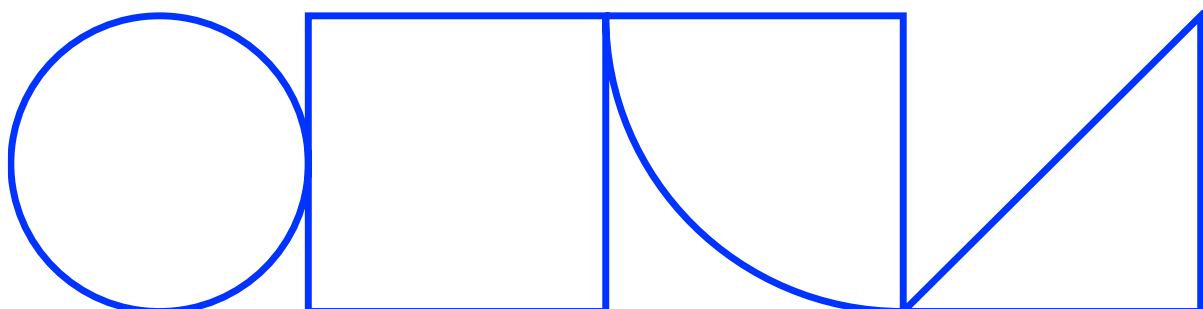


Experimental Characterisation of Drained Properties of Skåne Clay Till

Yohanes Armediaz
Lund Tekniska Högskola

Februari 2024



Förord

The research project has been jointly financed by Svenska byggbranschens utvecklingsfond (SBUF) and Branschsamverkan i grunden (BIG).

The author would like to express his deepest appreciation to his supervisors, Erika Tudisco, Minna Karstunen and Per Lindh, who have willingly spent their time to provide invaluable help to the project, without which the project would not be feasible.

The author would like to thank members of the reference group for providing guidance and assistance to the project. The members of the reference group are:

- Nils Rydén PEAB-LTH
- Kristy Heng Trafikverket
- Daniel Baltrock C3S Miljoteknik (previously PEAB)
- Anders Emanuelsson NCC (replacing Lars Nilsson)
- Sven Liedberg SKANSKA
- Mats Svensson Tyréns
- Ann Dueck Claytech
- Henrik Möller Henrik Möller Geokonsult AB

The author would also like to show his gratitude to people outside the reference group (Martin Holmén from SGI, Magnus Palm from Tyréns, Håkan Lindgren from Sweco) who have also provided inputs into the project which has helped immensely

Yohanes Armediaz, Lund, February 2024

Sammanfattning

I svensk praxis uppskattas de dränerade egenskaperna hos lermorän (som är ett material som är känt för sin variation) med ett förenklat antagande som inte tar hänsyn till materialets variation. Det är dock viktigt att få mer exakta mekaniska parametrar för jorden, inte bara för att undvika överdimensionerade konstruktioner, utan också för att undvika problem när infrastrukturen växer för att tillgodose samhällsutvecklingen. I denna studie beskrivs en experimentell program som omfattar geoteknisk provning i både fält och laboratorium för att karakterisera de dränerade egenskaperna hos lermorän. Skanning utförs också för att bättre förstå hur jorden beter sig under skjuvning. Resultaten har visat att hållfastheten potentiellt är högre än den som uppskattas med nuvarande antaganden. Analys av bilderna har också gett insikter om hur stenarna påverkar jordens skjuvningsegenskaper.

Summary

Currently in Swedish practice, drained properties of clay till (which is a material known for its variability) is estimated with a simplistic assumption that does not account for enough variation. Nevertheless, it is important to obtain a more precise mechanical parameters of the soil, not only to avoid overdesigned structures, but also to avoid failure, as infrastructure grows to cater to the development of society. This study sets out an experimental campaign involving both field and laboratory geotechnical testing to characterise the drained properties of clay till. Imaging is also performed to better understand how the soil behave under shearing. Results have shown that the strength is potentially higher than the one estimated with current assumptions. Analysis on the images has also provided insight on how the inclusions are affecting the shearing behaviour of the soil.

Innehållsförteckning

Förord	
Sammanfattning	
Summary	
Innehållsförteckning	
1. Introduktion	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Begränsning	1
1.4 Rapportens organisation	2
2. Litteraturstudie	3
2.1 Tidigare Forskning om Lermorän	3
2.2 Studieomfattning	5
3. Experimentell Undersökning	5
3.1 Lokalisering	5
3.3 In-situ Provning	6
3.4 Laboratorieprovning	7
3.5 Bildanalys	7
4. Triaxial Provuppställning	7
4.1 Provningsförberedelse	7
4.2 Testförfarande och testutrustning	8
4.2.1 Triaxial provuppställning	8
4.2.2 Metodik	9
5. Geotekniska Testresultat	10
6. Bildanalys	12
6.1 Teori	12
6.1.1 Röntgentomografi	12
6.1.2 Digital Image Correlation	13
6.2 Metodik	14
6.3 Resultat	14
7. Slutsats och rekommendationer	16
Litteraturförteckning	

1. Introduktion

1.1 Bakgrund

Ökade transporter och därmed en ökad efterfråga på viktig infrastruktur i Skåne har ökat på senare tid på grund av samhällsutvecklingen. Byggandet i lermorän kan dock vara besvärligt på grund av det oförutsägbara beteendet hos lermorän, en jordtyp av osorterade glaciala sediment med en lerhalt på mellan 15% och 50%, vilket är mycket av den underliggande jorden i regionen (Larsson, 2000). Lermorän är känd för att vara styv och hållfast, men när infrastrukturen växer för att tillgodose samhällsutvecklingen finns det ett ökande behov av att känna till dess gränser. Dessutom är lermorän mycket heterogen och uppvisar en stark rumslig variation i hållfasthet.

I den svenska byggbranschen antas den effektiva friktionsvinkeln ϕ' vara mellan 30° och 32°, baserat på erfarenhet, och den effektiva kohesionen c' är lika med 10% av den odränerade skjuvhållfastheten (Larsson, 2001). Tidigare arbeten som utförts på lermorän har främst varit inriktade på dess odränerade egenskaper. Å andra sidan förväntas det dränerade tillståndet vara styrande för lermorän med låg lerhalt, dvs. mellan 15% och 17% (Hartlén, 1974). Ett par studier undersökte dränerade egenskaperna och föreslog empiriska samband baserade enbart på jordparametrar som initial poralett, vattenhalt och lerhalt (Jacobsen, 1970; Hartlén, 1974). Larsson (2001) har dock visat att dessa samband inte nödvändigtvis förbättrade de antaganden som används i den svenska byggbranschen. Det nuvarande antagandet underskattar sannolikt jordens hållfasthet, vilket stöds av erfarenheter från branschen. Detta leder till ineffektiva konstruktioner i fråga om kostnader och resursförbrukning. För att stödja en mer klimatvänlig konstruktion finns det därför ett behov av att bättre förstå lermoräns beteende under dränerade förhållanden.

1.2 Syfte

I detta arbete genomförs experimentella undersökningar för att studera de dränerade egenskaperna hos lermorän som finns i Skåne och för att jämföra resultaten med den nuvarande metoden. Undersökningarna omfattar 1) in-situ fältförsök, dvs. konpenetrationsprov (CPT); 2) laboratorieförsök med dränerade triaxialförsök på rekonstituerade prover och 3) Avancerade undersökning med hjälp av röntgentomografi. Den senare utförs för att utforska hur jorden beter sig under skjuvning.

1.3 Begränsning

På grund av begränsade resurser användes en plats för in-situ undersökning och provtagning. Vidare fanns svårigheter att få tag på ostörda lermoränprover och därför användes inpackade prover för laboratorietesterna. En fördel med inpackade prover är att spänningshistoriken för provet är känd. Detta möjliggör en mer exakt analys för modelleringsändamål när det gäller att bestämma materialets mekaniska egenskaper.

1.4 Rapportens organisation

Rapporten är disponerad enligt följande:

- Kapitel 1 – Introduktion
Den allmänna bakgrunden och aktuella frågor beskrivs. Målen och omfattningen har också fastställts.
- Kapitel 2 – Litteraturstudie
En analys av tidigare arbeten som har utförts på dränerade egenskaper hos lermorän kommer att presenteras.
- Kapitel 3 – Experimentell Undersökning
En beskrivning av undersökningskampanjen, inklusive valet av plats och de tester som genomfördes, presenteras.
- Kapitel 4 – Triaxial Provuppställning
Här beskrivs provuppställningen för triaxialförsöken.
- Kapitel 5 – Geotekniska Testresultat
Resultaten från de tester som genomförts beskrivs här.
- Kapitel 6 – Bildanalys
En bakgrund till bildanalys tillsammans med de tester som gjorts i detta projekt presenteras.
- Kapitel 7 – Slutsatser och rekommendationer
Här görs en sammanfattning av projektet inklusive förslag och rekommendationer för det fortsatta arbetet.

2. Litteraturstudie

I detta kapitel beskrivs vad som för närvarande är känt om de dränerade egenskaperna hos lermorän. Detta inkluderar tidigare forskning både i Sverige och i Danmark. Detta kommer att ligga till grund för detta projekt för att avgöra vad som behöver undersökas ytterligare.

2.1 Tidigare forskning om lermorän

I Sverige utfördes en av de tidigaste undersökningarna av de dränerade egenskaperna hos lermorän på 1970-talet (Hartlén, 1974). I denna rapport undersökte författaren hållfastheten och bärförmågan hos lermorän. Detta gjordes genom att utföra både fält- och laborietester. Sex platser i sydvästra Sverige valdes ut med olika sammansättning av lermorän. De viktigaste resultaten från forskningen inkluderar ekvationer för att approximera både de odränerade (odränerad skjuvhållfasthet, c_u) och dränerade (effektiv kohesion, c' , och friktionsvinkel, ϕ') mekaniska egenskaperna med den ursprungliga vattenhalten w_0 , portalet e_0 , och lerhalten l_c , se Ekvation 2.1 till 2.4. Det är dock viktigt att notera att de ekvationer presenterade i den studien erhöles empiriskt med hjälp av multipla regressionsanalyser. Detta kan potentiellt innebära att dessa ekvationer endast är giltiga för de sex platser som studerats.

$$c_u = 18 * w_0^{-2,05} * e_0^{-1,88} * l_c^{2,66} \quad c_u \leq 200kPa \quad (2.1)$$

$$c' = 3 * w_0^{-3,23} * e_0^{-2,12} * l_c^{4,19} \quad \text{if } c' \leq 20kPa \quad (2.2)$$

$$c' = -24 - 140 \log w_0 - 80,9 \log e_0 + 155 \log l_c \quad \text{if } 20kPa < c' \leq 50kPa \quad (2.3)$$

$$\phi' = 22 * w_0^{0,166} * e_0^{-0,139} * l_c^{-0,311} \quad 24^\circ \leq \phi' \leq 33^\circ \quad (2.4)$$

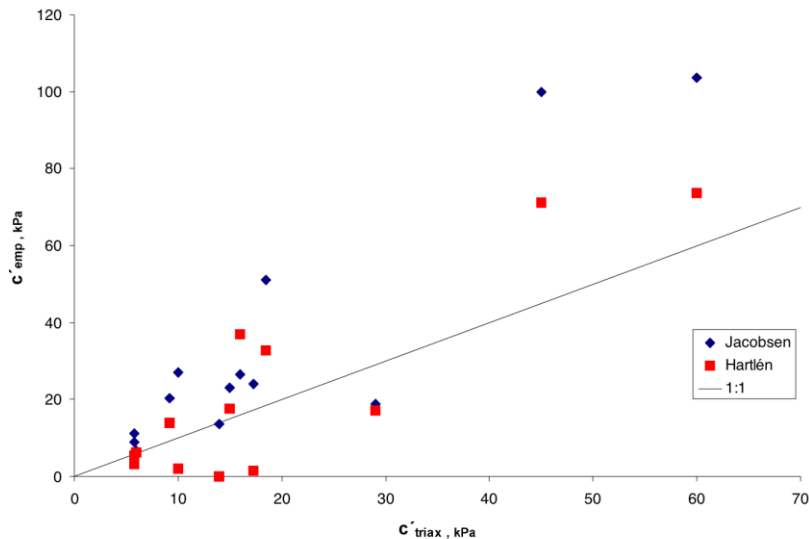
En annan studie av de dränerade egenskaperna på lermorän genomfördes i Danmark under samma tidsperiod (Jacobsen, 1970). I likhet med Hartlén (1974) utfördes fält- och laborietester på sju platser i Danmark. Författaren föreslog två ekvationer för att uppskatta ϕ' och c' genom att använda det initiala portalet, e_k , Ekvation 2.5 och 2.6.

$$c' = 430 * e^{-7,3e_k} \quad , kPa \quad (2.5)$$

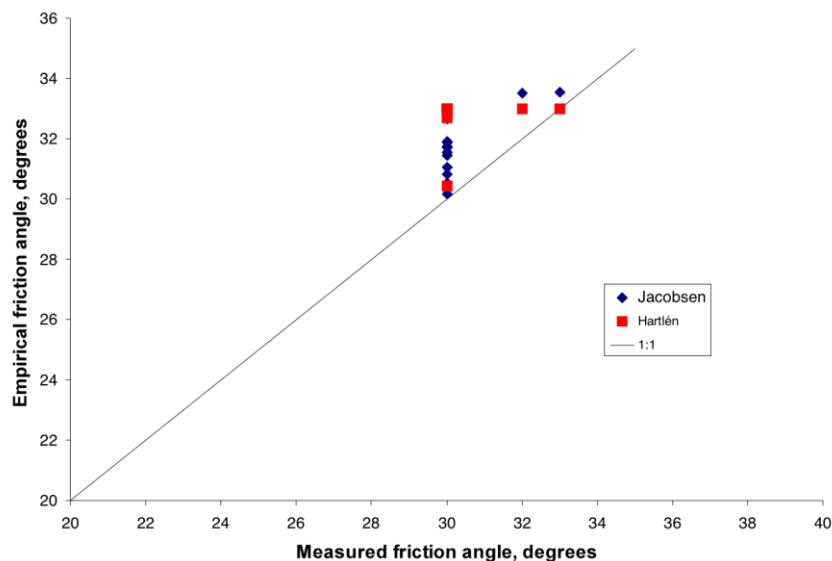
$$\phi' = 35,3 - 9e_k \quad , ^\circ \quad (2.6)$$

På senare tid har dessa två satserna jämförts med en annan studie utförd av Statens geotekniska institut (SGI) (Larsson, 2001). I denna studie samlades lermoränprover in från en referensplats belägen i Tornhill strax norr om Lund (Dueck, 1995). Författaren konstaterade att ekvationerna inte nödvändigtvis förbättrar de enkla antaganden som används i svensk praxis, där ϕ' är 30° och c' är lika med 10% av den odränerade skjuvhållfastheten, dvs. $0,1c_u$ (Larsson, 2001). Figur 1 och Figur 2 visar jämförelsen

mellan uppmätta data för effektiv kohesion respektive friktionsvinkel med beräknade data från de två ekvationssatserna av Jacobsen och Hartlén.



Figur 1 Jämförelse av effektiv kohesion mellan beräknade och uppmätta data (Larsson, 2001)



Figur 2 Jämförelse av effektiv friktionsvinkel mellan beräknade och uppmätta data (Larsson, 2001)

För kohesionen visar ekvationen från Hartlén en slumpmässig spridning medan den från Jacobsen konsekvent överskattar värdet. För friktionsvinkeln visar ekvationen från Hartlén ett konsekvent högre värde än det antagna 30° , men eftersom ekvationen endast är giltig för friktionsvinkel upp till 33° , måste begränsningen tillämpas. Ekvationen från Jacobsen visar också konsekvent att friktionsvinkeln är något högre. Eftersom skillnaden är marginell föreslogs dock att man skulle behålla det enkla antagandet om 30° och $0,1c_u$ för den effektiva friktionsvinkeln och kohesionen. Enligt erfarenheter från branschen leder dock dessa antaganden ofta till överdimensionerade konstruktioner. Det

finns därför ett ytterligare behov av att få en djupare förståelse för lermoräns beteende under dränerade förhållanden och av en mer exakt uppskattning av de effektiva hållfasthetsparametrarna.

2.2 Studieomfattning

Denna studie syftar till att ytterligare undersöka beteendet hos lermorän under dränerade förhållanden. Detta görs genom att utföra dränerade triaxialförsök för att minimera behovet av tolkning från totala spänningsparametrar. Vidare är lermorän mycket heterogen och välgraderad. Därför kommer bildanalys att utföras för att visualisera hur de stora stenarna i provet kan påverka dess beteende.

3. Experimentell Undersökning

3.1 Lokalisering

I detta projekt samlades lermoränprover in på en referensplats i Tornhill norr om Lund, se Figur 3. Denna plats har valts eftersom befintliga data finns tillgängliga från tidigare studier (Dueck, 1995; Larsson, 2001) som kan användas för att verifiera resultaten i detta arbete.



Figur 3 Läge för referensområde för lermorän i Tornhill

Två olika typer av lermorän finns på platsen. De första 3 m av jordprofilen består av baltisk lermorän. Det följs sedan av ett 3 m tjockt övergångslager bestående av baltisk lermorän och nordostlig lermorän. Nordostlig lermorän finns sedan under övergångslagret upp till 23 m djup.

Lermorän samlades in med hjälp av en grävmaskin på två olika djup, ett på cirka 0,9 m och det andra på cirka 1,4 m, vilket motsvarar baltisk lermorän. Under utgrävningen observerades att grundvattenytan ligger på cirka 1 m djup. Den undre nivån påverkas inte av frost och därför användes lermoränen som samlats in från det lägre djupet för laboratorietesterna. När jorden har samlats in förvaras den i kylskåp för att bibehålla sin fuktighet.

Några grundläggande egenskaper hos baltisk lermorän från tidigare arbeten redovisas i Tabell 1. I detta projekt undersöktes bulkdensiteten och den naturliga vattenhalten från det lägre djupet och de visade sig överensstämma med tidigare forskning.

Tabell 1 Grundläggande egenskaper hos baltisk lermorän (efter Dueck, 1995)

Egenskaper	Värde
Bulkdensitet (t/m ³)	2,11
Naturligt vattenhalt (%)	17,0
Flytgränsen (%)	32,0
Plasticitetsgränsen (%)	16,3
Vattenmättnadsgraden (%)	84,0
Lerhalt (%)	35,0

3.3 In-situ Provning

Konpenetrationsprov (CPT) och dilatometertester planerades i detta projekt. På grund av brist på utrustning utfördes dock endast CPT. Totalt utfördes fem CPTs. Eftersom fokus låg på baltisk lermorän utfördes varje CPT upp till cirka 2 m djup. Den odränerade skjuvhållfastheten beräknades från CPT-data med hjälp av ekvation 3.1. En konfaktor, N_{kt} , på 11 användes enligt SGI:s rekommendationer (Larsson och Åhnberg, 2003).

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

där:

c_u = odränerad skjuvhållfasthet

q_t = CPT spetsmotstånd

σ_{v0} = ursprunglig vertikalspänning

N_{kt} = konfaktor

En geofysisk seismisk undersökning genomfördes också. Två parallella linjer lades ut enligt Figur 4. Linjerna var 80 m långa och geofoner placerades längs linjen med 1 m mellanrum.



Figur 4 Geofysisk seismisk undersökning i Tornhill

3.4 Laboratorieprovning

I detta projekt har triaxialförsök med konsoliderad dränering (consolidated, drained, CD) utförts. CD har valts eftersom det direkt kan ge parametrar för provets i dränerade förhållande. Detaljer om provningen inklusive dess uppställning beskrivs i kapitel 4.

3.5 Bildanalys

Eftersom det mekaniska beteendet hos lermorän är starkt beroende av grövre particklar, t.ex. sten, är det viktigt att ytterligare undersöka deras roll. Detta görs genom bildanalys med hjälp av röntgentomografi. Detaljerna inkluderas i kapitel 6.

4. Triaxial Provuppställning

Detta kapitel diskuterar det experimentförfarande som använts i denna studie. Först förklaras metodiken för att förbereda provkropparna. Slutligen beskrivs utrustning och provningsförfaranden.

4.1 Provningsförberedelse

Först tas jordmaterialet ut från kylskåpet. Därefter placeras en tillräcklig mängd jord i en form för senare packning. Komprimeringen utförs med hjälp av en packningsutrustning (visas i Figur 5). Varje lager är ungefär 30 mm tjockt för att säkerställa att provet komprimeras jämnt. Efter packning av varje lager görs spår på ytan så att nästa lager kan fästa väl med det föregående.



Figur 5 Komprimator som används för provberedning

När provet är förberett vägs det tillsammans med formen. Provet pressas sedan ut ur formen för testning och den tomma formen vägs igen för att bestämma provets vikt.

4.2 Testförfarande och testutrustning

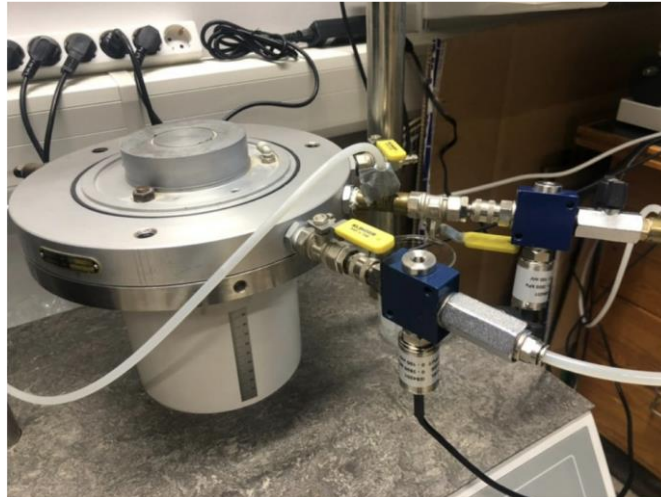
4.2.1 Triaxial provuppställning

Testerna utfördes med ett högtrycks triaxialt testsystem där både celltrycket och porttrycket kontrollerades av GDS Standard Digital Pressure Controllers. Triaxialcellen och belastningsramen är desamma som användes tidigare i Holmén (2003) (se Figur 6 och Figur 7). Triaxialcellen är en Wykeham Farrance och kan användas för triaxialförsök med provdiameterar upp till 100 mm och klarar ett celltryck på 1,7 MPa. För att undvika storlekseffekt på provet är det nödvändigt att säkerställa att diametern som används i triaxialprovningen är minst åtta gånger större än den största partikeln som finns i provet (Lade, 2016). Detta gör att ett prov på 100 mm kan ha stenar med storlekar upp till cirka 12 mm i diameter utan att ha en betydande storlekseffekt.



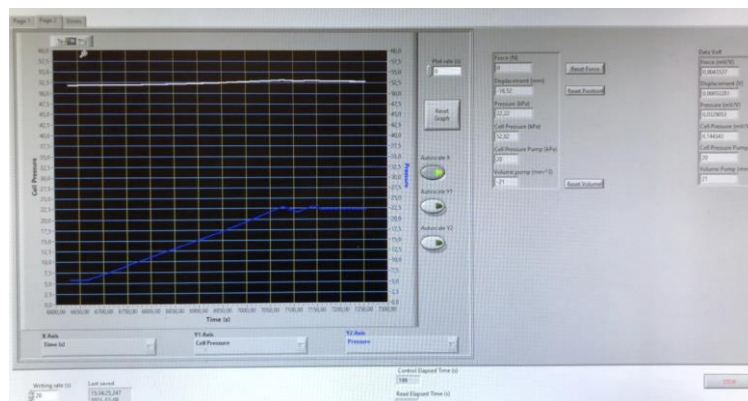
Figur 6 Triaxial provuppställning i LTH Geotekniska Laboratorium

Lastramen kommer från ELE International och klarar en kraft på 50 kN. Lastceller på upp till 25 kN användes, vilket innebär att uppställningen kan uppnå en σ_1 på upp till 3 MPa för prover med en diameter på 100 mm.



Figur 7 Triaxialbas med 100 mm pedestal och anslutna tryckgivare

Tryckförändringar i cellen och inom provet kan mätas med hjälp av tryckgivare, medan volymförändringar kan övervakas i GDS-tryckregulatorn som styr porttrycket. Provet är anslutet till porttrycks regulatorn från båda topp och botten ändarna för att minska tiden som behövs för att stabilisera porttrycket vid en förändring av spänningsnivån. Vid skjuvbelastning fastställdes att en töjningshastighet på 0,001 mm/min är lämplig för att undvika porttrycksökning. Axiella förskjutningar mättes med en linjär potentiometrisk givare. Alla data registreras digitalt med hjälp av ett datorsystem via en datalogger och kan övervakas i realtid, se figur 8.



Figur 8 Skärmdump av LabView-programmet som används för att logga data

4.2.2 Metodik

Eftersom det var svårt att få tag på ostörda prover utfördes testerna på inpackade prover. Detta förväntas inte ge några signifikanta skillnader baserat på tidigare rapporter (Hartlén, 1974). Dessutom innebär ett test på inpackade prover att den exakta spänningshistoriken är känd, vilket är viktigt för modelleringsändamål. Återkonsolideringen utfördes vid en effektiv isotropisk spänning på 500 kPa baserat på

tidigare utförda ödometertester (Larsson, 2001). När konsolideringen är klar avlastas provet helt och demonteras från cellramen för pre-mortem (före brott) avbildning med röntgentomografi. Därefter återmonteras provet i triaxialcellen och belastas till den valda effektiva radialspänningen. När provet är stabilt påbörjas axial belastning. Belastningen stoppas strax efter att den axiella spänningen har nått sin topp (för att säkerställa provets integritet för avbildningsändamål) och därefter demonteras provet och skannas igen för en post mortem-avbildning (efter brott).

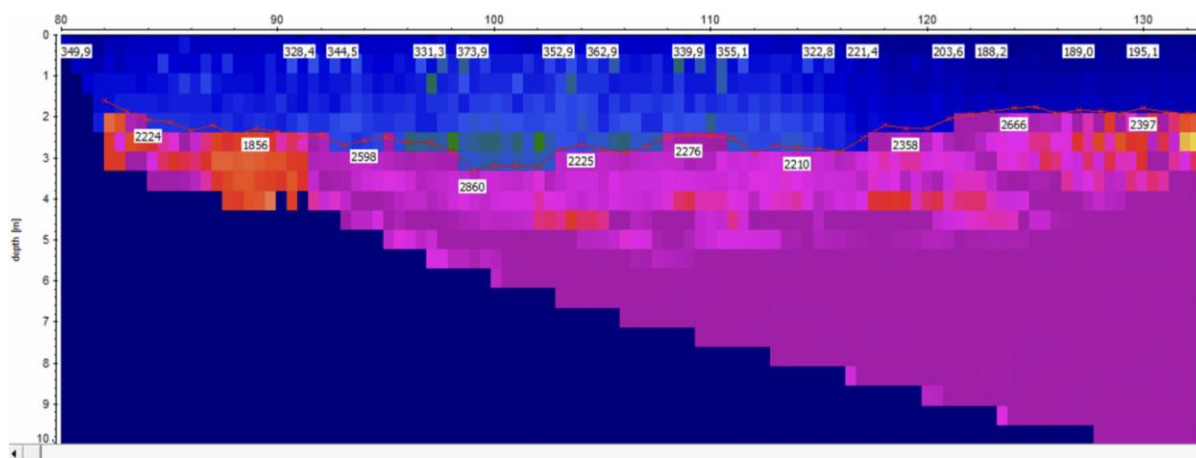
Totalt utfördes fyra CD-tester på prover med en diameter på 100 mm. Tabell 2 visar det valda effektivt radialtrycket, σ_3' , för de testade proverna tillsammans med om pre- eller post-mortem avbildning utfördes. För alla tester utförs ett mättnadstest genom att kontrollera att Skemptions B-värde är minst 0,9. I samtliga utförda tester uppmättes B-värdet konstant över detta värde. För att påskynda dräneringen användes sidodränering och filterpapper i båda ändarna av provkropparna.

Tabell 2 CD-tester utförda

ID	σ_3' (kPa)	Pre-mortem scan	Post-mortem scan
TC01	40		
TC02	40	✓	✓
TC03	80		✓
TC04	20	✓	✓

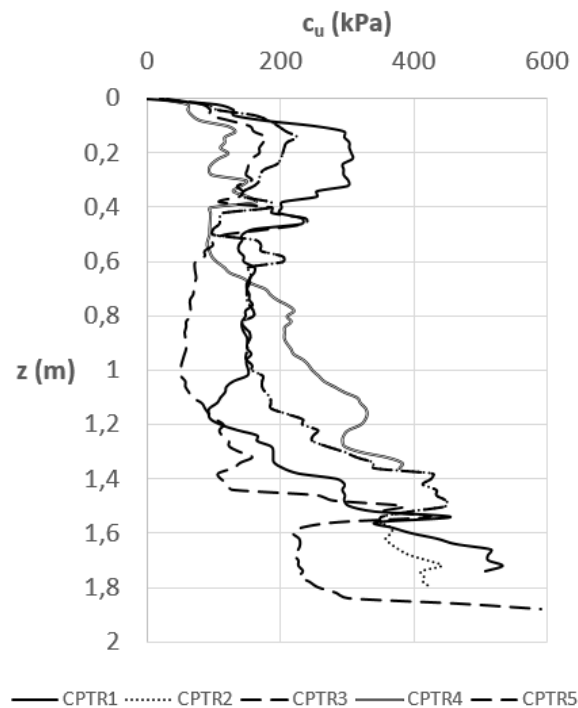
5. Testresultat

Figur 9 visar skjuvvågshastigheten från den seismiska undersökningen. Resultatet visar att det sker en förändring i skjuvvågshastigheten på 3 meters djup, vilket tyder på en förändring i jordart. Detta är i linje med den kända jordprofilen där baltisk lermorän förväntas finnas fram till 3 meters djup.



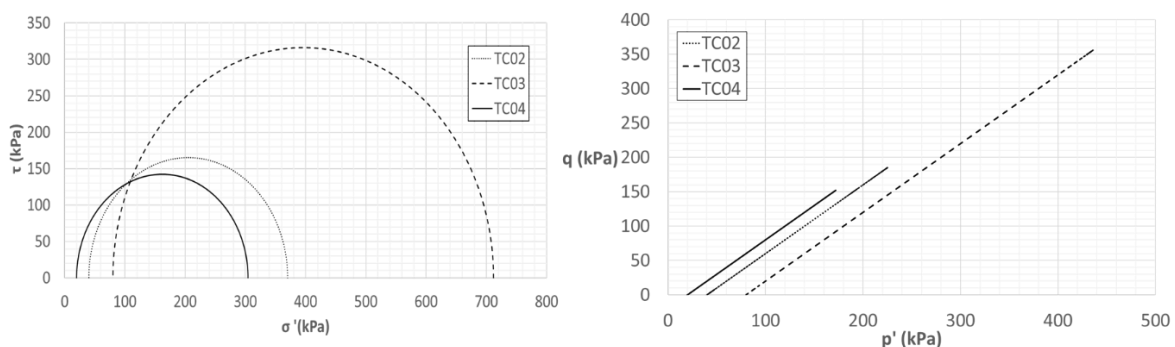
Figur 9 Skjuvvågshastighet från seismisk undersökning

Den odränerade skjuvhållfastheten, c_u , som erhållits från CPT-mätningen visas i Figur 10. Generellt är den odränerade skjuvhållfastheten hög vid ytan och minskar gradvis upp till 1 m djup. Den ökar sedan igen upp till 2 m djup. Samma beteende observerades i tidigare studier (t.ex. Dueck, 1995). Den genomsnittliga odränerade skjuvhållfastheten mellan 1,4 m och 1,6 m djup användes för att uppskatta c_u på 1,5 m djup, där materialet för laboratorieprovning samlades in. Detta ger en c_u på 350 kPa. Data från CPTR4 användes inte eftersom mätningen slutade före 1,6 m djup.



Figur 10 Odränerad skjuvhållfasthet från CPT

Figur 11 visar Mohrs cirklar och p' - q spänningsdiagram erhållna från CD triaxialprovningarna. Data från prov TC01 har utelämnats eftersom resultaten visar en orealistisk spänningsbana. En möjlig orsak till avvikelsen är en stark heterogenitet i provet som kan ha orsakat kanalisering i provet.



Figur 11 Mohrs cirkel och p' - q spänningsdiagram från triaxialprov

Spännings-töjningsdiagram, som inte ingår här, visar en mycket minimal minskning av spänningsnivån efter toppen, följt av en plattå. I p' - q -spänningsdiagrammet väljs därför

toppvärdena från spänningsbanan för varje prov för att bilda en trendlinje, som fungerar som brottgränsen. Trendlinjens lutning, β , och skärningspunkt, d , kan sedan användas för att härleda den effektiva kohesionen, c' , och friktionsvinkeln, φ' , där $\sin \varphi' = \tan(\beta)$ och $c' = d / \cos(\varphi')$. Ett värde på 51° och 21,7 kPa för φ' respektive c' erhålls. Alternativt erhöles ett annat p'-q spänningsdiagram genom att ytterligare utesluta resultaten från TC03, med hänsyn till den till synes stora Mohrs cirkel som erhöles från denna provning. Med dessa data erhålls ett värde på 38° och 57,3 kPa för φ' respektive c' . Vidare är resultaten från dessa provningar inte entydiga på grund av det begränsade antalet tester som utförts. Därför krävs fler provningar.

Den odränerade skjuvhållfastheten från CPT ligger inom intervallet från tidigare CPT-resultat, som var mellan 200 och 400 kPa (Dueck, 1995, Larsson, 2001). Det stora intervallet beror på jordens heterogenitet i kombination med förekomsten av stenar som är spridda, vilket kan orsaka att den odränerade skjuvhållfastheten har en stor variation.

Enligt svensk praxis uppskattas den effektiva kohesionen till 10% av den odränerade skjuvhållfastheten, vilket resulterar i ca 35 kPa, medan de experimentella värdena i detta arbete är antingen 21,7 kPa eller 57,3 kPa. Vidare antas den effektiva friktionsvinkeln normalt vara mellan 30° och 32° , medan experimentella värden uppvisar konsekvent högre värden, antingen 51° eller 38° . I en uppsättning av resultaten är kohesionen också högre än de värden som erhöles empiriskt inom industrin. Detta indikerar att den nuvarande metoden är potentiellt överkonservativ, vilket kan öka kostnaden för konstruktionen i onödan.

6. Bildanalys

I detta kapitel kommer bildanalys att diskuteras. Först beskrivs teorin bakom metoden, både bildtagning och bildbehandling. Därefter presenteras den metodik som implementerats i detta projekt. Slutligen kommer resultaten att visas.

6.1 Teori

6.1.1 Röntgentomografi

Röntgentomografi erhöles genom att först förvärva en 2D-projektion av provet genom att skjuta röntgenstrålar genom provet. 2D-projektionen, även känd som ett radiogram, baseras på dämpningen av röntgenstrålarna från att passera genom provet. Dämpningen kan beräknas baserat på Beer-Lamberts dämpningslag som säger att dämpningen till stor del styrs av objektets densitet och storlek. Flera 2D-projektioner tas sedan runt provet, antingen genom att rotera provet eller röntgenkällan. Inom det medicinska området är det vanligare att flytta röntgenkällan. I industri- och synkrotronuppställningar kan det dock vara kostsamt eller omöjligt att flytta röntgenkällan. Istället roteras provet. När flera projektioner har tagits kan skivorna i en 3D-volym rekonstrueras. Detta kan göras algebraiskt, vilket kräver färre projektioner. Beräkningen är dock intensiv och fanns inte tillgänglig i början. Istället rekonstrueras skivorna genom backprojektion med hjälp av en invers Radontransform.

För optimal rekonstruktion är det bäst att använda en synkrotron. Den är dock endast tillämplig för små provstorlekar i storleksordningen mm. Dessutom är de svåra att

komma åt. Å andra sidan är ett röntgenrör mer lättillgängligt och kan vara mer fördelaktigt för att skanna större prover.

Inom experimentell geomekanik utförs ofta röntgentomografi före och efter ett experiment där prover komprimeras. Bilderna kan ge information om hur kornen har förändrats, flyttats eller krossats beroende på den pålagda spänningen. Röntgentomografi kan också utföras under kompressionen. På så sätt kan lokal deformation identifieras med avseende på den ökade belastningen. Detta kräver dock specialutrustning som kan placeras inuti tomografen.

6.1.2 Digital Image Correlation

Digital Image Correlation (DIC) är en kompletterande, beröringsfri teknik som kan ge en fullfältsmätning av förskjutning på antingen 2D- eller 3D-ytor, eller volymer beroende på typ av DIC. Inom andra områden kallas DIC även för Particle Image Velocimetry (PIV). I princip utförs DIC genom att jämföra två bilder, där den första är referensbilden och den andra är målbilden. Baserat på referensbilden skapas ett rutnät som täcker den intressanta regionen i provet. I varje nod i rutnätet tas först en liten delmängd av bilden med känd placering från referensbilden, även kallat för ett motiv. Motivets nya placering i målbilden bestäms sedan. Detta görs genom att först placera motivet i målbilden på samma plats som referensbilden. Motivet flyttas sedan stegvis runt inom ett sökfönster av en viss storlek. För varje förflyttning beräknas en korrelationskoefficient (CC) för att avgöra hur väl det nya motivet passar jämfört med originalet. Den position som har högst CC väljs sedan som den slutliga förflyttningen av motivet från referens- till målbilden. I sin enklaste form kontrolleras endast translationsrörelser i målbilden. Mer komplicerade program kan dock även ta hänsyn till rotation och transformation. När alla rörelser för alla motiv har identifierats ger DIC ett förskjutningsfält för alla punkter i rutnätet. Fältet kan sedan omvandlas till ett töjningsfält som kan användas för ytterligare studier av lokaliserade fenomen, t.ex. lokalisering och kvantifiering av lokaliserad töjning. Om fler än två bilder finns tillgängliga under provningen kan DIC även visa hur förskjutningsfältet utvecklas under provningens gång, vilket ger ytterligare information om när den lokala spänningen börjar bildas. Denna information kan användas för att utveckla en lämpligare modell vid olika belastningsstadier.

För att komma igång med DIC behöver man först bilder av provet som tagits stegvis medan testet pågår eller pre- och post mortem. Den vanligaste metoden för att få bilderna är via fotografering, där en kamera tar en bild av provet vid ett bestämt tidsintervall. Men även andra former av avbildning, t.ex. röntgentomografi, kan användas. Dessa bilder kommer att fungera som canvas för DIC, där programmet spårar delmängder av referensbilden och hittar deras plats i nästa bild. Beroende på vilken typ av bilder som finns tillgängliga kan olika DIC-analyser utföras. 2D-DIC kan erhållas från 2D-bilder, t.ex. fotografier. I detta fall krävs det ofta att provet inte deformeras i riktningen vinkelrätt mot den fotograferade ytan. För att utföra 3D-surface DIC krävs det att minst 2 bilder av provet tas samtidigt från olika vinklar. Detta kommer att fånga 3D-rörelserna i provets yta. Slutligen, om 3D-volym av provet finns tillgänglig, kan 3D

volumetrisk DIC, även känd som Digital Volume Correlation (DVC), utförs. Detta kommer att ge förskjutningen även av provets inre punkt.

Hur DIC-analysen utförs kan också skilja sig åt när det gäller hur varje nod behandlas. Ett sätt är att inte begränsa hur noderna rör sig i förhållande till intilliggande noder. Detta möjliggör en friare DIC-analys, vilket kan leda till en kortare bearbetningstid. Denna typ av DIC är också känd som lokal DIC. Å andra sidan kan noderna också begränsas i hur de rör sig baserat på de intilliggande noderna. Med andra ord är den frihetsgrad som varje nod har beroende av vilka intilliggande noder som kontrollerar rörelsen. Denna typ av DIC är känd som global DIC. Även om global DIC förväntas ge ett mer representativt förskjutningsfält kommer det också att ta längre tid att utföra beräkningen.

6.2 Metodik

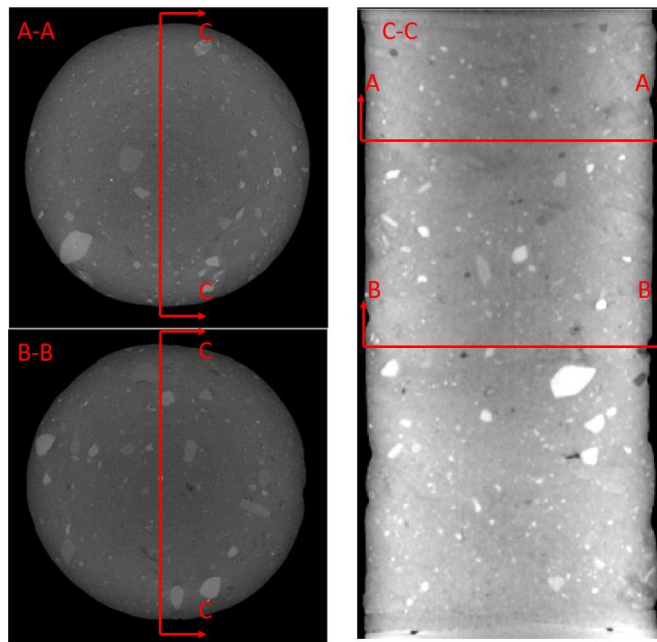
Bildtagning sker med hjälp av en RX Solutions EasyTom150 röntgentomograf i 4D Imaging Lab vid avdelningen för hållfasthetslära vid Lunds universitet, se Figur 12. Därefter utförs bildanalys med hjälp av DVC för att erhålla töjningsfältet.



Figur 12 Bildtagning med hjälp av röntgentomografi

6.3 Resultat

Figur 13 visar två horisontella och ett vertikalt snitt från samma prov som tagits med hjälp av röntgentomografi. Från bilderna kan stenar tydligt identifieras från matrisen, på grund av olika densitet, som visar en stark variation i storlek och en slumpmässig rumslig fördelning.



Figur 13 Två horisontella och en vertikal skiva från prov TC02 (Post-mortem). Ljusare nyans indikerar högre densitet

Vid en första analys av bilderna verkar provets ytterkanter vara tätare än dess centrum, se Figur 14 för en bild med förbättrad kontrast. Detta är ett känt fenomen inom röntgenavbildning, som kallas strålhårdningseffekt, vilket är en artefakt som uppstår under volymrekonstruktion. Det är dock oklart om den observerade gråskalvariationen faktiskt är strålhårdning. Det är möjligt att provet i själva verket är tätare i ytterkanten. En möjlig förklaring är att materialet pressas i sidled under komprimeringsprocessen vid provberedningen.

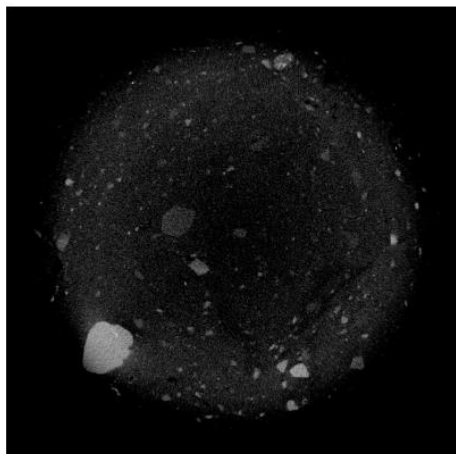
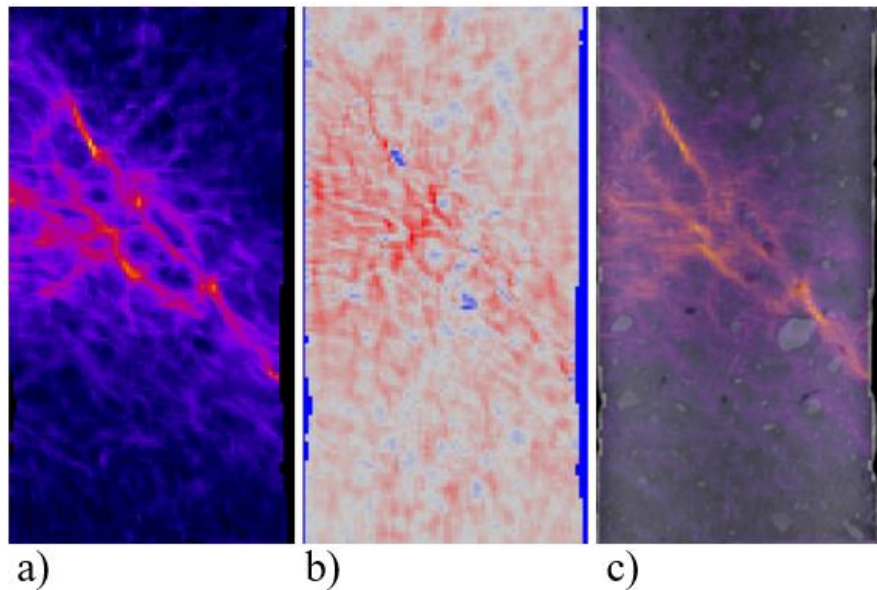


Figure 14 Slice AA from Figure X with enhanced contrast to show possible beam hardening effect. Lighter shade indicates higher density

Figur 15 (a-b) visar skjuv- och volymetrisk töjning från DVC-analys i den mellersta vertikala skivan av provet. I bilden av skjuvtöjning indikerar mörk färg ingen töjning medan ljus färg indikerar hög skjuvtöjning. På den volymetriska töjningen indikerar vitt ingen töjning medan rött indikerar zoner som upplever dilatation och blått indikerar zoner som upplever kompaktering. Från bilden av skjuvspänningen observeras två

huvudsakliga skjuvband med olika lutning, tillsammans med flera mindre skjuvband som förbinder dem. Detta belyser ett mer komplex skjuvbeteende jämfört med lera, som vanligtvis bara har ett större skjuvband. Överlagringen av skjuvtöjningen och röntgenbilderna (Figur 15c) visar att skjuvbandens komplexitet orsakas av förekomsten av stenar. Eftersom stenarna är mycket styva kommer materialet runt dem att deformeras istället som förhindrar att ett kontinuerligt skjuvband bildas. Istället behöver skjuvband gå runt stenarna. Komplexiteten i deformationsmönstret påverkar materialets mekaniska egenskaper och ökar hållfasthet.



Figur 15 a) Skjuvning och b) volymetrisk töjning av TC02 och c) en överlagrad bild av skjuvningstöjning med röntgenavbildning

Det observerades också från den volymetriska töjningsanalysen att provet överlag dilaterar, och inte bara nära skjuvbandet som det skulle förväntas (se Figur 15b). En möjlig orsak är att provet avbildades innan porvattenstrycket stabiliserades till slutvärdet efter förkonsolidering och därför fortfarande genomgick dilatation.

7. Slutsats och rekommendationer

Denna uppsats syftar till att karakterisera de dränerade egenskaperna hos skånsk lermorän genom en experimentell undersökning och jämföra med det befintliga antagandet som används i den svenska geotekniska industrin. CPT- och triaxialförsök utfördes och resultaten indikerar preliminärt att de dränerade egenskaperna är underskattade enligt nuvarande praxis. Detta resultat begränsas dock av det begränsade antalet tester. Bildtagning utfördes för att ge en bättre förståelse för hur jorden beter sig under skjuvning. Resultaten visade att jorden hade ett komplext beteende när det gäller bildandet av skjuvbandet på grund av förekomsten av stenar, som varierar i storlek och är utspridda i provet. I det framtida arbetet kommer fler CD-triaxialprov att utföras för att få en mer holistisk och representativ slutsats. Vi föreslår också en mer grundlig avbildningsundersökning där avbildningen utförs stegvis medan det triaxiala testet pågår. Detta skulle ge insikt i hur töjningslokaliseringen utvecklas under belastning.

Ytterligare studier av hur stenar i provet med avseende på deras form, storlek och/eller mängd kan påverka de mekaniska egenskaperna hos lermorän kan sedan undersökas.

Litteraturförteckning

Dueck, A. (1995). *Reference site for clay till*.

Hartlén, J. (1974). *Skånska moränlerors hållfasthets- och bärighetsegenskaper: [The geotechnical parameters of strength and bearing capacity of boulders clays from the southwest part of Sweden]*.

Jacobsen, Moust. (1970). *Strength and Deformation Properties of Preconsolidated Moraine Clay*. 27, 21–45.

Lade, P. (2016). *Triaxial testing of soils*. John Wiley & Sons Inc.

Larsson, Rolf. (2000). *Lermorän—En litteraturstudie* (Varia 480; p. 73). Statens Geotekniska Institut.

Larsson, R. (2001). *Investigations and load tests in clay till. results from a series of investigations and load tests in the test field at Tornhill outside Lund in southern Sweden* (tech. rep. No. 59).

Larsson, R., & Åhnberg, H. (2003). *Utvärdering av skjuvhållfasthet och förkonsolideringstryck från vingförsök, cpt-sondering och dilatometerförsök*.