

Trafikverket

Postadress: 781 89 Borlänge

E-post: trafikverket@trafikverket.se

Telefon: 0771-921 921

Dokumenttitel: Bestämningar av den odränerade skjuvhållfastheten med specialiserade metoder i praktiska tillämpningar. Delrapport 4 – Rekommendationer för val av odränerad skjuvhållfasthet

Författare: Göran Sällfors, Rolf Larsson och Per-Evert Bengtsson

Dokumentdatum: 2017-03-30

Ärendenummer: TRV 2014/86131

Version: 1.0

Kontaktperson: Jan Ekström Trafikverket

Publikationsnummer: 2017:078

ISBN 978-91-7725-073-9

Innehåll

1. INLEDNING	5
2. BAKGRUND OCH Å PRIORI KUNSKAP	6
3. METODIK FÖR UNDERSÖKNING OCH VAL AV ODRÄNERAD SKJUVHÅLLFASTHET	8
4. KVALITETSASPEKTER	11
4.1. Provtagning	11
4.2. CPT-sondering	12
4.3. Vingförsök	12
5. AVVIKELSER FRÅN EMPIRI	13
5.1. Förutsättningar som empirin bygger på	13
5.2. Faktorer som medför avvikelser från empirin	13
5.2.1. Uppfyllnader i modern tid	13
5.2.2. Erosion med näraliggande slänt.....	14
5.2.3. Urlakning med kvicklerebildning.....	14
5.2.4. Stora topografiska variationer	14
5.2.5. Avvikelser från empirin, som vi inte riktigt kan förklara	15
6. VAL AV ODRÄNERAD SKJUVHÅLLFASTHET. MOTIVERING, FÖRKLARING OCH FORTSATT ARBETE	16
7. REFERENSER	17
BILAGA A - FÖRENKLAD FLYTYTA SOM ILLUSTRERAR KOPPLING MELLAN FÖRKONSOLIDERINGSTRYCK OCH C_U^A, C_U^{DS} OCH C_U^P.	18

Förord

Denna rapport är en del i ett större utvecklingsprojekt som Trafikverket har beviljat medel för. Projektet fokuserar på bestämning och val av odränerad skjuvhållfasthet i lös lera.

Bidrag till projektet, i form av resultat från geotekniska undersökningar, har också lämnats av Sweco, Golder, Norconsult, Trafikverket, Tyréns, Skanska, SGI, Chalmers, Ramböll, Cowi, NCC och Atkins.

Följande delar ingår i projektet:

- Enkät avseende vilka metoder som används för bestämning av den odränerade skjuvhållfastheten, c_u , i olika länder där lös lera förekommer (Trafikverket, Publikation 2016:167.
<http://fudinfo.trafikverket.se/fudinfoexternwebb/pages/PublikationVisa.aspx?PublikationId=3084>).
- Upprättande av en rapport med detaljerade anvisningar för genomförande, redovisning och tolkning av specialiserade laboratorieförsök (direkta skjuvförsök, triaxialförsök och CRS-försök). (SGFs Rapport 1:2017. Metodik för bestämning av skjuvhållfasthet i lera. – En vägledning)
- Sammanställning av ett stort antal ”case records” där såväl traditionella metoder (vingförsök, konförsök och CPT) som specialiserade metoder (direkta skjuvförsök, triaxialförsök samt CRS-försök och empiri) använts för bestämning av c_u . (Trafikverket, Publikation 2017:037)
<http://fudinfo.trafikverket.se/fudinfoexternwebb/pages/PublikationVisa.aspx?PublikationId=3127>)
- Ett systemprojekt där en ny vinge tillverkas och testas där rotation och mätning av torsion sker nere vid vingen.
- Rekommendationer för val av odränerad skjuvhållfasthet, c_u . (Denna Rapport)

För att genomföra projektet tillsatte Trafikverket en arbetsgrupp bestående av:

- Anders Kullingsjö och Torbjörn Edstam, Skanska
- Tara Wood, NCC
- Rolf Larsson och Per-Evert Bengtsson, SGI
- Urban Högsta, Golder Associates
- Göran Sällfors, Chalmers och GeoForce
- Jan Ekström och Anders Hansson, Trafikverket
- Fredrik Dahlström, Skanska, adjungerades till arbetsgruppen

Denna rapport är en sammanställning av erfarenheterna från projektet och avsikten är att den skall fungera som en slags handledning och stöd vid tillämpningen av den föreslagna metodiken.

Göteborg i mars 2017

Göran Sällfors Rolf Larsson Per-Evert Bengtsson

1. Inledning

Valet av odränerad skjuvhållfasthet får stora konsekvenser i många projekt, såväl vad avser säkerhet som ekonomi. Ett för lågt val ger ofta en överstark konstruktion, förenad med onödigt höga kostnader, medan ett väl optimistiskt val inte ger den säkerhetsmarginal som regelverk och samhället kräver.

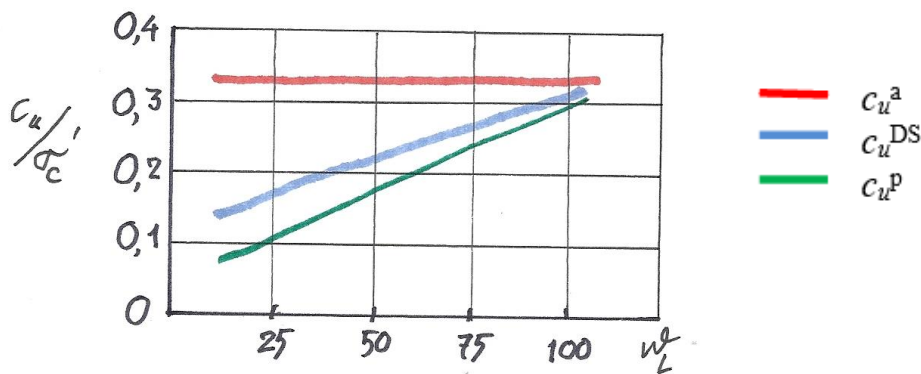
Syftet med denna rapport är att presentera en metodik, som medför att geotekniska undersökningar görs i den omfattning som kan leda till ett förnuftigt val, grundat på det underlag som problemet förtjänar. Speciellt betonas den förhandskunskap som finns när frågeställningen gäller lerors hållfasthetsegenskaper.

2. Bakgrund och à priori kunskap

Vid bestämning av den odränerade skjuvhållfastheten har under en följd av år använts vingförsök och konförsök och erfarenheten är god för djup ner till 15 à 20 m.

Under 1980- och 1990-talet utvecklades CPT-sondering och har sedan dess används i stor omfattning. De senaste 10 à 15 åren har direkta skjuvförsök och triaxialförsök kommit att användas i allt större omfattning, nu också i praktiska tillämpningar.

Geotekniker har sedan länge varit medvetna om att det för lera finns ett samband mellan odränerad skjuvhållfasthet, c_u , och det vertikala förkonsolideringstrycket, σ'_c , och det idag mest kända och använda sambandet som är baserat på en rad, såväl svenska som internationella undersökningar, återges i figur 1.



Figur 1. Förhållande mellan odränerad skjuvhållfasthet och förkonsolideringstryck som funktion av w_L för normal- till svagt överkonsoliderad lera (SGI Information 3)

Det finns en förhållandevis enkel modell som förklarar orsakerna till storleken på anisotropin. Detta förklaras utförligt i Bilaga A till denna rapport.

Även den s.k. Hansbos formel ($c_u = 0,45 \cdot w_L \cdot \sigma'_c$) används en del, även om den ursprungliga versionen avsåg att bestämma σ'_c baserat på π_v från vingförsök. Det finns en stark koppling mellan empirin för c_u^{DS} i figur 1 och Hansbos formel, om man tar hänsyn till korrektionsfaktorn μ , som är en funktion av w_L .

Leror har tydliga anisotropa hållfasthetsegenskaper. I figur 1 framgår att skillnaden mellan c_u^a , c_u^{DS} och c_u^p dessutom ökar som en funktion av minskande w_L . I Bilaga A framgår också att det egentligen är K_0^{nc} som är avgörande för storleken på anisotropin, men att då den är svår att mäta får w_L utgöra en slags ställföreträdande parameter. K_0 kan förväntas minska med minskande w_L .

Denna bakgrundskunskap är oerhört viktig att ta vara på och den föreslagna rekommendationerna bygger på att den används som kontroll/för avstämning i långt högre grad än vad som normalt varit fallet. Det är även viktigt att komma ihåg att empirin i figur 1 bygger på ett antal grundförutsättningar. Avvikelser kan vara beroende av att vissa av förutsättningarna inte är uppfyllda. Detta diskuteras vidare i kapitel 5.

3. Metodik för undersökning och val av odränerad skjuvhållfasthet

I rapporten ”Bestämning av leras skjuvhållfasthet - Sammanställning av Case Records” (Trafikverket, Publikation 2017:037) redovisas en rad ‘case records’ där metodiken illustreras. I korthet innebär den att man använder empiridiagrammet, som återfinns i fig.1, och baserat på skattade parametrar (w_L och OCR) för den aktuella lokalen, skissar hur c_u^a och c_u^{DS} kan förväntas variera med djupet. När resultat sedan blir tillgängliga från fall-kon, vingförsök och CPT-sondering läggs dessa in i diagrammet. Sedan, när även w_L , σ'_c , densitet och portryck blir tillgängliga uppdateras den empiribaserade skjuvhållfastheten.

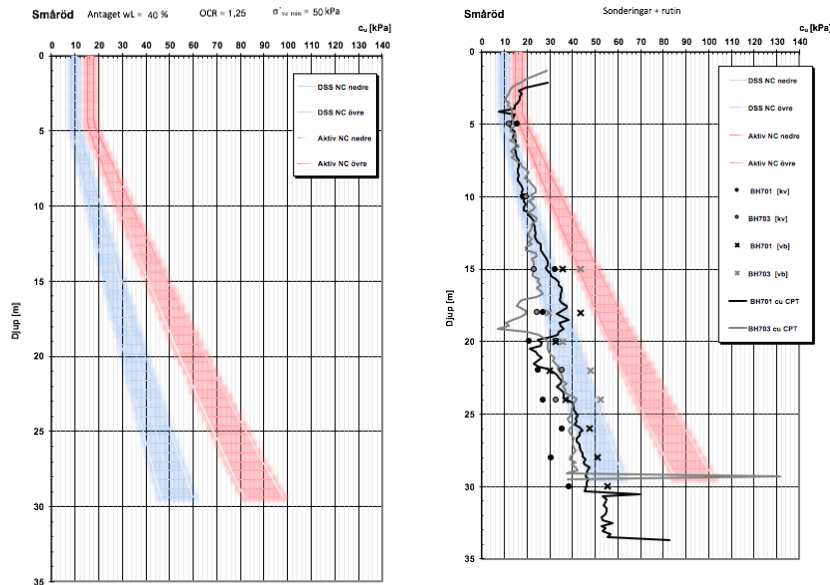
Därefter granskas resultaten och beslut fattas om även direkta skjuvförsök och eventuellt triaxialförsök skall utföras. Om så sker läggs dessa resultat in i diagrammet och ett slutligt val av hållfastheter görs. Därvid skall resultaten från de specialiserade försöken väga mycket tungt. Ytterligare information kan fås i SGI Information 3.

Följande steg genomförs:

1. *Definiera problemställningen.* Förtydliga vad projektet går ut på och ange vilka brottmoder som kan bli aktuella för konstruktionerna. Identifiera vilken hållfasthet eller vilka hållfasthetskombinationer som kan bli aktuella.
2. *Underlag för en à priori-bedömning av vad hållfastheten* bör vara tas fram. Hur à priori-bedömningen kan göras beskrivs i detalj i ”Anvisningarna” (SGFs Rapport 1:2017). I korthet innebär det att OCR skattas till 1,25 à 1,3 för ’gamla’ leror på västkusten, medan motsvarande siffra är 1,1 till 1,15 för ostkusten. w_L bedöms baserat på lokal erfarenhet. Diagrammet i figur 1 används som en första skattning. Ett fält, representerande +- 10 % av detta värde, används som en första skattning av förväntat värde på skjuvhållfastheten, se fig. 2.

Eventuellt kan det vara bra med två bedömningar; en för vad hållfastheten minst borde vara och en för troligaste hållfasthet. Bedömningen kan behöva modifieras för speciella jordarter som organisk lera, gyttja och sulfidjord om förekomsten av dessa är känd.

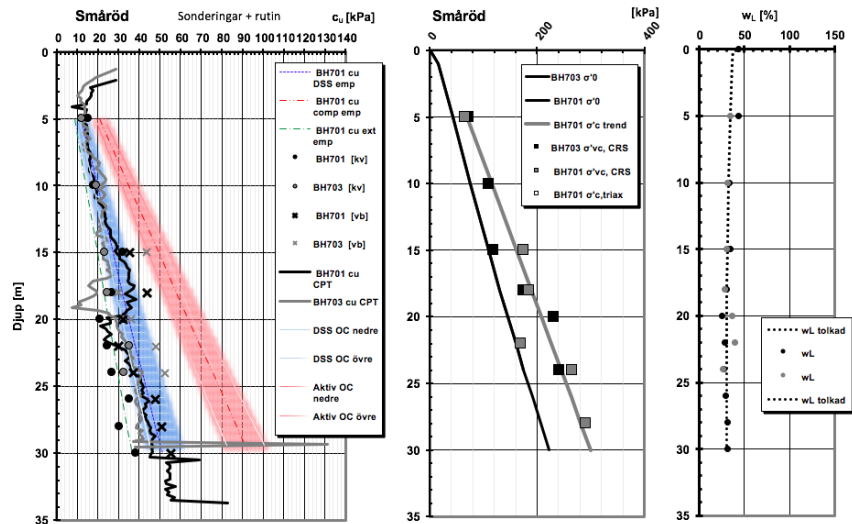
3. Lägga upp en plan för undersökningar, kvalitetskontroll och kontakta utförare av fält- och laboratorieundersökningar så att kraven på kvalitet och provning inom kort tid kan uppfyllas. Även dessa moment beskrivs utförligare i SGF Rapport 2017:1. Undersökningarnas omfattning bör avpassas efter om det bara är en bekräftelse på à priori-uppskattningen som eftersträvas eller om denna antas vara så osäker i förhållande till kraven på noggrannhet i bestämningarna att mer omfattande undersökningar krävs.



Figur 2. Empiriska värden på c_u^a (rött fält) och c_u^{DS} (blått fält). Dessutom redovisas c_u bestämt med konförsök, vingförsök och CPT-sondering

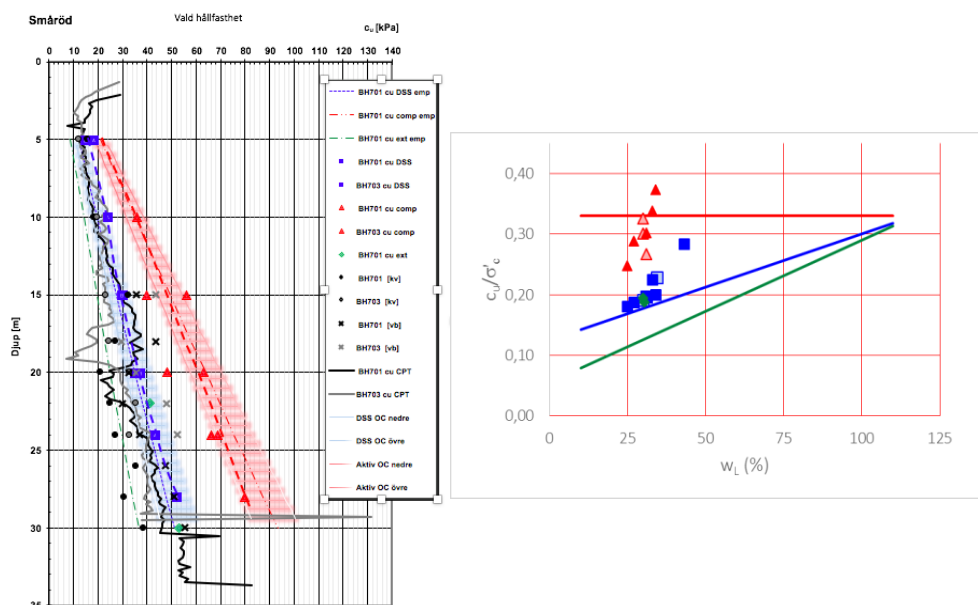
4. Utför sondering, porttrycksmätning, provtagning, vingförsök och laboratorieundersökningar. Besök platsen under undersökningarna och bilda dig en uppfattning om eventuella svårigheter eller problem på den aktuella platsen. Fält- och laboratorierapporter skall upprättas och uppdateras successivt under arbetets gång. Undersökningarna inleds lämpligen med CPT-sondering av högsta noggrannhetsklass, varpå provtagningsnivåer och nivåer för vingförsök kan väljas för att få en komplett bild av jordprofilen. Att stanna och mäta de utjämnade porttrycken i permeablare lager och främst de grövre bottenlager som oftast återfinns under lerprofilerna är ett mycket effektivt hjälpmedel för en snabb och ekonomisk bestämning av porttrycksnivåerna.
(Det kan bli aktuellt med att inleda med en grövre sonderingsmetod eller grövre CPT-sond för att skydda en känsligare sond. Med dagens möjligheter att automatiskt bryta sonderingarna på grund av för stora värden på nedrivningskraft, spetsmotstånd eller utböjning är detta behov normalt litet.)

5. När resultaten är klara uppdateras à priori-uppskattningen till en empiriskt förväntad hållfasthet med ledning av uppmätta densiteter, porttryck, flytgränser och förkonsolideringstryck. CPT-sonderingar, vingförsök och fallkonförsök i laboriet utvärderas och sammanställs med den empiriskt förväntade hållfastheten.
(Det visar sig ofta att resultaten från fallkonförsök och i något mindre grad även vingförsök avviker från övriga försök. Normalt inträffar detta från ett visst djup men kan gälla hela profilen. Detta kan vid fallkonförsök ofta relateras till störda prover från provtagning och hantering av prover. Vid vingförsök kan detta ofta relateras till ovanligt stor störning vid neddrivning av vingen i inhomogen jord. I fall med mycket homogen jord kan å andra sidan relevanta värden fås till stora djup. Hur homogen jorden är inom olika djupintervall framgår väl ur resultaten från CPT-sondering.)



Figur 3. Uppdaterade diagram, med angivande av förkonsolideringstryck och konflytgräns

6. Gör en bedömning av vad som eventuellt kan vinnas med specialiserade försök, som direkta skjuvförsök och triaxialförsök. Observera att om anisotropi skall påräknas bör denna verifieras med triaxialförsök. Speciella triaxialförsök bör utföras om jordens egenskaper ingår i avancerade numeriska beräkningar för den aktuella konstruktionen, detta för att ge underlag för utvärdering av de parametrar som ingår i modellen.
7. Utför eventuella kompletterande försök och gör en slutlig utvärdering av hållfastheten. Vid denna utvärdering viktas olika resultat med hänsyn till normala problem och felkällor för metoden ifråga. Resultat från specialiserade försök på prover av hög kvalitet ges mycket stor tyngd.



Figur 4. Valda hållfastheter c_u^a och c_u^{DS} , samt redovisning av erhållna värden på c_u^a och c_u^{DS} i empiridiagram

4. Kvalitetsaspekter

Krav på kvalitet i undersökningarna och hur denna bör kontrolleras och bedömas beskrivs i SGF Rapport 2017:1. I dessa beskrivs också olika metoders fördelar och begränsningar.

I detta kapitel ges lite kompletterande råd och rekommendationer. Dessa är delvis baserade på erfarenheterna från den insamling av data från väl undersökta områden som presenterats i ”Bestämning av leras skjuvhållfasthet - Sammanställning av case records”.

4.1. Provtagning

Provtagning utförs normalt med standardkolvprovtagare. Det är den utrustning som vi har mer än 50 års erfarenhet av och all utvärdering av skjuvhållfasthet, förkonsolideringstryck och parametrar för beräkning av relativt stora deformationer i jorden baseras på goda prover tagna med denna eller likvärdiga provtagare. Det finns två standardkolvprovtagare; StI och StII. Av dessa rekommenderas att använda StII då denna erfarenhetsmässigt uppvisat färre problem vid handhavandet och därmed ger en säkrare provtagning av god kvalitet.

På senare tid har ett antal nya provtagare som ger prover av ännu högre kvalitet utvecklats och generellt bör man alltid eftersträva så hög kvalitet som möjligt. Gemensamt för dessa provtagare är dock att de dels medför en avsevärt högre provtagningskostnad, dels ger prover där det inte finns några klara regler för hur provningsresultaten skall hanteras och tolkas. Att man i dessa prover med användande av tidigare utvärderingsmetoder kan få högre hållfastheter och förkonsolideringstryck betyder inte att jordens egenskaper *in situ* har förändrats och det är därmed risk att den hållfasthet som kan utnyttjas överskattas, att brottsannolikheten underskattas eller att de deformationer som kommer att uppstå underskattas. Det senare gäller främst vid relativt stora deformationer som konsolideringssättningar efter överskridande av förkonsolideringstrycket. Några säkra riktlinjer för eventuella korrigeringar finns inte och skulle kräva omfattande kalibrering mot fullskaleprojekt i fält och skulle sedan endast gälla den aktuella typen av provtagare.

Vid beräkning av mindre deformationer, ofta i samverkan med olika konstruktionselement, gäller det att få en så god uppskattning av jordens egenskaper som är praktiskt möjligt. Här kommer troligen de nya provtagarna att få sin huvudsakliga användning. Att utföra avancerade numeriska beräkningar med bristfälliga ingångsdata är ingen bra idé.

4.2. CPT-sondering

En av de största felkällorna vid CPT-sondering är otillräcklig temperaturstabilisering före sonderingsstart. En inbyggd termometer i sonden är till mycket stor hjälp, både för operatören i fält att kontrollera detta och för den efterföljande kvalitetsgranskningen. Om temperaturgivare saknas bör man observera att det normalt tar cirka 15 minuter för en sond att helt anta temperaturen i ett vattenfyllt hål i marken eller nedsänkt till strax ovan bottennivån i ett vattendrag.

4.3. Vingförsök

Det bör beaktas att de flesta korrektionsfaktorer för vingförsök är baserade på resultat från "standardvingen" med höjd = 110 mm och diameter = 55 mm. Speciellt vid stora lerdjup kan det bli aktuellt att byta till en mindre vinge på ett visst djup, eftersom den totala vridkraften (stångfriktion och rotation av vinge) överskrider mätutrustningens arbetsområde. Detta bör undvikas eftersom ett byte av vinge ofta medför att det mätta värdet, även efter korrektion, blir annorlunda än före bytet. Några klara regler för hur detta slår finns inte. En utrustning där vingen inte behöver bytas (t.ex. med friktionsreducering för vridstångerna eller med mätning på djupet strax ovan vingen) bör därför användas i dessa profiler. Går inte detta bör de nya försöken med en mindre vinge påbörjas ett antal provningsnivåer ovanför bytesnivån så att det går att se om någon påtaglig skillnad uppstod i detta intervall. Tyvärr är detta ingen garanti för att något sådant inte uppstår eller att skillnaden är densamma längre ned.

5. Avvikelser från empiri

5.1. Förutsättningar som empirin bygger på

De samband som framgår i figur 1 bygger på ett antal antaganden. Jorden antas ha haft samma effektivspänningar under lång tid, kanske upp emot 1000 år eller längre. Markytan förutsätts vara horisontell och jorden antas vara normal- eller svagt överkonsoliderad och ingen grundvattensänkning har skett under denna tid. Om jorden har ett $OCR > 1,3$ skall c_u korrigeras enligt vad som anges i SGI Information 3, sid 13. Om denna justering görs för OCR , och de övriga antagandena gäller, bör empirin stämma relativt väl.

5.2. Faktorer som medför avvikelser från empirin

Det finns en rad faktorer som kan medföra att empirin inte stämmer till fullo, som t.ex. förändringar i lastförutsättningar p.g.a. uppfyllnader eller avlastningar, ojämn terräng, förändringar i lerans kemi. I vilken omfattning detta påverkar är svårt att precisera. Nedan går dessa faktorer igenom och möjliga effekter diskuteras. Huvudsyftet är inte att i detalj försöka utreda de olika effekterna, utan mer finna ett logiskt underlag för att kunna värdera rimligheten i de resultat man får.

5.2.1. Uppfyllnader i modern tid

När en belastning påförs jorden p.g.a. terrängmodellering eller annan byggverksamhet är det, sett i ett geologiskt perspektiv, en mycket snabb belastning. Det skulle kunna innebära en helt annan förändring av de effektiva horisontalspänningarna än vad som är fallet vid den mycket långsamma pålastningen som var fallet då leran ursprungligen sedimenterade.

Om påtagliga belastningar påförts och jorden konsoliderats för dessa laster, åtminstone delvis, kan således inte empirin förväntas stämma lika bra. Det skulle kunna bero på att $K_{o^{nc}}$ för en ung lera skiljer sig åt från $K_{o^{nc}}$ för en gammal lera och är något lägre. Det skulle i sin tur medföra att c_u^{DS} och c_u^P kommer att vara lägre än vad empirin antyder, medan empirin ändå kan förväntas stämma för c_u^A .

En annan sak som bör beaktas i de fall uppfyllnadens utbredning är begränsad är att effekten efter konsolidering kan variera beroende på var under eller vid fyllningen den betraktas. Mitt under fyllningen kommer den till ett begränsat djup att vara i stort densamma som för plan markyta. På större djup kommer dock lastspredningen att medföra att effekten begränsas. Ju närmare fyllningens kant man kommer, desto mindre blir effekten av ökande horisontalspänningar i jorden eftersom ett motsvarande motstånd i horisontalled som under plan mark inte kan mobiliseras utan istället kommer horisontalrörelser att ha uppstått. Detta medför i sin tur att motsvarande öknings i direkt- och passiv skjuvhållfasthet som under plan mark inte kan påräknas. Någon påtaglig effekt på skjuvhållfastheten av fyllningen utanför dess utsträckning kan normalt inte påräknas.

I de fall jorden endast delvis hunnit konsolidera för fyllningen kommer överkonsolideringsgraden dessutom att variera med djupet, varför det enkla antagandet om en konstant överkonsolideringsgrad inte är korrekt. Om fyllningen efter en viss tid schaktats bort tillkommer bedömningen om liggtiden varit tillräcklig för att en genomgående överkonsolidering skall ha hunnit utbildas eller om eventuella sådana effekter bör bortses ifrån.

5.2.2. Erosion med näraliggande slänt

De flesta av våra slänter ned mot rinnande vattendrag som åar och älvar har bildats genom erosion under samtidigt pågående landhöjning. Denna naturliga process, som fortfarande pågår, medför att vattendraget successivt fördjupas och åter sig in i slänterna, huvudsakligen genom relativt ytliga ras och skred, samtidigt som slänterna blir allt högre. Exakt hur detta påverkar spänningsbilden i släntens yttre delar är komplicerat och beror bland annat på hur portrycksprofilen kommer att utbildas. I dessa partier kommer totala vertikalktrycket att bli lägre än för plan mark på grund av lastspridningen. Samtidigt kommer det effektiva vertikalktrycket att öka om fria grundvattenytan och portrycken sänks närmast slänten. I ett första grovt antagande kan man anta att detta i stort jämnar ut sig och att den aktiva skjuvhållfastheten kan antas vara densamma som en bit bakom slänten. För direkt- och passiv skjuvhållfasthet behöver empirin dock inte gälla för främst nivåer över vattendragets botten, eftersom den ökning i horisontaltryck som förutsätts för att dessa värden skall öka inte säkert kan påräknas. Signifikanta skillnader från den vanliga empirin har noterats i en del fall men några regler för hur detta skall beaktas finns inte. I de flesta fall innebär det att c_u^{DS} och c_u^p blir något lägre än vad empirin normalt pekar på.

5.2.3. Urlakning med kvicklerebildning

Saltvattenavsatta leror har en ganska lucker struktur med aggregat av ler- och siltpartiklar sammanbundna med länkar av lerpartiklar. Vattenkvoten är beroende av bl.a. silthalten men lerorna har ofta en konflytgräns i samma storleksordning som vattenkvoten och en sensitivitet på 15 – 25. Om en sådan lera utsätts för urlakning, så att salthalten i porvattnet minskar sjunker w_L högst påtagligt och leran blir sensitivare och med tiden eventuellt kvick. Den odränerade skjuvhållfastheten ändras däremot normalt inte under de inledande faserna av denna process. Det innebär att punkten för c_u/σ'_c i figur 1, som ursprungligen låg på den blå linjen skulle kunna förskjutas horisontellt åt vänster i diagrammet, p.g.a. den lägre w_L . Detta skulle i sin tur leda till en avvikelse från empirin. c_u^{DS} blir högre än vad w_L antyder. Om urlakningsprocessen går så långt att kvicklera bildas och att detta i sin tur medför att jordens struktur nära nog kollapsar på grund av att sammanhållningen i aggregat och länkar försvagas kommer jordens tidigare överkonsolidering att försvinna, och en helt normalkonsoliderad lera med lägre skjuvhållfasthet relaterad till detta att uppstå. Eftersom överkonsolideringseffekterna försvinner betyder detta i sin tur att skjuvhållfastheten blir lägre än tidigare.

5.2.4. Stora topografiska variationer

Stora topografiska variationer medför att överlagringstrycken varierar. På grunda nivåer kommer överlagringstrycken att styras av den direkt ovanliggande jordmassan medan de på djupare nivåer successivt anpassas till någon medelnivå hos markytan. Hur snabbt denna övergång sker beror på hur stora variationerna i markytanivån är. Exempel på

topografiska variationer är förutom tidigare nämnda fyllningar bl. a. nederoderade vattendrag. Tidigare och befintliga byggnader och andra konstruktioner kan också räknas till denna kategori. Vad som ovan beskrivits under ”uppfyllnader i modern tid” är i stort tillämpligt även för dessa fall.

5.2.5. Avvikelser från empirin, som vi inte riktigt kan förklara

I en del fall har konstaterats att den uppmätta direkta- och passiva skjuvhållfastheten inte fullt ut motsvarar vad som empiriskt skulle kunna förväntas. Detta tyder i sin tur på lägre K_0^{nc} - värden än de antagna. De uppmätta värden på K_0^{nc} som ligger till grund för empirin hänför sig till mätningar på måttliga djup och måttliga spänningsnivåer. Det finns egentligen inget underlag som klart visar att K_0^{nc} är en materialkonstant, utan detta värde skulle kunna variera något med faktorer som spänningsnivå, portal och ålder. I diskussioner har framförts att egenskaperna i de djupaste lagren tyder på att den långsamma pålastning som skett här de senaste årtusendena inte orsakat samma kompressioner som en hastigare pålastning skulle ha gjort och då har kanske inte heller horisontaltrycken utvecklats i samma takt heller.

Om detta vet vi ännu alldeles för lite och ovanstående utgör endast en möjlig förklaring.

6. Val av odränerad skjuvhållfasthet. Motivering, förklaring och fortsatt arbete

Enligt IEG bestäms först härledda värden för de olika metoderna som är aktuella. Baserat på bl. a. en värdering av de olika metoderna väljs ett värde eller en trend, som då benämns valt värde eller vald trend. Det värde som den i denna rapport beskrivna metodiken leder fram till är i princip valda värden på c_u^a , c_u^{DS} och c_u^p , i alla fall om man utfört direkta skjuvförsök och eventuellt triaxialförsök, och låtit dessa värden dominera valet.

Hur långt man skall driva undersökningarna är ju beroende av hur det påverkar designen. Man bör normalt inte driva undersökningarna längre än att en förväntad ökning av c_u ger ett ekonomiskt utbyte.

I det fall man får valda värden som är påtagligt lägre än vad empirin anger, skall man klart motivera varför man nöjer sig med dessa värden, utan att gå vidare med mer specialiserade försök.

7. Referenser

Kullingsjö, A., 2007. Effects of deep excavations in soft clay on the immediate surroundings – Analysis of the possibility to predict deformations and reactions against the retaining system. PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

Larsson, R., 1977. Basic Behaviour of Scandinavian Soft Clays. SGI, Rapport 4. Linköping.

Larsson, R., Sällfors, G., Bengtsson, P-E., Alén, C., Bergdahl, U., Eriksson, L., 2007. Skjuvhållfasthet - utvärdering i kohesionsjord. SGII, information 3. Linköping.

Olson, M., 2013. On Rate-Dependency of Gothenburg Clay. PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

Trafikverket, Publikation 2016:167. Bestämningar av odränerad skjuvhållfasthet med specialiserade metoder i praktiska tillämpningar - Delrapport 1a, Resultat från en internationell enkätundersökning

Trafikverket, Publikation 2017:037. Bestämningar av odränerad skjuvhållfasthet med specialiserade metoder i praktiska tillämpningar - Delrapport 3, Sammanställning av "Case Records".

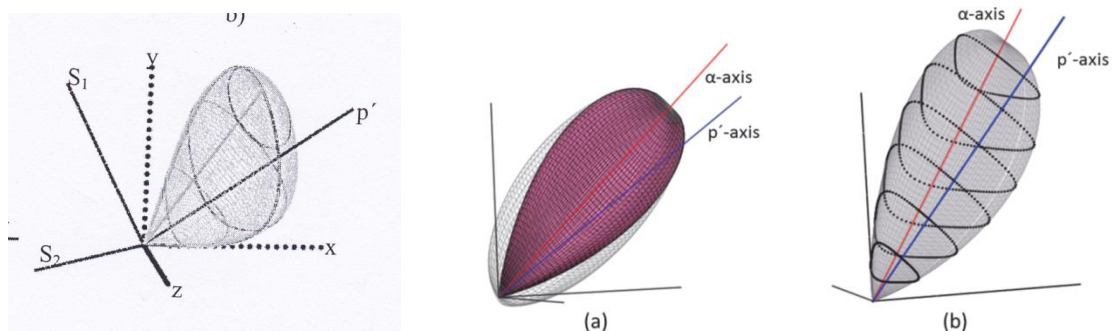
SGF Rapport 1:2017. Metodik för bestämning av skjuvhållfasthet i lera - En vägledning

Bilaga A - Förenklad flytyta som illustrerar koppling mellan förkonsolideringstryck och c_u^a , c_u^{DS} och c_u^p .

Under en lång följd av år dominerade fallkonförsök och vingborrförsök den svenska marknaden när det gällde metoder för bestämning av den odränerade skjuvhållfastheten för lera. Dessa gav ett härlett värde på hållfastheten, som användes i en rad olika tillämpningar, alltifrån bedömning av slänters stabilitet till beräkning av jordtryck mot stödkonstruktioner. Med tiden har CPT-sondering inneburit ett viktigt komplement till dessa metoder. Utrustning för utförande av direkta skjuvförsök och triaxialförsök har funnits på forskningslaboratorier i Sverige de senaste 50 åren, men det är inte förrän de senaste 10 åren som de kommit att användas i större omfattning i praktiska tillämpningar.

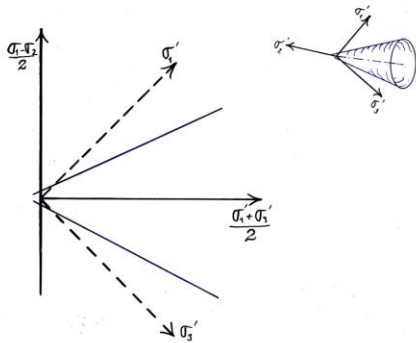
En av anledningarna till att dessa mer specialiserade försök blivit vanligare är den alltmer nyanserade bild som vuxit fram när det gäller lösa lerors egenskaper, som t.ex. insikten om de anisotropa hållfasthetsegenskaper som många leror har. En annan anledning till det ökade intresset för triaxialförsök är den ökade användningen av finita elementmetoden inom geotekniken. Dessa materialmodeller, varav vissa är mycket avancerade, som då nyttjas kräver kunskap om lerans egenskaper på en helt annan nivå.

Steget från att beskriva lerans odränerade egenskaper med ett enda värde till att koppla materialets odränerade och dränerade hållfasthets- och deformationsegenskaper i en enda konstitutiv modell är enormt. Denna utveckling har i och för sig pågått sedan CamClay-modellen presenterades i slutet av 1960-talet, men det är först i och med datorkapacitetens explosionsartade utveckling som de verkligt komplicerade modellerna sett dagens ljus. Exempel på delar av några sådana modeller åskådliggörs i fig. A.1.



Figur A.1 Några exempel på komplicerade konstitutiva modeller (Kullingsjö, 2007, Karlsson, 2013)

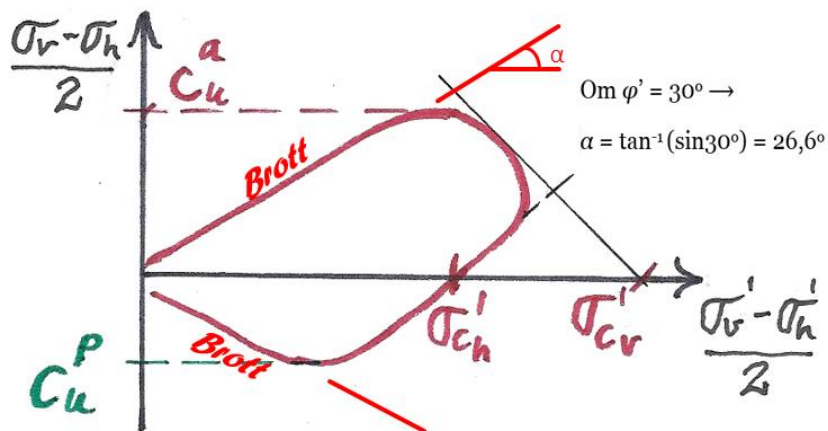
Modellerna i fig. A.1 visas i spänningsrymden $\sigma'_1 - \sigma'_2 - \sigma'_3$ vilket är lite ovanligt för geotekniker, som är vana att se det i $s' - t$ - diagram, $((\sigma'_v + \sigma'_h)/2; (\sigma'_v - \sigma'_h)/2)$, vilket ofta används för att illustrera Mohr/Coulombs eller Drucker/Pragers brotthypoteser, som trots allt fortfarande är de vanligaste inom geotekniken, fig. A.2.



Figur A.2 s'-t diagram

För dem som arbetat en del med triaxialförsök är det också en fördel med s'-t - diagrammet eller p'-q-diagrammet, då dessa normalt används för att redovisa den spänningsväg som erhålls som resultat av försöket.

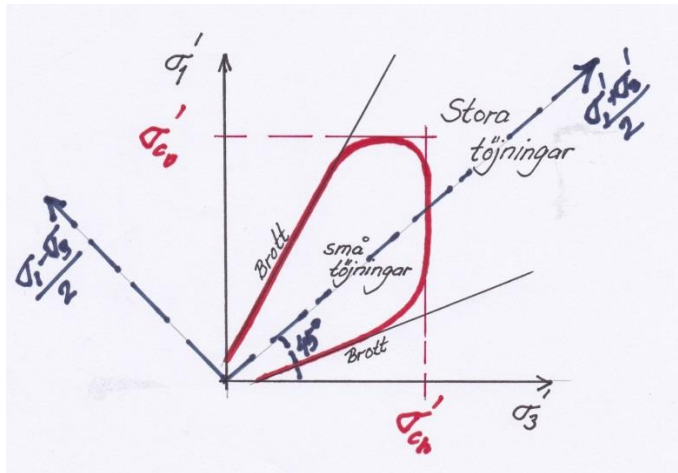
Då det är mycket enklare att redovisa och förstå samband i två dimensioner, jämfört med tre, används ofta en förenklad bild av det tredimensionella framställningssättet. En sådan två-dimensionell flytyta, som används allt oftare, visas i fig. A.3.



Figur A.3 Förenklad flytyta

Flytytan begränsas till vänster i fig. A.3 av de två linjerna som motsvarar Mohr/Coulomb's brotthypotes. Till höger begränsas flytytan av två linjer representerande det vertikala förkonsolideringstrycket, σ'_{cv} , respektive det horisontella förkonsolideringstrycket, σ'_{ch} , ($= K_0^{nc} \cdot \sigma'_{cv}$).

Betydelsen av de olika 'gränserna' blir kanske lite tydligare om man betraktar det i huvudspänningsrymden, se fig. A.4.



Figur A.4 Förenklad flytyta representerad i huvudspänningsrymden

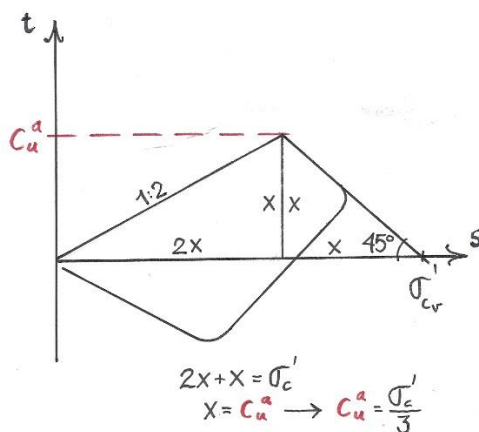
En koordinattransformering på 45° motsvarar det diagram som återfinns i fig. A.4.

Ett mycket omfattande studiematerial, inkluderande en rad 'mini-lectures' återfinns i SGFs e-learningkurs – Triaxialförsök

(<https://versal.com/learn/w4wiki/lessons/4?revision=true>)

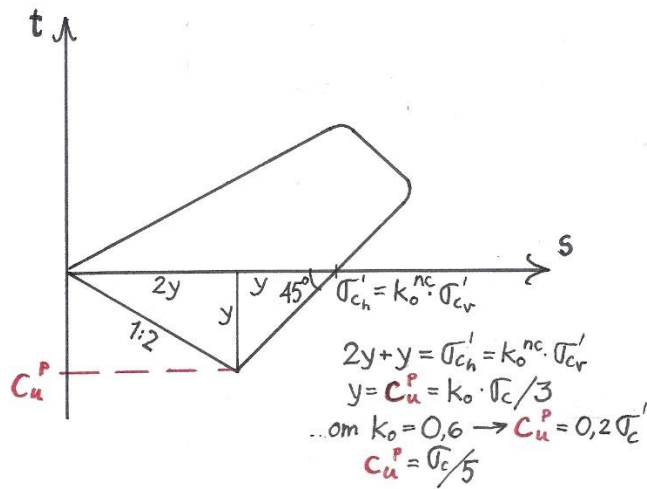
I fig. A.3 framgår materialets anisotropa egenskaper tydligt. Dessutom ger den en koppling mellan odränerad aktiv och passiv skjuvhållfasthet och tillhörande förkonsolideringstryck.

Den förväntade storleken på den aktiva odränerade skjuvhållfastheten är $c_u^a = \sigma'_c / 3$, vilket framgår ur de geometriska sambanden i fig. A.5. Detta förutsätter dock att $\varphi' = 30^\circ$ och $c' = 0$.



Figur A.5 Förenklad flytyta där det framgår varför $c_u^a = \sigma'_c / 3$

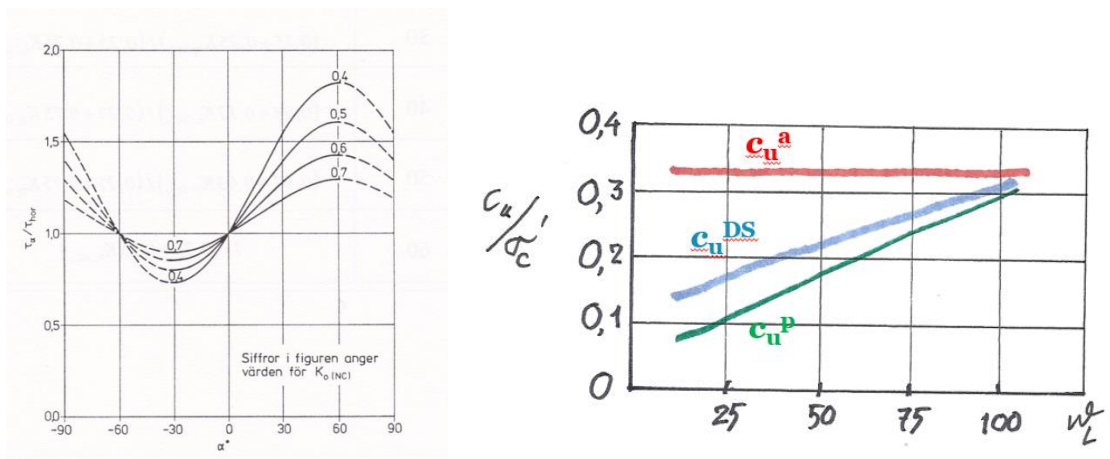
Man kan även se att det finns en koppling mellan K_o^{nc} och c_u^p också genom att studera den förenklade flytytan. I fig. A.6 framgår även att det förväntade värdet på $c_u^p = K_o^{nc} \cdot \sigma'_c / 3$.



Figur A.6 Förenklad flytyta där det framgår varför $c_u^p = K_o^{nc} \cdot \sigma'_c / 3$

Nyckelparametern, utöver σ'_c är alltså K_o^{nc} . Problemet är att bestämma detta experimentellt. Det är näst intill omöjligt att direkt bestämma K_o^{nc} genom mätningar, vare sig i fält eller i laboratoriet. Det vi vet är att ju grövre leran är desto lägre är K_o^{nc} , och ju fetare leran är desto högre är normalt K_o^{nc} . Man har då funnit att en parameter som i viss mån speglar detta är konflytgränsen w_L , som ingår i rutinundersökning av lera. Ju högre w_L desto högre K_o^{nc} och vice versa. Detta är anledningen till att det diagram för empiri, som återfinns i så många publikationer och som används flitigt, redovisar hur anisotropin beror av w_L . Det är alltså den bakomliggande parametern K_o^{nc} som egentligen styr.

För de geotekniker som arbetat med stabilitet av slänter och beaktat lerans anisotropi, är fig. A.7 känd och även där framgår att effekten av anisotropi blir större ju lägre värdet på K_o^{nc} är. Detta blir speciellt tydligt då man beaktar det starka sambandet mellan w_L och K_o^{nc} .



Figur A.7 Anisotropi som funktion av K_o^{nc} och w_L för en normalkonsoliderad lera.
 α = brottvinkel mot horisontalplanet. 60° motsvarar aktivt brott och -30° motsvarar passivt brott.

Vad som ovan sagts gäller c_u^a och c_u^p , medan inget sagts om c_u^{DS} . Men om man studerar fig. A.7 finner man att

$$c_u^{DS} = 0,75 c_u^p + 0,25 c_u^a$$

Därmed förklaras den blå linjen c_u^{DS} i empiridiagrammet i fig. A.7, som alltså är en ren funktion av den röda (c_u^a) och den gröna (c_u^p) linjen. Detta samband gäller med antagandet att $\varphi' = 30^\circ$ och $c' = 0$.

Det är viktigt att hålla i minnet att de empiriska sambanden för skjuvhållfastheten i olika riktningar har sin bas i empiri. Den anisotropi som finns hos leran är i princip spänningsinducerad, d.v.s. den är ett resultat av att effektivspänningen och förkonsolideringstrycket varierar i de olika riktningarna.

Lika viktigt är att det finns ett visst teoretiskt stöd för empirin, som åskådliggjorts i den s.k. förenklade flytytan. Det finns således ett visst 'teoretiskt fog' för att de empiriska formlerna skall vara giltiga.

