



LUND
UNIVERSITY



SKJUVHÅLLFASTHETSBESTÄMNING I LERA - I SAMBAND MED FÖRDJUPAD SLÄNTSTABILITETSUTREDNING

JONAS THELANDER

Geotechnical
Engineering

Master's Dissertation

Department of Construction Sciences
Geotechnical Engineering

ISRN LUTVDG/TVGT--11/5047--SE (1-72)

ISSN 0281-6679

SKJUVHÅLLFASTHETSBESTÄMNING
I LERA - I SAMBAND MED FÖRDJUPAD
SLÄNTSTABILITETSUTREDNING

Master's Dissertation by
JONAS THELANDER

Supervisors:

Per Johan Gustafsson *Professor,*
Dept. of Construction Sciences, LTH, Lund

Henrik Lundström *Geotechnical Engineer,*
Vectura Consulting AB, Vänersborg

Examiner:

Ola Dahlblom *Professor,*
Dept. of Construction Sciences, LTH, Lund

Copyright ©2011 by Geotechnical Engineering, LTH, Sweden.
Printed by Media-Tryck LU, Lund, Sweden, November 2011 (*PI*).

For information, address:
Geotechnical Engineering, LTH, Lund University, Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden.
Homepage: <http://www.byggvetenskaper.lth.se/geoteknik>

Sammanfattning

En fördjupad utredning av släntstabiliteten har utförts enligt skredkommissionens anvisningar 3:95 för bostadsområden i Sjuntorp, Trollhättans kommun. Med hjälp av data från geotekniska undersökningar utförda i området samt kvalitativa laboratorieförsök har skjuvhållfasthetsparametrar utvärderats. En analys har utförts för att ta reda på hur en noggrann utredning av skjuvhållfastheten påverkar den beräknade säkerhetsfaktorn för släntstabiliteten.

I fält har skjuvhållfastheten undersökts med hjälp av vingförsök och CPT-försök. Dessa värden antas representera ett medelvärde för skjuvhållfastheten i slänter där medellutningen på glidyten inte avviker från det horisontella. Den undersökta slänten i Sjuntorp är brant och har en stor aktiv skjuvzon och liten passiv skjuvzon. Den riktningensberoende skjuvhållfastheten har därför undersökts med försök utförda i laboratorium. Med hjälp av aktiva odränerade triaxialförsök har skjuvhållfastheten i den aktiva skjuvzonen undersökts och med hjälp av direkta skjuvförsök har skjuvhållfastheten i den direkta skjuvzonen undersökts. Släntstabilitetsberäkningar har utförts där den riktningensberoende skjuvhållfastheten beaktats för att ta reda på hur denna påverkar den beräknade säkerhetsfaktorn.

Leran i Sjuntorp är till stora delar överkonsoliderad. Det rekommenderas att skjuvhållfasthetsvärden utvärderade från ving- och CPT-försök ska korrigeras för överkonsolideringsgraden OCR. De kvalitativa laboratorieförsöken däremot behöver inte korrigeras för OCR då försöken är utformade för att kompensera för den avlastning som sker vid upptagandet av proverna. Korrigerade skjuvhållfasthetsvärden från ving- och CPT-försök har jämförts med skjuvhållfasthetsvärden uppmätta med direkta skjuvförsök för att undersöka hur de stämmer överens med varandra.

Skredkommissionen ställer krav på beräknad säkerhetsfaktor för både kombinerad och odränerad analys för en fördjupad utredning. Vid kombinerad analys ges leran ofta empiriskt ett värde för kohesionsinterceptet c' . Kohesionsinterceptet kan även utvärderas från odränerade triaxialförsök. Släntstabilitetsberäkningar har utförts för att se hur beräknad säkerhetsfaktor för kombinerad analys skiljer sig beroende på vilken metod som använts för att utvärdera c' .

Skredkommissionen sätter lägre krav på beräknad säkerhetsfaktor ju större mängd försök som utförts och/eller kvalitetsgraden hos dessa. I examensarbetet har det undersökts om det lönar sig att utföra fler och dyrare försök för att minska mängden förstärkningar för en utvald slänt.

Slutligen ges rekommendationer för hur och när triaxialförsök bör utföras samt hur ett fortsatt arbete med dränerade och odränerade triaxialförsök kan ge information om kohesionsinterceptets bidrag till skjuvhållfastheten i lera vid dränerade förhållanden.

Innehållsförteckning

1.	Inledning.....	1
1.1	Bakgrund.....	1
1.2	Problemformulering/frågeställning.....	1
1.3	Syfte.....	2
1.4	Metod.....	2
1.5	Avgränsningar.....	2
2.	Skjuvhållfasthet.....	3
2.1	Jordpartikeln/avsättning.....	3
2.2	Kontraktanta och dilatanta material.....	3
2.3	Spänningar-Mohr Coloumb.....	4
2.4	Flytyta.....	5
2.5	Dränerad och odränerad analys.....	6
2.6	Konsolideringsspänningar.....	9
2.7	Anisotropi.....	11
3.	Beskrivning av provningsmetoder.....	15
3.1	Fältmetoder.....	15
3.1.1	Vingförsök.....	15
3.1.2	CPT.....	18
3.1.3	Kolvprovtagning.....	21
3.2	Laboratoriemetoder.....	21
3.2.1	Fallkonförsök.....	21
3.2.2	Direkta Skjuvförsök.....	23
3.2.3	Triaxialförsök.....	27
4.	Fältlokal - Sjuntorp.....	31
4.1	Allmänt.....	31
4.2	Geologi och Geotekniska förhållanden.....	33
5.	Provresultat för fallstudie Sjuntorp.....	35
5.1	Fältförsök.....	35
5.1.1	Grundvatten och portryck.....	35
5.1.2	Vingförsök.....	38
5.1.3	CPT-försök.....	39
5.1.4	Konsolideringsförhållanden.....	40
5.2	Laboratorieförsök.....	42
5.2.1	Direkta Skjuvförsök.....	42

5.2.2	Triaxialförsök	43
5.3	Utvärdering empiri	46
5.3.1	Vingförsök.....	46
5.3.2	Rikttningsberoende empiri	49
5.3.3	Kohesionsinterceptet c'	52
5.4	Vald skjuvhållfasthetsprofil	52
6.	Beräkning av släntstabilitet	57
6.1	Beräkningsmetod.....	57
6.2	Skredkommissionens anvisningar 3:95	57
6.3	Utförda släntstabilitetsberäkningar	58
6.4	Beräknad förstärkningsåtgärd	60
7.	Diskussion.....	61
7.1	Provningsmetoder	61
7.1.1	Fallkonförsöket.....	61
7.1.2	Vingförsök.....	61
7.1.3	CPT-försök	61
7.1.4	Direkta Skjuvförsök	62
7.1.5	Triaxialförsök	62
7.2	Konsolideringsspänningar	63
7.3	Empiri.....	63
7.4	Kohesionsintercept.....	63
7.5	Beräknad säkerhetsfaktor	64
7.6	Förstärkningsåtgärd.....	65
8.	Slutsatser och rekommendationer.....	67
8.1	Slutsats.....	67
8.2	Rekommendationer	68
8.3	Fortsatta utredningar	69
	Referenser	71

Beteckningar

Skjuvhållfasthet

OCR	Överkonsolideringsgrad	[-]
σ'_c	Effektivt vertikalt förkonsolideringstryck	[kPa]
σ'_{Hc}	Effektivt horisontellt förkonsolideringstryck	[kPa]
σ'_{alt} σ'_{vo}	Effektivt vertikalt överlagringstryck	[kPa]
σ'_{ho}	Effektivt horisontellt överlagringstryck	[kPa]
u	Portryck	[kPa]
τ_f	Skjuvhållfasthet vid brott	[kPa]
τ_{fu}	Odränerad Skjuvhållfasthet	[kPa]
τ_{fd}	Dränerad Skjuvhållfasthet	[kPa]
ϕ'	Effektiv inre friktionsvinkel	[°]
ϕ'_{cv}	Effektiv inre friktionsvinkel vid kritisk lagring	[°]
ϵ	Töjning	[%]
c'	Effektivt kohesionsintercept	[kPa]
$w_{L,alt}$ w_f	Konflytgräns	[%]
$K_{O_{NC}}$	Horisontalspänningsfaktor normal -konsoliderad jord	[-]
K_O	Horisontalspänningsfaktor över -konsoliderad jord	[-]
P	Densitet	[t/m ³]

Vingförsök

μ	Korrigeringsfaktor för konflytgräns	[-]
-------	-------------------------------------	-------

CPT

q_T	Spetsmotstånd	[kPa]
f_T	Mantelfriktion	[kPa]

Triaxial försök

σ'_m	Effektiva medelspänningen	[kPa]
-------------	---------------------------	-------

Emperi

a	materialparameter anisotropi	[-]
b	materialparameter överkonsolidering	[-]

1. Inledning

1.1 Bakgrund

I Sjuntorp, en mindre tätort inom Trollhättans kommun, rinner Slumpån. Flera bostadshus ligger på eller i närheten av de slänter som vetter mot Slumpån. För att klargöra stabiliteten har ett flertal geotekniska utredningar utförts i området, senast 2008 utfördes en detaljerad undersökning. Utredningarna har visat att släntstabiliteten är otillfredsställande för delar av Sjuntorps samhälle. Trollhättans stad har beslutat genomföra en fördjupad utredning enligt Skredkommissionens anvisningar 3:95 för att mer noggrant bestämma säkerheten mot skred i området. Som en del i den fördjupade utredningen har detta examensarbete kopplats på för att detaljundersöka bestämningen av skjuvhållfastheten i lera.

En fördjupad stabilitetsutredning är den mest omfattande och noggrannaste utredningen av släntstabiliteten. Detta innebär höga krav för såväl val och utförande av provningsmetoder, som för utvärderingen av skjuvhållfasthetsvärden.

Om stabiliteten efter en fördjupad utredning fortfarande beräknas otillfredsställande återstår i princip endast förstärkningsåtgärder, eller att klassa marken som obrukbar/obeboelig. En noggrann utredd och vald skjuvhållfasthet för lera i slänten kan innebära att en lägre beräknad säkerhetsfaktor kan accepteras, vilket i sin tur kan medföra att förstärkningsåtgärder kan hållas nere.

I en fördjupad utredning bör anisotropieffekterna i jorden beaktas. Hänsyn tas då till hur skjuvhållfastheten i jorden varierar med riktningen på belastningen. Genom att undersöka jordens anisotropieffekter med triaxialförsök på upptagna prover i laboratorium kan eventuellt mer av jordens naturliga hållfasthet tillgodoräknas.

Slutprodukten av en geoteknisk utredning av släntstabilitet är en beräknad siffra för släntens säkerhetsfaktor. Hur väl återspeglar sig en noggrann undersökning utav skjuvhållfastheten i den beräknade säkerhetsfaktorn?

1.2 Problemformulering/frågeställning

I examensarbetet jämförs skillnaden i beräknad säkerhetsfaktor för släntstabiliteten beroende på vilka provningsmetoder som använts vid utvärderingen av skjuvhållfastheten i lera.

Frågeställningarna som ligger till grund för arbetet:

- Hur stor påverkan har en noggrann bestämning av skjuvhållfastheten i lera på beräknad säkerhetsfaktor för slänten?
- Hur påverkar valet av metod för att ta reda på skjuvhållfastheten i lera den projekterade förstärkningsåtgärden för slänten?

1.3 Syfte

Syftet med examensarbetet är att undersöka hur val av provningsmetod och utvärdering av försöken påverkar en lerslänths uppskattade skjuvhållfasthetsprofil. Syftet är även att undersöka hur dessa val påverkar den beräknade säkerhetsfaktorn för släntstabiliteten.

1.4 Metod

Litteraturstudier ligger till grund för stora delar av de avsnitt som behandlar skjuvhållfastheten som begrepp och beskrivningen av de olika provningsmetoderna.

För fallstudien om bostadsområdet i Sjuntorp, gällande fält- och laboratorieundersökningarna, har stor vikt lagts på diskussion med erfarna handläggare, fältgeotekniker och laboratoriepersonal hos Vectura, HA Geoteknik samt laboratoriepersonal vid Statens Geotekniska Institut. Som en del i examensarbetet har författaren deltagit vid fältgeotekniska undersökningar där de olika in-situ provningsmetoderna som beskrivs i rapporten utförts. Författaren har även under studiebesök vid SGI:s jordlaboratorium sett de olika laboratorieförsöken.

Författaren ansvarade i projektet för portrycks- och grundvattenmätningarna i Sjuntorp. Dessa värden ligger till grund för både utvärderingen av skjuvhållfastheten och släntstabilitetsberäkningen.

Sammanställning och utvärdering av skjuvhållfasthetsvärdena har utförts i excel enligt de i examensarbetet nämnda utvärderingsmetoderna.

För släntstabilitetsberäkningarna har programmet Geosuite Stability 5.0 använts, vilket ingår i programserien Geosuite från Viannova. Författaren har innan utförandet av beräkningarna deltagit i en kurs i programvaran.

1.5 Avgränsningar

Detta examensarbete ämnar endast behandla skjuvhållfasthetsbestämning i lera. Tillgången till data/undersökningar begränsades till de nya undersökningarna som låg inom ramen för den fördjupade utredningens budget samt till tidigare utförda undersökningar i området. Släntstabilitetsberäkningar har utförts för en utvald slänt i Sjuntorp där stora anisotropieffekter förväntades.

2. Skjuvhållfasthet

2.1 Jordpartikeln/avsättning

Lerpartikeln, som är mindre eller lika med 0,002 mm, och bär på attraherande bindningar som håller ihop partiklarna. I takt med att partiklarna närmar sig varandra genom t.ex. ökade spänningar ökar också den attraherande bindningen mellan kornen vilket gör att kohesionsjord likt friktionsjord har en ökande skjuvhållfasthet i takt med ökade effektivspänningar. (Axelsson, 2006)

Då partiklarna dras till varandra, flokulerar, bildas aggregat. Dessa aggregat kan liknas vid kornen hos friktionsjord men istället för kontaktkraft mellan kornen hålls aggregaten samman av länkar av lerpartiklar. (Rankka, 2003)

De finkorniga jordarnas strukturer varierar beroende på avsättningshastighet, spänningar och aggregatstorlek mellan öppna strukturer utan speciell partikelorientering till hårdare packade partiklar med parallella strukturer. (Rankka, 2003) Parallella strukturer ger upphov till en strukturanisotropi som kan bidra till att göra skjuvhållfastheten i jorden rikttningsberoende. (Larsson, 2008)

De finkorniga jordarna som överlagrar bergrunden i Sverige hör till de glaciala och postglaciala jordar som avsatts under och efter den senaste istiden. De glaciala lerorna är ofta varviga (avsatta i lager) beroende på att vattenhastigheten varierade (smältvattnets årsrytm) under tiden de avsattes. Denna varvighet kan saknas hos leror som bildades i saltvattenmiljö vilket skapade större aggregat (Rankka, 2003). De postglaciala lerorna är normalt omlagrade glaciala jordar och uppvisar inte samma varvighet som de glaciala lerorna och har ofta ett högre organiskt innehåll. (Axelsson, 2006)

2.2 Kontraktanta och dilatanta material.

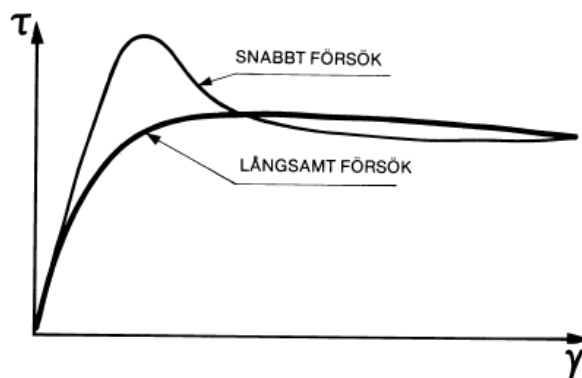
Jordens uppträdande vid skjuvning beror på dess lagringsstruktur och kan beskrivas med hjälp av begreppen kontraktant och dilatant.

Vid skjuvning av en kontraktant, normal till lätt överkonsoliderad, finkornig jord vill aggregaten nå ett tätare och stabilare läge vilket resulterar i en volymminskning vid skjuvning. Volymminskningen upphör när kornen nått kritisk lagring. Skjuvspänningen ökar successivt tills jorden nått kritisk lagring, därefter får skjuvspänningen ett konstant värde. (Axelsson, 2006) (Larsson, 2008)

Skjuvning av ett dilatant, överkonsoliderat, material där kornen är tätt lagrade resulterar vid skjuvning i en volymökning. Dilatanta material uppvisar till en början en "låsningsseffekt" som initialt ger ett högt skjuvhållfasthetsvärde för materialet. Om skjuvningen fortsätter sänks hållfastheten och en volymökning sker som slutar först när residualläget nåtts som ungefär motsvarar skjuvhållfastheten för en kontraktant jord. (Axelsson, 2006) (Larsson, 2008)

Det initialt högre skjuvhållfasthetsvärde som uppvisas vid skjuvning av ett dilatant material skall inte förväxlas med det initialt högre skjuvhållfasthetsvärdet som också kan uppvisas för ett kontraktant material om provet skjuvas hastigt, Figur 1. (Larsson, 2008)

Skjuvhållfasthetsvärdet från den hastiga skjuvningen bör inte användas om inte just ett hastigt förlopp ska återspeglas.



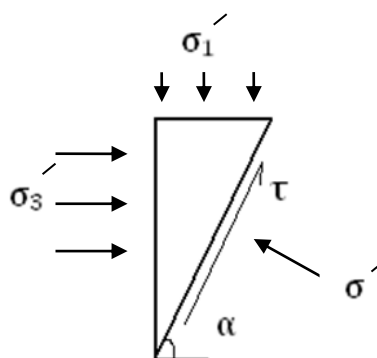
Figur 1. Snabbt respektive långsamt försök för en normalt konsoliderad kontraktant jord. (Larsson, 2008)

2.3 Spänningar-Mohr Coloumb

Enligt Coloumbs brottlag [Ekv. 1] ökar skjuvhållfastheten i jorden då normalspänningen och/eller friktionsvinkeln ökar.

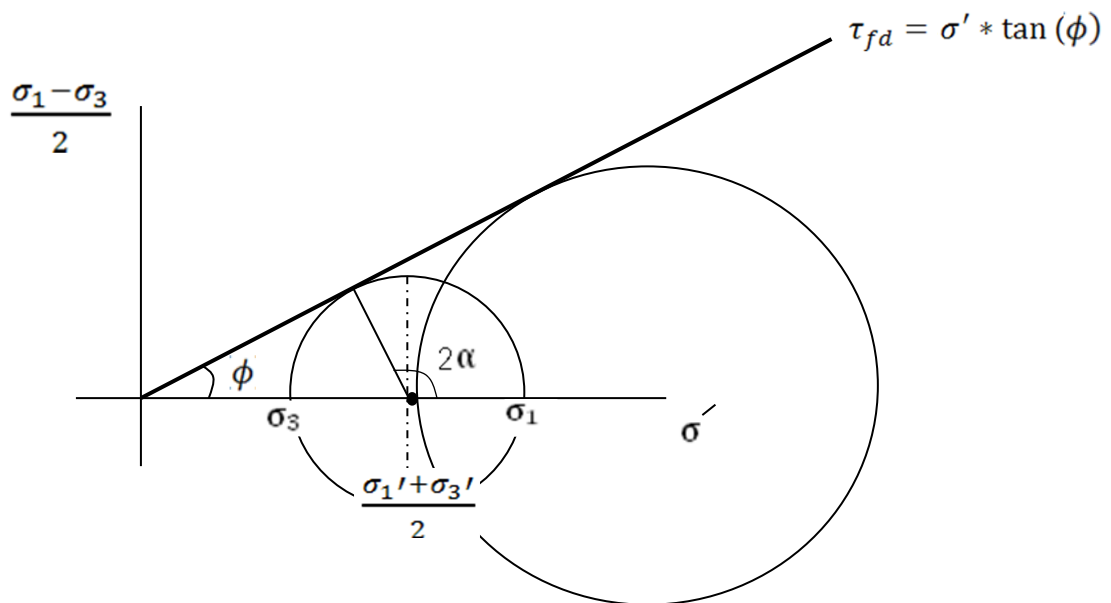
$$\tau_{fd} = \sigma' \times \tan(\phi') \quad (1)$$

För ett litet element kan spänningarna redovisas enligt Figur 2 där vinkeln α visar brottplanets lutning jämfört med planet för minsta huvudspänningen. Huvudspänningarna σ_1 och σ_3 beskriver största respektive minsta normalspänning och de verkar vinkelrätt mot varandra.



Figur 2 Huvudspänningar för ett litet jordelement.

Om effektiva medelspänningen $p' = \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2}$ och skjuvspänningen $\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ från flera försök redovisas mot varandra i Mohr-Coulombs diagram kan friktionsvinkeln utläsas som vinkeln på den linje utgående från origo som tangerar spänningscirkelarna vid brott. Detta redovisas schematiskt i figur 3. (Axelsson, 2006)

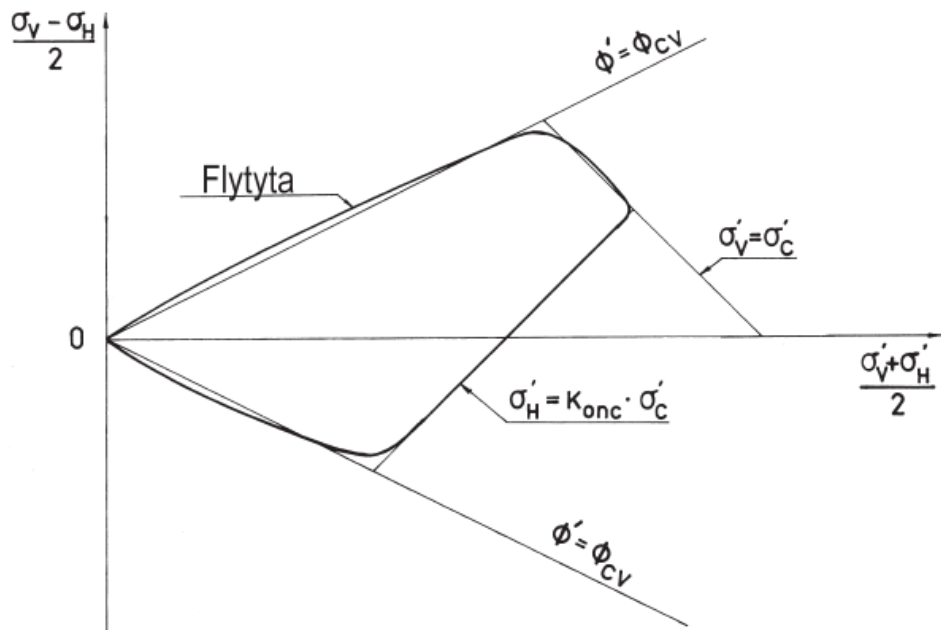


Figur 3. Schematisk illustration av spänningscirklar i ett mohr-coulomb diagram. Friktionsvinkeln kan utvärderas som den linje som skär spänningscirklarna vid brott om flera olika försök redovisas i samma diagram.

2.4 Flytyta

En flytyta definierar de gränsspänningar som om de tangeras resulterar i stora deformationer (plastiska) och hålls spänningarna inom dem sker endast små töjningar (elastiska). Dessa gränsspänningar kan i ett första skede utgöras av det vertikala samt det horisontella förkonsolideringstrycket. Vilket är ett rimligt antagande då stora deformationer sker om förkonsolideringstrycket överskrids. (kompetenscentrum infrastruktur, 2005)

Om Mohr-Coulombs brottlinjer tas med som begränsningslinjer avgränsas flytytan mot såväl deformationer som mot brott, se Figur 4. Inget spänningstillstånd kan ligga utanför flytytan. Om spänningarna är större än förkonsolideringstrycket och inget brott sker deformeras jorden plastiskt och om jorden tillåts att dränera intas nya gränsspänningar. (Larsson, 1983)



Figur 4. Flytyta för finkornig jord. (Larsson et al, 2007)

2.5 Dränerad och odränerad analys

För att kunna definiera jordens skjuvhållfasthet i finkorniga jordar är det väsentligt att känna till om skjuvningen sker odränerad eller dränerad.

Vid helt odränerad skjuvning skapas ett porövertryck som inte utjämnas under skjuvningen och kännetecknar korttidshållfasthet och tidsbegränsad belastning. Eftersom ingen ökning av effektivspänning sker så beror teoretiskt all skjuvhållfasthet av länkarna mellan aggregaten, kohesion, och definieras enligt:

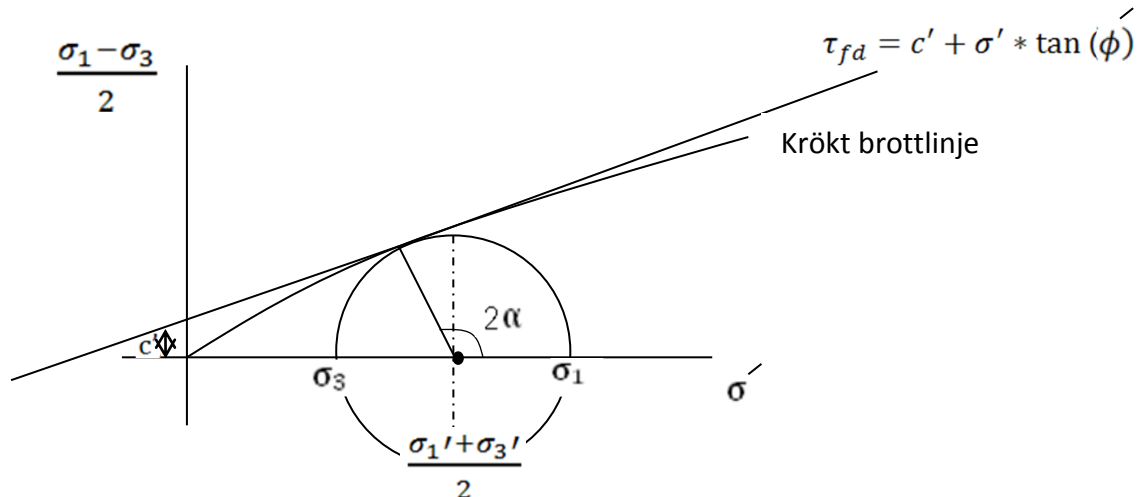
$$\tau_f = \tau_{fu} \quad (2)$$

Den dränerade skjuvhållfastheten beror dels på hur snabbt det genererade porövertrycket jämnas ut, dels på "effektivspänningen" mellan aggregaten. Den dränerade skjuvhållfastheten kan för finkorniga jordar beskrivas med hjälp av det effektiva kohesionsinterceptet c' och den effektiva friktionsvinkeln ϕ' enligt en modifierad version av Coulombs brottlag där:

$$\tau_f = \tau_{fd} = c' + \sigma' \tan(\phi') \quad (3)$$

Om flera försök på överkonsoliderade leror utförs utvärderas oftast en krökt brottlinje. Den krökta brottlinjen beror på att effektivspänningsparametrarna (c' och ϕ') varierar med effektivspänningen. Detta gäller särskilt för överkonsoliderade leror där förkonsolideringstrycket σ'_c är mycket högre än rådande spänningar in-situ. Om man för det

gällande spänningsintervallet approximerar den krökta brottlinjen med en tangent kan c' utvärderas där tangenten skär τ -axeln ($\sigma_v - \sigma_H/2$), enligt Figur 5. c' kan antas öka med överkonsolideringsgraden. Att utesluta c' och tillämpa en friktionsvinkel som ändras över spänningsområdet bör ge samma resultat. (Larsson et al, 2007)

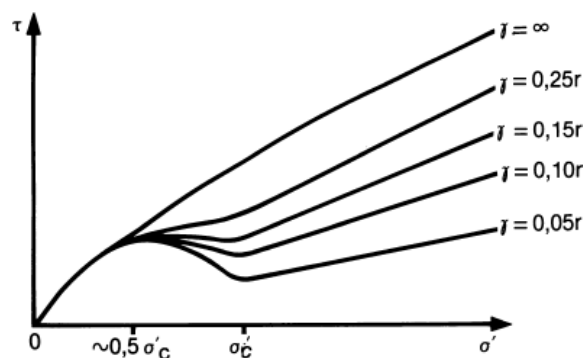


Figur 5. Mohrs cirkel, dränerad skjuvhållfasthet τ_{fd}

För överkonsoliderade finkorniga jordar ansätts ofta c' empiriskt som 10 % av den odränerade medelskjuvhållfastheten. c' bör även jämföras med värdet för $0.03 * \sigma'_c$. Den effektiva inre friktionsvinkeln antas ofta för svenska leror vara ca 30 grader. (Axelsson, 2006) (Larsson et al, 2007).

Det effektiva kohesionsinterceptet c' kan också bero på försökshastigheten. Enligt Larsson (1983) går c' vid långsamma försök mot noll.

För normalkonsoliderad lera bör ovanstående approximation ej användas då stora töjningar uppstår innan brott. Istället bör deformationskriterier (normaltskjuvinkel $\gamma=0.15$ radianer) användas vid skjuvhållfasthetsförsök för att bestämma den dränerade skjuvhållfastheten, se Figur 6. (Larsson, 2008)

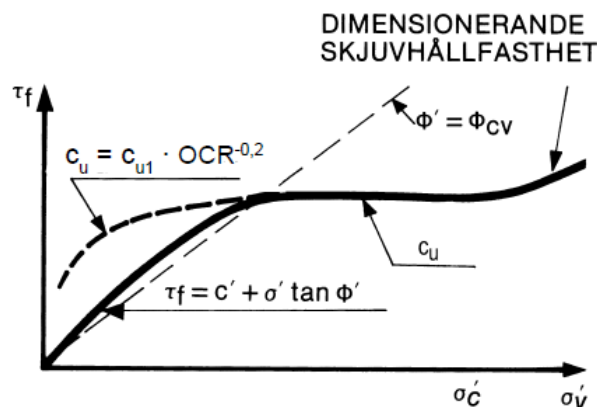


Figur 6. Dränerad skjuvhållfasthet förkontraktanta finkorniga jordar vid olika normalspänningar och deformationskriterier. (Larsson, 2008)

För ett kontraktant material, normalkonsoliderad lera, sker skjuvbrott lättast under odränerade förhållanden eftersom en portrycksutjämning sänker portryck vilket ökar hållfastheten. Motsatsen gäller för ett dilatant material, starkt överkonsoliderad lera, där en portrycksutjämning höjer portrycket vilket gör att brott sannolikt sker under dränerade förhållanden. (Skredkommissionen, 1995)

När gränsspänningarna (σ'_c) nåtts för en kontraktant normalkonsoliderad jord ökar portrycket så att ingen ökning av effektivspänningen sker. Den portrycksökning som sker i och med att gränsspänningen tangeras blir oftast kvar en lång tid och förlänger konsolideringstiden. Portrycken utjämnas 100-1000 ggr snabbare innan gränsspänningen nåtts. Detta medför att överkonsoliderade jordar borde beräknas som dränerade eller med effektivspänningsanalys. (Berntsson, 1983) (Larsson, 1977)

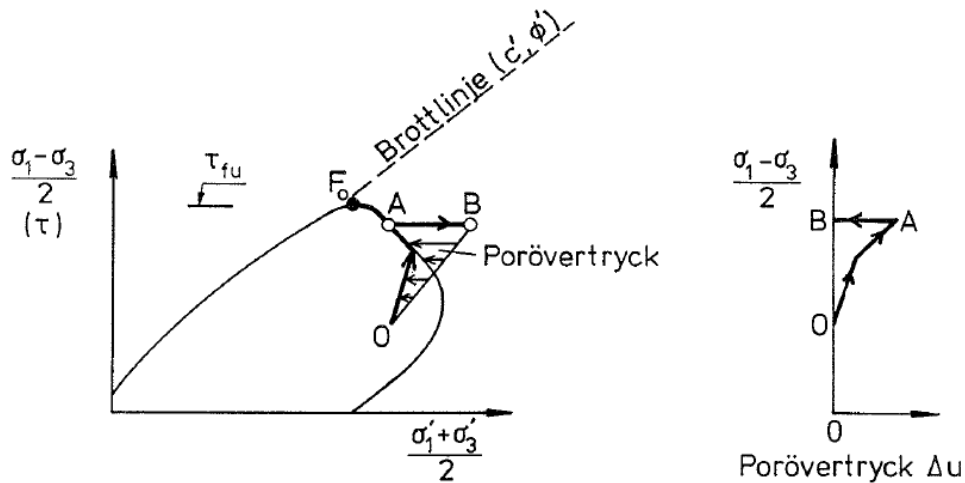
Enligt ovanstående kan därför värsta fallet ur släntstabilitetssynpunkt antas ske när den överkonsoliderade leran är fullt portrycksutjämnad och den normalkonsoliderade leran har kvarstående portryckshöjning efter nådda gränsspänningar (Larsson, 1983). Hållfastheten är sämst ur dräneringsynpunkt för dränerat fall under gränsspänningen och för odränerat fall vid och över gränsspänningen (Larsson, 2008).



Figur 7. Schematisk redovisning av hur den dimensionerande skjuvhållfastheten varierar mellan dränerad och odränerad med effektivspänningen. (Larsson, 2008)

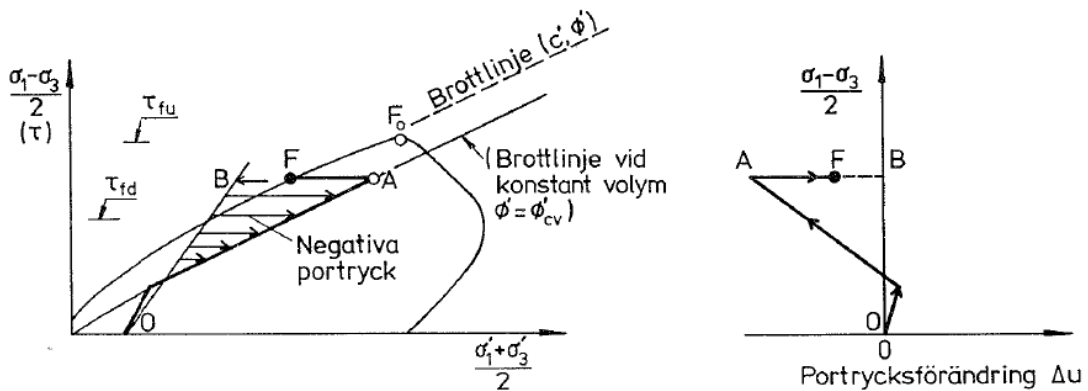
En portrycksökning pga. nederbörd hinner i regel slå igenom i hela lerprofilen under en säsong (månader). Vid torra sänks portrycket som mest så att gränsspänningarna inte överskrids. (Berntsson, 1983)

Figur 8 visar spänningsvägen vid odränerad pålastning för normalkonsoliderad finkornig jord efterföljt av portrycksutjämning. Portrycket utvecklas så att medeltrycket hålls konstant. När den vertikala belastningen når förkonsolideringstrycket börjar jorden att konsolidera (volymen minskar) och portrycket höjs ytterligare för att kompensera volymminskningen (O-A i Figur 8). Om dränering sker vid detta läge (A-B i Figur 8) sänks portrycket och en hållfasthetsökning sker samtidigt som jorden konsolideras plastiskt. Om istället fortsatt pålastning sker i odränerat tillstånd kommer jorden att gå till brott (A-F Figur 8).



Figur 8. Spänningsvägen för en normalt konsoliderad jord vid odränerad pålastning. (Skredkommissionen, 1995)

Figur 9 visar spänningsvägen för en starkt överkonsoliderad finkornig jord vid odränerad pålastning och efterföljande portrycksutjämning. Likt fallet för normalt konsoliderad jord utvecklas portrycket så att medeltrycket hålls konstant. När sedan den vertikala spänningen når förkonsolideringstrycket börjar jorden att öka i volym (dilatera) vilket resulterar i att portrycket sänks för att kompensera denna volymökning (O-A i Figur 9). När volymen inte längre kan öka på grund av höga spänningar eller att en portrycksutjämning sker som ökar portrycket går jorden till brott (A-F i Figur 9). Hade pålastning skett helt dränerat skulle jorden följt kurvan O-B i Figur 9 och gått till brott vid skärningspunkten med brottlinjen.



Figur 9. Spänningsvägen för en starkt överkonsoliderad jord efterföljt av portrycksutjämning. (Skredkommissionen, 1995)

2.6 Konsolideringsspänningar

Som tidigare nämnts har gränsspänningarna stor betydelse för hur spänningarna utvecklas under skjuvning vilket i sin tur definierar hur stor skjuvhållfasthet materialet har.

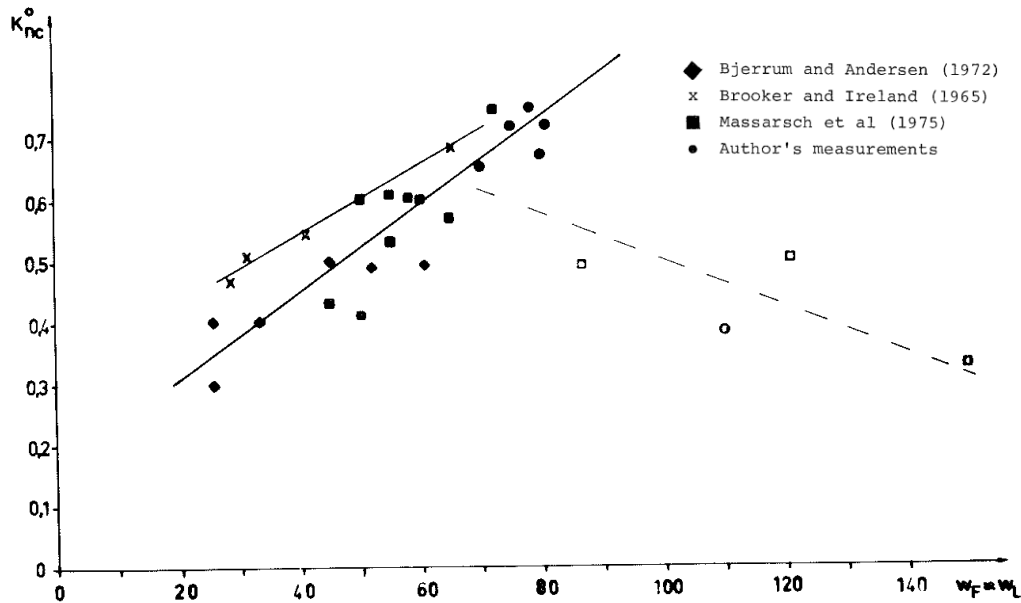
Gränsspänningens storlek är rikttningsberoende och hänger ihop med hur stor spänning som materialet tidigare konsoliderats för, förkonsolideringstryck, i respektive riktning. Det normala är att anta största respektive minsta förkonsolideringstryck i den riktning som jorden avsatts för respektive 90° mot denna.

Studier av Larsson (1977) på skandinaviska leror har visat ett samband mellan jordens vertikala och horisontella förkonsolideringstryck som beror på jordens konfliktgräns, Figur 10.

Relationen mellan gränsspänningen i vertikal-respektive horisontalled för normalkonsoliderad jord ges av K_{0nc} och definieras enligt:

$$K_{0nc} = 0,31 + 0,71(w_L - 0,2) \quad (4)$$

där w_L = konflytgränsen (Larsson, 2008)



Figur 10. Empiriska samband av Larsson (1977) tillsammans med utförda mätningar (fyllda svarta cirklar är försök utförda på svenska leror). Öppna cirklar redovisar försök på organiska leror.

Om jorden sedan avlastas, blir överkonsoliderad, följer förhållandet mellan den vertikala och horisontella effektivspänningen inte längre K_{0nc} .

Schmidt (1967) undersökte förhållandet mellan vertikal och horisontell effektivspänning för överkonsoliderade leror och publicerade ett uttryck för hur de varierar med överkonsolideringsgraden OCR:

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_{v0}} \quad (5)$$

$$K_0 = K_{0nc} OCR^{0,5 \text{ a' } 0,6} \text{ eller } K_{0nc} OCR^{\sin 1.2 \vartheta'} \quad (6)$$

Det effektiva horisontella förkonsolideringstrycket σ'_{ch} kan beräknas enligt:

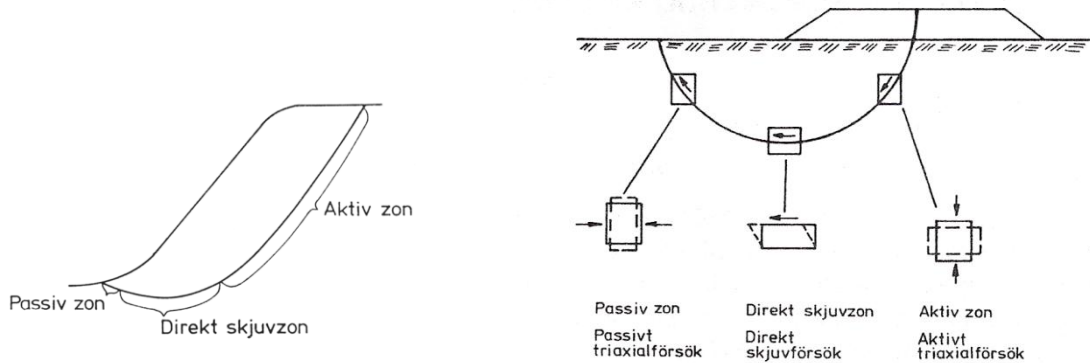
$$\sigma'_{ch} = K_{0nc} \sigma'_c \quad (7)$$

Den effektiva horisontella spänningen in-situ σ'_H kan då beräknas enligt:

$$\sigma'_H = K_0 \sigma'_{v0} \quad (8)$$

2.7 Anisotropi

Anisotropieffekterna i jorden kan förklaras med hur skjuvhållfastheten i jorden varierar med belastningsriktningen och kan vara både avsättningsrelaterad och spänningsinducerad. Vid beaktande av jordens anisotropi delas glidytan normalt in i tre olika skjuvzoner beroende på riktningen hos största huvudspänningen för respektive fall. De tre skjuvzonerna är aktiv, direkt och passivskjuvzon och kan ses för två fall i Figur 11. De olika skjuvzonernas storlek är huvudsakligen beroende av släntens geometri.



Figur 11. Till vänster redovisas skjuvzonerna för en brant slänt och till höger redovisas skjuvzoner för en bankfyllning. (Larsson et al, 2007)

De avsättningsrelaterade anisotropieffekterna beror på jordens mikro- och makrostruktur och den spänningsinducerade delen av anisotropin beror på vilken riktning största respektive minsta förkonsolideringsspänning jorden har.

Fortsättningsvis i rapporten kommer ordet anisotropi att innebära att både den avsättningsrelaterade och spänningsinducerade skjuvhållfastheten är beaktad då det är svårt att kvantifiera storleken hos respektive bidrag separat.

Den generella jordmodellen för odränerad skjuvhållfasthet kan skrivas på formen:

$$\tau_{fu} = \sigma'_{vo} a OCR^b \quad \text{eller} \quad \tau_{fu} = \sigma'_c a OCR^{b-1} \quad (9)$$

I Ekvation 9 är a en faktor för anisotropi och b en materialparameter som varierar med typ av jord. (Larsson, 2007)

Faktorn a kan för de svenska lerorna antas variera beroende på skjuvzon och konflytgräns enligt:

- Aktiv skjuvzon: 0.33
- Direkt skjuvzon: $0.125 + \frac{0.205}{1.17} w_L$
- Passiv skjuvzon: $0.055 + \frac{0.275}{1.17} w_L$

(Larsson, 2007)(Skredkommisionen 3:95)

Materialparameter b är i storleksordningen 0.7-0.9 och antas vanligen till 0.8.

Det definierades tidigt en ekvation för hur den odränerade skjuvhållfastheten för kohesionsmaterial varierar beroende på riktning i det vertikala-horisontella planet: (Al-Karni, Al-Shamrani, 1999)

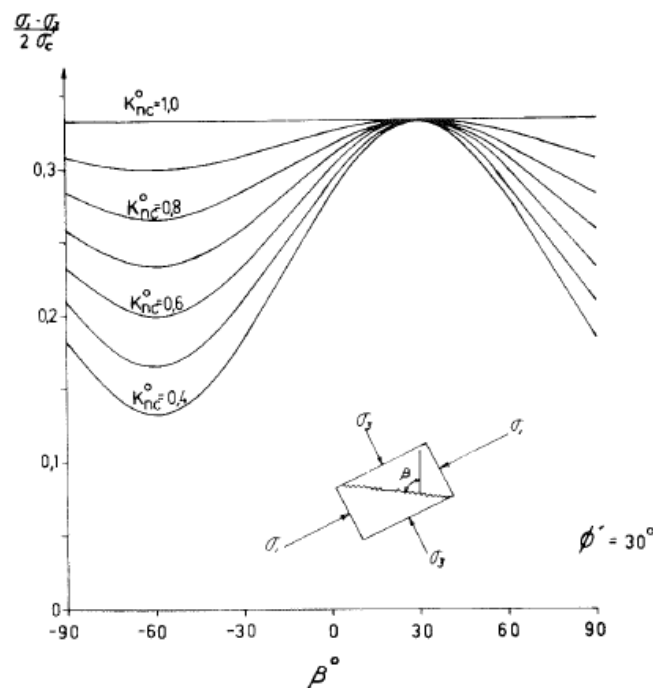
$$\tau(i) = \tau_h + (\tau_v + \tau_h) \cos i^2 \quad , i = \theta - \psi \quad (10)$$

där θ är vinkel mellan horisontalplanet och brottplanet och ψ är vinkel mellan brottplanet och riktningen för största huvudspänningen.

Enligt Larsson (1977) kan förkonsolideringstrycket i en riktning från den horisontella, α , beräknas enligt:

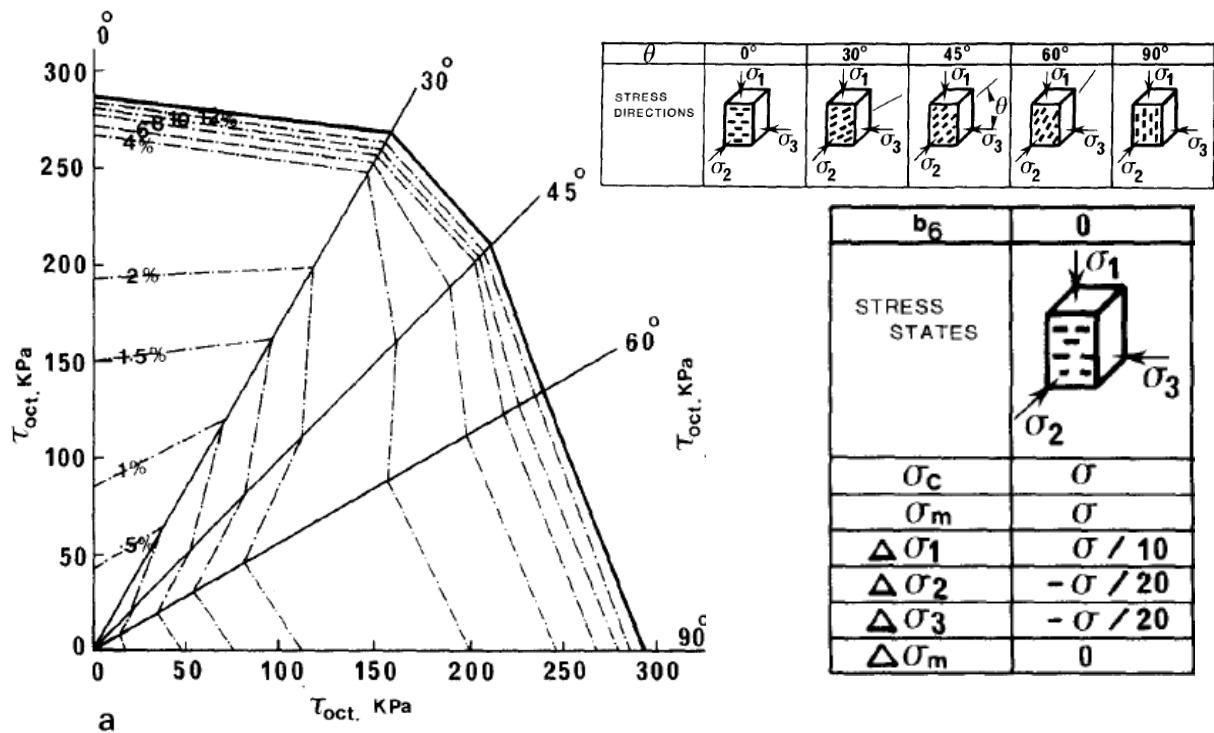
$$\sigma'_\alpha = \sigma'_c (\cos^2 \alpha^2 + K_{0nc} \sin^2 \alpha) \quad (11)$$

Där σ'_c är förkonsolideringstrycket mot det horisontella planet och $K_{0nc} \sigma'_c$ är förkonsolideringstrycket mot det vertikala planet. Figur 12 nedan visar hur förkonsolideringstrycket varierar för plan med olika riktning mot den vertikala.



Figur 12. Förkonsolideringstrycket variation för plan med olika riktning från det horisontella. (Larsson, 1977)

Young och Mohamed (1984) förklarar att det arbete som krävs för jorden att gå till brott är beroende av relationen mellan det vertikala och horisontella förkonsolideringstrycket. De förklarar även att det krävs olika mycket kraft för att organisera lerpartikeln till brottplanet beroende på vinkeln mellan den maximala huvudspänningen och brottplanet. Genom odränerade försök med rekonstruerade leror som avsatts i olika riktningar i laboratorium har uppmätta skjuvhållfastheter registrerats variera beroende på partikelriktning och konsolideringsförhållanden, Figur 13.



Figur 13 Skjuvhållfasthetens variation beroende på vilken partikelriktning jorden är avsatt i för ett triaxialt spänningsförhållande. (Young och Mohamed 1984).

Larsson (1981) förklarar att det arbete som krävs för att omorganisera partiklarna till brottplanet kan påvisas genom att se hur den inre friktionsvinkeln minskar då brottspänningen nås. Försöken nedan har utförts dränerade i direkt skjuvapparat.

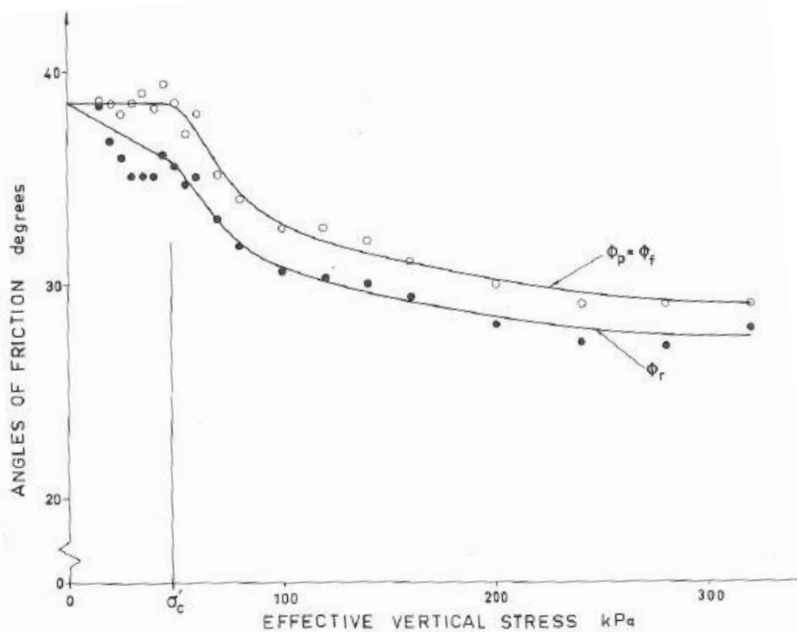


Fig. 93. ϕ_f , ϕ_r and ϕ_p from direct shear tests on Bäckebol clay.

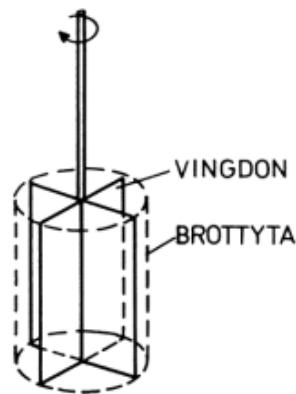
Figur 14. Utvärderade friktionsvinklar från dränerade direkta skjuvförsök utförda på lera från bäckebol i Göteborg. (Larsson, 1981)

3. Beskrivning av provningsmetoder

3.1 Fältmetoder

3.1.1 Vingförsök

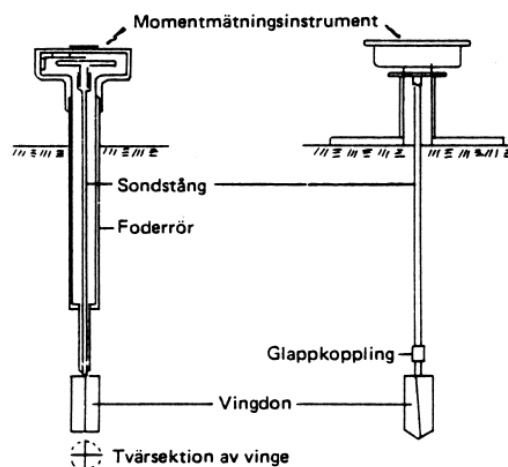
Vingförsök är en i Sverige beprövad metod för bestämning av det odränerad skjuvhållfasthetsvärdet τ_v och sensitiviteten S_t i fält (Larsson och Åhnberg, 2003) i finkorniga jordar. Metoden bygger på att ett vingdon med fyra mot varandra vinkelräta plåtar fästa på en stång roteras i jorden på önskat djup. Vid utförandet mäts det vridmomentet i stängen som krävs för att jorden skall gå till brott och genom att känna till arean på den cylinderyta som bildas när vingdonet roteras kan ett skjuvhållfasthetsvärde beräknas, se Figur 15. (SGF:s laboratoriekommitté, 1993)



Figur 15 Principskiss vingförsök. (Åhnberg et al, 2001)

Utrustning

Vingutrustningen finns i ett antal utföranden. De äldre varianterna av utrustningen var manuella och kunde antingen fås med eller utan skyddskåpa, se Figur 16. Med skyddskåpa skyddas vingdonet under neddrivning. Vid försöksnivån skjuts vingdonet ut ur kåpan och momentet från rotationen mäts i instrument vid markytan. Utrustningen utan skyddskåpa bygger istället på att en glappkoppling tar hand om friktionen som uppkommit under neddrivningen genom att låta stängerna rotera utan att vingdonet rör sig. När friktionen antas konstant kopplas vingdonet på och försöket kan börja. (Åhnberg et al, 2001)



Figur 16. Principskiss för vingdon med och utan skyddskåpa. (Åhnberg et al, 2001)

Dagens vingutrustning består oftast av ett elektroniskt instrument som sköter både momentpåläggning och digital registrering av data vilket underlättar handhavandet och datainsamlingen. Även idag kan man välja att använda don med eller utan skyddskåpa, skillnaden mot förr är att glappkoppling används i båda fallen. Elektroniskt instrument och vingdon utan skyddskåpa kan ses i Figur 17. Vingdonet har förhållandet 1:2 mellan diameter och höjd. Normalvingdonet har diametern 65 mm och höjden 130 mm. (Åhnberg et al, 2001)



a)

b)

Figur 17 a) Vingdon med glappkoppling utan skyddskåpa b) Elektroniskt instrument för momentpåläggning och datainsamling för vingförsök.

Bestämning av Skjuvhållfasthetsvärdena τ_v och τ_{RV}

Skjuvhållfasthetsvärdet för ostörd jord beräknas med formeln:

$$\tau_v = \frac{6M_{max}}{7\pi D^3} \quad M_{max} = \text{maximala vridmoment för vingen} \quad (12)$$

Samma formel gäller för skjuvhållfasthetsvärdet för störd jord τ_{RV} efter omrörning. Vingen roteras då hastigt 20 varv varefter man igen mäter det maximala vridmomentet. (SGF:s laboratoriekommité, 1993)

Bestämning av Sensitivitet S_t

Kvoten mellan skjuvhållfasthetsvärdena vid försök på ostörd och störd jord ger sensitiviteten:

$$S_{tv} = \frac{\tau_v}{\tau_{RV}} \quad (13)$$

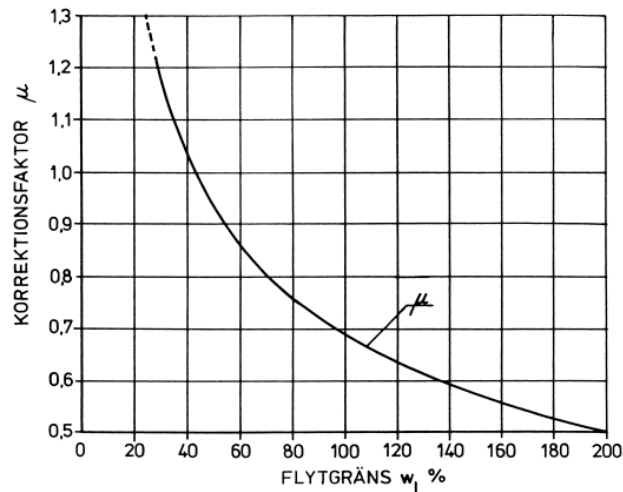
Sensitiviteten delas normalt in i tre klasser där $S_t < 8$ är lågsensitivt och $S_t > 30$ är högsensitiv. Om sensitivitet $S_t > 50$ och skjuvhållfastheten är mindre än 0,4 kPa kallas leran kvick. (SGF:s laboratoriekommité, 1993)

Skjuvhållfasthet

Om den odränerade skjuvhållfastheten ska kunna bestämmas genom vingförsök krävs att försöket utförs i jordar som är tillräckligt opermeabla för att odränerat brott ska kunna ske under försöket.

Den första korrektionen för att erhålla den odränerade skjuvhållfastheten tar hänsyn till flytgränsen w_L . Med hjälp av Ekvation 14 eller Figur 18 kan värdet μ beräknas som korrigerar τ_v enligt följande: $\tau_{fu} = \tau_v \times \mu$. (Larsson et al, 2007)

$$\mu = \left(\frac{0,43}{w_L}\right)^{0,45} \geq 0,5 \quad (14)$$



Figur 18 Reduktionsfaktor för skjuvhållfasthetsvärdet utifrån jordens flytgräns. Högre värden på μ än 1.2 bör användas med försiktighet. (Larsson et al, 2007)

Den ovanstående reduktionsfaktorn μ är baserad på en jämförelse mellan medelvärden av uppmätta och beräknade skjuvhållfastheter vid brott i fält. Korrektionsfaktorn μ från Figur 18 gäller för normalkonsoliderade och svagt överkonsoliderade leror med $OCR \leq 1,5$. (Larsson et al, 2007)

För att bedöma om reduktionsfaktorn μ kommer ge rimliga värden på skjuvhållfastheten kan Hansbos relation, ekvation 15, användas för att undersöka om det uppmätta skjuvhållfasthetsvärdet följer det normala för en jordart som är normal till lätt överkonsoliderade. (Larsson et al, 2007)

$$\tau_{v,k} = \sigma'_c 0,45 w_L \quad (15)$$

Utvärdering med hänsyn till OCR

I de fall överkonsoliderad jord undersökts bör skjuvspänningen korrigeras enligt:

$$\tau_{fu} = \tau_v \left(\frac{0,43}{w_L}\right)^{0,45} \left(\frac{OCR}{1,3}\right)^{-0,15} \quad (16)$$

(Larsson et al, 2007)

Om förkonsolideringstrycket från CRS saknas kan enligt Larsson & Åhnberg (2003) ett värde på OCR empiriskt uppskattas och användas i formeln ovan med hjälp av en modifierad version av Hansbos formel. Följande uppskattning av OCR visar enligt deras undersökning bättre överensstämmelse för höga överkonsolideringsgrader än att enbart använda Hansbos formel:

$$OCR = \left(\frac{\tau_v}{0,45 * w_L * \sigma'v} \right)^{1,11} \quad (17)$$

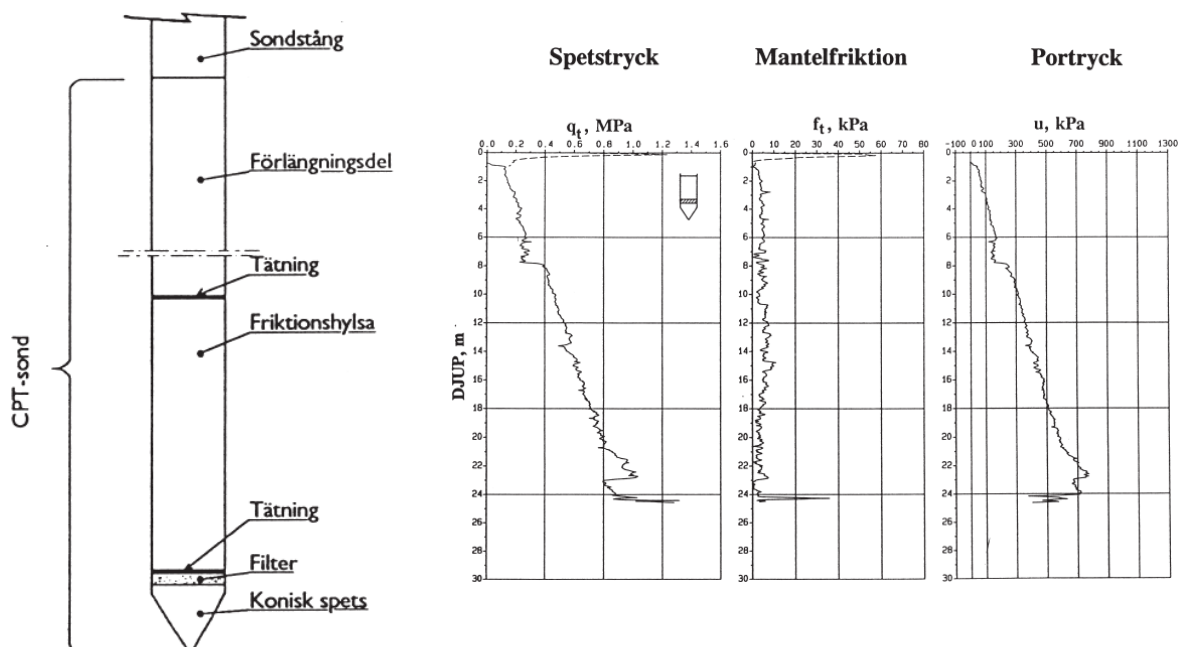
Korrigeringen för OCR grundar sig på att skjuvhållfasthetsvärden från vingförsök inte visar samma minskning vid avlastning som laboratorieförsök gör utförda på samma material. Skjuvhållfasthetsvärden från vingförsök i överkonsoliderad lera behöver därför korrigeras för detta. (Larsson et al, 2007)

Löfroth (2008) redovisar hur skjuvhållfasthetsvärden från vingförsök i lera påverkas av det horisontella och vertikala förkonsolideringstrycket. I försöken visar Löfroth med relativt god överensstämmelse att skjuvhållfasthetsvärdena till större del påverkas av det horisontella förkonsolideringstrycket och den horisontella effektivspänningen än den vertikala. Hon förklarar även att dagens reducering av vingen med hänsyn till vertikal OCR är acceptabel i de flesta fall men kan för vissa överkonsoliderade leror behöva reduceras ytterligare.

3.1.2 CPT

CPT (Cone Penetration Test) är en statisk spetstryckssonderingsmetod där sonderingsmotståndet mot spetsen mäts samtidigt som friktionsmotstånd och portryck registreras, se Figur 19.

Metoden används främst för att ta reda på jordlagerföljder men empiriska relationer har utvecklats som gör det möjligt att uppskatta såväl friktionsvinkel och odränerad skjuvhållfasthetsvärden som överkonsolideringsgrad. (Larsson, 2007)



Figur 19. Schematisk figur över geometrin för en CPT-sond tillsammans med det uppmätta och korrigerade spetstrycket, mantelfriktionen och portrycket. CPT-sonden har en längd på ca 1.05 m. (Larsson, 2007)

Utrustning

Den utrustning som vanligtvis används i Sverige idag har en kapacitet på 5-10 ton i spetskraft och klarar att utvärdera förhållandet i lösare lagrad finjord till fasta sandlager. Utrustningen delas in i tre klasser: CPT1, CPT2 och CPT3. Klassindelningen beskriver mätnoggrannheten hos sonderna och bestäms utifrån vilken typ av jord som ska undersökas. (Larsson, 2007)

Gemensamt för de ovanstående klasserna är att sonderingen utförs med en cylindrisk sond med tvärsnittsarean 1000 mm^2 , spetsvinkeln 60 grader, friktionshylsans mantelarea $15\,000 \text{ mm}^2$ och neddrivningshastigheten 20 mm/s . Under neddrivningen registreras Spetsmotstånd q_c , Mantelfriktion f_c och oftast portryck u . (Larsson, 2007)

Spetsmotstånd

Ett värde på spetsmotståndet erhålls genom att dividera axialkraften mot spetsen genom spetsens tvärsnittsarea enligt:

$$q_c = \frac{\text{Okorrigerat mätvärde på spetskraft}}{\text{Tvärsnittsarea}} \quad (18)$$

Om värdet korrigeras för uppmätt portryck vid spetsen kan det totala spetsmotståndet beräknas enligt följande:

$$q_T = \frac{\text{Total spetskraft}}{\text{Tvärsnittsarea}} \approx q_c + u(1-a) \quad (19)$$

u = uppmätt portryck, $a = A_N/A_T$ där A_N = sondspetsens nettoarea och A_T = sondspetsens totalarea

Mantelfriktion

Ett värde på mantelfriktionen erhålls genom att dividera friktionskraften mot friktionshylsan med hylsans mantelyta enligt:

$$f_c = \frac{\text{Okorrigerat mätvärde på friktionskraft}}{\text{Mantelarea}} \quad (20)$$

även mantelfriktion kan påverkas av portrycket varför mätvärdet korrigeras enligt nedan för att erhålla den totala mantelfriktionen:

$$f_T = \frac{\text{Total friktionskraft}}{\text{Mantelarea}} \approx f_c - (u b + 0,3\Delta u \left(\frac{1-a}{15} - b\right)) \quad (21)$$

Areafaktor $b = (A_L - A_U)/A_S$ där A_L = area nedsida friktionshylsa, A_U = area ovasida friktionshylsa och A_S = mantelarea friktionshylsa. Δu är skillnaden mellan skapat porövertryck vid neddrivning och uppmätt portryck i jorden

Skjuvhållfasthet

CPT-sonderingens främsta syfte är att kartlägga jordlagerföljder och skiktgränser. Empiriska metoder har dock tagits fram för att även kunna beräkna den odränerade skjuvhållfastheten med data från CPT-försöken. Oränerade skjuvhållfastheten utvärderad ur CPT-försöken

motsvarar enligt Larsson (2007) den skjuvhållfasthet som erhålls ur korrigerade ving- och konförsök samt direkta skjuvförsök.

Den odränerade skjuvhållfastheten för normalkonsoliderad och lätt överkonsoliderad jord kan med hjälp av flytgränsen w_L och nettospetstrycket $q_T - \sigma_{vo}$ beräknas enligt (Larsson, 2007):

$$\tau_{fu} = \frac{q_T - \sigma_{vo}}{13,4 + 6,65 * w_L} \quad (22)$$

Om värdet för flytgränsen saknas kan den odränerade skjuvhållfastheten grovt uppskattas genom att ersätta nämnaren i ekvation 22 med 14,5 för silt, 16,3 för lera och 24 för gyttja. (Larsson, 2007)

Utvärdering med hänsyn till OCR

Den utvärderade odränerade skjuvhållfastheten för CPT-sonderingen bör precis som vingförsöken korrigeras för överkonsolideringsgraden OCR. Detta görs enligt (Larsson, 2007):

$$\tau_{fu} = \frac{q_T - \sigma_{vo}}{13,4 + 6,65 * w_L} * \left(\frac{OCR}{1,3}\right)^{-0,2} \quad (23)$$

Från CPT-sonderingen kan förkonsolideringstrycket grovt uppskattas enligt följande:

$$\sigma'_c = \frac{q_T - \sigma_{vo}}{1,21 + 4,4 * w_L} \quad (24)$$

(Larsson, 2007)

Larsson och Åhnberg (2003) beskriver att CPT-metoden är känslig för jordens konflytgräns och att utvärderat förkonsolideringstryck har en spridning på ca +30 % mot uppmätta värden från CRS-försök.

Enligt Löfroth (2008) påverkas skjuvhållfasthetsvärden i lera från CPT-försök till större del av den horisontella spänningen än den vertikala. Relevansen för hennes utförda CPT-försök är dock inte lika bra som för utförda vingförsök.

3.1.3 Kolvprovtagning

Kolvprovtagning är en metod för att ta upp ostörda cylindriska jordprover. Från varje nivå hämtas normalt tre stycken jordprover med diametern 50 mm, se Figur 20. Proverna sluts tätt, förvaras svalt och fraktas varsamt. Detta för att inte störa proven mer än vad som redan åstadkommits under provtagningen. De cylindriska jordproverna används sedan vid laborieprovning för att bestämma jordens egenskaper och hållfasthet.



Figur 20. Kolvprovtagning med kolvprovtagare.

3.2 Laboriemetoder

I det här kapitlet kommer de provningsmetoder i laboriemiljö beskrivas som utförts på de upptagna jordproverna från Sjuntorp.

3.2.1 Fallkonförsök

Fallkonförsök utförs alltid på ostörda jordprover som en del i rutinundersökningen för kolvborrprover för att översiktligt ge ett värde på den odränerade skjuvhållfastheten. Metoden lämpar sig bäst för oskiktad homogen finkornig jord. (Skredkommissionen, 1995)

Fallkon-apparaten är en enkel utrustning som består av ett justerbart stativ där konhållaren med dess kon sitter fast samt en millimeterskala för avläsning av nedträngningsdjup, se Figur 21. (Geonor.com, 2011-11-10)



Figur 21. Fallkonapparat. (Geonor.com, 2011-11-10)

Till den vanliga fallkonutrustningen som beskrivs här används fyra olika koner;

Ostörd provtagning	}	<table style="border-collapse: collapse; display: inline-table;"> <tr> <td style="padding: 0 5px;">10 g</td> <td style="padding: 0 5px;">60°</td> </tr> <tr> <td style="padding: 0 5px;">60 g</td> <td style="padding: 0 5px;">60°</td> </tr> <tr> <td style="padding: 0 5px;">100g</td> <td style="padding: 0 5px;">30°</td> </tr> <tr> <td style="padding: 0 5px;">400 g</td> <td style="padding: 0 5px;">30°</td> </tr> </table>	10 g	60°	60 g	60°	100g	30°	400 g	30°	} Omrörd provtagning
10 g	60°										
60 g	60°										
100g	30°										
400 g	30°										

Vid försök placeras konen så att den precis tangerar provytan. Konen släpps mot provet genom att trycka in den knapp som frigör konen varefter konintryckningen direkt avläses på millimeterskala med noggrannheten 0,1 mm.

För ostörda försök skärs den översta delen av provet, som anses stört, bort varefter man utför första fallkonförsöket med standardkonen 100 g. Om intryckningen med denna kon blir större än 20 mm används den mindre konen 60 g och blir intryckningen istället mindre än 7 mm används den större konen 400 g. Detta ger att fallkonförsöket endast är giltigt för konintryckning i lerprovet mellan 7-20 mm och då ingen inträngning sker i annat skikt än det avsedda. (Wiesel et al, 1985) (Eriksson, 2004)

Delar av materialet som provats kan sedan användas för att bestämma den omrörda konintryckningen och jordprovets vattenkvot.

Den omrörda konintryckningen bestäms efter att jordprovetrörts om och sedan utsätts för ovanbeskrivna procedur. (Wiesel et al, 1985)

Skjuvhållfasthet

Det oreducerade skjuvhållfasthetsvärdet från fallkonförsöket kan utvärderas empiriskt genom att använda en modifierad version av Hansbos formel:

$$\tau_k = K * g * \frac{m}{i^2} \quad (25)$$

Där K = konparameter beroende på spetsvinkel, $K= 1.0$ (30°) och $K= 0,25$ (60°)
 $g= 9,81 \text{ m/s}^2$
 M = konens massa i g
 i = konintryckning i mm

Skjuvhållfasthetsvärdet reduceras precis som för vingförsök med hänsyn till flytgränsen enligt ekvation 1. Skjuvhållfastheten beräknas sedan enligt $\tau_{fu} = \tau_k \mu$. (Wiesel et al, 1985)

3.2.2 Direkta Skjuvförsök

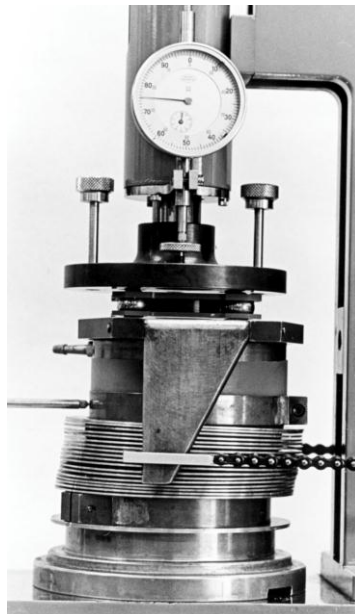
Det direkta skjuvförsöket utförs på ostörda jordprover i en skjuvapparat, se Figur 22 och Figur 23, och återspeglar skjuvningen vid den direkta skjuvzonen i en glidyta.

Skjuvhållfasthetsvärdet från odränerade skjuvförsök antas ofta som medelvärdet för den odränerade skjuvhållfastheten i en glidyta vars medellutning inte alltför mycket avviker från den horisontella.

Provet konsolideras först för rådande spänningstillstånd in-situ och sedan påförs en skjuvspänning på provkroppen och deformationen mäts. Resultatet från odränerade skjuvförsök kan användas direkt utan korrektioner varför denna metod ofta används för att verifiera skjuvhållfastheten från in-situ metoder som vingförsök och CPT där alla tre metoder mer eller mindre ämnar återspegla medelskjuvhållfastheten. (SGF:s laboratoriekommité, 2004)

Utrustning & genomförande

Det direkta skjuvförsöket kan utföras av mer eller mindre avancerade utrustningar där noggrannhet och styrning av de ingående parametrarna skiljer de annars principiellt lika skjuvapparaterna från varandra.

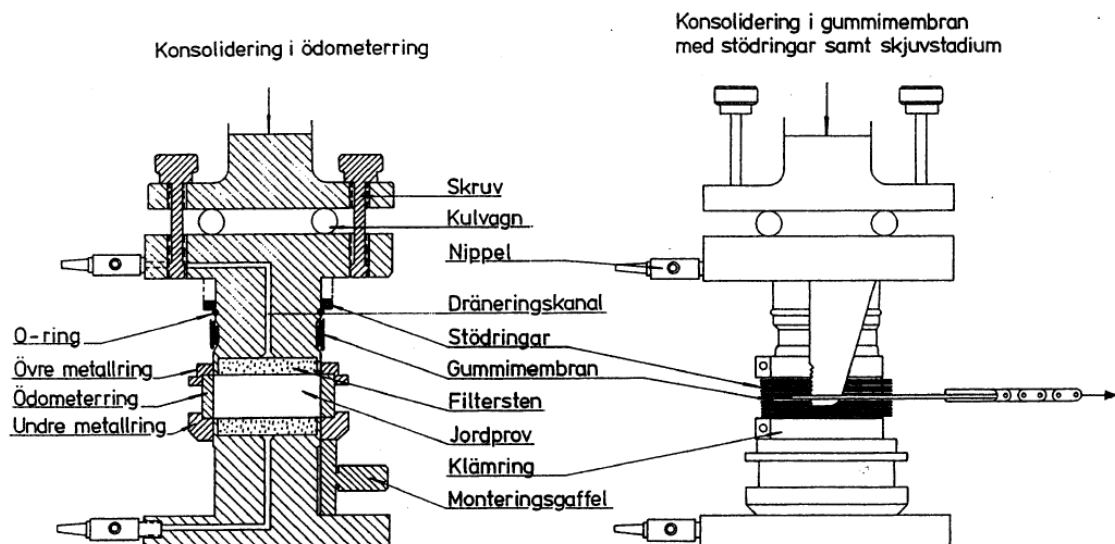


Figur 22. Skjuvapparat för direkta skjuvförsök. (SGF:s laboratoriekommité, 2004)

De ostörda prover som normalt används vid direkta skjuvförsök är upptagna genom kolvprovtagning.

Det ostörda cylindriska jordprovet skärs av till en önskad provhöjd och placeras i provhållaren. Provet konsolideras sedan för det förkonsolideringstryck som råder in-situ. Om inte förkonsolideringstrycket ska överskridas i försöket bör spänningen under konsolideringsfasen inte överstiga 80-90 % av förkonsolideringstrycket. Överskrids eller tangeras förkonsolideringstrycket under konsolideringen riskeras en hållfasthetsökning av provet vilket gör försöket ogiltigt.

När skjuvningen skall börja alternerar man i den enklare utrustningen mellan odränerade och dränerade försök genom att låta dräneringskanalerna vara stängda eller öppna. För den mer avancerade utrustningen hålls dräneringskanalerna alltid öppna och det vertikala trycket regleras så att provet hålls konstant i höjded för odränerade försök och i dränerade försök sker ingen reglering av vertikaltrycket. På detta sätt kan portrycket mätas. (Wiesel et al, 1985)



Figur 23 Principskiss över skjuvförsök i enklare skjuvapparat av typ SGI. Till vänster skiss över konsolidering i ödometerring och till höger skiss över konsolidering i gummimembran samt skjuvstadium. (SGF:s laborierkommitté, 2004)

Skjuvhållfasthet

Odränerad skjuvhållfasthet

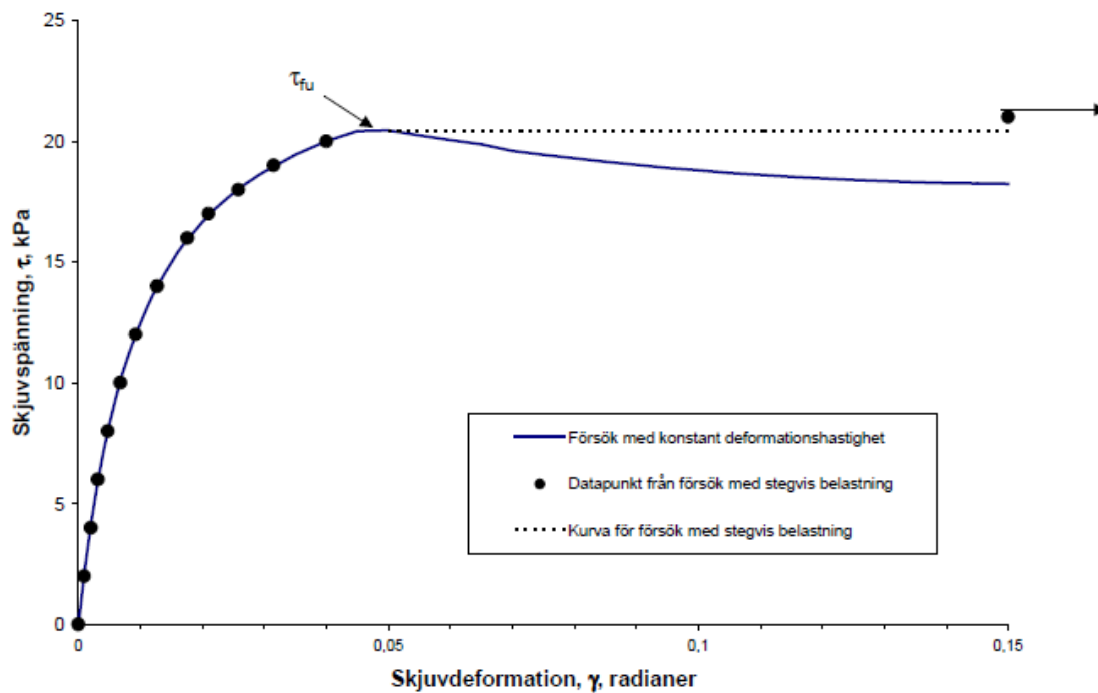
Den odränerade skjuvhållfastheten utvärderas antingen vid brott eller vid den maximala uppmätta skjuvspänningen innan 0.15 radianers vinkeländring. För att utvärdera detta krävs att skjuvkraften, provets tvärsnittsarea och höjd samt provets horisontalrörelse under skjuvningen är kända. Skjuvspänningen plottas mot skjuvdeformationen och dessa beräknas enligt:

$$\text{Skjuvspänning } \tau = F_{\text{horisontell}} A_{\text{tvärsnitt}} \quad (26)$$

$$\text{Skjuvdeformation } \gamma = \arctan \frac{\Delta s}{h} \quad (27)$$

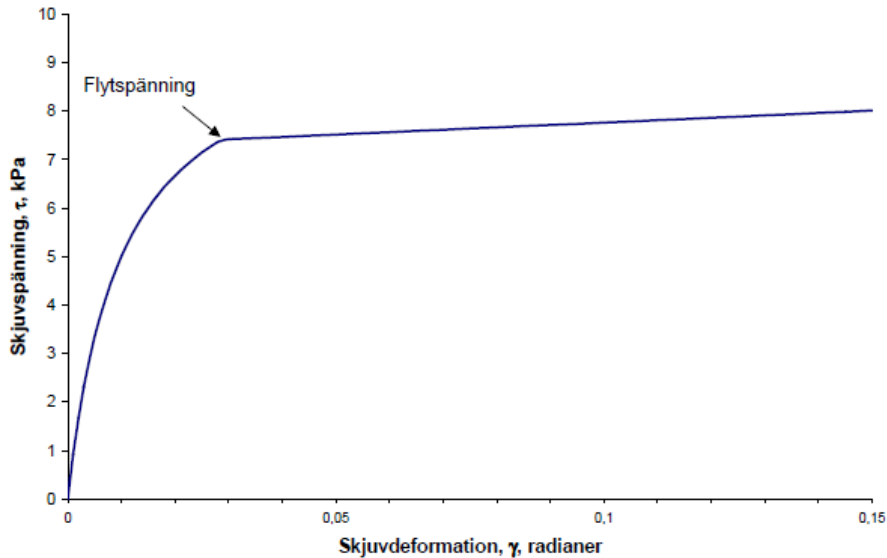
där Δs = horisontalrörelsen och h = provhöjden

I Figur 24 plottas skjuvspänningen mot skjuvdeformationen för ett odränerat skjuvförsök för utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet.



Figur 24. Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet för ett odränerat direkt skjuvförsök. (SGF:s laboratoriekommité, 2004)

Om hållfastheten i lera är mycket låg eller jordtypen är siltig kan flytspänningar uppstå. Detta innebär att vid en viss skjuvspänning får materialet stora deformationer vid en liten ökning av skjuvspänningen utan att brott uppstår, se Figur 25. Den odränerade skjuvspänningen utvärderas då vid flytspänningen eller i de fall där brott faktiskt uppstår innan 0,15 radianers vinkeländring får hänsyn tas till om deformationerna innan brott är acceptabla för rådande dimensionering. (SGF:s laboratoriekommité, 2004)



Figur 25. Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet vid flytspänning utan efterföljande brott. (SGF:s laboratoriekommité, 2004)

Den odränerade skjuvspänningen kan även redovisas mot konsolideringsspänningen om flera skjuvförsök utförs på samma typ av jord. Vid eller över förkonsolideringsspänningen ($OCR=1$) ges ett nära nog linjärt samband mellan dessa varför skjuvspänningen kan antas öka med konsolideringen enligt:

$$\tau_{fu} = \alpha \sigma'_c \quad (28)$$

Om spänningarna i jorden inte överstiger förkonsolideringstrycket ($OCR > 1$) gäller normalt:

$$\tau_{fu} = \alpha \sigma'_c OCR^{b-1} \quad (29)$$

Både a och b är materialparametrar som varierar med typ av jord och kan uppskattas efter flera utförda skjuvförsök på samma material, normalt uppskattas dessa värden i storleksordningen $a=0.22$ och $b=0.8$. (SGF, 2004) Detta kan jämföras med gen generella jordmodell som beskrivs i avsnitt 2.7.

Dränerad Skjuvhållfasthet

Dränerade skjuvförsök utförs främst på överkonsoliderad jord. Dels för att dränerad analys då kan ha lägre skjuvhållfasthet än odränerad analys samt för att brott normalt inte uppstår i försöken för jordar med $OCR < 2$. (SGF:s laboratoriekommité, 2004)(Skredkommissionen, 1994)

Dränerade försök utvärderas på likande sätt som odränerade försök. Om inget brott sker inom 0.15 radianers vinkeländring sätts den dränerade skjuvhållfastheten till detta värde.

3.2.3 Triaxialförsök

Triaxialförsöket utförs på ostörda prover i en triaxialapparat där odränerad och dränerad skjuvhållfasthet kan undersökas genom aktiva och passiva försök. (kompetenscentrum infrastruktur, 2005)

Utrustning & genomförande

Triaxialapparaten består av en tryckkammare för vätska som innesluter ett filter- och gummibeklätt prov. Provet placeras på en filtersten som är kopplad till en portrycksmätare för styrning av dräneringsväg och på provets överyta placeras en stämpel för styrning av axialspänning. Tryckkammaren är fylld med paraffinolja som trycksätter provet för en allsidig spänning (celltryck). Genom att antingen öka eller minska den axiella spänningen (stämpeln) kan anisotropa förhållanden skapas. Det går att variera celltrycket under försöket. (Wiesel et al, 1985)

Utrustningen består också av olika givare som mäter celltryck, axialtryck, portryck, deformation och volymändring.

Triaxialapparaten finns i flera olika storlekar beroende på typ av försök och provstorlek. I denna rapport diskuteras endast triaxialförsök på ostörda prover upptagna genom standard kolvprovtagning.

Innan provet utsätts för skjuvning förkonsolideras provet för rådande konsolideringsspänningar in-situ eller för kommande spänningar. I isotropa triaxialförsök konsolideras hela provet för ett allsidigt celltryck motsvarande ca 85 % av förkonsolideringstrycket. För anisotropa triaxialförsök konsolideras först provet allsidigt för det beräknade eller uppmätta horisontella förkonsolideringstrycket (radiella spänningen). Sedan hålls den radiella spänningen konstant och provet konsolideras för det vertikala förkonsolideringstrycket genom att öka den axiella spänningen. Efter att provet rekonsoliderats tillåts provet att svälla och anpassa sig till de effektiva spänningar och portryck som provet ska skjuvas för. (Wiesel et al, 1985)

Ingångsparametrar till försöken

Det effektiva vertikala förkonsolideringstrycket kan bestämmas genom CRS-försök. Det horisontella förkonsolideringstrycket bestäms vanligen empiriska enligt ekvation (7).

Den effektiva spänningen in-situ bestäms genom att känna till densiteten och portrycket i jorden. Horisontella effektivspänningen in-situ bestäms ofast empiriskt enligt ekvation (8).

Portrycket bör mätas in-situ, men kan också uppskattas om grundvattennivån är känd och hydrostatisk portrycksprofil antas råda för platsen.

Odränerade triaxialförsök

Under odränerade triaxialförsök mäts kontinuerligt portrycksförändringen, axiell spänning samt radiellspänning. Ingen volymändring sker under försöket.

Aktiva försök utförs genom att celltrycket hålls konstant, enligt in-situ spänningar, sedan läggs en ökande axialspänning på provet tills det går till brott. Även kallat kompressionsbrott. (Swedish Standards Institut, 2005)

Passiva försök utförs genom att celltrycket hålls konstant och sedan minskas axialspänningen successivt till dess att brott uppstår. Extensionsbrott. (Swedish Standards Institut, 2005)

Utvärdering & Redovisning

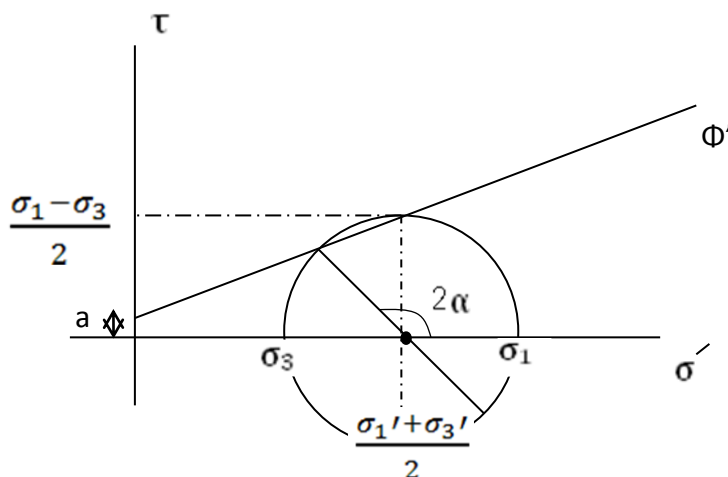
Triaxialförsöken bör enligt Swedish Standards Institut (2005) redovisas i både mohr-coloumb diagram samt i ett $p:\tau$ – diagram.

Spänningsvägen under försöket redovisas i ett Mohr-Coloumbs spänningsdiagram.

Brottlinjen 30° tangerar egentligen inte spänningsskirkeln ovanför cirkelns medelpunkt, men för att slippa rita ut hela cirkeln för varje spänningstillstånd så ritas endast cirkelns topppunkt ut för respektive spänningstillstånd, se Figur 26. Brottlinjen vid cirkelns topppunkt motsvarar en brottlinje med 26° lutning. Om kohesionsinterceptet ska utvärderas ur samma diagram

måste denna korrigeras och utvärderas då som $c' = 1.15a$ på grund av att $\frac{\tan 30}{\tan 26} = 1.15$.

(kompetenscentrum infrastruktur, 2005)



Figur 26. Om toppunkten spänningsskirkeln redovisas, medelspänningen, kan den inre friktions vinkel vid brott utvärderas enligt figuren. (kompetenscentrum infrastruktur, 2005)

Odränerad skjuvhållfasthet

Enligt Swedish Standards Institut (2005) utvärderas skjuvhållfastheten ur konsoliderade triaxialförsök på vattenmättade jordar vid brott eller vid 0.15 rad deformation.

Effektivspänningsparametrar

Effektivspänningsparametrarna ϕ' och c' kan utvärderas ur såväl odränerade som dränerade triaxialförsök. Effektivspänningsparametrarna utvärderas för båda typerna av triaxialförsök för en konstant volym, men för det dränerade försöket så beaktas även effekterna av volymförändring som sker när jorden dilaterar eller kontrakterar. (Larsson & Åhnberg, 2003)

Larsson och Åhnberg (2003) beskrivs triaxialförsök utförda för spänningar under förkonsolideringstrycket för både odränerade och dränerade försök. De såg i deras försök att

kohesionsinterceptet ökade med överkonsolideringsgraden. Vid dränerade försök utvärderades samma eller högre kohesions intercept än ur odränerade försök utförda på motsvarande nivå.

Dekker (2002) förklarar att kohesions interceptet utvärderat ur dränerade försök på överkonsoliderade prov är större än det utvärderat ur odränerade försök på samma typ av jord. I ett dränerat försök är alla spänningar effektiva och i ett odränerat försök kan effektiva parametrar utvärderas om portrycket mäts. Detta ger att för normalkonsoliderade leror där ingen eller mycket liten volymökning väntas utvärderas en friktionsvinkel ur dränerade försök som är lika med den utvärderad ur odränerat försök. För överkonsoliderade leror där en volymökning väntas utvärderas en högre friktionsvinkel från det dränerade försöket än från det odränerade. Detta beror på att det inte bara krävs energi för skjuvmotståndet utan även för volymökningen. I ett odränerat försök tillåts ingen volymökning varför friktionsvinkeln blir lägre i detta försök. Om friktionsvinkeln antas vara 30 grader kan därför högre kohesionsintercept utvärderas från dränerade försök än från odränerade försök.

4. Fältlokal - Sjuntorp

4.1 Allmänt

Sjuntorp är en liten ort i Trollhättans kommun och ligger en dryg mil söder om Trollhättans stad, se Figur 27. Genom Sjuntorp rinner Slumpån, biflöde till Göta älv, vilket länge varit en viktig del i den lilla bruksorten. På 1800-talet var bomullsindustrin stark i Sjuntorp och Slumpån utnyttjades då till att flotta bomull. Detta gjorde att samhället naturligt växte fram runt ån och bostadsområden ligger idag på många håll i Sjuntorp nära de slänkrön som vätter mot ån. Forsen nedströms samhället används numera till elproduktion.

Vattennivåerna i Slumpån kontrolleras idag av de dämningarnivåer som kraftbolaget använder och korrigeras enligt länsstyrelsens vattendom. Kraftbolaget har möjlighet att släppa på vatten till Slumpån från närliggande sjöar ifall vattennivåerna blir för låga. Det är viktigt för stabiliteten i området att vattennivåerna hålls uppe då vattnet i ån fungerar som mothåll för glidytor i skredkänsliga områden.

Den i examensarbetet undersökta slänten ligger vid ett biflöde till Slumpån där högsta och lägsta vattennivåer styrs av ett överfall (dämning) innan den rinner vidare till Slumpån. Den undersökta släntens läge kan ses markerat med blå ring i Figur 27 och markerat som sektion A i Figur 29.



Figur 27. Sjuntorps geografiska läge i kart och satellitbild. (Eniro 2010-12-14) redovisas genom att markeras rött. Den gula markeringen på satellitbilden visar läget av den i examensarbetet undersökta slänten.

Ett tidigare skred sägs ha ägt rum vid sektion A då området fortfarande utnyttjades som betesmark. Uppgiften kommer från en boende i området som på tiden då begav sig upptäckte skredet när han skulle hämta familjens kor som betade i området. Genom okulär bedömningen av slänten kan man skymta att ett skred tidigare ägt rum på platsen då slänten är skålförmad och väldigt brant i detta läge, Figur 28.

Idag finns ett bostadshus med tillhörande friggebod väldigt nära släntkrön i den del av området där slänten har störst lutning.

I en detaljerad undersökning som gjordes år 2008 redovisas säkerhetsfaktor för skred i sektion A enligt kombinerad analys ned mot $F_K = 1.01$ vilket är långt under Skredkommissionens krav för tillfredställande stabilitet.



Figur 28. Vy mot den del av slänten där skredet sägs ha ägt rum. Till höger i bild syns friggeboden och närmast i bild syns portrycks och grundvattenrören som installerades 2009.

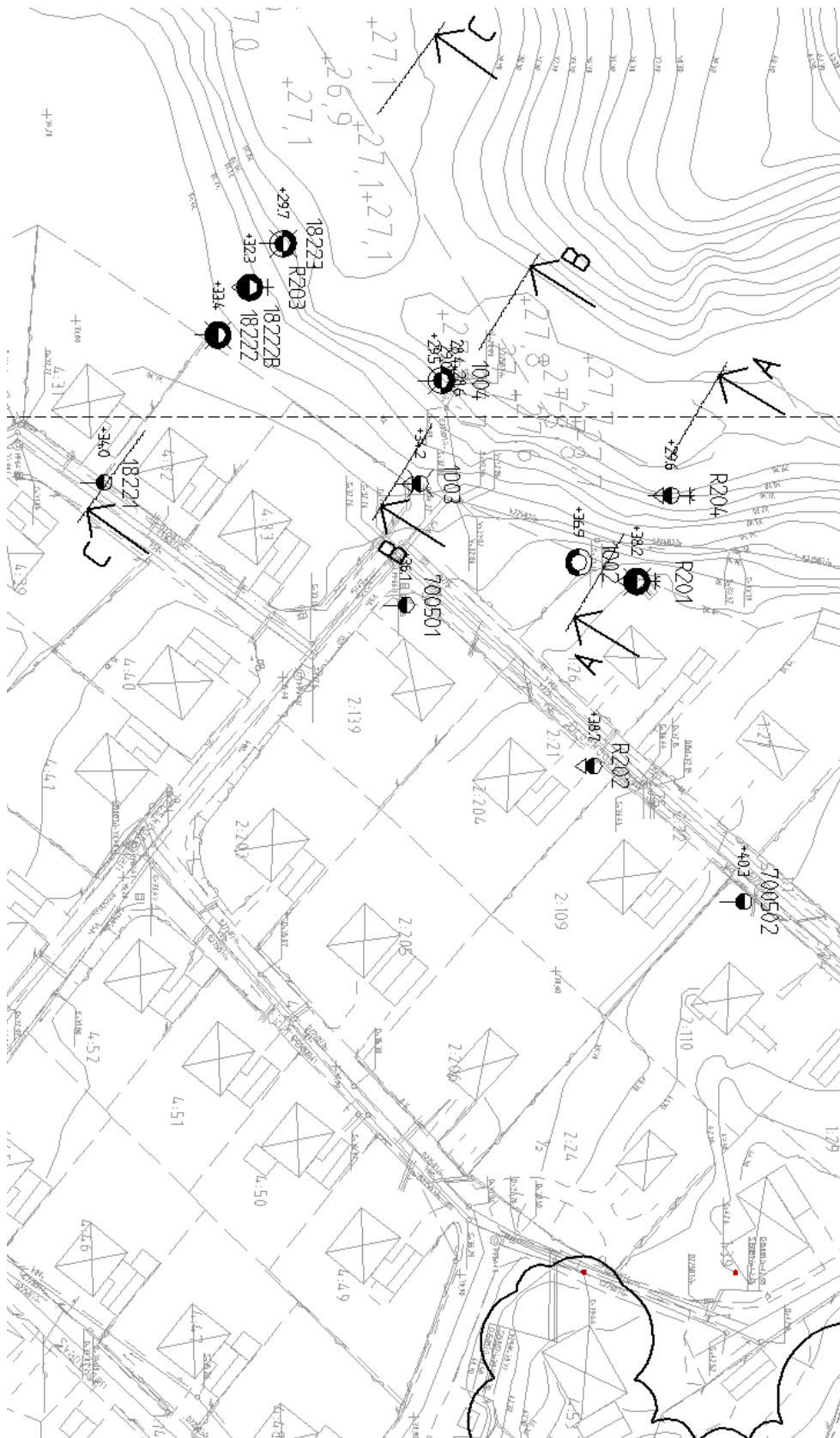
4.2 Geologi och Geotekniska förhållanden

Kvartärgeologin i Sjuntorp består huvudsakligen av glacial- och postglacial lera som överlagrar morän på berg. Högst upp i jordprofilen finns ofta lager med silt och sand som antagligen avlagrats vid isälvsflodernas mynning. Dessa lager har i våra undersökningar visat sig vara mäktigast vid ån för att sedan minska i tjocklek med det vinkelrätta avståndet från ån. Slumpån har antagligen vuxit fram i dessa silt- och sandavlagringar som är förhållandevis lättroderade i förhållande till leran. Leran är något sulfidhaltig och ofta väldigt sensitiv.

Undersökta sektioner vid biflödet redovisas tillsammans med borrhålens läge i Figur 29. Sektion A har inom ramen för examensarbetet valts ut att studeras lite extra. För slänten i sektion A är brant och har en lutning på ca 1:2 med en höjdskillnad från åbotten till släntkrön på ca 11 m. Djupet till fast botten varierar inom sektion A mellan ca 5 m i släntfot till 12 m i släntkrön. Den förmodade lutningen på berggrunden är från nivån ca +25 vid släntfot till ca +43 där berget går i dagen en bit in i bostadsområdet.

Jordlagerföljden består huvudsakligen av lera som överlagrar ett tunt lager av friktionsjord på berg. Jordlagerföljden från markytan under vegetationslagret:

- Den översta delen av jordprofilen består av torrskorpelera med en mäktighet på 0-3 m som ställvis både är mullhaltig och siltig. Torrskorpan är i princip obefintlig vid släntfot som ofta står i kontakt med vatten.
- Under torrskorpeleran finns ett lager av sulfidlera eller sulfidfläckig lera med en mäktighet på ca 4-8 m. I leran förekommer också skikt av skalrester. Vattenkvoten och konflytgränsen, uppmätta vid borrhål R201, varierar mellan ca 20 – 70 % respektive 40-60 %. Sensitiviteten är uppmätt till mellan ca 30-55 vilket innebär att leran är högsensitiv och tappar stora delar av sin hållfasthet vid omrörning.
- Ett tunt lager av friktionsjord/morän överlagrar berggrunden, tjocklek ca 1 m.



Figur 29. Översiktskarta som visar borrhålens läge i plan. I bildens högra hörn visar markeringen var berget går i dagen.

5. Provresultat för fallstudie Sjuntorp

Nedan redovisas utvalda fält- och laboratorieförsök utförda inom ramen för stabilitetsutredningen i Sjuntorp.

5.1 Fältförsök

5.1.1 Grundvatten och portryck

Portrycksmätningar har utförts i Sjuntorp under sommar och höst 2010. Mätningarna har utförts med hjälp av BAT spetsar som installerades i samband med den detaljerade utredningen 2008. BAT-spetsen fylls innan installation med vatten. Väl installerad på önskad nivå ställer trycket i spetsen sig in med omgivande portryck med hjälp av ett filter i spetsen. Med en kanyl som förs ned i röret kan ett membran i BAT spetsen penetreras så att man från markytan med hjälp av en handenhet ett värde på portrycket avläsas. Se Figur 30.

Nedan redovisas portrycksmätningar utförda i sektion A som är utvald för att detaljstuderas i detta examensarbete.

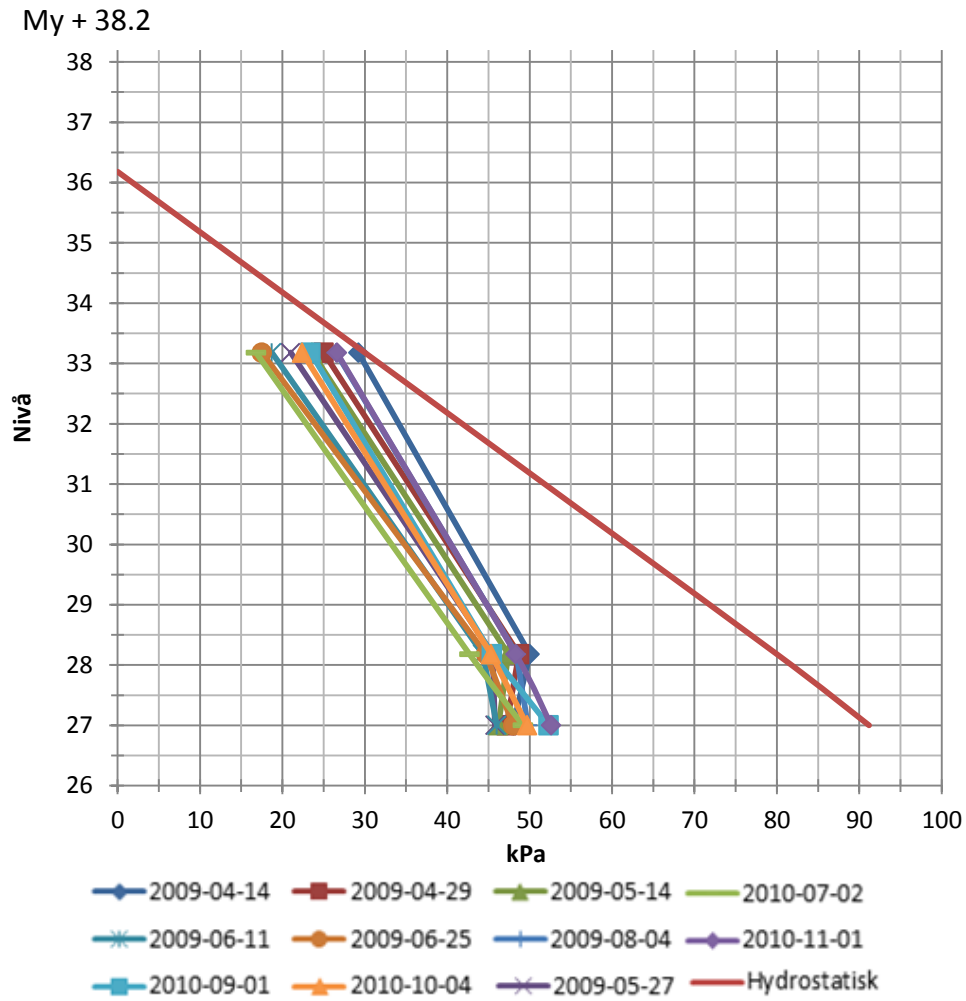
Lerprofilens övre delar i släntkrön visar större fluktuationer än de djupare delarna. Detta stämmer bra överens med de undersökningar utförda av Berntson, 1983, på leror i Göteborgsregionensom visar att grundvattennivån i övre jordprofilen (<4 m) ofta har ett direkt samband med nederbörd och torka och reagerar snabbare på förändringar. Portrycksprofilerna från mätningar i sektionen under perioden 2009-04-14 till 2009-08-04 och perioden 2010-07-02 till 2010-12-07 finns redovisade i Figur 31 och Figur 32. I Figur 33 redovisas hur portrycket varierar över tid i sektion A.

Mätningarna visar att ett hydrodynamiskt tillstånd råder under släntkrönet med nedåtriktad strömning mot det undre friktionslagret. Under slänkfot är trycket artesiskt i friktionslagret vilket under mätperioden har visat sig haft genomslag på nästan hela lerprofilen i slänkfot med tryck större än det hydrostatiska. Under mätperioden har portrycket i slänkfot varit relativt konstant.

Figur 30. Illustativ skiss av en BAT-spets. I figuren kan en kanyl ses föras ned för att punktera membranet och läsa av portrycket. (bat-gms.com, 2011-09-05)

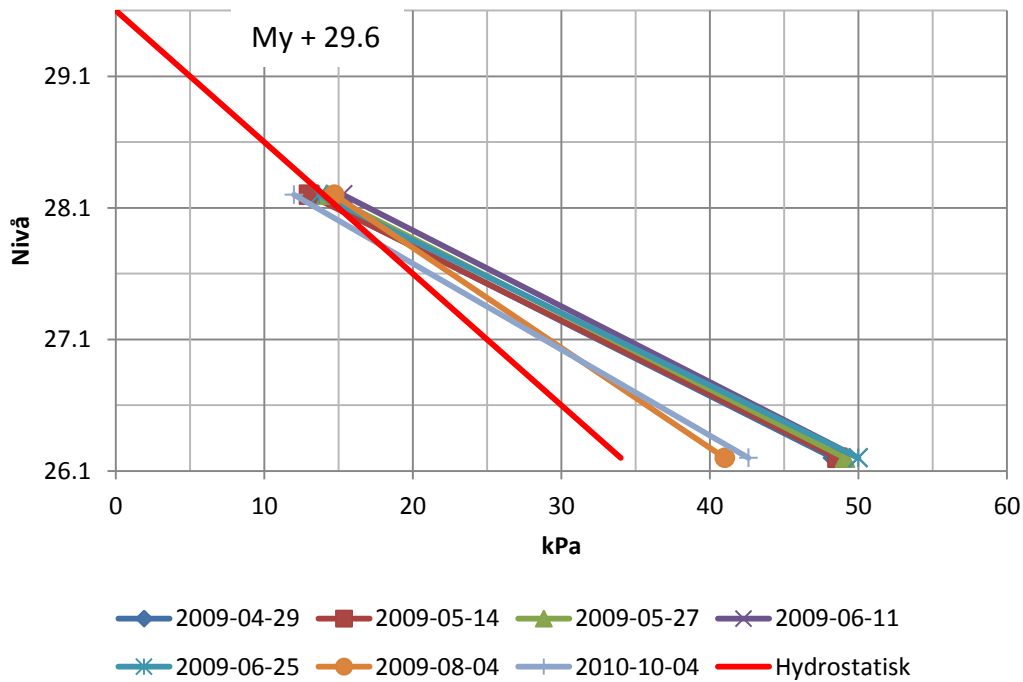


Uppmätt portryck i slänkrön - sektion A



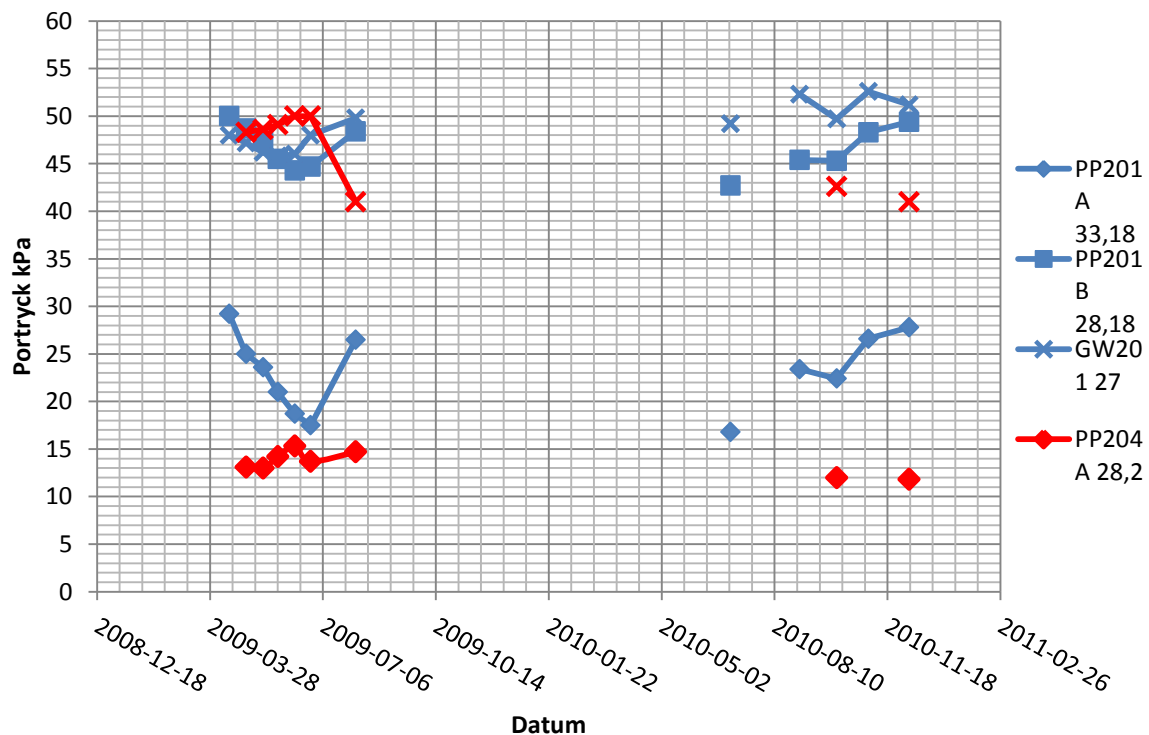
Figur 31. Uppmätta portryck i slänkrön i sektion A vid borrhål R201 på nivåerna + 33, +28 och +27 mellan april 2009 och december 2010. Markytan vid bh R201 är + 38.2.

Uppmått portryck i släntfot - sektion A



Figur 32. Uppmått portryck i släntfot i sektion A i borrhål R204 på nivåerna +28 och +26 mellan april 2009 och december 2010. Markytan vid R204 ligger på + 29.6.

Sektion A tidsvariationer i portryck



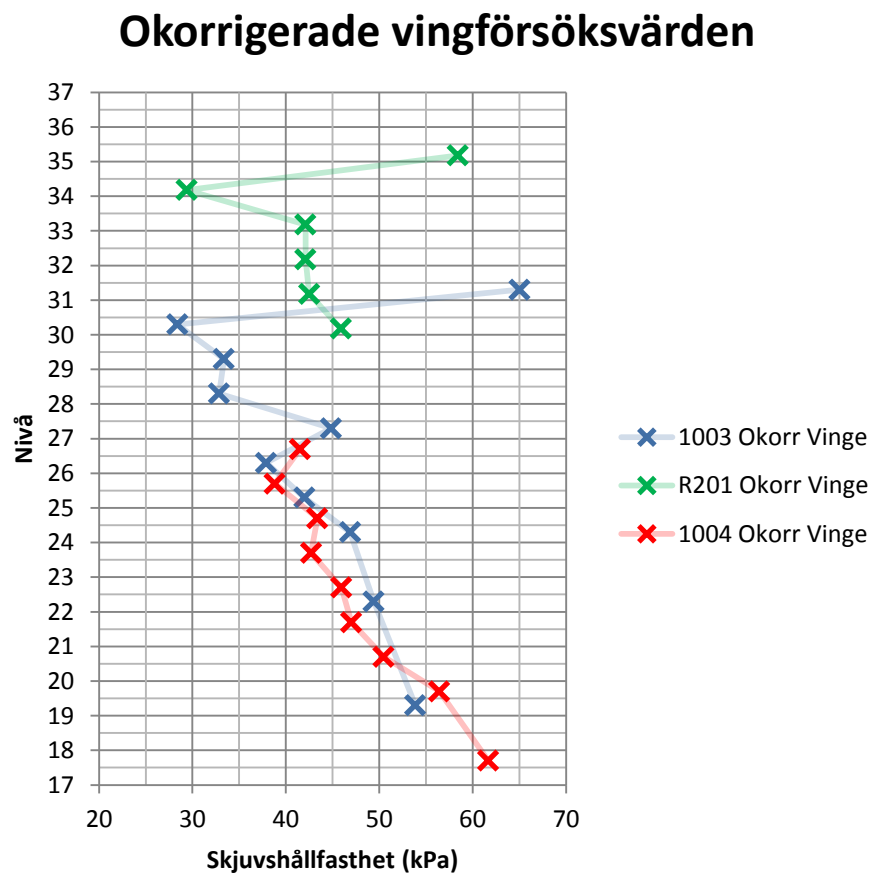
Figur 33. Portryckets variation med tiden i bh R201 och bh R204 i sektion A.

5.1.2 Vingförsök

Uppmätta värden från vingförsöken i borrhål R201, 1003 och 1004 redovisas mot nivå i Figur 34.

Vingförsöken i borrhål R201 utfördes under den detaljerade undersökningen år 2009 och vingförsöken i borrhål 1003 och 1004 under den fördjupade undersökningen år 2010. Deras läge i plan kan ses i Figur 29. Vid försöken har ett normalvingdon använts.

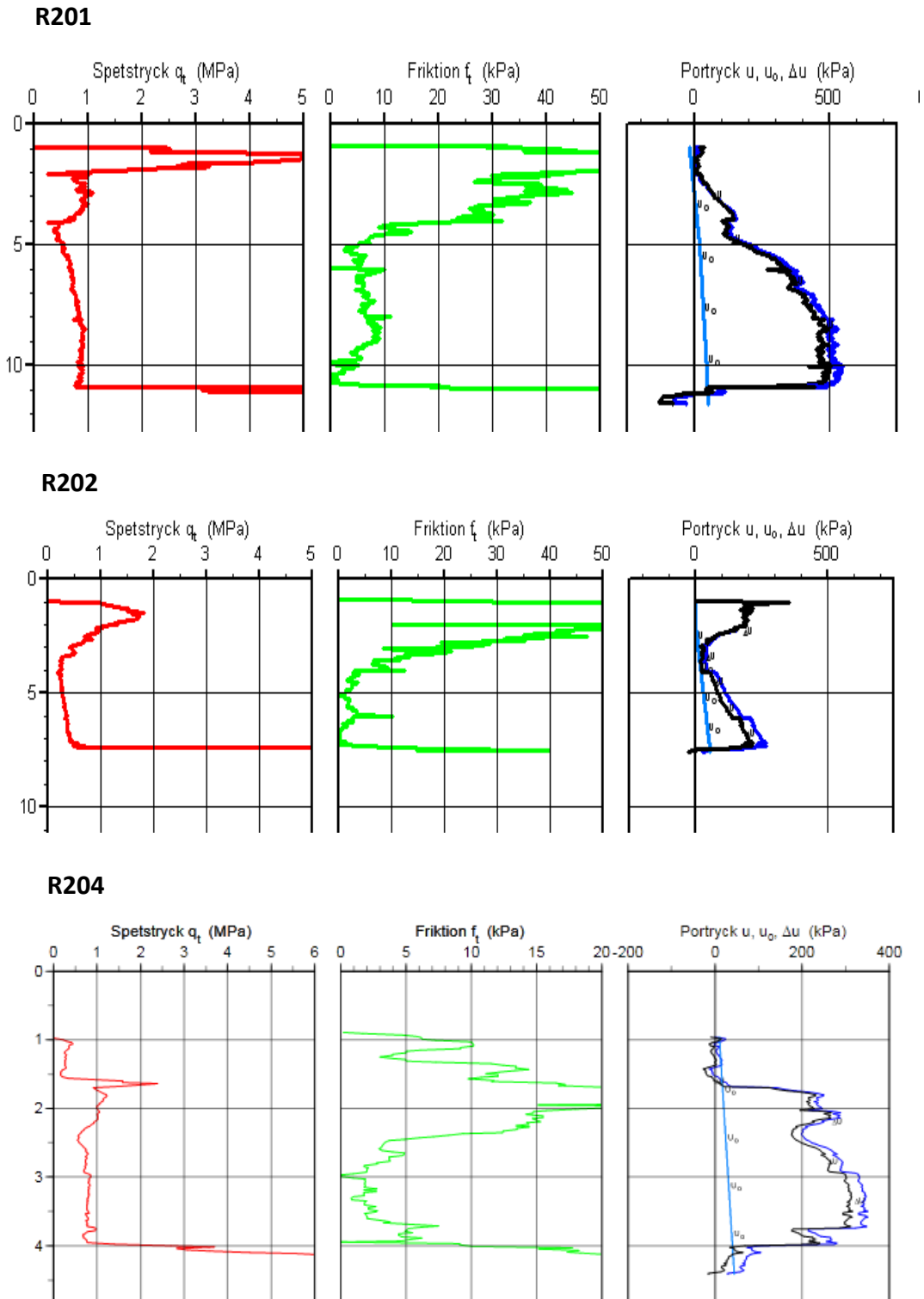
Borrhål R201 och 1003 ligger på slänkrön och borrhål 1004 är i släntfot. De höga värdena i lerans övre del i borrhål R201 och 1003 är uppmätta i torrskorpan.



Figur 34. Uppmätta skjuvhållfasthetsvärden från vingförsök i fält vid borrhål R201, 1003 och 1004. Markytan vid R201 är +38,2, vid 1003 +34,15 och vid 1004 +29,45.

5.1.3 CPT-försök

Uppmätta värden från CPT-sonderingen vid borrhål R201, R202 och R204 kan ses i Figur 35. Mätresultatet har korrigerats i SGI:s programvara CONRAD (2006) med kalibreringsdata för CPT-spetsen samt nollvärden uppmätta före samt efter sonderingen. CPT-sonderingen är utförd enligt klass 3. Sonderingen i borrhål R201, R202 och R204 är utförd under den detaljerade undersökningen år 2009 och har förborrats till ett djup av 1 m under markytan.



Figur 35 Uppmätta värden från CPT-sondering vid borrhål R201, R202, R204 mot djup.

Portrycksmätningen är en bra indikator på hur genomsläppligt materialet är som sonderas. Sonderingarna i R201 och R202 börjar bygga ett konstant ökande porövertryck först efter den siltiga torrskorpeleran genomträngts och den mindre genomsläppliga leran påträffas.

Utvärderade skjuvhållfasthetsvärden med och utan hänsyn till OCR för de utförda CPT-försöken kan ses i Bilaga 1 tillsammans med skjuvhållfasthetsvärden utvärderade från övriga provningsmetoder.

Skjuvhållfasthetsvärdena utvärderade från CPT-försöken sänks om hänsyn tas till OCR. Störst är sänkningen i Släntfot vid bh R204. Där utvärderas empiriskt ett högt förkonsolideringstryck enligt ekvation (23) vilket resulterar i högt OCR och stor reduktion av skjuvhållfasthetsvärdet.

5.1.4 Konsolideringsförhållanden

Konsolideringsförhållandena i sektion A finns redovisade i Figur 36.

Konsolideringsförhållanden är ett samlingsnamn för de spänningar som råder in-situ.

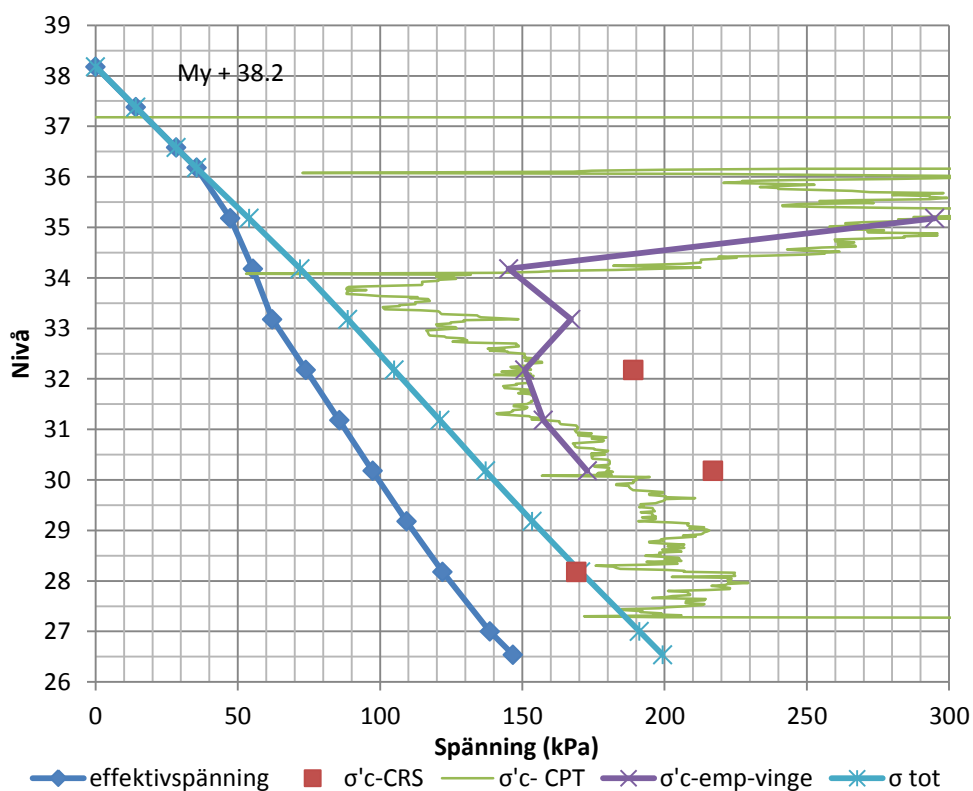
Effektivspänningen har beräknats med hjälp av uppmätt densitet och uppmätt portryck. Redovisade förkonsolideringstryck bygger på värden uppmätta vid CRS-försök eller utvärderade empiriskt från CPT- och vingförsök.

Förkonsolideringstrycket har utvärderas empiriskt ur värden från CPT och vingförsök enligt ekvationerna (24) respektive (17). För den översta delen i lerprofilen visar utvärderade förkonsolideringstryck från CPT och vingförsöken höga värden. De ligger ungefär inom djupet för torrskorpeleran. Nedanför torrskorpan följer de utvärderade samt uppmätta förkonsolideringstrycken en trend att öka mot djupet.

Figur 37 visar konsolideringsförhållandena i vertikal respektive horisontalled för samma sektion. De horisontella spänningarna är framräknade genom de empiriska ekvationerna (4) och (6) som bygger på konflytgränsen samt det vertikala effektiva överlagringstrycket.

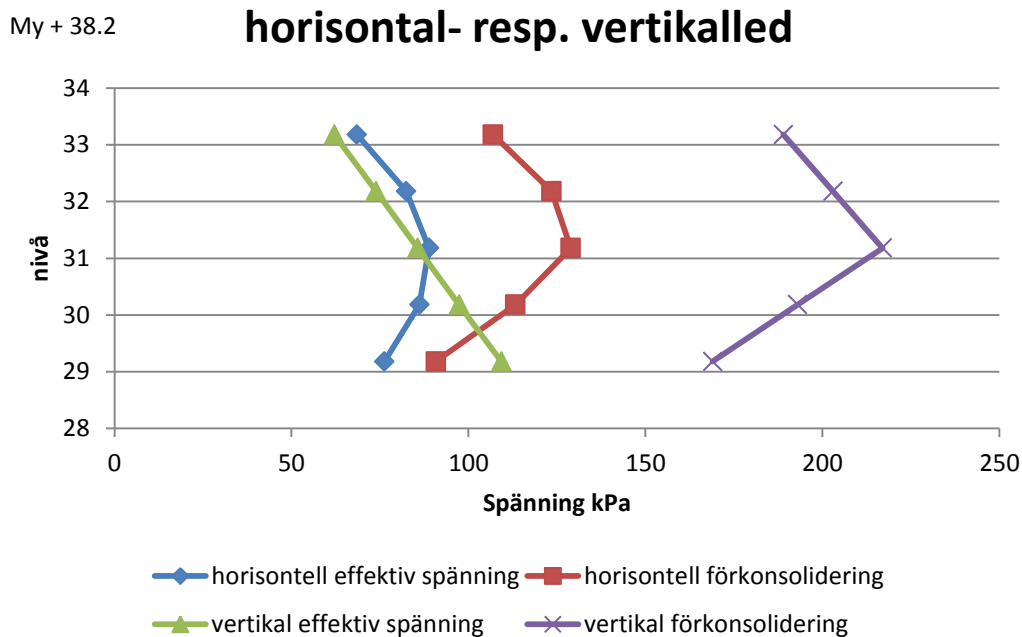
De framräknade horisontella effektiva överlagringstrycket är högre än de vertikala på nivån +31 och uppåt (markytan + 38,2). Under denna nivå är det effektiva vertikala överlagringstrycket högre än det horisontella.

Konsolideringsförhållanden



Figur 36. Konsolideringsförhållanden i beräkningssektionen, sektion A. Uppgifterna kommer huvudsakligen från Bh R201, CRS-försöken är utförda på prover från Bh 1002.

Konsolideringsförhållanden horisontal- resp. vertikalled



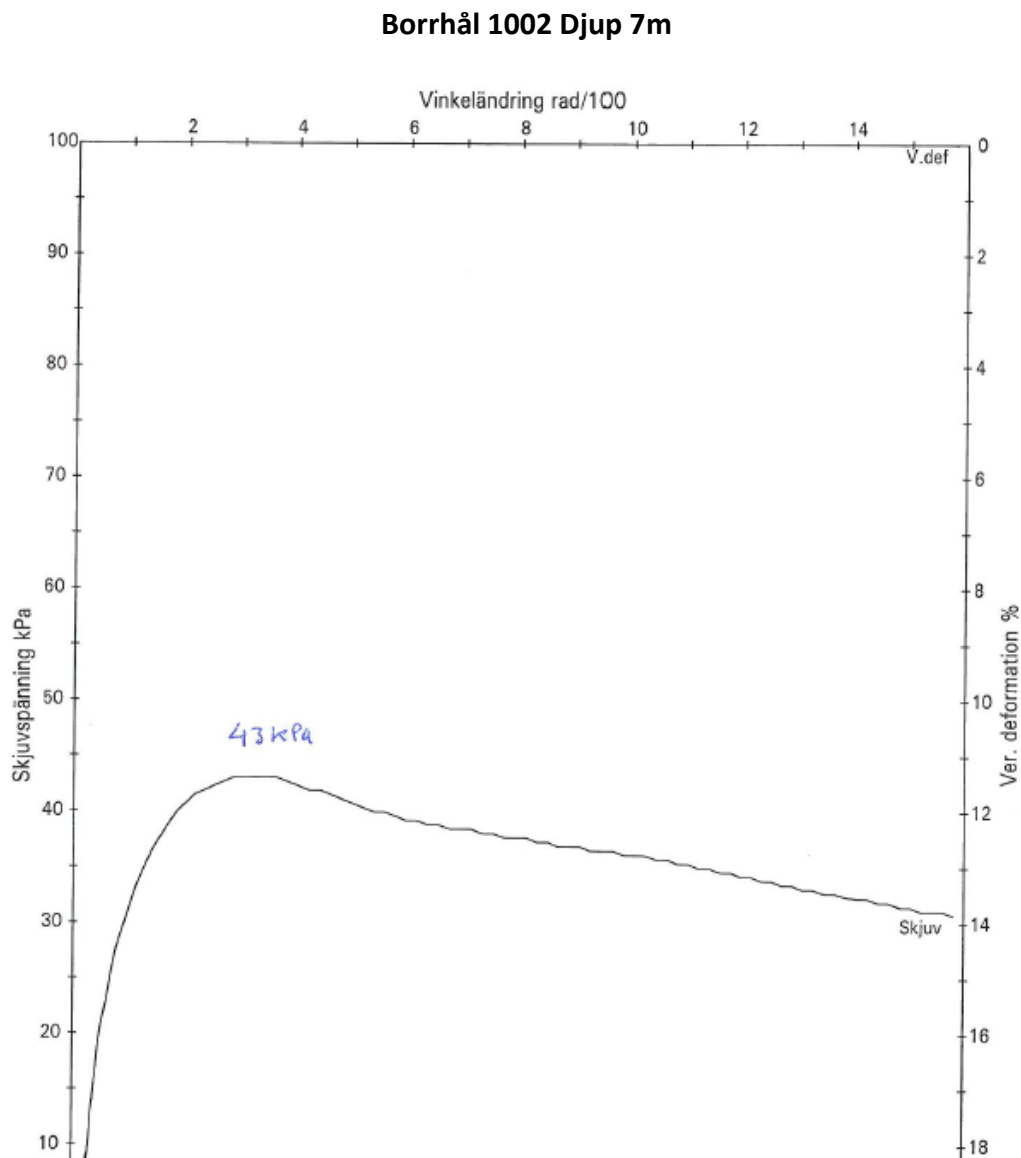
Figur 37. Konsolideringsförhållandena i vertikal respektive horisontalled mellan nivåerna +28 - +34 i sektion A.

5.2 Laborieförsök

5.2.1 Direkta Skjuvförsök

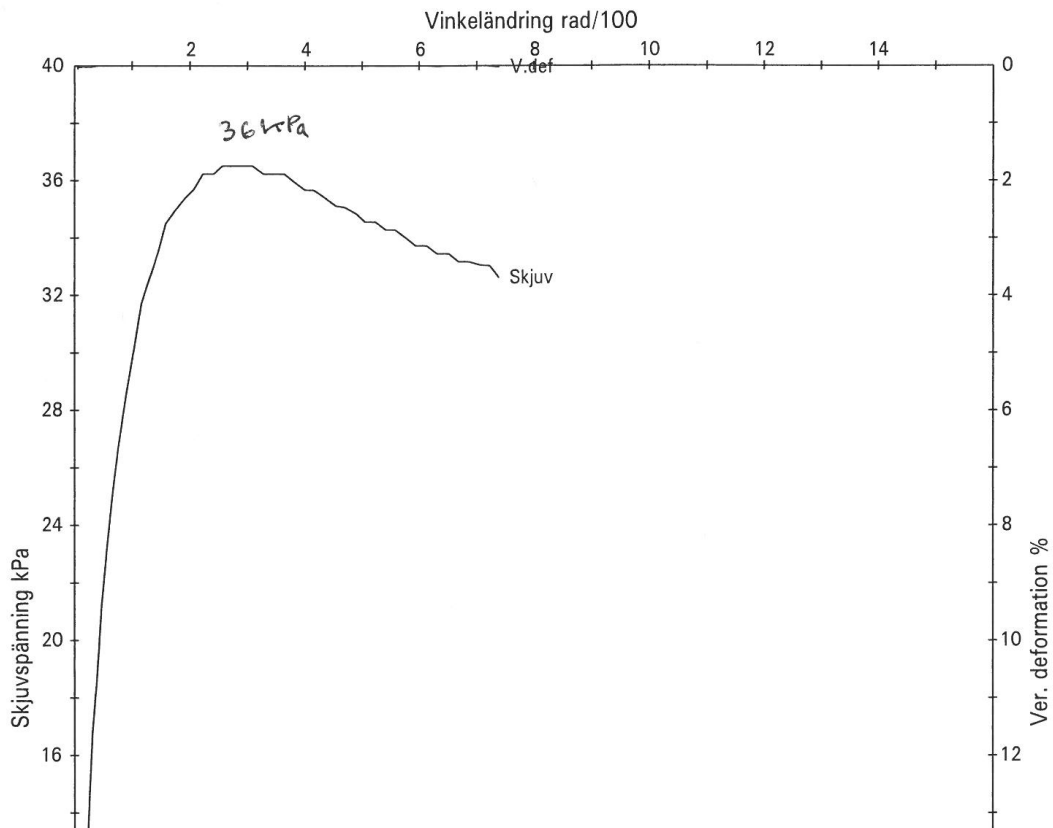
Direkta skjuvförsök utförda på ostörda prover från borrhål 1002 från djupet av 7 och 9 m kan ses i Figur 38 och Figur 39.

Det direkta skjuvförsöket på kolvprov från borrhål 1002 på djupet 7 m uppvisar en maximal skjuvspänning på 43 kPa vid drygt 0.03 rad vinkeländring. Provet har före skjuvning konsoliderats för 85 % av förkonsolideringstrycket 217 kPa och skjuvningen utfördes vid den vertikala effektivspänningen in-situ.



Figur 38. Odränerat direkt skjuvförsök utförd på ostört kolvprov från borrhål 1002 djup 7 m. Skjuvhållfastheten är utvärderad till 43 kPa av SGI jordlaboratorium.

Borrhål 1002 Djup 9m



Figur 39. Odränerat direkt skjuvförsök på kolvprov från borrhål 1002 djup 9 m. Skjuvhållfastheten är utvärderad till 36 kPa av SGI jordlaboratorium.

Det direkta skjuvförsöket på kolvprov från borrhål 1002 på djupet 9 m uppvisar en maximal skjuvspänning på 36 kPa vid ca 0.03 rad vinkeländring. Provet har före skjuvning konsoliderats för 85 % av förkonsolideringstrycket 169 kPa och skjuvningen sker sedan vid den vertikala effektivspänningen in-situ.

5.2.2 Triaxialförsök

Aktiva odränerade triaxialförsök utfördes på ostörda prover upptagna i borrhål 1002 på djupen 5 och 7 m. Proverna konsoliderades anisotropt för 85 % av den vertikala och horisontella förkonsolideringstrycket. Det horisontella förkonsolideringstrycket beräknades enligt ekvation (7).

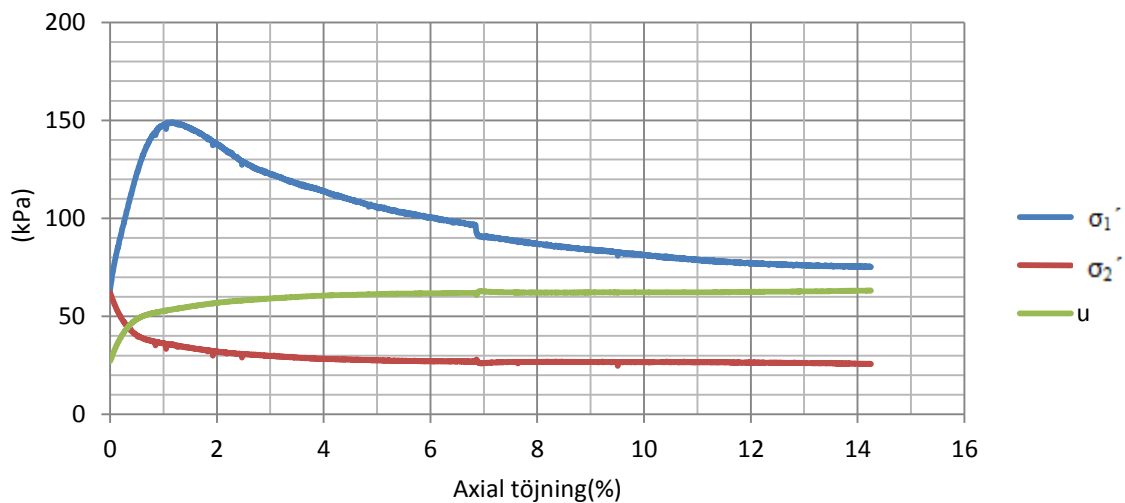
Proverna tilläts sedan svälla och anpassa sig till de beräknade in-situ spänningarna vilka provet sedan initieellt skjuvades under. Den horisontella in-situ spänningen är beräknad enligt ekvation (8). Portrycket sattes initieellt till maximalt uppmätt portryck.

Under skjuvningen ökas den axiella lasten succesivt medan den radiella lasten (celltrycket) hålls konstant. De effektiva huvudspänningarna och portrycket redovisat mot töjningen kan för försöken på prover från 5 m och 7 m djup ses i Figur 40 och Figur 42.

Brottskjuvspänningen för proverna från 5 m och 7 m djup är utvärderade till 56.6 kPa respektive 70 kPa. Skjuvspänningen redovisad mot töjningen kan för de bägge fallen ses i Figur 41 och Figur 43.

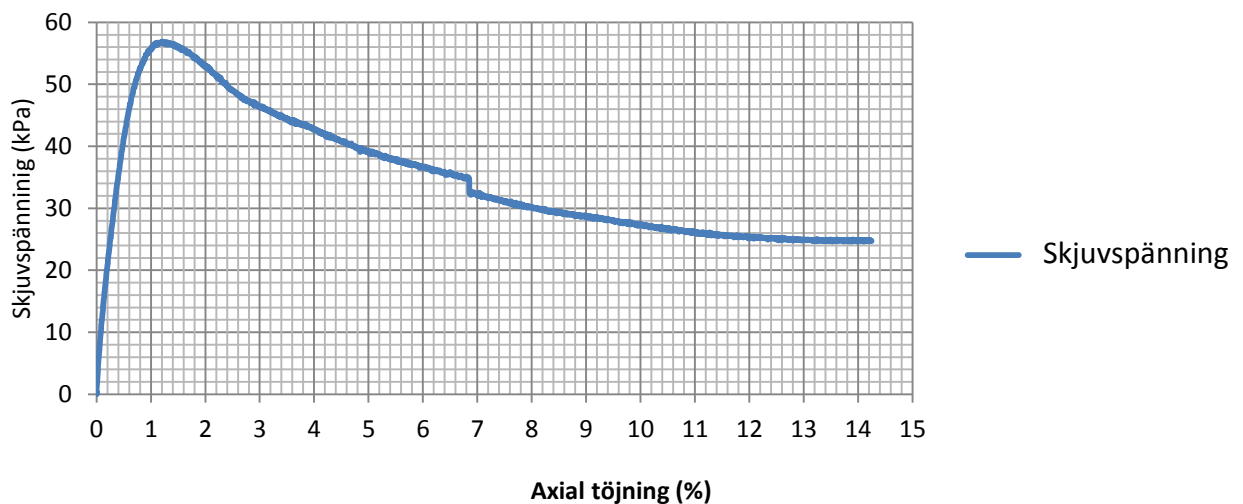
I Figur 44 redovisas de effektiva medelspänningarnas väg för båda försöken. Det effektiva kohasionsinterceptet c' utvärderas i försöken till 12.42 kPa och 9.75 kPa vid antagandet att friktionsvinkel α är 30 grader.

Odränerat aktivt triaxialförsök - Djup 5m Spänning-Töjning



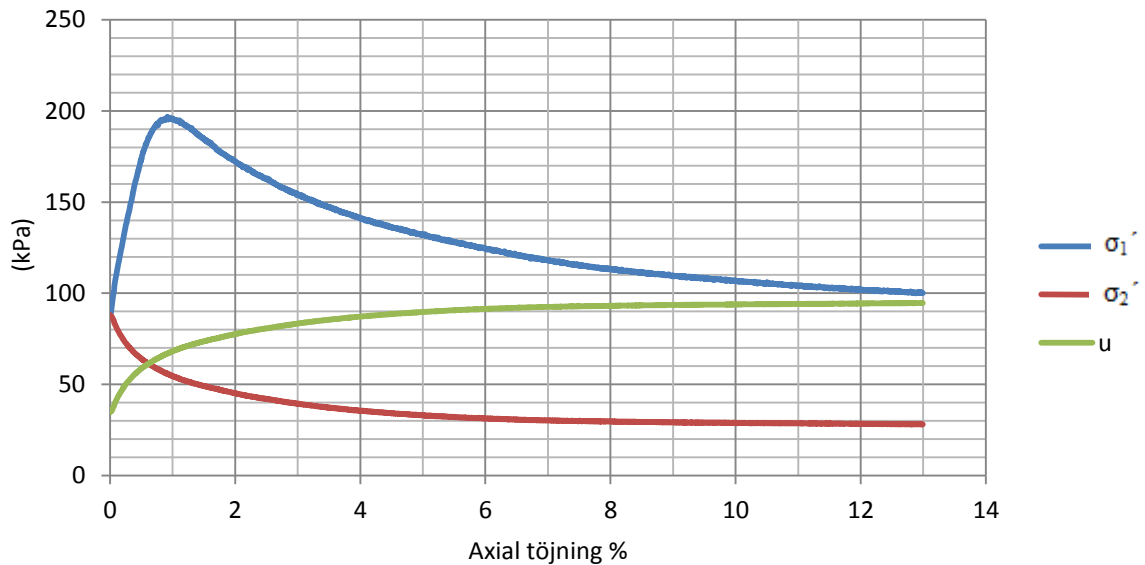
Figur 40. De effektiva huvudspännings- och portrycksförändringen redovisat mot töjningen för triaxialförsöket på provet från 5 m djup, bh 1002.

Odränerat aktivt triaxialförsök - Djup 5 m Skjuvspänning-Töjning



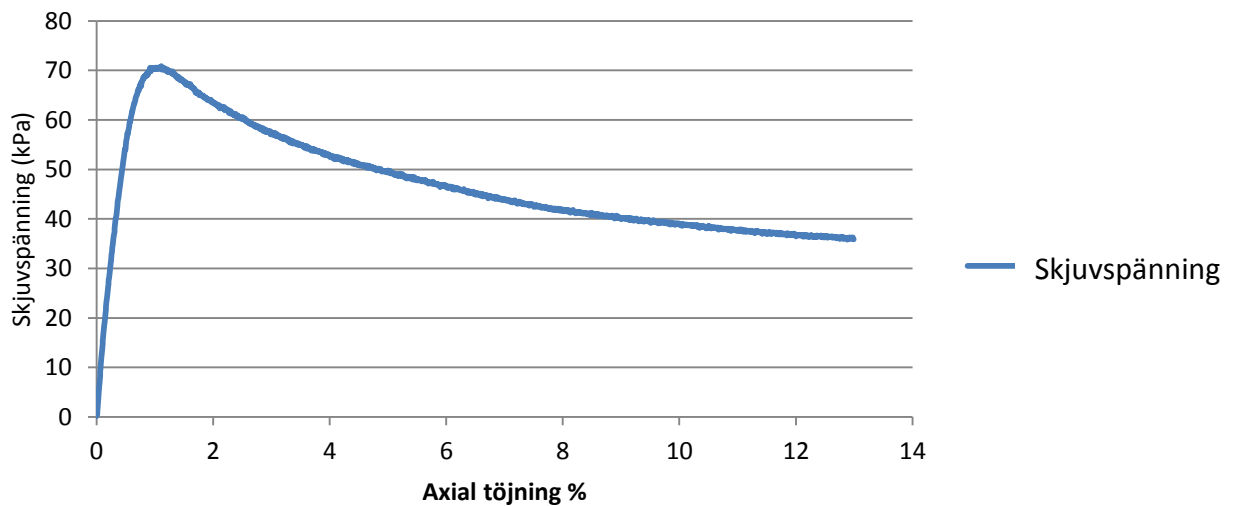
Figur 41. Skjuvspänningen redovisat mot töjningen för aktivt triaxialförsöket på prov från 5 m djup, bh 1002.

Odränerat aktivt triaxialförsök - Djup 7 m Spänning - Töjning



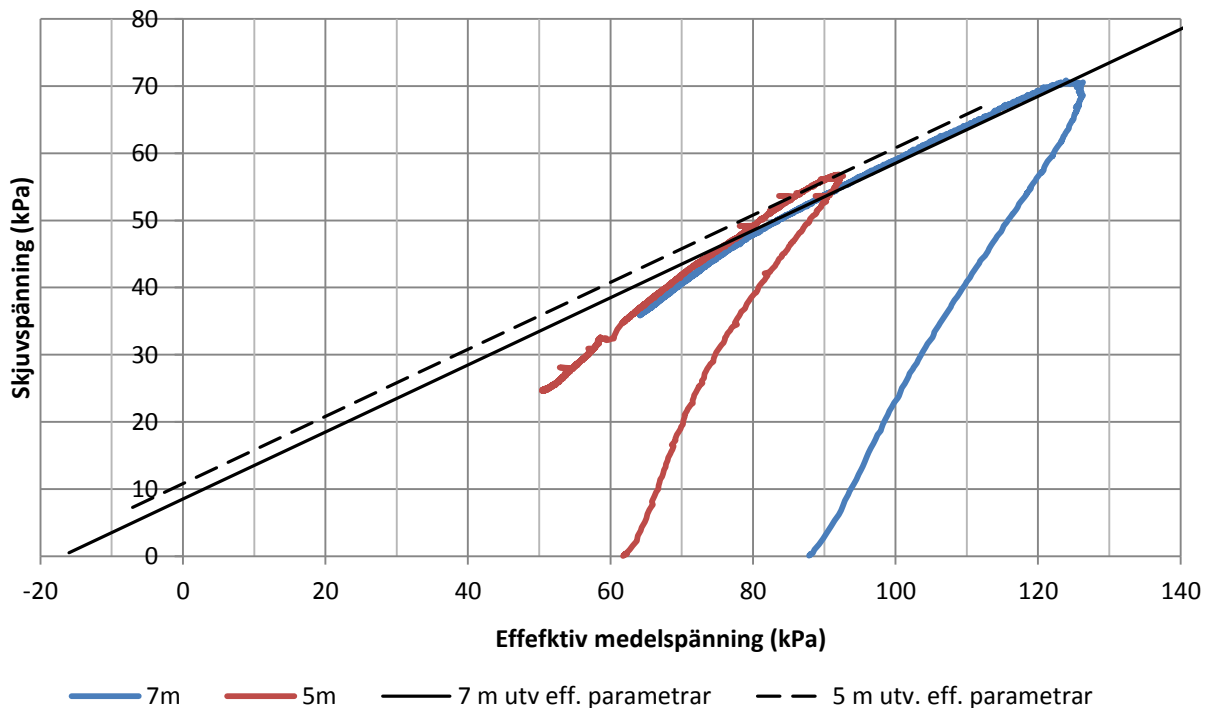
Figur 42. De effektiva huvudspännings- och portrycksförändringen redovisat mot töjningen för triaxialförsöket på provet från 7 m djup, bh 1002

Odränerat aktivt triaxialförsök- Djup 7m Skjuvspänning - Töjning



Figur 43. Skjuvspänningen redovisat mot töjningen för triaxialförsöket på prov från 7 m djup, bh 1002.

Odränerade aktiva triaxialförsök - Djup 5 och 7 m Utvärdering av effektivparametrar



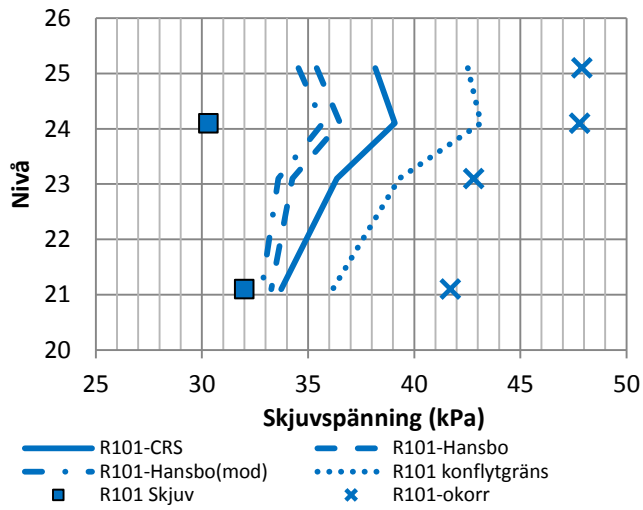
Figur 44. Den effektiva medelspänningsvägen under aktiva triaxialförsök på prover från djup 5 m och 7 m, bh 1002. Den svarta heldragna samt streckade linjen visar hur c' varierar om brottlinjen antas till 30 grader för bägge fallen.

5.3 Utvärdering empiri

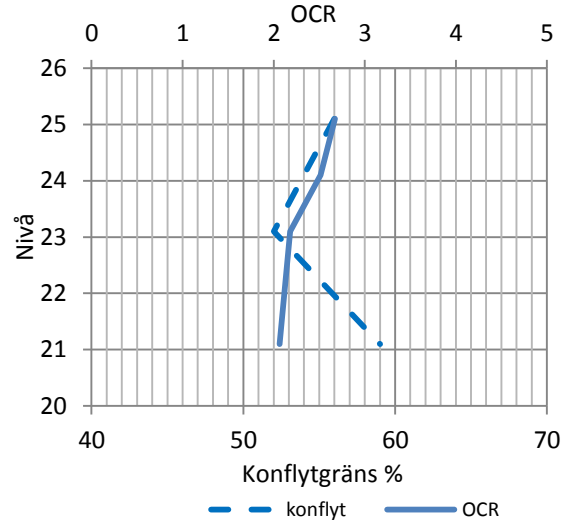
5.3.1 Vingförsök

För att se hur korrigeringen med hänseende till konflytgräns och beräknad OCR baserad utvärderad från CRS-försök, Hansbos-formel eller modifierad hansbos-formel påverkar resultatet från vingförsöken redovisas i Figur 45 korrigerade värden från vingförsök i borrhål R101, R103, R102, R201 och 3003. Gemensamt för dessa borrhål är att CRS-försök har utförts på utvalda nivåer. På de nivåer skjuvförsök har utförts redovisas också dessa i samma diagram. Endast borrhål R201 ligger i sektion A, men alla borrhål finns i Sjuntorp. Alla vingförsök nedan som har korrigerats för OCR har också korrigerats för konflytgränsen.

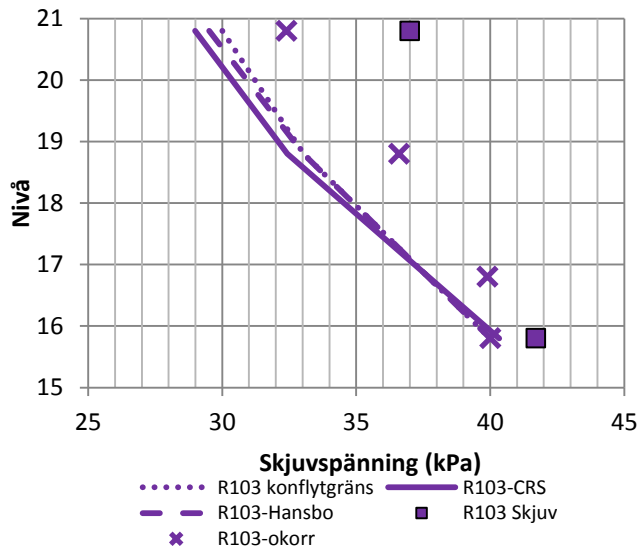
Korrigerade Vingförsök - R101



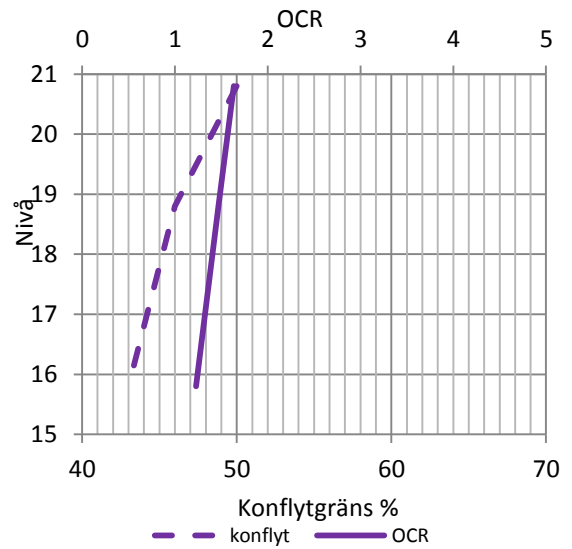
Konflytgräns & OCR - R101



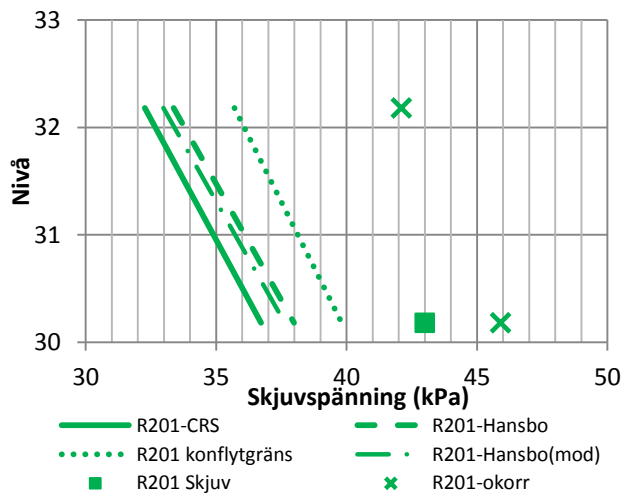
Korrigerade Vingförsök - R103



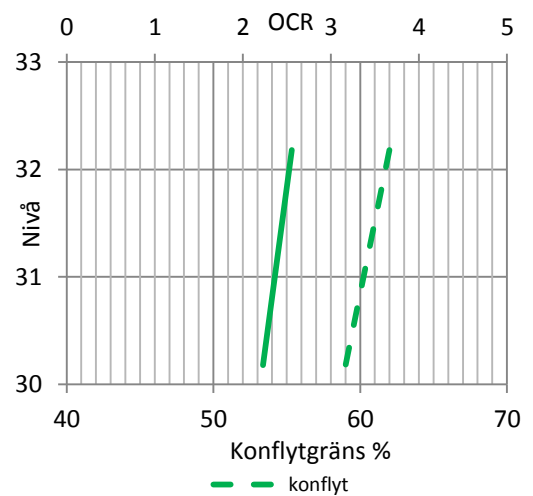
Konflytgräns & OCR - R103

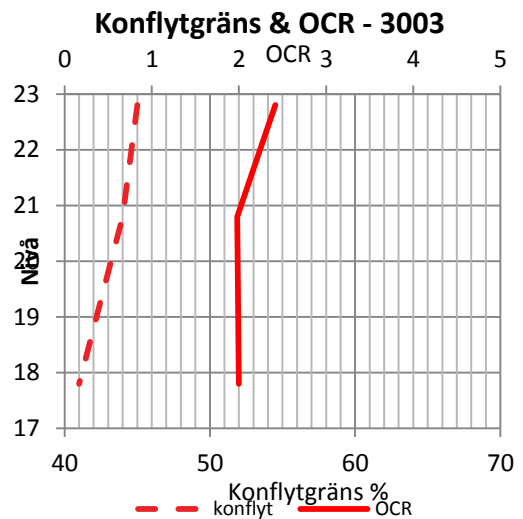
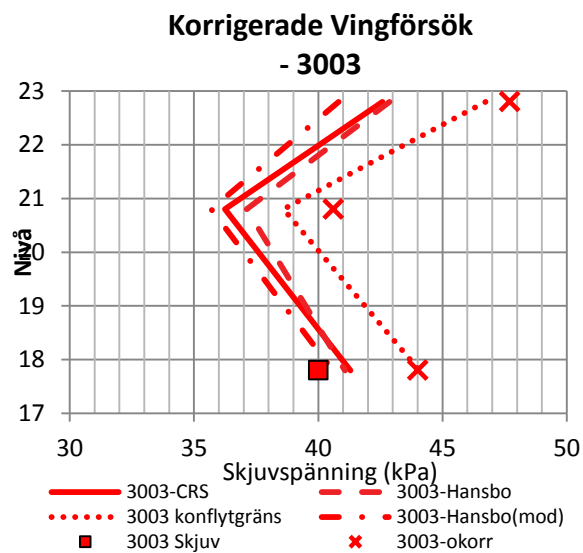
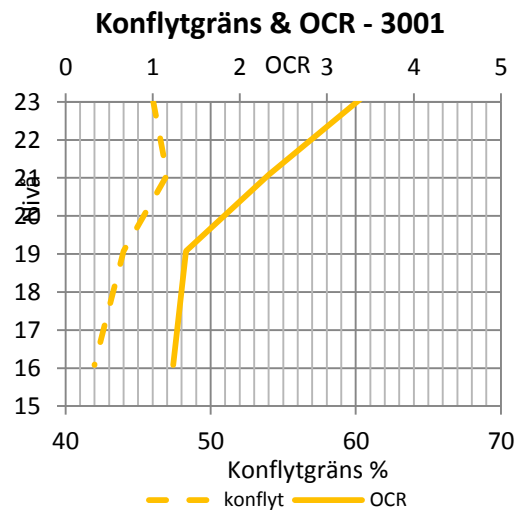
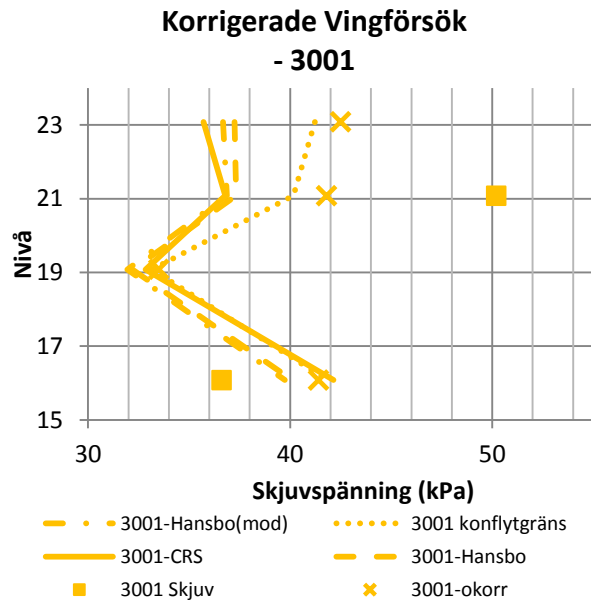


Korrigerade Vingförsök - R201



Konflytgräns & OCR - R201





Figur 45. Korrigerade vingförsök från utvalda borrhål i Sjuntorp. Vingförsöken är korrigerade för konflytgränsen. Vingförsöken redovisas även korrigerade för OCR baserat på CRS-försök samt Hansbos-formel.

Tabell 1. Redovisning av jordmaterialparametrar på de djup där både vingförsök och direkta skjuvförsök utförts.

Bh/djup	σ'_v [kPa]	σ'_h [kPa]	σ'_c [kPa]	St	OCR	w _L [%]	Vinge- okorr [kPa]	Skjuv- försök [kPa]
<u>R101</u>								
5 m	49.8	47.6	125	47	2.5	54	48	30
8 m	69.2	62.8	143	24	2.1	59	42	32
<u>R103</u>								
10 m	97.2	69.2	159	193	1.6	50	32	37
15 m	144.0	87.5	177	215	1.2	43	40	42
<u>R201</u>								
8 m	97.4	92.4	217	55	2.2	59	46	43
<u>3001</u>								
10 m	93.4	78.0	218	241	2.3	47	42	50
15 m	126.8	67.2	157	301	1.2	42	41	37
<u>3003</u>								
13 m	117.5	79.2	223	244	1.9	41	44	40

Följande samband kan utvärderas ur Figur 45 och tabell 1:

Normal- till lätt överkonsoliderad jord ($1.3 < OCR < 2$)

Det vertikala effektivtrycket är större än det horisontella på alla djup där jorden är normal- till lätt överkonsoliderad. Sensitiviteten är i de flesta fall högre och konflytgränsen lägre för den normal- till lätt överkonsoliderade jorden jämfört med den överkonsoliderade.

Skjuvhållfasthetsvärdena från de direkta skjuvförsöken visar huvudsakligen att högre förkonsolideringstryck ger högre utvärderad skjuvhållfasthet. Vingförsöken har huvudsakligen lägre skjuvhållfasthetsvärden än det direkta skjuvförsöket på motsvarande nivåer.

Överkonsoliderad jord ($OCR > 2$)

Den överkonsoliderade jorden finns i de övre delarna av jordprofilen. I de fall det beräknade effektiva horisontaltrycket är i samma storleksordning som det vertikala uppvisar skjuvhållfasthetsvärdet uppmätt med vingförsök en högre hållfasthet än det direkta skjuvförsöket. BH 3001 avviker från övriga försök. Detta kan bero på att leran är mycket siltig här.

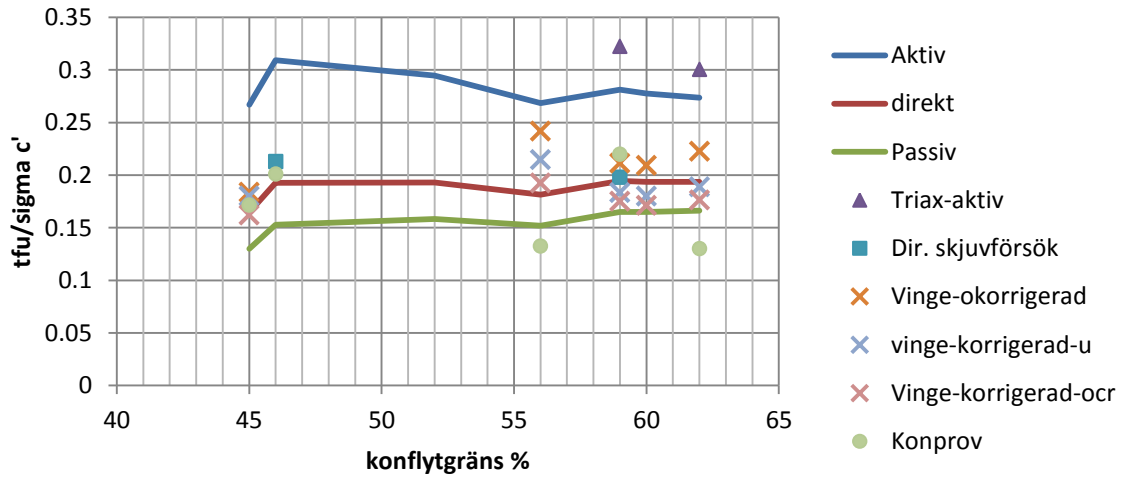
5.3.2 Riktningberoende empiri

Den empiriska jordmodellen som beskrivs i avsnitt 2.7 där a varierar beroende på aktiv, passiv eller direktskjuvzon jämförs här med normaliserade skjuvhållfasthetsvärden från vinge, triaxialförsök och direkta skjuvförsök från borrhål R201 och 1002. Jämförelsen görs för två fall, både med och utan hänsyn till OCR för de empiriska värdena. I

Figur 46 redovisas vingförsöken såväl korrigerade som okorrigerade.

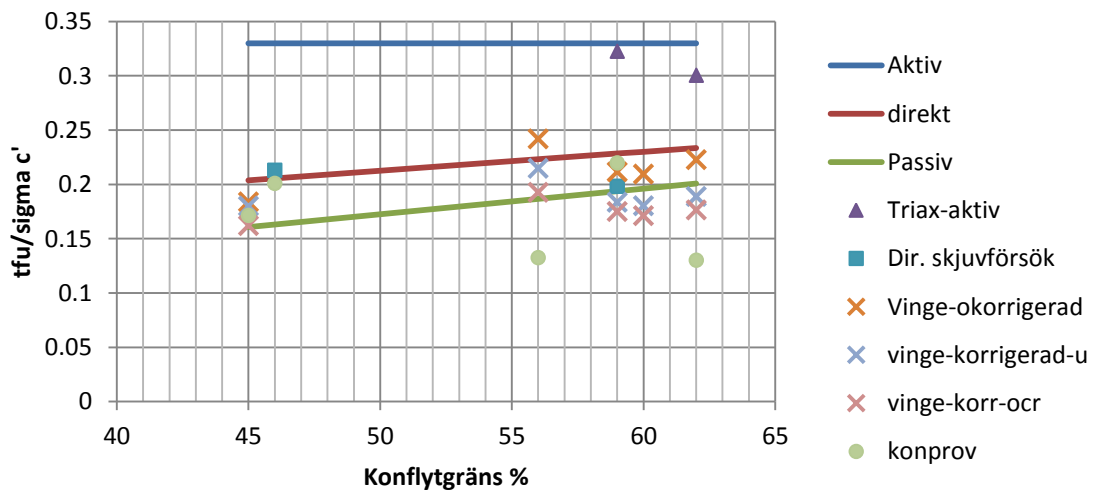
De empiriska skjuvhållfasthetsvärdena bör enligt SGI rapport 3 korrigeras för OCR. I figur 44 a) jämfört med figur 44 b) ses hur normaliserade skjuvhållfasthetsvärden förhåller sig till empirin. Aktiva triaxialförsök visar lägre skjuvhållfasthetsvärden än aktiv empiri utan OCR korrigerad. Samma triaxialförsök visar högre skjuvhållfasthetsvärden än aktiv empiri med OCR korrigerad. Korrigerade skjuvhållfasthetsvärden utvärderade från vingförsöken är huvudsakligen lägre empirin för den direkta skjuvzonen såväl med- som utan OCR-korrigerad.

Empiriska relationer för odränerad skjuvhållfasthet -korrigerad för OCR



Figur 46 a)

Empiriska relationer för odränerad skjuvhållfasthet -ej korrigerad för OCR



Figur 46 b)

Figur 46. Utvärderade skjuvhållfasthetsvärden från triaxialförsöken, direkta skjuvförsöken och vingförsöken i borrhål R201 och 1002 redovisas tillsammans med de empiriskt utvärderade rikttningsberoende skjuvhållfastheterna både utan (a) och med (b) OCR korrigerad.

5.3.3 Kohesionsinterceptet c'

I tabell 2 nedan redovisas kohesionsinterceptet utvärderat ur empiriska formler och från de utförda odränerade aktiva triaxialförsöken.

Tabell 2. Redovisning av hur c' varierar beroende på utvärderingsmetod för bh 1002.

BH 1002	c' (kPa)		
	5 m	7 m	9 m
Utv. Enligt:			
Triax _{utvärderad}	12.42	9.75	-
$0.03 * \sigma_c$	5.67	6.51	5.07
$0.1 * \tau_{fu}$	3.3	4.1	3.6

Resultatet i tabell 2 ovan visar att huvudsakligen utvärderas ett mycket högre c' ur triaxialförsöket jämfört med de empiriska formlerna. För att verifiera att utvärderat kohesionsintercept från triaxialförsöket ska multipliceras med 1.15 (Kompetenscentrum infrastruktur, 2005) jämförs värdet med den som utvärderas där brottlinjen skär Mohr-Coloumbs vid friktionsvinkel 30 °. Jämförelsen nedan är utförd för prov från bh 1002, djup 7 m.

Det effektiva kohesionsinterceptet kan beräknas ur Mohr-Coloumbs spänningscirkel enligt:
 $R = \sigma'_m \sin \phi' + c' \cos \phi'$ (Axelsson, 2006)

Radien R sätts till 70.5 kPa vilket är lika med skjuvspänningens maxvärde och utvärderad skjuvhållfasthet. σ'_m är medelspänningen vid brott. Friktionsvinkeln antas vara 30 °.

c' beräknas då till 9.82 kPa. Vilket är samma som utvärderad c' från triaxialförsöket.

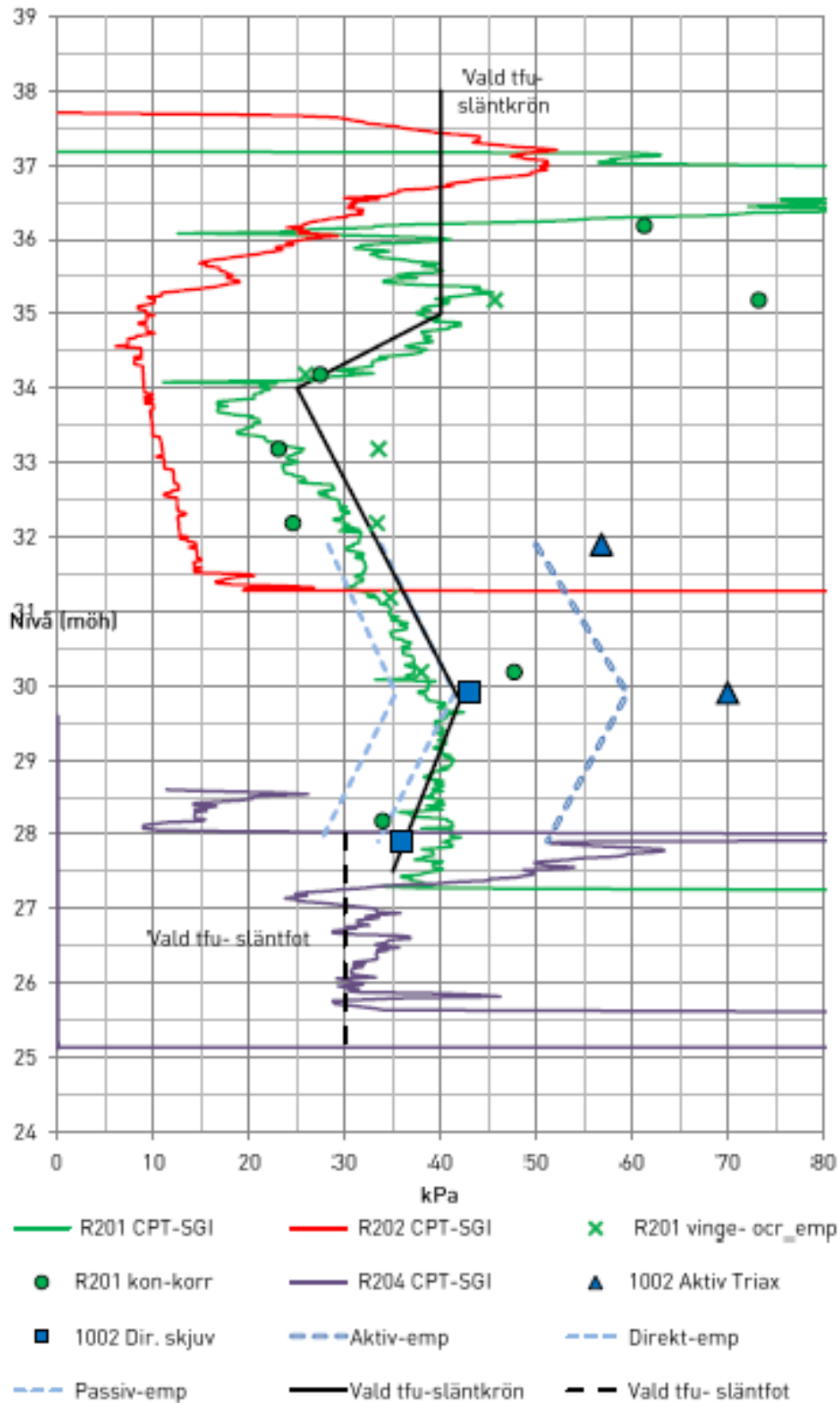
5.4 Vald skjuvhållfasthetsprofil

Korrigerade skjuvhållfasthetsvärden samt vald skjuvhållfasthetsprofil för sektion A motsvarande en fördjupad utredning kan ses i Figur 47. En skjuvhållfasthetsprofil redovisas även utan de avancerade försöken för att motsvara bedömningsunderlaget för en detaljerad utredning, se Figur 48.

Den valda skjuvhållfasthetsprofilen är baserad de försök som återspeglar den direkta skjuvzonen eller medelskjuvspänningen. Beaktande av anisotropin görs direkt i beräkningsprogrammet med hjälp av en faktor som höjer upp den valda skjuvhållfastheten för respektive jordlager. Den aktiva resp. passiva skjuvhållfastheten beräknas sedan av programmet enligt ekvation (9).

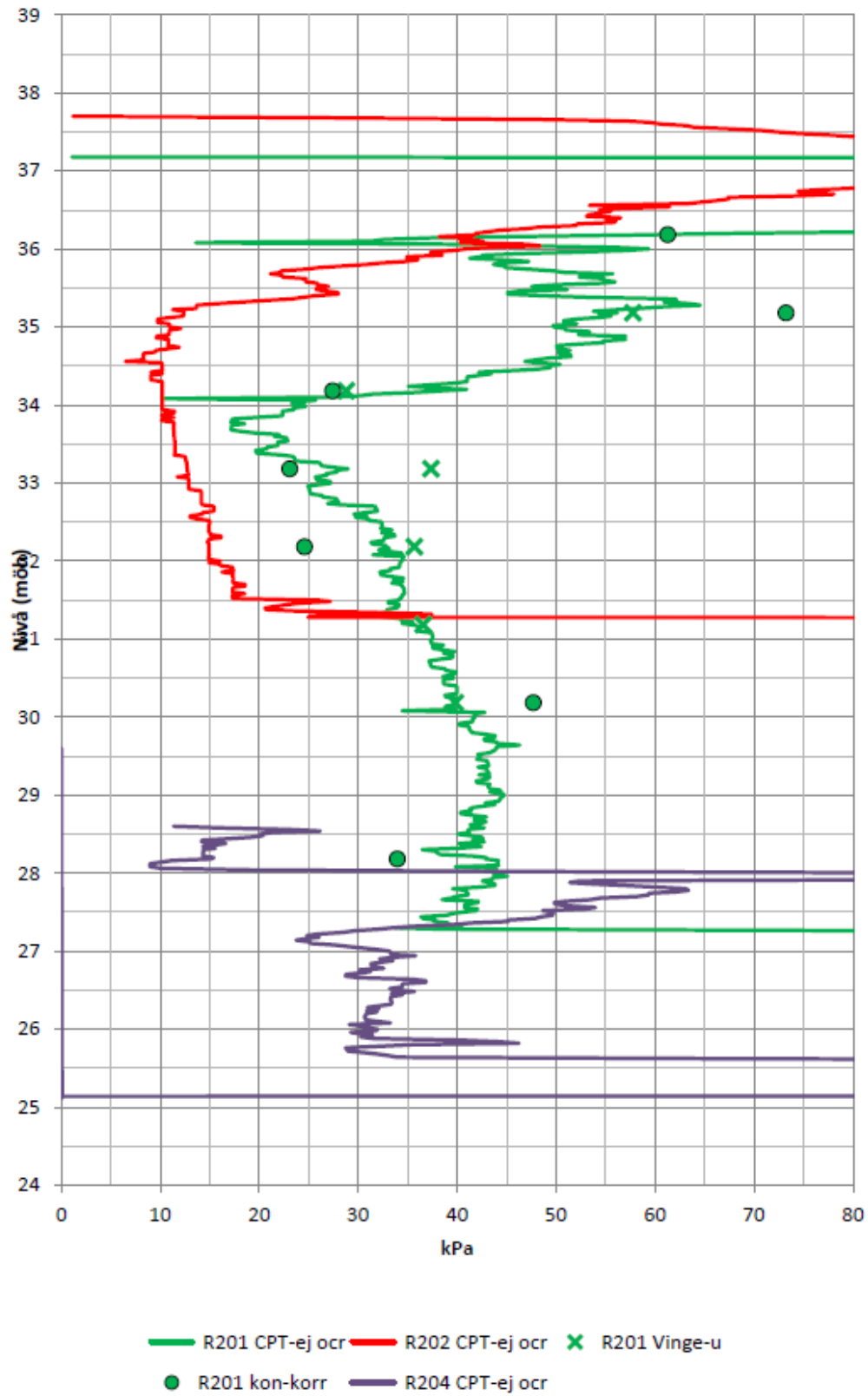
Vald skjuvhållfasthet i släntfot skiljer sig något från utvärderad skjuvhållfasthet från CPT-försöket. Med hjälp av utvärderade skjuvhållfasthetsvärden från närliggande sektion där vingförsök har utförts i släntfot på motsvarande nivå har skjuvhållfasthetsvärden från utfört CPT-försök i släntfot korrigerade för OCR ansetts ge låga skjuvhållfasthetsvärden. Den valda skjuvhållfasthetsprofilen i släntfot har därför valts följa skjuvhållfasthetsvärdena från CPT-försöket ej korrigerat för OCR men inte valts lika högt som vingförsöken i närliggande sektion. Såväl vingförsöken som CPT-försöken som nämns ovan redovisas i Figur 49.

Skjuvhållfasthetsprofil – Fördjupad utredning



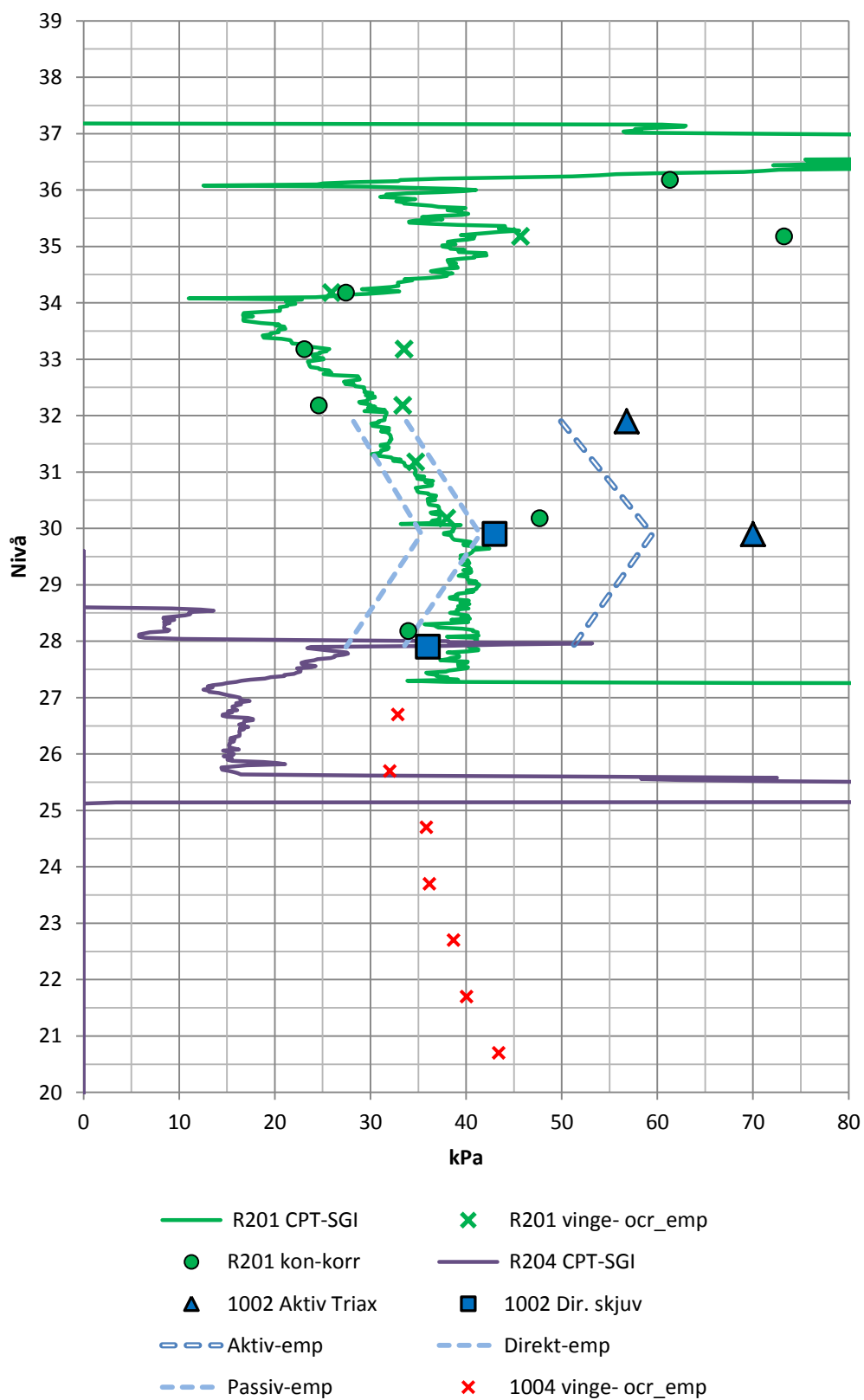
Figur 47. Korrigerad skjuvhållfasthetsvärden och vald skjuvhållfasthetsprofil motsvarande en fördjupad utredning för sektion A.

Skjuvhållfasthetsprofil – Detaljerad utredning



Figur 48. Korrigerad skjuvhållfasthetsvärden (utan beaktade av OCR-korrigerings) motsvarande en detaljerad utredning för sektion A.

Skjuvhållfastheter ocr korr - med bh 1004



Figur 49. Skjuvhållfasthetsvärden fördjupad utredning. Beakta särskilt försöken R204-CPT-SIG och 1004-vinge-ocr_emp som är utförda i släntfot.

6. Beräkning av släntstabilitet

6.1 Beräkningsmetod

Släntstabilitetsberäkningarna i detta examensarbete har utförts med programmet Geosuite stability 5.0 (Vianova, 2009). Den senaste beräkningsmotorn i Geosuite stability 5.0 heter BEAST 2003 och tillämpar en modifierad version av lamellmetoden.

Lamellmetoden bygger på att glidkroppen delas in i ett antal lameller där varje lamell beräknas var för sig enligt kraft - och momentjämvikt. Lamellmetoden klarar av beräkningar där glidyten går igenom olika jordlager med varierande hållfasthetsparametrar.

Beräkningarna i examensarbetet har utförts med cirkulärcylindriska glidytor. Programmet har en självsökande funktion dvs. den letar automatiskt upp, för det specificerade randvillkoret, glidyten med lägst beräknad säkerhetsfaktor. Förenklat kan det uttryckas att beräknad säkerhetsfaktor är skillnaden mellan mothållande och pådrivande krafter.

Beräkningsprogrammet Geosuite stability 5.0 kan ta hänsyn till anisotropieffekter genom att beräkna skjuvhållfastheten i den riktningen som över- eller understiger vinkel 0 förutsatt att användaren ger indata för relationen mellan skjuvhållfastheten i de tre skjuvzonerna enligt:

Aktiv/vanlig

direkt/vanlig

passiv/vanlig

I normalfallet har direkt/vanlig relationen 1/1.

Programmet korrigerar sedan skjuvhållfastheten enligt:

$$\tau(\alpha) = \tau_{\text{direkt}} + (\tau_{\text{aktiv}} - \tau_{\text{direkt}}) \sin(2\alpha) \text{ om } \alpha > 0$$

$$\tau(\alpha) = \tau_{\text{direkt}} - (\tau_{\text{passiv}} - \tau_{\text{direkt}}) \sin(2\alpha) \text{ om } \alpha < 0$$

Kohesionsinterceptet kan i programmet antingen anges som en faktor i procent av vald skjuvhållfasthetsprofil eller som ett karakteristiskt värde för hela det valda jordlagret. Båda metoderna har använts vid beräkningarna.

6.2 Skredkommissionens anvisningar 3:95

Skredkommissionens anvisningar 3:95 (1995) ger riktlinjer för hur undersökningar och utredningar av slänters naturliga stabilitet bör utföras. Skredkommissionen ger följande förslag på detaljeringsnivåer för en släntstabilitetsutredning; översiktlig bedömning, detaljerad utredning, fördjupad utredning och ev. kompletterande utredning. Beroende på markanvändning och skede i utredningen ges förslag på beräknad säkerhetsfaktor som bör uppfyllas för tillfredställande stabilitet, se Figur 50.

Skede	Markanvändning			
	Nyexploatering	Befintlig bebyggelse och anläggning	Annan mark	Naturmark
Geoteknisk besiktning och överslagsberäkning	Minst detaljerad utredning skall utföras	$F_C > 2 +$ $F_{C\phi} > 1,5$	$F_C > 2 +$ $F_{C\phi} > 1,5$	F_C, F_{KOMB} och $F_\phi > 1$ (Under förutsättning att omgivande mark ej påverkas)
Detaljerad utredning	$F_C \geq 1,7 - 1,5 +$ $F_{KOMB} \geq 1,45-1,35$ $F_\phi \geq 1,3$ (sand)	$F_C \geq 1,7 - 1,5 +$ $F_{KOMB} \geq 1,45-1,35$ $F_\phi \geq 1,3$ (sand)	$F_C \geq 1,6 - 1,4 +$ $F_{KOMB} \geq 1,4-1,3$ $F_\phi \geq 1,3$ (sand)	F_C, F_{KOMB} och $F_\phi > 1$ (Under förutsättning att omgivande mark ej påverkas)
Fördjupad utredning (och kompletterande utredning)	$F_C \geq 1,5 - 1,4 +$ $F_{KOMB} \geq 1,35-1,30$ $F_\phi \geq 1,3$ (sand)	$F_C \geq 1,4 - 1,3 +$ $F_{KOMB} \geq 1,30-1,20$ $F_\phi \geq 1,3-1,2$ (sand) Under förutsättning att restriktioner införs.	$F_C \geq 1,3 - 1,2^* +$ $F_{KOMB} \geq 1,2-1,15^*$ $F_\phi \geq 1,2-1,15$ (sand) *) Lägre värden avser befintlig anläggning av mindre betydelse	F_C, F_{KOMB} och $F_\phi > 1$ (Under förutsättning att omgivande mark ej påverkas)

Figur 50. Förslag på säkerhetsfaktorer som bör uppfyllas för att markens stabilitet ska klassas som tillfredställande. (Skredkommissionen, 1995)

Kravet på beräknad tillfredställande säkerhetsfaktor sänks med undersökningens och utredningens detaljeringsgrad. Även om skredkommissionen ger riktlinjer om vad som bör ingå i respektive skede så finns det ändå utrymme att själv välja en detaljeringsgrad som man tycker motsvarar resultatet och undersökningsmängden. (Skredkommissionen, 1995)

Vår utredning för bostadsområdet i Sjuntorp antas motsvara en fördjupad utredning där markanvändningen klassas som befintlig bebyggelse. Beräknade säkerhetsfaktorer för släntstabiliteten bör då vara $F_C > 1,4- 1,3$ och $F_{komb} > 1,3 -1,2$ för att uppfylla kravet om tillfredställande stabilitet. För en detaljerad utredning är motsvarande krav på beräknade säkerhetsfaktorer för släntstabiliteten $F_C > 1,7- 1,5$ och $F_{komb} > 1,45 -1,35$.

6.3 Utförda släntstabilitetsberäkningar

Utförda släntstabilitetsberäkningar kan ses i bilaga 1:1-1:8. Dessa redovisar för varje antagande den beräknade säkerhetsfaktorn för både odränerad och kombinerad analys. Beräknade säkerhetsfaktorer redovisas även i tabell 3. Beräkningarna har utförts med högsta uppmätta portryck. Ingen fri vattenyta antas finnas i släntfot. Den beräknade slänten kan ses i Figur 29 markerad med sektion A.

Tabell 3. Beräknade säkerhetsfaktorer för släntstabiliteten för sektion A i Sjuntorp.

Analys	Säkerhetsfaktor odränerad analys	Säkerhetsfaktor kombinerad analys	Bilaga
<u>Detaljerad utredning</u>			
Tidigare utredning utförd 2009	1.29	1.01	
Utan OCR korr – inga skjutförsök	1.39	0.99	1
Med OCR korr - inga skjutförsök	1.06	0.91	2
<u>Fördjupad utredning</u>			
Utan anisotropi – ($c' = 10\%$ av τ_{fu})	1.34	0.99	3
Med anisotropi – ($c' = 10\%$ av τ_{fu})	1.44	0.99	4
Med anisotropi – ($c' = 0.03 * \sigma'_c$)	1.44	1.12	5
Med anisotropi – ($c' =$ utvärd. triax)	1.44	1.16	6
Med anisotropi – ($c' = 0$)	1.44	0.80	7
Med anisotropi – ($c' =$ Vald c')	1.44	1.07	8

Den beräknade säkerhetsfaktorn för odränerad analys ökar från den detaljerade utredningen utförd 2009 med $F_c = 1.29$ till den fördjupade utredningen med $F_c = 1.44$ om hänsyn tas till anisotropin i leran. Den beräknade säkerhetsfaktorn för kombinerad analys höjs något från den detaljerade utredningen till den fördjupade utredningen när ett högre c' utvärderas. Höjningen är från $F_{komb} = 1.01$ till $F_{komb} = 1.07$.

För den odränerade analysen finns två parametrar som påverkar den beräknade säkerhetsfaktorn mycket, OCR korrigerings och beaktande av anisotropi. Om inga hänsyn tas till kvalitativa laboratorieförsök (direkta skjutförsök och triaxialförsök) och skjuvhållfastheten utvärderas utan att korrigeras för OCR beräknas säkerhetsfaktorn $F_c = 1.39$. Om samma värden korrigeras för OCR beräknas säkerhetsfaktorn till $F_c = 1.06$. För en överkonsoliderad lera har OCR korrigeringen stor betydelse för den beräknade odränerade säkerhetsfaktorn om inte dessa kan verifieras med avancerade försök (direkta skjutförsök eller triaxialförsök)

Om anisotropi beaktas ökas den beräknade säkerhetsfaktorn för odränerad analys från $F_c = 1.34$ (utan anisotropi) till $F_c = 1.44$.

För den kombinerade analysen har utvärderingen av kohesionsinterceptet c' stor betydelse om friktionsvinkeln antas till 30 grader. Kohesionsinterceptet som används i beräkningarna har antingen utvärderats som 10 % av τ_{fu} , $0.03 \sigma'_c$ eller ur den effektiva spänningsvägen från

triaxialförsöket. Den beräknade säkerhetsfaktorn för kombinerad analys går från $F_{\text{komb}} = 0.99$ för $c' = 10\%$ av τ_{fu} , $F_{\text{komb}} = 1.12$ för $c' = 0.03 \sigma_c'$ eller till $F_{\text{komb}} = 1.16$ för c' utvärderad från triaxial försöket. Om kohesionsintercept ansätts till 0 beräknas säkerhetsfaktorn för kombinerad analys till $F_{\text{komb}} = 0.80$.

Den valda beräknade säkerhetsfaktorn för odränerad analys är $F_c = 1.44$ och för kombinerad analys $F_{\text{komb}} = 1.07$. För den odränerade analysen har inte empirin för aktiv skjuvzon överskridits. För den kombinerade analysen har empirin för $c' = 0.03 \sigma_c'$ använts för de delar där CRS-försök har utförts, för övriga jordlager har c' satts till 10 % av τ_{fu} .

6.4 Beräknad förstärkningsåtgärd

Förstärkningsåtgärd har översiktlig beräknats för tre typer av utredningar; detaljerad, fördjupad med $c' = 10\%$ av τ_{fu} och fördjupad där $c' = 0.03 \sigma_c$. Släntstabilitetsberäkningarna med förstärkningsåtgärderna kan ses i bilaga 3:1-3:3. Förstärkningsåtgärden i mängd fyllning på en sträcka av 100 m som krävs för att uppfylla kravet för respektive detaljningsnivå uppgår till ca 4500 m³ för detaljerad utredning, ca 2800 m³ för fördjupad utredning $c' = 10\%$ av τ_{fu} och ca 1800 m³ för fördjupad utredning där $c' = 0.03 \sigma_c$.

Förstärkning:

Detaljerad undersökning utan OCR-korrigerig: 45,6 m³/m

Fördjupad utredning med triax: 17,7 m³/m:

Fördjupad utredning utan triax: 28 m³/m:

7. Diskussion

Nedan diskuteras utförande och utvärdering av utförda försök, valet av odränerad och dränerad skjuvhållfasthet samt hur det påverkar beräknad säkerhetsfaktor och beräknad förstärkningsåtgärd.

7.1 Provningsmetoder

7.1.1 Fallkonförsöket

Fallkonförsök är känslig som metod då ett flertal faktorer kan påverka hållfasthetsvärdet. Provets störningsgrad efter upptagning, hantering och lagringstid är faktorer som kan påverka försöket. Vid upptagning ur jorden sker alltid en avlastning av provet. Denna avlastning kompenseras det inte för i fallkonförsöket varför detta kan ge stora felaktigheter för prover från stora djup.

Resultatet från försöket påverkas även av om konen släpps från felaktig höjd, avläsning inte sker tillräckligt snabbt och omrörning inte utförts korrekt. Fallkonförsöken ges mycket liten vikt i bestämningen av vald skjuvhållfasthetsprofil.

7.1.2 Vingförsök

Vingförsöken har, utom för ett fall, uppvisat högre okorrigerade skjuvhållfasthetsvärden än de direkta skjuvförsöken i överkonsoliderade leror. En förklaring till detta kan vara att de horisontella spänningarna i jorden är relativt höga i överkonsoliderade jordar. Höga horisontella spänningar har i tidigare studier visat sig ge höga värden för vingförsöken. De horisontella spänningarna är i denna studie beräknade utifrån empiriska formler och de verkliga horisontella spänningarna har inte bekräftats genom försök.

Vingförsöken från flera olika lägen i Sjuntorp har jämförts med varandra och med odränerade direkta skjuvförsök. På vissa av dessa platser är leran siltig och de empiriska sambanden kan vara ogiltiga.

Redan vid justeringen för konflytgränsen hamnar skjuvhållfasthetsvärdet från vingförsöket i flera fall under värdet det direkta skjuvförsöket. Korrigeringen för OCR sänker ytterligare skjuvhållfasthetsvärdet och blir därför alldeles för lågt om syftet är jämföra det med det direkta skjuvförsöket. I de fall konflytgränsjusteringen ej gör att vingförsöket understiger det direkta skjuvförsöket är korrigeringen för OCR lämplig.

7.1.3 CPT-försök

CPT-försöken utförda i Sjuntorps samhälle har visat sig att ofta ligga något lägre än utvärderad skjuvhållfasthet från övriga provningsmetoder. Skjuvhållfasthetsvärdena utvärderade från CPT sänks om hänsyn tas till OCR. Störst är sänkningen i Släntfot vid bh R204. Där utvärderas empiriskt ett högt förkonsolideringstryck enligt ekvation (23) vilket resulterar i högt OCR och stora reduktion av skjuvhållfasthetsvärdet.

Skjuvhållfastheten som utvärderas från CPT-sonderingarna korrigeras med hänsyn till överkonsolideringsgraden samt konflytgränsen. I Conrad, programvara från SIG som används för att utvärdera CPT-försök, utvärderas förkonsolideringstrycket empiriskt genom ekvation

(24) och används sedan för att bestämma OCR. OCR-korrigeringen utförs automatiskt i CONRAD om konflytgränser matas in i programmet. Det finns ingen möjlighet att själv ansätta ett värde för förkonsolideringstryck uppmätt från tex CRS-försök. Den empiriska ekvation (24) som nämnts har i studier visat ha en felmarginal med +-30% gentemot CRS-försöket. Det finns dock möjlighet att själv ansätta konstanterna som används i ekvation (24) vid beräkningen utav förkonsolideringstrycket från CPT-försöken. Denna metod är krånglig, kräver att referensvärde finns från tex CRS-försök och fungerar endast om förkonsolideringstrycket är systematiskt högre eller lägre än eftersökt värde.

I huvuddelen av borrhålen där korrigerad skjuvhållfasthet från CPT-sonderingarna legat lägre än övriga provningsmetoder har dock inte OCR-korrigeringen varit större än för t.ex. vingförsöken, utom i bh R204.

7.1.4 Direkta Skjuvförsök

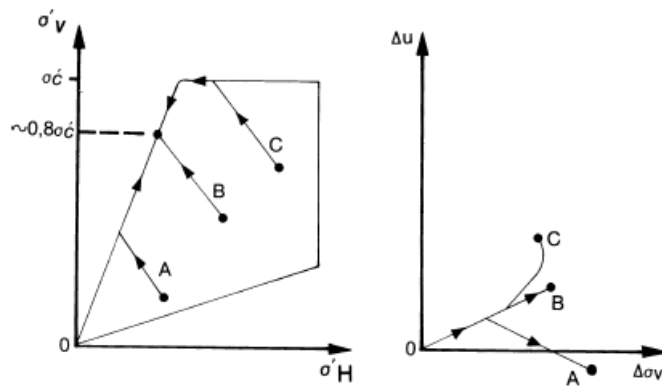
Brotten från försöken i bh 1002 sker snabbt och är tydliga vilket tyder på att jordproven troligtvis var ostörda. Brotten var relativt spröda vilket förstärker antagandet om ostört jordprov.

Provet konsolideras vertikalt innan försöket för att återspegla spänningsförhållandet in-situ. Provet konsolideras däremot inte för det horisontella förkonsolideringstrycket. Denna rapport utreder inte vidare hur olika jordprover uppträder vid avlastning mer än vad som tidigare beskrivits i kapitlet om horisontella och vertikala spänningar. Då en spänningsrotation måste ske under försöket för att brott ska kunna uppstå i horisontalplanet skulle eventuellt en konsolidering för det horisontella förkonsolideringstrycket haft påverkan på resultatet. Detta utreds ej vidare.

Om provet konsoliderats för högre förkonsolideringstryck än in-situ har ej kunnat verifieras i denna metod. Dock pekar resultaten från triaxialförsöken som också är rekonsoliderade för CRS-resultaten, se nästa stycke, att förkonsolideringstrycken ej överskridits.

7.1.5 Triaxialförsök

Aktiva triaxialförsök utfördes på djupen 5 m och 7 m. Spänningsvägen hinner inte för något av försöken träffa flytspänningen (förkonsolideringstrycket) innan den når brottlinjen som för exemplet för normalkonsoliderad kontraktant brott, figur 7. Om brottet hade varit mycket överkonsoliderat skulle leran visat tendenser till att dilatere och spänningsvägen vikit av mot höger i diagrammet. I vårt fall viker den av åt vänster, kontraktant brott. Provet går till brott vid en vertikal spänning kring 80 % av förkonsolideringstrycket vilket stämmer väl överens med vad empirin säger om en överkonsoliderad lera, Figur 51 nedan. Detta kan ses som en kvalitetssäkring för att provet inte överskridit förkonsolideringstrycket under försöket.



Figur 51. Effektiv spänningsändring och portrycksändring vid odränerad ökning av vertikalktrycket i leror med olika överkonsolideringskvoter. A. Starkt överkonsoliderad, B. Överkonsoliderad, C. Svagt överkonsoliderad. (Larsson, 2007)

7.2 Konsolideringsspänningar

Anledningen till att den beräknade effektiva horisontella spänningen i jorden är lika med eller större än den vertikala i jordprofilens övre delar hänger ihop med det empiriska uttryck formulerat av Schmidt, 1967, som används vid beräkningen. Uttrycket är baserat på OCR och konflytgränsen varför den horisontella spänningen nästan alltid närmar sig den vertikala i dessa beräkningar om $OCR > 2$. Inga försök har utförts för att verifiera hur spänningen varierar beroende på riktning.

Även förkonsolideringstrycket kan utvärderas empiriskt. Här antas förhållandet mellan vertikal och horisontell riktning endast bero på konflytgränsen, vilket i svenska leror visat sig fungera hyggligt som kriterium. Inte heller här har försök utförts i denna studie för att verifiera hur förkonsolideringstrycket varierar beroende på riktning. Ett sådant försök skulle kunna utföras om stora blockprover togs upp. Ur dessa prover kan sedan mindre prover skäras ut och provas i önskad riktning. Upptagning och försök av dessa är mycket kostsamma.

7.3 Empiri

De empiriska skjuvhållfastheten är framtagen för normal till lätt överkonsoliderad jord och passar således dåligt som jämförelse mellan uppmätta och beräknade skjuvhållfasthetsvärden. Den korrigering som görs för överkonsolideringsgraden bygger på data från vingförsök och hansbos formel som i sin tur lämpar sig bäst för normal-till lätt överkonsoliderade leror. Relevansen anses därför för dessa diagram vara låg.

Den empiri som finns med i sammanställningsdiagrammen för skjuvhållfastheten har korrigerats för OCR baserat på förkonsolideringstrycket uppmätt med CRS. Dessa anses ha något högre relevans.

7.4 Kohesionsintercept

Kohesionsinterceptet har visat sig haft större betydelse för den släntstabiliteten i området än vad som förmodades när examensarbetet påbörjades. Då leran till stor del är överkonsoliderad är den kombinerade analysen ofta dimensionerande. Den beräknade säkerhetsfaktorn i den kombinerade analysen kan höjas endast genom en högre utvärderad

friktionsvinkel eller högre utvärderat kohesionsintercept om spänningen i jorden antas vara konstant på en given nivå.

Larsson, 1983, beskriver att om tillräckligt långsamma försök utförs går kohesionsinterceptet mot noll. Det framgår dock inte om försöken sker dränerade eller odränerade. Larsson, 2003, skriver även att utförda dränerade triaxialförsök på lera visar samma eller högre utvärderat c' som odränerade försök på samma typ av lera under förkonsolideringstrycket. Försökshastigheten vid provning framgår ej i rapporten. Den senare av förklaringen av Larsson stämmer väl överens med vad Dekker, 2002, beskriver om att den volymökning som tillåts ske för en överkonsoliderad lera vid dränerat försök bidrar positivt till skjuvhållfastheten.

Vid utförda odränerade försök uppmätts en c' som är betydligt högre än noll. Töjningshastigheten under försöken var relativt låg, 0.1 %/h jämfört med 0.6 %/h som är den rekommenderade hastigheten. Våra triaxialförsök utfördes odränerade vilket precis som namnet beskriver inte tillåter att vatten dränerar under försöket. Inga dränerade försök utfördes under examensarbetet varför inga slutsatser kan dras om c' skulle öka eller minska vid dränerade försök jämfört med odränerade försök. Skulle en mycket långsam töjning till brott innebära att c' skulle vara noll? I vårt fall är svaret nej, varför det är så förklaras under nästa rubrik.

Vilken har störst påverkan på c' ; jordens överkonsolideringsgrad eller försökets hastighet? Och hur bestämmer man c' i en överkonsoliderad lera och har anisotropi någon inverkan på resultatet? Svaret på dessa frågeställningar kommer inte att kunna besvaras i detta examensarbete då det krävs att stora mängder dränerade och odränerade försök utförs på olika typer av leror med olika överkonsolideringsgrader för att utröna eventuella samband. Om man med säkerhet kan utvärdera c' från odränerade triaxialförsök skulle säkert fler inse fördelen med metoden och börja tillämpa den i fler projekt.

Frågan skulle säkerligen vara intressant för många av Sveriges geotekniker då mätbart kohesionsinterceptet skulle ge mer information till den kombinerade analysen.

7.5 Beräknad säkerhetsfaktor

Den beräknade säkerhetsfaktorn varierar för odränerad analys mellan 1.29 - 1.44 från detaljerad utredning till fördjupad utredning. Detta innebär att den beräknade säkerhetsfaktorn höjs tillräckligt från detaljerad till fördjupad utredning för att klara skredkommissionens krav för odränerad analys (F_c detalj > 1.7–1.5 & F_c fördjupad > 1.4–1.3).

För den kombinerade analysen varierar den beräknade säkerhetsfaktorn mellan 0.8–1.16. Variationen i säkerhetsfaktor beror här på hur kohesionsinterceptet utvärderas, då friktionsvinkeln i alla beräkningar antas vara 30 grader. Lägst säkerhetsfaktor beräknas då c' antas vara 0 kPa och högst säkerhetsfaktor beräknas då c' utvärderas från triaxialförsöken. Då leran är överkonsoliderad och slänten brant blir de dränerade parametrarna dimensionerade för hela den beräknade glidyten. Den kombinerade analysen uppfyller inte skredkommissionens krav oavsett om högsta tänkbara c' ansätts.

Hela det utvärderade kohesionsinterceptet från triaxialförsöket har inte använts i beräkningarna då alltför lite information funnits att tillgå kring utvärdering av c' i

överkonsoliderad lera samt att försöket anses utföras under relativt hög hastighet. För att våga använda ett högre c' bör i vårt fall även dränerade triaxialförsök utföras. Även om de höga utvärderade c' från våra triaxialförsök skulle kunna bekräftas genom dränerade försök skulle ändå inte skredkommissionens krav på beräknad säkerhetsfaktor uppnås. Dock skulle förstärkningsåtgärden kunna minskas. Dränerade triaxialförsök är kostsamma och minst två försök skulle krävas för att bekräfta de redan utförda försöken. Ur utförda triaxialförsök utvärderas så pass höga c' att vi vågar använda oss av de högre empiriskt utvärderade kohesionintercepten $c' = 0.03\sigma'_c$ istället för endast 10 % av τ_{fu} .

Samtidigt som den beräknade säkerhetsfaktorn ökar med detaljeringsgraden sänks Skredkommissionens krav på säkerhetsfaktorn med detaljeringsgraden.

Den procentuella ökningen av beräknad säkerhetsfaktor från detaljerad till fördjupad utredning för odränerad och dränerad analys är ca 11 % respektive ca 6 %. Om det sänkta kravet tas i beaktning så är förhållandet mellan beräknad säkerhetsfaktor och skredkommissionens krav för odränerad analys ca $1.44/1.35 = 1.07$ i den fördjupade utredningen jämfört med $1.29/1.6 = 0.81$ för detaljerade utredningen.

För kombinerad analys är samma förhållande för den fördjupade utredningen ca $1.07/1.25 = 0.86$ och för den detaljerade utredningen $0.99/1.35 = 0.73$.

Jämförelserna ovan grundas på medelvärdet i spannet för kravet på beräknad säkerhetsfaktor enligt Skredkommissionens anvisningar 3:95.

Om c' i den kombinerade analysen sätts till 0 resulterar detta i att den beräknade säkerhetsfaktorn blir 0.80 för befintlig slänt med högsta uppmätta portryck. Detta betyder inte bara att stabiliteten är otillfredställande utan teoretiskt borde det gått ett skred i slänten då lasterna verkat under lång tid. Eftersom inget skred har gått så dras slutsatsen att $c' = 0$ inte är rimligt i detta fall.

Kravet för beräknad säkerhetsfaktor för den kombinerade analysen sänks från den detaljerade till fördjupade utredning. Detta trots att inga extra krav ställs på att utreda de effektiva materialparametrarna för lera som friktionsvinkel och kohesionsintercept. Detta är något underligt, särskilt då det är vanligt att kohesionsinterceptet utvärderas som 10 % av τ_{fu} . Här får inte den riktighetsberoende skjuvhållfastheten beaktas vilket gör att kohesionsinterceptet = 10 % av τ_{fu} i den fördjupade utredningen blir ungefär samma som för den detaljerade.

7.6 Förstärkningsåtgärd

Förstärkningsåtgärd har översiktligt beräknats för tre typer av utredningar; detaljerad, fördjupad med $c' = 10\%$ av τ_{fu} och fördjupad där $c' = 0.03\sigma'_c$. Förstärkningsåtgärden i mängd fyllning på en sträcka av 100 m som krävs för att uppfylla kravet för respektive detaljeringsnivå uppgår till ca 4800 m³ för detaljerad utredning, ca 2800 m³ för fördjupad utredning där $c' = 10\%$ av τ_{fu} och ca 1800 m³ för fördjupad utredning där $c' = 0.03\sigma'_c$. Om kostnaden för transport, massor och utläggning uppskattas till ca 150 kr/m³ uppnås en besparing på ca 250 000 kr i förstärkningskostnader genom att en fördjupad utredning utförs, anisotropi beaktas. Genom att ett högre c' väljs på grund av att triaxialförsök utföras resulterar användandet av triaxialförsök i en ytterligare besparing på ca 150 000 kr.

8. Slutsatser och rekommendationer

8.1 Slutsats

Vid beaktade av anisotropi för den odränerade analysen ses en klar förbättring av släntstabilitetens beräknade säkerhetsfaktor. Utförda odränerade aktiva triaxialförsök visar högre skjuvhållfasthetsvärden än vad empirin tillåter att man beaktar. Trots empirins begränsning uppfyller slänten skredkommissions krav för odränerad analys i fördjupad utredningen om anisotropi tas i beaktning. Kravet uppfylldes ej i den detaljerade utredningen.

Skredkommissionen har även krav på minsta tillåtna säkerhetsfaktor vid kombinerad analys. Denna analys beräknar i varje del av slänten både odränerad och dränerad hållfasthet och använder sig av den lägsta skjuvhållfastheten av de två. Den kombinerade analysen kan för finkorniga jordar aldrig bli högre än den helt odränerade analysen.

För den kombinerade analysen har utvärderat eller antaget kohesions intercept c' stor betydelse för den beräknade säkerhetsfaktorn. Dålig överensstämmelse uppvisas mellan de två empiriskt beräknade c' och det utvärderade kohesionsinterceptet från triaxialförsöket. Ingen av de nämnda c' ger en beräknad säkerhetsfaktor som visar på tillfredställande stabilitet. Dock ökar den beräknade säkerhetsfaktorn om c' utvärderas från triaxialförsöken.

Om kohesionsinterceptet är riktningberoende eller ej och hur stor inverkan försökets hastighet har på utvärderingen har inte kunnat påvisas i denna rapport. För att göra detta krävs att flera olika försök utförs på samma typ av jord under samma spänningar. Försöken bör utföras såväl dränerade som odränerade.

Okorrigerade skjuvhållfasthetsvärden uppmätta med vingförsök i den överkonsoliderade leran visar i de flesta fall högre skjuvhållfasthetsvärden än värdena uppmätta med direkta skjuvförsök utförda på samma nivå om beräknad horisontell spänning är i samma storleksordning som den vertikala spänningen. På de nivåer där leran är normal till lätt överkonsoliderade visar direkta skjuvförsök högre eller lika stor skjuvhållfasthet som de okorrigerade vingförsöken.

Beräknad säkerhetsfaktor för den utvalda sektionen i Sjuntorp ökar från detaljerad till fördjupad utredning från $F_c=1.29$ till 1.44 respektive $F_{komb} = 1.01$ till 1.07. Eftersom kravet på beräknad säkerhetsfaktor sänks med ökad detaljeringsgrad samtidigt som beräknad säkerhetsfaktor ökar uppfylls kravet för den odränerade analysen i den fördjupade utredningen. Den kombinerade analysen uppfyller fortfarande inte kravet för fördjupad utredning.

Att kravet på säkerhetsfaktor sänks i takt med att detaljeringsgraden ökar har större effekt på förstärkningskostnaden än valet av skjuvhållfasthetsprofil, även om de båda till viss del hänger ihop.

Utförda avancerade försök är trots den lilla "skjuvhållfasthetsökningen" de bidrar med en förtjänst i projektet då förstärkningsåtgärden nu kan dimensioneras efter det lägre kravet och den något högre beräknade säkerhetsfaktorn.

8.2 Rekommendationer

Vad som bör utföras innan ställning tas om att utföra de relativt kostnadsamma triaxialförsök är att undersöka förutsättningarna för om resultatet från försöken kan komma att höja beräknad säkerhetsfaktor för slänten eller minska eventuella förstärkningskostnader.

För de slänter där odränerade parametrar är dimensionerande finns stor potential att höja den beräknade säkerhetsfaktorn. De empiriska ekvationerna för att anta riktningens beroende skjuvhållfasthet bör användas som ett första steg för att se hur mycket beaktande av anisotropi kan höja släntens beräknade säkerhetsfaktor. Som tidigare nämnts är empirin den maximala höjningen enligt skredkommissionen, 1995, och ett triaxialförsök kan endast bekräfta eller minska den högre skjuvhållfastheten.

Om dränerade parametrar är dimensionerande för hela glidyten bör ställning tas om utvärderade effektivspänningsparametrar från t.ex. odränerade eller dränerade triaxialförsök kan höja den beräknade säkerhetsfaktorn tillräckligt. Med tillräckligt menas att kostnaden för försöket täcks av de minskade eller uteslutna förstärkningskostnaderna.

Innan beslut om triaxialförsök ska utföras i lera:

Steg

1. Beräkna odränerad analys med vald skjuvhållfasthetsprofil
2. Beräkna kombinerad analys med $c' = 10\%$ av τ_{fu}
3. Beräkna även kombinerad analys med $c' = 0.03\sigma'_c$ (om denna är högre än $c' = 10\%$ av τ_{fu})
4. Jämför de beräknade säkerhetsfaktorerna med kraven för fördjupad analys.

Om dränerade parametrar ger en beräknad säkerhetsfaktor under skredkommissionens krav, bör triaxialförsök ej utföras om inte förstärkningsåtgärden antas kunna minskas så att försöken blir ekonomiskt/miljömässigt lönsamma med den högre valda c' .

Om odränerade parametrar är dimensionerande bör en uppskattning göras om glidyten aktiva skjuvzon är tillräckligt stor för att beräkningsmetoden ska kunna få upp den beräknade säkerhetsfaktorn. Beräkna den empiriska aktiva och passiva skjuvhållfastheten och utför sedan släntstabilitetsberäkningar med dessa skjuvhållfasthetsvärden. Uppfyller beräkningen inte Skredkommissionens krav för fördjupad utredning bör triaxialförsök ej utföras om inte förstärkningsåtgärden antas kunna minskas så att försöken blir ekonomiskt/miljömässigt lönsamma.

Om dränerade parametrar och empiriskt framräknad anisotrop odränerad skjuvhållfasthet vid testberäkning uppfyller Skredkommissionens krav finns goda möjligheter att triaxialförsök kan påvisa antagandena, öka den beräknade säkerhetsfaktorn och således minska förstärkningskostnaderna.

8.3 Fortsatta utredningar

För att få bättre förståelse för hur kohesionsinterceptet ska utvärderas och användas bör en studie utföras för att jämföra skillnaden i utvärderat kohesionsintercept mellan dränerade och odränerade triaxialförsök. Även dränerade direkta skjuvförsök bör utföras på samma typ av jord för eventuellt kunna utröna om kohesionsinterceptet är riktningsberoende eller ej. En annan intressant frågeställning är klimatpåverkan på slänter med redan låg beräknad säkerhetsfaktorer. Skredkommissionen rekommenderar att ett prognosticerat 200-års värde för portrycket ska användas i beräkningarna. De skjuvhållfasthetsparametrar som används i beräkningarna, även om prognosticerat 200-års portryck används, är uppmätta och utvärderade vid lägre portryck. Detta resulterar i att den använda skjuvhållfastheten inte stämmer för klimatanalysen. För att undersöka hur ett högre portryck påverkar den odränerade och dränerade skjuvhållfastheten kan odränerade triaxialförsök utföras under låga effektivtryck motsvarande de prognosticerade portrycken. I odränerade triaxialförsök uppmäts effektivspänningarna kontinuerligt varför sådana försök skulle kunna ge svar på hur skjuvhållfastheten påverkas av höga portryck.

Referenser

Litteratur

Axelsson, Kennet, Introduktion till Geotekniken, Skrift 04:4, Inst. för geovetenskaper, Uppsala universitet, Uppsala 2006

Awad A. Al-Karni & Mosleh A. Al-Shamrani, Study of the effect of soil anisotropy on slope stability using method of slices, King Saud University, Civil Engineering Dept. Riyadh, Saudi Arabia, 1999

Berntson A Jan, Portrycksvariationer i leror i Göteborgsregionen, Statens Geotekniska institut rapport 20, Linköping 1983

Eriksson G. Lars, Hur tillförlitligt är fallkonförsöket? – en jämförelse mellan resultat från olika koner, Väg och vattenbyggaren, Stockholm, 2004

Dekker Marcel, Geotechnical engineering- Principles and practices of soil mechanics and Foundation Engineering, V.V.S Murthy Inc, New York USA, 2002.

Kompetenscentrum infrastruktur, En kortkurs om triaxialförsök på främst normalkonsoliderade och svagt överkonsoliderade leror, Chalmers Tekniska Högskola, 2005

Larsson Rolf, 1981, Drained behaviour of swedish clays, Statens Geotekniska institut rapport 12, Linköping 1981

Larsson Rolf, Släntstabilitetsberäkningar i lera- Skall man använda totalspänningsanalys, effektivspänningsanalys eller kombinerad analys? Statens Geotekniska institut rapport 19, Linköping 1983

Larsson Rolf och Åhnberg Helen, Utvärdering av skjuvhållfasthet och förkonsolideringstryck från vingförsök, CPT-sondering och dilatometerförsök, Varia 528, Statens Geotekniska Institut, Linköping 2003

Larsson Rolf, Åhnberg Helen, Long-term effects of excavations at crests of slopes Pore pressure distribution – Shear strength properties – Stability – Environment, Statens Geotekniska institut rapport 61, Linköping 2003

Larsson Rolf, Sällfors Göran, Bengtsson Per-Evert, Alén Claes, Bergdahl Ulf, Eriksson Leif, Skjuvhållfasthet– utvärdering i kohesionsjord, Statens geotekniska institut och Geo, Chalmers tekniska högskola- SGI information 3, Linköping 2007

Larsson Rolf, SGI information 15, CPT-sondering utrustning – utförande – utvärdering En in-situ metod för bestämning av jordlagerföljd och egenskaper i jord, Linköping, 2007

Larsson Rolf, Jords egenskaper, Statens Geotekniska institut information 1, ISSN 0281-7578 Linköping 2008

Löfroth Hjördis, Undrained shear strength in clay slopes- Influence of stress conditions
A model and field test study- Doktorsavhandlingar vid Chalmers tekniska högskola, Statens
Geotekniska institut rapport 19, ISSN 0348-0755, Linköping 2008

Rankka Karin, Kvikklara – bildning och egenskaper– Litteraturstudie, Varia 526, Statens
Geotekniska institut, Linköping 2003

Skredkommisionen, Anvisningar för släntstabilitet, Rapport 3:95,
Ingenjörsvetenskapsakademin, Linköping 1995

Svenska Geotekniska föreningen, SGF rapport 2:93, Rekommenderad standard för vingförsök
i fält, Linköping, 1993

Svenska Geotekniska föreningen, SGF Notat 2:2004, Direkta skjuvförsök- en vägledning,
SGF:s laboratoriekommité, Linköping 2004

Swedish Standards Institut, 2005, Teknisk specifikation SIS-CEN ISO/TS 17892-9:2005,
Geoteknisk undersökning och provning Laboratorieundersökning av jord- Del 9: Konsoliderat
triaxialförsök på vattenmättad jord, utgåva 1, september 2005

Åhnberg Helen, Larsson Rolf och Berglund Christina, Varia 509, Nygamla vingar, stora som
små, Statens geotekniska institut, Linköping 2001

Wiesel Carl-Eric, Hansbo Sven och Broms Bengt, Skjuvhållfasthet, Byggeforskningsrådet i
samarbete med Svenska geotekniska föreningens laboratorie kommitte, linköping, 1985

Hemsidor

www.eniro.se, sökord: Sjuntorp, hämtad: 2010-12-14

www.geonor.com, sökord: fall cone apparatus, hämtad:2011-11-10

www.bat-gms.com, sökord: BAT Piezometer, hämtad 2011-09-05

Programvaror

Conrad 3.1, Reporting and evaluation of CPT-tests, Löfroth Björn och Nolberger Anders SGI-
statens geotekniska insitut, 2006-11-10

Geosuite stability 5.0, Novapoint, Vianova Geosuite AB, 2009