



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE



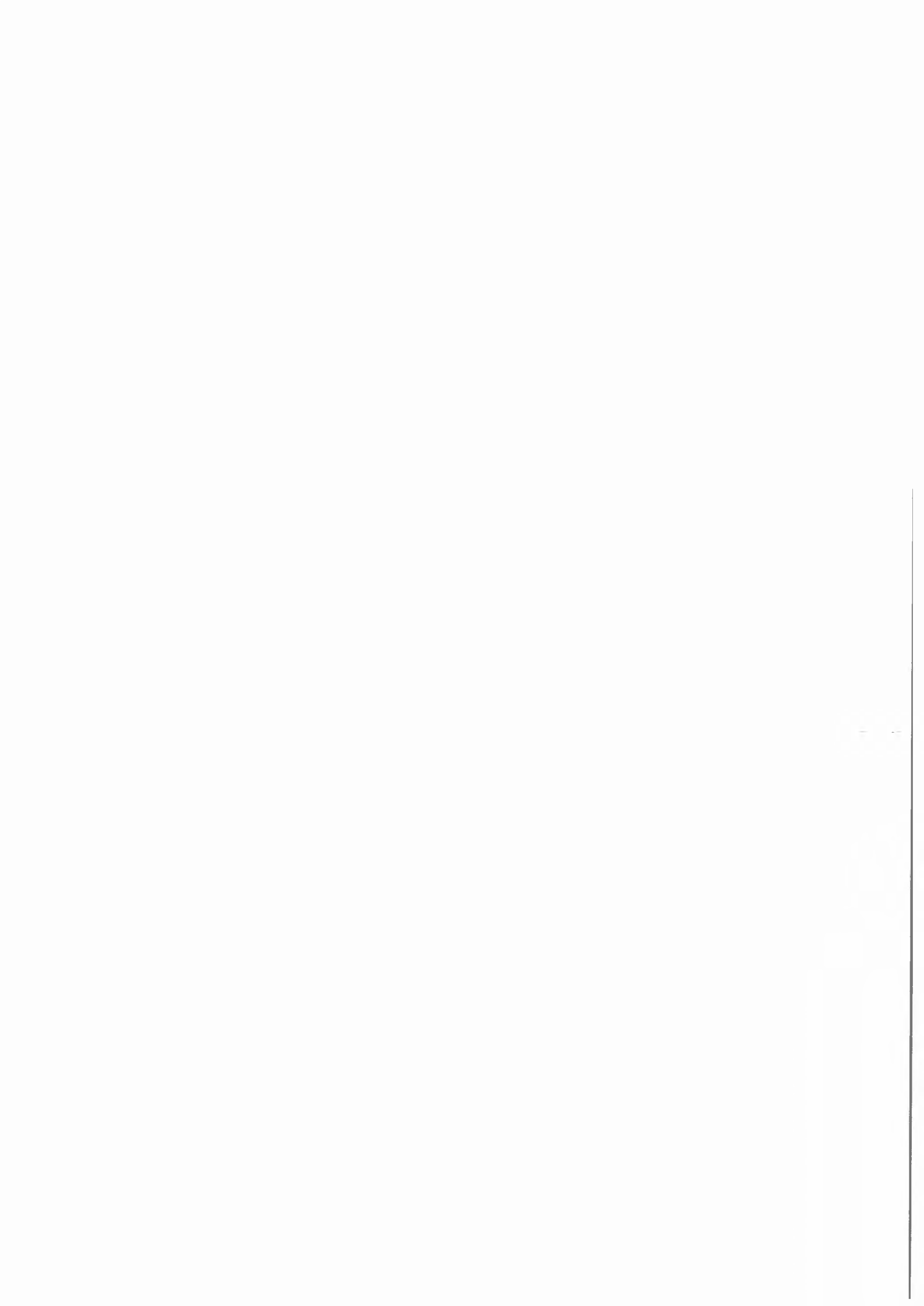
Skjuvhållfasthet

– utvärdering i kohesionsjord

ROLF LARSSON
GÖRAN SÄLLFORS
PER-EVERT BENGTTSSON
CLAES ALÉN
ULF BERGDAHL
LEIF ERIKSSON

Information 3

LINKÖPING 2007





STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

Information 3

Skjuvhållfasthet

– utvärdering i kohesionsjord

ROLF LARSSON
GÖRAN SÄLLFORS
PER-EVERT BENGTTSSON
CLAES ALÉN
ULF BERGDAHL
LEIF ERIKSSON

Statens geotekniska institut och Geo, Chalmers tekniska högskola

LINKÖPING 2007

Andra utgåvan – reviderad

Information	Statens geotekniska institut (SGI) 581 93 Linköping
Beställning	SGI, Informationstjänsten Tel: 013-20 18 04 Fax: 013-20 19 09 E-post: info@swedgeo.se Internet: www.swedgeo.se
ISSN	0281-7578
ISRN	SGI-INF--07/3--SE
Projektnummer SGI	12600
Dnr SGI	3-0510-0606

Förord

Denna skrift är en uppdatering av SGI Information 3 som gavs ut första gången 1984. I skriften informeras om hur olika försöksresultat och empiriska erfarenheter kan bedömas och vägas samman för att ge en så god bild som möjligt av hållfasthetsegenskaperna i kohesionsjord.

Det tillvägagångssätt som redovisas har skapats successivt under det fortlöpande arbetet med geotekniska problemställningar och allteftersom forskningsresultat och praktiska erfarenheter erhållits och tagits i beaktande.

Uppdateringen har gjorts med anledning av att nya forskningsresultat framkommit och av att de nya Europainormerna introducerats med delvis nya och formaliserade regler för hur hållfasthet bestäms genom provning (derived values) och hur olika värden och övrig kunskap vägs samman till en bedömd relevant hållfasthet. Denna kan, beroende på typ av jord och belastningsfall, vara en bedömd troligaste

hållfasthet i homogena jordprofiler där stora jordvolymen är involverade i potentiella glidytor eller brottzoner (best estimate) eller en försiktigt vald hållfasthet i fall med heterogena jordar och/eller små involverade jordvolymen (cautious selection). Avsikten har varit att få fram ett enhetligt och objektiva sätt att beakta den samlade svenska erfarenheten vid främst bedömningen av troligaste hållfastheten och hållfasthetsfördelningen i jordprofiler. Uppdateringen av denna skrift har samordnats med uppdateringen av Vägverkets anvisningar för bedömning av jords egenskaper. Föreliggande skrift koncentrerar sig dock till utvärderingen av skjuvhållfastheten i kohesionsjord, vilken ges en mer detaljerad beskrivning som också innefattar bakgrunden till det rekommenderade förfarandet.

Linköping och Göteborg i oktober 2007.

Författarna

Uppdateringen har gjorts med anledning av nya forskningsresultat och de nya Europainormerna.

Innehållsförteckning

1. Inledning	7
2. Beteckningar och symboler	8
3. Inledande besiktning och inhämtning av geologisk information	9
4. Empirisk erfarenhet	10
4.1 Allmänt	10
4.1.1 Bedömning av jords egenskaper	
4.1.2 Utvärdering av försöksresultat	
4.2 In situ spänningar	11
4.3 Förkonsolideringstryck	11
4.4 Modell för hållfasthets- och deformationsegenskaper	12
4.5 Hållfasthetsegenskaper	13
4.5.1 Odränerad skjuvhållfasthet	
4.5.2 Dränerad skjuvhållfasthet	
5. Bestämning av egenskaper genom provning	15
(härledda värden = derived values)	
5.1 Allmänt	15
5.2 In situ spänningar	16
5.3 Förkonsolideringstryck	17
5.4 Odränerad skjuvhållfasthet i normalkonsoliderad och svagt överkonsoliderad jord ...	17
5.4.1 Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet ur resultat från vingförsök i fält och fallkonförsök i laboratoriet	
5.4.2 Bedömning av provningsresultat med hjälp av Hansbos relation	
5.4.3 Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet ur CPT-sondering	
5.5 Odränerad skjuvhållfasthet i överkonsoliderad jord	19
5.5.1 Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet ur resultat från vingförsök	
5.5.2 Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet ur CPT-sondering	
5.6 Komplettering med mer avancerade laboratorieförsök	20
5.6.1 Bestämning av odränerad skjuvhållfasthet med direkta skjuvförsök	
5.6.2 Bestämning av anisotropa hållfasthetsegenskaper med triaxialförsök	
5.7 Bedömning av hållfasthetstillväxt vid konsolidering	21
5.8 Dränerad skjuvhållfasthet	22
6. Hållfasthet i silt och friktionsjord	23
6.1 Provning i fält	23
6.2 Laboratorieprovning	23
7. Val av odränerad eller dränerad skjuvhållfasthet	25
8. Sammanvägning av provningsresultat och empirisk erfarenhet	26
8.1 Allmänt	26
8.2 Sammanvägning och bedömning av odränerad skjuvhållfasthet	27
8.3 Bedömning av förkonsolideringstryck	28

9. Exempel	29
9.1 Undersökningar i djupa lerlager i Göteborg	29
9.2 Skjuvhållfasthet i störningskänslig lera i Östergötland	32
9.3 Lermorän	34
9.4 Slänt i sand, silt och sulfidjord	36
9.5 Jordprofil från mellersta Bohuslän	39
10. Referenser	42

Bilaga

Bakgrund till rekommendationer för utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet från vingförsök och CPT-sondering i fält och fallkonförsök i laboratoriet samt empiriska relationer för odränerad

skjuvhållfasthet	49
Inledning	49
Historisk utveckling fram till 1969	49
SGI:s korrektionsfaktor 1969	50
Bjerrums korrektionsfaktorer	51
Vidare studier av korrektionsfaktorer fram till 1984	51
SGI:s korrektionsfaktorer från 1984	52
Resultat av forskning om vingförsök	52
Empiriska relationer för odränerad skjuvhållfasthet i normalkonsoliderad och svagt överkonsoliderad jord	54
Jämförelse mellan empiriska relationer och brott i jord	56
Jämförelser mellan empiriska relationer och hållfasthetsvärden från vingförsök och fallkonförsök	56
Sammanställning av resultat och jämförelser med rekommenderad korrektion från 1984	57
Empirisk hållfasthet och utvärdering av skjuvhållfasthet från vingförsök i överkonsoliderad jord	59
Allmänt	
Generella jordmodeller	
Utvärdering av vingförsök i överkonsoliderad jord	
Utvärdering av vingförsök i lermorän	
Utvärdering av vingförsök och fallkonförsök i sulfidjord	61
Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet och förkonsolideringstryck från CPT-sondering	62
Allmänt	
Utvärdering av förkonsolideringstryck	
Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet	
Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet i lermorän	
Utvärdering av förkonsolideringstryck och odränerad skjuvhållfasthet i sulfidjord	

1. Inledning

Beräkningar för stabilitet och andra ingenjörsmässiga problem i kohesionsjord har i Sverige traditionellt baserats på odränerad skjuvhållfasthet bestämd genom vingförsök och fallkonförsök. Dessa värden kompletteras idag i hög utsträckning med hållfastheter utvärderade från CPT-söndering. De resultat som erhålls ur de olika försöken utvärderas och korrigeras med hjälp av empirisk erfarenhet för framtagning av värden på den odränerade skjuvhållfastheten (härledda värden = derived values).

De olika skjuvhållfasthetsvärdena sammanställs sedan och viktas med ledning av erfarenheter av hur relevanta de olika försöksmetoderna normalt är i den aktuella typen av jordprofil och jämförs dessutom med den hållfasthet som skulle kunna förväntas råda med ledning av de aktuella geologiska förhållandena. I vissa fall kompletteras bestämningarna med direkta skjuvförsök i laboratoriet. Efter denna ingenjörsmässiga bedömning erhålls en bedömd troligaste skjuvhållfasthet och hållfasthetsprofil mot djupet (best estimate). Den odränerade skjuvhållfastheten är som regel anisotrop och den på ovanstående vis framtagna hållfastheten avser en medelskjuvhållfasthet. Vid mer detaljerade beräkningar görs en ytterligare ingenjörsmässig bedömning av medelskjuvhållfasthetens relevans i det aktuella fallet och vid behov utförs också mer avancerade laborieförsök.

I heterogena jordar och där endast mindre jordvolymer är involverade i den potentiella glidyten eller brottzonen måste en större försiktighet iakttas och ett hållfasthetsvärde väljs då inom det lägre spridningsområdet som med stor sannolikhet kan påräknas även om lokala svaghetszoner blir styrande (cautious selection).

Den odränerade skjuvhållfastheten är dimensionerande i främst normalkonsoliderad och svagt överkonsoliderad jord samt vid belastningsfall med mycket kort varaktighet i överkonsoliderad jord. I övriga fall med profiler eller partier med överkonsoliderad jord måste även den dränerade hållfastheten beaktas.

Denna uppskattas ur empiriska relationer och/eller ur dränerade försök i laboratoriet beroende på vilken noggrannhet som krävs i det aktuella fallet.

Hållfastheten i jord beror främst på dess sammansättning och geologiska avsättnings- och belastningshistoria. Med tiden har en god empirisk kunskap skapats om hur hållfastheten i lera varierar med plasticitet, förkonsolideringstryck och överkonsolideringsgrad, samt i organisk jord med innehåll och typ av organiskt material.

I denna skrift ges en beskrivning av den empiriska erfarenheten av hur hållfastheten i kohesionsjord varierar och hur denna kan användas vid bedömning av uppmätta och utvärderade värden. Vidare ges rekommendationer för hur den odränerade skjuvhållfastheten (härledda värden = derived values) bör utvärderas ur olika försök. Vägledning ges också för hur olika försöksresultat och den empiriska kunskapen bör vägas samman vid den ingenjörsmässiga bedömningen av skjuvhållfastheten i jorden.

Rekommendationerna baseras på erfarenheter från främst skandinaviska jordar och kan inte direkt appliceras på jordar från andra geologiska regioner.

I en **bilaga** redovisas en del av den historiska utveckling och forskning som ligger till grund för rekommendationen och de empiriska relationer som används.

2. Beteckningar och symboler

a	faktor, materialparameter
b	faktor, materialparameter
c'	hållfasthetsparameter, kohesionsintercept vid effektivspänningsanalys
c_u	odränerad skjuvhållfasthet
c_{uAKTIV}	odränerad skjuvhållfasthet vid aktiv skjuvning
$c_{uDIREKT SKJUVNING}$	odränerad skjuvhållfasthet vid direkt skjuvning
c_{uMEDEL}	odränerad medelskjuvhållfasthet = = $(c_{uAKTIV} + c_{uDIREKT SKJUVNING} + c_{uPASSIV})/3$
$c_{uPASSIV}$	odränerad skjuvhållfasthet vid passiv skjuvning
CRS -försök	ödometerförsök med konstant deformationshastighet
F_B	beräknad säkerhetsfaktor vid brott
k	konstant
K_0	jordtryckskoefficient
$K_{0(NC)}$	jordtryckskoefficient i normalkonsoliderad jord
$N_{kt(cu)}$	konfaktor vid utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet
$N_{kt}(\sigma'_c)$	konfaktor vid utvärdering av förkonsolideringstryck
OCR	överkonsolideringsgrad
q_t	totalt spetsmotstånd vid CPT-sondering
t	tid till brott
t_1	referenstid
u_0	rådande porvattentryck
w	vattenkvot (w i formler är uttryckt i decimaltal)
w_L	flytgräns (w_L i formler är uttryckt i decimaltal)
β	koefficient
$\Delta\sigma'_c$	ökning i förkonsolideringstryck
Δc_u	ökning i odränerad skjuvhållfasthet
ε_{vol}	volymändring vid rekonsolidering av prover i laboratoriet
ϕ'	hållfasthetsparameter, friktionsvinkel vid effektivspänningsanalys
γ	tunghet
μ	korrektionsfaktor för hållfasthetsvärden från vingförsök och fallkonförsök
σ_{v0}	rådande vertikalt överlagringstryck
σ'_c	förekonsolideringstryck
σ'_{v0}	rådande totalt effektivt vertikalt överlagringstryck
τ_{CR}	mobiliserad skjuvspänning i passiva triaxialförsök vid en deformation som motsvarar deformationen vid brott i aktiva triaxialförsök
τ_k	okorrigerat hållfasthetsvärde från fallkonförsök
τ_v	okorrigerat hållfasthetsvärde från vingförsök
τ_0	hållfasthetsvärde från vingförsök med ca 5 minuters väntetid
τ_{ID}	hållfasthetsvärde från vingförsök med 1 dygns väntetid
τ_1	hållfasthetsvärde från vingförsök utfört med standardhastighet
τ_t	hållfasthetsvärde från vingförsök med en rotationshastighet som ger tiden t till brott

3. Inledande besiktning och inhämtning av geologisk information

Det finns en stark koppling mellan jordens hållfasthet och dess sammansättning och av-sättnings- och belastningshistoria. Vidare på-verkar dessa faktorer inte bara materialets egenskaper utan också relevansen och använd-barheten för olika undersökningsmetoder, vil-ket bör vägas in vid val av undersökningsme-todik. Det är därför viktigt att beakta befintlig geologisk kunskap om bildningssätt och be-lastningshistoria i det aktuella området. Senare nivå- och belastningsförändringar pga. erosi-on, uppfyllnader och eventuella avschaktning-ar bör också kartläggas. I görligaste mån bör även områdets geohydrologi studeras. Områ-det kan sedan delas in i delområden med likar-tade förhållanden och därefter kan relevanta sammanställningar av resultaten från de geo-tekniska undersökningarna och bedömningar av hållfastheter göras på basis av empiri. Vik-tig information kan fås ur:

- Besök på platsen och ”arkivborrning” be-träffande tidigare erfarenheter från geoteknis-ka undersökningar i området samt geologiska kartor och annan information som kan ge upp-lysning om jordlagerföljd.
- Belastningshistoria kan delvis fås ur geolo-giska kartor, men också från information till-gänglig hos kommunen, som utförda uppfyll-nader, avschaktningar, exploatering m.m. Eventuell erosion och andra jordrörelser är också mycket viktig information. Förändring-arnas tidshistoria ska också beaktas. Hem-byggsföreningar har många gånger viktig do-kumenterad information som har bäring på belastningshistorien.
- Geohydrologi kan delvis utläsas ur geolo-giska beskrivningar, inventering av brunnar samt arkivborrning. Ordentliga sammanställ-ningar av detta är viktiga. Inte minst bör drä-neringsfronter, infiltrations- och utströmning-sområden för området i stort beskrivas, efter-som dessa kan ha bäring även på de lokala delar som studeras.

Om inte jordlagerföljderna är kända i tillräck-liga detaljer är CPT-sondering den lämpligaste metoden för att kartlägga dessa för att den vidare undersökningen med provtagningar och fält- och laboratorieförsök ska kunna utföras på ett optimalt sätt. Också rådande grund-vattentryck i grövre jordlager och underlig-gande akvifärer kan uppskattas med denna metod. För prognostisering av grundvattenva-riationer och lägsta respektive högsta nivåer för porvattentrycken krävs dock ofta por-trycksobservationer under en längre tidsperi-od.

Den bedömda belastningshistorien, och därur bedömda förkonsolideringstryck och överkon-solideringsgrader, kan styrkas med resultat från CPT-sonderingar och verifieras med ödo-meterförsök.

4. Empirisk erfarenhet

4.1 Allmänt

4.1.1 Bedömning av jords egenskaper

Empiriska erfarenhetsvärden och samband är till stor nytta för en preliminär uppskattning av vilka egenskaper som kan förväntas hos jord och för bedömning av relevansen hos olika provningsresultat. I princip beror jordens egenskaper på dess sammansättning och belastningshistoria.

I princip beror jordens egenskaper på dess sammansättning och belastningshistoria.

Jordens sammansättning framgår i stort av den geotekniska klassificeringen, där jorden indelas i olika grupper beroende på främst dess avsättningshistoria, om den är en mineraljord eller organisk jord samt dess kornstorleksfördelning respektive typ av organiskt material och förmultningsgrad. Beroende på hur detaljerad klassificeringen är indelas kohesionsjord vidare med tilläggsbenämningar med avseende på fasthet, halt av grövre material, organisk halt samt konsistensgränser, främst flytgräns.

Jordens egenskaper påverkas dock också av en rad andra faktorer i dess sammansättning som inte ingår i en vanlig klassificering och som sällan bestäms. Egenskaperna i finkornig jord påverkas av de ingående bergarts- och lermineralen och dessutom av avsättningsmiljön, porvattnets kemi vid avsättningstillfället och eventuella förändringar i denna därefter samt eventuella andra substanser som sulfider och karbonater. Inverkan av ett organiskt innehåll och egenskaperna i organisk jord påverkas av t.ex. typ av innehåll och längd av ingående fibrer samt friktion och draghållfasthet hos dessa. För torv finns olika detaljerade klassificeringssystem (von Post 1927, Radford 1969, m.fl., se t.ex. SGI Information 6), men i praktiken används i Sverige normalt endast en tregradig förmultningsskala för torv medan ingen indelning görs för gyttja och dy.

Olika befintliga empiriska samband gäller därmed endast för jord med samma ursprung och sammansättning som de jordar från vilka de empiriska erfarenhetsvärdena hämtats. Samtidigt gäller att ju vidare ramar som ges för vilka värden som bakas in i empirin, desto osäkrare blir sambanden. De flesta leror i

Sverige har illit som huvudsakligt lermineral medan grövre partiklar i siltfraktionen i huvudsak består av en blandning av lermineral och bergartsmaterialen kvarts och fältspat. Det finns dock en variation i sammansättningen och avsättningsförhållanden, porvattenkemi och övrigt innehåll varierar stort. De flesta empiriska samband för lera (och i viss mån organisk jord) baseras på flytgränsen (internationellt oftast plasticitetsindex), som får utgöra ett ensamt mått på inverkan av alla dessa faktorer. För att detta ska fungera fordras att sammansättning och bildningshistoria är någorlunda likartade. För svenska förhållanden kan därför i princip endast inhemska erfarenheter kompletterade med värden från grannländerna Norge och Finland användas. Detta gäller normala typer av lera, gyttja och torv. Starkt avvikande jordtyper som t.ex. sulfidjord ("svartmocka") faller ofta ur bilden och kräver separata empiriska samband. Också för vanligare jordar kan spridningen vara betydande i den empiri som avser att omfatta större delen av Sverige. Det är därmed ofta möjligt att skapa en förbättrad lokal empiri för en viss begränsad region eller inom ett större projekt där jordförhållandena är mer likartade.

4.1.2 Utvärdering av försöksresultat

På grund av olika störnings-, hastighets- och skaleffekter är utvärdering av samtliga fältförsök liksom fallkonförsöket i laboratoriet halvempirisk. I samtliga fall finns en viss teoretisk grund för utvärderingen, men på grund av ovannämnda effekter måste de teoretiskt framtagna hållfasthetsvärdena korrigeras med hjälp av empiriska faktorer som baseras på erfarenhetsvärden från olika inträffade brott och provbelastningar.

I likhet med jordens egenskaper påverkas de olika korrektionsfaktorerna av jordens sammansättning i form av mineral, kornstorlekar, organisk halt, typ av organiskt material, andra ingående substanser, t.ex. sulfider och salter, avsättningsförhållanden och efterföljande geologisk historia med förändringar i form av belastningar, vittring, urlakning m.m. Störningskänsligheten påverkas dessutom av jordens sensitivitet, naturlig vattenkvot i förhål-

lande till konsistensgränser, varvighet, skiktning, m.m. Detta medför att den korrigering som normalt görs, och som för finkornig jord och gytta är baserad enbart på flytgränsen, är ett trubbigt instrument som fungerar bäst i homogena jordlager med en "normal" sammansättning för svenska jordar. Detsamma gäller för de korrektionsfaktorer som används generellt för andra typer av jord som t.ex. sulfjord. Detta bör beaktas vid bedömning av såväl rent empiriska relationer som empiriskt korrigerade värden.

4.2 In situ spänningar

Det vertikala totaltrycket på en nivå i naturlig mark, σ_{v0} , utgörs av överlagringstrycket från ovanliggande jordmassor. Det vertikala effektivtrycket, σ'_{v0} , är detta tryck minskat med det rådande portrycket, u_0 .

$$\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0$$

Portrycket kan vara hydrostatiskt från en fri grundvattenyta, men kan också ha en nedåtriktad gradient, vilket är vanligt invid slänter och i deras övre delar eller ha en uppåtriktad gradient (vara artesiskt), vilket är vanligt i slänters undre delar och vid slänftoten samt i dalar med finkorniga jordar omgivna av höjdparter med berg i dagen. Portrycksfördelningen bör mätas i fält. Mätningarna bör utföras under en så lång tidsperiod att portryckens extremvärden, såväl lägsta som högsta värden, kan prognosticeras. I finkornig jord ovanför den fria grundvattentytan är portrycken negativa och de effektiva trycken därmed större än totaltrycken. Metoder för uppskattning av negativa portryck anges bl.a. i SGI Information 16.

Vid horisontell markyta och normalkonsoliderad jord är den vertikala spänningen lika med största huvudspänningen och den horisontella spänningen, σ_H , lika med den minsta huvudspänningen. Förhållandet mellan de effektiva horisontella och vertikala spänningarna vid normalkonsoliderad jord anges med jordtryckscoefficienten K_{0NC} .

För friktionsjord antas normalt att $K_{0NC} \approx 0,4 - 0,5$. Detta gäller också för siltjord.

K_{0NC} i svenska leror har funnits variera enligt relationen

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

där w_L är flytgränsen i decimaltal.

Som ett approximativt medelvärde för leror, speciellt i varvig och skiktad jord med omväxlande ler- och siltskikt används ofta $K_{0NC} \approx 0,5$.

I organisk jord har K_{0NC} befunnits ligga runt 0,6.

Om jorden lastas av efter att först ha konsoliderat för ett visst effektivt överlagringstryck, σ'_c , minskar vertikalspänningen och jorden blir överkonsoliderad. Överkonsolideringsgraden OCR uttrycks som

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_{v0}}$$

Överkonsolideringseffekter kan också uppstå på grund av krypning, också kallad sekundär konsolidering.

Den effektiva horisontalspänningen minskar inte i samma takt som den effektiva vertikalspänningen utan förhållandet, K_0 , ändras gradvis enligt

$$K_0 = K_{0NC} OCR^{0,5 \text{ till } 0,6}$$

I jord som konsoliderar för en lutande markyta roteras huvudspänningarna i viss mån så att största huvudspänningen vrids mot slänthlutningens riktning. En spänningsrotation på upp till 20 grader har uppmätts, men detta beaktas endast i speciella fall. I och invid slänter blir dessutom horisontalspänningarna längs och tvärs slänten olika, vilket kan behöva beaktas vid avancerad numerisk simulering. (Exempel på uppmätta förkonsolideringstryck och spänningar i slänter återfinns i SGI Rapport No 19 respektive Rankka 1994).

4.3 Förkonsolideringstryck

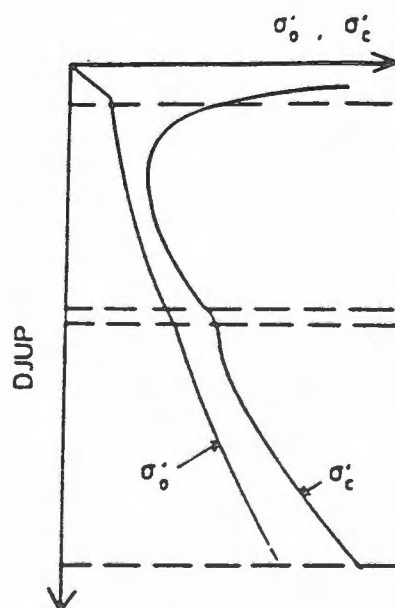
De flesta naturliga jordar är minst normalkonsoliderade. Undantagen är främst områden där fyllningar lagts ut eller grundvattensänkningar skett under senare tid (ur geologiskt tidsperspektiv). I områden på land finns överst i jordprofilen en torrskorpa som är överkonsoliderad på grund av uttorkning, grundvattenfluktuationer och vittringseffekter. I områden med lös lera finns därunder en övergångszon med gradvis minskande överkonsolidering ned till den mer normalkonsoliderade jorden. På grund av krypeffekter (sekundär konsolidering) och eventuella andra processer finns normalt en viss överkonsolidering även i den "normalkonsoliderade" leran.

De flesta naturliga jordar är minst normalkonsoliderade.

Torrskorpans och övergångszonens tjocklekar beror bland annat på grundvattenytans läge och dess variationer. De kan därmed variera från endast någon halvmeter i sank och strandnära områden till flera meter i torrare områden. Överkonsolideringen längre ned i profilen beror bland annat på när materialet avsattes och hur länge markytan legat över havsytan (alternativt sjöytan). I marina leror på västkusten är överkonsolideringsgraden normalt inte lägre än 1,3. Motsvarande värde på ostkusten är cirka 1,2. Lägre värden kan dock förekomma, främst i sank och strandnära områden som nyligen blivit land samt t.ex. bakom släntkrön där en pågående erosionsprocess medfört en grundvattensänkning. Också mänskliga ingrepp som resulterat i en lastökning och/eller grundvattensänkning ger motsvarande effekt. Indikationer finns också på att områden med marin lera där urlakning och kvicklerebildning skett uppvisar lägre överkonsolideringsgrader. I avlagringar under havs- och sjöbotten är jorden ofta i det närmaste normalkonsoliderad, speciellt där sedimentavsättning fortfarande pågår.

Utveckling av överkonsolidering på grund av krypeffekter sker snabbast i närheten av dräneringsgränser. En förhöjning av överkonsolideringsgraden i profiler med lös lera kan därmed, förutom vid torrskorpan, ofta observeras i närheten av inbäddade dränerande skikt och närmast en dränerande bottenyta, Figur 1.

Ovanstående gäller för lösa sedimentära leror. Organiska jordar återfinns ofta i sank och strandnära områden där överkonsolideringsgraden är låg. För fastare och grövre jordar finns inga allmänna riktlinjer, förutom eventu-



Figur 1.
Principskiss för normal relativ variation av förkonsolideringstrycket i en profil med lös lera, (Larsson och Sällfors 1995).

ella mycket lokala tumregler. Lermoräner är normalt kraftigt överkonsoliderade efter att ha konsoliderat för ovanliggande istryck, men många undantag finns, speciellt i ytligare jordlager (se vidare t.ex. SGI Varia 480.)

4.4 Modell för hållfasthets- och deformations-egenskaper

För beskrivning av jords hållfasthets- och deformationsegenskaper används ofta en modell med en flytyta i den effektiva spänningsrymden inom vilken töjningarna vid spänningssändringar i stort kan betraktas som relativt små och elastiska. Då flytytan tangeras uppstår dessutom större plastiska deformationer. Flytytan begränsar också det spänningsområde inom vilket de effektiva spänningarna kan utvecklas i vattenmättad finkornig jord under odränerade förhållanden. Ett tangerande av flytan medför i detta fall att portrycksutvecklingen blir sådan att de effektiva spänningarna stannar på eller inom flytytan. Eftersom jorden är vattenmättad och volymen är konstant uppträder alla deformationer i detta fall som skjuvtöjningar.

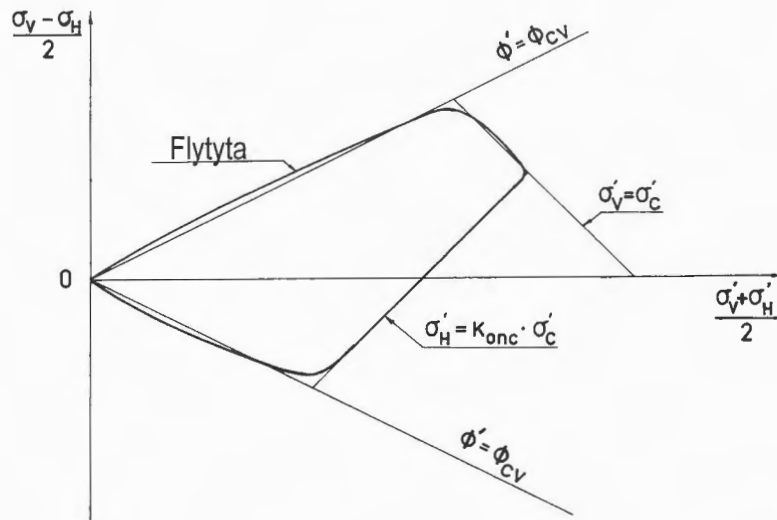
Empiriskt har visats att flytytan i finkornig jord bestäms av jordens förkonsolideringstryck och de effektiva hållfasthetsparametrarna c' och ϕ' . I en vanlig uppritning av ett triaxialförsök bestäms flytytan därmed av att skjuvspänningen når brottgränslinjen definierad av c' och ϕ' alternativt att den effektiva vertikalspänningen når förkonsolideringstrycket σ'_c eller den horisontella effektivspänningen når förkonsolideringstrycket i horisontalld, $K_{ONC} \sigma'_c$, Figur 2.

Modellen kan roteras i spänningsrymden för andra belastningsfall, (se Sällfors och Larson 1985)

Modellen kan bland annat användas för att :

- prognostisera portrycksutvecklingen vid odränerad belastning
- bedöma odränerad skjuvhållfasthet
- bedöma den odränerade skjuvhållfasthetens anisotropi
- utvärdera effektiva hållfasthetsparametrar ur spänningsvägar i odränerade försök
- utvärdera förkonsolideringstryck ur aktiva triaxialförsök
- utvärdera horisontellt förkonsolideringstryck ut passiva triaxialförsök

(se vidare t.ex. CTH kurs triaxialförsök och CTH Rapport B 1994:6 (Larsson 1994))



Figur 2.
Flytyta för
finkornig jord.

4.5 Hållfasthetsegenskaper

4.5.1 Odränerad skjuvhållfasthet

Den odränerade skjuvhållfastheten beror på typ av jord, belastningsfall, förkonsolideringstryck och överkonsolideringsgrad. Den kan uttryckas som

$$c_u = a \cdot \sigma'_c \cdot OCR^{(1-b)} \text{ eller } c_u = a \cdot \sigma'_{v0} \cdot OCR^b$$

där a och b är materialparametrar.

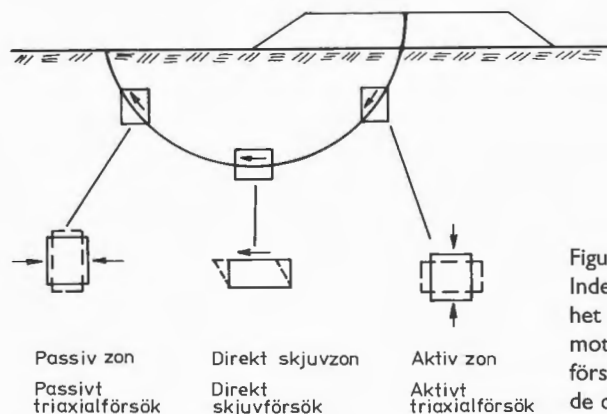
Faktorn a beror på såväl typ av jord som belastningsfall medan faktorn b befunnits variera mellan cirka 0,7 och 0,9 oberoende av belastningsfall. Normalt antas att $b = 0,8$.

Den odränerade skjuvhållfastheten varierar med belastningsriktningen på motsvarande sätt som förkonsolideringsstrycket varierar i olika riktningar. Normalt indelas den odränerade skjuvhållfastheten i tre fall: aktiv skjuvning, direkt skjuvning och passiv skjuvning enligt Figur 3.

För lera är det empiriska värdet för faktor a vid

- aktiv skjuvning $a \approx 0,33$
- direkt skjuvning $a \approx 0,125 + 0,205 w_L/1,17$
- passiv skjuvning $a \approx 0,055 + 0,275 w_L/1,17$

Ett matematiskt medelvärde ligger strax ovanför värdet för direkt skjuvning, men medelvärdet för glidytor med måttlig medellutning antas i praktiken oftast vara lika med värdet för direkt skjuvning, eftersom denna zon i detta fall dominerar. Vid grövre överlag, då flytgränsvärden saknas, används ofta $a = 0,22$.



Figur 3.
Indelning av skjuvhållfasthet i huvudtyper och motsvarande laboratorieförsök för bestämning av de olika hållfastheterna.

Motsvarande värden kan användas också för lerig silt. För ren silt och grövre jord beror den odränerade skjuvhållfastheten, i den mån den är relevant, främst av jordens lagringstäthet.

För jord med organiskt innehåll sker en förändring av parametern a då den organiska halten överstiger cirka 2 %, dvs. då jorden ska ges tilläggsbenämningen gyttjig. Vid aktiv skjuvning ökar a enligt empirin linjärt från 0,33 till 0,50 mellan 2 och 6 % organisk halt och är därefter konstant. Vid direkt skjuvning och passiv skjuvning ökar a linjärt mellan 2 och 20 % organisk halt till cirka 0,40 och förblir därefter konstant (se vidare SGI Rapport 38).

I lermorän skiljer man normalt inte på hållfastheten vid olika belastningsfall. De empiriska värdena på a och b för denna typ av jord är 0,40 respektive 0,85 (se vidare t.ex. SGI Varia 480 och Rapport 59).

Normalt indelas den odränerade skjuvhållfastheten i tre fall.

*Sulfidjord
("svart-
mocka") har
i stora drag
egenskaper
motsvarande
övrig jord
med organiskt
innehåll.*

För övriga typer av jord finns inga motsvarande empiriska värden. För sulfidjord ("svartmocka") gäller att denna i stora drag har egenskaper motsvarande övrig jord med organiskt innehåll. För att kunna använda denna empiriska erfarenhet behövs bland annat en betydligt mer detaljerad klassificering än den som hittills normalt utförts (se Larsson et al. 2007).

I de empiriska relationerna för odränerad skjuvhållfasthet finns givetvis en viss spridning och relationerna kan aldrig ersätta övriga försök utan bara komplettera dessa. Ett speciellt fall där empiriska relationer kan överskatta hållfastheten är i lågplastiska högsensitiva leror. I dessa material ger dock såväl vingförsök som fallkonförsök låga värden och låga värden registreras också vid CPT-sondering. I sådana fall bör en låg vikt ges åt de empiriska värdena.

4.5.2 Dränerad skjuvhållfasthet

Den dränerade skjuvhållfastheten i finkornig jord beskrivs med de effektiva hållfasthetsparametrarna c' och ϕ' . I grövre friktionsjord används normalt värden på friktionsvinkeln ϕ' som varierar med lagringstäthet och spänningsnivå.

I överkonsoliderad lera, lerig silt och gyttjig lera (samt annan organisk mineraljord) antas empiriskt att $\phi' = 30^\circ$ och $c' = 0,1 c_u$ alternativt $0,03 \sigma'_c$. Motsvarande värden kan normalt inte användas för beräkningar i normalkonsoliderad och endast svagt överkonsoliderad lös jord, eftersom det i detta fall erfordras mycket stora töjningar för att mobilisera den dränerade hållfastheten samt att det här normalt är den odränerade hållfastheten som är avgörande.

I "baltisk lermorän" i Skåne har uppmätta värden av samma storlek, medan friktionsvinkeln i den grövre sandiga lermoränen "nordostmorän" befunnits vara i storleken $32 - 33^\circ$.

Friktionsvinkeln för torv har befunnits vara cirka 30° . Eftersom lågförmultnad torv har hög permeabilitet kan dess dränerade hållfasthet ofta vara relevant, men den fordrar mycket stora töjningar för att mobiliseras.

5. Bestämning av egenskaper genom provning

(härledda värden = derived values)

5.1 Allmänt

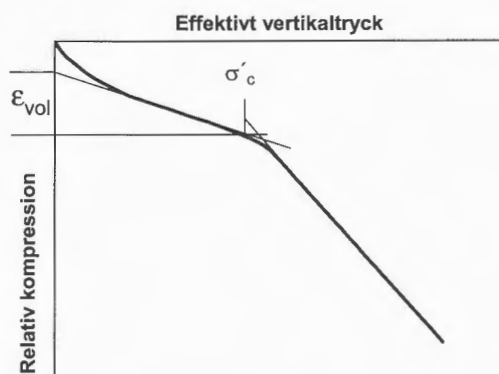
Val av provningsmetod beror på typ av jord och jordlagerföljd. In situ provning utförs i naturlig jord i dess rådande tillstånd, men utrustningarnas neddrivning kan medföra avsevärda störningseffekter. Provning av hållfasthetsegenskaper i laboratoriet förutsätter att prover av hög kvalitet kan tas upp och införas i laboratoriet, vilket i vissa fall är svårt eller näst intill omöjligt.

Kvaliteten hos prover av finkornig jord i laboratoriet kan bedömas ur resultaten från fallkonförsöken vid rutinundersökningen i relation till fältresultat och empiriska hållfastheter. Den kan vidare bedömas ur uppmätta förkonsolideringstryck i förhållande till rådande effektiva överlagringstryck och överkonsolideringsgrad bedömd ur geologisk historia, samt kriterier som kompression upp till förkonsolideringstrycket i ödometerförsök. I vissa försök, som direkta skjuvförsök och triaxialförsök rekonsolideras proverna för att återskapa det naturliga tillståndet i fält. Detta kan inte helt kompensera för en bristande provkvalitet och en sådan bör påverka såväl rekonsolideringsförfarandet som bedömningen av provningsresultatets relevans. Ett ytterligare mått på provkvaliteten fås vid rekonsolideringen till in situ spänningar i dessa försök, där pro-

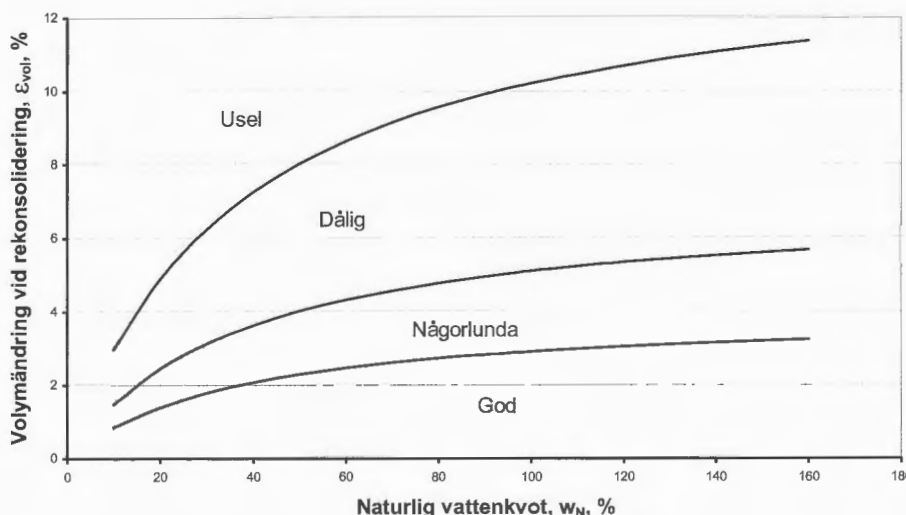
verna bör uppfylla kraven för en god provkvalitet enligt Figur 4a. För överkonsoliderad jord som endast rekonsolideras till in situ spänningarna bör volymändringen vid rekonsolidering inte överstiga 75 % av värdena för maximal volymändring vid god provkvalitet i Figur 4a. (Se vidare Lunne et al. 1997).

Motsvarande kriterier för ödometerförsök fås ur lutningen av den flackaste delen av ödometerkurvan före förkonsolideringstrycket som motsvarar en modul av $\sigma'_c / \epsilon_{vol}$ (se Figur 4b). Det så framtagna värdet på ϵ_{vol} används för bedömning av provkvalitet enligt Figur 4a.

Val av provningsmetod beror på typ av jord och jordlagerföljd.



Figur 4b. Utvärdering av ϵ_{vol} vid ödometerförfök.



Figur 4 a. Diagram för bedömning av kvalitet hos vattenmättad kohesionsjord ur volymändringen vid rekonsolidering. (efter Lunne et al. 1997).

Spänningarna i jorden utvärderas främst i form av vertikalt tryck och porvattentryck.

Bestämning av odränerade egenskaper ska göras med metoder som medger att jorden förblir odränerad under provningen. Detta medför att t.ex. vingförsök kan bli missvisande i jord med inbäddade skikt av grövre jord där en påtaglig dränering hinner ske under försökets utförande. På motsvarande sätt ska dränerade parametrar bestämmas med metoder där jorden är helt dränerad under provningen. Detta medför att dränerade parametrar endast kan bestämmas i fält i jord som är så grov att den hinner dränera under försökets (eller sonderingens) utförande, dvs. främst grovsilt och grövre jord. För finkornigare jord utförs dränerade försök i laboratoriet.

Samtliga fältförsök samt fallkonförsök i laboratoriet utvärderas och/eller korrigeras med

hjälp av empiriska samband och korrektionsfaktorer. För relevansen hos dessa härledda värden (derived values), se avsnitt 8.2 Sammanvägning och bedömning av odränerad skjuvhållfasthet.

5.2 In situ spänningar

De rådande spänningarna i jorden utvärderas främst i form av vertikalt tryck och porvattentryck. Vertikalt trycket utvärderas som trycket från ovanliggande naturliga jordmassor samt eventuella fyllningar och andra laster. Trycket från ovanliggande jord utvärderas ur den skrymdensitet som uppmäts i upptagna jordprover. För grövre jord och fyllning används ofta empiriska riktvärden med ledning av sammansättning och fasthet, se Tabell 1.

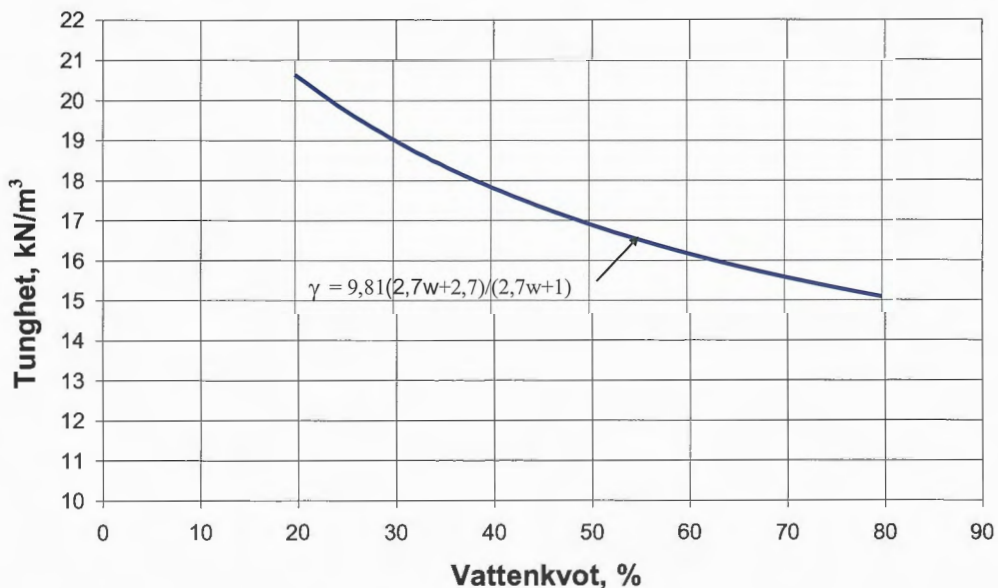
Tabell 1. Riktvärden på jords tunghet, γ .

Material/Jordart	Tunghet, kN/m ³	
	Naturfuktig jord över grundvattenytan	Effektiv tunghet under grundvattenytan
Sprängsten	18	11
Makadam	18	11
Grus	19	12
Grusig morän	20	13
Sand	18	10
Sandig morän	20	12
Silt	17	9
Siltig morän	20	11
Lera	17	7
Lermorän	22	12
Gyttja	14	4
Torv	11-13	1-3

Anm. För friktionsjord motsvarar värdena i tabellen empiriska medelvärden för naturligt lagrad jord med minst medelhög relativ fasthet samt utfyllt jord som packats enligt VÄG 94 kapitel 4. För jord med låg relativ fasthet görs avdrag med upp till 2 kN/m³ över grundvattenytan och 1 kN/m³ under grundvattenytan.

Om sten och blockhalten i friktionsjord överstiger 15 % ökas tungheten med 1 kN/m³ över grundvattenytan och 0,5 kN/m³ under grundvattenytan.

Värden för lera, gyttja och torv avser vattenmättad jord. I vattenmättad mineraljord kan tungheten beräknas ur $\gamma \approx 9,81(2,7w + 2,7)/(2,7w + 1)$. Den effektiva tungheten under vatten är 10 kN/m³ lägre.



Figur 5. Tunghet hos vattenmättad mineraljord med korndensitet 2,7 t/m³.

Bestämning av odränerade egenskaper ska göras med metoder som medger att jorden förblir odränerad under provningen.

Porvattentrycket mäts i fält ofta i öppna grundvattenrör i grövre permeabel jord och med slutna portrycksspetsar i finkornig jord.

Negativa portryck över grundvattenytan kan mätas med slutna portrycksspetsar, men uppskattas normalt empiriskt (se SGI Information 16).

Horisontaltrycket i marken kan utvärderas ur resultaten från dilatometerförsök, men uppskattas vanligen empiriskt, se avsnitt 4.2. Dilatometerförsök utförs enligt SGF Rapport 1:95 och utvärderas enligt SGI Information 10, t.ex. med programmet SGIDILL.

5.3 Förkonsolideringstryck

Förkonsolideringstryck bestäms i tillräcklig omfattning för att dessa tillsammans med grövre indikationer från främst CPT-sonderingar och vad som är känt om belastningshistoria ska kunna utgöra basen för en empirisk uppskattning av hållfastheten. Dessa värden behövs också om mer avancerade hållfasthetsbestämningar ska utföras i laboratoriet.

Förkonsolideringstrycket i finkornig jord bestäms i laboratoriet med ödometerförsök utförda som CRS-försök enligt SS 02 71 26 eller som stegvisa ödometerförsök enligt ISO/TS 17892-5:2004. Tolkning av CRS-försök görs enligt SS 02 71 26 och tolkning av stegvisa försök görs enligt SS 02 71 29. För tolkning av försök på lermorän se SGI Varia 480. Försök på torv utförs som stegvisa kompressometerförsök, se SGI Information 6.

I normalkonsoliderad och svagt överkonsoliderad jord kan en kompletterande bestämning av förkonsolideringstrycket göras ur resultat från dränerade och/eller odränerade triaxialförsök, se avsnitt 4.4 "Modell för hållfasthet och deformationsegenskaper" och CTH kurs triaxialförsök.

Förkonsolideringstrycket kan grovt uppskattas ur resultat från CPT-sondering och dilatometerförsök i fält. CPT-sondering utförs enligt SGF Rapport 1:93 och förkonsolideringstrycket utvärderas enligt SGI Information 15 rev. 2007. Dilatometerförsök utförs enligt SGF Rapport 1:95 och utvärderas enligt SGI Rapport 61. Utvärdering av förkonsolideringstryck ingår i CPT-programmet CONRAD och utvärdering av OCR ingår i dilatometerprogrammet SGIDILL. Också resultat från vingförsök kan användas för en grov uppskattning av förkonsolideringstrycket, men osäkerheten

är större än för ovannämnda metoder, (se SGI Rapport 61).

Resultaten från fältförsöken ger främst en uppfattning om trenden för förkonsolideringstryckets variation med djupet och en ledning för hur de diskreta värdena från laboratoriebestämningarna kan sammanbindas till en relevant profil för förkonsolideringstryckets variation med djupet.

5.4 Odränerad skjuvhållfasthet i normalkonsoliderad och svagt överkonsoliderad jord

5.4.1 Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet ur resultat från vingförsök i fält och fallkonförsök i laboratoriet

Hållfasthetsvärden som uppmätts med vingförsök och fallkon korrigeras normalt med hänsyn till jordens flytgräns enligt

$$c_u = \mu \cdot \tau_v$$
$$c_u = \mu \cdot \tau_k$$

där

c_u = odränerad skjuvhållfasthet

μ = korrektionsfaktor

τ_v = hållfasthetsvärde bestämt med vingsond

τ_k = hållfasthetsvärde bestämt med fallkon

Korrektionsfaktorn μ är en funktion av flytgränsen w_L och kan beräknas ur

$$\mu = \left(\frac{0,43}{w_L} \right)^{0,45} \geq 0,5$$

eller tas ur Figur 6. w_L i formeln är uttryckt i decimaltal.

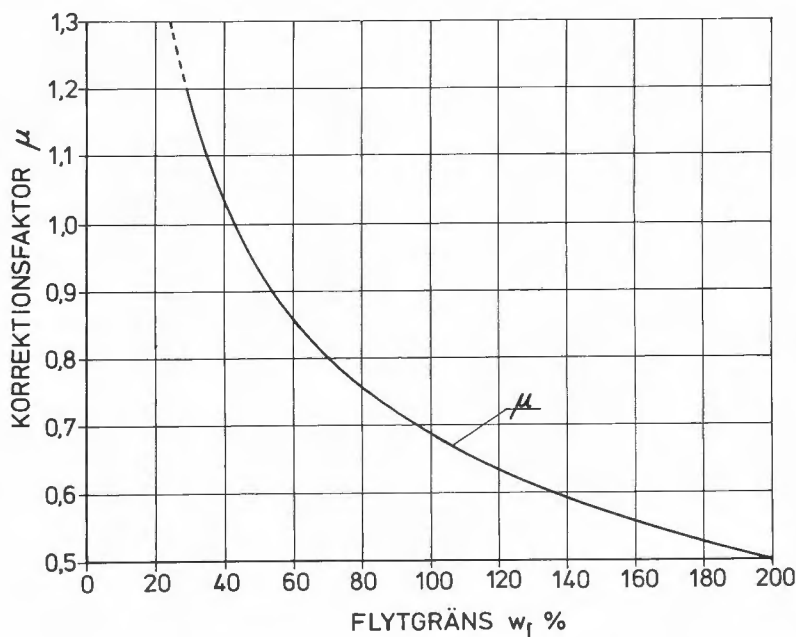
Högre korrektionsfaktorer än 1,2 bör inte användas utan stöd av kompletterande undersökningar.

Varje hållfasthetsvärde bör korrigeras med den korrektionsfaktor som motsvarar tillhörande flytgräns. För korrigering av vingförsök fordras således normalt bestämning av flytgränsvärdet i samma borrhål.

För sulfidjord används korrektionsfaktorn $\mu = 0,65$ (se vidare SGI Rapport 69).

Hållfasthetsvärden som uppmätts med vingförsök och fallkon korrigeras normalt med hänsyn till jordens flytgräns.

Figur 6.
 Rekommenderad korrek-
 tionsfaktor för resultat från
 vingförsök och fallkonfö-
 sök i normalkonsoliderad
 och svagt överkonsoliderad
 jord ($OCR \leq 1,5$).
 (SGI Information 3, 1984)



Ovannämnda korrek-tionsfaktorer är framtagna främst genom jämförelse mellan medelvärden av uppmätta hållfasthetsvärden och beräknad skjuvspänning vid brott i fält. Jämförelser mellan medelvärden av hållfasthetsvärden uppmätta med vingförsök och fallkon och medelvärden av direkta skjuvförsök och aktiva och passiva triaxialförsök har använts som komplement. Dessa jämförelser har givetvis givit en viss spridning och korrek-tionsfaktorer utgör medelvärden.

5.4.2 Bedömning av hållfasthetsvärden med hjälp av Hansbos relation

Förutsättningen för att ovannämnda korrek-tionsfaktorer ska kunna ge användbara skjuv-hållfastheter är att vingförsöket och fallkon-försöket ger normala resultat för jordarten i fråga. Det normala resultatet i normalkonsoli-derade och svagt överkonsoliderade skandina-viska jordar är att hållfasthetsvärden som upp-mäts med vingförsök och fallkon i stort sett följer Hansbos relation

$$\tau_{v,k} = \sigma'_c \cdot 0,45w_L \quad (\text{Hansbo 1957})$$

där

τ_v = okorrigerat hållfasthetsvärde från vingförsök

τ_k = okorrigerat hållfasthetsvärde från fallkonförsök

σ'_c = förkonsolideringstryck

w_L = flytgräns

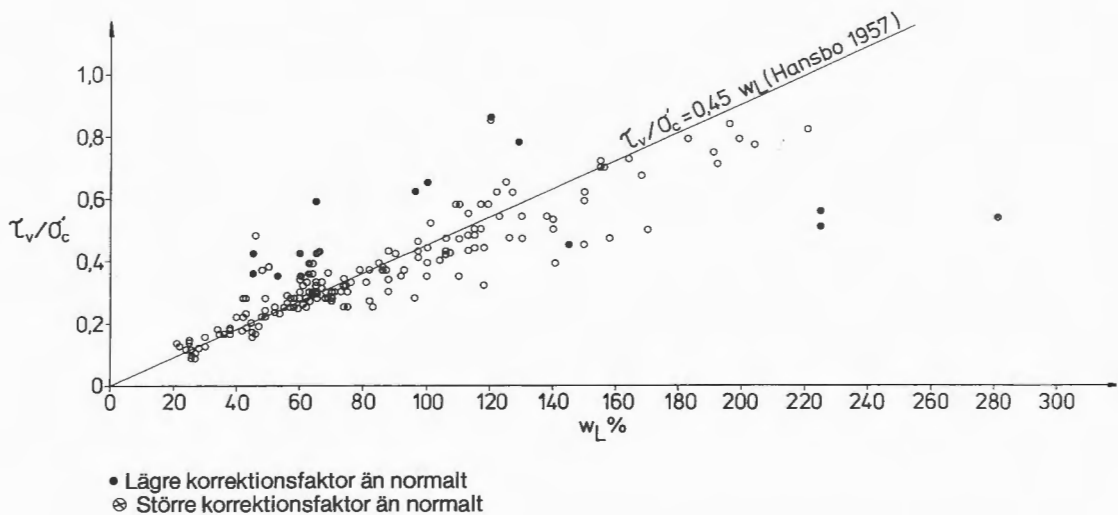
En sammanställning av ett antal hållfasthets-värden som uppmäts med vingförsök i skan-dinaviska jordar visas i relation till förkonsoli-deringstryck och flytgräns i Figur 7.

Som synes i figuren är spridningen stor. I figu-ren har speciellt markerats ett antal fall där hållfasthetsvärdena från vingförsöken varit ovanligt höga eller låga och där också värdet på den rekommenderade korrek-tionsfaktorn visat sig vara för högt respektive för lågt.

På detta vis kan en enkel bedömning göras av rimligheten i hållfasthetsvärdena genom att jämföra dem med normala värden enligt Hans-bos relation. Är hållfasthetsvärdet ovanligt högt finns stor risk att det behöver reduceras mer än den generella korrek-tionsfaktorn anger och är det ovanligt lågt, är det sannolikt att kompletterande undersökningar ger högre hållfastheter.

Några slutsatser utöver dessa kan inte dras och den empiriska relationen kan aldrig ersätta verkliga försök.

En empirisk relation kan aldrig ersätta verkliga försök.



Figur 7.
 Förhållandet τ_v/σ'_c
 som funktion av
 flytgräns för ett antal
 skandinaviska jordar.

5.4.3 Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet ur CPT-sondering

CPT-sondering i kohesionsjord utförs enligt av SGF (1993) rekommenderad standard med krav på noggrannhet enligt sonderingsklass 3. Utvärderingen av den odränerade skjuvhållfastheten görs normalt på basis av uppmätt spetstryck och porttryck under sonderingen och med ledning av jordens flytgräns enligt

$$c_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{13,4 + 6,65w_L}$$

där q_t är det totala spetsmotståndet vid sonderingen. Saknas värden för flytgränsen kan en grovare utvärdering göras där termen $(13,4 + 6,65w_L)$ ersätts med 14,5 för silt, 16,3 för lera och 24 för gytta.

För sulfidjord ersätts termen $(13,4 + 6,65w_L)$ med faktorn 20.

För extremt lös *normalkonsoliderad lera*, som t.ex. bottenslam i sjöar och vattendrag, kan hållfastheten utvärderas ur det uppmätta porttrycket som

$$c_u = \frac{\Delta u_2}{14,1 - 2,8 w_L}$$

där Δu_2 är det genererade porövertrycket vid sonderingen, (avser normal filterplacering, se vidare SGI Information 15).

5.5 Odränerad skjuvhållfasthet i överkonsoliderad jord

5.5.1 Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet ur resultat från vingförsök

I överkonsoliderad jord korrigeras det utvärderade hållfasthetsvärdet även för överkonsolideringsgraden enligt

$$c_u = \tau_v \left(\frac{0,43}{w_L} \right)^{0,45} \left(\frac{OCR}{1,3} \right)^{-0,15}$$

med begränsningen att termen

$$\left(\frac{0,43}{w_L} \right)^{0,45} \geq 0,5$$

I de fall värden på förkonsolideringstryck och överkonsolideringsgrad saknas, kan dessa preliminärt uppskattas med hjälp av Hansbos relation, (se vidare SGI Rapport 61).

I lermorän används ofta s.k. dansk vinge och försöken utförs enligt DGF Feltekommitté (1993). I denna typ av jord görs normalt ingen korrigering för w_L eller OCR , men däremot bör hållfasthetens volymsberoende beaktas (se vidare t.ex. SGI Varia 480). Spridningen i resultaten är normalt stor och relevanta värden väljs som ett försiktigt val i underkant av spridningsområdet.

5.5.2 Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet ur CPT-sondering

På liknande sätt korrigeras utvärderingen av den odränerade skjuvhållfastheten ur CPT-sondering för OCR i överkonsoliderad jord. Utvärderingen görs då enligt

$$c_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{13,4 + 6,65w_L} \left(\frac{OCR}{1,3} \right)^{-0,20}$$

I de fall värden på förkonsolideringstryck och överkonsolideringsgrad saknas, kan dessa preliminärt utvärderas ur resultaten från CPT-sonderingen enligt

$$\sigma'_c = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{1,21 + 4,4w_L}$$

(se vidare SGI Rapport 61).

I **lermorän** utvärderas den odränerade skjuvhållfastheten som

$$c_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{11}$$

eller uppskattas alternativt empiriskt ur

$$c_u = 0,4\sigma'_{v0} OCR^{0,85}$$

Förkonsolideringstrycket kan i detta fall preliminärt utvärderas ur

$$\sigma'_c = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{3}$$

(se vidare SGI Varia 480 och Rapport 59).

I **sulfidjord** görs motsvarande korrektion för överkonsolidering som för lera

$$c_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{20} \left(\frac{OCR}{1,3} \right)^{-0,20}$$

och förkonsolideringstrycket kan i detta fall preliminärt utvärderas ur

$$\sigma'_c = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{4,75}$$

(se vidare SGI Rapport 69)

För att få ytterligare underlag för bedömning av den odränerade skjuvhållfastheten kan mer kvalificerade laboratorieförsök utföras.

5.6 Komplettering med mer avancerade laboratorieförsök

5.6.1 Bestämning av odränerad skjuvhållfasthet med direkta skjuvförsök

För att få ytterligare underlag för bedömning av den odränerade skjuvhållfastheten kan mer kvalificerade laboratorieförsök utföras.

Den hållfasthet som bör jämföras med de värden som utvärderas ur ving- och fallkonförsök samt CPT-sondering är skjuvhållfastheten vid direkt skjuvning i en horisontell glidyta. Denna relation ger värden som är direkt applicerbara i släntstabilitetsanalyser med flacka glidytor och som är något på säkra sidan vid beräkning av branta glidytor. Den används också normalt vid beräkning av stabilitet hos väg- och järnvägsbankar på plan mark med cirkulär cylindriska glidytor. Skjuvhållfastheten vid direkt skjuvning i en horisontell glidyta bestäms med direkta skjuvförsök. Dessa försök är också speciellt lämpliga för skiktade och varviga jordar där skjuvningen i försöket styrs till eventuella svagare skikt i jorden.

Direkta skjuvförsök utförs och utvärderas enligt SGF Notat 2:2004 på prover som rekonstrueras till strax under bedömda förkonsolideringstryck och därefter tillåts anpassa sig till in situ spänningarna. Den uppmätta skjuvhållfastheten avser skjuvhållfastheten då glidytan i jorden är horisontell, men antas också normalt utgöra ett värde på medelskjuvhållfastheten i jorden.

För lermorän beaktas normalt ingen anisotropi men däremot är volymsberoendet stort på grund av materialets heterogenitet. På lermorän utförs därför normalt triaxialförsök, helst med relativt stora provkroppar.

Speciella skjuvförsök kan utföras för bestämning av skjuvmotståndet vid glidning mellan jord och olika material och konstruktionselement. Dessa utförs som direkta skjuvförsök, skjuvboxförsök eller utdragsförsök i motsvarande apparater. För olika ytliga täckskikt kan glidförsök i full skala bli aktuella, (se t.ex. SGI Information 19).

5.6.2 Bestämning av anisotropa hållfasthetsegenskaper med triaxialförsök

Anisotropieffekter gör att den odränerade skjuvhållfastheten varierar med belastningsfallet. Man skiljer normalt på fallen aktiv skjuvning, direkt skjuvning och passiv skjuvning, vilka i laboratoriet simuleras med aktiva triaxialförsök, direkta skjuvförsök respektive passiva triaxialförsök, se Figur 3.

Aktiva triaxialförsök ger generellt de högsta hållfasthetsvärdena men dessa är endast användbara i aktivzoner. Passiva triaxialförsök ger de lägsta värdena och dessa kan bli aktuella i det rena passivfallet. Anisotropieffekterna är störst i lågplastiska leror och i dessa kan betydande skillnader i utvärderad odränerad skjuvhållfasthet uppstå beroende på om anisotropin beaktas eller ej.

Anisotropieffekterna kan uppskattas empiriskt med ledning av flytgränsen och den organiska halten, (se avsnitt 4.5 samt t.ex. Skredkommissionen 1995). För att de ska kunna användas vid beräkningar måste de dock alltid verifieras för den aktuella jorden med ett antal triaxialförsök.

Triaxialförsök utförs på prover som rekonsolideras till strax under bedömda förkonsolideringstryck och därefter tillåts anpassa sig till in situ spänningarna. Aktiva respektive passiva triaxialförsök används för bestämning av den odränerade skjuvhållfastheten i den aktiva respektive passiva skjuvzonen. En generell beskrivning av utförande och tolkning ges i ISO/TS17892-9:2004. Vidare rekommendationer för utförande och tolkning av triaxialförsök ges för normalkonsoliderad och svagt överkonsoliderad lera i CTH kurs triaxialförsök, för gytta i SGI Rapport 38 och för lermorän i SGI Rapport 59.

Några anisotropieffekter beaktas normalt inte i lermorän och för denna typ av jord utförs främst aktiva triaxialförsök.

5.7 Bedömning av hållfasthetstillväxt vid konsolidering

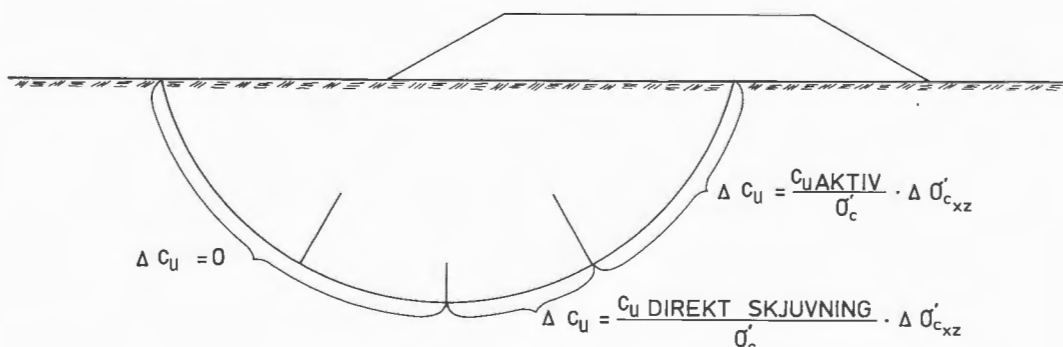
Då normalkonsoliderad lera belastas och konsoliderar ökar förkonsolideringstrycket och därmed den odränerade skjuvhållfastheten. Ökningen i hållfasthet följer ökningen i förkonsolideringstryck enligt de relationer som bestämts genom försök eller genom empiriska relationer: $\Delta c_u = k \cdot \Delta \sigma'_c$ där k beror på belastningsfallet.

Denna hållfasthetsökning kan utnyttjas dels genom att en belastning påförs stegvis med mellanliggande konsolideringsfaser, dels genom att den hållfasthetsökning som skett under gamla konstruktioner kan utnyttjas om dessa ska byggas på eller breddas.

Att mäta denna hållfasthetsökning under befintliga konstruktioner med traditionella geotekniska metoder är ofta både svårt och kostsamt. Man måste ta sig igenom konstruktionen och hållfasthetsvärdena varierar i sidled om konstruktionen har begränsad utbredning. Ett sätt att uppskatta hållfasthetsökningen under t.ex. en gammal vägbank är att anta att hållfasthetsökningen begränsats till att ske enbart inom bankens utbredning och att ökningen följer de empiriska relationerna, Figur 8. Man måste också beakta att ändringen i förkonsolideringstrycket är olika under olika delar av banken. Spänningsökningen $\Delta \sigma'_{c,xz}$ bör beräknas med elasticitetsteori. Vidare måste man förvissa sig om att belastningen verkligen medfört en ökning i förkonsolideringstrycket, dvs. att lastökningen medfört att jordens tidigare förkonsolideringstryck överskridits och att jorden konsoliderat för den nya lasten.

Som kriterium på att jorden konsoliderat kan sättningsobservationer som visar att sättningen avstannat användas. Alternativt kan porttrycksmätning utföras. Denna utförs i så fall mitt i de skikt där en förhöjning av förkonsolideringstrycket förväntas. Är belastningstiden

Anisotropieffekter gör att den odränerade skjuvhållfastheten varierar med belastningsfallet.



Figur 8. Enkel uppskattning av ökning av odränerad skjuvhållfasthet under en vägbank på grund av konsolidering.

känd, kan sättningsberäkning utföras med t.ex. programmet Embankco och parametrar från obelastad jord vid sidan av banken. Den uppskattade hållfasthetsökningen kan verifieras med begränsade geotekniska provningar eller seismisk cross-hole tomografi (se SGI Rapport 63).

5.8 Dränerad skjuvhållfasthet

Dränerad skjuvhållfasthet i kohesionsjord bestäms genom direkta skjuvförsök eller triaxialförsök i laboratoriet. Den dränerade skjuvhållfastheten är främst relevant i överkonsoliderad kohesionsjord och i skikt och lager med grövre jord. Även i normalkonsoliderade jordprofiler kan dränerad skjuvhållfasthet bli dimensionerande i anslutning till lager med höga vattentryck.

Den dränerade skjuvhållfastheten bedöms ofta empiriskt, speciellt i de fall där de potentiella glidytorerna endast till en mindre del går i partier där denna hållfasthet kan vara dimensionerande.

Direkta skjuvförsök utförs och utvärderas enligt SGF Notat 2:2004 på prover av finkornig jord som fått rekonsolidera till in situ spänningarna. För organiska och skiktade jordar används dränerade direkta skjuvförsök eftersom skjuvningen då utförs parallellt med den huvudsakliga fiber- respektive skiktorienteringen.

Dränerade triaxialförsök på finkornig jord utförs och tolkas enligt ISO/TS 17892-9:2004. De utförs som regel endast som aktiva försök med axiell kompression. Effektiva hållfasthetsparametrar som motsvarar den dränerade hållfastheten vid konstant volym kan utvärderas ur spänningsvägar i odränerade försök. Aktiva dränerade triaxialförsök används normalt inte för bestämning av effektiva hållfasthetsparametrar i organisk jord, eftersom fiberinnehållet i jorden medför att inget skjuvbrott uppstår i detta försök. Vidare rekommendationer för utförande och tolkning av triaxialförsök ges för normalkonsoliderad och svagt överkonsoliderad lera i CTH kurs triaxialförsök och för lermorän i SGI Rapport 59.

Dränerad skjuvhållfasthet i kohesionsjord bestäms genom direkta skjuvförsök eller triaxialförsök.

6. Hållfasthet i silt och friktionsjord

Hållfastheten i naturlig silt och friktionsjord bestäms normalt från sonderingsresultat i fält. Laborrieförsök utförs på denna typ av jord normalt endast då finjordshalten är så hög att ostörda prover kan tas och jorden är så lågpermeabel att sonderingar utförs under i princip odränerade förhållanden. I dessa fall utförs bestämningarna med samma metoder som för lerjord. Laborierprovning utförs också som förprovning av material som ska användas i olika typer av fyllningar.

6.1 Provning i fält

Hållfasthetsegenskaperna provas främst genom CPT-sondering. Dräneringsgraden under sonderingen i silt bedöms ur de genererade portrycksförändringarna. Bedöms sonderingen vara i princip odränerad utvärderas den odränerade skjuvhållfastheten ur sonderingen. Bedöms jorden vara delvis dränerad kan de effektiva hållfasthetsparametrarna c' och ϕ' utvärderas under vissa förutsättningar och för helt dränerad jord utvärderas friktionsvinkeln, se vidare SGI Information 15. Utvärdering av odränerad respektive helt dränerad hållfasthet ingår i t.ex. programmet CONRAD.

De på ovanstående vis utvärderade hållfasthetsparametrarna avser värden som kan användas för fall med konstanta eller sjunkande spänningsnivåer, t.ex. släntstabilitet. För fall med kraftigt ökande belastning, som bärförmåga hos plattor och fundament, används lägre värden, speciellt för lös och finkornig jord. Dessa empiriska erfarenhetsvärden utvärderas med ledning av jordart och uppmätt sonderingsmotstånd, Figur 9.

I speciellt silt kan negativa portryck ha stor betydelse för sonderingsmotståndet och utvärderingen bör göras med hänsyn till detta, se vidare SGI Rapport 54 och Information 16.

För grusig jord och morän är det främst hejarsondering som är användbar.

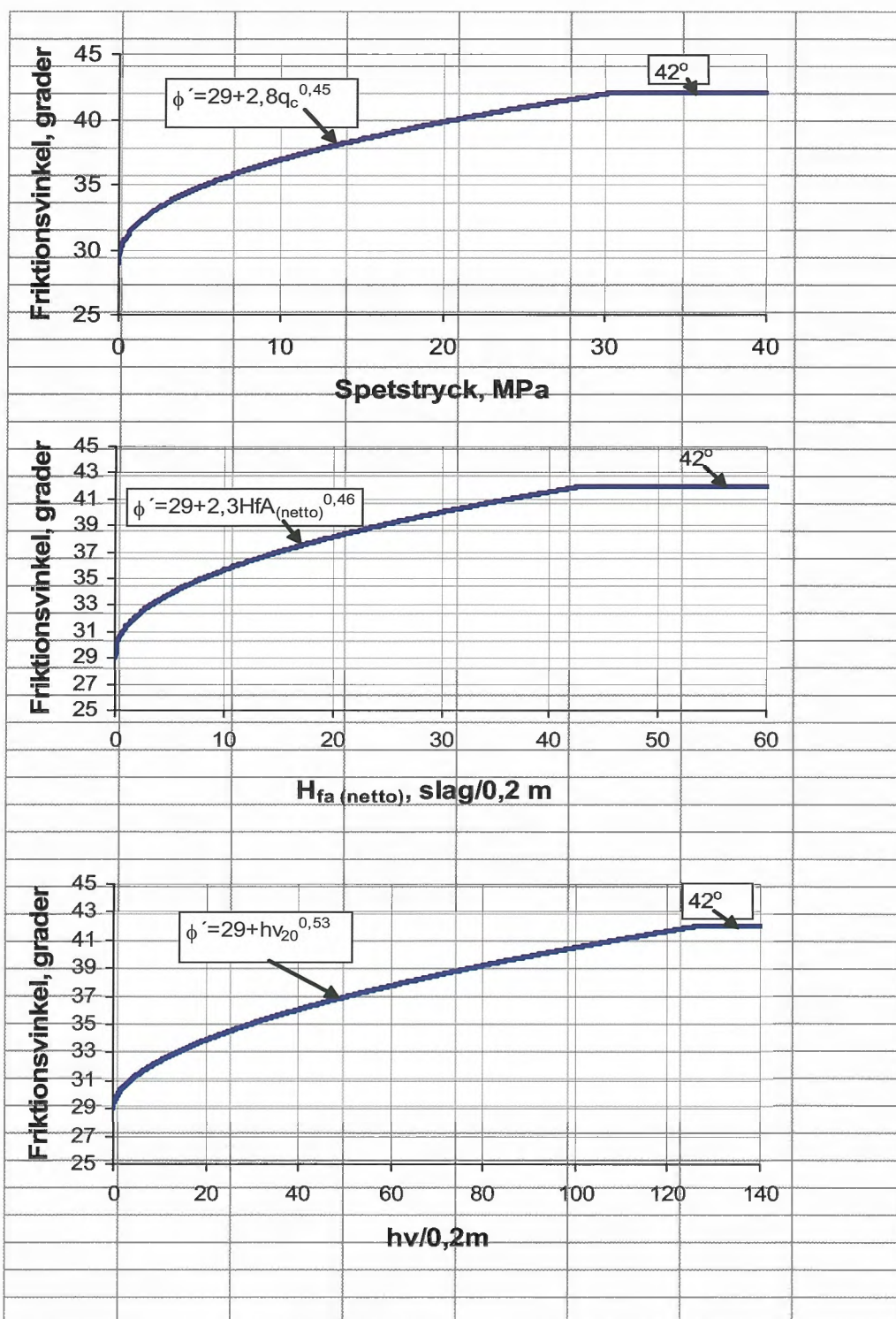
Vid stabilitetsberäkningar där hållfastheten i fyllningar och bankar av friktionsjord förutsätts mobiliseras samtidigt som hållfastheten i underliggande normalkonsoliderad eller svagt överkonsoliderad kohesionsjord antas värden som maximalt motsvarar en lös lagring i friktionsjorden oavsett vilken packning som utförts. Riktvärden för dessa friktionsvinklar är 30° för silt, 32° för sand och 34° för grus.

6.2 Laborierprovning

Direkta skjuvförsök utförs på ostörda prover av främst skiktad jord med omväxlande silt och lera. Såväl odränerad skjuvhållfasthet som effektiva hållfasthetsparametrar bestäms.

Triaxialförsök används för bestämning av hållfasthetsegenskaperna i homogen jord. De utförs bl.a. ofta som förprovning av nya material som ska användas i konstruktioner. För silt och annat finkornigt material kan såväl odränerad skjuvhållfasthet som effektiva hållfasthetsparametrar bestämmas. I grövre jord och andra material bestäms friktionsvinkeln, se vidare SGI Information 8 och 16.

*Hållfasthets-
egenskaperna
provas i fält
främst genom
CPT-sondering.*



Figur 9.
 Diagram för utvärdering av friktionsvinkel vid bärlighetsberäkning i sand ur sonderingsresultat.
 a) CPT-sondering
 b) Hejarsondering
 c) Viktsondering

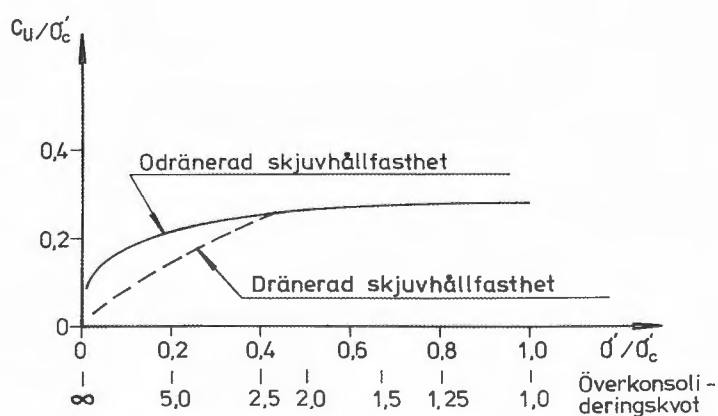
Anm.
 För **grus** görs ett tillägg av 2 till ovanstående värden.
 För **silt** görs ett avdrag med 3 från ovanstående värden.
 Vid **utfylld eller packad** jord divideras sonderingsmotståndet med 1,2 före utvärdering av friktionsvinkeln.
 I **siltig jord** divideras viktsonderingsmotståndet med 1,3 före utvärdering av friktionsvinkeln.
 Vid hejarsondering ska det totala neddrivningsmotståndet reduceras med ledning av uppmätt mantelfriktion mot sondstängerna.

7. Val av odränerad eller dränerad skjuvhållfasthet

Den odränerade skjuvhållfastheten betraktas ofta som en konstant trots att försök visat att den från att ha ett värde då leran är normalkonsoliderad sjunker då effektivtrycket minskar och överkonsolideringskvoten därmed ökar. I vad som klassificeras som normalkonsoliderad eller svagt överkonsoliderad jord ($OCR \leq 1,5$) är påverkan av överkonsolideringen så liten att den normalt kan bortses ifrån, men vid högre överkonsolideringsgrader bör den beaktas. Vid val av skjuvhållfasthet måste dock också hänsyn tas till den dränerade skjuvhållfastheten. Då denna blir lägre än den odränerade skjuvhållfastheten blir den också, utom i mycket korta tidsperspektiv, den hållfasthet som ska användas vid dimensioneringsberäkningar. Dränerad skjuvhållfasthet blir lägre än den odränerade skjuvhållfastheten vid en överkonsolideringskvot som, beroende på belastningsfall, normalt är i storleksordningen 2 – 4. Vid denna överkonsolideringsgrad är nedgången i odränerad skjuvhållfasthet i jämförelse med det normalkonsoliderade fallet fortfarande begränsad, men kan spela en viss roll vid bedömning av skjuvhållfasthet efter stora avlastningar eller ökade porvattentryck. Figur 10.

Hänsyn till överkonsolideringsgraden vid val av odränerad eller dränerad hållfasthet erhålls automatiskt om en kombinerad analys utförs. Eventuella förändringar i den odränerade skjuvhållfastheten på grund av spänningsnivån beaktas dock inte i befintliga beräkningsprogram.

Hänsyn till överkonsolideringsgraden vid val av odränerad eller dränerad hållfasthet erhålls automatiskt vid en kombinerad analys.



Figur 10. Skjuvhållfasthetens variation med effektivspänningsnivån vid direkt skjuvning.

8. Sammanvägning av provningsresultat och empirisk erfarenhet

8.1 Allmänt

Behovet av en noggrann sammanställning och utvärdering av olika resultat samt empiri beror på problemställningen och mätresultatens nivå. Är de uppmätta värdena på den odränerade skjuvhållfastheten så höga att inga stabilitets- eller bärlighetsproblem med avseende på denna hållfasthet kan uppstå behöver den inte heller utredas vidare. I dessa fall ska dock också risken för brott enligt dränerad (och kombinerad) analys beaktas.

I de fall bärlighets- respektive stabilitetsproblem potentiellt föreligger, ökar behovet av en noggrannare sammanvägning för en säker utvärdering av hållfasthetsegenskaperna.

Behovet av portrycksobservationer varierar också med problemställning och mätresultat. I många fall räcker det med observationer av den fria grundvattenytan i borrhål samt mätning av trycknivån i inbäddade eller underliggande dränerande lager och skikt tillsammans med uppskattade högsta bräddningsnivåer vid den geologiska besiktningen. Om mätresultaten indikerar att den dränerade skjuvhållfastheten kan bli dimensionerande även i den fin-korniga jorden kan fler observationer behövas. Om det klart framgår att portrycksnivåerna inte kan bli så höga att den odränerade skjuvhållfastheten inte är dimensionerande behöver portrycken i kohesionsjorden däremot inte klarläggas i detalj. Det skall dock observeras att höga artesiska tryck kan förekomma i bottenlager även i områden där risken för sådana inte är uppenbar och att trycken i inbäddade eller underliggande dränerande lager och skikt alltid bör mätas. Detta kan preliminärt göras genom tillfälliga stopp vid CPT-sonderingar och bör vid behov följas upp med observationer i portrycksspetsar under så lång tid att portrycksprognoser kan göras.

Vid sammanvägningar av resultat används olika kriterier för försiktiga val av relevanta värden beroende på problemställning och vad som är relevant i det aktuella fallet. Vid stabilitetsberäkningar används normalt de högsta prognosticerade portrycksnivåerna i jorden samtidigt som lägsta prognosticerade vattenni-

vå ansätts i vattendrag vid släntfot. Motsvarande ansätts ofta högre densiteter i påskjutande jordmassor på aktivsidan medan lägre densiteter ansätts i de mothållande jordmassorna på passivsidan.

För heterogena jordmassor som t.ex. fyllningar med varierande innehåll och packningsgrad lämpar sig ofta statistiska metoder för att ta fram hållfasthetsvärden som med stor sannolikhet kan betraktas som säkra. Vid beräkning av bärförmåga för plattor och andra hållfasthetsproblem där en relativt liten jordvolym är involverad används ofta de lägsta bedömda hållfasthetsvärdena inom den aktuella volymen eller ett motsvarande statistiskt värde eftersom eventuella lokala svaghetsplan då har stor betydelse.

För problemställningar som involverar större volymer av naturligt avsatt jord, där hållfastheten varierar i plan och profil på ett logiskt och förutsebart sätt beroende på sammansättning och geologisk avsättnings- och belastningshistoria, ställer en statistisk behandling mycket stora krav så att inte denna information, eller delar av den, går förlorad. Det kan därför vara bättre med en manuell ingenjörsmässig bedömning i dessa fall.

De korrigerade hållfastheterna sammanställs oftast som en hållfasthetsprofil mot djupet. I erosionslänter sammanställs hållfastheterna normalt mot nivån. En ingenjörsmässig bedömning görs av värdena med hänsyn till jordens övriga egenskaper. Efter viktning samt eventuell komplettering, eller uteslutning av värden som bedömts oriktiga enligt nedan, tas en trolig hållfasthetsprofil fram, som vid liten spridning ofta motsvarar medelvärden av de korrigerade hållfastheterna (derived values).

I de fall man endast har ett fåtal parameterbestämningar bör denna brist beaktas vid val av erforderlig säkerhetsfaktor respektive partialkoefficienter.

Behovet av en noggrann sammanställning och utvärdering av olika resultat samt empiri beror på problemställningen och mätresultatens nivå.

8.2 Sammanvägning och bedömning av odränerad skjuvhållfasthet

Vid sammanvägning av försöksresultat i form av hållfasthetsvärden från vingförsök, fallkonförsök och CPT-sondering ska beaktas att efter korrigering för flytgräns och i förekommande fall för överkonsolidering ska dessa **härledda värden** (derived values) ge samma resultat under idealiska förhållanden. De ska dessutom i princip överensstämma med de resultat som utvärderas ur direkta skjuvförsök. Resultaten från samtliga dessa försök antas motsvara hållfastheten i en horisontell glidyta vilken också approximativt är densamma som medelskjuvhållfastheten i en cirkulärcylindrisk glidyta med lika stora aktiva och passiva zoner.

Resultaten från odränerade aktiva- och passiva triaxialförsök representerar hållfastheterna vid aktiv- respektive passiv skjuvning, vilket normalt också är största och minsta odränerade hållfasthet med hänsyn till anisotropieffekter. Resultaten från de två typerna av triaxialförsök ska således inte blandas samman sinsemellan eller med resultaten från övriga typer av försök utan behandlas separat och var för sig.

Vid sammanvägningen av olika försöksresultat ska för fältförsöken vägas in vad som är känt om för- och nackdelar för de olika metoderna såväl allmänt som i den aktuella typen av jordprofil.

För vingförsök gäller att det är den metod som vi har längst erfarenhet av och mätutrustningen är robust och avpassad för mätning av odränerad skjuvhållfasthet i mycket lös till fast lera. Resultaten fås i form av diskreta värden med som regel en eller flera meters intervall i djupled. Felkällor uppstår främst i skiktad, inhomogen och/eller sensitiv jord, där onormalt stor störning påverkar såväl resultat som möjligheten till en relevant korrigering. Förekomst av siltskikt eller andra inbäddade skikt eller föremål (typ växtrester, snäckskal eller sten och gruskorn) medför risk för såväl stor störning som för höga mätvärden på grund av dränering eller ihakning i föremålet. Låga hållfasthetsvärden kan också mätas i anslutning till siltskikt till följd av störning eller höga vattentryck.

Störningseffekter uppstår vid övergång från fastare till lösare jordlager. Används vinge med skyddskåpa begränsas störningen till första provningsnivån under det fastare lagret.

Vid mycket skiktad/varvig jord kan dock kontinuerlig störning uppstå. Vid användning av vinge utan skyddskåpa är störningsrisken större, då lera från ett överliggande fastare lager kan fastna på vingen och hela den underliggande lösare lerprofilen kan bli störd vid provningen.

Risken för felaktiga värden på främst större djup och i fastare lera beror också på om skyddsror och skyddskåpa används för stänger och vinge. Resultat från mycket djupa undersökningar indikerar att resultaten från vingförsök utan skyddsror ofta tenderar att bli för låga under cirka 35 m djup även i homogena normalkonsoliderade jordprofiler.

Utvärderingen av vingförsök är halvempirisk och i vissa jordar, som t.ex. svämsediment, är relevansen osäker.

CPT-sondering är den sonderingsmetod som ger den mest detaljerade informationen om jordlagerföljden i jordprofilen. Resultaten är nära nog kontinuerliga och detaljerade trender i fasthetsvariation kan därmed utläsas. Mätningen sker med elektronik som är installerad i sondspetsen, vilket ställer mycket stora krav på utrustning och handhavande om en god noggrannhet skall uppnås även i lösa leror. Felkällor som inte relevanta noll-avläsningar, temperaturdrift, hystereseffekter, nollpunktförskjutning vid genomgång av fasta skikt m.m. kan uppstå. Resultaten måste därför granskas noga och bedömas från fall till fall. CPT-sonderingen utförs ofta i ett tidigt skede och tolkas då ofta preliminärt innan några flytgränsvärden finns tillgängliga. Noggrannheten i tolkningen förbättras då faktorer som uppmätta grundvattennivåer och bestämda densiteter och flytgränsvärden beaktas. Utvärderingen är halvempirisk och är osäker i vissa jordar, som t.ex. svämsediment. Hur tolkningen gjorts, vad som beaktats och detaljeringsgraden i tilläggsinformationen bör därför också vägas in.

Vid bedömningen av laboratorieförsöken ska provernas störningsgrad beaktas.

För fallkonförsök gäller att dessa ingår i rutinprovningen av ostörda prover i laboratoriet. I homogen lera och på måttliga djup ger de normalt värden i samma storlek som vingförsöken. På grund av spänningsrelaxation och svällning samt annan störning i samband med provtagning och provhantering blir värdena från fallkonförsök ofta för låga i prover tagna på större djup än cirka 10 – 15 m. Under

CPT-sondering är den sonderingsmetod som ger den mest detaljerade informationen om jordlagerföljden i jordprofilen.

Empiri är inte en bestämning utan främst en bedömningsgrund.

gynnsamma förhållanden med homogen lera kan dock hållfastheten i vissa fall bibehållas och relevanta hållfasthetsvärden mäts med fallkonförsök ned till mycket stora djup. I skiktad och inhomogen jord blir resultaten ofta missvisande med för låga värden då proverna är störda och för höga värden då konen träffar ett fastare skikt, t.ex. ett siltskikt, eller en grövre partikel i jorden. På grund av den mycket begränsade jordvolym som provas, blir spridningen i mätvärden också ofta stor. Utvärderingen av fallkonförsök är halvempirisk och i vissa jordar, som inte ingår i det empiriska erfarenhetsunderlaget, är relevansen osäker.

För direkta skjuvförsök och triaxialförsök gäller att dessa provningar sker under kontrollerade förhållanden och på prover vars sammanställning och homogenitet också kan kontrolleras. Resultatens relevans är dock avhängig av provernas kvalitet (grad av ostördhet) och hur relevanta de är för den aktuella jordprofilen eller delen av denna.

Vid sammanvägningen av resultaten ska ovanstående faktorer, vad som i övrigt är känt om jordprofilen och vad som kan förväntas med ledning av empiri beaktas. Innan sammanvägningen till en bedömd hållfasthet görs sorteras uppenbart irrelevanta resultat bort. De olika resultaten viktas med hänsyn till ovannämnda faktorer och ett därefter som tillförlitligt bedömt värde (eller profil) väljs. Denna bedömning påverkas i sin tur av hur många och vilka metoder som använts, hur omfattande undersökningarna är med avseende på provtagningspunkter och nivåer och hur omfattande och tillförlitligt underlaget för de empiriska jämförelsevärdena är. Det skall observeras att empiri inte är en bestämning utan främst en bedömningsgrund. Vid behov utförs kompletterande försök.

8.3 Bedömning av förkonsolideringstryck

En bedömning av förkonsolideringstrycket är en förutsättning för en empirisk uppskattning av odränerad skjuvhållfasthet.

Utvärderade förkonsolideringstryck från laboratorieprovning bedöms med ledning av störningsgraden hos proverna.

Utvärderade förkonsolideringstryck och trender bedöms vidare från rådande effektiva överlagringstryck, inbäddade dränerande skikt i profilen, uppskattad rimlig överkonsolideringsgrad samt resultat från främst CPT-sondering (och eventuella dilatometerförsök). Hansbos relation kan användas på värden från ving- och fallkonförsök, men denna uppskattning är ofta mycket grov. Den utvärderade förkonsolideringen mot djupet ska normalt vara en jämn kurva, möjligen med förhöjda överkonsolideringsgrader närmast markytan och dränerande skikt. En utvärderad underkonsolidering visar på att något i den utvärderade kombinationen av överlagringstryck, portryck och förkonsolideringstryck är fel. Språng i överkonsolideringen kan förekomma i områden där skred tidigare inträffat eller den geologiska avsättningshistorien inneburit konsolidering för olika överlastar eller grundvattenförhållanden, som t.ex. i olika typer av lermorän i Skåne.

9. Exempel

9.1 Undersökningar i djupa lerlager i Göteborg

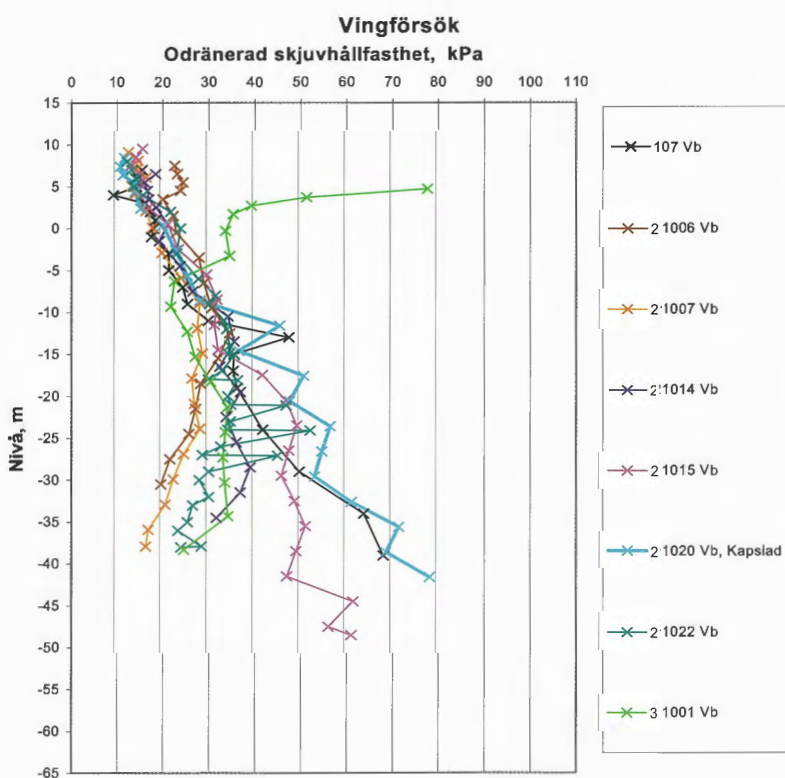
Detta exempel är hämtat från undersökningar i samband med ett mycket stort infrastrukturprojekt i Göteborg. De aktuella jordlagren består av tämligen homogena leravlagringar med över 80 meters mäktighet. Eftersom problemställningarna bland annat innefattade djupa tunnlar, mycket långa kohesionspålar och djupa glidytor är hållfastheten till fullt djup av avgörande betydelse. I de undersökningar som utförts för att skapa en tillförlitlig modell över skjvuhållfastheten i området har ingått vingförsök i 8 punkter, kolvprovtagning i 9 punkter och CPT-sondering i 4 punkter.

Leran inom området är normalt svagt överkonsoliderad. De flesta undersökningspunkterna är förlagda i orörd mark, men eftersom området varit exploaterat i olika grad genom årens lopp, kan lokalt högre överkonsolideringsgrader förekomma på måttliga djup på

grund av tidigare eller befintliga konstruktioner och ingrepp.

Resultaten av vingförsöken är i huvudsak likartade ned till cirka 20 m djup, Figur 9.1.1. Från detta djup börjar de flesta kurvorna, en efter en, att avvika från trenden med ökande hållfasthet mot djupet för att sedan visa konstant eller minskande hållfasthet med ökande djup. Endast i två av punkterna bibehålls trenden med kontinuerligt ökande hållfasthet mot djupet ända ned till cirka 50 m där försöken avslutades. I den punkt där de högsta värdena erhöles på större djup utfördes vingförsöken med utrustning med skyddsror och skyddsskåpa. I övrigt användes oskyddad utrustning. En jämförelse med Hansbos relation ger att resultaten på större djup i de flesta fall indikerar underkonsoliderad jord.

Resultaten från CPT-sonderingarna är samlade och visar på ökande hållfasthet mot djupet i samtliga punkter, Figur 9.1.2. Den utvärderade



Figur 9.1.1. Resultat från vingförsök.

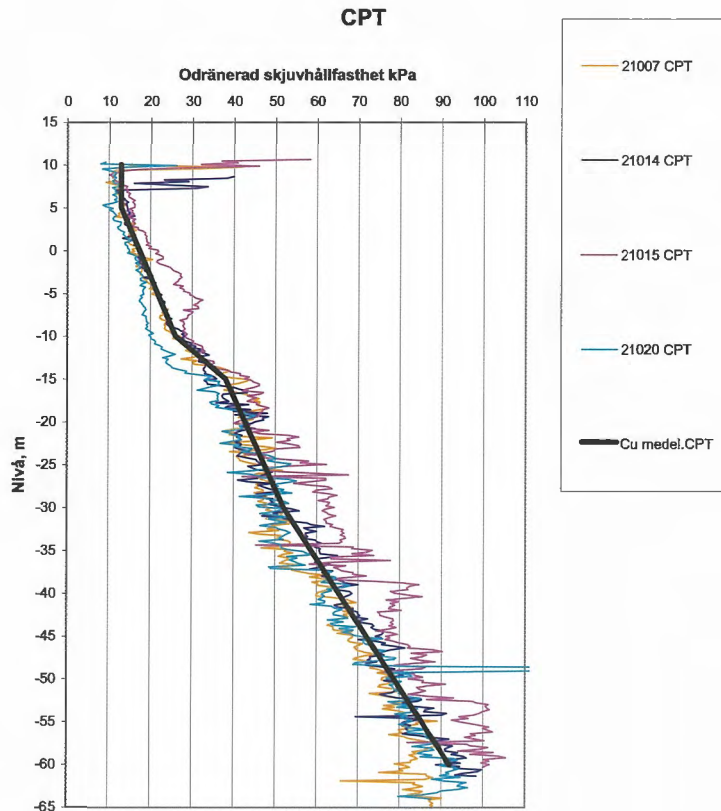


Fig. 9.1.2.
Utvärderad odränerad
skjuvhållfasthet ur
CPT-sonderingar.

skjuvhållfastheten motsvarar i stort den som erhöles ur vingförsöken ner till cirka 20 m djup och därunder ungefär de högsta värdena ur vingförsöken som erhöles med den kapslade vingutrustningen.

De utförda provtagningarna har i några punkter utförts ända ned till cirka 70 m djup. Resultaten från fallkonförsöken ger utvärderade skjuvhållfastheter som är i samma storlek som de som erhöles ur CPT-sonderingarna och med den kapslade vingutrustningen. Detta tyder på att mycket bra prover kunnat tas upp även från stora djup i denna profil. Fallkonförsöken verifierar också den högre hållfasthet i de övre lerlagren i en punkt som indikerades i vingförsöken. På grund av hållfasthetens stora betydelse utfördes ett antal direkta skjuvförsök som täcker in hela djupprofilen. Eftersom provkvaliteten bedöms vara mycket god genom hela profilen kan också resultaten från dessa försök antas vara mycket relevanta. Resultaten från dessa försök stämmer väl med vad som erhöles ur vingförsök på måttliga djup samt med fallkonförsök, vingförsök med kapslad utrustning och CPT-sonderingar genom hela profilen. Resultaten från de direkta skjuvförsöken verifierar därmed de högre uppmätta hållfastheterna och ger underlag för att bedöma den odränerade skjuvhållfastheten vara något högre än vad som annars skulle ha gjorts, Figur 9.1.3.

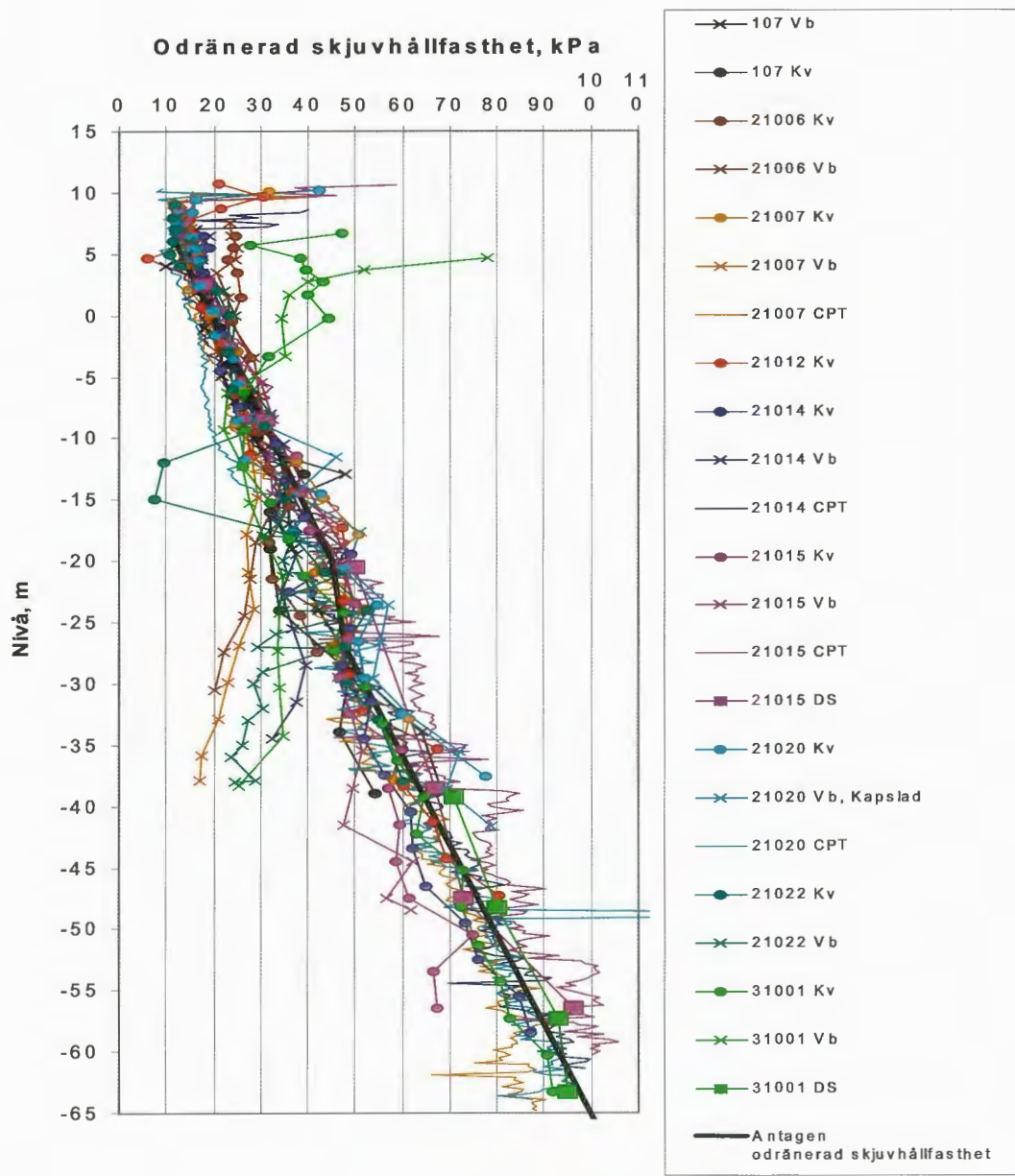


Fig. 9.1.3. Sammanställning av samtliga skjuvhållfasthetsbestämningar och bedömd odränerad skjuvhållfasthet.

9.2 Skjuvhållfasthet i störningskänslig lera i Östergötland

Exempel 2 är hämtat från en undersökning av stabilitet för en järnvägsbank nära Norsholm i Östergötland. Jordprofilen består av cirka 20 m sediment ovanpå morän och berg. De översta cirka 9 metrarna består av högplastisk och ställvis något organisk lera. Därunder blir leran varvig och mot djupet finns ett ökande inslag av tunna siltskikt. På cirka 16 – 17 m djup finns ett grövre lager som kan antas vara dränerande. Under detta finns fastare ler- och siltlager som övergår till silt och sand innan moränen påträffas på 18 – 23 m djup.

Torrskorpan är i medeltal 2,5 m tjock och grundvattenytan ligger på cirka 1 m djup. Ur geologisk och topografisk synpunkt skulle jordförhållandena kunna antas vara likartade inom den sträcka av cirka 150 m som studerats. Det är de också under cirka 6 m djup, men inom de två sektioner som undersökts i detalj varierar torrskorpeeffekterna till att nå ned till 2,5 respektive cirka 6 m djup och andra hårdare partier påträffades i denna zon vid undersökningarna.

I de två sektionerna utfördes CPT-sondering, vingförsök och ostörd provtagning. På de upptagna proverna utfördes rutinprovning samt ödometerförsök.

Resultaten från ödometerförsöken och CPT-sonderingarna visar på en normal överkonsolideringsgrad av minst 1,2 i leran under torrskorpan, Figur 9.2.1.

De utvärderade skjuvhållfastheterna från vingförsök, fallkonförsök och CPT-sonderingar skiljer stort, Figur 9.2.2. De lägsta värdena uppmättes i fallkonförsöken medan vingförsöken gav något högre värden och CPT-sonderingarna gav markant högre värden. En kontroll med Hansbos relation, där förkonsolideringstrycken uppskattas, visar att resultaten från såväl fallkonförsöken som vingförsöken pekar på en underkonsoliderad lera. Detta tyder i sin tur på att leran störts vid provtagning respektive provning och/eller att högre korrektionsfaktorer än vanligt skulle vara tillämpliga. Några ödometerförsök fick också kompletteras på grund av alltför störda prover. De hållfastheter som utvärderas empiriskt med ledning av förkonsolideringstryck och flytgräns är markant högre än resultaten från fallkon- och vingförsöken och ligger i underkant av resultaten från CPT-sonderingarna. På grund av den stora spridningen utfördes några kompletterande direkta skjuvförsök. Också resultaten från dessa var högre än de från vingförsöken. Ett par av resultaten var något lägre än de empiriska hållfasthetsvärdena, men på grund av den konstaterade störningen av proverna, dels ur resultaten från konförsöken dels ur ödometerkurvornas form på dessa nivåer, antas hållfastheten vara i samma storlek som de empiriska värdena.

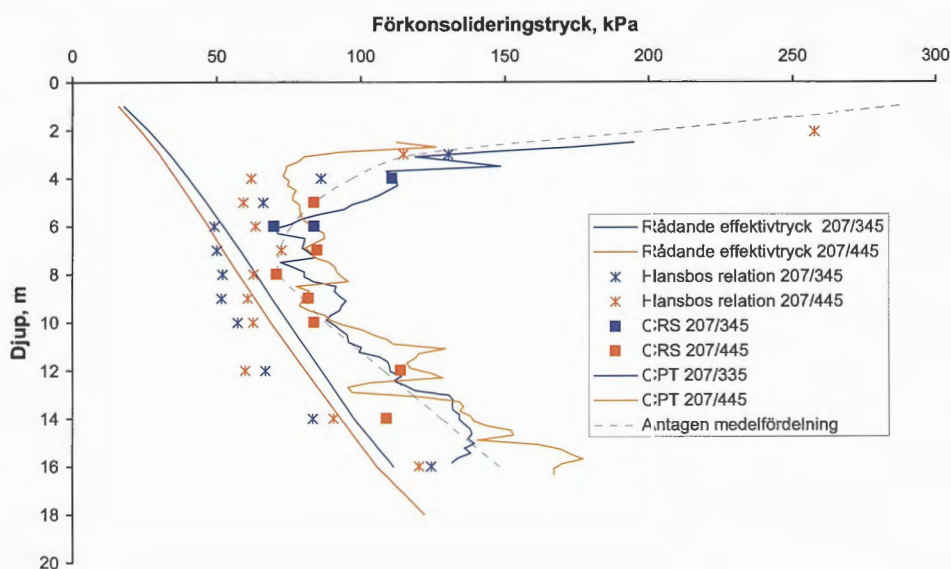
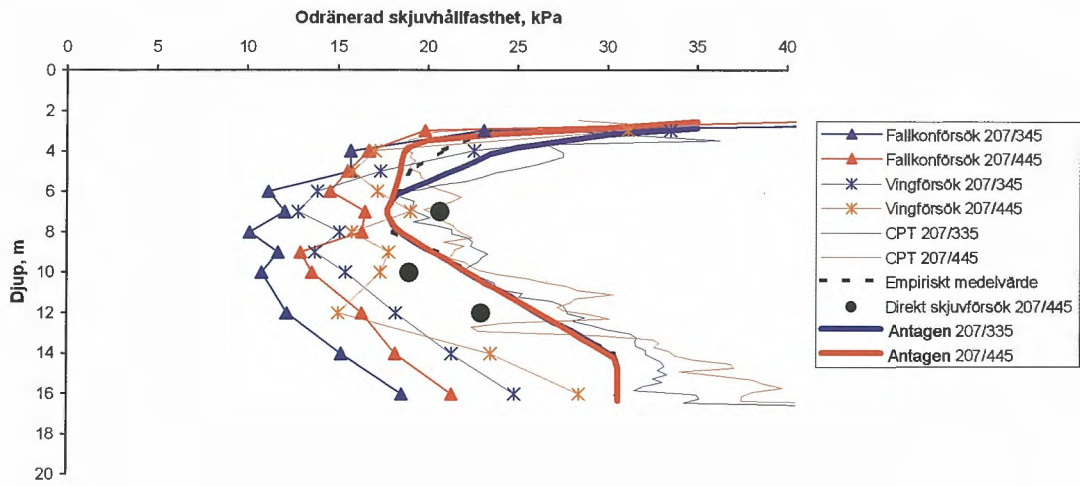


Fig. 9.2.1. Rådande effektivt överlagringstryck och utvärderade förkonsolideringsstryck vid Norsholm.



Figur 9.2.2.
Utvärderad odränerad
skjuvhållfasthet vid
Norsholm .

9.3 Lermorän

Ett exempel på utvärdering av skjuvhållfasthet i lermorän kan ges från undersökningar i Tornhill strax norr om Lund. Undersökningar utfördes här för bedömning av bärförmåga och sättningar hos provbelastade grundplattor. Undersökningarna utfördes i form av vingförsök och CPT-sonderingar i fält samt ödometerförsök på upptagna prover i laboratorium.

Jordprofilen består överst av cirka 4 m baltisk lermorän. Därpå följer en cirka 2 m tjock övergångszon med omväxlade lermorän och sediment som överlagrar sandig lermorän ned till 14 m djup där kalkberget påträffas. Den senare moränen är av typ nordostmorän. Grundvattenytan ligger normalt på cirka 2 m djup, men kan stiga till markytan under blöta perioder.

Området hade tidigare varit en jordbruksfastighet med byggnader och dräneringsledningar. För att undersöka eventuella variationer i jordens fasthet över den aktuella ytan delades denna in i ett rutnät och CPT-sonderingar utfördes i hörnpunkterna. Totalt utfördes 25 CPT-sonderingar och samtliga penetrerade ned till cirka 7 m djup, där det blev stopp i den fastare nordostmoränen. Resultaten i form av uppmätta spetsmotstånd uppvisade mycket stor variation med djupet på grund av det stora innehållet av grövre partiklar i jorden, men visade ingen variation sinsemellan som tydde på att egenskaperna hade någon regelbunden variation inom den undersökta ytan. Resultaten utjämnades och sammanställdes och en medelvärdeskurva utvärderades, Figur 9.3.1.

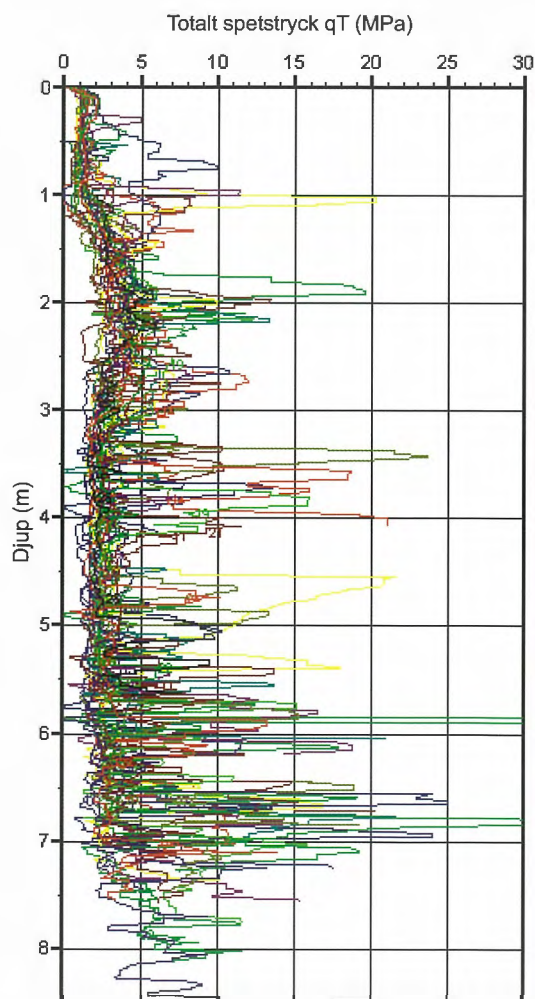
Vingförsök utfördes i ett par punkter med minsta avstånd mellan provningsnivåerna enligt DGF:s feltekomités rekommendationer. Spridningen i resultat var relativt stor, men resultaten var likartade i de två punkterna.

Ödometerförsök utfördes på delar av de upptagna proverna som var tillräckligt homogena för att kunna monteras i provningsapparaturen. Också dessa resultat visade en avsevärd spridning och här har representativa värden utvärderats i spridningsområdets överkant, eftersom större delen av proverna kan förväntas vara påtagligt störda.

Förkonsolideringstrycket har också uppskattats ur det medelvärdesbildade CPT-resultatet och den empiriska utvärderingen för detta. Flytgränsen varierade i detta fall från cirka 40 % i profilens övre del till cirka 20 % i dess

nedre del. Den empiriska konfaktorn för utvärdering av förkonsolideringstryck skulle därmed variera mellan 3 och 2,5. Giltigheten för dessa empiriska konfaktorer för lermorän är osäker, men trenden i förkonsolideringstrycket torde avspelas i CPT-resultaten även här. I detta fall har konfaktorn antagits vara konstant med ett värde av 3,0 genom hela profilen eftersom detta bäst matchar resultaten från ödometerförsöken. De utvärderade förkonsolideringstrycken ur ödometerförsöken visar då på mycket likartade värden, där resultaten från ödometerförsöken i genomsnitt ligger marginellt under CPT-resultaten, Figur 9.3.2.

Värden på den odränerade skjuvhållfastheten har utvärderats ur vingförsöken. I lermorän utförs ingen korrektion, men representativa värden ska utvärderas i spridningsområdets underkant. Värden på skjuvhållfastheten har också utvärderats ur CPT-sonderingarnas medelvärde med användning av konfaktorn 11 för lermorän. Slutligen har empiriska hållfasthetsvärden utvärderats ur rådande effektiva

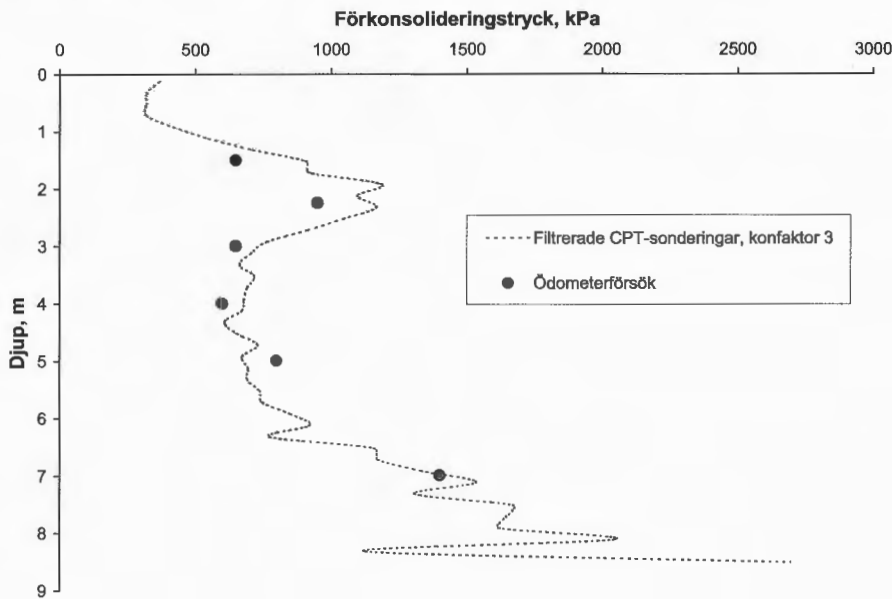


Figur 9.3.1. Sammanställning av CPT-sonderingar i Tornhill.

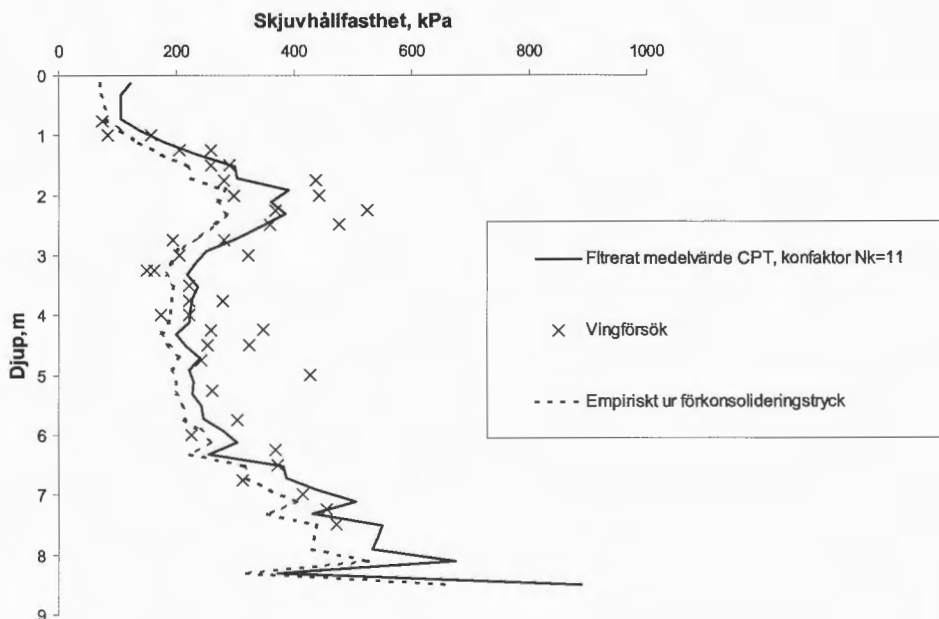
överlagringstryck och uppskattat förkonsolideringstryck samt de empiriska parametrarna $a = 0,4$ och $b = 0,85$ för lermorän.

Som framgår av sammanställningen i Figur 9.3.3, ligger hållfastheten utvärderad ur CPT-sonderingarna i huvudsak mellan underkant och medelvärde av hållfasthetsbestämningarna med vingförsök, medan de empiriskt utvärderade hållfasthetsvärdena genomgående ligger i underkanten av hållfastheten bestämd med vingförsök. I detta fall skulle en bedömd odränerad skjuvhållfasthet ha utvärderats som i princip överensstämmt med den empiriskt utvärderade hållfastheten.

Den odränerade skjuvhållfastheten är dock så hög att den dränerade skjuvhållfastheten ofta blir dimensionerande för hållfastheten. Den dränerade skjuvhållfastheten i den baltiska lermoränen kan uppskattas ur $c' = 0,1 c_u$ och $\phi' = 30^\circ$. I detta fall grundlades plattor på botten av en 1,5 m djup schakt och belastades till brott utan återfyllning. Resultaten visade klart att det då var den dränerade skjuvhållfastheten som var dimensionerande.



Figur 9.3.2. Utvärderade förkonsolideringstryck i Tornhill.



Figur 9.3.3. Utvärderad odränerad skjuvhållfasthet i Tornhill.

9.4 Slänt i sand, silt och sulfidjord

Nedanstående exempel är hämtat från en undersökning rörande stabiliteten i en befintlig slänt i Norrlands kustland. Jordprofilen består av cirka 6,5 m sand som överlagrar sulfidsilt, vilken på cirka 11 m djup övergår i lerig sulfidsilt. Denna fortsätter sedan till stort djup. Slänten lutar ned mot ett vattendrag. Grundvattenytan ligger en bit bakom krönkanten på cirka 4,6 m djup och portvattentrycken därunder har en negativ gradient på grund av den lägre vattennivån i vattendraget.

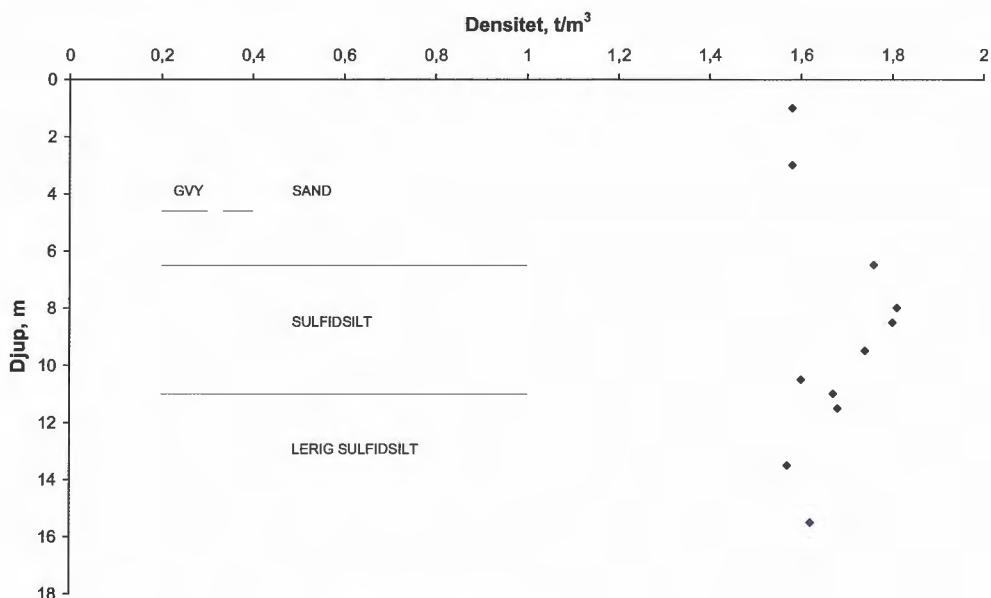
I slänten har utförts CPT-sondering i två punkter, provtagning i en punkt och vingförsök i en punkt.

Enligt rutinförsöken klassificeras jorden i den övre delen som sand och som sulfidsilt därunder. Lerhalten i sulfidsilten ökar med djupet

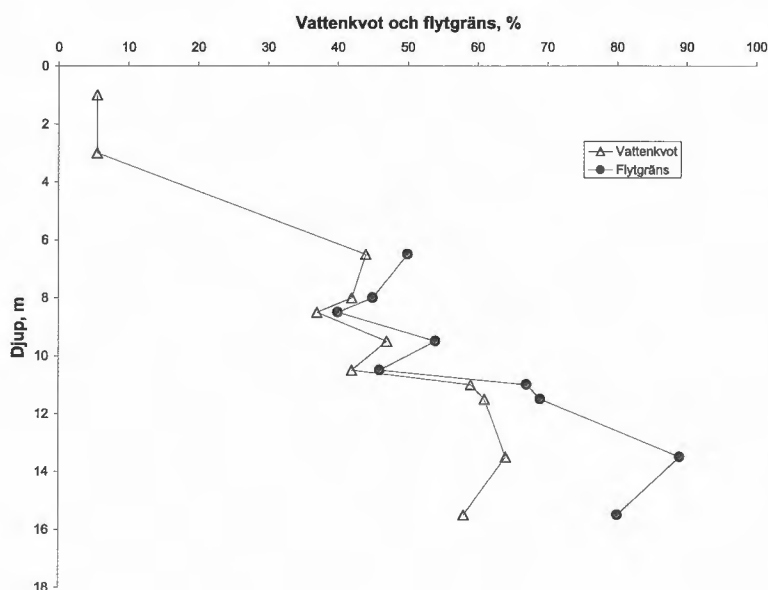
och uppgår under 11 m djup till något över 10 %, vilket gör att jorden här klassificeras som lerig sulfidsilt. Den organiska halten i sulfidsilten varierar mellan 1 och 3 % och vissa partier skulle därmed få tilläggsbenämningen organisk.

Densiteten i den övre endast naturfuktiga sanden är cirka $1,6 \text{ t/m}^3$. Den ökar i den vattenmättade sanden och sulfidsilten till cirka $1,8 \text{ t/m}^3$, för att sedan åter sjunka till cirka $1,6 \text{ t/m}^3$ i den leriga sulfidsilten, Figur 9.4.1.

I sanden ovan grundvattenytan är vattenkvoten endast 5 – 6 %, men i sulfidsilten är både vattenkvot och flytgräns höga, vilket kan hänföras till innehållet av sulfid och organiskt material, Figur 9.4.2.



Figur 9.4.1
Klassificering och densitet.



Figur 9.4.2.
Vattenkvot och flytgräns.

Resultaten från CPT-sonderingarna visar också klart gränserna för de tre typerna av jordmaterial, Figur 9.4.3.

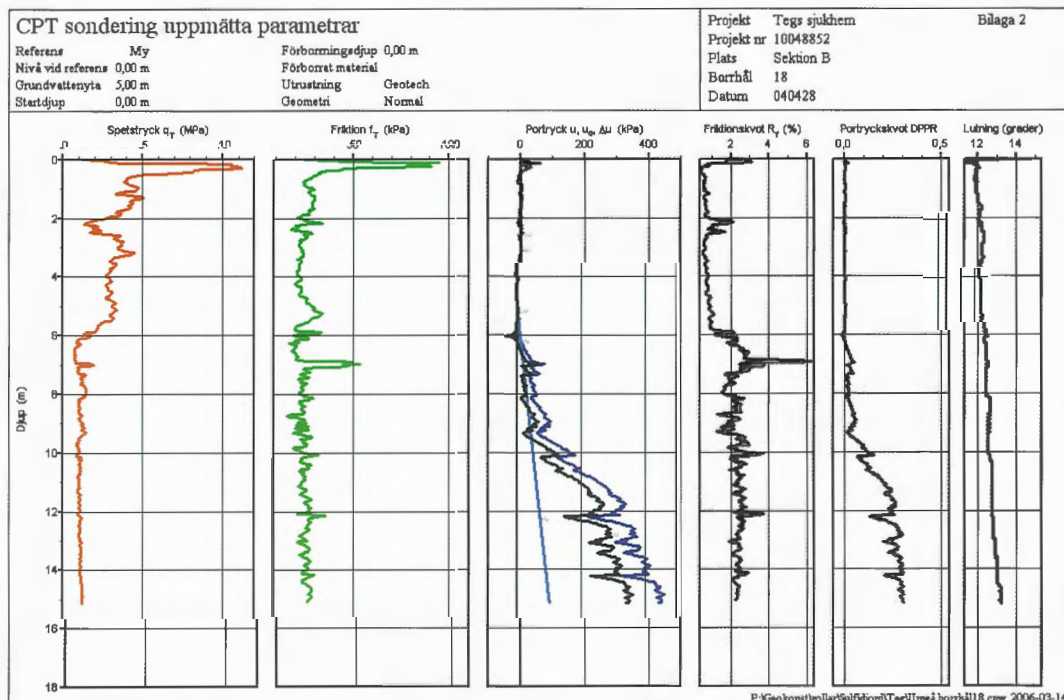
Resultaten från CPT-sonderingen visar ett högt spetsmotstånd, en låg friktionskvot och inga genererade porövertryck i de översta 6 – 6,5 metrarna, Figur 9.4.3. Därunder sjunker spetsmotståndet samtidigt som friktionskvoten ökar och låga men signifikanta porövertryck genereras. Under 10 m djup sjunker spetsstrycket ytterligare något samtidigt som spetsstryckskurvan ändrar form och blir jämnare och betydligt högre porövertryck genereras under sonderingen. Jordmaterialet uppträder därmed dränerat, nästan dränerat respektive odränerat i de tre skilda lagren och motsvarande hållfasthetsparametrar kan utvärderas ur resultaten.

Resultaten från båda CPT-sonderingarna utvärderade enligt gängse metoder i programmet CONRAD visar på en friktionsvinkel i sanden av 34 grader. I den inte helt dränerade sulfidsilten sjunker den så utvärderade skenbara friktionsvinkeln till cirka 25 grader. Detta låga värde beror dock på att det genereras porövertryck under sonderingen. När hänsyn tagits till detta enligt Senneset och Janbu (1984), se SGI Information 16, blir den utvärderade friktionsvinkeln i sulfidsilten 30 grader. Resultaten från två dränerade direkta skjuvförsök bekräftar detta värde.

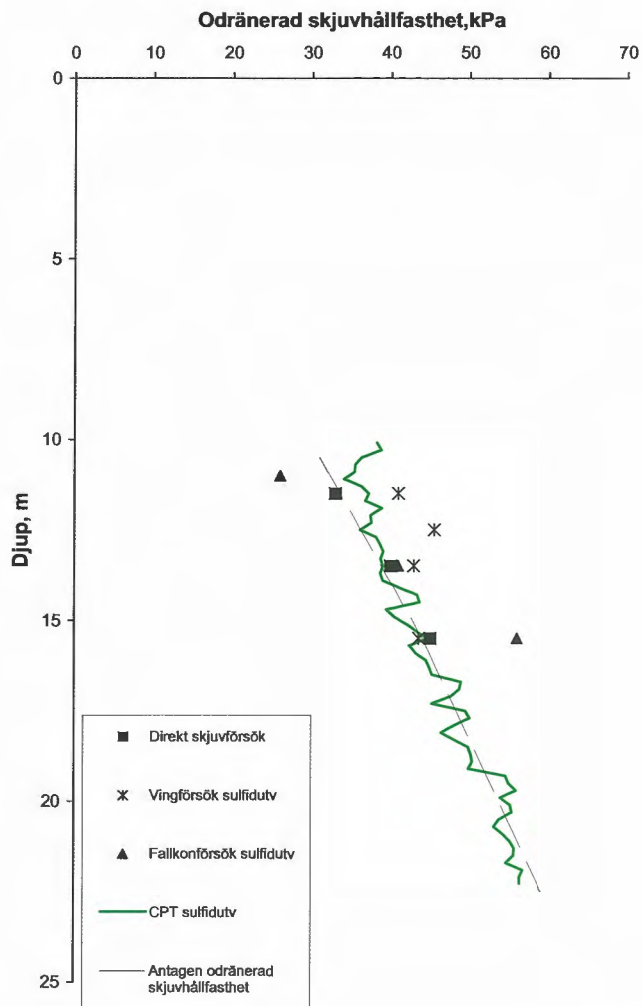
Den odränerade skjuvhållfastheten i sulfidsilten har mätts med vingförsök i fält och fallkonförsök i laboratoriet och utvärderats ur resultaten från CPT-sonderingarna. Resultaten sprider samtidigt som utvärderingen är osäker och bestämningarna har kompletterats med fyra odränerade direkta skjuvförsök i den leriiga sulfidsilten. Resultaten av de olika bestämningarna framgår av Figur 9.4.4.

Den utvärderade odränerade skjuvhållfastheten i den övre sulfidsilten är högre än den dränerade hållfastheten på dessa nivåer samtidigt som klassificering och resultaten från CPT-sonderingarna visar att den inte är relevant. Det är således endast under cirka 10,5 m djup som den odränerade skjuvhållfastheten är av intresse.

Resultaten från de två CPT-sonderingarna skiljer sinsemellan i främst den lösare jorden. Detta beror troligen på att man först penetrerat mer än 6 meter sand innan man kommit ned i sulfidjorden. Förutom felkällor på grund av hystereseffekter vid skiftande fasthet hos jorden medför sondering genom torr sand normalt en påtaglig uppvärmning av sonden och temperatureffekter som inte kan kompenseras för kvarstår då inom ett stort djupintervall under grundvattenytan. Den ena sonderingen utfördes direkt från markytan men inför den andra förborrades det fastaste ytlagret. Resultaten från den senare bedöms därför som mest



Figur 9.4.3 Resultat från en av CPT-sonderingarna.



Figur 9.4.4
Utvärderad odränerad
skjuvhållfasthet.

relevant för utvärdering av hållfastheten i de underliggande lösare jordlagren. Resultaten från denna sondering visar på något lägre hållfastheter än vingförsöken.

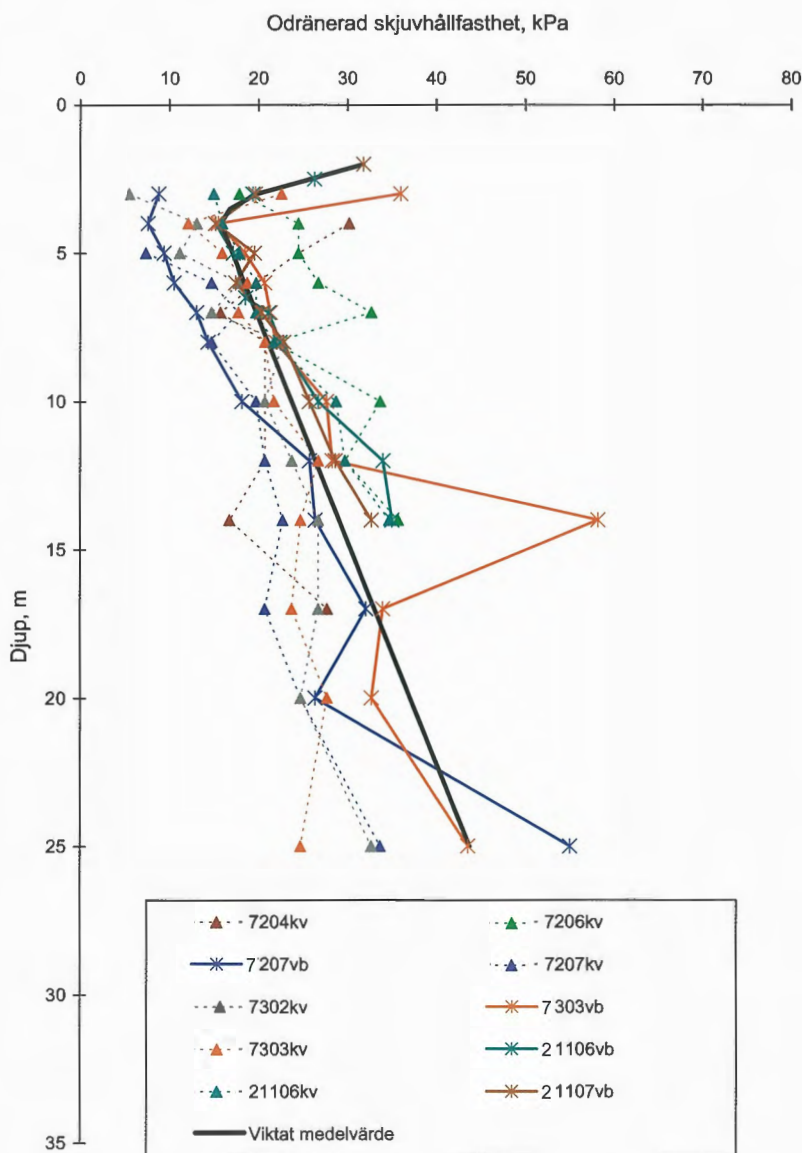
Odränerade direkta skjuvförsök har erfarenhetsmässigt visat sig ge resultat som motsvarar den odränerade skjuvhållfasthet som kan utnyttjas vid olika belastningar i fält. Den antagna odränerade skjuvhållfastheten baseras därför på resultaten från dessa försök tillsammans med den trend för hållfasthetsutvecklingen mot djupet som uppmätts i CPT-sonderingen. I detta fall stämmer dessutom de utvärderade skjuvhållfasthetsvärdena från CPT-sonderingen väl överens med värdena från de direkta skjuvförsöken.

9.5 Jordprofil från mellersta Bohuslän

Jordprofilen i detta exempel, som är hämtat från mellersta Bohuslän, är över 30 m mäktigt och består av postglacial lera överlagrande glaciallera, som i sin tur vilar på friktionsjord på berg. De översta ca 15 metrarna har en skrymdensitet på mellan 16,5 och 17 kN/m³ och en vattenkvot som i huvudsak varierar mellan 50 och 60 %. På större djup minskar vattenkvoten något och är där 45 till 50 %. Skrymdensiteten blir då också något högre, 18 till 19 kN/m³. Sensitiviteten är genomgående mycket hög, 100 till 300. Här och var finns inbäddade silt- och sandskikt. Lerans överkonso- lideringsgrad är 1,3 till 1,4.

Resultaten från vingförsöken och konförsöken varierar kraftigt i jordprofilen och är ställvis ganska höga, men även påtagligt låga värden

har uppmätts. Variationen är störst för konförsöken och resultaten från dessa ligger klart lägre än de från vingförsöken på djup större än 10 à 15 m. Risken för störning är stor då leran är mycket sensitiv, samtidigt som närvaron av silt/sandskikt kan medföra att dels för höga värden uppmäts (om skjuvningen sker i skikt), att dels för låga värden uppmäts då skikten kan medföra att leran under störs såväl vid vingförsök som vid kolvprovtagning. Även konflytgränsen varierar en del i jordprofilen och risken finns att uppmätta hållfasthetsvärden och flytgränser inte i samtliga fall utgör resultat från identisk lera. Den torrskorpepåverkade zonens tjocklek och fasthet kan variera något inom området, men i övrigt är förhållandena tämligen homogena.



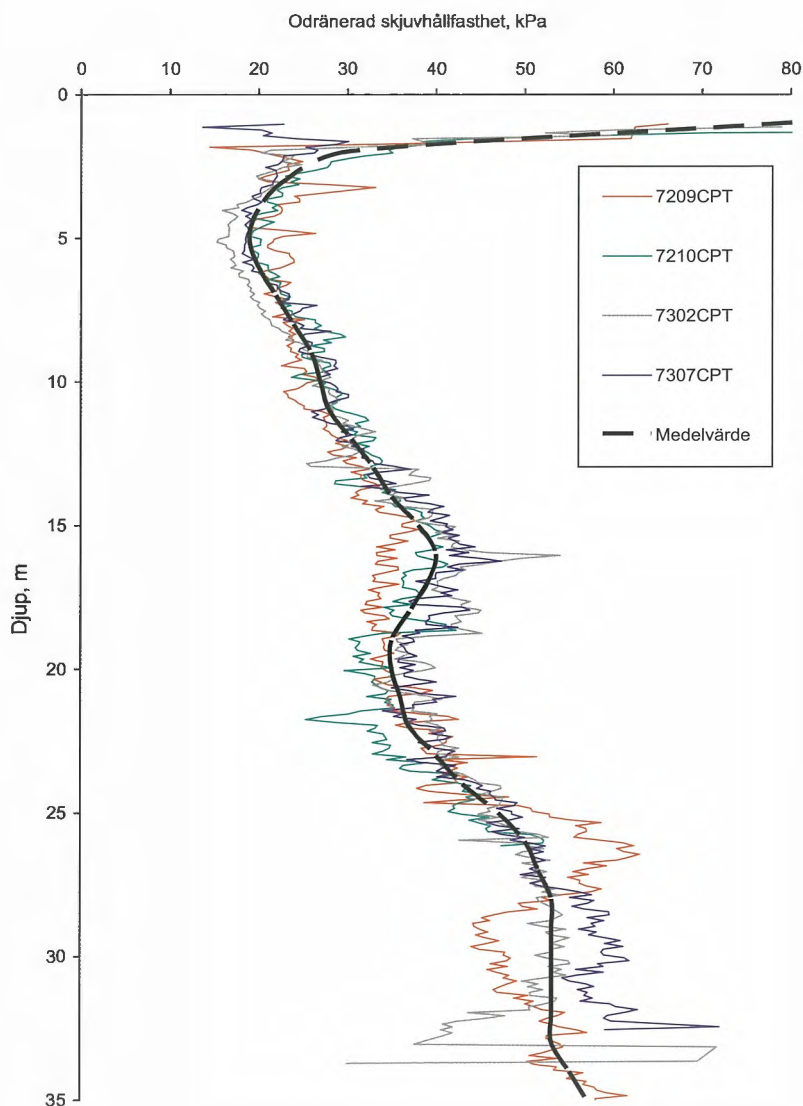
Figur 9.5.1.
Resultat från vingförsök
och konförsök.

Vid bedömningen av resultaten från ving- och konförsöken anses vingförsöken som mest rättvisande och ett viktat medelvärde ger en odränerad skjuvhållfasthet av ca 16 kPa på 4 m djup och en ökning av ca 1,3 kPa/m därunder. Spridningen är dock stor och bedömningen därmed osäker. Resultaten antyder en viss hållfasthetsförhöjning runt ca 15 m djup, men denna är mycket osäker.

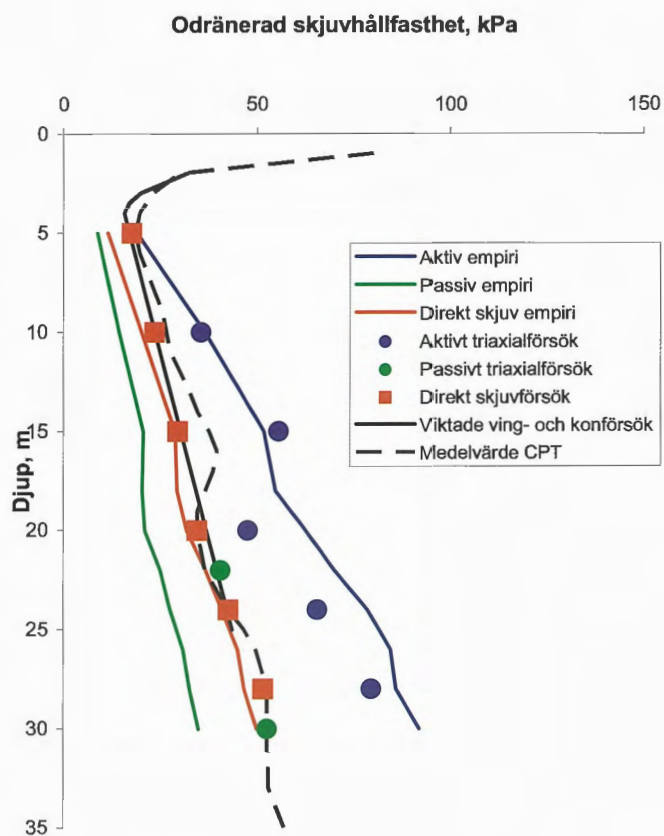
Resultaten från CPT-sonderingarna visar en relativt god samstämmighet och en tydligare trend, även om samma osäkerhet beträffande tillhörande konflytgränser som för vingförsöken finns. Här framträder den hållfasthetsvariation med en förhöjning runt 15 m djup som antydde i ving- och konförsöken tydligare. Kurvan för den utvärderade odränerade skjuvhållfastheten mot djupet slingrar sig i stort

runt den viktade linje som utvärderats ur ving- och konförsök men är genomgående något högre ner till 18 m djup.

På lera från denna jordprofil har även utförts direkta skjuvförsök samt aktiva och passiva triaxialförsök. Resultaten från de aktiva triaxialförsöken överensstämmer i stort med empirin medan passivförsöken visar på påtagligt högre värden jämfört med empirin. Detta kan relateras till att spridningen i empirin för den aktiva skjuvhållfastheten är relativt liten, medan den är betydligt större för den passiva skjuvhållfastheten.



Figur 9.5.2. Odränerad hållfasthet utvärderad från CPT-sonderingar.



Figur 9.5.3. Sammanställning av samtliga skjuvhållfasthetsbestämningar.

De direkta skjuvförsöken stämmer mycket väl med empirin och ger resultat med mycket liten spridning, jämfört med förväntad trendlinje. Dessa försök ges mycket stor vikt vid sammanvägningen till den skjuvhållfasthet, c_u , som tolkats som representativ för jordprofilen. Resultaten från skjuvförsöken ger i stort stöd för de skjuvhållfastheter som grovt utvärderats

ur vingförsök och CPT-sondering, men visar också att den något högre skjuvhållfasthet som utvärderats ur CPT-sonderingen ner till 18 m djup inte kan påräknas. Exemplet illustrerar vikten av att utföra direkta skjuvförsök, framförallt när spridningen i resultaten från vingförsök och konförsök är stor och dessa skiljer från vad som utvärderas ur CPT-sondering.

Referenser

- Aas, G. (1976).** Totalspänningsanalyser, princip, grundlag. Norske Sivilingeniörers Forening. Kurs i Jordartsegenskaper bestemmelse og anvendelse. Gol 20-22/5.
- Aas, G., Lacasse, S., Lunne, T. and Mads- hus, C. (1984).** In situ testing new developments, Nordiska Geoteknikermötet i Linköping 1984.
- Aas, G., Lacasse, S., Lunne, T. and Hoeg, K. (1986).** Use of In situ tests for foundation design on clay. Proceedings of In Situ '86, a Specialty Conference on Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, Blacksburg, Virginia, ASCE, New York, pp 1-30.
- Andréasson, L. (1974).** Förslag till ändrade reduktionsfaktorer vid reduktion av vingborrbestämmd skjuvhållfasthet med ledning av flytgränsvärdet. Intern rapport. Chalmers Tekniska Högskola, Inst. för geoteknik. Göteborg.
- Bergdahl, U. (1984).** Geotekniska undersökningar i fält. Statens geotekniska institut. Information 2. Linköping.
- Bergdahl, U., Larsson, R. and Viberg, L. (2003).** Ground investigations and parameter assessment for different geological deposits in Sweden. In-situ characterization of soils. Eds: Saxena, KR, Sharma, pp 119-170, Balkema, Lisse.
- Berre, T. (1995).** Methods for triaxial compression tests on water-saturated soils. 11th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Copenhagen, Workshop 2: Standardisation of Laboratory Testing. Report prepared by the European Committee ETC5.
- Bjerrum, L. (1972).** Embankments on soft ground. Proceedings, ASCE Specialty Conference on Performance of Earth and Earth supported Structures, Purdue University, Lafayette, Indiana, Vol. 2, pp 1-54.
- Bjerrum, L. (1973).** Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils. State of the art Report, Session 4. Proceedings, 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, Vol. 3, pp 111-159.
- Börgesson, L. (1981).** Mechanical properties of inorganic silt. Avhandling Luleå tekniska universitet, Inst. för geoteknik. Luleå.
- Cadling, L. and Odenstad, S. (1950).** The vane borer. An apparatus for determining the shear strength of clay soils directly in ground. Statens geotekniska institut, Proc. No. 2. Stockholm.
- Caldenius, C. (1938).** Några rön från grundundersökningar i Göteborg rörande fasthetens variation inom lerorna. Teknisk Tidskrift, V. o V. 68(12):137-142.
- Carlsten, P. (1989).** Torv - geotekniska egenskaper och byggmetoder. Statens geotekniska institut, Information 6, Linköping.
- Chalmers tekniska högskola (2005).** Kurs i triaxialförsök. www.kcentrum-infra.chalmers.se.
- Dascal, O. and Tournier, J.P. (1975).** Embankments on soft and sensitive clay foundations. ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol 101, No. GT3, pp. 297-314.
- Demers, D. and Leroueil, S. (2002).** Evaluation of preconsolidation pressure and the overconsolidation ratio from piezocone tests of clay deposits in Quebec. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 39, No. 1, pp.174-192.
- DGF Feltekomité (1993).** Referenceblad for vingeforsøg. Referenceblad 1, Revision 1, Dansk Geoteknisk Forening, København.
- Dueck, A. (1995).** Reference site for clay till. Lunds tekniska högskola, Avdelningen för geoteknik, LUTVDG/TVGT-3025-SE.
- Dueck, A. (1997).** Egenskaper i lermorän - En laboratoriestudie utförd vid Laboratoriet for Fundering, Aalborgs Universitetscenter. Lunds tekniska högskola, Inst. för geoteknologi, LUTVDG/TVGT-3028-SE.

- Eidsmoen, T., Gillespie, D., Lunne, T. and Campanella, R.G. (1985).** Tests with UBC seismic cone at three Norwegian research sites. Norges Geotekniske Institutt, Report No. 59040-1, Oslo.
- Eidsmoen, T., Howland, J. and Kjesbu, E. (1986).** Laboratory and field evaluation of cone penetrometers; statistical evaluation of CPTs in Onsøy clay. Norges Geotekniske Institutt, Internal report No 40015-8, Oslo.
- Eriksson, L.G. (2004).** Hur tillförlitligt är fallkonförsöket. Väg- och Vattenbyggaren No. 4, pp. 24-27.
- Fellenius, W. (1918).** Kaj och jordrasen i Göteborg. Teknisk Tidskrift, V. o V. 48:17-19.
- Fellenius, W. (1919).** Utredning beträffande kajbyggnader för Trondhjems hamn, Teknisk Tidskrift, V. o V. 49:1-19.
- Fellenius, W. (1926).** Jordstatiska beräkningar med friktion och kohesion för cirkulärcylindriska glidytor. Kungl. Väg och Vattenbyggarkårens 75 årskrift.
- Fellenius, W. (1927).** Erdstatische Berechnung mit Reibung und Kohäsion (Adhäsion) und unter Annahme krieszylindrischer Gleitflächen. Ernst, Berlin.
- Fellenius, W. (1929).** Jordstatiska beräkningar för vertikal belastning på horisontal markyta under antagande av cirkulärcylindriska glidytor. Teknisk Tidskrift, V. o V. vol. 59, no. 5, pp.57-63 och 75-80.
- Fellenius, B. (1936).** Discussion on soil properties. Proceedings. 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cambridge, Massachusetts., Vol. III.
- Fellenius, B. (1938).** Provbekastning av i lera nedpressade järnrör. Teknisk Tidskrift, vol 68, no. 10.
- Flodin, N. and Broms, B. (1981).** Historical development of civil engineering in soft clay. Soft Clay Engng, Elsevier, Amsterdam.
- Foged, N. and Steenfelt, J.S. (1992).** An engineering approach to preloaded clay till strength. Nordiske geoteknikermøde, NGM-92, Aalborg, DGF-Bulletin No. 9, Vol.1/3.
- Götaälvskommittén (1962).** Rasriskerna i Götaälvdalen - Betänkande avgivet av Götaälvs-kommittén. Statens offentliga utredningar, SOU 1962:48, Stockholm.
- Hansbo, S. (1957).** A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall cone test. Statens geotekniske institut, Proc. No 14. Stockholm.
- Hartlén, J. (1974).** Skånska moränlerors hållfasthets- och bärighetsegenskaper. Avhandling. Chalmers tekniska högskola, Inst. för Geoteknik, Göteborg.
- Hartlén, J. and Wolski, W. (Editors). (1996).** Embankments on organic soils. Developments in Geotechnical Engineering, 80. Elsevier, Amsterdam.
- Helenelund, K.V. (1977).** Methods for reducing undrained shear strength of soft clay. Statens geotekniske institut. Rapport Nr. 3, Linköping
- Hultin, S. (1916).** Grusfyllningar för kajbyggnader. Bidrag till frågan om deras stabilitet. Teknisk Tidskrift. V. o V. 46(36):292-294.
- Hultin, T. (1937).** Försök till bestämning av Göteborgslerans hållfasthet. Tekn. Samfundets Handlingar, No. 2.
- Jacobsen, M. (1967).** Morænelers geotekniske egenskaber. Licentiatavhandling. Aalborg Univversitetscenter 1994, Aalborg.
- Jacobsen, M. (1970).** Strength and deformation properties of preconsolidated moraine clays. Dansk Geoteknisk Institut, Bulletin No. 27, København.
- Jacobsen M. (1975).** Nogle danske morænelers styrke- og deformationsegenskaber. Nordiske geoteknikermøde i København.
- Jacobson, B. (1946).** Kortfattat kompendium i geoteknik. Statens geotekniske institut, Meddelande No. 1. Stockholm.
- Jamiolkowski, M., Ladd, C.C., Germaine, J.T. and Lancelotta, R. (1985).** New developments in field and laboratory testing of soils. Theme Lecture. Proceedings, 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco. Vol. 1, pp. 57-153.
- Jørgensen, M. og Denver, H. (1992).** CPT-Tolkningsprocedurer. 11 Nordiske Geoteknikermøde, NGM-92, Aalborg, Vol. 1/3.
- Kallstenius, T. (1963).** Studies on clay samples taken with standard piston sampler. Statens geotekniske institut, Proc. No. 21. Stockholm.
- Karlsson, R. och Hansbo, S. (1982).** Jordarternas indelning och benämning. Publikation T21:1982. 3:e reviderade upplagan 1992. Byggeforskningsrådet, Stockholm.
- Karlsson, R. and Viberg, L. (1967).** Ratio c/p' in relation to liquid limit and plasticity index, with special reference to Swedish clays. Proceedings, Geotechnical Conference, Oslo, Vol. 1, pp 43-47.

- Kjellman, W. (1942).** Väg och Vattenbyggnadsstyrelsens geotekniska laboratorium. Teknisk Tidskrift, V. o V. 72(8):105-116.
- Kjellman, W. (1950).** Testing the shear strength of clay in Sweden. *Geotechnique* 2:225-232.
- Knutsson, S., Larsson, R., Tremblay, M. och Öberg-Högsta, A.-L. (1998).** Siltjordars egenskaper. Statens geotekniska institut, Information Nr. 16, Linköping.
- Kristensen, P.S., Erichsen, L. and Sørensen, C.S. (1992).** Great Belt - Foundation of the West Bridge. 11 Nordiske Geoteknikermøde, NGM-92, Aalborg, Vol. 1/3.
- Lacasse, S. (1988).** Design parameters of clays from in situ and laboratory tests. Invited lecture, Proceedings, Symposium on New Concepts in Geotechnical Engineering, Rio de Janeiro, Vol. 4.
- 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.
- Ladd, C.C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F. and Poulos, H.G. (1977).** Stress deformation and strength characteristics. State of the art report. Proceedings, International conference on soil mechanics and foundation engineering, 9, Tokyo, July 1977, Vol. 2. pp. 421-494.
- Larsson, R. (1977).** Basic behaviour of Scandinavian soft clays. Statens geotekniska institut, Rapport No. 4, Linköping.
- Larsson, R. (1980).** Undrained shear strength in stability calculation of embankments and foundations on soft clays. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 17. No. 4.
- Larsson, R. (1982 a).** Jords egenskaper. Statens geotekniska institut, Information 1, Linköping.
- Larsson, R., (1982 b).** Några praktiska konsekvenser av resultaten från forskning i vingsonering. *Geotekniknytt* No. 3.
- Larsson, R. (1983).** Släntstabilitetsberäkningar i lera. Statens geotekniska institut, Rapport No. 19, Linköping.
- Larsson, R. (1989).** Hållfasthet i friktionsjord. Statens geotekniska institut, Information 8, Linköping.
- Larsson, R. (1989).** Dilatometerförsök - En in-situmetod för bestämning av lagerföljd och egenskaper i jord. Statens geotekniska institut, Information 10, Linköping.
- Larsson, R. (1990).** Behaviour of organic clay and gyttja. Statens geotekniska institut, Rapport No. 38, Linköping.
- Larsson, R. (1992 och 2007).** CPT-sondering - En in-situmetod för bestämning av lagerföljd och egenskaper i jord. Statens geotekniska institut, Information 15, reviderad 2007, Linköping.
- Larsson, R. (1994).** Deformationsegenskaper i jord. Chalmers tekniska högskola, Inst. för geoteknik, Rapport B 1994:6, Göteborg
- Larsson, R. (1995).** Jordmaterialet silt. Statens geotekniska institut, Rapport No. 49, Linköping.
- Larsson, R. (2000).** Lermorän - en litteraturstudie. Statens geotekniska institut, Varia 480, Linköping.
- Larsson, R. (2001).** Investigations and Load Tests in Clay Till. Statens geotekniska institut, Rapport No. 59, Linköping.
- Larsson, R., Bergdahl, U. och Eriksson, L. (1983).** Utvärdering av skjuvhållfasthet i kohesionsjord. Statens geotekniska institut, Information 3, Linköping.
- Larsson, R. och Mattsson, H. (2003).** Settlements and shear strength increase below embankments - long-term observations and measurement of shear strength increase by seismic cross-hole tomography. Statens geotekniska institut, Rapport No. 63, Linköping.
- Larsson, R. and Mulabdic, M. (1991).** Piezocone Tests in Clay. Statens geotekniska institut, Rapport No. 42, Linköping.
- Larsson, R. and Sällfors, G. (1985).** Hypothetical yield envelope at stress rotation. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 10, Stockholm, June 1981. Proceedings, Vol. 1 pp. 693-696.
- Larsson, R. och Sällfors, G. (1995).** Sättningssegenskaper i lös lera på grund av geologisk avsättning och "åldring". Statens geotekniska institut, Varia 438, Linköping. Förkortad version i *Väg och Vattenbyggar* 1995, no 2, pp 33-38.
- Larsson, R. och Åhnberg, H. (2003).** Effekter av avschaktningar vid släntkrön, Portryckssituation - Hållfasthetsegenskaper - Stabilitet - Miljö. Statens geotekniska institut, Rapport No. 61, Linköping.

- Larsson, R. och Åhnberg, H. (2003).** Utvärdering av skjuvhållfasthet och förkonsolideringstryck från vingförsök, CPT-sondering och dilatometerförsök. Statens geotekniska institut, Varia 528, Linköping. Också som "Utvärdering av skjuvhållfasthet och förkonsolideringstryck från in-situförsök", Väg- och Vattenbyggaren 2003, Nr. 4, pp. 36-39 samt "On the evaluation of undrained shear strength and preconsolidation pressure from common field tests in clay". Canadian Geotechnical Journal, Vol. 42, No. 4, 2005, pp. 1221-1231.
- Larsson, R., Westerberg, B., Albing, D., Knutsson, S. och Carlsson, E. (2007).** Skjuvhållfasthet i sulfidjord - geoteknisk klassificering och bestämning av odränerad skjuvhållfasthet. Forskningsrapport, Tekniska högskolan i Luleå, Luleå. Också som Rapport No. 69, Statens geotekniska institut, Linköping.
- Leroueil, S., Collins, G. and Tavenas, F. (1983).** Total and effective stress analyses of slopes in Champlain sea clays. Symposium on Slopes on Soft Clays. Statens geotekniska institut, Rapport No. 17, Linköping.
- Luke, K. (1996).** Cone factors from field vane and triaxial tests in Danish soils. XII Nordiska Geoteknikermötet, NGM-96, Reykjavik.
- Lunne, T., Robertsson, P.K. and Powell, J.J.M. (1997).** CPT and piezocone testing in geotechnical practice. Blackie Academic & Professional. London
- Lunne, T., Christoffersen, H.P. and Tjelta, T.I. (1985).** Engineering use of piezocone data in North Sea clays. Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Vol. 2, pp. 907-912.
- Lunne, T., Eide, O. and de Ruiter, J. (1976).** Correlations between cone resistance and vane shear strength in some Scandinavian soft to medium stiff clays. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 13, No. 4, pp. 430-441.
- Lunne, T., Eidsmoen, T., Gillespie, D. and Howland, J.D. (1986).** Laboratory and Field Evaluation of Cone Penetrometers. Proceedings of In Situ'86, a Specialty Conference on Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, Blacksburg, Virginia, June 23-25, ASCE, New York.
- Lunne, T., Lacasse, S., Rad, N.S. and Décourt, L. (1989).** SPT, CPT, pressuremeter testing and recent developments on in situ testing. General Report, 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Session 2, Rio de Janeiro.
- Marchetti, S. (1980).** In situ tests by flat dilatometer. ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 106, No. GT3.
- Lunne, T., Berre, T. and Strandvik, S. (1997).** Sample disturbance effects in soft low plastic Norwegian clay. Proc. International Symposium on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics. Rio de Janeiro 1997, pp. 81-102. (Also in NGI Publikasjon 204).
- Mayne, P.W. (1988).** Determining OCR in clays from laboratory strength. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 114, No. 1, pp-76-92.
- Mayne, P.W. and Mitchell, J.K. (1988).** Profiling of overconsolidation ratio in clays by field vane. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 25, No. 1, pp. 150-157.
- Olsson, J. (1925).** Kolvorr. Ny borryp för upptagning av lerprov. Teknisk Tidskrift, V. o V. 52(2):13-16.
- Olsson, J. (1936/37).** Angående (om) inre friktion (och kohesion) i lera. Teknisk Tidskrift, V. o V. 66(5):60 och 67(2):21-23.
- Petterson, K.E. (1916).** Kajraset i Göteborg den 5 mars 1916. Teknisk Tidskrift, V. o V. 46(52):471-478.
- Petterson, K.E. (1933).** Förbättrad apparat för upptagning av lerprov (jordprov). Teknisk Tidskrift, V. o V. 63:85-87.
- Pilot, G. (1972).** Study of five embankment failures on soft soils. Proceedings, ASCE Specialty Conference on Performance of Earth and Earth supported Structures, Purdue University, Lafayette, Indiana, Vol. 1, (Part 1), pp. 81-99.
- Powell, J.J.M. and Uglow, I.M. (1988).** The Interpretation of the Marchetti dilatometer in UK clays. Penetration Testing in the UK. Thomas Telford. London.
- Rankka, K. (1994).** In situ stress conditions across clay slopes. Avhandling, Chalmers tekniska högskola, Inst. för geoteknik, Göteborg.
- Rogbeck, J., Bengtsson, P.-E., Larsson, R., Rogbeck, Y. och Westberg, G. (2007).** Deponiers stabilitet - Vägledning för beräkning. Statens geotekniska institut, Information 19, Linköping.

- Roscoe, K.H. and Burland, J.B. (1968).** On the generalised stress-strain behaviour of "wet" clay. Symposium on Engineering Plasticity. Cambridge, pp. 535-609. Cambridge University Press.
- Sandvén, R. (1990).** Strength and deformation properties of fine-grained soils obtained from piezocone tests. Thesis. Department of Civil Engineering, Norwegian Institute of Technology, Trondheim.
- Schofield, A. N. and Wroth, C.P. (1968).** Critical State Soil Mechanics. McGraw-Hill. London.
- Schwab, E.F. (1976).** Bearing capacity, strength and deformation behaviour of soft organic sulphide soils. Avhandling, Stockholms Tekniska Högskola. Inst. för Jord- och Bergmekanik. Stockholm.
- Senneset, K. and Janbu, N. (1984).** Shear Strength Parameters obtained from Static Cone Penetration Tests. In "Strength Testing of Marine Sediments". ASTM Special Technical Publication STP 833, Philadelphia.
- Senneset, K., Sandvén, R. and Janbu, N. (1989).** Evaluation of Soil Parameters from Piezocone Tests. Transportation Research Record 1235, Washington, D.C.
- SGF:s laboratoriekommitté (2004).** Direkta skjuvförsök - en vägledning. SGF Notat 2:2004, www.sgf.net
- SIS. Swedish Standards Institute (2005).** Geotechnical investigation and testing -- Laboratory testing of soil -- Part 5: Incremental loading oedometer test (ISO/TS 17892-5:2004). SIS, Stockholm.
- SIS. Swedish Standards Institute (2005).** Geoteknisk undersökning och provning - Laboratorieundersökning av jord, del 9: Konsoliderat triaxialförsök på vattenmättad jord, (ISO/TS 17892-9:2004). SIS, Stockholm.
- SIS. Swedish Standards Institute (2005).** SS-EN 1997-1:2005, Eurokod 7: Dimensionering av geokonstruktioner - Del 1: Allmänna regler. SIS, Stockholm
- SIS. Swedish Standards Institute (2007).** SS-EN 1997-2:2007, Eurokod 7: Dimensionering av geokonstruktioner - Del 2: Markundersökning och provning. SIS, Stockholm
- Skaven Haug, S. (1931).** Skjaerfasthetsforsok med leire. Norges Statsbaner, Meddelande 6(6), pp. 101-105.
- Skempton, A.W. (1948).** Vane tests in the alluvial plain of the river Forth. Geotechnique, vol.1, no. 2, pp. 111-124.
- Skempton, A.W. (1954).** Discussion of the structure of inorganic soil. ASCE, Proceedings, 80, Separate No. 478. pp. 19-22.
- Skredkommissionen (1995).** Anvisningar för släntstabilitetsutredningar. Skredkommissionen, Rapport 3:95, Linköping.
- Slunga, E. (1983).** On the influence of organic content on the shear strength of fine grained soil. Väg och Vattenbyggaren. No. 7/8 1983.
- Statens geotekniska institut (1970).** Reducering av skjuvhållfasthet med avseende på finlekstal och sulfidhalt. Sammandrag av teknisk träff 1969 12 11. Stockholm.
- Statens Järnvägars Geotekniska Kommission (1922).** Slutbetänkande. Statens Järnvägar, Stockholm. Geotekniska Meddelanden Nr 2.
- Steenfelt, J.S. and Foged, N. (1992).** Clay Till Strength - SHANSEP and CSSM. Nordiske geoteknikermøde i Aalborg, DGF-Bulletin No. 9, Vol 1/3.
- Steenfelt, J.S. and Sörensen, C.S. (1995).** CPT - Contraption for Probing in Tills?. International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT'95, Vol. 2, Linköping.
- Svenska Geotekniska Föreningens (SGF). Kolvborrkommitté (1962).** Tolkning av fallkonprov på provkroppar av lera tagna med standardkolvborr.
- Svenska Geotekniska Föreningen (1993).** Rekommenderad standard för CPT-sondering. Rapport 1:93, Linköping.
- Svenska Geotekniska Föreningen (1993).** Rekommenderad standard för vingförsök i fält. Rapport 2:93, Linköping.
- Svenska Geotekniska Föreningen (1995).** Rekommenderad standard för dilatometerförsök. Rapport 1:95, Linköping.
- Svensk Standard SS 02 71 25 (1992).** Geotekniska provningsmetoder - Skjuvhållfasthet - Fallkonförsök. Byggstandardiseringen, Stockholm.
- Svensk Standard SS 02 71 26 (1991).** Geotekniska provningsmetoder - Kompressionssegenskaper - oedometerförsök - CRS-försök - kohesionsjord. Byggstandardiseringen, Stockholm.
- Svensk Standard SS 02 71 27 (1991).** Geotekniska provningsmetoder - Skjuvhållfasthet - Direkta skjuvförsök. Byggstandardiseringen, Stockholm.

- Svensk Standard SS 02 71 29 (1992).** Geotekniska provningsmetoder - Kompressionssegenskaper - ödometerförsök med stegvis pålastning - kohesionsjord. Byggstandardiseringen, Stockholm.
- Torstensson, B.-A. (1973).** Kohesionspålar i lös lera: en fältstudie. Avhandling. Chalmers tekniska högskola. Inst. för Geoteknik. Göteborg.
- Torstensson, B.-A. (1977).** Time dependent effects in the field vane test. Proceedings Int. Symp. on Soft Clay, Bangkok.
- Wendel, E. (1900).** Om profbelastning på pålar med tillämpning deraf på grundläggningsförhållanden i Göteborg. Tekn. Samfundets Handlingar, No. 7.
- Westerberg, B. (1999).** Behaviour and Modelling of a Natural Soft Clay. Avhandling, Luleå tekniska universitet, Inst. för geoteknik, Luleå.
- Westerberg, B., Albing, D. and Larsson, R. (2005).** Research on strength and deformation properties of Swedish fine-grained sulphide soils. International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 16, Osaka, September, 2005. Proceedings, Vol. 2, pp. 623-626.
- Wiesel, C.-E. (1975).** Bestämning av skjuvhållfasthet med fältvingborr. Statens geotekniska institut, Varia 25, Linköping.
- Wood, D.M. (1991).** Soil behaviour and critical state soil mechanics. Cambridge University Press.
- Åhnberg, H., Larsson, R. och Berglund, C. (2001).** Nygamla vingar, stora som små. Statens geotekniska institut, Varia 509, Linköping. Också i Väg- och Vattenbyggarer, Nr 4, 2001, pp. 20-24 samt som "Influence of vane size and equipment on the results of field vane tests". Proceedings, International Conference on Site Characterization, 2, ISC 2, Porto, Portugal, 20-22 September, 2004. Vol. 1, pp. 271-277.
- Öberg, A.-L. (1995).** Stabilitet i silt- och sandslänter, Delrapport 1. Chalmers tekniska högskola, Inst. för Geoteknik, Rapport B 1994:9, Göteborg.
- Öberg, A.-L. (1997).** Matrix Suction in Silt and Sand Slopes - Significance and Practical Use in Stability Analysis. Avhandling. Chalmers tekniska högskola, Inst. för Geoteknik, Göteborg.

Bilaga

Bakgrund till rekommendationer för utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet från vingförsök och CPT-sondering i fält och fallkonförsök i laboratoriet samt empiriska relationer för odränerad skjuvhållfasthet.

Inledning

Odränerad skjuvhållfasthet har i Sverige traditionellt i huvudsak bestämts med vingförsök i fält och fallkonförsök i laboratoriet. På senare år har också CPT-sondering utvecklats till en rationell metod att bestämma jordens egenskaper i fält. Vid mer avancerade utredningar och för kontroll bestäms den odränerade skjuvhållfastheten också med direkta skjuvförsök och triaxialförsök i laboratoriet. Ur de skjuvhållfasthetsvärden som utvärderas från försöken gör geoteknikern sin bedömning av vad som kan betraktas som relevanta värden som sedan används vid beräkningar.

Tillvägagångssättet för att bedöma de enskilda hållfasthetsvärdena och väga samman dessa till en tillförlitlig hållfasthet har varierat med rådande praxis genom åren, men det praktiska slutresultatet har oftast varit ungefär detsamma. Idag regleras förfarandet genom Europannormen, som beskriver hur framtagna skjuvhållfasthetsvärden (derived values) från olika försök ska vägas samman med empirisk kunskap i en ingenjörsmässig bedömning av skjuvhållfastheten, vilket bortsett från det mer formaliserade förfarandet i princip ska ge samma resultat.

På det sätt som den bedömda hållfastheten i regel använts tillsammans med erforderliga säkerhetsfaktorer, och i förekommande fall partialsäkerhetsfaktorer, har förfarandet i stort sett fungerat väl. En förutsättning för detta är dock att man är medveten om vad som mäts i olika försök, den utveckling som lett fram till utvärderingsmetoderna och hur dessa är tänkta att användas.

Användningen av ving- och fallkonförsök har spritts över världen, nya utrustningar och forskningsresultat har kommit fram och ett antal olika utvärderingsmetoder har föreslagits. Under de senaste decennierna har också CPT-sonderingen utvecklats till en metod att bestämma egenskaperna även i lös kohesionsjord. I Sverige har den använda utvärderingsmetoden kalibrerats mot främst hållfastheter bestämda med vingförsök och direkta skjuvförsök, men i vissa fall används även andra

hållfasthetsvärden. För att kunna särskilja vad som är verkliga skillnader i resultat och jordens egenskaper från skillnader i hanteringen av försöksresultaten måste bakgrund och förutsättningar för olika försök och utvärderingsmetoder beaktas. Likaså bör metodernas tillförlitlighet i olika typer av jord beaktas.

Statistiska metoder för att behandla försöksresultat kommer alltmer i bruk. När statistiska metoder används är det viktigt att den statistiska behandlingen utförs på värden som kontrollerats och bedömts relevanta och som avser att motsvara samma parameter. Den kan således i princip utföras på utvärderade skjuvhållfastheter från såväl vingförsök, CPT-sondering, fallkonförsök och direkta skjuvförsök, medan okorrigerade mätvärden från de tre första metoderna aldrig kan behandlas på detta vis och heller inte sammanblandas. Resultat från triaxialförsök kan inte heller behandlas tillsammans med övriga resultat i jord med anisotropa hållfasthetsegenskaper.

Det finns därför anledning att erinra om den historiska utveckling som lett fram till de olika utvärderingsmetoderna och hur de är eller var tänkta att användas.

Historisk utveckling fram till 1969

Bestämning av skjuvhållfasthet och beräkning av stabilitet startade i Sverige i samband med Statens Järnvägars geotekniska kommissions och Kommittén för stabilitetsfrågor i Göteborgs hamns arbeten. Dessa ledde fram till metoden för beräkning av stabilitet med cirkulärcylindriska glidytor (Hultin 1916, Pettersson 1916 och Fellenius 1918, 1919, 1926, 1927, 1929) och till fallkonförsöket som utvecklades av John Olsson (Statens Järnvägars Geotekniska Kommissions slutbetänkande 1922).

Fallkonförsöket kalibrerades genom försök på prover som tagits med en då nykonstruerad provtagare för "ostörda" prover, som jämfördes med resultat från en stor serie belastningsförsök på pålar utförd av Wendel år 1900. Hållfasthetsvärden från fallkonförsök jämför-

des också med inträffade skred som efterkal-
kylerades med användning av odränerad
skjuvhållfasthet och cirkulärcylindriska glid-
tytor och provningsförfarandet rekommendera-
des i kommissionens slutbetänkande.

Provtagningsmekniken förbättrades och kolv-
provtagare började användas (Olsson 1925,
Pettersson 1933, Caldenius 1938). Fallkonförsöket kalibrerades på nytt för dessa bättre pro-
ver mot olika typer av försök för att bestämma
hållfasthet i fält, mot belastningsförsök i full
skala, mot inträffade brott och skred och sena-
re också mot direkta skjuvförsök i laboratoriet.
Dessa kalibreringar ledde också till de första
korrektionsfaktorerna för odränerad skjuv-
hållfasthet uppmätt med fallkon i organisk och
högplastisk lera (Skaven Haug 1931, Olsson
1936–37, Fellenius 1938, Caldenius 1938).
Vid kalibreringarna av fallkonförsöket mot
inträffade skred användes nu också andra ty-
per av glidtytor än cirkulärcylindriska. Det
klarades också att hållfastheten var beroende
av förkonsolideringstrycket (Fellenius 1936).

Den korrigerade odränerade skjuvhållfastheten
från fallkonförsök användes vid alla typer av
stabilitetsproblem som schakter, jordtryck och
stabilitet hos vägbankar med och utan tryck-
bankar (Jakobson 1946).

En ny typ av skjuvapparat konstruerades 1936
av Kjellman (1942, 1950) för såväl odränerade
som dränerade försök. Också triaxialförsök
har används i Sverige sedan 1940 talet.

Vingförsöket för bestämning av odränerad
skjuvhållfasthet i fält introducerades i sin nu-
varande form av Cadling och Odenstad 1950.
Försöksresultaten kalibrerades mot ett antal
inträffade skred och ett belastningsförsök. Till
en början användes värdena från vingsonde-
ring utan korrigering. I slutet av femtiotalet
utvecklades nya och bättre provtagare, vilket
ledde till den nya standardkolvprovtagaren

(Kallstenius 1963). Hansbo (1957) rekalibre-
rade fallkonförsöket på dessa nya prover mot
vingförsöket. Denna nya utvärdering skilde
sig något men inte så markant från den tidiga-
re. Tidigare erfarenhet hade visat att hållfast-
hetsvärden uppmätta med fallkon måste korri-
geras med hänsyn till flytgränsen. Insikten att
den odränerade skjuvhållfastheten från ving-
försök måste korrigeras på samma sätt som
fallkonvärdena spred sig också med tiden.

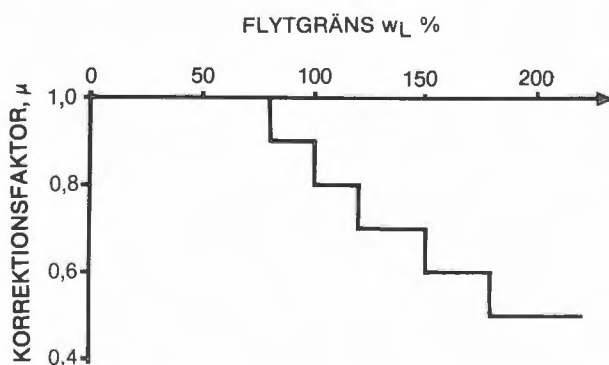
Korrektionsfaktorerna för fallkonförsöket har
dock, liksom utvärderingen av den odränerade
skjuvhållfastheten, varierat med tiden bl.a.
beroende på vilken provtagningsutrustning
man använt. För att summera erfarenheterna
efter introduktionen av standardkolvborren
1963 och få fram en enhetliga utvärdering för
moderna provningsförfaranden hölls ett tek-
niskt branchmöte på Statens geotekniska insti-
tut i Stockholm 1969 (SGI 1970).

SGI:s korrektionsfaktor 1969

Vid mötet på SGI kom man fram till en re-
kommendation för vilka korrektionsfaktorer
som skulle användas för odränerade skjuvhåll-
fasthetsvärden bestämda med ving- och fall-
konförsök. Korrektionsfaktorerna baserades
på jordens flytgräns, Figur B1.

Många mötesdeltagare ville rekommendera
ännu lägre korrektionsfaktorer (större reduktion).
Frågan löstes på så sätt att de rekom-
menderade korrektionsfaktorerna skulle appli-
ceras på försiktigt valda värden eller "lågt
valda medelvärden" av de uppmätta hållfast-
hetsvärdena.

SGI:s korrektionsfaktorer från 1969, som såle-
des egentligen var en branchgemensam re-
kommendation, förutsatte således att en ytter-
ligare reduktion görs av de verkliga medelvär-
dena av korrigerade hållfasthetsvärden.



Figur B1.
SGI:s rekommende-
rade korrektionsfak-
torer från 1969.

Detta innebar att korrektionsfaktorerna skulle vara lägre än vad som anges i Figur B1 när hållfastheten baseras på statistiska medelvärden av utvärderad skjuvhållfasthet.

Den korrigerade hållfastheten förutsattes kunna användas i alla beräkningsfall och någon hållfasthetsanisotropi beaktades inte. I den mån hållfasthetsanisotropi över huvud taget beaktades i Sverige vid denna tid gjordes det indirekt genom att kravet på säkerhetsfaktorn modifierades vid olika belastningsfall.

Bjerrums korrektionsfaktorer

Bjerrum (1972 och 1973) gjorde en omfattande sammanställning av inträffade brott och skred baserad på vad som rapporterats i världslitteraturen och NGI:s erfarenheter från Norge och Bangkok. Efter analys av detta material föreslog Bjerrum nya korrektionsfaktorer. Dessa baserades på medelvärden av de skjuvhållfasthetsvärden som uppmätts med vingförsök och relaterades till plasticitetsindex I_P

I Bjerrums studier ingick ett stort antal lågplastiska leror från Norge och leror med varierande plasticitet från främst Europa och Nordamerika. Ingen högplastisk eller organisk jord från Skandinavien ingick dock i studien, utan korrektionsfaktorerna för denna jordtyp kom i hög grad att baseras på undersökningar av organisk Bangkoklera. Jämförelser med svenska jordar med motsvarande plasticitet visar dock att egenskaperna hos Bangkokleran inte motsvarar de som är normala för svenska förhållanden.

Andréasson (1974) bearbetade Bjerrums värden för att få fram motsvarande korrektionsfaktorer baserade på flytgräns i stället för plasticitetsindex. En jämförelse med SGI:s rekommendation från 1969 visade att Bjerrums korrektionsfaktorer reducerade hållfastheten mer för lågplastiska leror men mindre för mycket högplastiska organiska jordar. Om hänsyn tas till hur SGI:s korrektionsfaktorer skulle användas tillsammans med försiktigt valda hållfasthetsvärden blev slutresultatet att den utvärderade skjuvhållfastheten blev ungefär densamma utom för organiska jordar. Bjerrums och Andréassons studier ledde därför inte till någon förändring av SGI:s rekommendation.

Vidare studier av korrektionsfaktorer fram till 1984

Vingförsökets användning spreds och nya förslag till korrektionsfaktorer togs fram t.ex. Pilot (1972), Dascal och Tournier (1975). Aas gav 1976 förslag till hur vingförsöksvärden skulle kunna korrigeras i norska leror med hänsyn endast till hur den med vingförsök uppmätta skjuvhållfastheten stod i förhållande till rådande överlagringstryck. Ytterligare resultat från Norge presenterades av Aas et al. 1984.

En omfattande genomgång av de olika korrektionsfaktorerna, som dessutom inkluderade en del nya fall från Sverige, gjordes 1977 av Helenelund som då gästforskade på SGI. Med ledning av detta material föreslogs en korrektionsfaktor i storleksordningen

$$\mu \approx \frac{1,45}{1 + w_L}$$

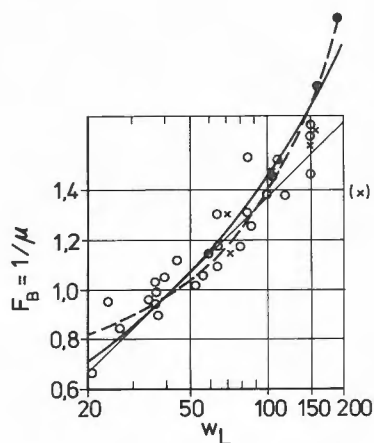
Denna korrektion motsvarar i stort sett Bjerrums korrektion men korrektionen av det uppmätta hållfasthetsvärdet blir större för organiska högplastiska jordar.

Med insättande av Hansbos relation $\tau_v = \sigma'_c \cdot 0,45 w_L$ kan Helenelunds förslag till korrektion också skrivas

$$\mu \approx \frac{1,45}{1 + 2,22 \tau_v / \sigma'_c}$$

En stor undersökning av egenskaperna hos organisk jord har genomförts i Finland (Slunga 1983) och en liknande undersökning genomfördes i Sverige av SGI (Larsson 1990).

Alla sammanställningar av försöksresultat medför en spridning och föreslagna korrektionsfaktorer blir en anpassning till medelvärdeskurvor. I Figur B2 redovisas de värden som togs fram av Andréasson (1974) kompletterade med jämförelser mellan vingförsöksresultat och kvalificerade laboratorieundersökningar, dvs. medelvärden av direkta skjuvförsök och aktiva och passiva triaxialförsök, data från Slunga (1983) och forskning på organisk jord på SGI. I figuren är de kurvor som motsvarar de korrektioner som föreslagits av Andréasson (1974) och Helenelund (1977) inlagda tillsammans med den korrektion som nu rekommenderas av SGI.



Figur B2.
Beräknade säkerhetsfaktorer vid brott $F_B = 1/\mu$ som funktion av flytgränsen jämförda med föreslagna korrektionsfaktorer.

- Data från Andréasson 1974
- × τ_v / C_{UMODEL} Stunga 1983
- τ_v / C_{UMODEL} organisk jord (SGI)
- Andréassons förslag till korrektion 1974
- $\mu = \frac{1,45}{1+w_L}$ (Helenelund 1977)
- $\mu = \left(\frac{0,43}{w_L}\right)^{0,45}$

SGI:s korrektionsfaktorer från 1984

En ny genomgång av utvärderingen av vinge- och fallkonförsök gjordes på SGI 1984 och resulterade i den första utgåvan av Information 3. I denna genomgång ingick allt tidigare underlag samt en del nytillkomna erfarenheter. Dessutom studerades resultaten av forskning rörande olika faktorer som påverkar de värden som fås från vingförsök, och detta sattes in i sitt sammanhang med utvärdering av skjuvhållfastheten. Vidare vägdes empirisk kunskap om jords hållfasthet beroende på dess förkonsolideringstryck och konsistensgränser samt belastningsfallet in i bedömningen. Genomgången, som skisseras i det följande, resulterade i modifierade korrektionsfaktorer som är avsedda att appliceras på medelvärden av de uppmätta hållfasthetsvärdena i försöken.

Den rekommenderade korrektionsfaktorn erhålls ur

$$\mu = \left(\frac{0,43}{w_L}\right)^{0,45} \geq 0,5$$

och avser normalkonsoliderad och endast svagt överkonsoliderad jord.

Resultat av forskning om vingförsök

Under 1960 talet och början av 1970 talet bedrevs en omfattande forskning i vilka faktorer som påverkar resultaten från vingförsök. De faktorer som undersöktes var vingens form och konstruktion, väntetid mellan sondens installation och hållfasthetsprovningen samt rotationshastigheten vid provningen.

Vingens form och konstruktion visade sig ha stor betydelse för resultatet. I Sverige används dock alltid vingar med förhållandet 2:1 mellan vingbladens höjd och bredd och den empiriska erfarenheten är uppbyggd på denna typ av vinge*. Det finns i dag två huvudtyper av vingutrustningar i bruk i Sverige; dels utrustning där vingen under större delen av neddrivningen är indragen i en skyddskåpa och där sondstången också går i ett foderrör, dels en lättare utrustning typ Nilcon/Geotech där vingen drivs ned direkt i jorden genom hela lagerföljden. Då vingen i den senare utrustningen är oskyddad under neddrivningen har utförandet fått göras något robustare än i den första. Resultaten synes oftast likvärdiga i homogen lös lera till måttliga djup, men skiljaktigheter kan uppstå i skiktade jordprofiler och på stora djup.

Vinge med skyddsrör är en relativt tung utrustning medan Nilcon/Geotechsonden är mycket lätthanterlig. Å andra sidan torde den tyngre utrustningen normalt störa jorden mindre och vingen skrapas dessutom ren efter varje provningstillfälle. Med den oskyddade utrustningen finns risken att lera från ett fastare lager häftar vid vingen och följer med ned i lösare lager med åtföljande störning av jorden där. Man bör därför alltid förborra genom torrskorpan då denna utrustning används. Även då kan problem uppstå i skiktad eller varvig störningskänslig jord samt på stora djup där bl.a stångfriktionen utgör en stor andel av det uppmätta vridmotståndet för den oskyddade utrustningen.

Vid studier av inverkan av väntetiden mellan sondens installation och hållfasthetsprovningen har det visat sig att ju längre man väntar desto högre blir det mätta hållfasthetsvärdet upp till en viss väntetid (≤ 1 dygn), varefter värdet blir konstant. Ökningen med väntetiden torde bero på rekonsolidering efter den störning som sker vid vingens installation. Idea-

*) Undantag är lermoran där dansk vinge enligt DGF (1993) ofta används.

likt sett skulle man således vänta 1 dygn efter installationen av vingen innan hållfasthetsprovningen utfördes, men detta är normalt inte en praktiskt tillämpbar metod. Istället utförs provningen strax efter vingens installation på provningsnivån och störningen beaktas empiriskt vid utvärderingen. Det rekommenderade förfarandet är att hållfasthetsprovningen påbörjas inom 5 minuter efter installationen. Inom denna tidsrymd sker ingen nämnvärd ökning av hållfasthetsvärdet.

En sammanställning av de relationer mellan uppmätt hållfasthetsvärde efter ett dygns väntetid, τ_{1D} , och uppmätt hållfasthetsvärde enligt standardförfarandet, τ_0 , visar att relationen τ_{1D}/τ_0 ökar markant med minskande flytgräns, vilket betyder att störningen vid vingens installation normalt är störst i lågplastiska leror. Dessutom ökar spridningen med minskande flytgräns. Figur B3.

Inverkan av rotationshastigheten har studerats i försök som utförts efter 1 dygns väntetid. Vid kortare väntetider går det inte att särskilja vad som är effekt av väntetid och vad som beror på rotationshastighet. Studierna av rotationshastighetens inverkan på uppmätta hållfasthetsvärden har i de flesta undersökningar visat ett samband mellan uppmätt hållfasthetsvärde och rotationshastighet som kan skrivas

$$\frac{\tau_t}{\tau_1} = \left(\frac{t}{t_1} \right)^{-\beta}$$

där

τ_t = uppmätt hållfasthetsvärde vid en rotationshastighet som ger tiden t till brott

τ_1 = referenshållfasthetsvärde uppmätt vid en rotationshastighet som ger tiden t_1 till brott

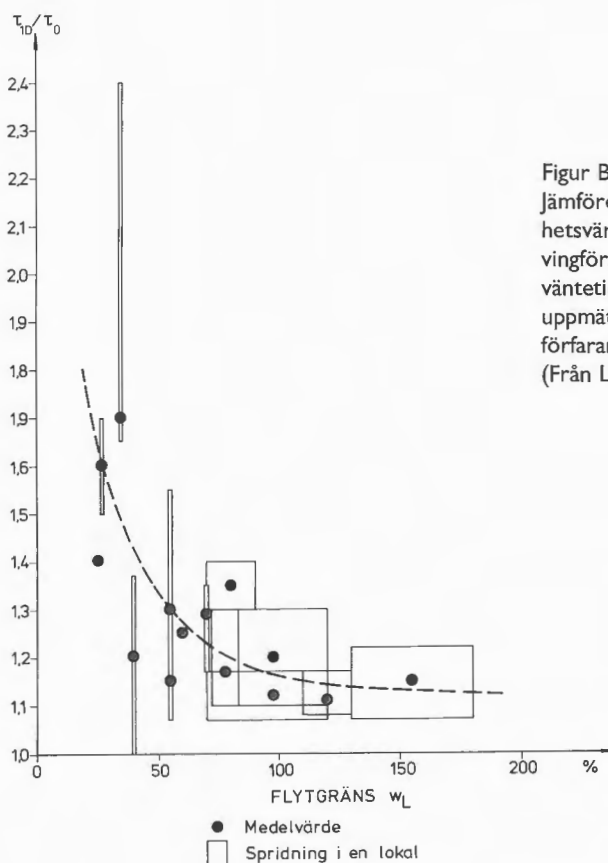
t_1 = referenstid. Vanligen 1–3 minuter som motsvarar rekommenderad provningshastighet

β = koefficient.

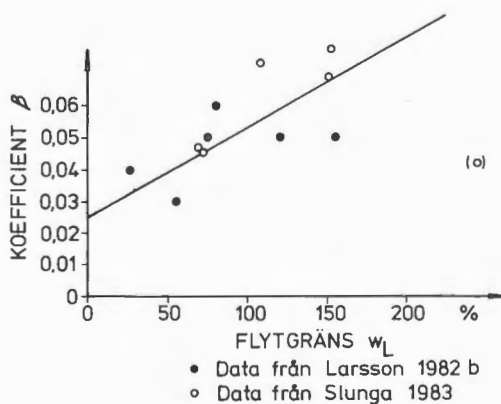
Uppmätta värden på koefficienten β från vingförsök kompletterade med β -värden från andra typer av försök på organisk jord hämtade från Slunga (1983) visas i Figur B4.

Som framgår av Figur B4 minskar hastighetseffekten något med minskande plasticitet.

I en summering av resultaten av forskningen om vingförsök visade Torstensson (1977) att om såväl störning som hastighetseffekter be-



Figur B3. Jämförelse mellan hållfasthetsvärden uppmätta med vingförsök efter 1 dygns väntetid, τ_{1D} , och värden uppmätta enligt standardförfarande, τ_0 . (Från Larsson, 1982b).

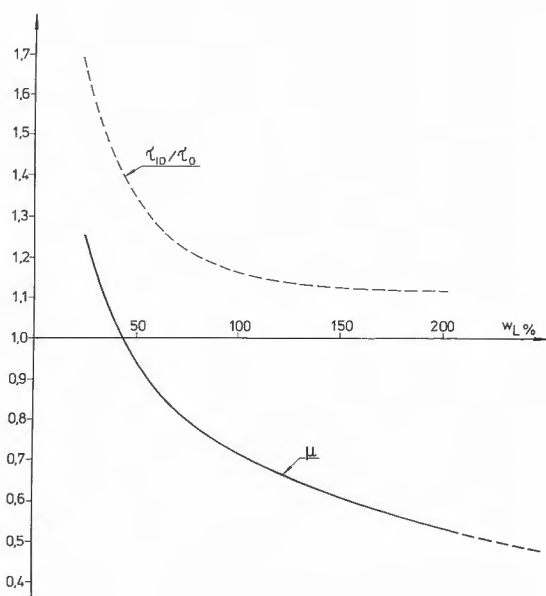


Figur B4. Koefficienten β som funktion av flytgränsen.

aktas fås för en tid till brott av ca en vecka en utvärderad skjuvhållfasthet som ungefär motsvarar den som skulle erhållits om de hållfasthetsvärden som uppmäts med standardförfarandet korrigerats enligt Bjerrums förslag från 1973.

Om den korrektion för störning vid installation som erhålls enligt Figur B3 i sin tur korrigeras för hastighetseffekter så att den i stället för att gälla för en tid till brott av 1–3 minuter motsvarar mer normala tider till brott på 1 vecka – 1 månad erhålls en samlad korrektion av det enligt standardförfarandet uppmätta hållfasthetsvärdet enligt Figur B5. Korrektionsfaktorn μ har beräknats som

Figur B5. Korrektionsfaktor μ för hållfasthetsvärden som uppmätts enligt standardförfarande med vingförsök inkluderande störningseffekter vid installation av vingen och hastighetseffekter för en tid till brott av en vecka till en månad.



$\mu = 10000^{-\beta} \cdot (\tau_{ID}) / \tau_O$ och β har antagits följa relationen i Figur B4.

Eftersom störningen visat sig vara störst i lågplastiska leror samtidigt som hastighetseffekterna är minst i dessa blir slutresultatet att de med normalförfarandet uppmätta hållfasthetsvärdena i lågplastiska leror inte behöver reduceras och att korrektionsfaktorn till och med kan bli större än 1. Ju högre plasticiteten är desto mindre blir störningen och desto större blir hastighetseffekten och följaktligen minskar korrektionsfaktorn med ökande plasticitet, Figur B5.

Figur B6. Huvudtyper för belastningsfall med hänsyn till jordens skjuvhållfasthetsanisotropi och motsvarande laboratorieförsök.

Empiriska relationer för odränerad skjuvhållfasthet i normalkonsoliderad och svagt överkonsoliderad jord

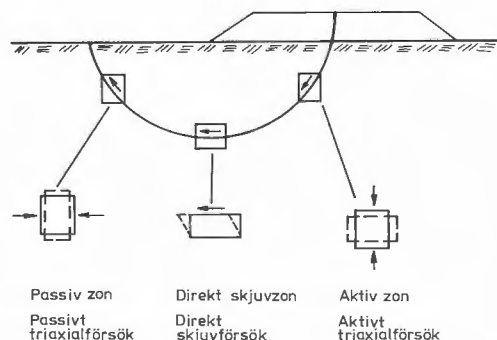
Olika värden på den odränerade skjuvhållfastheten erhålls vid olika typer av försök beroende på belastningsfallet. Skjuvhållfastheten är således anisotrop. En modell för skjuvhållfasthetens variation med belastningsfallet i oorganiska leror uppställdes av Larsson (1977).

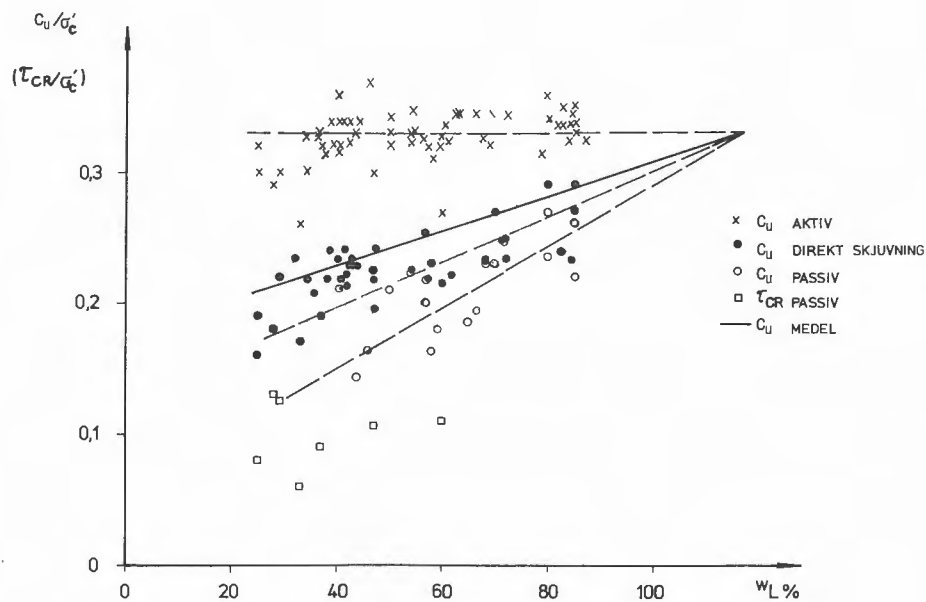
Den odränerade skjuvhållfastheten brukar indelas i skjuvhållfastheterna vid tre huvudtyper av belastning; aktiv skjuvning då vertikalspänningen är största huvudspänningen, passiv skjuvning då horisontalspänningen är största huvudspänningen och direkt skjuvning där normalspänningen mot den horisontella glidytan är konstant men skjuvspänningarna ökar. De tre belastningsfallen kan i laboratoriet simuleras med aktiva och passiva triaxialförsök samt direkta skjuvförsök. Figur B6.

De resultat av aktiva och passiva triaxialförsök samt direkta skjuvförsök på skandinaviska leror som rapporterats i litteraturen med angivande av plasticitetsgränser och förkonsolideringstryck sammanställdes med några opublicerade data från SGI:s undersökningar 1980, (Larsson 1980). Sedan dess har ett antal data tillkommit och inkluderas i Figur B7. Ytterligare data för svenska leror har presenterats av bl.a Westerberg (1999). Resultaten från direkta skjuvförsök ligger nära medelvärdet av aktiva och passiva triaxialförsök och direkta skjuvförsök.

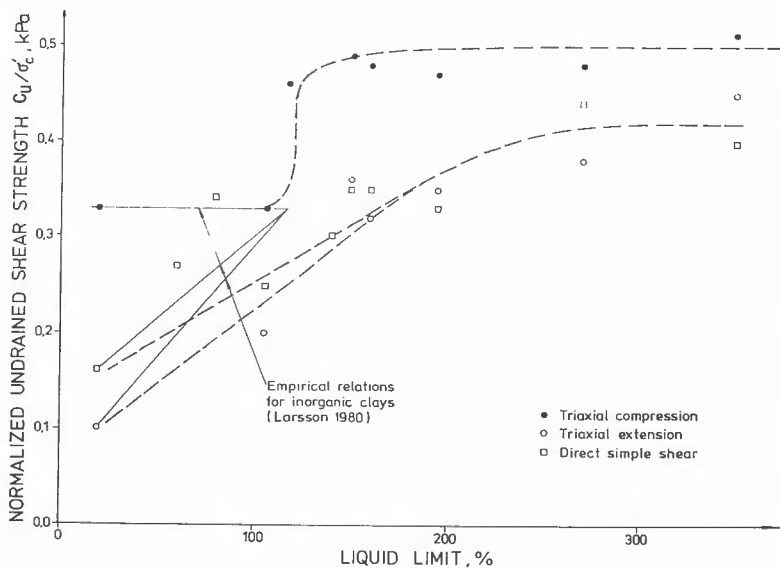
Motsvarande empiriska relationer för organiska leror har senare redovisats av Larsson (1990), Figur B8.

De relationer som anges ovan gäller för normalkonsoliderade och svagt överkonsoliderade jordar. För överkonsoliderad jord se avsnitt "överkonsoliderad jord".

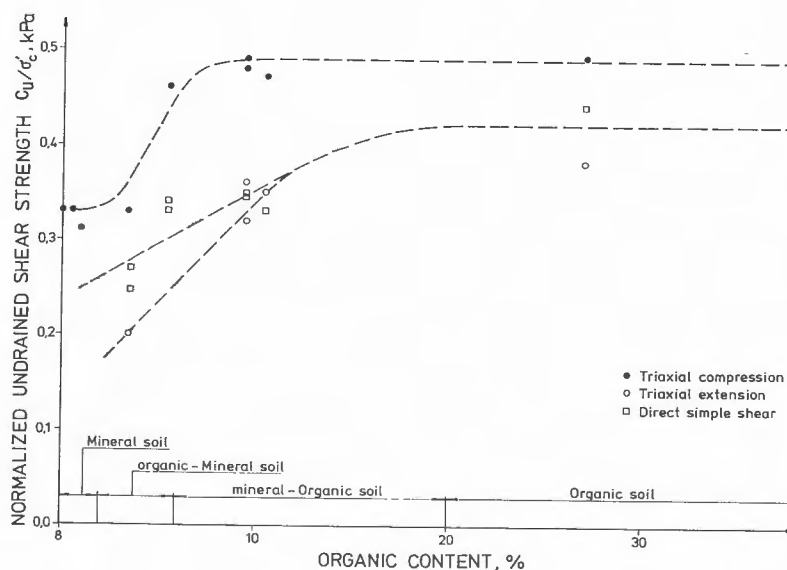




Figur B7. Odränerad skjuvhållfasthet i normalkonsoliderade och svagt överkonsoliderade skandinaviska oorganiska leror som funktion av förkonsolideringstryck och flytgräns. τ_{CR} motsvarar den skjuvspänning som mobiliserats vid en deformation som motsvarar deformationen vid brott i aktiva försök varför brotthållfastheten $c_{uPASSIV}$ är något högre än τ_{CR} .



Figur B8. Odränerad skjuvhållfasthet i normalkonsoliderad och svagt överkonsoliderade skandinaviska organiska leror och gyttja som funktion av förkonsolideringstryck och flytgräns respektive organisk halt.

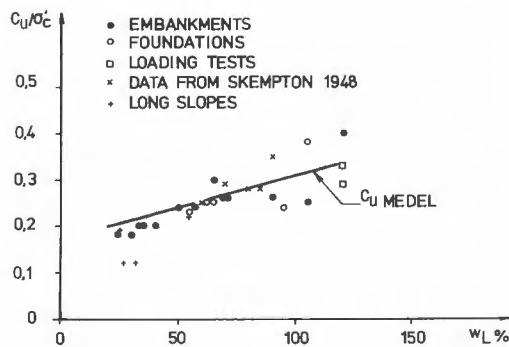


Jämförelse mellan empiriska relationer och brott i jord

Relevansen för odränerad skjuvhållfasthet bestämd med kvalificerade laboratorieundersökningar har fortgående visats i de undersökningar som utförts av bl.a. Norges geotekniska institutt (NGI). NGI har utvecklat ADP analysen (aktiv direkt skjuvning passiv) och denna används vid alla mera kvalificerade undersökningar (Aas 1976).

Motsvarande typ av analys har också utvecklats vid Massachusetts Institute of Technology (MIT) och här normaliseras alla skjuvhållfastheter enligt SHANSEP proceduren (Ladd och Foott 1974).

En sammanställning av brott i full skala i kohesionsjord in situ som rapporterats i litteraturen tillsammans med uppgifter om plasticitet, mobiliserad skjuvhållfasthet och förkonsolideringstryck gjordes 1980 (Larsson, 1980). Figur B9.



Figur B9. Mobiliserad odränerad skjuvhållfasthet vid inträffade brott i jord som funktion av flytgränsen (Larsson, 1980).

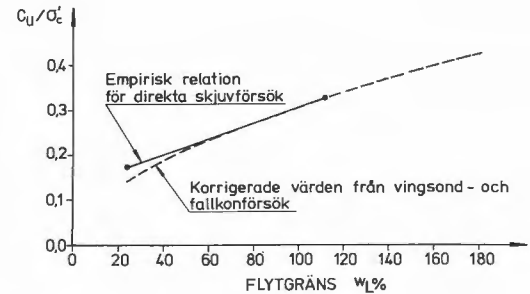
I sammanställningen ingår brott i vägbankar, brott under silos och oljecisterner, resultat från provbankar och andra belastningsförsök samt några skred i slänter. Av Figur B9 framgår att resultaten sprider sig något men bortsett från ett par skred i lågplastisk kvicklera utgör de empiriska värdena på medelskjuvhållfastheten från laborieförsök och från direkta skjuvförsök goda approximationer av den hållfasthet som kunnat mobiliseras i fält. Sammanställningen avser i huvudsak normalkonsoliderad eller svagt överkonsoliderad jord.

Jämförelser mellan empiriska relationer och hållfasthetsvärden från vingförsök och fallkonförsök

Direkta skjuvförsök ger i regel odränerade skjuvhållfastheter som är direkt jämförbara med de skjuvhållfastheter som utvärderas ur

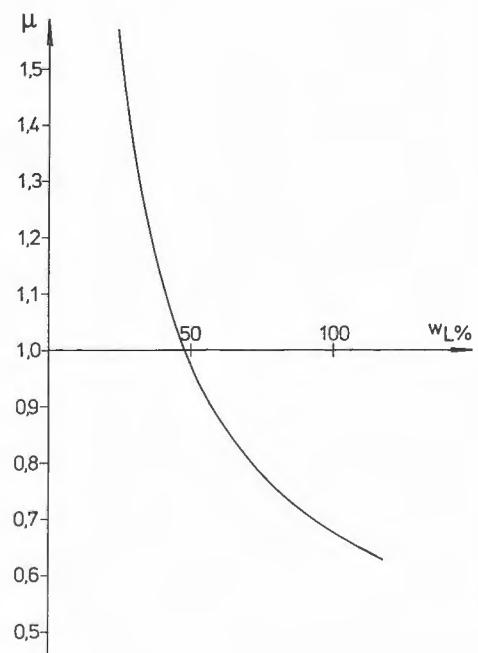
resultat från ving- och fallkonförsök korrigerade enligt den nya rekommendationen. Denna överensstämmelse uppnås om både den empiriska relationen för skjuvhållfasthet och Hansbos relation

$$\tau_v = \sigma'_c \cdot 0,45 w_L \text{ gäller. Figur B10.}$$



Detta betyder att jämfört med den korrigerade hållfastheten bestämd med vingförsök och fallkon ger normalt aktiva triaxialförsök högre och passiva triaxialförsök lägre odränerade skjuvhållfastheter. Medelvärdet av den odränerade skjuvhållfastheten från aktiva och passiva triaxialförsök och direkta skjuvförsök är något högre än den korrigerade hållfastheten från ving- och fallkonförsök, speciellt i lågplastiska leror.

De korrektionsfaktorer för hållfasthetsvärden uppmätta med vingförsök och fallkon som normalt skulle behöva användas för att få en fullständig överensstämmelse med direkta skjuvförsök redovisas i Figur B11.



Figur B11. Korrektionsfaktorer för hållfasthetsvärden bestämda med vingförsök och fallkonförsök som erfordras för att motsvara direkta skjuvförsök.

Sammanställning av resultat och jämförelser med rekommenderad korrektion från 1984

Resultaten från alla de ovan redovisade undersökningarna sedan 1969 är tämligen samstämmiga. I Figur B12 har de olika korrektionsfaktorer som föreslagits eller indirekt framkommit sammanställts.

Den av Helenelund (1977) föreslagna korrektionen $\mu = 1,45/(1 + w_L)$ ger en relativt god överensstämmelse med samtliga resultat. Den ger dock en något mindre krökt kurva än övriga relationer och ger därmed en något låg korrektionsfaktor för mycket lågplastiska leror, en något hög korrektionsfaktor för mellanplastiska leror och åter något låga värden för mycket högplastiska organiska jordar. Andréassons förslag från 1974 ansluter sig väl till övriga resultat för låg- och mellanplastiska jordar men ger högre korrektionsfaktorer för högplastiska och organiska jordar. Som tidigare nämnts ingick inga skandinaviska mycket högplastiska leror eller organiska jordar i underlaget för Andréassons (och Bjerrums) förslag.

Den svenska erfarenheten är att man i jordar med hög flytgräns måste använda betydligt lägre korrektionsfaktorer än vad Andréassons förslag anger. Enligt SGI:s rekommendation från 1969 skulle man använda en korrektionsfaktor som var 0,50 för alla jordar med flytgräns över 180 % och enligt Vägverkets tidigare rekommendation skulle man korrigera för organisk halt så att $\mu = 0,8/w_L$. Också Vägverket använde 0,50 som lägsta korrektionsfaktor, men å andra sidan ansåg man att man borde kräva en högre beräkningsmässig säkerhet mot brott i mycket högplastiska jordar.

Det numeriska underlaget för korrektionsfaktorer för skandinaviska organiska jordar med mycket höga flytgränser är begränsat och omfattar i stort sett endast de jämförelser med kvalificerade laboratorieundersökningar som rapporterats av Slunga (1983) och senare av Larsson (1990). Dessa gav dock också 0,5 som ett undre gränsvärde för korrektionsfaktorn.

Det matematiska uttryck för korrektionsfaktorn som bäst överensstämmer med de resultat som framkommit ur de olika undersökningarna är som framgår av Figur B13

$$\mu = \left(\frac{0,43}{w_L} \right)^{0,45} \geq 0,5$$

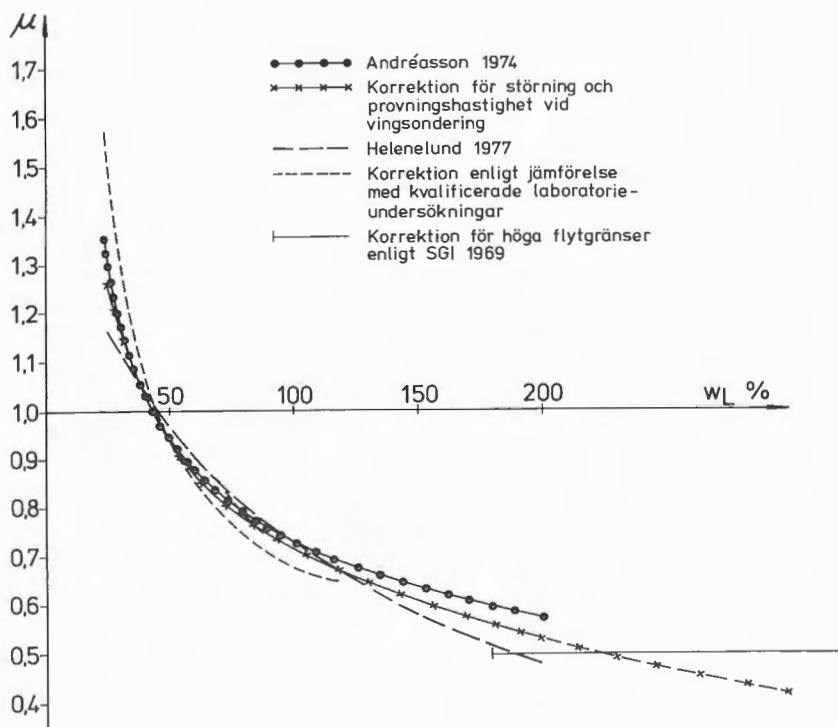
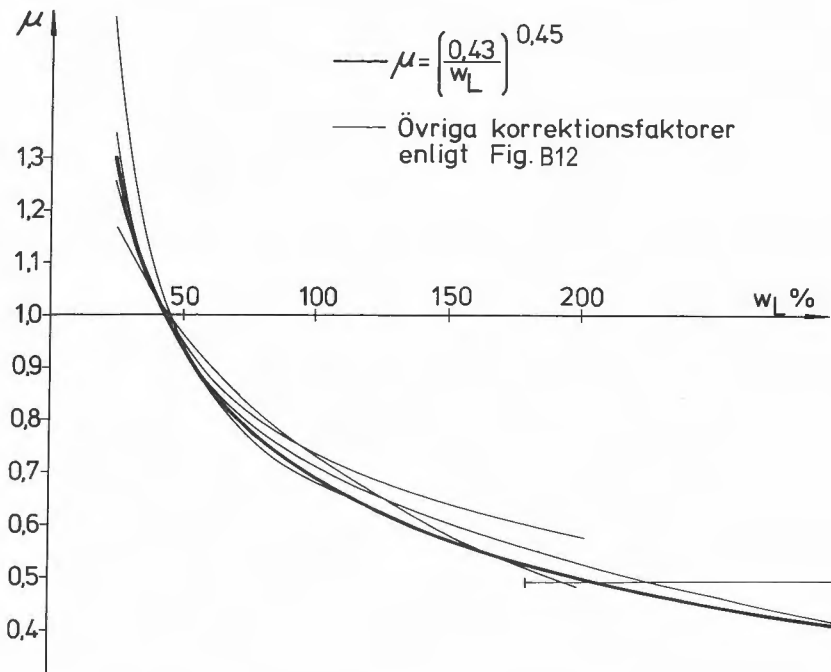


Fig B12. Jämförelse mellan olika korrektionsfaktorer för hållfasthetsvärden bestämda med vingförsök och fallkonförsök.

Figur B13.
Jämförelse mellan SGI:s
rekommendation från
1984 och övriga föreslag-
na korrektionsfaktorer.



Denna relation får en övre begränsning av $\mu_{max} = 1,3$ då den avses gälla skandinaviska leror och organiska jordar. Leror med lägre flytgräns än ca 24 % förekommer knappast här.

Med hänsyn till korrektionsfaktorernas stora känslighet för små förändringar i flytgränsvärdet och den stora spridning i hållfasthetsvärden som ofta erhålls i lågplastiska jordar bör inte högre korrektionsfaktorer än 1,2 användas utan stöd av kompletterande undersökningar.

Norska erfarenheter (Aas et al, 1984) och kurvan för medelskjuvhållfasthet från Larsson (1977, 1980) antyder att man för stabilitetsberäkning av bankar på plan mark skulle kunna höja hållfastheten bestämd med ving- och fallkonförsök ytterligare för mycket lågplastisk lera. Å andra sidan brukar man varken i Sverige eller utomlands betrakta anisotropi från denna typ av hållfasthetsprovning utan tar fram ett värde som ska kunna användas generellt. Det kan knappast heller anses acceptabelt med en provningsmetod där det erhållna hållfasthetsvärdet ska korrigeras upp med mer än 20 % för att sedan användas. I dessa extremfall får det snarare konstateras att i dessa material fungerar varken vingförsök eller konprov tillfredsställande och ska högre hållfastheter tillgodoräknas får andra provningsmetoder som direkta skjuvförsök och triaxialförsök användas.

Som generell korrektionsfaktor för värden från vingförsök och konprov applicerad på medelvärden rekommenderades därför

$$\mu = \left(\frac{0,43}{w_L} \right)^{0,45} \geq 0,5$$

med reservation att korrektionsfaktorer större än 1,2 inte bör användas utan kompletterande undersökningar.

I likhet med vad som konstaterades vid jämförelser mellan Bjerrums korrektionsfaktorer och SGI:s rekommendation från 1969 (Andréasson 1974) innebar detta nya förfarande inte någon större skillnad i utvärderad odränerad skjuvhållfasthet jämfört med tidigare förfarande med försiktigt valda hållfasthetsvärden och SGI:s korrektion från 1969. Den korrigerade hållfastheten för mycket lågplastiska leror blev dock något högre enligt det nya förslaget.

Avsikten med det nya förfarandet var främst en anpassning till en förändrad och enhetligare bedömning av mätvärdena som sådana.

Empirisk hållfasthet och utvärdering av skjuvhållfasthet från vingförsök i överkonsoliderad jord

Allmänt

De metoder för utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet och förkonsolideringstryck från fältförsök som tidigare använts i Sverige bygger i huvudsak på erfarenheter från normalkonsoliderade eller svagt överkonsoliderade jordar. I de databaser för erfarenhetsvärden som använts för att få fram korrektionsfaktorer har resultat från mer överkonsoliderad lera utslutits med motiveringen att dessa brott kan ha varit mer eller mindre dränerade och därför inte är helt relevanta för en jämförelse med den odränerade skjuvhållfastheten.

Generella jordmodeller

Idag finns ett antal olika jordmodeller för att beskriva hur jords odränerade skjuvhållfasthet varierar med förkonsolideringstryck och överkonsolideringsgrad, t.ex. SHANSEP och CRITICAL STATE SOIL MECHANICS. Dessa modeller är baserade på de samband som erhållits i avancerade laboratorieförsök som direkta skjuvförsök, triaxialförsök och plane-strainförsök. Formuleringarna är lite olika men gemensamt för modellerna är att den odränerade skjuvhållfastheten kan skrivas

$$c_u = a \cdot \sigma'_v \cdot OCR^b$$

där

c_u = odränerad skjuvhållfasthet

σ'_v = effektivt överlagringstryck

OCR = överkonsolideringsgrad

σ'_c = förkonsolideringstryck

a = faktor beroende på jord och belastningsriktning (anisotropi)

b = exponent, materialkonstant

Resultat som presenterats i litteraturen, för såväl svenska som utländska jordar av liknande typ, visar att faktorn a är i storleken 0,33 för fallet med aktiva triaxialförsök på lera och upp till 0,5 i organisk jord. För direkta skjuvförsök och passiva triaxialförsök har a befunnits variera med flytgränsen. Ett medelvärde av cirka 0,22 används ofta för fallet med direkt skjuvning i lera medan högre värden gäller i organisk jord.

Faktorn b är normalt i storleken 0,75 – 0,85 för såväl triaxialförsök som direkta skjuvförsök och antas ofta schablonmässigt vara 0,8.

För lermorän används faktorerna $a \approx 0,4$ och $b \approx 0,85$ oberoende av belastningsfall. Detta baseras på undersökningar i dansk lermorän av Stenfelt och Foged (1992) och undersökningar i skånsk lermorän av SGI (Larsson 2001).

Utvärdering av vingförsök i överkonsoliderad jord

En viss effekt på resultaten från vingförsök erhålls vid stora avlastningar (höga överkonsolideringsgrader) men denna är betydligt mindre än vad som skulle förväntas enligt den generella jordmodellen. Enligt tumregler kan en mindre påverkan ofta observeras i ytliga skikt ned till djup av 5 à 10 meter under botten av vattendrag men just inte djupare.

Att vingförsök inte ger samma minskning i hållfasthetsvärde vid en avlastning och åtföljande överkonsolidering som laboratorieförsök och de allmänna jordmodellerna är således väl känt. Denna inverkan uttryckt som b -värde i den allmänna ekvationen är enligt sammanställningar av erfarenhetsvärden för icke-cementerade leror i storleken 0,95. Detta betyder att för att få jämförbara värden med de som erhålls ur avancerade laboratorieförsök måste resultaten från vingförsök i överkonsoliderade leror korrigeras med hänsyn till överkonsolideringsgraden. Enligt de empiriska värden som finns är denna i storleken

$$\mu_{OCR} \approx OCR^{-0,15}$$

Den vanliga korrektionen med hänsyn till flytgränsen är framtagen för jordar med en överkonsolideringsgrad av cirka 1,3 och effekter av överkonsolidering upp till detta värde kan antas vara inräknade i denna. Korregerad odränerad skjuvhållfasthet bestämd med vingförsök i överkonsoliderad jord blir därmed

$$c_u = \tau_v \mu_w \mu_{OCR}$$

$$c_u = \tau_v \left[\frac{0,43}{w_L} \right]^{0,45} \left[\frac{OCR}{1,3} \right]^{-0,15}$$

kalibrerades resultaten från vingförsök och fallkonförsök mot motsvarande resultat från direkta skjuvförsök. Studien visade att en korrektionsfaktor $\mu = 0,65$ oberoende av flytgräns var tillämplig för normalkonsoliderad och svagt överkonsoliderad sulfidjord för båda försökstyperna. Resultaten från vingförsök i överkonsoliderad jord bör dessutom korrigeras för överkonsolideringsgrad på motsvarande sätt som för övrig kohesionsjord.

Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet och förkonsolideringstryck från CPT-sondering

Allmänt

I och med introduktionen av portrycksmätning vid CPT-sondering utvecklades metoden till att förutom bestämning av lagerföljd och relativ fasthet också kunna uppskatta odränerad skjuvhållfasthet och förkonsolideringstryck i kohesionsjord. Ett flertal teoretiska studier har visat att den odränerade skjuvhållfastheten kan utvärderas ur nettospetstrycket som

$$c_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt(c_u)}}$$

där

q_t = totalt spetstryck
 σ_{v0} = totalt överlagringstryck
 $N_{kt(c_u)}$ = konfaktorn för utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet

Den teoretiska konfaktorn måste dock modifieras empiriskt beroende på jordart, anisotropieffekter, hastighetseffekter, överkonsolidering m.m. Ett stort antal regionala och alternativa utvärderingsmetoder har därför föreslagits (Larsson och Mulabdic 1991, Lunne et al. 1997, Larsson och Åhnberg 2003). På motsvarande sätt utvärderas förkonsolideringstrycket ur nettospetstrycket med hjälp av en empirisk konfaktorn $N_{kt(\sigma'c)}$ (Larsson och Mulabdic 1991, Demers and Leroueil 2002).

En undersökning genomfördes i Sverige i slutet av 1980-talet, där CPT-sonderingen kalibrerades mot vingförsök och direkta skjuvförsök i ett stort urval av lokaler med normalkonsoliderad och svagt överkonsoliderad kohesionsjord. Dessa kombinerades med motsvarande undersökningar i främst Norge och regler för utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet

och förkonsolideringstryck i denna typ av jord togs fram, (Larsson och Mulabdic 1991).

I en senare undersökning, (Larsson och Åhnberg 2003), har inverkan av överkonsolideringsgraden på utvärderingen studerats.

Utvärdering av förkonsolideringstryck

Resultaten från undersökningarna har visat att förkonsolideringstrycket i kohesionsjord oberoende av överkonsolideringsgraden kan utvärderas ur

$$\sigma'_c = \frac{q_t - \sigma_v}{1,21 + 4,4 w_L}$$

där

q_t = totalt spetstryck
 σ_v = totalt överlagringstryck
 w_L = flytgräns

I den typ av jord som är vanlig i Sverige är utvärderingen dock mycket känslig för jordens flytgräns.

Liknande värden har uppmätts på andra håll i Världen, men inflytandet av och kopplingen till flytgränsen varierar stort.

På grund av känsligheten för flytgränsen, (egentligen jordens sammansättning), och olika felkällor i mätningen av olika parametrar visar resultaten främst en bild av trenden för förkonsolideringstryckets variation med djupet. Vid noggrant utförda sonderingar i relativt homogena jordar kan noggrannheten i de uppskattade förkonsolideringstrycken antas ligga inom cirka $\pm 30\%$. Enstaka värden kan hamna utanför, men spikar och lågvärden vid passering av grövre objekt och onormala störningar kan normalt sorteras bort. Resultaten från CPT-sonderingar kan främst användas som stöd för sammanbindning av värden från ödometerförsök till en kurva för förkonsolideringstryckets variation med djupet i jordprofilen, samt för korrigering av den odränerade skjuvhållfastheten i överkonsoliderad jord.

Undersökningarna i lermorän antyder också att förkonsolideringstryck i rimlig storlek kan utvärderas direkt ur nettospetstrycken. Här kan det dock vara svårt att bestämma ett relevant värde på flytgränsen w_L , och för en preliminär uppskattning kan konfaktorn $N_{kt(\sigma'c)} = (1,21 + 4,4 w_L)$ ersättas med $N_{kt(\sigma'c)} = 3$.

Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet

Den odränerade skjuvhållfastheten utvärderas normalt ur nettospetstrycket, $(q_t - \sigma_v)$. De svenska erfarenheterna från normalkonsoliderad och endast svagt överkonsoliderad lera har givit det empiriska sambandet

$$c_u = \frac{q_t - \sigma_v}{13,4 + 6,65 w_L}$$

Med korrektion för överkonsolidering blir detta

$$c_u = \left[\frac{q_t - \sigma_v}{13,4 + 6,65 w_L} \right] \left[\frac{OCR}{1,3} \right]^{-0,2}$$

Exponenten $-0,2$ motsvarar $b = 0,8$ i den generella jordmodellen och används vid en schablonmässig utvärdering. För en preliminär utvärdering kan också överkonsolideringsgraden utvärderas ur resultaten från CPT-sonderingen. En noggrannare utvärdering kan göras då tillgång till resultat från ödometerförsök finns och en ytterligare förfinad utvärdering kan erhållas om b -faktorn kalibreras genom avancerade laborieförsök. I likhet med vingförsöken erhålls ingen större effekt av korrektionen i normalkonsoliderad och endast svagt överkonsoliderad jord. I överkonsoliderad jord blir korrektionen större än för vingförsöken, men i övrigt blir effekten i princip densamma som för dessa.

För extremt lös normalkonsoliderad jord, dvs. främst bottenlam i sjöar, vikar och andra vattendrag, kan det vara bättre att utvärdera den odränerade skjuvhållfastheten ur de genererade porövertrycken vid sonderingen. Detta på grund av den normalt bättre upplösningen och noggrannheten i portrycksmätningen. För en normal sond med filtret placerat direkt över sondens koniska spets blir denna utvärdering

$$c_u = \frac{\Delta u_2}{14,1 - 2,8 w_L}$$

där Δu_2 är det genererade porövertrycket. Detta är mycket känsligt för överkonsolideringsgraden och utvärderingen kan endast användas för normalkonsoliderad jord.

Erfarenhetsmässigt ger direkta skjuvförsök och korrigerade vingförsök likartade värden. Resultat från båda dessa typer av bestämningar har använts för att kalibrera utvärderingarna

av fallkonförsök och CPT-sondering i motsvarande jord och alla fyra försökstyperna förväntas därmed ge samstämmiga resultat.

Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet i lermorän

Utvärderingen av odränerad skjuvhållfasthet från CPT-sondering i lermorän bygger på danska erfarenheter (Luke 1996 m.fl.). I denna utvärdering används konfaktorn $N_{kt(cu)} = 11$. Denna faktor har kalibrerats mot vingförsök, ur vilka den relevanta skjuvhållfastheten utvärderats i spridningsområdets underkant. Metoden har prövats med gott resultat även i skånsk lermorän, (Dueck 1995, Larsson 2001).

Utvärdering av förkonsolideringsstryck och odränerad skjuvhållfasthet i sulfidjord

Utvärderingen av förkonsolideringsstryck och odränerad skjuvhållfasthet i sulfidjord bygger på erfarenheterna från ovannämnda undersökning av bestämningen av dessa egenskaper som nyligen genomförts i samarbete mellan Tyréns, Luleå tekniska universitet och SGI, (Larsson et al. 2007). Utvärderingen av förkonsolideringsstryck kalibrerades mot ödometerförsök och utvärderingen av odränerad skjuvhållfasthet mot direkta skjuvförsök. Resultaten visade på att förkonsolideringsstryck och odränerad skjuvhållfasthet i sulfidjord kan utvärderas på motsvarande sätt som för övrig kohesionsjord, men med användande av konfaktorererna $N_{kt(\sigma'_c)} = 4,75$ respektive $N_{kt(cu)} = 20$ oberoende av flytgräns.

SGI Information

1. **Jords egenskaper.**
(48 sid, 1982/1986/1990/1993)
2. **Geotekniska undersökningar i fält.**
(72 sid, 1984)
3. **Utvärdering av skjuvhållfasthet i kohesionsjord.**
(28 sid, 1985)
- 3E. **Evaluation of shear strength in cohesive soils with special reference to Swedish practice and experience.**
(32 pages, 1985)
4. **Geotekniska utredningar för stabilitetsanalyser – allmänna råd för omfattning och kvalitet.**
(20 sid, 1988/1993)
5. **Nyare in-situmetoder för bedömning av lagerföljd och egenskaper i jord.**
(64 sid, 1988)
6. **Torv - geotekniska egenskaper och byggmetoder**
(34 sid, 1989)
7. **Report on the ISSMFE technical committee on penetration testing of soils – TC16 with reference test procedures.**
CPT - SPT - DP - WST
(50 pages, in english and french, 1989))
8. **Hållfasthet i friktionsjord.**
(50 sid, 1989)
9. **Olje- och kemikalieutsläpp i jord.**
(40 sid, 1989)
10. **Dilatometerförsök – en in-situmetod för bestämning av lagerföljd och egenskaper i jord. Utförande och utvärdering.**
(50 sid, 1990/1993)
11. **Mätning av grundvattennivå och portryck.**
(116 sid, 1990)
12. **Termiska egenskaper i jord och berg.**
(28 sid, 1991)
13. **Sättningsprognoser för bankar på lös finkornig jord – beräkning av sättningars storlek och tidsförlopp.**
(51 sid, 1994)
- 13E. **Prediction of settlements of embankments on soft, fine-grained soils – calculation of settlements and their course with time.**
(52 pages, 1997)
14. **Lärobok i geobildtolkning.**
(123 sid, 1991)
15. **CPT-sondering.**
Utrustning – Utförande – Utvärdering
(80 sid, 1993, 71 sid, 2007)
- 15E. **The CPT-test.**
Equipment-Testing-Evaluation
(77 pages, 1995)
16. **Siltjordars egenskaper.**
– Silt som konstruktionsmaterial
– Bestämning av geotekniska egenskaper
(71 sid, 1998)
17. **Geodynamik i praktiken.**
(51 sid, 2000)
- 18:4 **Handbok.**
Flygaska i mark- och vägbyggnad. Grusvägar
(58 sid, 2006)
- 18:5 **Handbok.**
Slaggrus i väg- och anläggningsarbeten
(40 sid, 2006)
19. **Deponiers stabilitet.**
Vägledning för beräkning
(46 sid, 2007)



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