

## SÅ KAN VI MINSKA OSÄKERHETEN I GEOTEKNISKA UNDERSÖKNINGAR – CC-TESTET SOM AVSLÖJAR VARIATION OCH STÄRKER METODERNAS TILLFÖRLITLIGHET

*Peter Hedborg 1<sup>A</sup>, Karin Bergroth 2<sup>A</sup>*

<sup>A</sup> **AFRY**

### SAMMANFATTNING

Den odränerade skjuvhållfastheten i kohesionsjord är en grundläggande parameter vid dimensionering och riskbedömning. Samtidigt baseras etablerade laboriemetoder som fallkon och DSS på provsegment som endast representerar en begränsad del av jordprovet, vilket innebär att variationer längs hela provsektionen inte fångas. Clay Cutting Testet (CCT) är en snabb och repeterbar metod där en 0,25 mm tråd skär genom jordprovet med konstant hastighet och genererar högupplösta hållfasthetsprofiler. Genom två ortogonala snitt kan både anisotropi och naturlig variation bestämmas direkt.

CCT har kalibrerats mot fallkon, DSS, CRS och triaxiella försök. En 4–40 m referensprofil i Kungsbacka, vald för sin mycket homogena kohesionsjord, har möjliggjort metodjämförelser utan att naturlig variation dominerar resultaten. Resultaten uppvisar en hög grad av överensstämmelse mellan metoderna och bekräftar CCT:s stabilitet samt dess potential att minska osäkerheten i geotekniska undersökningar. Metodens höga datatäthet gör det möjligt att utvärdera en större del av provets struktur än med traditionella tester, vilket ökar representativiteten i provutvärderingen och ger ett stabilare underlag för geotekniska bedömningar samt bidrar till minskad osäkerhet.

### SUMMARY

Undrained shear strength in cohesive soils is a fundamental parameter in geotechnical design and risk assessment. At the same time, established laboratory methods such as the fall cone and DSS are based on test segments that represent only a limited portion of the soil sample, meaning that variations along the full specimen are not captured. The Clay Cutting Test (CCT) is a fast and repeatable method in which a 0.25 mm wire cuts through the soil sample at constant speed, producing high-resolution strength profiles. Two orthogonal cuts allow direct detection of anisotropy and natural variation.

The CCT has been calibrated against the fall cone, DSS, CRS, and triaxial tests. A 4–40 m reference profile in Kungsbacka—selected for its highly homogeneous cohesive

soil—enabled comparisons between methods without interference from natural variability. The results show a high degree of agreement between the methods and confirm CCT's stability as well as its potential to reduce uncertainty in geotechnical investigations. The high data density allows a larger portion of the specimen to be evaluated compared with traditional tests, increasing representativeness in the strength assessment and providing a more stable basis for geotechnical evaluations while contributing to reduced uncertainty.

## 1 INLEDNING

Bestämningen av odränerad skjuvhållfasthet är en centrala parametrarna inom geoteknisk projektering. Osäkerheter i denna parameter påverkar såväl dimensioneringen av konstruktioner som riskbedömningen vid grundläggningsarbeten. Trots dess betydelse baseras dagens etablerade laboriemetoder – främst fallkonförsök och direkta enkel-skjuvförsök (DSS) – på mätprinciper som i praktiken endast undersöker en mycket begränsad del av provvolymen. Detta innebär att metoderna har relativt låg upplösning och begränsad förmåga att fånga jordens naturliga interna variationer. I sensitiva eller siltiga leror, där små störningar och strukturförändringar kan ha stor betydelse, blir denna begränsning särskilt tydlig eftersom sådana variationer ofta förblir helt osynliga i mätresultaten.

I känsliga, varviga eller anisotropa leror, där skjuvhållfastheten kan variera med riktningen, riskerar dessa metoder dessutom att missa variationer som uppträder över mycket korta avstånd. När hållfastheten förändras inom intervall som faller inom metodernas egen mätosäkerhet – ibland mindre än fem procent – upptäcks de helt enkelt inte. Detta innebär att betydelsefulla detaljer i jordens mekaniska beteende riskerar att utelämnas i den geotekniska analysen. I en bransch där både säkerhet och kostnadseffektivitet är direkt beroende av ett tillförlitligt hållfasthetsunderlag utgör dessa begränsningar en tydlig utmaning.

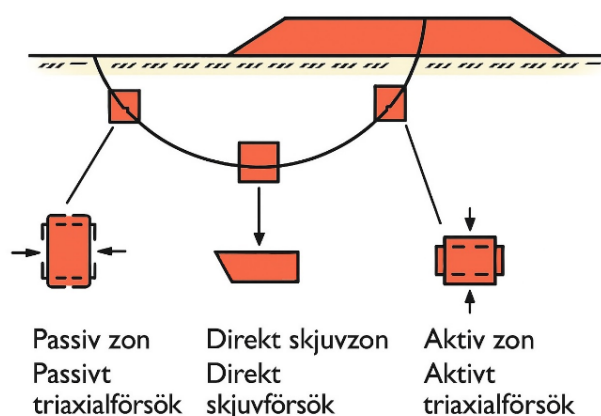
För att bättre kunna karakterisera kortsikliga variationer och riktningens beroende egenskaper finns därför ett tydligt behov av metoder som erbjuder högre upplösning och mer detaljerad information än traditionella laborietester. Clay Cutting Test (CCT), på svenska CC-testet, har utvecklats för att möta just detta behov. Metoden bygger på att en tunn tråd skär genom provet med konstant hastighet och registrerar det motstånd som uppstår längs hela snittet. Genom att utföra två vinkelräta snitt på varje nivå erhålls både duplikata mätningar och möjlighet att identifiera anisotropi – något som är mycket svårt att påvisa med konventionella metoder.

Kombinationen av hög upplösning, god repeterbarhet och riktad information gör att CCT kan belysa variationer som annars riskerar att förbises. Därmed utgör metoden ett värdefullt verktyg för att förbättra hållfasthetsbedömningen i geotekniska undersökningar och minska den totala osäkerheten i dagens provningsmetoder.

## 2 TEORETISK BAKGRUND

### 2.1 Odränerad skjuvhållfasthet

Den odränerade skjuvhållfastheten varierar med belastningsriktningen på motsvarande sätt som förkonsolideringstrycket varierar med riktning. Vanligtvis delas den odränerade skjuvhållfastheten in i tre belastningsfall: aktiv, direkt och passiv skjuvning, vilket ofta illustreras i ett skjuvdiagram (Figur 1).



Figur 1: Skjuvzonsfördelning för passiv, direkt och aktiv skjuvning, motsvarande belastningsfallen i passivt triaxialförsök, direkt skjuvförsök och aktivt triaxialförsök

I geoteknisk praxis beskrivs den odränerade skjuvhållfastheten ofta med ett empiriskt samband kopplat till effektivspänning och överkonsolideringsgrad (OCR). Sambandet utvecklades ursprungligen inom SHANSEP-metodiken (Ladd & Foott, 1974) och används i svensk praxis enligt SGF (2004) och SGI (Larsson, 2011).

Den kan uttryckas som:

$$c_u = a \cdot \sigma'_c \cdot OCR^b \quad (1)$$

eller med vertikal effektivspänning in situ:

$$c_u = a \cdot \sigma'_{v0} \cdot OCR^b \quad (2)$$

Faktorerna  $a$  och  $b$  beskriver jordens respons. Faktor  $b$  varierar vanligtvis mellan 0,7 och 0,9 och antas ofta vara 0,8 vid praktisk dimensionering. Faktor  $a$  beror på

jordart och belastningsfall. För lera används ofta följande empiriska värden (SGI och SGF):

- Aktiv skjuvning:  $a \approx 0,33$
- Direkt skjuvning:  $a \approx 0,125 + 0,205 \cdot (w_1 / 1,17)$
- Passiv skjuvning:  $a \approx 0,055 + 0,275 \cdot (w_1 / 1,17)$

Detta innebär att den odränerade hållfastheten styrs av flera faktorer, framför allt jordtyp, belastningsfall, förkonsolideringstryck och överkonsolideringsgrad.

## 2.2 Empiriska modeller inom geotekniken

Mycket av dagens geotekniska dimensioneringsmodeller bygger på empiriska samband som utvecklats genom omfattande laboratorie- och fältförsök. För att öka modellernas tillförlitlighet krävs både förfinad förståelse och bättre referensmaterial, där den naturliga variationen har så liten påverkan som möjligt. Detta är särskilt viktigt vid analys av skjuvhållfasthet i kohesionsjord, där traditionella metoder ofta bygger på antaganden som sällan fångar jordens komplexa beteende.

## 2.3 Statistisk osäkerhet inom geoteknik

Geotekniska parametrar, till exempel skjuvhållfasthet i lera, kan bestämmas genom fält- och laboratorieundersökningar. Då mätningar aldrig helt kan representera markens verkliga variation måste osäkerheter både korrigeras och kvalificeras (Prästings, 2019).

Dessa osäkerheter delas traditionellt in i:

- Aleatoriska osäkerheter: naturliga variationer i jordens egenskaper som inte kan påverkas.
- Epistemiska osäkerheter: kunskapsbrist eller metodbegränsningar som kan reduceras genom bättre mätningar.

Enligt Ang & Tang (2006) och Baecher & Christian (2003) kan statistiska metoder delas upp i två skolor:

1. Frekventistiskt synsätt – Osäkerhet behandlas som en okänd men fix parameter.
2. Bayesianiskt synsätt – Osäkerhet behandlas som en sannolikhet och tidigare erfarenheter vägs in i analysen.

För geotekniska tillämpningar anses det bayesianska synsättet vara mest lämpligt eftersom det bättre hanterar komplexa jordmaterial och möjliggör integrering av erfarenhetsdata.

## 2.4 Mätosäkerheter och metodbegränsningar

SGI genomförde 2015 en omfattande analys av mätosäkerheter i geotekniska laboriemetoder (Ezziyani et al., 2015). Arbetet utfördes enligt svensk standard och syftade till att identifiera samtliga relevanta osäkerhetskällor. För varje metod analyserades mätstorhet, spridningsbidrag, sannolikhetsfördelning, standardmätosäkerhet, känslighetsfaktor samt total standardosäkerhet. Resultaten visade att även etablerade metoder som fallkon, DSS och UCT uppvisar betydande spridning — både på grund av instrumentella begränsningar och provens naturliga heterogenitet.

Dessa osäkerheter tydliggör behovet av kompletterande metoder som kan ge en mer detaljerad bild av provets interna variation. Här fyller CC-testet (CCT) en särskilt viktig funktion. Till skillnad från traditionella laboriemetoder, som endast ger ett enda skjuvhållfasthetsvärde per provkropp, genererar CCT en kontinuerlig profil längs hela snittet genom provet. Förmågan att registrera variationer på millimeter- till centimeternivå gör det möjligt att skilja mellan metodrelaterad spridning och verkliga mikrostrukturella skillnader i kohesionsjord.

Detta demonstrerades tydligt i Bergroths examensarbete (2025), där CCT jämfördes med fallkon, DSS och UCT i identiska prov. Studien visade att CCT konsekvent identifierade lokala svaghetszoner, variationer kopplade till provlagring och återkommande oscillerande mönster i djupa prov (20–35 m). Dessa variationer upptäcktes inte med fallkon eller UCT. Den interna variation som CCT registrerade kunde kopplas till verkliga mikrostrukturella skillnader snarare än mätosäkerhet. Bergroth visade dessutom att CCT har mycket hög reproducerbarhet — både inom samma prov och mellan vinkelräta snitt (CC1/CC2) — vilket ytterligare stärker metodens roll som kvalitetskontroll i provserier.

Sammantaget innebär detta att CCT kan fungera som ett internt referenstest som kompletterar traditionella laboriemetoder på tre centrala sätt:

1. Kvalitetssäkring mellan provtuber: CCT-profiler visar om prov från samma nivå är representativa eller om tuberna avviker.
2. Verifiering av avancerade laborietester: Genom att indikera om DSS, CRS eller TRIAX råkat träffa ett ovanligt starkt eller svagt segment i provet.
3. Reduktion av epistemisk osäkerhet: Genom att synliggöra provets naturliga heterogenitet snarare än att denna döljs bakom metodspridning.

SGI:s mätosäkerhetsanalys tillsammans med Bergroths examensarbete visar att CCT inte ersätter etablerade metoder, men tillför en unik informationsnivå som är central för att förstå och hantera mätosäkerhet i geotekniska undersökningar.

## 3 METOD

### 3.1 Metodöversikt

CC-testet är utvecklat som ett snabbt, högupplöst och praktiskt komplement till etablerade laboriemetoder som fallkon, DSS och triaxiella försök. Metoden bygger på att en mycket tunn tråd förs genom lerprovet med kontrollerad hastighet, vilket möjliggör kontinuerlig registrering av skjuvmotstånd längs hela provets längd.

En central egenskap hos testet är snittgeometrin. Tråden, som typiskt har en diameter på 0,25 mm och en effektiv skärlängd på cirka 50 mm, ger ett förhållande mellan diameter och längd som skapar en extremt koncentrerad och väldefinierad skjuvyta. Kontaktarean begränsas till ungefär halva trådens mantelyta, vilket gör att skjuvningen sker längs en mycket smal zon med minimal friktion och med *nästan inga sidoeffekter*. Den låga friktionspåverkan innebär att mätningen i praktiken domineras av lerans odränerade skjuvhållfasthet, utan behov av omfattande friktionskorrigeringar.

Detta är en av de tydligaste skillnaderna mot konventionella metoder. Både fallkon och DSS kräver i praktiken kalibreringar eller korrigerings-faktorer för att ta hänsyn till friktion och materialparametrar. För fallkonen är exempelvis konflytgränsen ( $w_L$ ) den styrande parametern som används för att anpassa skjuvhållfasthet till provets plastiska egenskaper.

### 3.2 Provberedning

En av CCT-metodens största styrkor är att provberedningen är direkt och okomplicerad. Till skillnad från mer avancerade laboriemetoder — såsom DSS och triaxiella försök — som kräver tid, erfarenhet och känslig provhantering vid montering, kan CCT utföras direkt på det uttagna provet utan ytterligare bearbetning.

I Sverige erhålls ostörda jordprover vanligen genom standardiserad kolvprovtagning, vilket genererar tre provtuber per meter: en över-, mellan- och undertub. Varje tub har en invändig diameter på cirka 50 mm och en provlängd runt 170 mm. CCT kan utföras:

- direkt på hela tublängden,
- eller på valfri del av provet,
- utan inpassning eller omfattande hantering.

Denna enkla provberedning minimerar störningar och säkerställer att de naturliga variationer som finns i kohesionsjorden inte påverkas av provpreparationen. Samtidigt möjliggör den en direkt och konsekvent jämförelse mellan över-, mellan- och undertuber från samma nivå — något som är svårt att uppnå med

traditionella tester, där provet ofta måste kapas, trimmas eller monteras i en cell innan mätningen kan göras.

Det är just denna praktiska och störningsfria hantering som från början inspirerade utvecklingen av CCT: idén uppstod från det tydliga motstånd som kändes när prov trådtrimmades inför andra laboriemetoder. Genom att låta detta moment bli själva mätprincipen skapades ett snabbt och högupplöst sätt att registrera hållfasthetsvariationer i provet, utan att provet behöver monteras eller förberedas i flera steg.

### 3.3 Utrustning

CC-testet utförs med en högupplöst apparatur konstruerad för bestämning av odränerad skjuvhållfasthet i lera. En styv ram utgör referensstruktur för skärtråden och den linjärstyrning som säkerställer en exakt och kontrollerad genomskärning av provet.

Skärtråden inspänns i en specialtillverkad gaffel, där spännskruvar dras åt med momentnyckel för att uppnå korrekt och reproducerbar förspänning av tråden. Denna metod säkerställer konstant trådförsträckning och exakt linjering inför varje snitt.

Utrustningen registrerar skjuvmotståndet kontinuerligt med en samplingsfrekvens över 100 Hz. En returhastighet på 200 mm/min används för att minimera tidsförluster vid provbyten.

Apparaten är monterad på ett XYR-bord som möjliggör 90° rotation av provet mellan snitt samt finjusterad positionering via mikrometerskruvar (Figur 2).



Figur 2: Huvudkomponenter: 1) lastcell, 2) provhållare, 3) CCT-gaffel, 4) trådinspännare, 5) linjärstyrning. Till höger visas den kompletta utrustningen.

### 3.4 Testprocedur

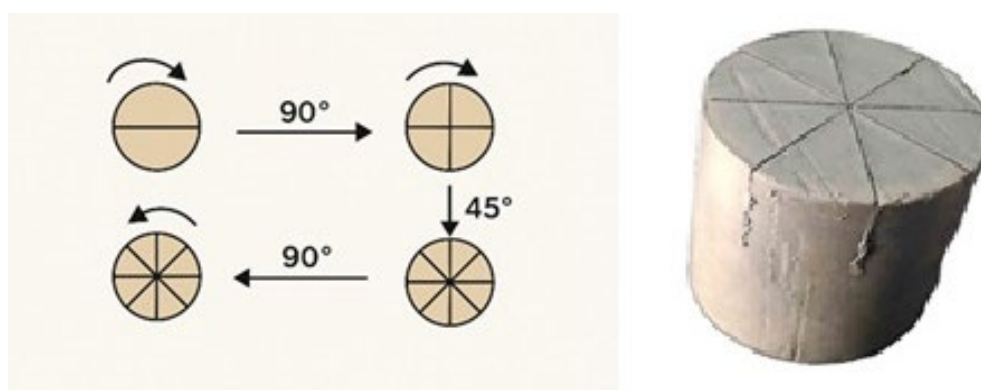
#### 3.4.1 Skärriktningar

CC-testet utförs genom att en tunn tråd skär genom provet med konstant hastighet, samtidigt som skjuvmotståndet registreras kontinuerligt och ger en högupplöst hållfasthetsprofil. För att fånga räkningsberoende variationer utförs två snitt i vinkelräta riktningar (Figur 3):

- 0°-snitt längs provets längdaxel
- 90°-snitt efter rotation av provet i XYR-bordet

Dessa två profiler är vanligtvis tillräckliga för att identifiera anisotropi och kortskalliga heterogeniteter i leran.

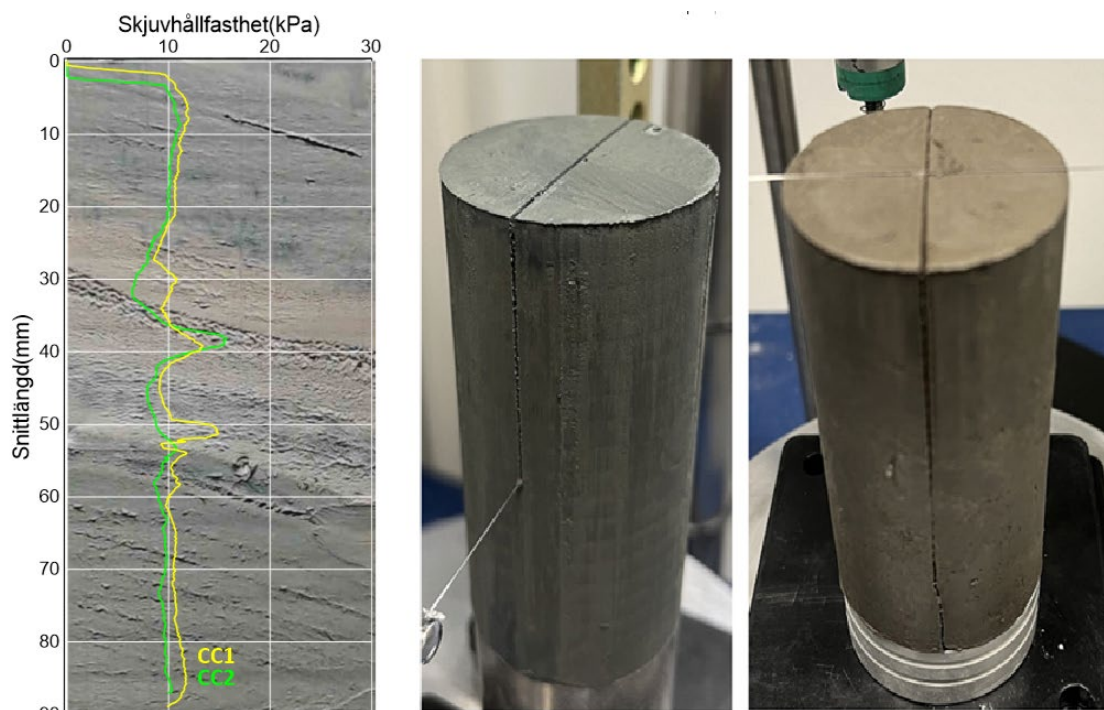
Vid tydliga skillnader mellan 0°- och 90°-profilerna rekommenderas två ytterligare snitt med 45° rotation, vilket ger totalt fyra skärriktningar. Denna utökade serie används främst i känsliga, varviga eller strukturerade leror där anisotropin förväntas vara mer uttalad.



Figur 3: Skärriktningar i CC-testet

#### 3.4.2 Fotodokumentation och koppling till skjuvprofiler

Varje snitt fotodokumenteras systematiskt med hög upplösning direkt efter att tråden skurit genom provet. Bildmaterialet jämförs sedan med den motsvarande skjuvkurvan (Figur 4), vilket gör det möjligt att visuellt identifiera strukturella element såsom skikt, sprickor, färg- och texturvariationer samt eventuella skalrester. Genom att jämföra snitt tagna med 90 graders rotation kan anisotropi påvisas och kvantifieras, samtidigt som dokumentationen ger ett underlag för jordartsbedömning.



Figur 4 Fotodokumentering och resultatredovisning

### 3.4.3 Skärhastighet

De initiala testerna med CC-metoden utfördes vid 1, 5 och 10 mm/min och visade att högre hastigheter gav skjuvhållfasthetsvärden som bättre överensstämde med den okorrigerade fallkonen, medan lägre hastigheter tenderade att ge något högre värden. En utvidgad studie med 20, 40 och 80 mm/min visade därefter att resultaten var stabila inom detta intervall, medan hastigheter över 80 mm/min gav minskat motstånd då leran inte hinner sluta sig bakom tråden vid mycket snabba snitt.

Denna trend bekräftades även i Bergroths examensarbete (2025), som visade att skärhastigheter kring 40 mm/min ger stabila, reproducerbara resultat och god överensstämmelse med både fallkon och DSS.

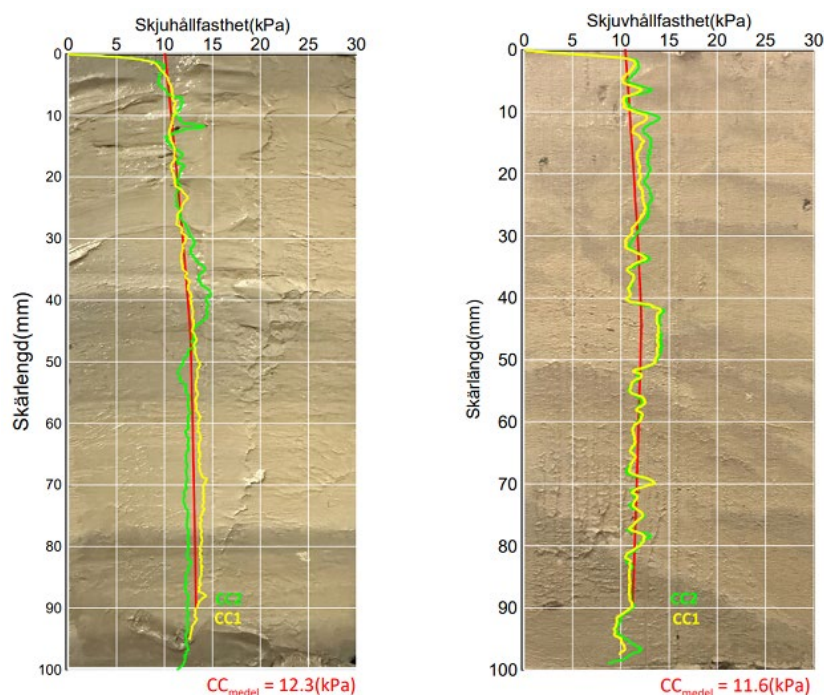
Sammantaget fastställdes 40 mm/min som en optimal och robust standardhastighet för CC-testet.

### 3.4.4 Utvärdering av CC-Testet

Utvärderingen av CC-testet bygger på att två tester (CC1 och CC2) utförs i samma provkropp. Skjuvhållfastheten registreras kontinuerligt längs provets längd, och medelvärde från de två testerna visas som den röda linjen.

Två exempel (Figur 5) från olika provdjup där testerna utförts på en provhöjd om 100 mm. Resultaten visar god repeterbarhet mellan CC1 och CC2, vilket indikerar att metoden ger stabila och reproducerbara värden. Båda testserierna visar dessutom

hur den naturliga variationen utvecklas genom provet, vilket framgår av de småskaliga förändringarna i skjuvhållfasthet längs hela provhöjden.



Figur 5 Två exempel på CC-tester utförda på 100 mm provhöjd från två olika provdjup. De två individuella testerna (CC1 och CC2) visas med gröna och gula kurvor, medan den röda linjen representerar medelvärdet av testerna.

### 3.5 Framtagning och validering av CC-testets skjuvhållfasthetssamband

För att möjliggöra beräkning av odränerad skjuvhållfasthet från CC-testet utvecklades ett särskilt hållfasthetssamband baserat på både skärgeometri och jämförande laboriemätningar. Eftersom skjuvningen i CC-testet sker längs en mycket smal zon runt skärtråden definierades den effektiva skjuvytan som halva mantelytan, vilket gav den initiala relationen mellan uppmätt skärkraft och skjuvhållfasthet.

Denna relation jämfördes därefter med resultat från fallkonförsök okorrigerad skjuvhållfasthet och DSS-tester utförda i identiska provkroppar. Jämförelserna visade god överensstämmelse men indikerade samtidigt behovet av en skalfaktor för att harmonisera resultaten med SI-enheter och möjliggöra användning av trädens tvärsnittsarea i det slutliga sambandet.

Genom analys av geometri, areaförhållandet mellan skjuvyta och trådtvärsnitt samt omvandling från kilogram till Newton härleddes en empirisk faktor  $N_{CC} = 15,7$ .

Det slutliga, SI-anpassade hållfasthetssambandet uttrycks därefter som:

### 3.5.1 Ekvation 1

$$s_{u,CC} = \frac{F}{N_{CC} \cdot A_T} \quad (1)$$

Där

$s_{u,CC}$  = CC-test odränerad skjuvhållfasthet(kPa) enligt ekvation (1)

$F$  = uppmätt skärkraft (N)

$A_T$  = trådens tvärsnittsarea (m<sup>2</sup>)

$N_{CC}$  = empirisk kalibreringsfaktor

Sambandet har validerats genom fler än 500 CC-tester utförda i kombination med både fallkon och DSS, och visar mycket god överensstämmelse samt hög reproducerbarhet.

## 4 RESULTAT

### 4.1 Validering av CCT mot fallkon

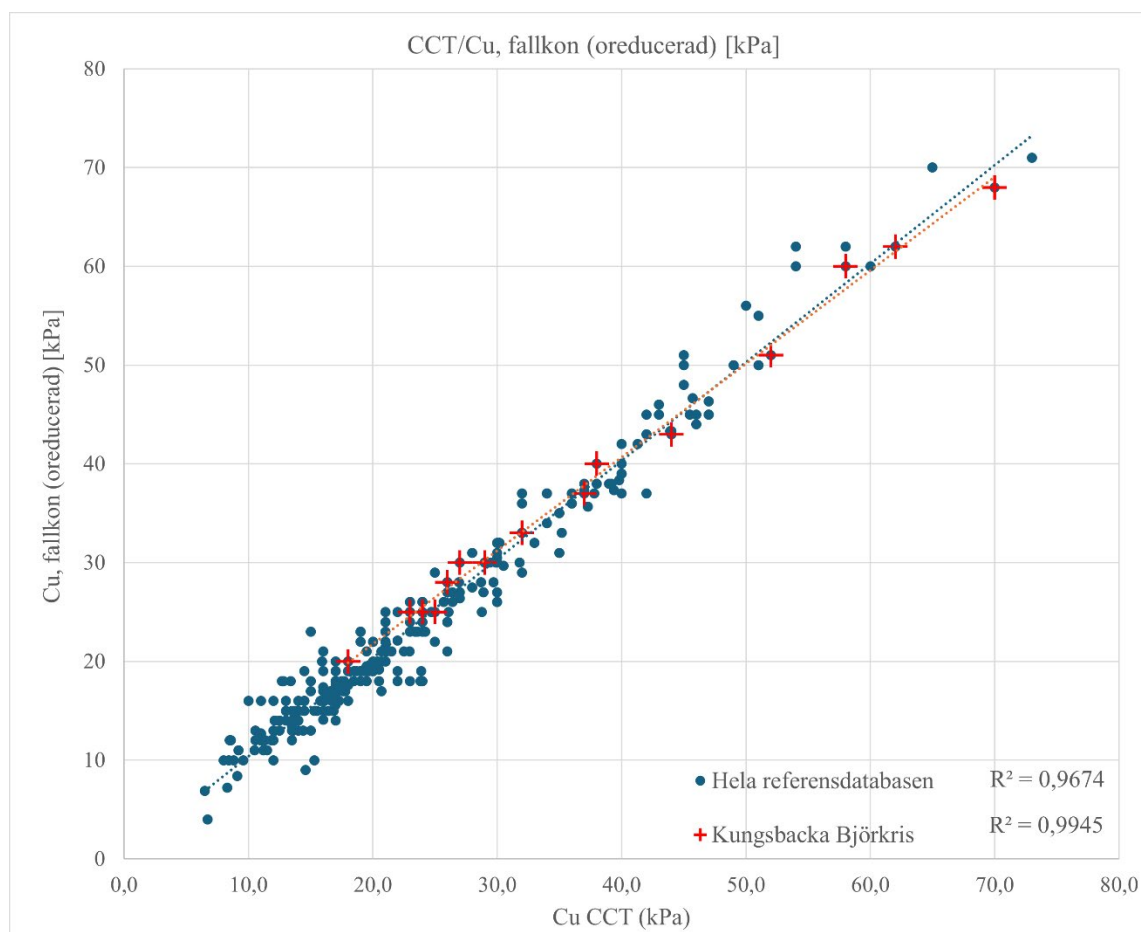
Fallkonmetoden är en av de mest etablerade och använda metoderna för bestämning av odränerad skjuvhållfasthet i svenska leror. Jämförelsen i (Figur 6) mellan CC-testet och den okorrigerade fallkonen baseras både på ett omfattande referensmaterial och på resultat från Kungsbackaprofilen.

Grafen visar en mycket stark linjär relation mellan metoderna, där CC-testets hållfasthetsvärden korrelerar nära med fallkonens uppmätta  $C_u$  (okorrigerad). För hela datamängden erhöles ett  $R^2$ -värde på 0,967, vilket är anmärkningsvärt högt med tanke på den naturliga variation som förekommer i finkorniga jordar.

För Kungsbacka Björkris erhöles ett än högre  $R^2$ -värde på 0,995, vilket visar att CC-testet i denna profil nästan exakt följer fallkonens respons. Kungsbackapunkterna (markerade i rött) ligger tätt längs regressionslinjen, vilket indikerar mindre påverkan av den naturliga variationen i jorden.

Sammanfattningsvis visar jämförelsen mot fallkon att CC-testet har mycket hög methodsamstämmighet, både för hela datamängden och specifikt för Kungsbackaprofilen. Tester utförda i jordar med högre organiskt innehåll visar dock en viss återkommande avvikelse mellan metoderna, där den okorrigerade fallkonen i flera fall tenderar att indikera något högre hållfasthet än CC-testet. När

fallkonvärdena korrigeras minskar skillnaden, och resultaten visar i större utsträckning överensstämmelse med CCT-värdena.



Figur 6 Samband mellan CC-testet och odränerad skjuvhållfasthet ( $C_u$ ) från fallkon, okorrigerade värden.

## 4.2 Validering av CCT mot DSS

Direkt enkel skjuvning (DSS) är en etablerad metod för bestämning av odränerad skjuvhållfasthet, men metoden är samtidigt känslig för störningar i både provhantering och inmontering i utrustningen. Detta gäller i synnerhet för siltiga jordar, där materialets struktur påverkas lätt av små deformationer och störningar. Dessa faktorer kan ge mätvärden som avviker från den verkliga odränerade hållfastheten.

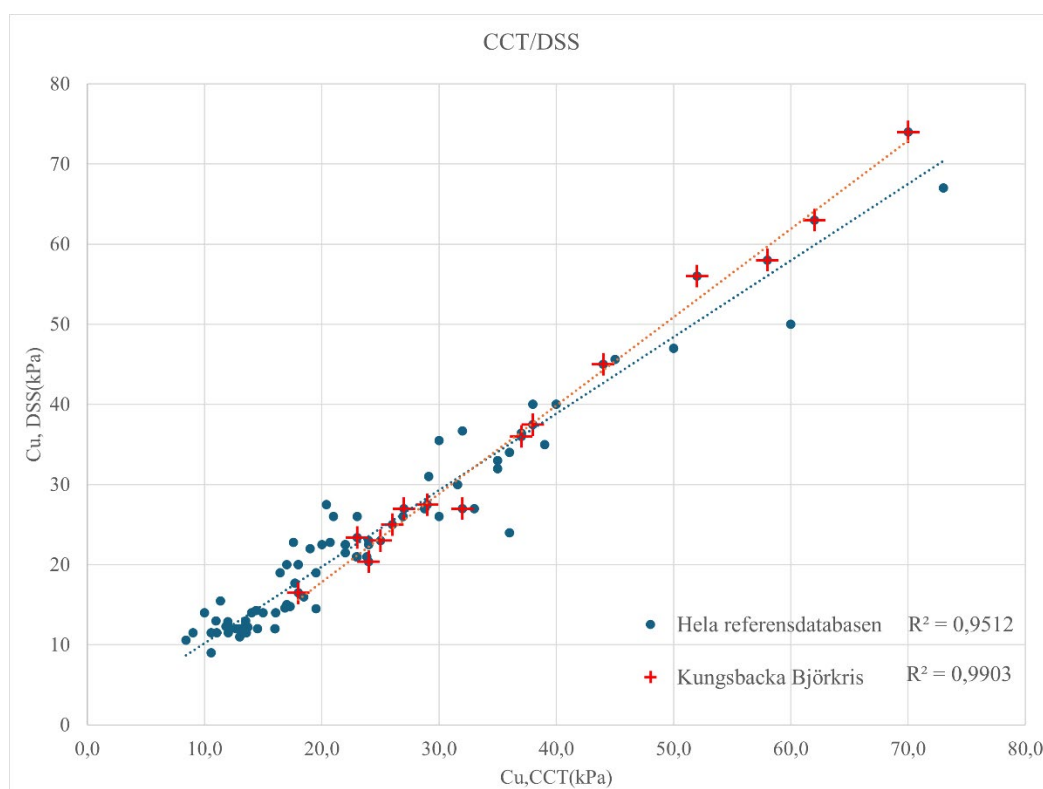
Jämförelsen mellan CC-testet (Figur 7) uppskattade odränerade hållfasthet och DSS-metodens  $C_u$ -värden. Trots DSS-metodens störningskänslighet uppvisar resultaten en tydlig och stabil linjär relation mellan metoderna. För hela datamängden erhöles ett  $R^2$ -värde på 0,951, vilket indikerar en stark överensstämmelse. Datapunkterna från Kungsbacka visar ett ännu högre

samband,  $R^2 = 0,990$ , vilket tyder på att CCT på ett robust sätt fångar samma hållfasthetstrender som DSS även där DSS-resultaten normalt kan variera.

Kungsbackapunkterna ligger nära regressionslinjen, vilket visar att:

- CCT fångar samma hållfasthetstrend som DSS, även i jordar där DSS är extra känsligt för störningar,
- CCT:s kontinuerliga snittning ger ett stabilt och representativt mått på odränerad hållfasthet, oberoende av små variationer i provets kondition vid inmontering.

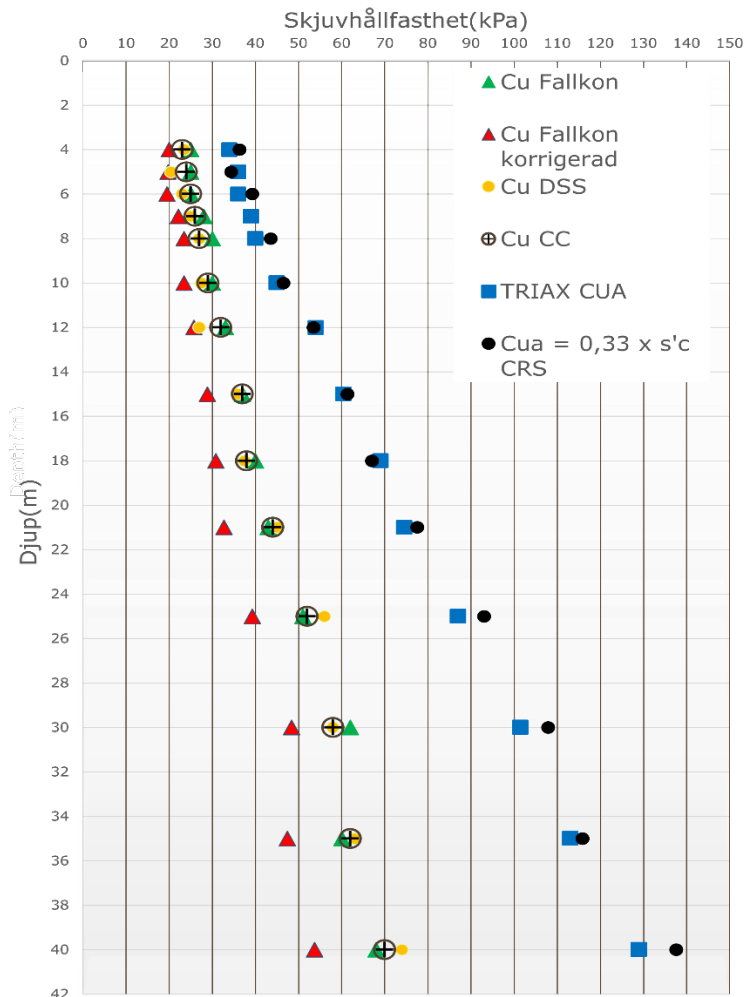
Vissa nivåer hamnar något under 1:1-linjen, vilket är förväntat då DSS ofta mobiliserar en något lägre hållfasthet vid större deformationer. Trots detta uppvisar metoderna en konsekvent och stabil relation inom intervallet 10–70 kPa. Sammantaget visar jämförelsen att CC-testet fungerar som ett tillförlitligt och kompletterande referensvärde till DSS, särskilt vid utvärdering av intern variation längs provkroppen och för material där DSS-responsen är känslig för störning.



Figur 7: Samband mellan CC-testet och DSS

### 4.3 Kungsbacka homogen referensprofil

En central uppgift i arbetet har varit att identifiera en lerprofil med tillräckligt låg naturlig variation ner till cirka 40 m djup, så att jämförelser mellan olika hållfasthetsmetoder kan genomföras utan att resultaten påverkas av geologiska skillnader i materialet. Efter analys av provmaterial från flera projekt identifierades en ovanligt homogen och strukturellt stabil lera i Björkrisområdet i Kungsbacka. Rutinparametrar visade mycket små skillnader mellan nivåer, och inga tydliga skiktningar eller abrupta förändringar kunde observeras inom intervallet 4–40 m. Detta gjorde profilen särskilt lämpad för metodjämförelser, kalibreringar och analys av empiriska samband under kontrollerade naturliga förhållanden. Efter att profilens homogenitet verifierats genomfördes en omfattande provningsserie med 15 CRS-försök, 15 DSS-försök, 15 triaxiella CUA-försök, 7 CUP-försök, 15 rutinserier samt CC-test i både 0° och 90° på varje nivå (Figur 8).



Figur 8 Hållfasthets samband från Kungsbacka profilen.

## 5 DISKUSSION

Utvecklingen och tillämpningen av CC-testet i denna studie indikerar att metoden kan bidra till att minska osäkerheten i geotekniska undersökningar och stärka kopplingen mellan laboratorie- och fältbaserade metoder. Genom att registrera skjuvhållfasthet kontinuerligt längs hela provtubens längd ger CC-testet en betydligt större provrepresentativitet än traditionella index försök exempelvis fallkontest som endast representerar en mycket begränsad materialvolym.

Studiens grundläggande utgångspunkt var att undersöka hur olika hållfasthetsmetoder förhåller sig till varandra under förhållanden där materialets naturliga variation är låg nog för att metodspecifika skillnader ska kunna urskiljas. Kungsbackaprofilen visade sig särskilt lämpad för detta ändamål. Dess höga naturliga homogenitet gjorde det möjligt att i högre grad frikoppla metodernas egenskaper från geologisk variation, vilket i normala profiler ofta utgör det dominerande osäkerhetsmomentet.

CC-testet hade en central funktion i att identifiera nivåer med tillräckligt låg variation. Genom att analysera under-, mellan- och övertub separat kunde både provstörning och strukturella skillnader upptäckas. Endast nivåer med konsekvent respons användes vidare i laboratorietesterna, vilket ökade representativiteten och skapade mer rättvisa förutsättningar för metodjämförelser. Denna systematik visade också att även leror som betraktas som homogena uppvisar mätbar intern variation, vilket är relevant att beakta i framtida utredningar.

De jämförda laboriemetoderna—CRS, DSS, fallkon, CC och triaxiella CUA-försök—uppvisade genomgående parallella trender genom profilen. Att okorrigerad fallkon, DSS och CC visade så god överensstämmelse tyder på att de i denna profil fångar det odränerade beteendet på ett likartat sätt. Den låga anisotropin i CC-testet mellan 0° och 90° förstärker bilden av att materialet är relativt isotrop på den skjuvningsskala som testet representerar.

CRS-resultaten visade en nära linjär utveckling av förkonsolideringstrycket, vilket bekräftar att leran i profilen är normalkonsoliderad och strukturellt jämn. Detta gav goda möjligheter att studera empiriska samband med högre noggrannhet än vad som normalt är möjligt. Sambandet  $s_u = 0,33 \cdot \sigma'_c$  visade tydlig överensstämmelse med CUA-värdena—ett resultat som ofta döljs i mer heterogena jordlager där variation och störning begränsar tolkningen.

Övergripande visar resultaten att Kungsbackaprofilen är en värdefull referensprofil för att belysa metodspecifika skillnader och för att studera empiriska samband under kontrollerade förhållanden. Kombinationen av låg materialvariation och hög testtäthet möjliggjorde en ovanligt tydlig jämförelse mellan metoderna. CC-testets roll i detta sammanhang är särskilt viktig, då metoden kan fungera som ett verktyg för att bedöma provens representativitet, komplettera index tester och stärka kopplingen mellan fält- och laborieresultat i framtida geotekniska undersökningar.

## 6 SLUTSATSER

Studien visar att CC-testet kan ge en mer representativ bestämning av odränerad skjuvhållfasthet genom att täcka en betydligt större del av provmaterialet än traditionella index tester. I Kungsbackaprofilen möjliggjorde detta identifiering av homogena nivåer och skapade goda förutsättningar för jämförelser mellan DSS, fallkon, CC och triaxiella försök.

En central observation är att den korrigerade fallkonhållfastheten låg på en lägre nivå än övriga metoder. Resultaten indikerar att den empiriska korrigeringen, i kombination med att fallkonen representerar en mycket begränsad provvolym, kan leda till en undervärdering av skjuvhållfastheten i profiler med låg naturlig variation.

Sammantaget visar studien att CC-testet är ett användbart verktyg för att minska osäkerheter kopplade till provvolym och materialvariation, och att det kan bidra till att stärka kopplingen mellan fältmätningar och laboratorietester. Kungsbackaprofilens homogenitet har samtidigt visat sig värdefull för att tydliggöra metodspecifika skillnader och för att skapa bättre förutsättningar för utvärdering av empiriska samband i framtida geotekniska undersökningar.

## 7 REFERENSER

Ang, A.H-S. & Tang, W.H. (2006). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design. Volume II: Decision, Risk, and Reliability*. Wiley, New York.

Baecher, G.B. & Christian, J.T. (2003). *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. Wiley, Chichester.

Bergroth, A. (2025). *Utvärdering av CCT som metod för bestämning av skjuvhållfasthet i lera*. Examensarbete, Chalmers tekniska högskola, Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik.

Ezziyani, F., Carlson, K., Fransson, B. & Bergdahl, U. (2015). *Utvärdering av mätosäkerheter i geotekniska laboriemetoder*. Statens geotekniska institut (SGI), Linköping.

Ladd, C.C. & Foott, R. (1974). "New design procedure for stability of soft clays." *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 100(GT7), 763–786.

Larsson, R. (2011). *Odränerad skjuvhållfasthet i svenska leror*. SGI Rapport, Linköping.

Phoon, K.K. & Kulhawy, F.H. (1999). "Characterization of geotechnical variability." *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), 612–624.

Prästings, A. (2019). *Hantera osäkerheter i geotekniska undersökningar*. SGI Publikation, Linköping.