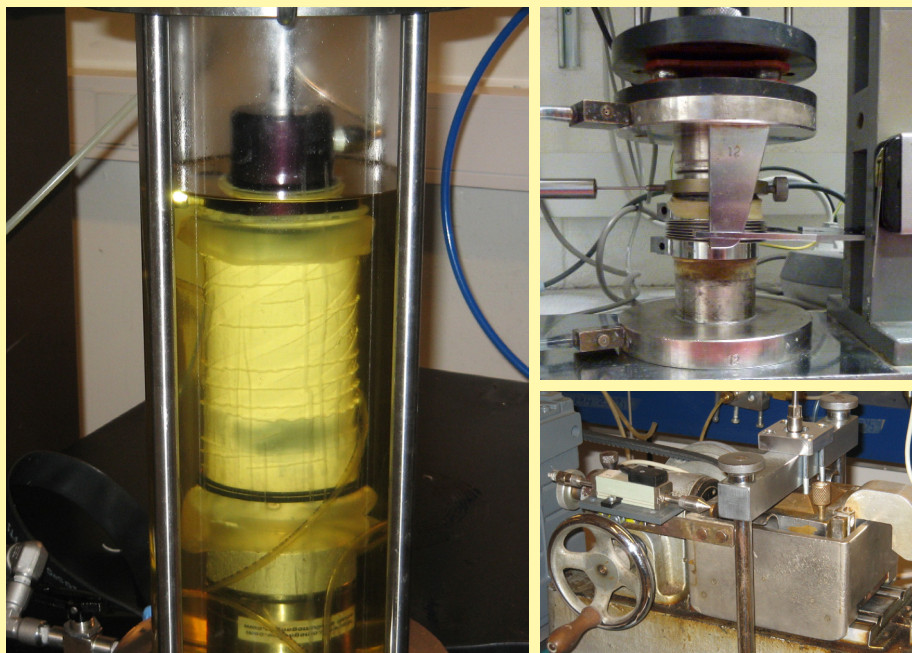




STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE



Bestämning av dränerad skjuvhållfasthet med olika laboratorieförsök

Varia 630

Rolf Larsson
Helen Åhnberg
Martin Holmén

LINKÖPING 2012

Varia	Statens geotekniska institut (SGI) 581 93 Linköping
Beställning	SGI – Informationstjänsten Tel: 013-20 18 04 Fax: 013-20 19 09 info@swedgeo.se www.swedgeo.se
ISSN	1100-6692
ISRN	SGI-VARIA--12/630--SE
Dnr SGI	1-0404-0294
Uppdragsnr SGI	12045

Foto omslag: SGI



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

Varia 630

Bestämning av dränerad skjuvhållfasthet med olika laboratorieförsök

Rolf Larsson
Helen Åhnberg
Martin Holmén

FÖRORD

Denna rapport vänder sig främst till geotekniska handläggare som skall beställa laboratorieförsök för bestämning av dränerade hållfasthetsparametrar i jord samt till dem som utför sådana försök. Den vänder sig också till dem som skall sammanställa och utnyttja befintliga resultat från olika typer av försök.

Rapporten har tagits fram inom ett internt projekt på Statens geotekniska institut. Den har granskats av Per-Evert Bengtsson.

Linköping i april 2012

Författarna

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD	4
1 BAKGRUND	6
2 FÖRSÖKSUTRUSTNINGAR FÖR BESTÄMNING AV DRÄNERAD SKJUVHÅLLFASTHET	7
2.1 Triaxialförsök.....	7
2.2 Plane-strainförsök.....	9
2.3 Direkta skjuvförsök.....	10
2.4 Skjuvboxförsök	11
2.5 Ringskjuvförsök.....	12
3 ALLMÄNT OM DRÄNERAD HÅLLFASTHET OCH OLIKA FÖRSÖK	13
3.1 Friktionsvinkel.....	13
3.2 Friktionens beståndsdelar	13
3.3 Allmänna samband	15
3.4 Friktion och kohesion.....	16
3.5 Förväntade relationer	17
4 UTFÖRDA FÖRSÖK	19
4.1 Jordmaterial i de jämförande försöken	19
4.2 Provpreparering och montering	20
4.3 Försöksutförande och resultat	23
4.3.1 Sand.....	23
4.3.2 Silt.....	28
4.3.3 Lera.....	36
5 SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER.....	43
6 REFERENSER.....	45

1 BAKGRUND

Den vanligaste metoden att bedöma den dränerade skjuvhållfastheten, friktionsvinkeln, för friktionsmaterial i deras naturliga tillstånd är genom utvärdering av sonderingsresultat, främst från CPT-sonderingar, eller empirisk bedömning med ledning av resultat från grövre sonderingsmetoder. I finkornigare material sker sonderingar helt eller delvis under odränerade förhållanden och dränerade fältförsök skulle ta mycket lång tid. I dessa material kan man dock ta ostörda prover och utföra laboratorieförsök, vilket också är det normala förfarandet.

Laboratorieförsök är också det normala provningsförfarandet när olika material skall undersökas med avseende på vilka egenskaper de får efter att ha lagts ut i fält eller karakteriseras med avseende på sin lämplighet för olika användningsområden. Detta gäller såväl naturliga material som grävts eller spolats upp och sedan lagts ut som fyllningar som konstgjorda granulära material. För bestämning av dränerade hållfasthetsegenskaper och då främst friktionsvinklar finns ett antal olika försöksmetoder, vilka dock sinsemellan ger olika resultat. I Sverige har i huvudsak använts triaxialförsök för friktionsjord, främst grovsilt – fingrus, och antingen triaxialförsök eller direkta skjuvförsök för finkornigare jord. Skjuvboxapparater finns endast på ett fåtal laboratorier och utrustningar för mer avancerade plain-strainförsök eller ringskjuvförsök finns endast på enstaka forskningslaboratorium. Skjuvboxförsök används dock i stor utsträckning utomlands och är det försök som jämte triaxialförsök omnämns som lämpligt för att bestämma friktionsvinklar i den nya standarden SS-EN 1997-2:2007 (SIS 2007). Skjuvboxförsök används också i viss utsträckning för mycket grova material vid t.ex. dammbyggnation. Material i sten- och blockstorlek gör att triaxialförsök inte kan användas av praktiska skäl medan mycket stora skjuvboxar kan byggas om så behövs. Eftersom den svenska erfarenheten av skjuvboxförsök är liten och kunskapen om hur resultaten från olika försök förhåller sig till varandra är begränsad, startade Statens geotekniska institut, SGI, en studie på initiativ av övering. Ulf Bergdahl. Denna studie omfattade jämförande dränerade försök i triaxialapparat, direkta skjuvförsök i vanlig SGI utrustning och skjuvboxförsök. Skjuvboxutrustningen ställdes till förfogande av Chalmers tekniska högskola. Försöken utfördes på tre typjordar; sand, silt och överkonsoliderad lera.

Många utrustningar används för olika typer av försök. Vad som behandlas i denna skrift avser endast vanliga försöksutföranden för att bestämma de dränerade egenskaperna i jord.

2 FÖRSÖKSUTRUSTNINGAR FÖR BESTÄMNING AV DRÄNERAD SKJUVHÅLLFASTHET

2.1 Triaxialförsök

Triaxialförsöket är ett mycket vanligt försök som används internationellt. Försöket används ofta som referensförsök vid olika kalibreringar och utvärderingsmetoder för t.ex. sonderingar. Det beskrivs i ett antal handböcker, (t.ex. Head 1998), och är standardiserat i bl.a. ISO/TS 17892-9:2004 (SIS 2004).

I det klassiska och mest använda aktiva triaxialförsöket innesluts ett vattenmättat cylindriskt prov i ett gummimembran. Provet placeras på en piedestal i en cell och på provet placeras en stämpel. Gummimembranet försluts mot piedestalen och stämpeln så att provet är tätt inneslutet. Porvattnet i provet sätts i förbindelse med ett dräneringssystem genom kanaler i piedestalen och eventuellt också toppstycket. Förbindelsen och dräneringen underlättas med hjälp av en filtersten mellan provet och piedestalen, och även mellan provet och stämpeln om dräneringsledningar går till den senare. I mycket finkornig jord, lera, används dessutom remsor av filterpapper placerade mellan provets utsida och gummimembranet och som överlappar filterstenen(arna).

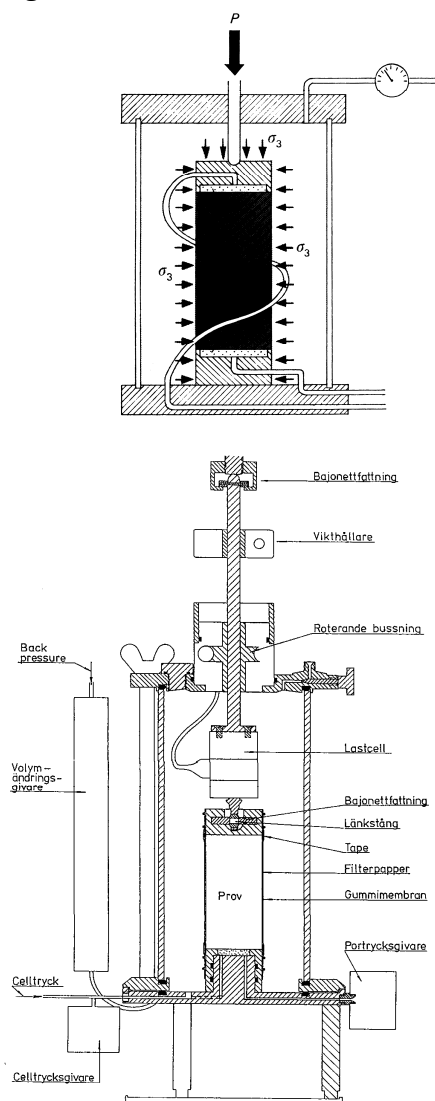


Fig. 1. Triaxialapparat (från SGI Information Nr. 8, Larsson 1989.)

Provet utsätts för ett allsidigt tryck i cellen samt eventuellt en axiell tillskottslast och får konsolidera för detta. Provets axiella längd registreras med en lägesgivare och volymförändringarna under konsolideringen mäts genom att man mäter den vattenmängd som strömmar ut eller in i provet under denna fas. Också porvattnet kan sättas under tryck och det effektiva tryck som provet konsoliderar för är skillnaden mellan celltryck och portryck. I den efterföljande skjuvningsfasen trycks provet ihop vertikalt samtidigt som celltryck och portryck hålls konstanta. Sammantryckningen görs så långsamt att inga signifikanta portrycksförändringar uppstår inne i provet och under denna fas mäts vertikalkraft, axiell deformation och volymförändring hos provet. Under konsolideringen och sammantryckningen ändras provets diameter. Denna ändring beräknas successivt ur ursprunglig provvolym, axiell kompression av provet och uppmätt volymförändring och antas vara lika i alla radiella riktningar och jämnt fördelad över provets längd.

Triaxialförsökets användningsområde begränsas praktiskt av att cellerna, och därmed proverna, inte kan göras hur stora som helst. Provdiametern skall helst vara minst 10 ggr största kornstorleken och de största kommersiellt tillgängliga cellerna kan därmed användas upp till fingrusfraktionen. Ännu större prover kan provas torra utan omgivande cell och med undertryck i porerna istället för celltryck. Detta är dock tryckmässigt begränsat till ett allsidigt tryck av 100 kPa (dvs. vakuum i porerna).

2.2 Plane-strainförsök

Ett plane-strainförsök utförs i princip på samma sätt som ett triaxialförsök. I detta fall har dock provet ett rektangulärt tvärsnitt och kortsidorna vilar mot stela plattor. Provet kan därmed bara deformeras i en riktning vinkelrätt mot den riktning i vilket tryckkraften verkar, dvs. plant töjningstillstånd, vilket ofta bättre motsvarar det aktuella fallet i fält. Apparaturen, provprepareringen och mätningarna är avsevärt mer komplicerade än i triaxialförsöket och bland annat måste sidofriktionen i ändytorna beaktas. En typ av plane-strainapparat finns beskriven i t.ex. SGI Rapport No.12 och Information Nr. 8 (Larsson 1981 och 1989).

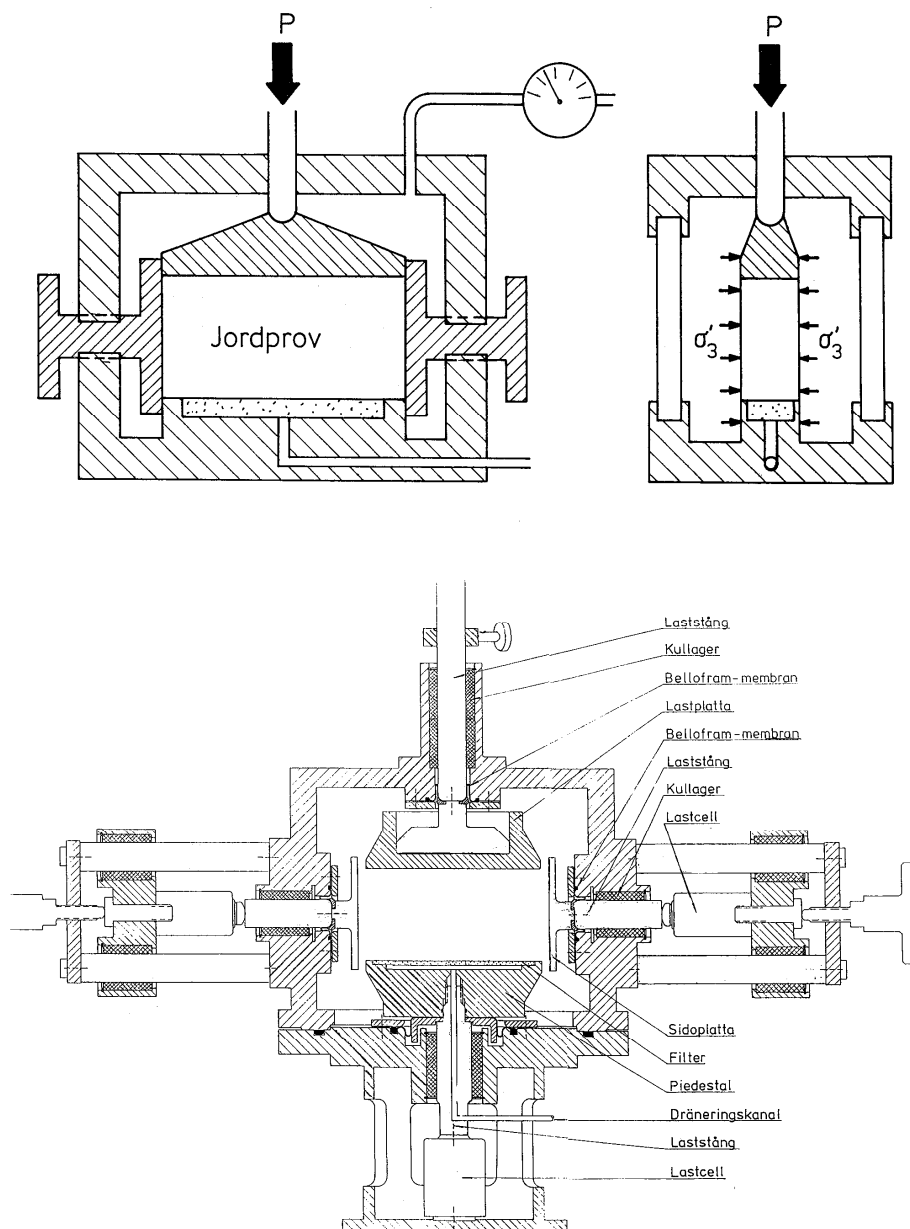


Fig. 2. Plane-strainapparat (från SGI Information Nr. 8, Larsson 1989)

2.3 Direkta skjuvförsök

I Sverige används mest den relativt enkla direkta skjuvapparat som togs fram av SGI i början av 1950-talet (Kjellman 1951). I försöket används samma stativ som samtidigt togs fram för stegvis belastade ödometerförsök. Istället för att ha provet inneslutet i en ring omsluts det av ett gummimembran som i sin tur omges av ett antal tunna metallringar. Ringarna ligger med små inbördes avstånd så att de inte kan överföra någon vertikalkraft men håller provets tvärsnitt konstant. Gummimembranet tätas mot över- och understämplarna och provet konsolideras för en vertikal last. Efter konsolidering skjuvas provet så långsamt att inga portrycksförändringar uppstår. Detta görs genom att den övre stämpln förskjuts horisontellt samtidigt som vertikallasten hålls konstant. Under skjuvningen mäts horisontalkraft samt vertikal och horisontell rörelse hos överstämpln. Skjuvkraften överförs till provet via friktion mellan detta och filterstenarna i stämplarna och under skjuvningen antas hela provkroppen undergå en jämn vinkelförändring. Provets tvärsnittsytta i skjuvriktningen förändras inte under försöket men vertikalkraftens angreppspunkt förskjuts, vilket torde medföra en successivt ojämnares spänningsfördelning.

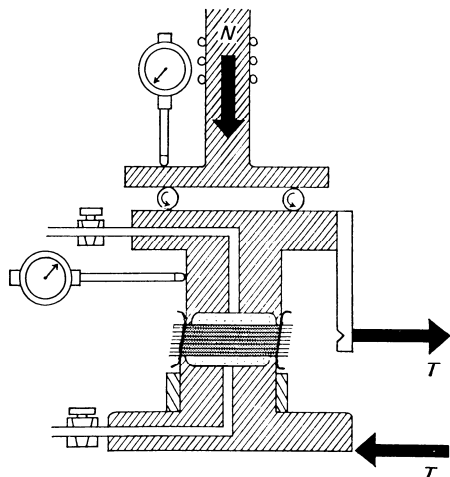


Fig. 3. Direkt skjuvapparat (från SGI Information Nr. 8, Larsson 1989)

Provstorleken är normalt 50 mm diameter och maximal höjd 20 mm, vilket begränsar användningsområdet till sand och finkornigare material. För försök på sand och grovsilt krävs dock speciella filterstenar med räfflad eller nålförsedd yta, vilket i praktiken normalt begränsar användbarheten till finsilt och lera. Även för fast lagrad finsilt och överkonsoliderad lera kan dock en nålförsedd yta vara att rekommendera. På SGI finns också en större modell av den enkla skjuvapparaten för försök på främst torv. Försöket är standardiserat i SS 27127 (SIS 1991).

En mer avancerad modell av denna utrustning med fler mät- och provningsmöjligheter har senare utvecklats av Norges Geotekniske Institutt (Bjerrum och Landva 1966). Denna används också av flera forskningslaboratorier runt om i världen. Dessa två typer av direkta skjuvförsök beskrivs mer detaljerat i SGF Notat 2:2004 (Larsson 2004). I notatet rekommenderas att triaxialförsök används för sand och silt istället för försök i den enklare skjuvapparaten.

Andra typer av avancerade direkta skjuvapparater har utvecklats vid främst engelska universitet, men användningen begränsas i stort till grundforskning.

2.4 Skjuvboxförsök

En skjuvbox består av två stela ihåliga ramar placerade på varandra. Hålet för provet har kvadratisk eller cirkulär form. Vid provmonteringen är halvorna fastskruvade i varandra. Östörda prover kan trimmas ut i rätt form och skjutas in i hålet medan störda prover fylls i och packas till önskad lagringstäthet. Över och under proven placeras porösa och räfflade plattor som skall hjälpa till med dränering och överföring av skjuvkrafter. På provet placeras sedan en tryckplatta som kan vara löst ledad eller styrd så att dess underyta alltid är horisontell. Boxen placeras i en behållare som kan fyllas med vatten så att vattenmättade prover inte torkar ut under försökets gång. Provet belastas med en vertikallast och får konsolidera för denna. Därefter lossas de skruvar som håller ihop boxens två delar och den övre halvan lyfts upp så att det bildas en spalt mellan boxhalvorna. Provet skjuvas sedan genom att den övre boxhalvan förskjuts i förhållande till den undre. Skjuvkrafterna överförs via tryckkrafter i boxhalvornas påskjutande respektive mothållande sidor och friktion mellan provet och halvornas innersidor samt mellanläggsplattorna. Skjuvningen antas ske i det horisontella planet i spalten mellan boxhalvorna. Tvärsnittsytan i skjuvplanet förändras successivt, vilket medför att såväl normalspänningen som skjuvspänningen ökar. Detta beaktas dock normalt inte vid utvärderingen (ETC5 1998).

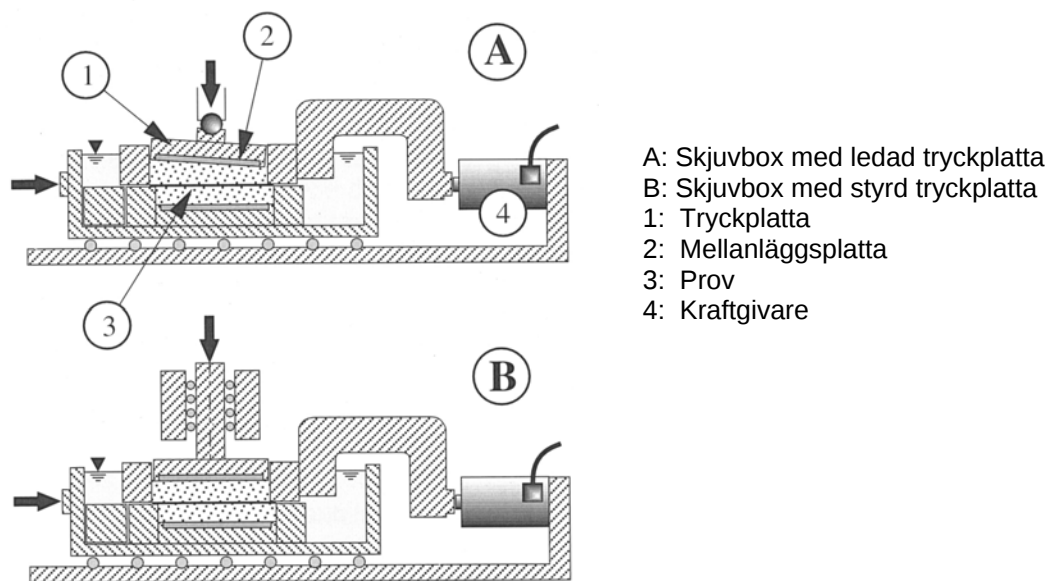


Fig. 4. Skjuvbox. (Efter ETC5 1998)

Skjuvboxförsök kan i princip endast utföras som dränerade försök. De kan utföras på helt torrt friktionsmaterial eller på vattenmättat material. I det senare fallet fylls den behållare som omger boxen med vatten för att förhindra att portrycksförändringar uppstår på grund av dilatation eller uttorkning under försöket.

Skjuvboxar finns i många olika storlekar som avpassas efter det material som skall provas. Vanliga skjuvboxar i laboratoriet har provstorlekar från runt 70 mm diameter eller 60x60 mm till upp till knappt 0,5x0,5 m i tvärsnitt. Stora skjuvboxar med flera meters

sida har dock byggts på plats i samband med stora dammkonstruktioner, se t.ex. Nguyen and Ihle (1980).

Enligt utländska erfarenheter kan försök med löst ledade respektive styrda tryckplattor ge mycket olika resultat (ETC5 1998).

2.5 Ringskjuvförsök

Ringskjuvförsöket kan ses som en variant av skjuvboxförsök med styrd tryckplatta. Skillnaden är att utrustningens två halvor är utformade som ihåliga ringar. Provets horisontella tvärsnittsyta blir därmed en rund ring med relativt stor ytter- och innerdiameter i förhållande till dess tjocklek i höjd- och vertikalled. Skjuvningen utförs genom att den undre ringen roteras i förhållande till den övre.

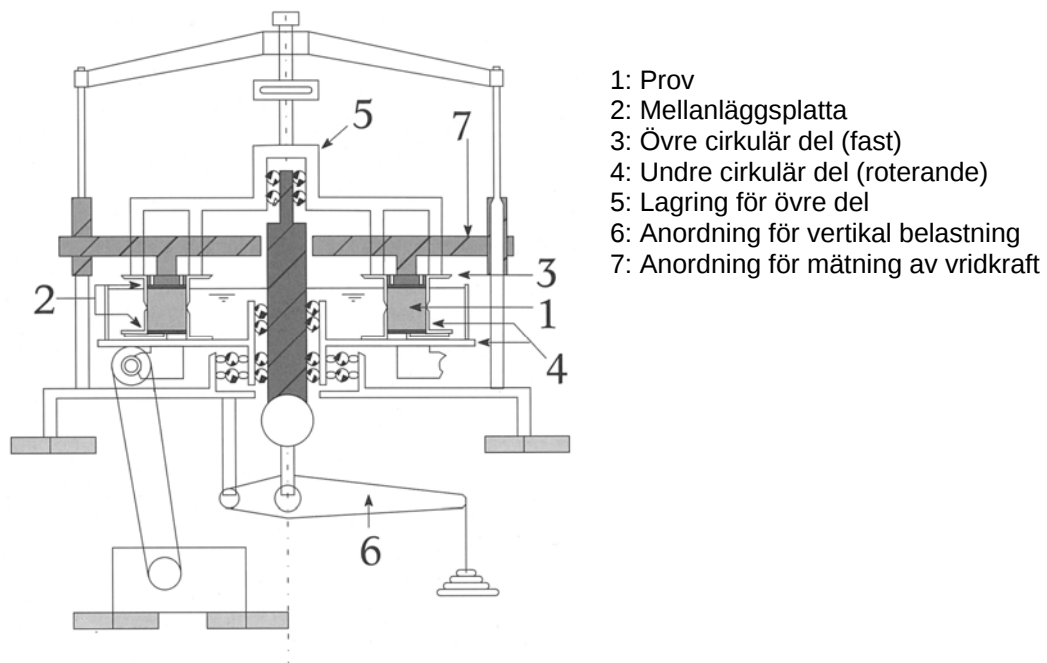


Fig. 5. Ringskjuvapparat. (Efter ETC5 1998)

Ringskjuvapparaten är betydligt mer komplicerad än den vanliga skjuvboxen men har å andra sidan ingen begränsning för hur stora skjuvdeformationer som provet kan utsättas för. Dess huvudsakliga användning är också att studera residualhållfasthet efter mycket stor deformation.

3 ALLMÄNT OM DRÄNERAD HÅLLFASTHET OCH OLIKA FÖRSÖK

3.1 Friktionsvinkel

En jords friktionsvinkel beror på ett antal faktorer som dess mineral, ytjämnhet, kornform, kornfördelning, lagringstäthet, krossningsbenägenhet samt spänningsnivån och randvillkoren i det aktuella fallet. Detta medför att hållfastheten inte generellt kan uttryckas med ett enda värde utan att beskrivningen blir mer komplicerad och att resultaten från olika provningar beror på hur materialet i det aktuella provet behandlats före provningen och vid vilka försöksbetingelser och randvillkor som försöket utförts. Den utvärderade friktionsvinkeln beror sedan också på hur försöksresultaten tolkats. En detaljerad beskrivning av hållfastheten i friktionsjord och inverkan av olika faktorer ges i SGI Information Nr 8 (Larsson 1989).

Av de olika faktorerna kan mineral, ytjämnhet, kornform, kornfördelning och krossningsbenägenhet sägas vara materialspecifika. Lagringstätheten beror på materialets behandling vid avsättning eller utläggning och eventuella efterföljande belastning och/eller packning i fält respektive provets preparering i laboratoriet. Spänningsnivån och randvillkoren beror på rådande spänningsförhållanden och lastförändringens natur i det aktuella fallet samt geometriska förhållandet respektive randvillkor i den aktuella provningsmetoden.

3.2 Friktionens beståndsdelar

Friktionen består av en basfriktion som motsvarar friktionen då två plana polerade ytor av materialet förskjuts i förhållande till varandra. Denna friktion beror på de ingående mineralen i materialet. Ytorna hos partiklar är normalt inte som polerade utan har en viss ojämnhet, yttråhet, som beror på materialets historia och i viss mån på mineralsammansättning. Materialet i t.ex svallsand och rullstensåsar är därmed oftast mer eller mindre rundat och polerat medan nykrossat bergmaterial ofta har mycket råa ytor om det inte spräcks efter naturliga inbäddade svaghetsplan som beror på mineralsammansättningen. Råa ytor har svårare att glida och rulla i förhållande till varandra, vilket utgör en annan friktionskomponent. Kornformen, som också till stor del beror på materialets historia, påverkar hur de olika partiklarna kilas in i varandra och därmed försvårar förskjutningar och ökar friktionen. Kornformen påverkar också materialets krossningsbenägenhet som verkar åt andra hållet. Kornfördelningen påverkar så att ju mer välgraderat materialet är, desto mindre del av jorden utgörs av porer vilket medför större dilatationseffekter som ger högre friktion. Ett välgraderat material ger också fler kontaktpunkter mellan korn vilket ger mindre krossning. Krossningseffekter medför att kornen krossas i kontaktpunkterna eller i sin helhet i stället för att glida eller rulla i förhållande till varandra, vilket medför lägre motstånd mot skjuvning. Krossningsbenägenheten ökar med lägre tryckhållfasthet hos kornmaterialet, vilken i sin tur beror på ingående mineral. Kornformen påverkar så att krossningsbenägenheten ökar ju kantigare de ingående kornen är. Krossningsbenägenheten påverkas också av kornstorleken eftersom större korn i princip innehåller fler sprickor och dessa ökar krossningsbenägenheten. I jämförelsen mellan de olika försöksmetoderna användes identiska material i de olika försöken. Av ovanstående faktorer har då i princip endast krossningsbenägenheten någon inverkan och då främst om någon metod skulle medföra mycket höga spänningskoncentrationer.

Lagringstätheten påverkar motståndet mot skjuvning i hög grad. I ett löst lagrat material faller kornstrukturen ihop och volymen minskar då kornen efter en första elastisk sammantryckning börjar förskjutas i förhållande till varandra. Detta fortsätter tills jorden lagrats om och förtätats så mycket att den vidare skjuvningen fortgår under konstant volym. I ett fast lagrat material faller kornstrukturen inte ihop utan för att kunna förskjutas måste kornen till en början klättra över varandra. Detta medför att volymen ökar tills materialet luckrats upp så mycket att skjuvningen kan fortgå under konstant volym. Förenklat skulle detta kunna liknas vid att partiklarna vid lös lagring förskjuts i en nedförsbacke tills denna planat ut och skjuvkraften ökar successivt tills den uppgår till vad som fordras för att överkomma friktionen vid plan mark. Motsvarande kan skjuvning vid fast lagring liknas vid att partiklarna måste förskjutas i en uppförsbacke tills denna planat ut och skjuvkraften efter ett maximum minskar till den som behövs för att överkomma friktionen vid plan mark. Ett antal dilatansteorier och formuleringar som med mindre variationer försöker beskriva detta och hur det inverkar på olika försöksresultat har presenterats, (t.ex. Bjerrum 1961, Rowe 1962, Bishop 1966, Larsson 1981). I den aktuella jämförelsen mellan olika försöksmetoder påverkas alla resultat av lagringstätheten. Graden av denna inverkan beror på hur väl materialet kunnat packas i olika försök, vilket måste beaktas och kompenseras för, samt randvillkoren i de olika försöken som påverkar hur rörelserna mellan partiklarna kan utvecklas.

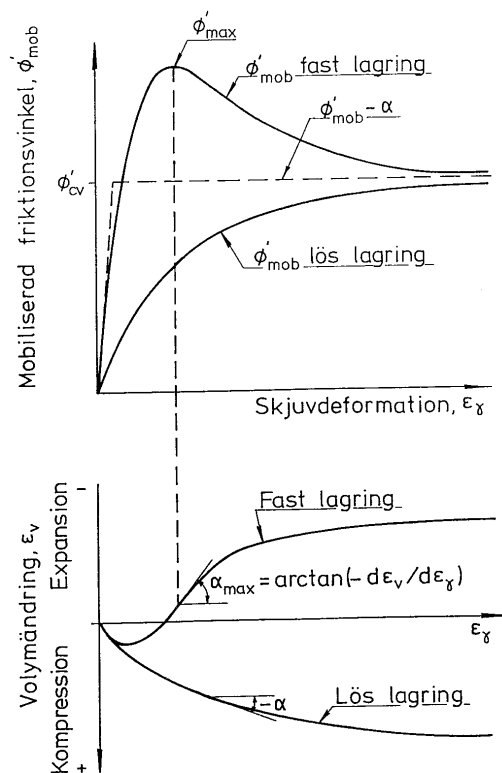


Fig. 6. Principiella skjuvkraft-deformationssamband (från SGI Information Nr. 8, Larsson 1989)

Spänningsnivån påverkar på så sätt att ju högre spänningsnivån är desto mer krossning uppstår, vilket medför att dilatanseffekterna undertrycks och den utvärderade friktionsvinkeln minskar för fast lagrade material. Randeffekterna i de olika försöken påverkar också hur dilatanseffekterna utvecklas. I triaxialförsöket kan partiklarna röra sig i alla riktningar. Detta medför att kornen inte alltid behöver klättra över varandra utan till stor del kan röra sig runt varandra i andra riktningar. Det gör de till viss del även i de andra

försöken, men här är normaltrycken i alternativa riktningar högre och här finns också restriktionen att den samlade rörelsen bara sker i en riktning, dvs. att summan av alla rörelser tvärs denna riktning skall vara noll. I princip blir därför dilatans effekterna mindre i triaxialförsök än i de andra försöken. I de jämförande försöken har spänningsnivåerna varierats inom samma spänningsintervall och med samma steg. En viss reservation finns dock eftersom det endast är i triaxialförsöket som spänningssituationen i provet är känd i detalj.

3.3 Allmänna samband

Den dränerade skjuvhållfastheten i friktionsjord, som beskrivs med friktionsvinkeln, kan generellt skrivas

$$\phi' = \phi'_{cv} + \mu n I_D [(Q - \ln p') - 1]$$

där ϕ' = friktionsvinkel
 ϕ'_{cv} = friktionsvinkel vid konstant volym
 μ = funktion av kornform och ytråhet
 n = funktion av randvillkor
 I_D = relativ lagringstäthet
 Q = funktion av kornhållfasthet och gradering
 p' = isotropt medeleffektivtryck $(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3$

Ovanstående uttryck är hämtat från Bolton (1986) och har modifierats av Larsson (1989). Ett liknade uttryck för stenfyllningar och andra mycket grova material presenterades av Barton & Kjaernsli (1981).

Faktorn n i ovanstående samband har empiriskt befunnits vara 3 för triaxialförsök och 5 för plane-strainförsök (Bolton 1986).

Friktionsvinkeln utvärderas ur triaxialförsök och plain-strainförsök med Mohrs spänningscirkel. I dessa försök är största och minsta huvudspänning och deras riktningar kända och därmed skjuv- och normalspänningar i övriga plan.

I direkta skjuvförsök och skjuvboxförsök är endast skjuvspänning τ och normalspänning σ'_v i horisontalplanet kända. Friktionsvinkeln utvärderas ur

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

Detta uttrycker inte den mest kritiska spänningssituationen i provet och den horisontella skjuvrörelsen utgör det påtvingade samlade resultatet av de olika partikelrörelserna inom provet (Rowe 1962, Roscoe et al. 1967, Wroth 1987, Airey and Wood 1987, Liu 2006, Zhang and Thornton 2007 m.fl.). Rowe (1962) presenterade en teori för hur den friktionsvinkel som utvärderas ur plane-strainförsök, ϕ'_{PS} , förhåller sig till den som utvärderas ur direkta skjuvförsök, ϕ'_{DSS} , vilken gav sambandet

$$\tan \phi'_{DSS} = \tan \phi'_{PS} \cos \phi'_{cv}$$

där ϕ'_{cv} är friktionsvinkeln vid konstant volym utvärderad ur triaxialförsök eller plane-strainförsök. Friktionsvinkeln vid konstant volym sammanfaller vid dessa försök.

Relationen medför att vid konstant volym förhåller sig den utvärderade friktionsvinkeln i direkta skjuvförsök, $\phi'_{cv,DSS}$, till den från triaxialförsök, $\phi'_{cv,TRIAX}$, och plain-strainförsök, $\phi'_{cv,PS}$, som

$$\tan \phi'_{cv,DSS} = \sin \phi'_{cv,TRIAX} = \sin \phi'_{cv,PS}$$

Den senare relationen har bland annat verifierats för svensk sand och silt av Börgesson (1981) och Rowe's dilatanteori bekräftades i stort av resultaten i avancerade försök utförda av Jewell and Wroth (1987).

De tre försökstyperna med direkt skjuvning ger dock sinsemellan inte nödvändigtvis samma resultat. På grund av ojämna spänningsfördelningar kan ideal direkt skjuvning endast förväntas ske i de centrala delarna i skjuvboxförsök och försök med enkla skjuvapparater (t.ex. Airey and Wood 1987). Försöksresultat och teoretiska betraktelser har visat att försök i direkta skjuvapparater ger lägre utvärderade hållfastheter än de som utvärderas i mycket mer avancerade utrustningar och att skjuvboxförsök kan ge högre hållfastheter än direkta skjuvförsök (t.ex. Airey and Wood 1987, Dounias and Potts 1993). Försök på samma material har också visat att skjuvboxens storlek har betydelse så att högre friktionsvinklar uppmäts i boxar med mindre dimensioner (Cerato and Luntenegger 2006). Mätningen av provhöjden över hela provet medan skjuvningen endast utvecklas i en mindre del i nivå med spalten mellan boxhalvorna i skjuvboxförsöken kan också medföra att de verkliga dilatanteffekterna underskattas, (t.ex. Zhang and Thornton 2007).

3.4 Friktion och kohesion

Det faktum att friktionsvinkeln gradvis förändras och sjunker med ökande spänningsnivå (utom för extremt löst lagrad jord) medför att sambandet mellan skjuvhållfasthet och normalspänning är krökt, Fig. 7.

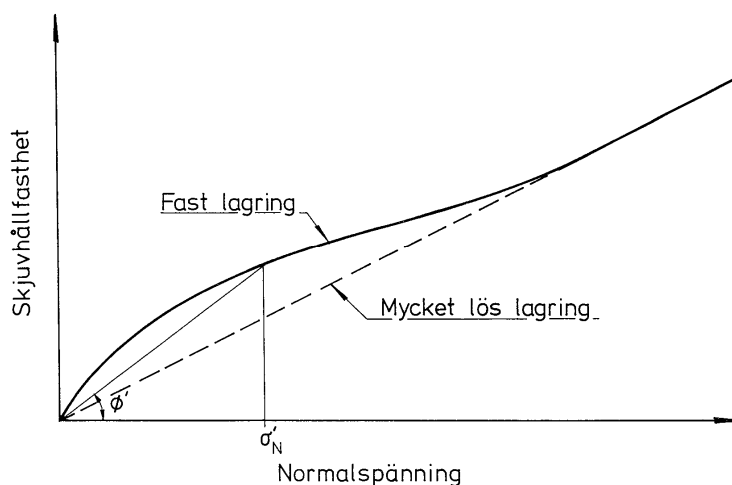


Fig. 7. Principiellt samband mellan skjuvhållfasthet och normalspänning i friktionsjord-jord. (från SGI Information Nr. 8, Larsson 1989).

För friktionsjord ligger punkten i Fig. 7 där kurvorna för fast och lös lagring sammanfaller mycket högt upp på normalspänningsskalan och styrs av materialets krossningsbenägenhet. För leror infaller övergången vid mycket lägre spänningar som är relaterade till förkonsolideringstrycket. Minskningen i friktionsvinkel vid denna övergång är då mycket större och friktionsvinkeln når för lös lera därefter inte upp till i närheten av ϕ'_{cv} inom rimliga skjuvdeformationer. Sambanden för ”mellanjordarten” silt hamnar mellan de för friktionsjord respektive lera.

Kurvans krökning medför att man för ett visst begränsat spänningsintervall kan uttrycka hållfastheten τ_{fd} som

$$\tau_{fd} = c' + \sigma'_N \tan \phi'$$

Detta innebär ofta en förenkling vid efterföljande beräkningar jämfört med att beskriva friktionsvinkelns variation med spänningsnivån, men innebär normalt inte att det finns några påtagliga sammanhållande krafter utöver friktionen i materialet.

I leror är den dränerade hållfastheten normalt endast intressant för spänningar väl under förkonsolideringstrycket, där den dränerade skjuvhållfastheten blir lägre än den odränerade. Inom detta spänningsområde brukar man för svenska leror ofta på basis av empiri räkna med en friktionsvinkel av 30 grader och ett c' -värde av $0,03 \sigma'_c$ eller $0,1 c_u$, där σ'_c är förkonsolideringstrycket och c_u den odränerade skjuvhållfastheten.

3.5 Förväntade relationer

På basis av ovanstående teoretiska och empiriska underlag skulle förväntade samband mellan de olika försökstyperna kunna beräknas. En förutsättning är dock att såväl den enkla direkta skjuvapparaten som skjuvboxen uppfyller de teoretiska kriterierna för direkt skjuvning. Ett exempel på ett sådant förväntat samband visas i Fig. 8. Exemplet är för en relativt rundkornig sand med normal mineralsammansättning (en blandning av kvarts och fältspat) och i absolut fastaste lagring. De absoluta värdena och brytpunkterna varierar med typ av material och lagringstäthet, men mönstret förblir i princip det samma utom för mycket löst lagrat material där inga eller endast mycket små dilatans effekter uppstår.

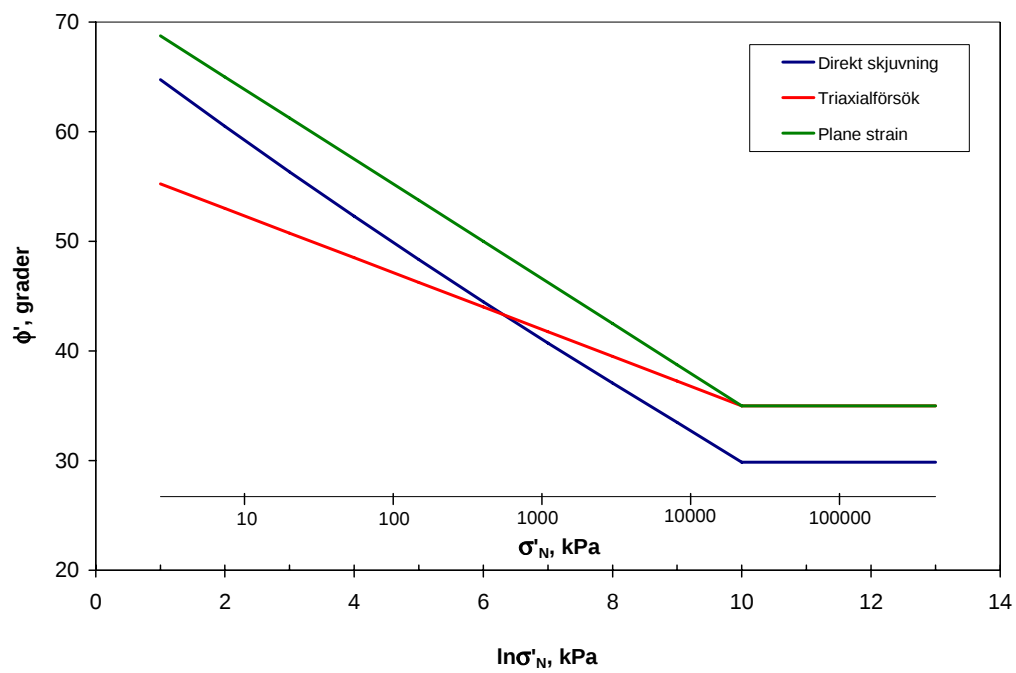


Fig. 8. Exempel på samband mellan friktionsvinklar i fast lagrad sand ur olika typer av försök beräknade på basis av teori och empiri.

4 UTFÖRDA FÖRSÖK

4.1 Jordmaterial i de jämförande försöken

De jämförande försöken utfördes på tre olika material; en sand, en silt och en överkonsoliderad lera.

Sanden utgjordes av ensgraderad Simrishamnssand med kornstorleken 0,5 -1 mm. Simrishamnssand är en svallsand som består av en blandning av mineralen kvarts och fältspat med relativt jämna och rundade korn. Simrishamnssand används bland annat i akvarier och reningsanläggningar. Ett foto av korn av den använda sanden visas i Fig. 9 tillsammans med ett diagram för bedömning av ytjämnhet och rundning hos kornen.



EXAMPLES SHOWING DEGREE OF ROUNDEDNESS				
QUARRIED ROCK	TALUS	MORAINE	GLACIFLUVIAL MATERIAL	FLUVIAL MATERIAL

Quarried rock – bergkross kännetecknas av skarpa och kantiga korn med stor ytråhet
Talus – Nedrasat bergmaterial kännetecknas av råa och kantiga korn
Moraine – Morän kännetecknas av råa och delvis kantiga korn
Glaciofluvial material – Isälvsmaterial kännetecknas av jämna och delvis rundade korn
Fluvial material – t.ex. deltaavlagringar och svallsand kännetecknas av mycket släta och runda korn

Fig. 9. Den använda sanden och ett jämförande diagram för bedömning av ytråhet och kornform från Barton and Kjaernsli (1981). (Foto SGI.)

Silten kommer från Borlänge. Den innehåller alla siltfraktioner och har en lerhalt mindre än 1,5 %. Ursprungsmaterialet innehöll också en mindre andel sand som siktades bort. Någon mineralanalys har inte gjorts, men mineralet i svensk silt är normalt en

blandning av i huvudsak bergartsmaterialen kvarts och fältspat samt lermineral som illit (e.g. Larsson 1995).

Leran i försöken har sitt ursprung från Norrköping. Materialet togs upp som ett enda prov i samband med en provtagning med SGIs stora lerprovtagare (Larsson et al. 2011), och var således mycket homogent redan från början. Ursprungsmaterialet hade en naturlig vattenkvot av 88 %, flytgräns av 80 % och plasticitetsgränsen 24 %. Som förberedelse inför de aktuella försöken rördes det om till en trögflytande homogen massa. Det fylldes sedan i en stor ödometerring med 290 mm diameter och cirka 300 mm ursprunglig provhöjd, Fig. 10. Provet konsoliderades stegvis i en press och det sista laststeget fick ligga på under flera månader för att försäkra att hela provet konsoliderat för slutlasten. Hela konsolideringsfasen varade mer än ett halvt år. Provet trycktes sedan ut och behandlades och förvarades på samma sätt som prover som tagits med den stora lerprovtagaren. Ett inledande ödometerförsök på ett uttrimmat delprov visade på att konsolideringen resulterat i ett förkonsolideringstryck av ca 326 kPa. Efter konsolideringen var lerans skrymdensitet $1,83 \text{ Mg/m}^3$ och vattenkvoten 38 %. Flytgränsen var 62 %, plasticitetsgränsen 23 % och den odränerade skjuvhållfastheten enligt konförsök cirka 65 kPa.



Fig. 10. Konsolidering av stort lerprov i ödometerpress. (Foto SGI)

4.2 Provpreparering och montering

Triaxialapparat

Prover av sand och silt fylls ut och packas inuti ett cylindriskt gummimembran som är monterat på piedestalen i triaxialcellen. Runt gummimembranet är en speciell packningscylinder monterad. Gummimembranet sugas ut mot cylinderns innerväggar med hjälp av en vakuumsug. Vid ifyllningen ses noga till att provet blir vattenmättat och att dess lagringstäthet blir jämn genom hela provet. Lagringstätheten kan varieras från

mycket lös till mycket fast, men absolut lösaste eller fastaste lagring är svårt att åstadkomma. Likaså är det svårt att exakt åstadkomma en förutbestämd lagringstäthet. Istället utförs försök med olika lagringstätheter så att resultatens beroende av denna faktor kan bestämmas och friktionsvinkeln därefter kan utvärderas för alla lagringstätheter (se t.ex. SGI Information Nr. 8, Larsson 1989).

Efter denna provpreparering placeras stämpeln ovanpå provet och gummimembranets överkant förs upp över och tätas mot denna. Porvattnet i provet utsätts för ett undertryck så att provet står upp för sig självt och packningscylindern avlägsnas. Provets torra vikt bestäms genom vägning av materialet före provprepareringens början och efterföljande vägning av resterande material. Provhöjden mäts på minst två motstående sidor och provdiameter mäts på ett antal nivåer där mätning görs i minst två motstående riktningar. Ur dessa mätningar beräknas provets medelhöjd, medeldiameter och volym. Provernas storlek i den aktuella undersökningen var cirka 50 mm diameter och 100 mm höjd.

Efter dessa mätningar sätts cellens överdel på, cellen vätskefylls och laststången förs ned till kontakt med provet. Mätarna för volymändring och provhöjd nollas och celltrycket börjar föras på. När celltrycket är tillräckligt högt kan undertrycket i porvattnet släppas av och om ett mottryck i porvattnet skall användas för att försäkra full vattenmättnad kan sedan både portryck och celltryck höjas parallellt. Om provet skall konsolideras för anisotrop spänning läggs dessutom en extra vertikallast på gradvis. I de aktuella försöken har mottryck i porvattnet använts för att tillförsäkra vattenmättnad och proverna konsoliderats isotropt, dvs. allsidigt lika tryck. Celltrycket har varit så mycket högre än mottrycket att den avsedda effektiva konsolideringsspänningen uppnåtts. Under konsolideringstiden registreras volym- och höjdförändring hos provet kontinuerligt. Efter att konsolideringsspänningarna nåtts får proven stå med konstanta spänningar tills mätningarna visar att alla signifikanta deformationer upphört. När detta tillstånd nåtts beräknas provets aktuella höjd, volym, torra skrymdensitet och lagringstäthet.

Proverna av lera trimmades ut ur det stora provet med hjälp av trådavskärare, trimningsstativ och trimningsvagg. De placerades på piedestalen och stämpeln lades på. Proven försågs sedan med snedställda strimlor av filterpapper på utsidan innan de inneslöts och tätades av gummimembranet. I detta fall behövdes endast en kontrollmätning av höjd och diameter och inget undertryck i porvattnet fordrades för att proverna skulle kunna stå för sig själva. I övrigt utfördes konsolideringen som för sand och silt, bortsett från att proven först återkonsoliderades anisotropt för spänningar strax under de uppskattade förkonsolideringstrycken i vertikal- och horisontalled innan de åter avlastades och fick anpassa sig till de aktuella startspänningarna i försöken.

Direkt skjuvapparat

Den direkta skjuvapparaten är försedd med en speciell monteringscylinder för prover av friktionsjord som inte håller ihop utan yttre tryck. Denna placeras runt den undre stämpeln där gummimembranet först monterats och tätats. I cylindern ligger de yttre ringarna med rätt höjdavstånd i infällda spår. Gummimembranet viks över cylinderns överkant så att ett runt hål med 50 mm diameter och 20 mm djup bildas, och i vilket provet kan fyllas i och packas. Efter att full provhöjd nåtts planas överytan av och understämpel med prov och monteringscylinder förs in i belastningsstativet. Den övre stämpeln förs ned till kontakt med provet och gummimembranets överdel förs upp och tätas mot

denna. En mindre last förs på och monteringscylindern avlägsnas. Därefter läggs full last på och provet får konsolidera för denna.

Provets torra vikt bestäms genom vägning av ursprungligt material och resterande material efter provuttagningen. Provets höjd bestäms genom att mätaren för stämpelns vertikallrörelse nollats mot en känd provtjocklek. På detta vis kan avståndet mellan överstämpelns underkant och understämpelns överyta, dvs. provhöjden mätas och registreras. Provets skrymdensitet och lagringstäthet beräknas efter att full konsolidering uppnåtts. Bestämningen blir dock osäkrare än den vid triaxialförsök eftersom provdiametern kan variera något om provet skulle tendera att bukta ut mellan ringarna och minsta fel i mätningarna får stor betydelse på grund av den låga provhöjden. Om räfflade eller nålförsedda fillterstenar används kan dessa felkällor bli större eftersom volymberäkningen blir svårare och på grund av svårigheter att uppskatta vilken packning och lagringstäthet som fås i räfflorna respektive mellan nålarna.

Proverna av lera skars ut ur det stora provet och stansades in i en ödometerring. Efter vägning monterades provet på vanligt sätt mellan stämplarna i skjuvapparaten. Provet konsoliderades i ringen upp till en viss spänningsnivå innan ringen avlägsnades och ersattes av gummimembran och yttre ringar. Det konsoliderades sedan vidare upp till vertikalspänningar strax under förkonsolideringstrycket innan spänningarna minskades till den aktuella försöksspänningen och provet fick anpassa sig till denna.

Prover av silt kan också packas i en ödometering placerad på en platta runt den undre stämpele. Ett vattenmättat prov kan sedan fås att stå för sig själv då ringen avlägsnas genom att porvattnet i provet utsätts för ett undertryck. Detta begränsas dock av siltens kapillaritet.

Skjuvbox

I skjuvboxen skruvas de två boxhalvorna ihop och efter att den undre mellanläggsplattan lagts ned fylls prov av sand eller silt i och packas till lagom höjd. Den övre mellanläggsplattan och tryckplattan läggs på och sedan belastas provet vertikalt. Då en ledad tryckplatta används läggs en kula mellan tryckplatta och belastningsanordningen och då en styrd platta skall användas fixeras plattan så att den inte kan tippa. Efter att provet konsoliderat lossas skruvarna som håller ihop boxhalvorna och den övre delen lyfts med två skruvar på motstående sidor så att en jämntjock spalt öppnas mellan halvorna.

Provets torra vikt bestäms genom vägning av ursprungligt material och resterande material efter provuttagningen. Provets höjd bestäms genom att mätaren för stämpelns vertikallrörelse nollats mot en känd provtjocklek. På detta vis kan avståndet mellan mellanläggsplattorna, dvs. provhöjden mätas och registreras. Provets skrymdensitet och lagringstäthet beräknas efter att full konsolidering uppnåtts och boxhalvorna separerats. Bestämningen blir dock osäkrare än den vid triaxialförsök eftersom minsta fel i mätningarna får stor betydelse på grund av den låga provhöjden. Eftersom räfflade mellanläggsplattor används blir felkällorna större för volymberäkningen och beräkningen av skrymdensitet blir svårare på grund av svårigheter att uppskatta vilken packning och lagringstäthet som fås i räfflorna. En viss osäkerhet uppstår också om medelvärdet för hela provet är representativt för den tunna zon där skjuvningen antas ske.

Proverna av lera skars ut ur det stora provet och trimmades till avsedda dimensioner. Efter vägning fördes provet försiktigt in i de monterade boxhalvorna. För att underlätta

dräneringen lades först ett tunt sandlager mellan den undre mellanläggsplattan och provet och sedan ett likadant lager mellan prov och övre mellanläggsplatta. Provet konsoliderades i boxen upp till vertikalspänningar strax under förkonsolideringstrycket innan spänningarna minskades till den aktuella försöksspänningen och provet fick anpassa sig till denna. Därefter separerades boxhalvorna.

4.3 Försöksutförande och resultat

4.3.1 Sand

Triaxialförsök

Triaxialförsöken utfördes som vanliga dränerade aktiva försök med konstant axiell deformationshastighet och konstanta cell och mottryck. Under försöken registrerades axiell tillskottslast, axiell deformation och volymändring (utöver kontrollmätningar av tid, celltryck och mottryck). Totalt utfördes 7 försök på sand enligt Tabell 1.

Tabell 1. Triaxialförsök på sand

Effektivt celltryck, kPa	Eftersträvad lagringstäthet
50	Lös
50	Lös
50	Lös
50	Medelfast
50	Fast
350	Medelfast
680	Fast

Försöken gav jämna kraft-deformationskurvor med brott inom 5-6 % axiell deformation, Fig. 11. Samtliga prover dilaterade vid brott och följde det normala mönstret att ju fastare lagring desto större dilatation (volymökning relativt axiell kompression), Fig. 12.

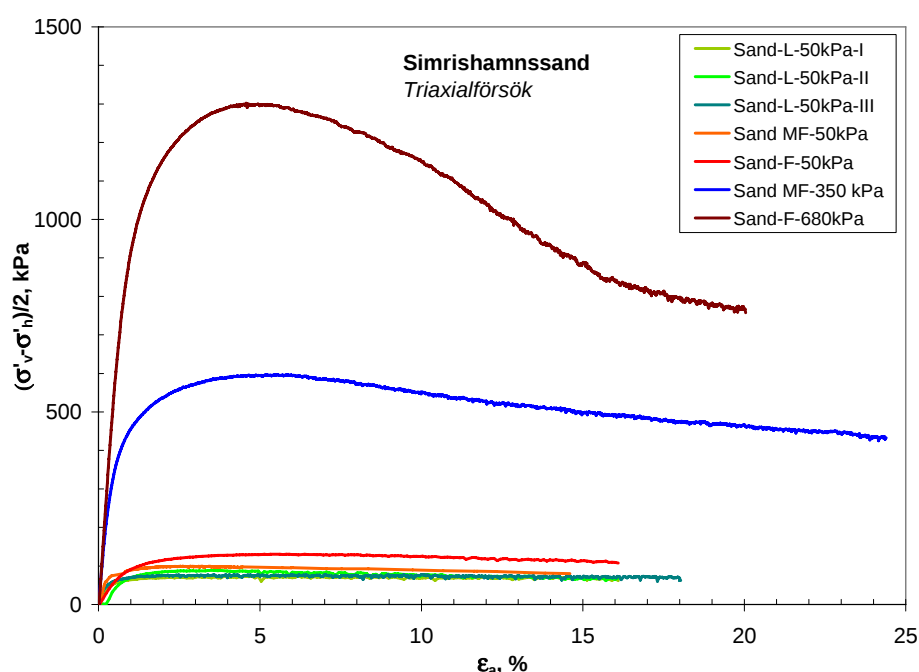


Fig. 11. Skjuvspännings-deformationskurvor från triaxialförsök på Simrishamnssand

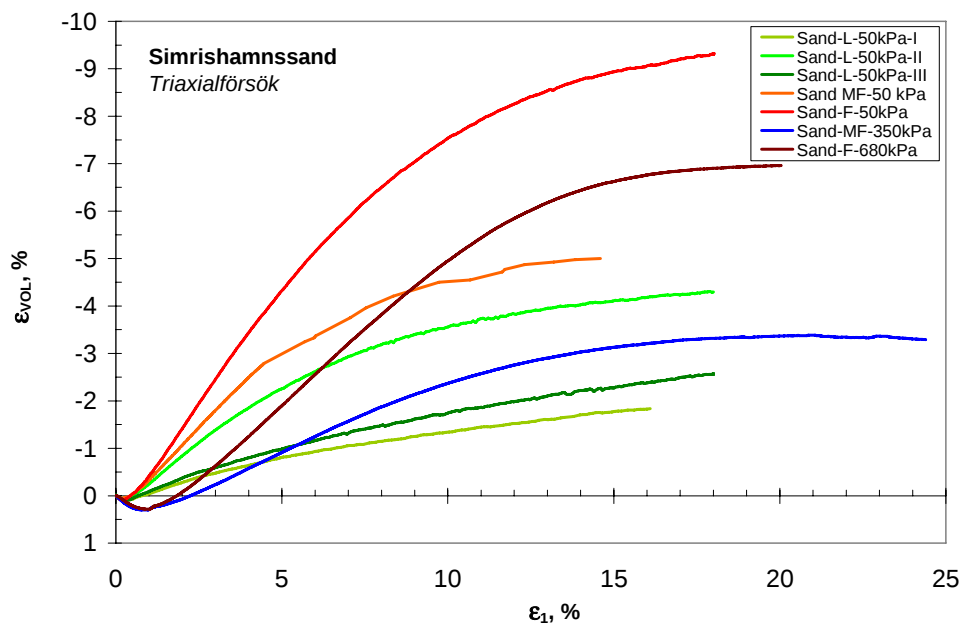


Fig. 12. Uppmätta samband mellan axiell kompression och volymändring i triaxialförsök på Simrishamnssand

Friktionsvinkeln vid kritisk lagring har utvärderats enligt Bishop (1966) genom att plotta friktionsvinkel mot dilatation vid brott och extrapolera det rätlinjiga sambandet till noll dilatation (= konstant volym), Fig. 13. Den utvärderade friktionsvinkeln ϕ'_{cv} blev cirka 35° ($34,7^\circ$).

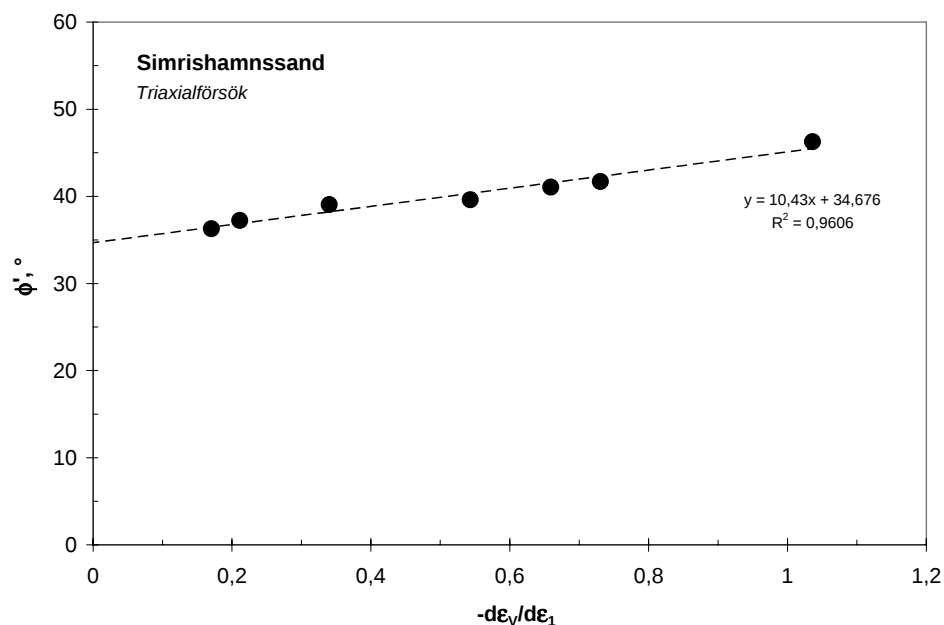


Fig. 13. Utvärdering av friktionsvinkel vid konstant volym ur triaxialförsök på Simrishamnssand.

De utvärderade friktionsvinklarna varierade mellan 36 och 46 grader och för att skapa en generell bild av hur friktionsvinkeln varierar med lagringstäthet och spänningsnivå har det förfarande som beskrivs i SGI information Nr 8 (Larsson 1989) använts. Enligt

detta kan grupper av försök med likartade lagringstätheter väljas ut. En gemensam lagringstäthet, $I_{D,ref}$, ansätts för gruppen och de individuella resultaten justeras enligt

$$\phi'_{I_{D,ref}} = \phi'_{cv} + \frac{I_{D,ref}}{I_D} (\phi' - \phi'_{cv})$$

De utvärderade friktionsvinklarna plottas sedan mot $\ln p'$ där $p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$ vid brott i försöket, Fig. 14.

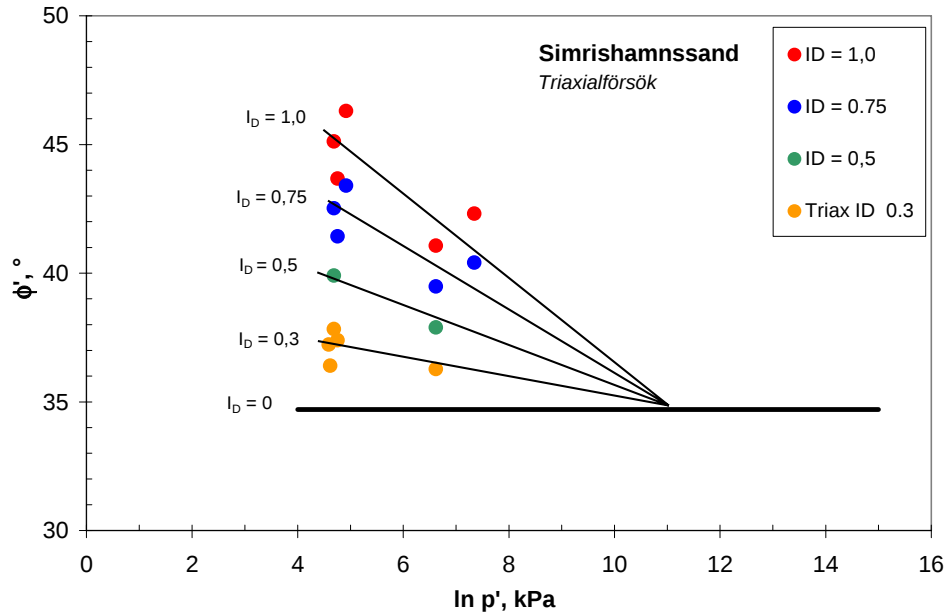


Fig. 14. Modell för friktionsvinkelns variation i triaxialförsök på Simrishamnssand

Resultaten sprider något men den utvärderade generella bilden överensstämmer med den förväntade och de enskilda resultaten ligger i stort inom $\pm 1^\circ$ från vad modellen anger.

Direkta skjuvförsök

Att den enkla direkta skjuvapparaten inte är lämplig för försök på sand är känt sedan tidigare. En serie av fem försök på prover med olika lagringstäthet och olika effektiva normaltryck utfördes ändå för att komplettera jämförelsematerialet.

I samtliga försök erhöles mycket krumma skjuvspännings-deformationskurvor med stora deformationer till brott. Inget av försöken uppvisade brott inom försöksmetodens normala maximala deformationsgräns av 0,15 radianer och det enda konstaterade verkliga brottet inträffade vid 0,22 radianers vinkeländring. Detta trots att samtliga försök uppvisade ett dilatant uppträdande.

En extrapolering av kurvorna visade i samtliga fall en friktionsvinkel av cirka 33° oavsett lagringstäthet. En svag tendens till minskande friktionsvinkel med ökande effektiv normalspänning kunde dock urskiljas. Någon meningsfull utvärdering av ϕ'_{cv} kunde inte göras.

Resultaten tyder på att huvuddelen av glidningen skett mellan provet och stämplarna där friktionen mellan sanden och de plana relativt finkorniga filterstenarna varit mindre än inom proven.

Skjuvboxförsök

Skjuvboxförsöken utfördes i två serier med ledad tryckplatta respektive styrd tryckplatta. Försöken utfördes dels med lös lagring, dels med fast lagring och normalspänningarna 53, 503 och 1053 kPa. För normaltrycket 53 kPa utfördes försöken som dubbelförsök, Fig. 15.

Som regel uppstod brott inom 2 mm förskjutning av boxhalvorna i förhållande till varandra och sambanden mellan deformation och skjuvspänning följde förväntade förlopp. Undantagen var löst lagrat material i försök med ledad tryckplatta. Den ledade tryckplattan medför att denna kan tippa, vilket medför att lagringen längs skjuvytan ändras och blir ojämn. Detta avspeglas dock inte nödvändigtvis i det uppmätta medelvärde av vertikallrörelsen. I ett av försöken med löst lagrat material och ledad tryckplatta uppnåddes heller inget brott på grund av att det efter en viss förskjutning uppstod stora vertikala rörelser istället för de successivt avstannande.

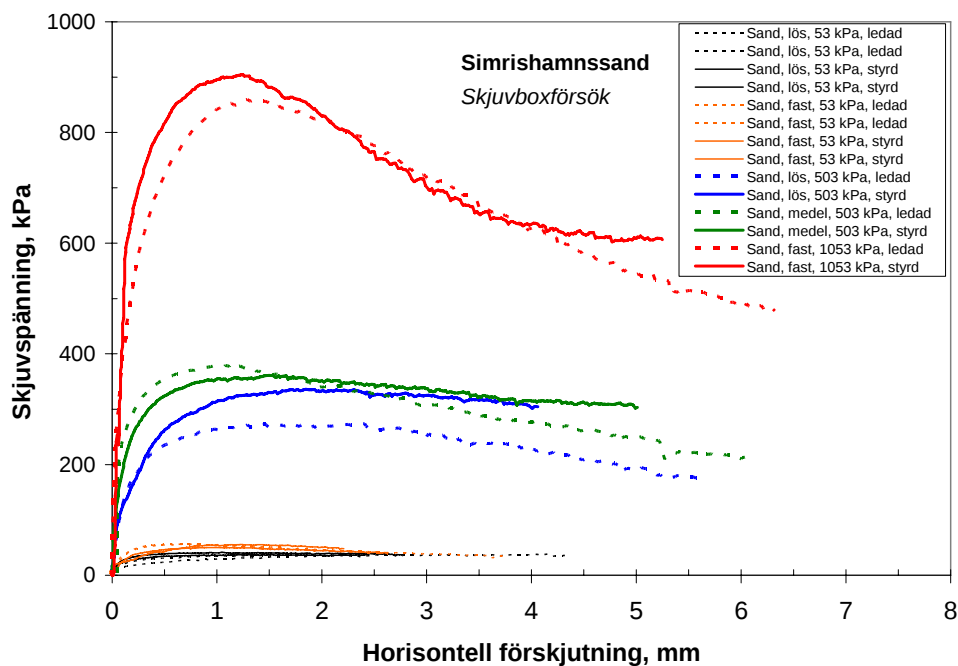


Fig. 15. Skjuvspännings-förskjutningskurvor från skjuvboxförsök på Simrishamnssand

Inverkan av den ledade tryckplattan visade sig också vid utvärderingen av friktionsvinkeln vid konstant volym ϕ'_{cv} . För fast lagrat material gav båda försökstyperna ungefär samma relation mellan friktionsvinkel vid brott och dilatans, men för löst lagrat material erhöles mycket varierande resultat då tryckplattan var ledad. Utvärderingen gjordes därför med ledning av resultaten från försök med styrd tryckplatta, Fig. 16.

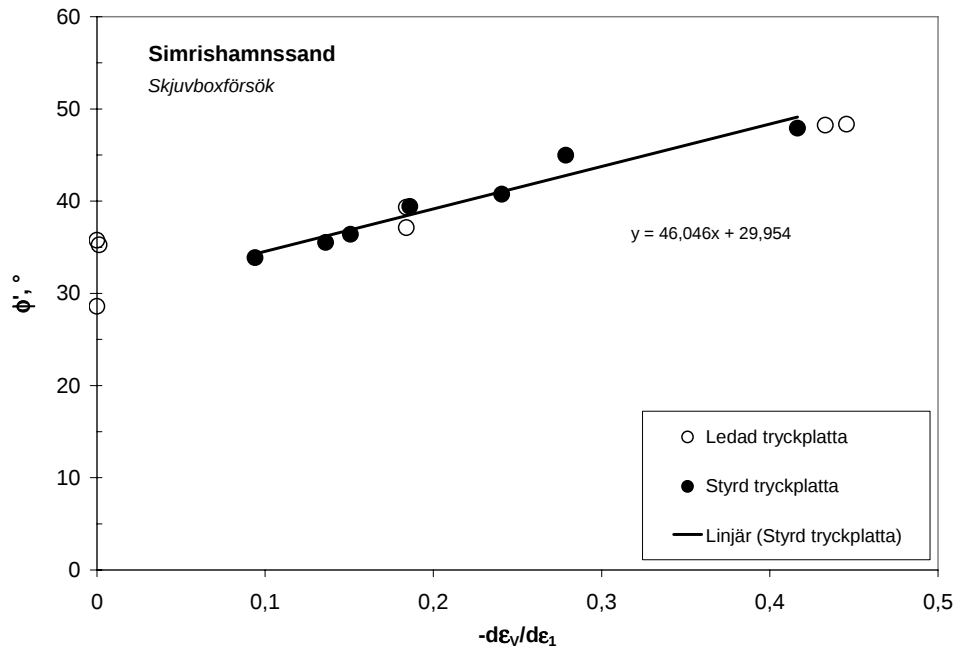


Fig. 16. Utvärdering av friktionsvinkel vid konstant volym ur skjuvboxförsök på Simrishamnssand.

För de försök där brott uppstod har de utvärderade friktionsvinklarna plottas mot $\ln \sigma'_v$, Fig 17. Detta har gjorts eftersom den effektiva vertikalspänningen är den enda kända normalspänningen i försöket. Teoretiskt går det att beräkna största och minsta huvudspänning i försöket (och att uppskatta den mellersta huvudspänningen) men detta är något osäkert och här har den effektiva vertikalspänningen fått representera effektivspänningsnivån i försöket.

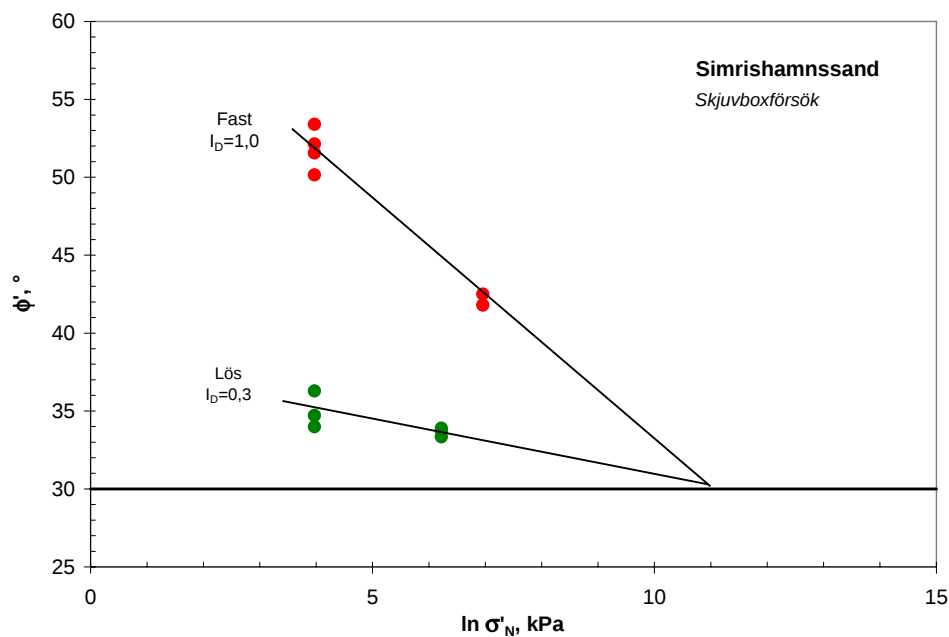


Fig. 17. Modell för friktionsvinkelns variation vid skjuvboxförsök på Simrishamnssand.

De samband som fås från skjuvboxförsöken följer mönstret i den allmänna modellen för friktionsvinkelns variation med spänningsnivå och lagringstäthet. En direkt jämförelse med resultaten från triaxialförsöken visar att relationerna mellan resultaten i stort följer vad som teoretiskt kan förväntas men att de utvärderade värdena från skjuvboxförsöken genomgående är något högre, Fig. 18.

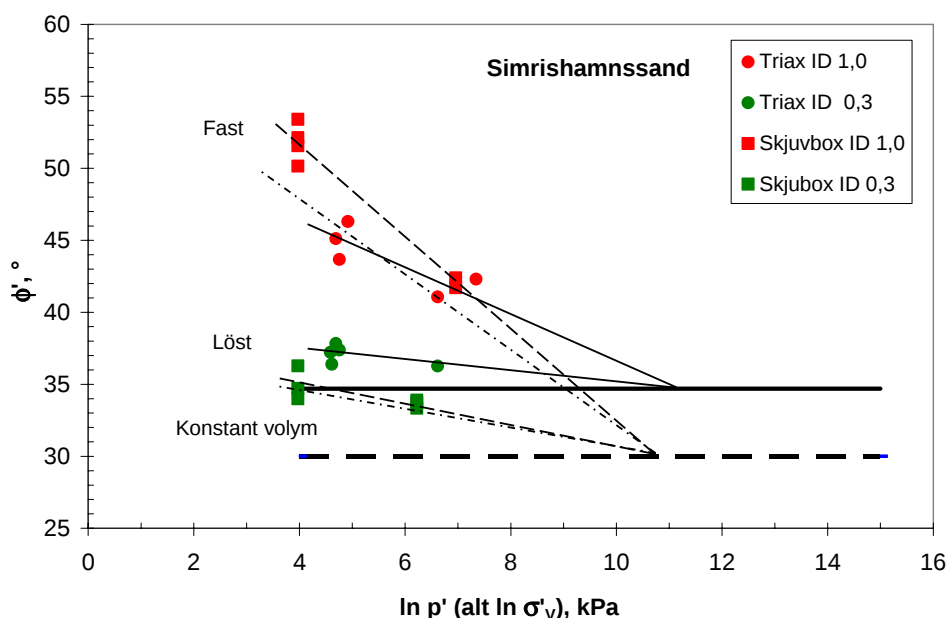


Fig. 18. Jämförelse mellan den utvärderade friktionsvinkelns variation vid triaxialförsök respektive skjuvboxförsök. Punktstreckade linjer motsvarar vad som teoretiskt beräknas för direkt skjuvning för de relativa lagringstätheterna 0,3 och 1,0 på basis av resultaten från triaxialförsöken.

4.3.2 Silt

Triaxialförsök

Ett tiotal triaxialförsök utfördes på silt från Borlänge. På grund av tekniska svårigheter med att läckage tenderade att uppstå i gummimembranen mot slutet av försöken fick den först använda metoden att bestämma provets densitet modifieras. Resultaten från de tidigaste försöken i serien kunde därför inte användas för utvärdering av lagringstäthets inverkan. Silten visade sig dessutom vara besvärlig på så vis att mycket olika lagringstätheter fås vid olika vattenkvot vid provprepareringen. Mycket högre densiteter erhålls då proven packas i vått tillstånd än om materialet är torrt, vilket påverkade vilka lagringstätheter som kom att ingå i olika försökstyper där prepareringstekniken är olika. Proverna i triaxialförsöken packades in i vått tillstånd och fick därmed generellt en relativt hög lagringstäthet. Beteckningarna lös, medelfast och fast i redovisningsdiagrammen avser därför lagringstätheten i förhållande till övriga triaxialförsök i serien snarare än det vanliga klassificeringssystemet.

Brott uppstod i samtliga försök inom 15 % axialdeformation, med i princip lägre brottdeformation ju lägre spänningsnivå och ju högre lagringstäthet, Fig. 19.

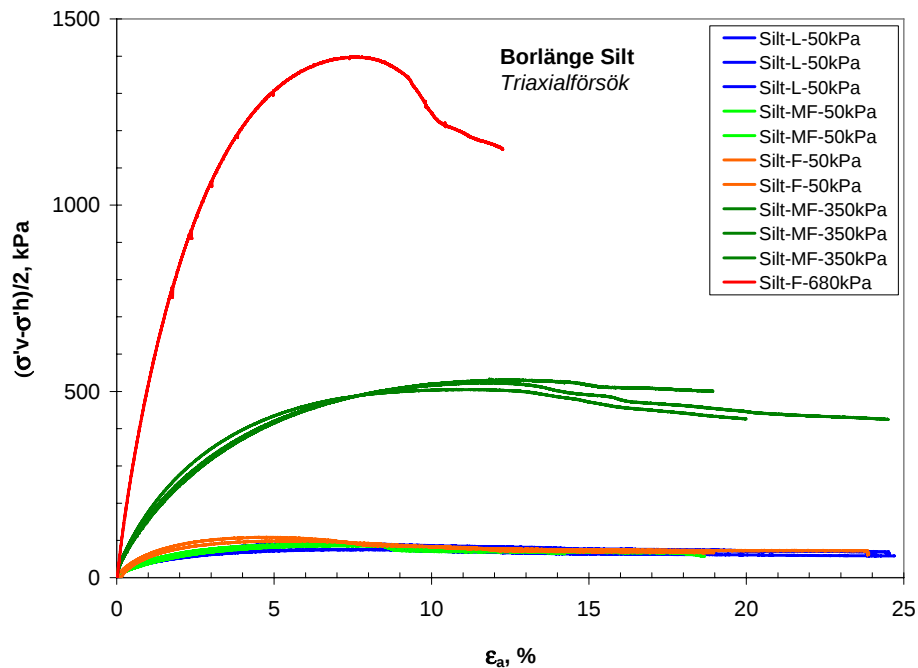


Fig. 19. Skjuvspännings-deformationskurvor från triaxialförsök på silt från Borlänge.

Volymändringarna under försökens gång motsvarade också det förväntade mönstret med större dilatans ju fastare lagrat material och ju lägre spänningsnivå. Samtliga prover utvisade dilatans vid brott, Fig. 20.

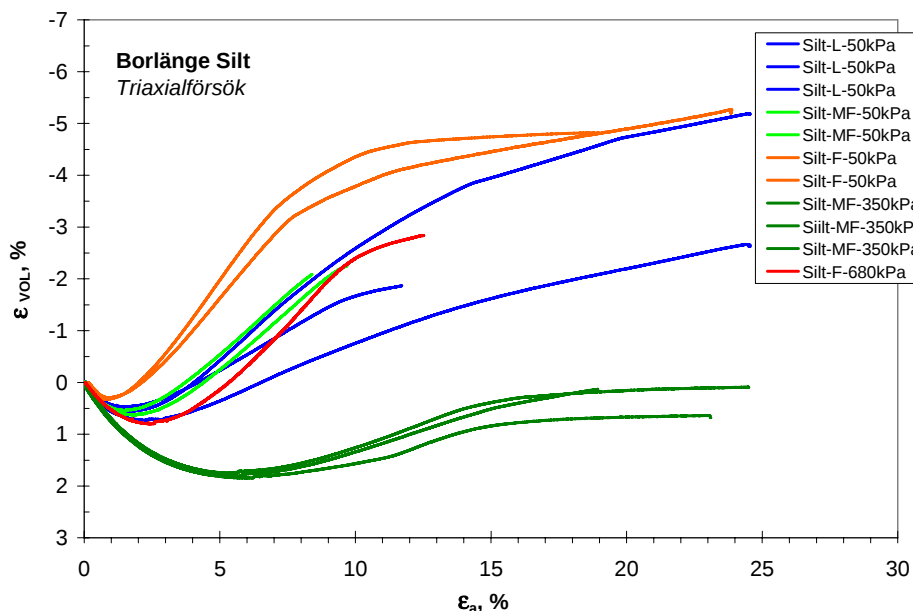


Fig. 20. Uppmätta samband mellan axiell kompression och volymändring i triaxialförsök på silt från Borlänge.

Utvärderingen av friktionsvinkeln vid kritisk lagring var också relativt säker. Visserligen fanns inga värden med mycket liten eller negativ dilatans, men den extrapolerade

trendlinjen var klart rätlinjigt med många punkter och endast liten variation från medel-
linjen hos de enskilda försöksresultaten, Fig. 21.

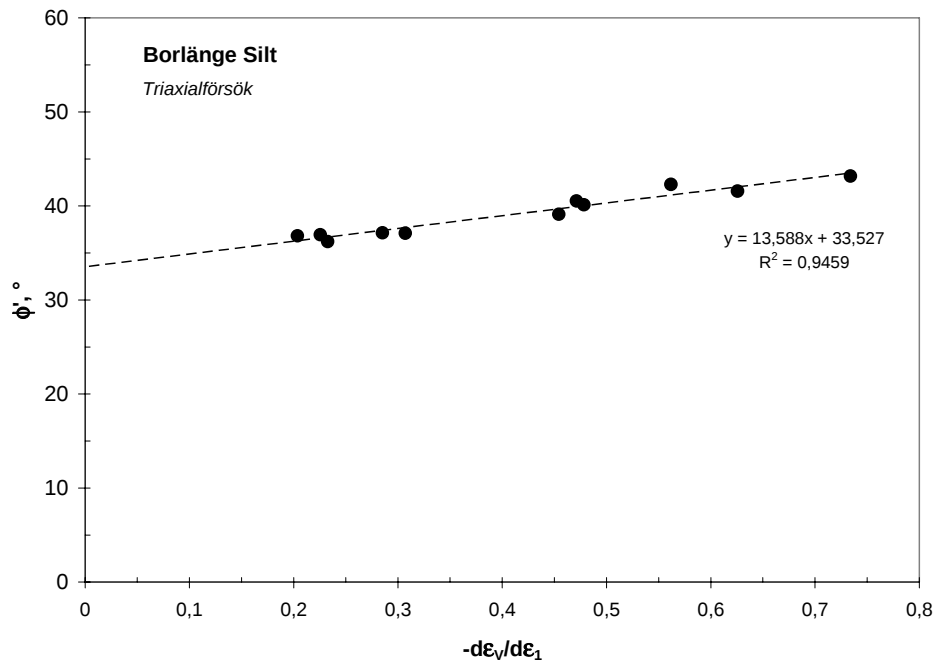


Fig. 21. Utvärdering av friktionsvinkel vid konstant volym ur triaxialförsök på silt från Borlänge.

De utvärderade friktionsvinklarna varierade mellan 36 och 44 grader. Resultaten har räknats om med ledning av den relativa lagringstätheten för att skapa en generell bild av hur friktionsvinkeln varierar med lagringstäthet och spänningsnivå på samma sätt som för sanden ovan, Fig. 22. På grund av ovan nämnda problem med densitetsbestämning har endast en del av försöksresultaten kunnat användas för detta.

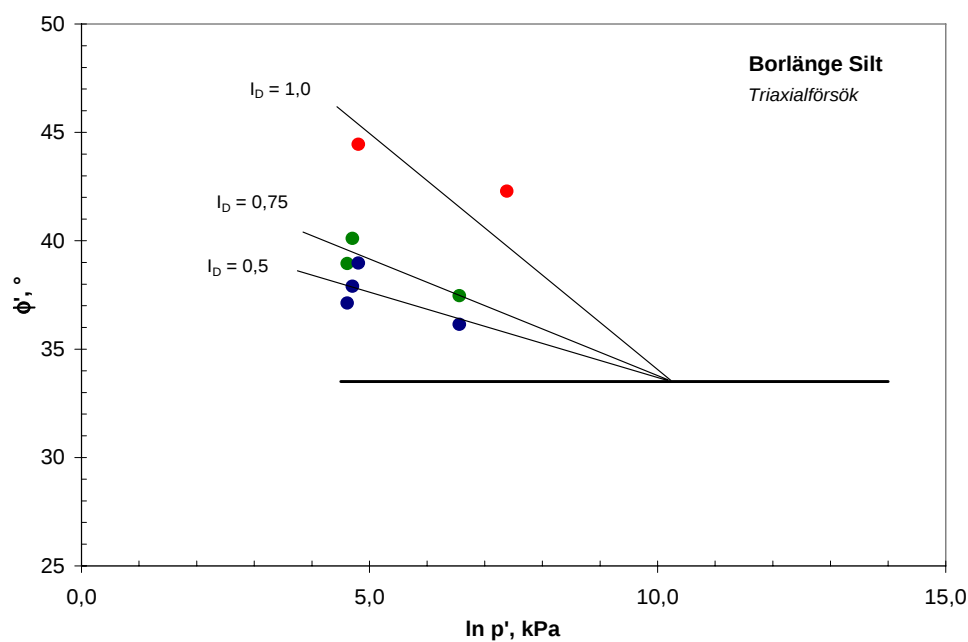


Fig. 22. Modell för friktionsvinkelns variation i triaxialförsök på silt från Borlänge.

Resultaten sprider mer än för sanden, vilket delvis kan antas bero på att endast ett begränsat antal försök har ingått i modellen och att enskilda resultat därmed fått större inverkan.

Direkta skjuvförsök

Fem direkta skjuvförsök utfördes på silten. Tre av försöken utfördes med det effektiva normaltrycket 50 kPa och med lös, medelfast respektive fast lagring. De andra två försöken utfördes med medelfast lagring och normaltrycken 500 respektive 1000 kPa. Försöken resulterade i mycket krumma skjuvspännings - deformationskurvor och inget av försöken gav något klart uttalat brott trots att de drevs till som mest 0,45 radianers vinkeländring, Fig. 23. Normalt utvärderas brott vid 0,15 radianers vinkeländring om inget verkligt brott inträffat dessförinnan, (SIS 1991). Detta är dock inget direkt mått på hållfasthet utan ger bara en uppfattning om vad som kan utnyttjas inom ett visst deformationskriterium.

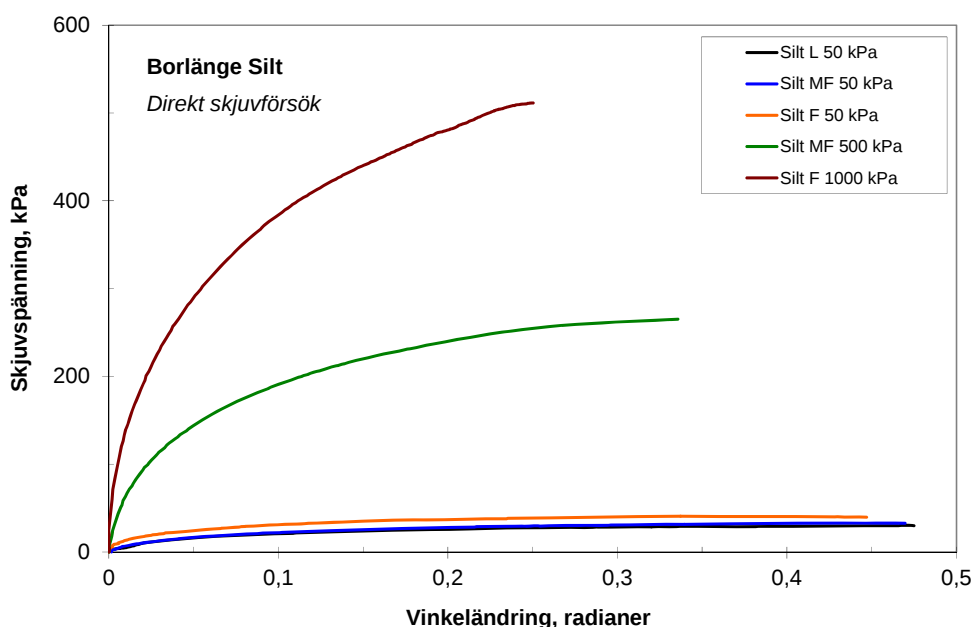


Fig. 23. Uppmätta samband mellan skjuvspänning och vinkeländring i direkta skjuvförsök på silt från Borlänge.

De uppmätta sambanden mellan volymändring och horisontell förskjutning matchade inte de uppmätta skjuvspännings-deformationssambanden, speciellt inte vid mycket stora vinkeländringar där volymen minskade kraftigt utan att detta avspeglades i uppmätt skjuvspänning. Det senare uppstod dock vid vinkeländringar långt utanför apparatens normala arbetsområde. Eftersom inga brott utvecklades har ett försök gjorts att utvärdera friktionsvinkeln vid kritisk lagring från uppmätta värden på friktionsvinkel och dilatans inom partier av kurvorna där dessa verkar motsvara ett normalt skjuvförlopp. Det så utvärderade värdet på ϕ'_{cv} blev strax över 30 grader, (30,8°) men får betraktas som mycket osäkert, Fig. 24.

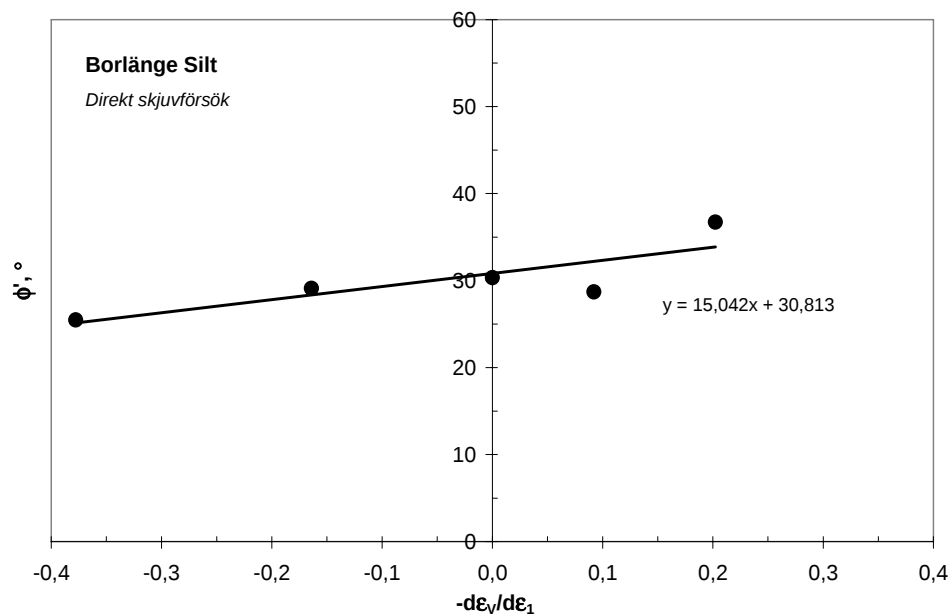


Fig. 24. Utvärdering av friktionsvinkel vid konstant volym ur direkta skjuvförsök på silt från Borlänge.

Eftersom inga brott inträffade i de direkta skjuvförsöken är det inte möjligt att skapa en modell för friktionsvinkeln variation liknande den som används för sand. I Fig. 25 har resultaten ritats upp som skjuvspänning mot effektivt normaltryck där skjuvspänningen värderats ut vid 0,15 radianers vinkeländring. En grov utvärdering skulle på detta vis ha givit en friktionsvinkel av cirka 24 grader, vilket är långt under värdet för kritisk lagring trots att materialet i de flesta försöken var medelfast lagrat. Endast i försöket med lägst normaltryck och fastaste lagring kom den utvärderade friktionsvinkeln över 30 grader, men den var ändå lägre än vad som skulle kunna förväntas från empiri. Försöksresultaten tyder på att de i hög grad påverkats av glidning mellan jorden och filterstenarna i stämplarna samt eventuellt också utpressning av material mellan ringarna som skulle hålla provdiametern konstant.

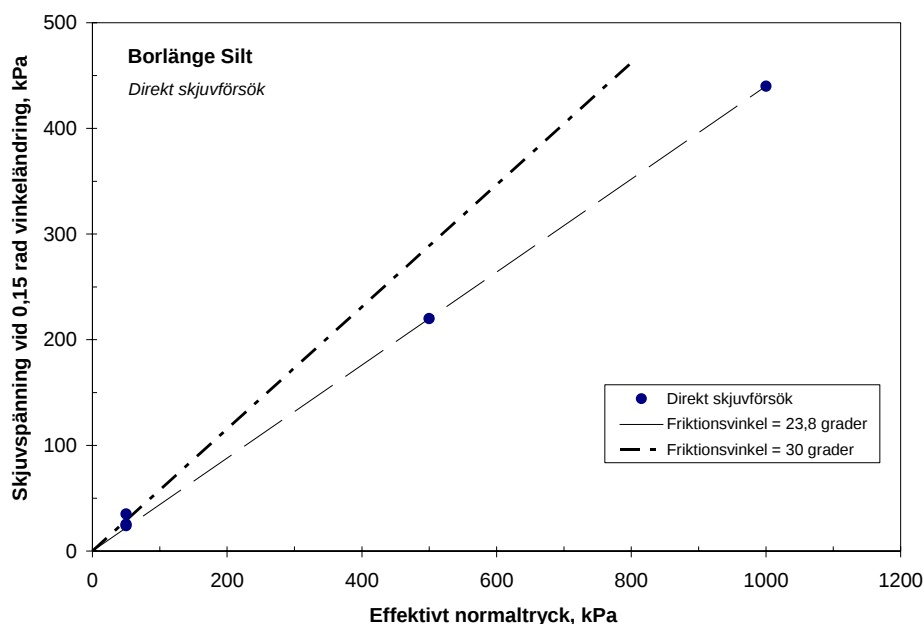


Fig. 25. Hållfasthetsvärden utvärderade vid 0,15 radianers vinkeländring i direkta skjuvförsök på silt från Borlänge.

Skjuvboxförsök

Sammanlagt utfördes tio skjuvboxförsök; fem med ledad tryckplatta och fem med styrd tryckplatta. I varje serie utfördes tre försök med ett effektivt vertikalltryck av 53 kPa och lös, medelfast respektive fast lagring. Dessutom utfördes ett försök med effektivt vertikalltryck av 503 kPa och medelfast lagring samt ett med effektivt vertikalltryck av 1043 kPa och fast lagring. I de flesta fall uppmättes brott inom en förskjutning mellan boxhalvorna av 1,5 – 4,5 mm, men i de lösast lagrade proverna uppstod inget klart markerat brott under försöken. Brottvärdena blev i stort desamma i de båda försöksserierna, men kurvformerna skiljde något mellan försök med ledad och styrd tryckplatta, Fig. 26. Relationerna mellan kurvorna berodde på om proverna var löst eller fast lagrade.

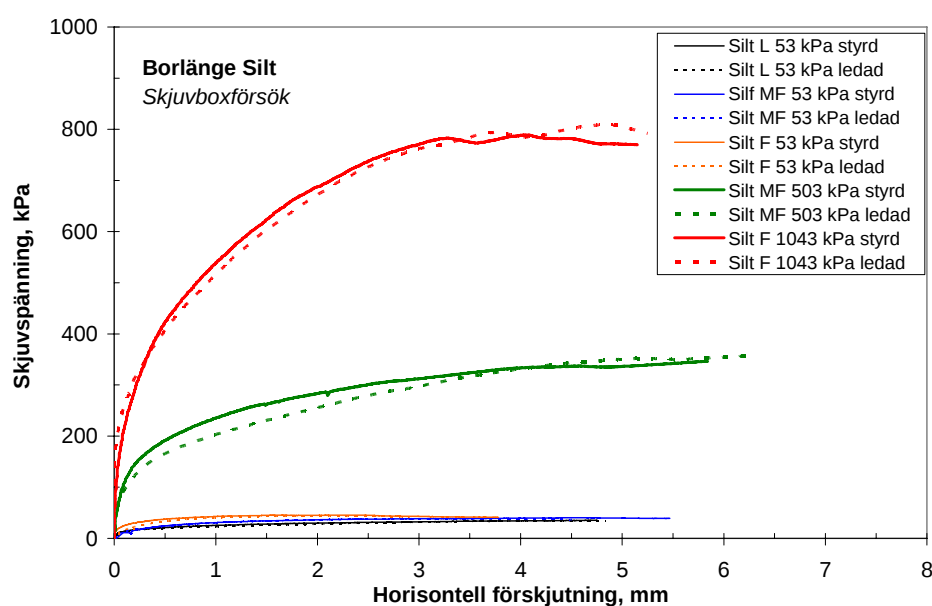


Fig. 26. Skjuvspännings-förskjutningssamband i skjuvboxförsök på silt från Borlänge.

Trots att de flesta proverna var fast eller medelfast lagrade uppmättes i huvudsak kontraktion, dvs. volymminskning, under skjuvförloppen. De enda undantagen var de fast lagrade proverna med det lägsta normaltrycket. De medelfast lagrade proverna med samma normaltryck uppvisade en svag dilatation vid själva brottet men i huvudsak sammantryckning. En utvärdering av friktionsvinkeln vid konstant volym gav ett förhållandevis högt värde av cirka 34 grader, Fig. 27. Liksom för sandproverna var värdet högst för försök med ledad tryckplatta där speciellt försöken med löst lagrat material ger högre värden.

I skjuvboxförsöket medverkar endast en tunn zon i nivå med slitsen mellan boxhalvorna i skjuvförloppet. Volymändringen mäts dock som provets totala höjdförändring där

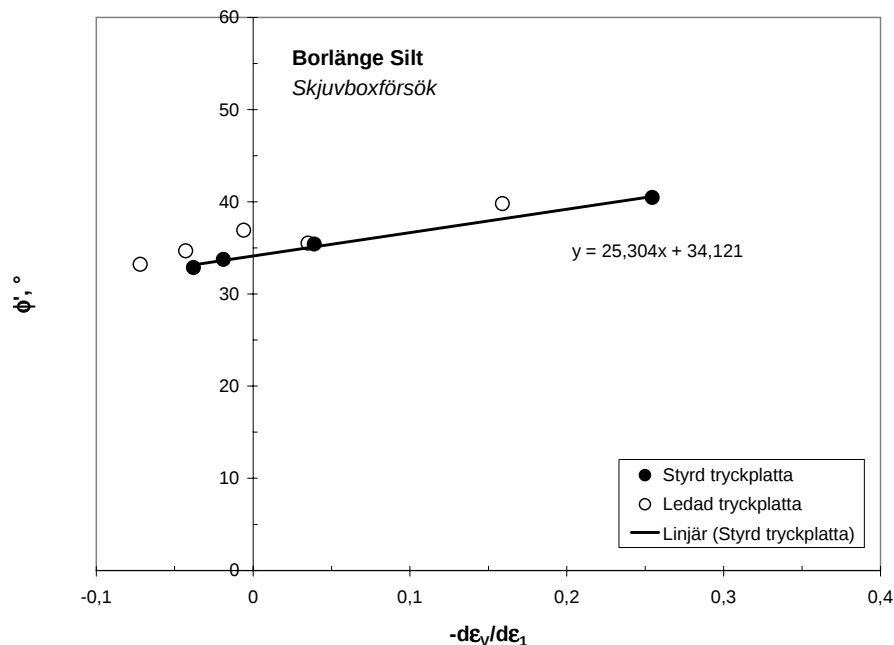


Fig. 27. Utvärdering av friktionsvinkel vid konstant volym ur skjuvboxförsök på silt från Borlänge. (Observera reservationer för relevans i text)

eventuella kompressioner i materialet över och under skjuvzonen, samt i fallet med den finkorniga silten också eventuellt utfall av material i spalten mellan boxhalvorna, inverkar. Båda dessa felkällor skulle i princip innebära att den uppmätta dilatansen är för liten i förhållande till vad som sker i skjuvzonen och att det utvärderade värdet på ϕ'_{cv} blir för högt.

För jämförelse med de direkta skjuvförsöken har försöksresultaten uppritats som maximal skjuvspänning mot det effektiva normaltrycket, Fig. 28. En grov utvärdering av friktionsvinkelns medelvärde ger då 36,6 grader jämfört med 23,8 grader i de direkta skjuvförsöken vid ungefär motsvarande spänningsnivåer och lagringstätheter.

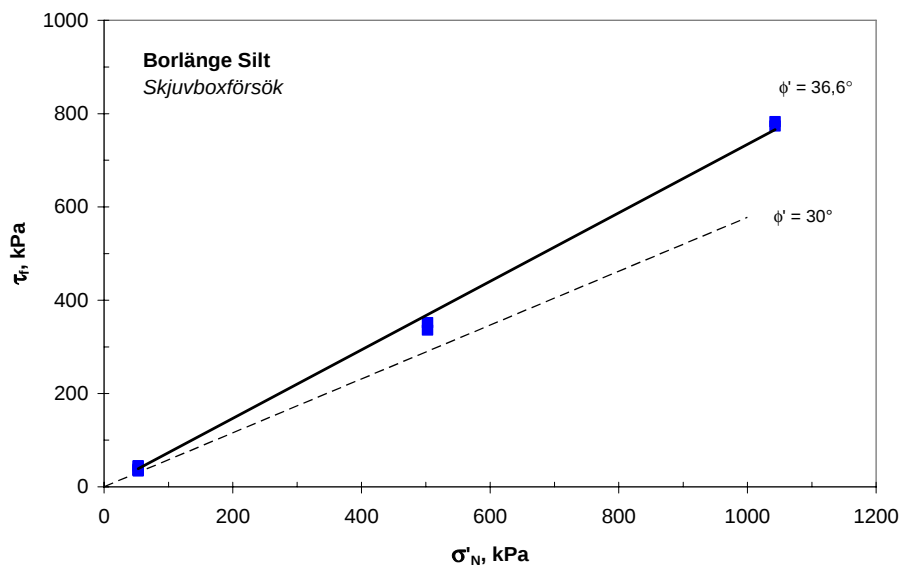


Fig. 28. Uppmätt maximal skjuvspänning mot effektivt normaltryck i skjuvboxförsök på silt från Borlänge.

För att försöka skapa en modell av friktionsvinkelns variation med lagringstäthet och spänningsnivå har försöken delats in i grupper med avseende på lagringstätheten. Ett antagande har gjorts att friktionsvinkeln vid konstant volym utvärderad i försök med direkt skjuvning motsvarar ett normalt värde av cirka 29 grader (t.ex. Börgesson 1981), vilket också motsvarar vad som beräknas utifrån resultaten från triaxialförsöken. De utvärderade friktionsvinklarna har sedan justerats med avseende på lagringstätheten på samma sätt som tidigare beskrivits för sand. Resultaten ger en väl samlad bild, men det skall observeras att den bygger på det antagna värdet av ϕ'_{cv} . Resultaten motsvarar också väl vad som kan förväntas genom omräkning av de samband som utvärderades ur triaxialförsöken, Fig. 29.

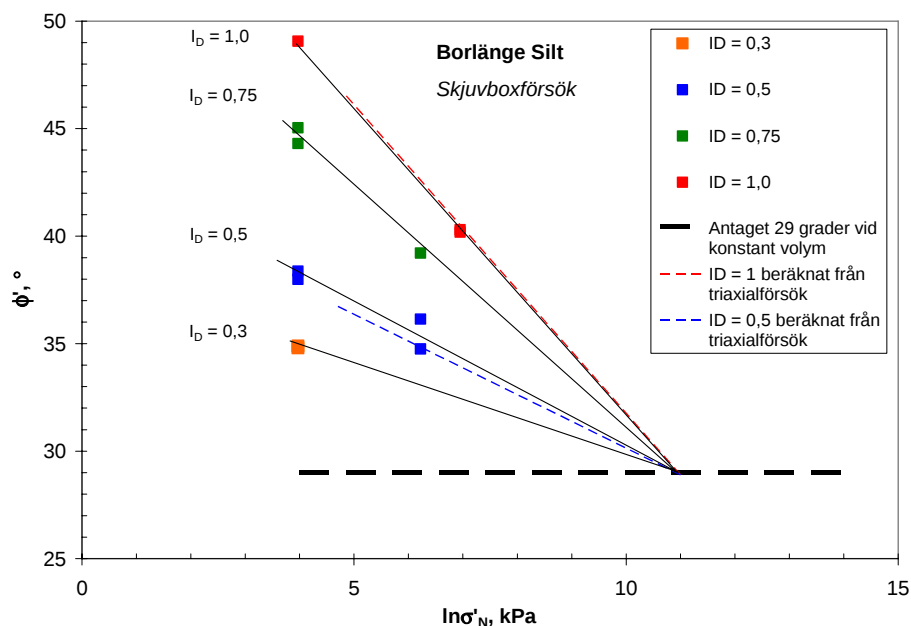


Fig. 29. Modell för friktionsvinkelns variation med lagringstäthet och spänningsnivå i den använda silten från Borlänge baserad på resultat från skjuvboxförsök och en antagen friktionsvinkel vid konstant volym.

4.3.3 Lera

Triaxialförsök

Fem dränerade triaxialförsök utfördes på den ödometerkonsoliderade leran. I triaxialapparaten konsoliderades proverna först för en effektiv vertikalspänning av 260 kPa och en effektiv horisontalspänning av 160 kPa. Ett av proverna fick behålla dessa spänningar som startvärden medan de andra avlastades till isotropa spänningar av 20, 40, 80 och 120 kPa och fick anpassa sig till dessa. Efter att alla signifikanta längd- och volymändringar upphört trycktes proverna axiellt med konstant kompressionshastighet.

I försöken med låg horisontalspänning, och där proverna således var överkonsoliderade, inträffade ett markerat brott inom 2-4 % axialdeformation. För prover med höga horisontalspänningar uppstod markerade knäckar på kurvorna efter en mindre axialdeformation, varefter den effektiva vertikalspänningen och skjuvspänningen endast långsamt ökade med vidare kompression av provet, Fig. 30. Detta kan relateras till att den effektiva vertikalspänningen överskred det effektiva förkonsolideringstrycket och att volymändringen därmed ökade markant. Resultaten antyder att proven inte var helt homogena eftersom de ur vertikalspänning-volymändringskurvorna utvärderade förkonsolideringstrycken varierade mellan cirka 260 – 326 kPa. Om detta berodde på ursprungsprovet, provhanteringen eller det lite speciella konsolideringsförfarandet där alla prover utom ett fick starta vid isotropa spänningar istället för simulerade in-situspänningar vid avlastning är svårt att bedöma. Normalt skulle den effektiva vertikalspänningen i prover med samma förkonsolideringshistoria ha nått upp till samma förkonsolideringstryck i alla prover där skjuvbrott inte inträffat dessförinnan, t.ex SGI Rapport Nr 12 (Larsson 1981).

Kurvorna för skjuvspänning mot axiell kompression antyder att brott skulle inträffat efter 12-14 % axiell deformation även för proverna med de högsta horisontalspänningarna. Detta motsägs av de uppmätta sambanden mellan volymändring och vertikal kompression där kurvorna på intet sätt planat ut vid detta stadium, Fig. 31. Det skenbara brottet får snarare tolkas som att antagandet att provets area förändras homogent utefter hela provets längd inte längre gäller och att tolkningen därmed inte längre är relevant. Detta antagande styrks av provens utseende efter försöken.

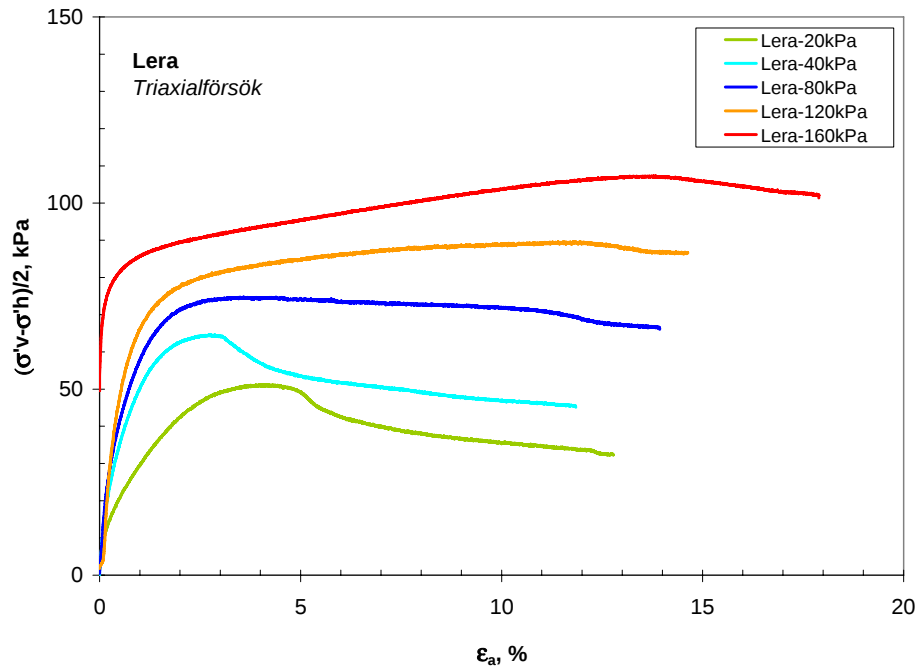


Fig. 30. Uppmätta skjuvspännings- deformationssamband i triaxialförsök på lera.

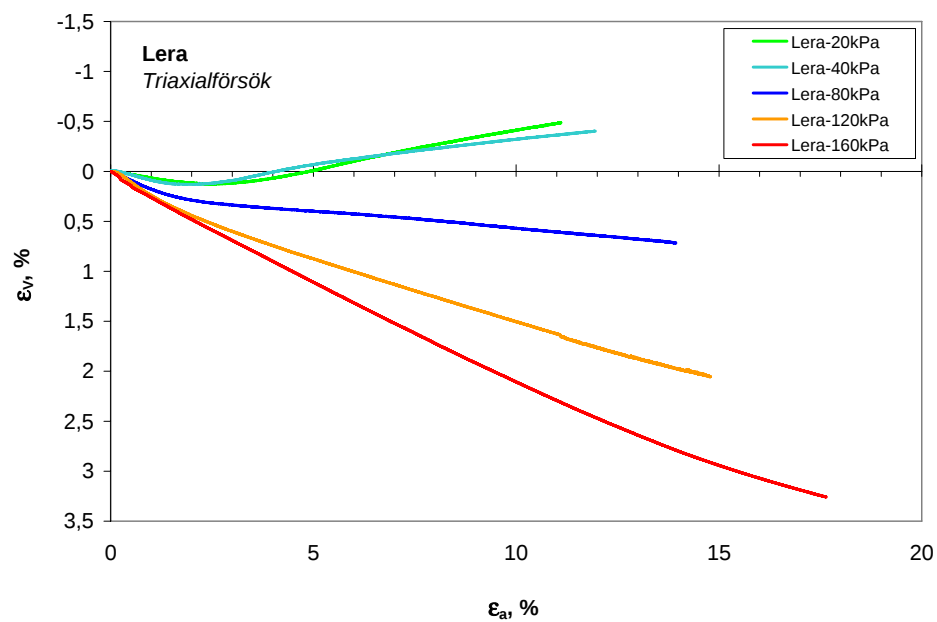


Fig. 31. Uppmätta samband mellan axiell kompression och volymändring i triaxialförsök på lera.

Utvärderingen av friktionsvinkeln vid konstant volym gav ett värde på ϕ'_{cv} av cirka 35 grader, Fig. 32. För försöken med högre horisontalspänningar har värdena på mobiliserad friktionsvinkel och dilatationshastighet tagits strax innan de skenbara brotten och där utvärderingen fortfarande kan antas vara relevant.

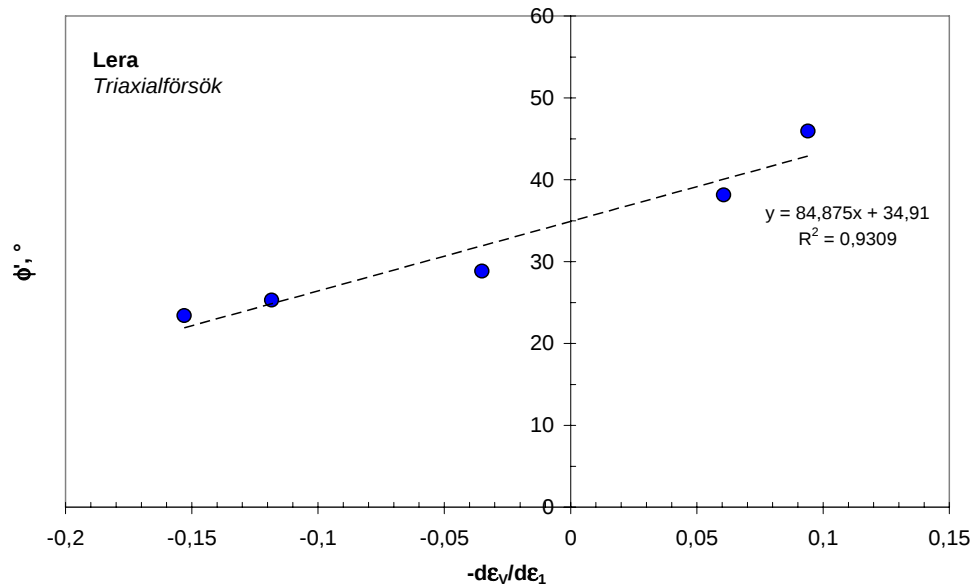


Fig. 32. Utvärdering av friktionsvinkel vid konstant volym ur triaxialförsök på lera.

Den uppmätta dränerade skjuvhållfastheten har uppritats mot $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ som vid normal uppritning av spänningvägar i triaxialförsök. Det skall här observeras att punkterna för de högsta spänningarna inte motsvarar brott utan skulle ha sakta vandrat uppåt om större deformationer tillåts. De lägsta punkterna motsvarar verkligt brott och dessa ligger något över de empiriska värden som normalt används och som betraktas som varande "på säkra sidan", Fig. 33.

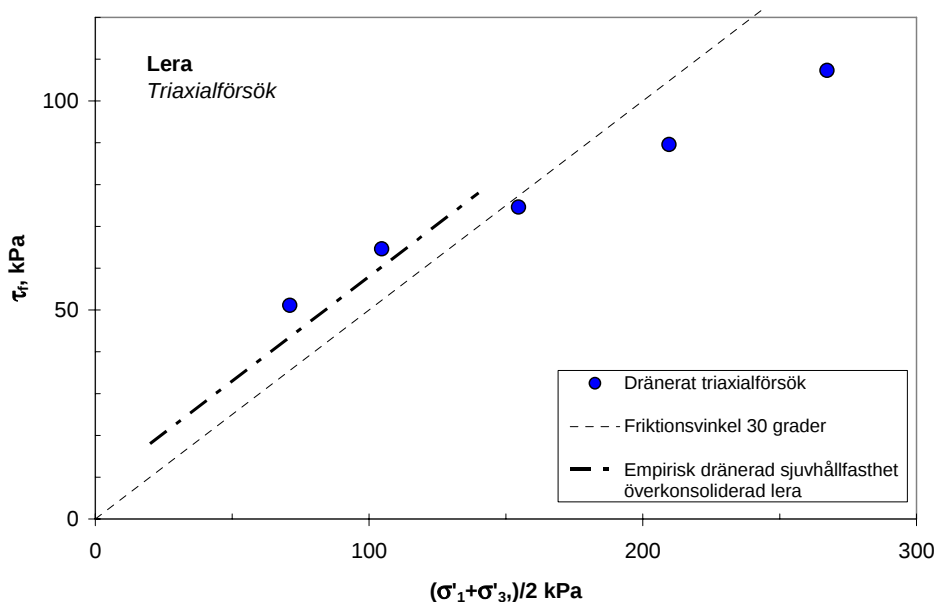


Fig. 33. Skjuvhållfasthetens variation med spänningsnivån i dränerade triaxialförsök på lera.

Direkta skjuvförsök

De fem proverna för de direkta skjuvförsöken konsoliderades först för effektiva vertikalktrycket 260 kPa. Fyra av dem avlastades sedan till 20, 40, 80 respektive 160 kPa. När alla vertikallrörelser avstannat skjuvades sedan proverna genom att den övre stämpeln försköts horisontellt med konstant hastighet. Inga distinkta brott uppstod under försöken, Fig.34. I de två försöken med lägst effektivt vertikalktryck, dvs. de mest överkonsoliderade proverna, uppstod mycket svagt markerade toppvärden efter 0,06 respektive 0,11 radianers vinkeländring och praktiskt taget konstanta värden på skjuvspänningen därefter. För övriga prover uppstod inga brott inom det normala arbetsområdet för försöket, som är 0,15 radianers vinkeländring, och inte heller därefter trots att ett par försök drevs ända till 0,45 radianers vinkeländring. De uppmätta skjuvspännings-deformationskurvorna motsvarades inte helt av de uppmätta skjuvdeformations-volymändringskurvorna. En inledande kraftig dilatans vid de låga normaltrycken motsvarades inte av någon uttalad hållfasthetsspic vid brott och ökande volymändringar mot slutet av de försök som drevs långt motsvarades inte av någon sjunkande mobiliserad hållfasthet. Det kan därför ifrågasättas om inte en del av horisontalförskjutningarna skett som glidning mellan provet och filterstenarna i stämplarna.

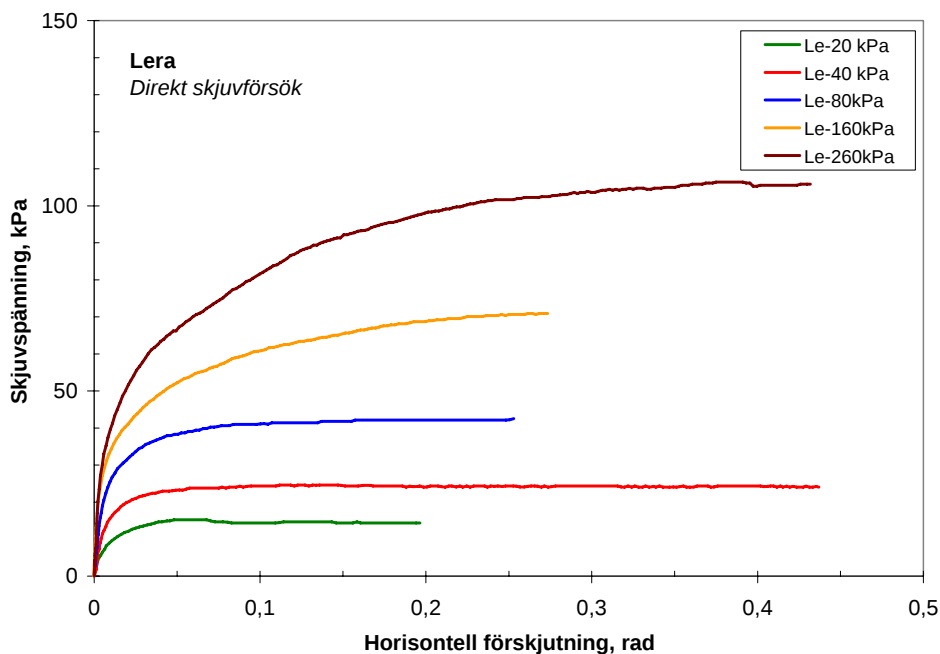


Fig. 34. Uppmätta skjuvspännings- förskjutningssamband i direkta skjuvförsök på lera.

Den utvärderade friktionsvinkeln vid konstant volym ϕ'_{cv} blev cirka 30 grader, Fig. 35. Om detta värde är helt relevant för lera eller påverkas av friktionen mellan lera och filterstenarna i stämplarna är svårt att bedöma. Vid utvärderingen har bortsetts från extremvärden vid mycket stora deformationer långt utanför apparaturens normala arbetsområde, dvs. långt över 0,15 radianers vinkeländring hos provet.

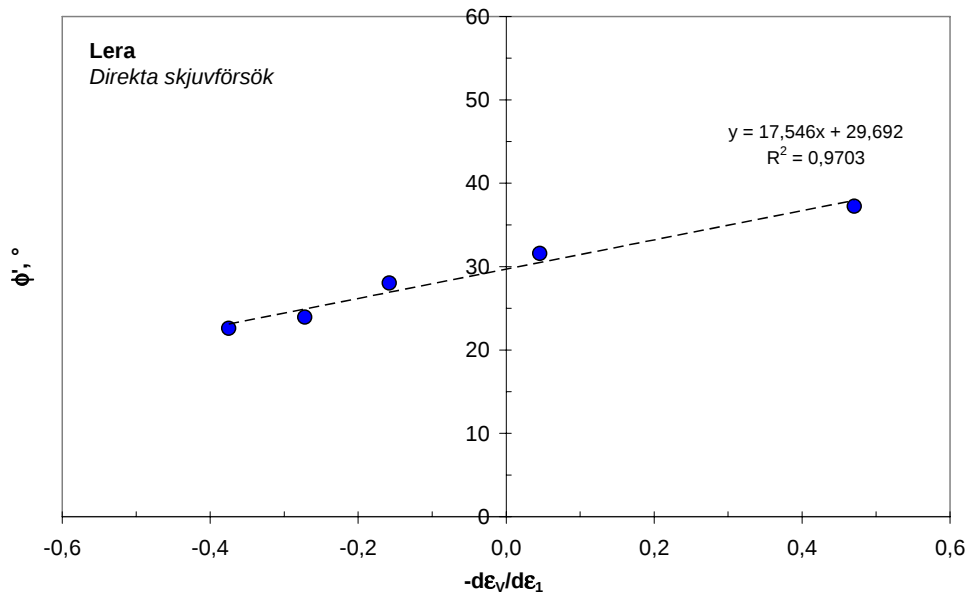


Fig. 35. Utvärdering av friktionsvinkel vid konstant volym ur direkta skjuvförsök på lera.

Den uppmätta skjuvhållfastheten har uppritats mot den effektiva normalspänningen. Mönstret för hållfasthetsvariationen med spänningsnivå följer i stort det normala, men hållfastheten vid låga effektiva normalspänningar når inte helt upp till vad som empiriskt kan förväntas, Fig. 36. Detta är i linje med att dilatanseffekterna inte avspeglas i några hållfasthetsspicar och att glidning kan ha skett i gränsytorna mellan lera och filterstenar där inga större dilatanseffekter kan förväntas. Detta är dock inte i överensstämmelse med tidigare erfarenheter från försökstypen, jämför t.ex. SGI Rapport Nr 12 (Larsson 1981), men dessa härrör från betydligt lösare leror med lägre förkonsolideringstryck.

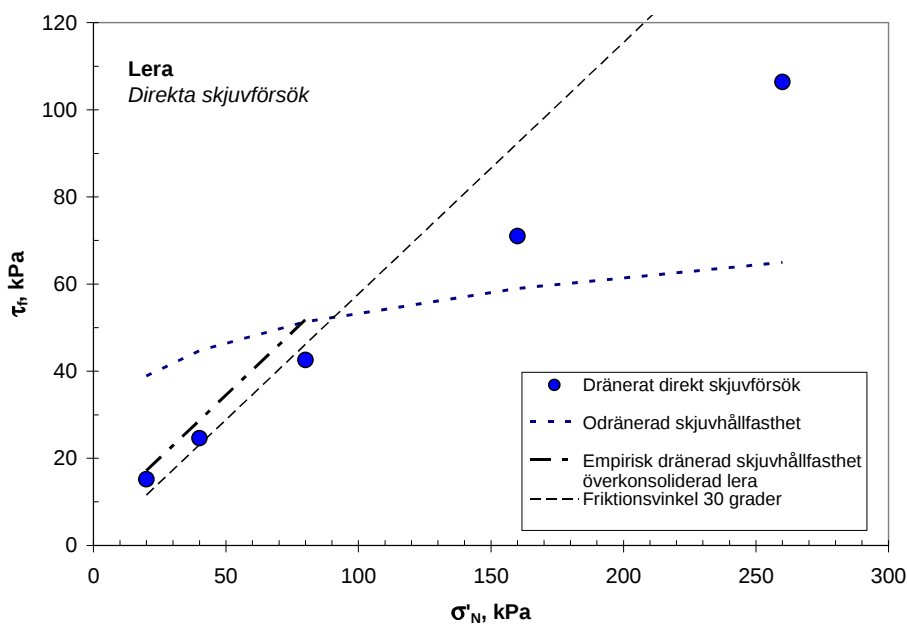


Fig. 36. Variation i dränerad hållfasthet med spänningsnivå i direkta skjuvförsök på lera.

Skjuvboxförsök

De fem proven i skjuvboxförsöken konsoliderades på samma sätt som de i de direkta skjuvförsöken, bortsett från att det effektiva vertikalltrycket 40 kPa ersattes av 50 kPa. När boxhalvorna separerades tillkom 3 kPa från den övre boxhalvans vikt. För att kunna utföra försöken med så låg hastighet att proven skulle vara helt dränerade fick apparaturen för påföring av skjuvdeformationen förses med en ny utväxling. Skjuvboxförsök utförs normalt inte på så lågpermeabla och lösa leror som de svenska och före eventuella försök måste kontrolleras att den aktuella utrustningen klarar att utföra försök med så låg hastighet som krävs.

Skjuvboxförsöken resulterade i skjuvspännings – förskjutningskurvor med klart markerade brott inom 0,5 mm förskjutning i försöken med lägst vertikalltryck, Fig. 37. Försöken med högre vertikalltryck resulterade i krumma kurvor som sakta planade ut alltefter som horisontalrörelsen ökade. I detta fall motsvarades de uppmätta skjuvspänningsdeformationskurvorna i princip av vad som kunde förväntas från de uppmätta volymändrings-förskjutningskurvorna.

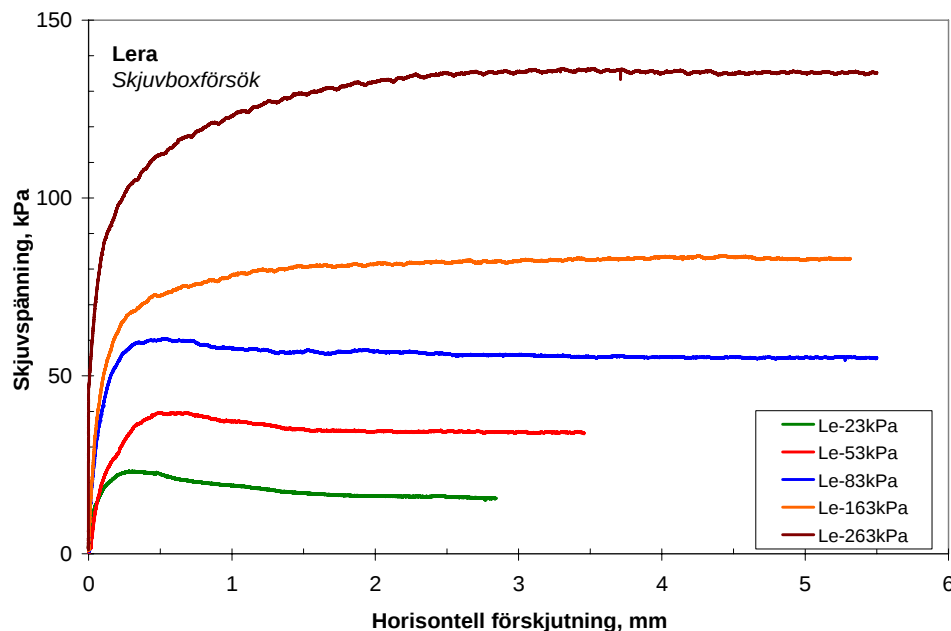


Fig. 37. Uppmätta skjuvspännings-förskjutningssamband i skjuvboxförsök på lera.

Den utvärderade friktionsvinkeln vid kritisk lagring ϕ'_{cv} var cirka 30 grader, dvs. ungefär densamma som i de direkta skjuvförsöken, Fig. 38.

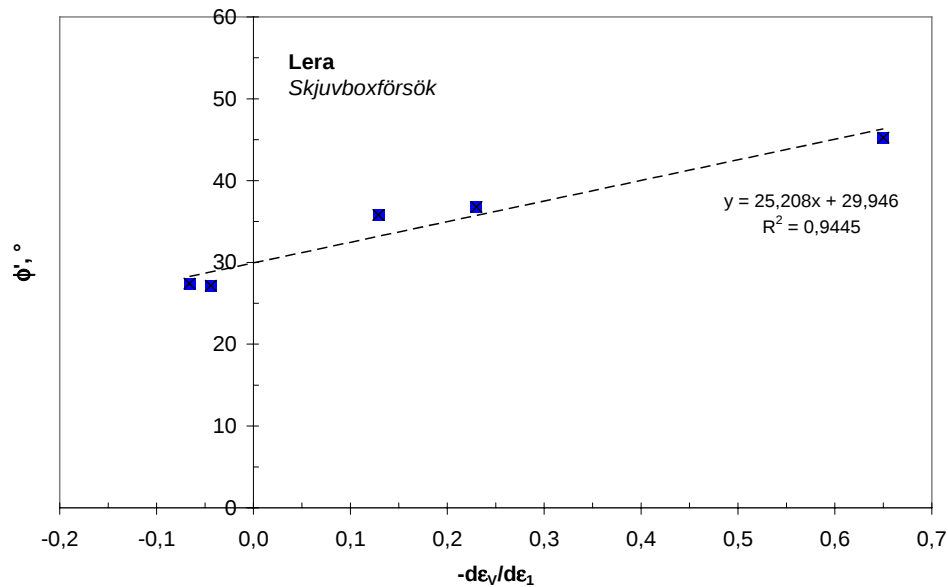


Fig. 38. Utvärdering av friktionsvinkel vid konstant volym ur skjuvboxförsök på lera.

Hållfasthetsvärdena uppmätta mot det effektiva vertikalktrycket visar en normal variation mellan uppmätt hållfasthet och spänningsnivå, Fig. 39. I detta fall ligger värdena för överkonsoliderad lera strax över den empiriska dränerade hållfastheten.

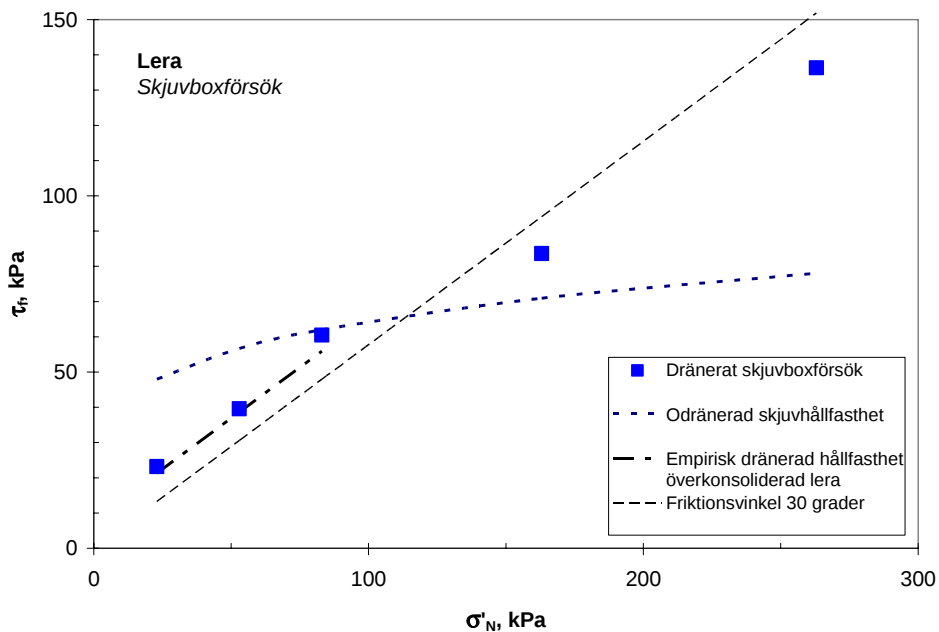


Fig. 39. Variation hos dränerad skjuvhållfasthet med spänningsnivå i skjuvboxförsök på lera.

5 SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

Allmänt

Olika provningsmetoder ger olika resultat beträffande utvärderad dränerad hållfasthet (friktionsvinkel). Teoretiskt finns möjligheten att räkna om värden från en typ av försök till vad som skulle fås i andra typer av försök, men felkällor i försöken och deras utvärdering gör att detta inte är möjligt eller blir grovt då enkla skjuvförsök eller skjuvboxförsök används som försöksmetod.

Triaxialförsök

Generellt är triaxialförsök att föredra för bestämning av dränerad hållfasthet eftersom spänningssituationen i försöken är känd och de därmed ger den säkraste utvärderingen. Metoden ger också den bästa möjligheten till en noggrann bestämning av lagringstätheten i inpackade prover. Det är också möjligt att med ett fåtal triaxialförsök bestämma parametrar som behövs för att skapa en fullständig modell för hur hållfastheten i en friktionsjord varierar med lagringstäthet och spänningsnivå. Empiriskt och teoretiskt underlag finns också för att räkna om resultaten från triaxialförsök till belastningsfallen direkt skjuvning och plant töjningstillstånd (plane-strain), vilket dock fordrar att också friktionsvinkeln vid konstant volym utvärderats. För lera kan försöket användas för att bestämma de dränerade hållfasthetsparametrarna inom det överkonsoliderade spänningsområde där den dränerade skjuvhållfastheten ofta blir dimensionerande.

Direkta skjuvförsök

Den enkla svenska direkta skjuvapparaten är avsedd för försök på lera (och organisk jord) med måttliga förkonsolideringstryck och användningsområdet bör begränsas till denna typ av jord. Direkta skjuvförsök på sand och silt kan dock bli aktuella, t.ex. för försök med cyklisk belastning. I dessa fall skall speciella, (t.ex. nålförsedda), filterstenar som tillförsäkrar full friktion mellan prov och stämplor användas. Denna typ av filterstenar bör också användas för fastare lera, men man får då samtidigt se till att ostörda prover inte luckras upp av de penetrerande nålarna. För sand och silt bör dessutom spiralarmade gummimembran användas för att hålla provdiametern konstant, som i den mer avancerade norska modellen av utrustningen. Även i dessa fall måste man beakta att felkällor i försök och utvärdering kan medföra osäkra värden. Dessa antas normalt vara något för låga även efter att de teoretiska skillnaderna på grund av utvärderingsmetoden beaktats.

Skjuvboxförsök

Skjuvboxförsöket är ett vanligt försök, dock främst utomlands. Det är relativt enkelt att utföra och provdimensionerna kan göras mycket stora så att även mycket grovt material kan provas. Försöket och dess utvärdering innehåller dock många felkällor och resultaten måste betraktas med försiktighet. Försökets användning bör begränsas till sand och grövre jord. Det bör helst utföras med styrd tryckplatta i enlighet med rekommendationerna från ETC5 (1998). I silt tillkommer extra felkällor på grund av stora icke beaktade deformationer i provet och apparaturen är normalt inte avsedd för den typ av lera som vanligen provas i Sverige. Någon kommersiell utrustning som kan användas för de provstorlekar som normalt tas upp här, (dvs. kolvborrprover), finns veterligt inte heller. För de fasta delprover av lera som i denna undersökning trimmats ut ur ett stort prov uppmättes rimliga värden på hållfastheten i det överkonsoliderade spänningsområdet. Felkällorna i utvärderingen och försöket medför annars att såväl för höga som för låga

värden kan utvärderas även efter att de teoretiska skillnaderna på grund av utvärderingsmetoden beaktats. Resultaten måste därför behandlas med försiktighet.

6 REFERENSER

Airey, D. W. and Wood, D. M. (1987). An evaluation of direct simple shear tests on clay. *Geotechnique* vol. 37, No. 1, pp 25-36.

Barton, N. and Kjaernsli, B. (1981). Shear strength of rockfill. *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 107, No. GT7, pp 873-891. Också i Norges Geotekniske Institutt, Publikasjon Nr. 136, Oslo.

Bishop, A. W. (1966). Strength of soils as engineering materials. 6th Rankine Lecture. *Geotechnique*, No. 2, pp 91-130.

Bjerrum, L. (1961). The effective shear strength parameters of sensitive clays. *Proceedings, Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, Paris.

Bjerrum, L. and Landva, A. (1966). Direct simple shear tests on a Norwegian quick clay. *Geotechnique*, Vol. 16, No. 1, pp 1-20. Också i Norges Geotekniske Institutt, Publikasjon Nr. 70, Oslo.

Bolton, M. D. (1986). The strength and dilatancy of sands. *Geotechnique*, Vol. 36, No. 1, pp 65-78.

Börgesson, L. B. (1981). Mechanical properties of inorganic silt. Avhandling. Institutionen för Geoteknologi. Högskolan i Luleå. 1981:09 D.

Cerato, A. B. and Lutenecker, A. J. (2006). Specimen size and scale effects of direct shear box tests of sands. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol. 29, No. 6, pp 1-10.

Dounias, G. T. and Potts, D. M. (1993). Numerical analysis of drained direct and simple shear tests. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 119, No. 2, pp 1870-1891.

ETC5 (1998). Recommendations of the ISSMGE for geotechnical laboratory testing. Prepared by the European regional technical committee ETC5 'Laboratory testing'. Beuth Verlag. Berlin.

Head, K. H. (1998). Manual of soil laboratory testing: Effective stress tests. John Wiley & Sons, New York.

ISO/TS 17892-9:2004. Geotechnical investigation and testing -- Laboratory testing of soil -- Part 9: Consolidated triaxial compression tests on water-saturated soils. Swedish Standards Institute, SIS, Stockholm.

Jewell, R.A. and Wroth, C. P. (1987). Direct shear tests on reinforced sand. *Geotechnique*, Vol. 37, No. 1, pp 53-68.

Kjellman, W. (1951). Testing the shear strength of clay in Sweden. *Geotechnique*, Vol. 2, No. 3, pp 225-232.

- Larsson, R. (1981).** Drained behaviour of Swedish clays. Statens geotekniska institut, Rapport Nr. 12, Linköping.
- Larsson, R. (1989).** Hållfasthet i friktionsjord. Statens geotekniska institut, Information Nr. 8, Linköping.
- Larsson, R. (1995).** Jordmaterialet silt. Statens geotekniska institut, Rapport Nr. 49, Linköping.
- Larsson, R. (2004).** Direkta skjuvförsök – en vägledning. Svenska geotekniska föreningen, SGF, Notat 2:2004
- Larsson, R., Åhnberg, H. och Löfroth, H. (2012).** SGI:s nya stora provtagare för ostörda prover i lös finkornig jord. Bygg och Teknik, Vol. 104, No 1, pp 43-48.
- Liu, S. H. (2006).** Simulating a direct shear box test by DEM. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 43, pp 155-168.
- Nguyen, V. U. and Ihle, U. W. (1980).** Design of a large field shear box. CSIRO Earth Resources. Applied Geomechanics. R 26.
- Rowe, P. W. (1962).** The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact. Royal Society Academy. Proceedings 269:500-527, London.
- SIS (1991).** SS 27127 Geotekniska provningsmetoder – Skjuvhållfasthet – Direkta skjuvförsök. Swedish Standards Institute, SIS, Stockholm.
- SIS (2004).** ISO/TS 17892-9: 2004 Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 9: Consolidated triaxial compression tests on water-saturated soils. Swedish Standards Institute, SIS, Stockholm.
- SIS (2007).** SS-EN 1997-2:2007 Eurokod 7: Dimensionering av geokonstruktioner - Del 2: Marktekniska undersökningar. Swedish Standards Institute, SIS, Stockholm.
- Wroth, C. P. (1987).** The behaviour of normally consolidated clay as observed in undrained direct shear tests. Geotechnique, Vol. 37, No. 1, pp. 37-44.
- Zhang, L. and Thornton, C. (2007).** A numerical examination of the direct shear test. Geotechnique, Vol. 57, No. 4, pp 343-354.



Statens geotekniska institut
Swedish Geotechnical Institute

SE-581 93 Linköping, Sweden

Tel: 013-20 18 00, Int + 46 13 201800

Fax: 013-20 19 14, Int + 46 13 201914

E-mail: sgi@swedgeo.se Internet: www.swedgeo.se