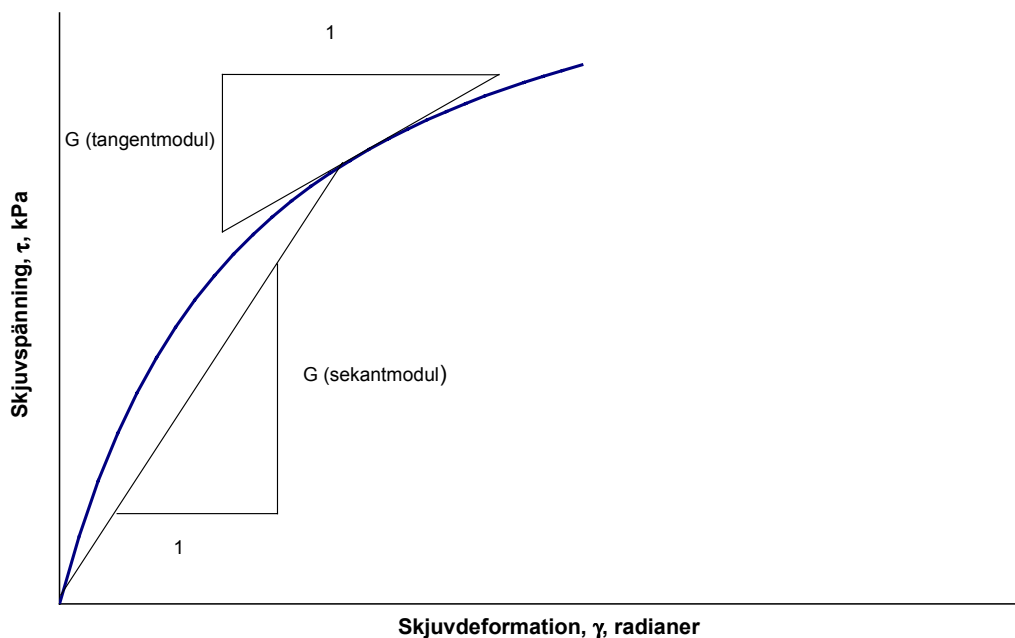


Fig. 12. Utvärdering av tangentmodul och sekantmodul.

Dessa värden kan i sin tur plottas mot skjuvspänning eller skjuvdeformation upp till strax innan brott. Sambanden kan också tillpassas för en så god beskrivning som möjligt med någon av de vanliga använda modellerna, t.ex. hyperboliskt eller modifierat hyperboliskt samband, Fig. 13.

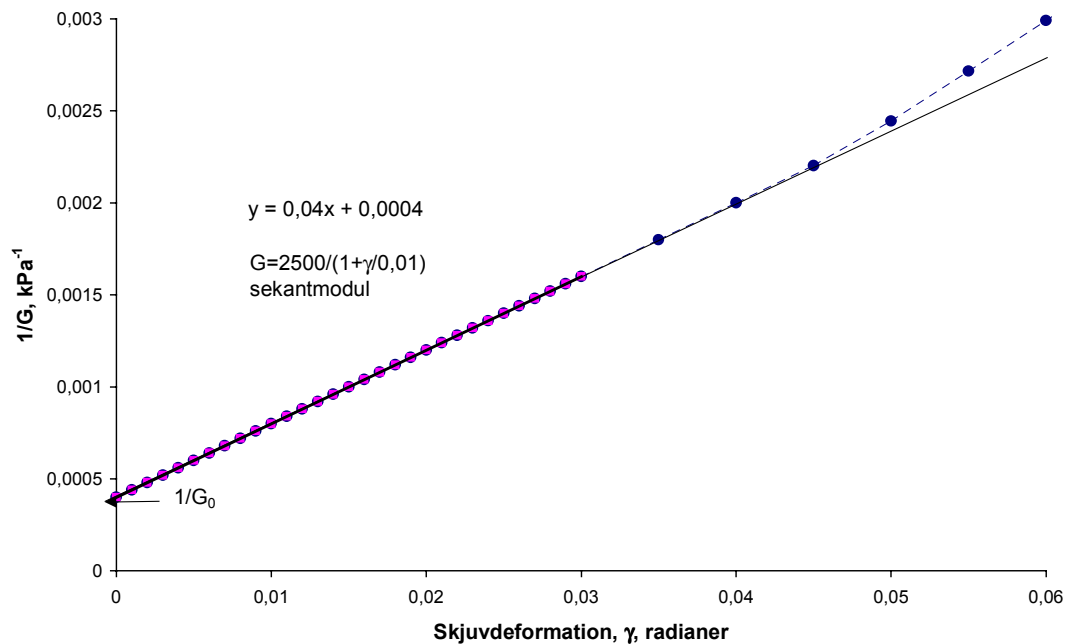


Fig. 13. Utvärdering av parametrar i ett hyperboliskt samband för skjuvmodulen.

Uppritning och utvärdering av mer avancerade odränerade försök kan göras på motsvarande sätt med tillägg av att den utvärderade portrycksförändringen också uppritas. Resultaten från de olika utrustningarna är så långt ungefär likvärdiga. Utvärderingar i form av effektiva spänningar, effektiva spänningsvägar och effektiva brottparametrar beskrivs inte här. Denna form av utvärdering är delvis omstridd och någon consensus om hur detta bör göras finns inte. Någon svensk erfarenhet på området finns inte heller eftersom denna nästan helt bygger på den enkla försöksutrustningen. De utvärderingsmetoder som presenterats ovan är dock inte direkt omstridda och det är allmänt accepterat att försöket med denna utvärdering ger värden som kan användas direkt för stabilitetsberäkningar. Försöket motsvarar främst fallet med odränerad skjuvning utefter horisontella glidytor, men det är också den metod som ger den mest representativa hållfastheten för hela glidytan under bankar på plan mark, (t.ex. Zdrakovic et al. 2002).

3.4.2 Dränerade försök

Resultaten från dränerade försök presenteras på motsvarande sätt som för odränerade försök med tillägg av en kurva för sambandet mellan skjuvdeformation och volymändring (relativ höjdändring), Fig. 14. Vid beräkning av skjuvdeformationen beaktas att provhöjden förändras under försökets gång.

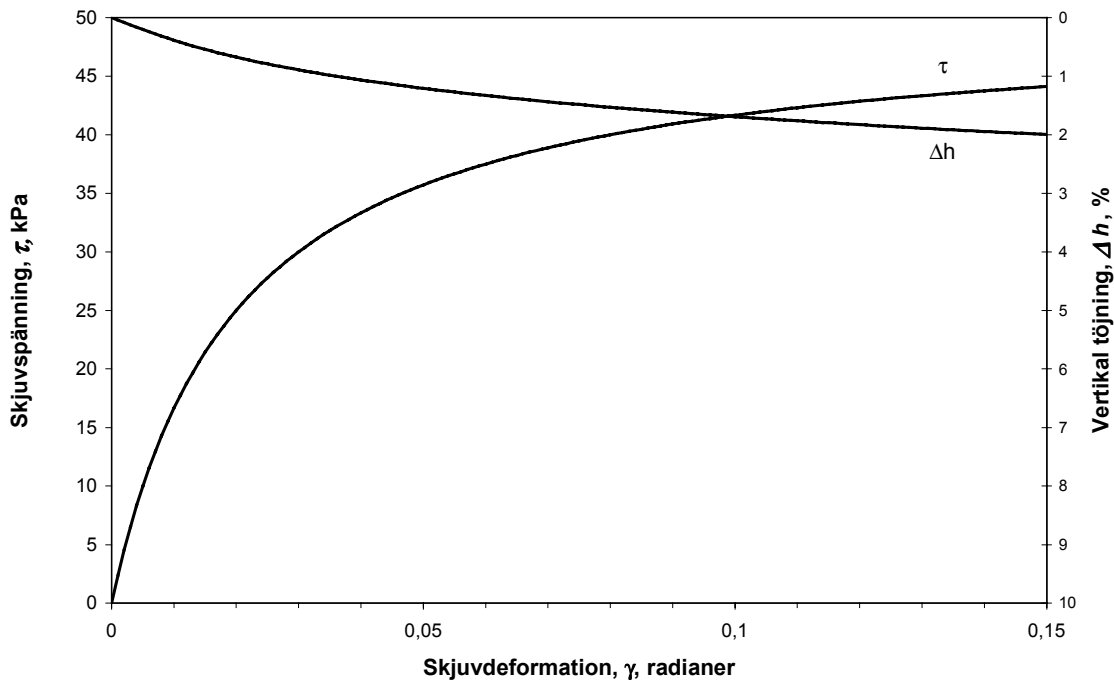


Fig. 14. Uppritning av resultat från ett dränerat direkt skjuvförsök.

Den dränerade skjuvhållfastheten utvärderas också på motsvarande sätt som för odränerade försök, men det skall observeras att något verkligt brott normalt inte inträffar för kompressibel jord om inte överkonsolideringsgraden är minst 2. För jord med lägre överkonsolideringsgrad blir det alltid någon form av deformationskriterium som avgör viken hållfasthet som utvärderas. Enligt svensk standard är detta kriterium 0,15 radianers vinkeländring. Ett sätt att utvärdera den slutliga hållfasthet som kurvan asymptotiskt närmar sig med ökande deformationer är att studera de dilatans-kontraktanseffekter som uppstår under försöket. Dessa kan uttryckas som vinkeln α mellan horisontalplanet och rörelseriktningen vid provets överyta.

$$\alpha = \arctan \frac{\delta h}{\delta s}, ^\circ$$

där α = kontraktansvinkel (tangentvinkel), $^\circ$

δs = momentan skjuvrörelse, mm

δh = momentan höjdändring, mm där kompression räknas som positivt

Denna kontraktansvinkel adderas till den samtidigt mobiliserade friktionsvinkeln ϕ'_{mob} .

$$\phi'_{mob} = \arctan \frac{\tau}{\sigma'_v}$$

där τ = mobiliserad skjuvspänning

σ'_v = pålagd vertikalspänning

Efter en inledande elastisk deformation hos provet blir summan $\phi'_{mob} + \alpha$ ett konstant värde, vilket också är det slutvärde ϕ'_{cv} som den mobiliserade skjuvspänningen går mot vid mycket stora skjuvdeformationer, då värdet av α samtidigt går mot noll och provet uppnår kritisk lagring, Fig. 15.

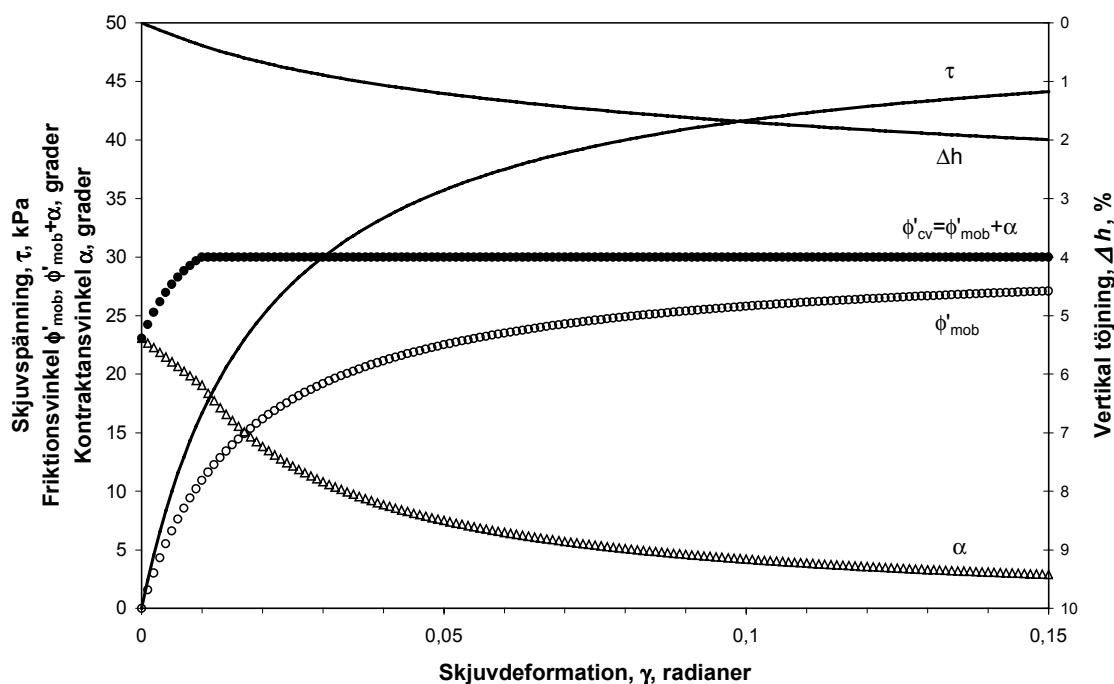


Fig. 15. Utvärdering av friktionsvinkel vid kritisk lagring.

Resultaten från dränerade direkta skjuvförsök kan sammanställas mot konsolideringsspänningen i försöket. I en sådan sammanställning bör observeras att sambandet mellan skjuvspänningen och det effektiva normaltrycket är krökt. Resultat från dilatanta prover, där ett verkligt skjuvbrott inträffat under försöket, och kontraktanta prover, där brott utvärderats efter ett deformationskriterium skall inte blandas. Detta resulterar i orimliga värden på friktionsvinklar och effektiv kohesion. För kontraktanta prover bör därför även värden på friktionsvinkeln vid kritisk lagring, ϕ'_{cv} ; redovisas. Alla värden under denna vinkel är ett mått på jordens kompressionsegenskaper snarare än dess hållfasthetsegenskaper. I Fig. 16 illustreras resultat från dränerade direkta skjuvförsök på ett material med ett naturligt förkonsolideringstryck omkring 120 kPa. Vid låga spänningar, där skjuvbrott inträffar under försöket, kan skjuvhållfastheten uttryckas som friktionsvinkeln vid konstant volym plus ett visst kohesionsintercept, som är ett mått på hur provet dilaterat under försöket. Vid högre spänningar utvärderas brottet vid 0,15 radianers vinkeländring och avståndet mellan denna ”brottlinjje” och linjen för den ur samma försök utvärderade friktionsvinkeln vid konstant volym är ett mått på hur kontraktant materialet uppträtt under försöket, ju kompressiblare jord desto större relativt avstånd.

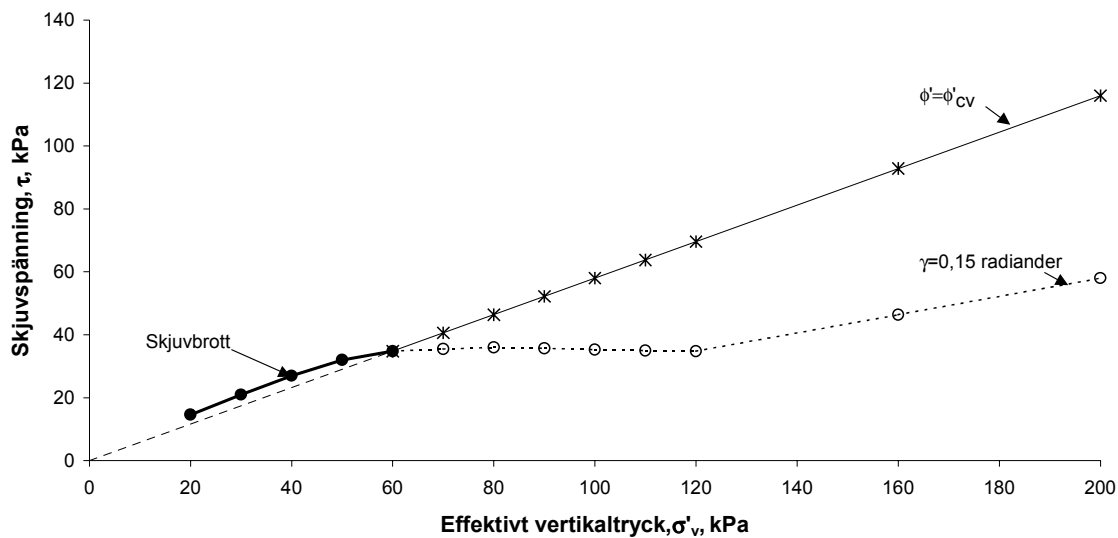


Fig. 16. Sammanställning av resultat från dränerade direkta skjuvförsök.

Inom det spänningsområde där verkligt skjuvbrott inträffar kan således hållfasthetegenskaperna uttryckas med parametrarna c' och ϕ' , Fig. 17. Det skall dock observeras att dessa parametrar endast gäller inom det spänningsområde för vilka de utvärderats och att för kompressibel jord är giltighetsområdet för utvärderingsmetoden och de utvärderade parametrarna mycket begränsade.

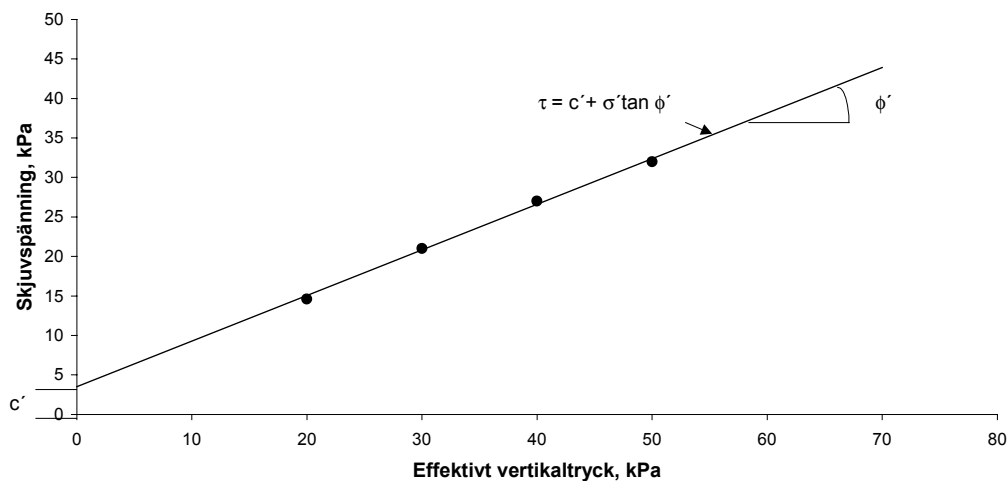
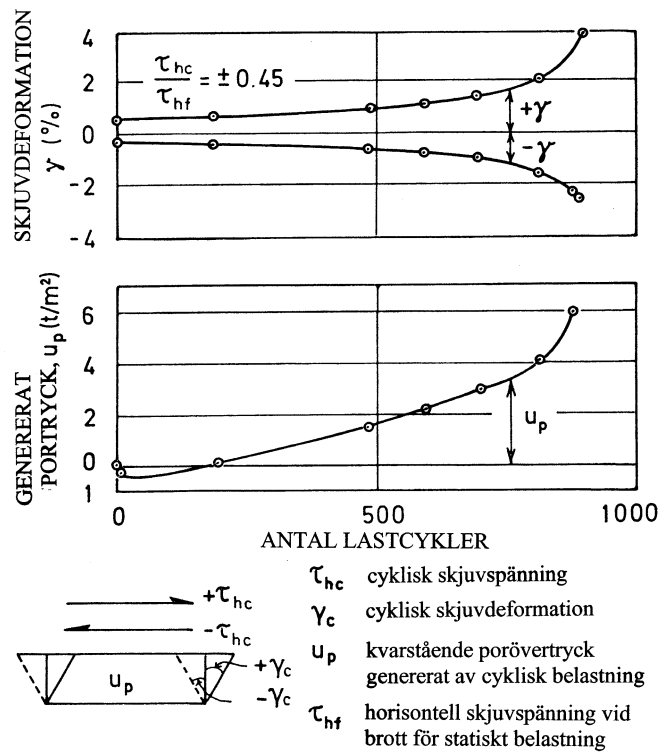


Fig. 17. Utvärdering av de effektiva skjuvhållfasthetsparametrarna c' och ϕ' .

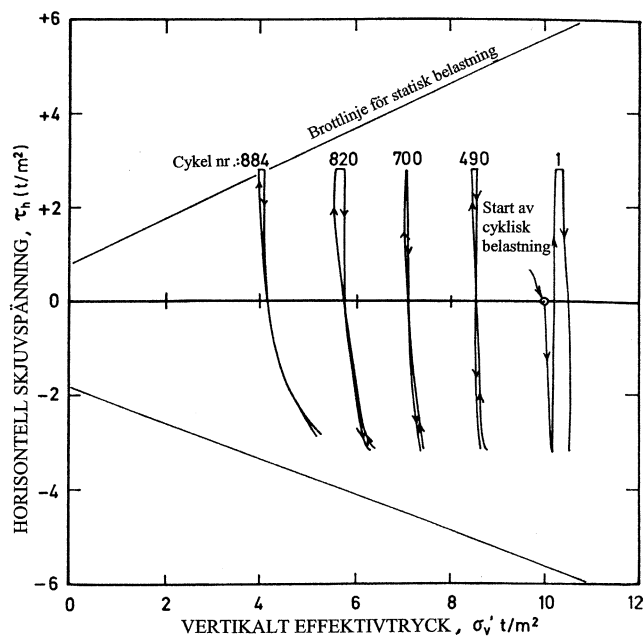
3.4.3 Cykliska försök

Resultaten från cykliska försök presenteras oftast som diagram för portrycksuppbyggnad och skjuvdeformationernas amplitud med antalet lastväxlingar. Om medelskjuvspänningen inte är noll utan lasten växlar runt en viss statisk skjuvspänning redovisas också oftast den ackumulerade permanenta skjuvdeformationen med antalet lastväxlingar. För att illustrera hur portrycksuppbyggnaden medför att provet successivt närmar sig brottspänningarna kan också de effektiva spänningarna i lastcyklerna ritas upp, vilket normalt görs för ett antal utvalda cykler. I Fig. 18 illustreras resultat från ett odränerat cykliskt direkt skjuvförsök med en växlande skjuvspänning av $\pm 45\%$ av brotthållfastheten. I de inledande cyklerna är skjuvdeformationerna små och provet uppträder dilatant så att portrycken minskar något. Allteftersom antalet lastcykler ökar och provets strukturella uppbyggnad bryts ned ökar såväl skjuvdeformationer som portryck. De ökande portrycken medför att det vertikala effektivtrycket minskar och spänningarna vid maximal skjuvspänning börjar närma sig brottlinjen. Både skjuvdeformationer och portryck ökar därmed allt hastigare och då brottlinjen tangeras uppstår brott i form av mycket stora deformationer.

Resultaten från flera olika försök kan sammanställas i modeller som visar hur jordens deformationer vid ett visst antal belastningscykler varierar med skjuvspänningsnivån i cyklerna, hur många cykler som jorden klarar utan att gå till brott vid olika skjuvspänningsnivåer etc.



a)



b)

Fig. 18. Resultat från odränerade cykliska direkta skjuvförsök (Efter Andersen et al. 1976)

- skjuvdeformation och portrycksuppbyggnad som funktion av antalet lastcykler
- effektiva spänningar i ett antal utvalda lastcykler

4. MER ATT LÄSA

- Andersen, K.H., Brown, S.F., Foss, I., Pool, J.H. och Rosenbrand, W.F. (1976).** Effect of Cyclic Loading on Clay Behaviour. Norges geotekniske institutt, Publikasjon Nr. 113, Oslo, reprinted from Proceedings of Conference on Design and Construction of Offshore Structures, London.
- Andersen, K.H., Kleven, A. och Heien, D. (1988).** Cyclic soil data for design of gravity structures. Norges geotekniske institutt, Publikasjon Nr. 175, Oslo, reprinted from ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 114, No. 5, p. 517-539.
- Bjerrum, L. och Landva, A. (1966).** Direct simple shear tests on a Norwegian Quick Clay. Norges geotekniske institutt, Publikasjon Nr 70, Oslo, reprinted from Geotechnique, Vol.16, No.1, p.1-20.
- Börgesson, L. (1981).** Mechanical properties of inorganic silt. Avhandling, Avdelningen för geoteknik, Luleå tekniska universitet, 1981:09D, Luleå.
- DeGroot, D.J., Ladd, C.C., Germaine, J.T. (1996).** Undrained multidirectional direct simple shear behaviour of cohesive soil. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122, No. 2, p. 91-98.
- Dyvik, R., Berre, T., Lacasse, S. och Raadim, B. (1987).** Comparison of truly undrained and constant volume direct simple shear tests. Norges geotekniske institutt, Publikasjon Nr. 170, Oslo, reprinted from Geotechnique, Vol. 37, p 3-10.
- Jamiolkowski, M., Ladd, C.C., Germaine, J.T. och Lancelotta, R. (1985).** New developments in field and laboratory testing of soils. Theme Lecture. Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Vol.1, pp. 57 – 153.
- Ladd, C.C. and Foott, R. (1974).** New design procedure for stability of soft clays. ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 100, No. GT7, pp. 763-786.
- Larsson, R. (1977).** Basic behaviour of Scandinavian soft clays. Statens geotekniska institut, Rapport Nr. 4, Linköping.
- Larsson, R. (1981).** Drained behaviour of Swedish clays. Statens geotekniska institut, Rapport Nr. 13, Linköping.
- Larsson, R. (1994).** Deformationsegenskaper i jord. Institutionen för geoteknik, Chalmers tekniska högskola, Rapport Nr. B 1994:6, Göteborg.
- Larsson, R., Bergdahl, U. och Eriksson, L. (1983).** Utvärdering av skjuvhållfasthet i kohesionsjord. Statens geotekniska institut, Information Nr. 3, Linköping.
- Rowe, P.W. (1969).** The relation between the shear strength of sands in triaxial compression, plane strain and direct shear. Geotechnique Vol. 19, No.1.
- Skredkommissionen (1995).** Anvisningar för släntstabilitetsutredningar. Skredkommissionen, Rapport 3:95, Linköping.
- Statens geotekniska institut (1949).** Redogörelse för Statens geotekniska instituts verksamhet under åren 1944-1948, Kapitel 5: Apparat för skärhållfasthetsbestämning. Statens geotekniska institut, Meddelande Nr.2, Stockholm.
- Svensk Standard SS 02 71 27 (1991).** Geotekniska provningsmetoder – Skjuvhållfasthet – Direkta skjuvförsök. Byggstandardiseringen. Stockholm.
- Wiesel, C.-E., Hansbo, S. och Broms, B. (i samarbete med SGF:s laboratoriekommitté) (1985).** Skjuvhållfasthet – Geotekniska laboratorieanvisningar, Del 9. Statens råd för byggnadsforskning, T2:1985, Stockholm

SGF Notat

1:2004 Packning och packningskontroll av blandkornig och finkornig jord

Svenska Geotekniska Föreningen (SGF) bildades 1950 och består av drygt 700 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 med föredrag, diskussioner och kommittéarbeten samt att samarbeta med svenska, nordiska och övriga internationella organ med liknande inriktning.

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

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