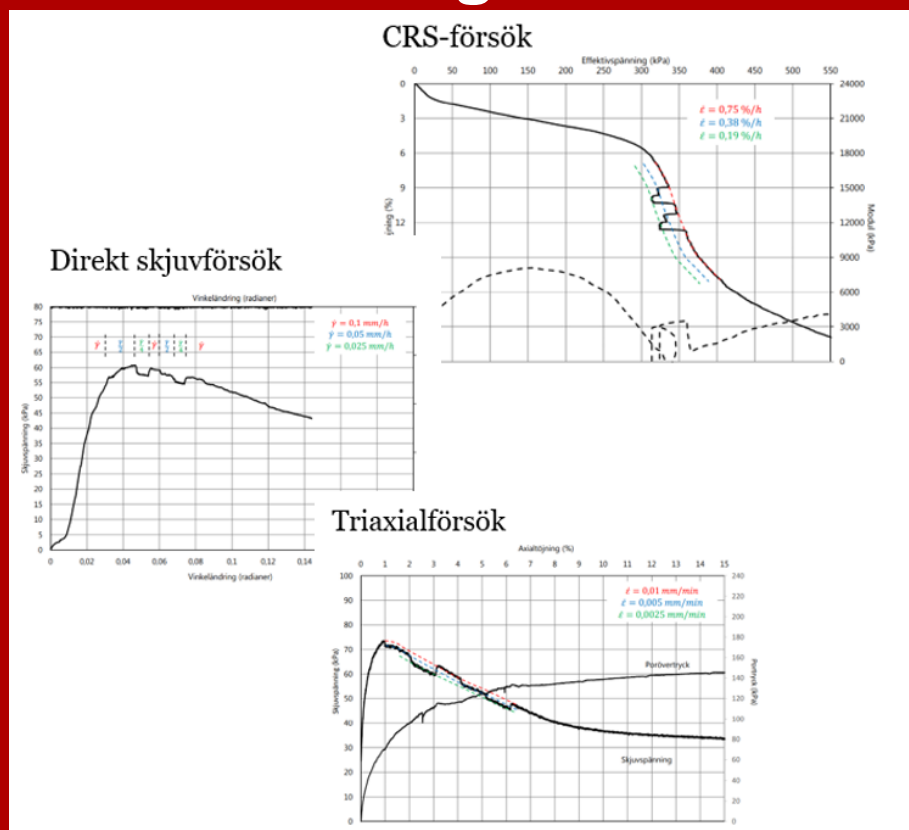


RAPPORT

Anpassning av avancerade geotekniska laboratorieförsök till nya användningsområden



Trafikverket

Postadress: 781 70 Borlänge

E-post: trafikverket@trafikverket.se

Telefon: 0771-921 921, Texttelefon: 010-123 50 00

Konfidentialitetsnivå: 1

Dokumenttitel: Anpassning av avancerade geotekniska laborieförsök till nya användningsområden

Författare: Göran Sällfors

Dokumentdatum: 2022-09-15

Version: [Version]

Kontaktperson: Kenneth Viking

Publikationsnummer: 2022:005

Innehåll

Förord

1 Bakgrund	.... 5
2. Upplägg	.... 7
3 Kortfattad litteraturgenomgång	.... 9
3.1 Ett urval av befintliga standarder och rekommendationer	.... 10
3.2 Tidiga observationer om lerans hastighetsberoende (viskösa respons och materialbeteende)	.... 11
3.3 Forskning om hastighetsberoende för leror de senaste decennierna	.... 12
3.4 Några exempel på numerisk modellering av hastighetsberoende	.... 17
4 Syfte/Hypotes	.... 18
5 Redovisning av resultat från genomförda försöksserier	.... 21
5.1 LabMind	.... 21
5.2 Bjerking's	.... 26
5.3 Bohusgeo	.... 27
5.4 Multiconsult, Trondheim	.... 28
5.5 Mitta	.... 29
5.6 WSP	.... 31
5.7 Några exempel och utvärderade B-värden från litteraturen	.... 34
5.8 Töjningshastighetens inverkan på $M_0 \sigma'_c$.	.... 36
6 Analys och kommentarer	.... 38
7 Rekommendationer	.... 43
7.1 CRS-försök	.... 43
7.2 Odränerade direkta skjuvförsök	.... 44
7.3 Odränerade aktiva triaxialförsök	.... 44
7.4 Odränerade passiva triaxialförsök	.... 44
8. Förslag till fortsatt forskning och utveckling	.... 46
9. Referenser	.... 47

Förord

Detta FoI-projekt, ”*Anpassning av avancerade geotekniska laborieförsök till nya användningsområden*”, har finansierats av Trafikverket, med en delfinansiering av Göteborgs Kommun.

Det är en rad personer och företag som bidragit med råd och dåd under arbetet, och utan denna medverkan hade projektet inte kunnat genomföras.

Jag riktar därför ett stort och innerligt tack till:

- *Trafikverket*, som varit huvudfinansiär
- *Göteborgs Kommun*, Stadsbyggnadskontoret och Fastighetskontoret, som delfinansierat projektet och visat stort intresse för frågeställningen
- *Referensgruppen*, som läst, granskat och lämnat värdefulla kommentarer
 - Leif Jendeby, COWI, som ofta ställer de rätta, lite obekväma frågorna
 - Per-Evert Bengtsson, egen företagare, vars erfarenhet och kloka råd varit mycket värdefulla
 - Johannes Tornborg, Skanska/Chalmers, som kan så mycket inom detta område och så generöst delat med sig av sin kunskap
 - Kenneth Viking, Trv, som varit en stor tillgång, inte minst som FoI-handläggare
- *LabMind*, med David Gaharia och Sölve Hov, som med skicklighet, stort tålamod och noggrannhet utfört ett stort antal försök
- *WSP*, med Khaled Alaydi, som visat stort intresse och bidragit med många fina försöksresultat
- *Mitta*, med Peter Hedborg, som sett till att vi fått intressanta resultat från olika lokaler i Göteborgsregionen
- *Bjerkings*, med Teddy Johansson, har sett till att också Uppsala-leran kommit med i vår databas
- *Multiconsult*, med Anders Gylland, som bidragit med försök på de magra Norska lerorna. En värdefull breddning av databasen
- *Bohusgeo*, med Per-Gunnar Larsson, som tillhandahållit försöksresultat från några djupa nivåer nära Göta älv

- *Chalmers*, med Mats Karlsson som stöttat med värdefulla synpunkter och en del FEM-simuleringar

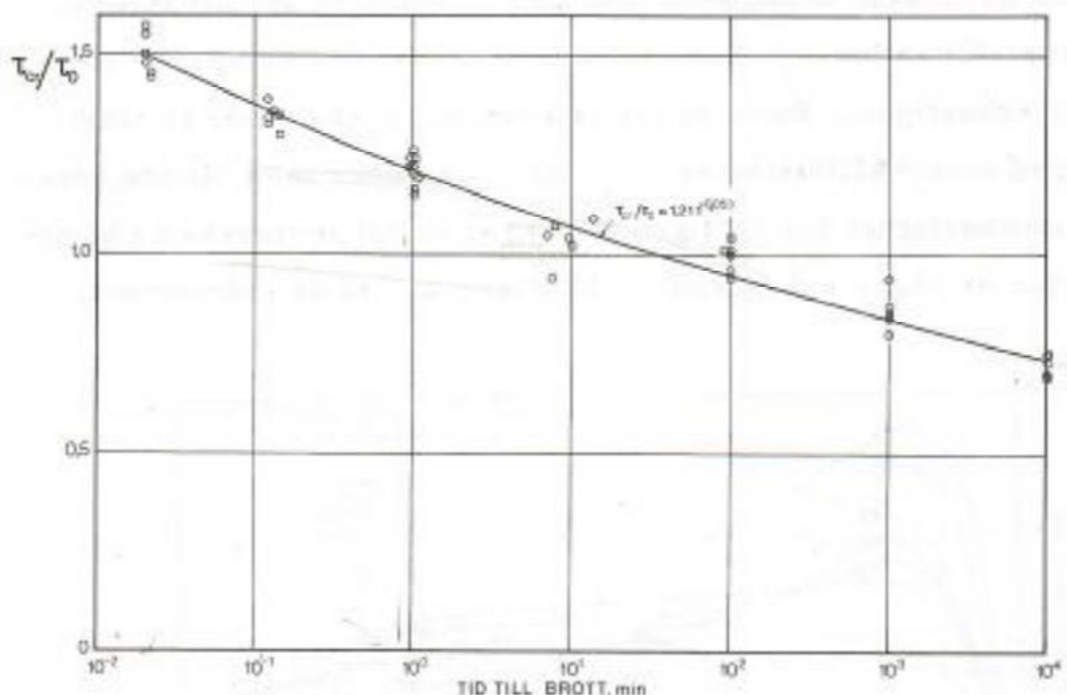
Det är min förhoppning att ni också funnit arbetet intressant och att vi gemensamt kan fortsätta detta goda erfarenhetsutbyte, till gagn för svensk geoteknik.

Lund sommaren 2022

Göran Sällfors

1 Bakgrund

Det är sedan länge känt att leror uppvisar viskösa egenskaper, ju lägre deformationshastighet eller belastningshastighet, desto lägre respons i termer av utvärderat förkonsolideringstryck och skjuvhållfasthet. För nordiska förhållanden är kanske de tidigaste och tydligaste exemplen på det de fältvingprovningar som Gunnar Aas (1965) och Bengt-Arne Torstensson (1973) redovisade. De utförde vingprovning med olika tid till brott, alltifrån 10 sekunder till ca 1 dygn. Exempel på resultat återfinns i Fig.1 nedan.



Figur 1. Hållfasthetens variation med tid till brott för vingsondering i lös lera, Torstensson, 1973.

I rekommenderad standard för vingsondering i fält (SGF, Publikation 2:93) anges att väntetiden, efter det att vingen når provningsnivån skall vara 2 till 5 minuter. Provningsen skall sedan utföras så att tiden till brott blir 2 till 4 minuter. Därmed har man försäkrat sig om ett utförande som då ger en hållfasthet enligt svensk standard.

Av samma anledning har töjningshastigheten vid andra typer av försök på lös lera också standardiserats. Direkta skjuvförsök skall utföras med en töjningshastighet som är 0,15 rad/dygn.

På motsvarande sätt skall CRS-försök på lera utföras med en

töjningshastighet på 0,72 %/h och K_0 -konsoliderade odränerade triaxialförsök utföras med en vertikal töjningshastighet på 0,6 %/h, medan dränerade triaxialförsök utförs vanligtvis med en hastighet på 0,06 %/h.

Dessa töjningshastigheter har sitt ursprung från förr, när man oftast tog prover ner till 15 eller 20 m djup och kalibrerade laboratoriemetoderna mot fullskaleförsök (Sällfors, 1975) eller tidigare skred (t.ex. Larsson, 1980). Fast lera ägnades då i Sverige inget större intresse. Det innebar att de förkonsolideringstryck som man bestämde oftast låg i intervallet 30 till 100 kPa, och motsvarande odränerade skjuvhållfastheter var i storleksordningen 10 à 30 kPa.

De senaste decennierna har det blivit allt vanligare att man tar prover från långt större djup, ända ner mot 100 m, samtidigt har fastare lera, t.ex. längre norrut längs Göta älv, ägnats påtagligt större intresse. Detta har medfört att man då studerar leror med förkonsolideringstryck långt större än 100 kPa, stundom upp mot 500 à 600 kPa. Motsvarande odränerade skjuvhållfastheter är då i storleksordningen 100 till 200 kPa.

Att då använda samma töjningshastigheter, som står angivna i standarder, resulterar i belastningshastigheter som kan vara i storleksordningen 5 ggr större. Mot bakgrund av lerans viskösa egenskaper finns det anledning att ifrågasätta detta och lite noggrannare studera hur töjningshastigheten och den i försöken resulterande belastningshastigheten påverkar de ur försöken utvärderade geotekniska parametrarna. Det finns således anledning att se över gällande standarder och rekommendationer och överväga en modifiering/komplettering av dessa.

2. Upplägg

Denna rapport är upplagd på följande sätt och behandlar i tur och ordning:

Kortfattad Litteraturgenomgång

- Ett urval av befintliga standarder och rekommendationer
- Tidiga observationer om lerans hastighetsberoende
- Forskning om hastighetsberoende för leror de senaste decennierna
- Några exempel på numerisk modellering av hastighetsberoende

Hypotes

Den hypotes som ingick i projektbeskrivningen redovisas kortfattat.

Redovisning av resultat från genomförda försöksserier

Ett ganska stort antal försök med varierande töjningshastighet har genomförts och sammanställts tillsammans med liknande tidigare försök. Här redovisas en sammanfattning, medan samtliga försöksresultat återfinns i ett separat appendix.

Analys och kommentarer

Erhållna resultat systematiseras och diskuteras.

Rekommendationer

Förslag till nya rekommendationer, eller kanske snarare modifiering av försöksutförande och/eller tolkningsmetodik, för CRS-försök, direkta skjuvförsök och triaxialförsök går igenom.

3 Kortfattad litteraturgenomgång

3.1 Ett urval av befintliga standarder och rekommendationer

Fältvingprovning

Enligt tidigare svensk praxis, SGF Publikation 2:93 – Rekommenderad svensk standard för vingförsök, ges tidsintervall för provningens olika faser, samt krav på förborrning genom eventuell torrskorpa eller fastare jordlager.

Det finns en ny EN-standard, som har ändrat en del på kraven jämfört med tidigare rekommendationer i Sverige. Man har minskat något på det tidsintervall för vilket brott skall ske. Dessvärre har man missat att ta med krav på förborrning genom torrskorpan och dessutom saknas krav på väntetid mellan det att vingen nått försöksnivån och det att försöket med vridning av vingen startas.

CRS-försök

CRS-försök utförs i Sverige normalt på 20 mm höga prover. Enligt svensk standard, *SS 027126; 1991 Ödometerförsök, CRS*, används då en deformationshastighet på 0,0025 mm/min, vilket motsvarar 0,72 %/h.

Direkta skjuvförsök

Direkta skjuvförsök utförs i Sverige antingen med stegvis ökande skjuvspänning eller en kontinuerlig skjuvning med konstant hastighet. I det senare fallet skall hastigheten väljas så att vinkeländringen för provet är 0,15 rad på 24 timmar. Det innebär 0,00625 rad/h.

Triaxialförsök

Konsoliderade, odränerade triaxialförsök utförs i Sverige normalt med en töjningshastighet i vertikalled som motsvarar 0,6%/h. Konsoliderade dränerade försök utförs med töjningshastigheten 0,06%/h.

Det finns dock en EN-standard för triaxialförsök,

SS-EN_ISO_17892-9_2018 Konsoliderat triaxialförsök på vattenmättad jord, där den vertikala töjningshastigheten anges med en formel, som beaktar den tid som konsolideringen av provet tar.

Förskjutningshastigheten av stämpeln beräknas enligt en av nedanstående

$$v_{\max} = (H_c \cdot \varepsilon_{vf}) / (F \cdot t_{50}) \quad \text{eller} \quad v_{\max} = (H_c \cdot \varepsilon_{vf}) / (F/4 \cdot t_{100})$$

där H_c = provhöjd efter konsolidering

ε_{vf} = förväntad töjning vid brott

t_{50} = tid för 50% konsolidering

t_{100} = tid för 100% konsolidering

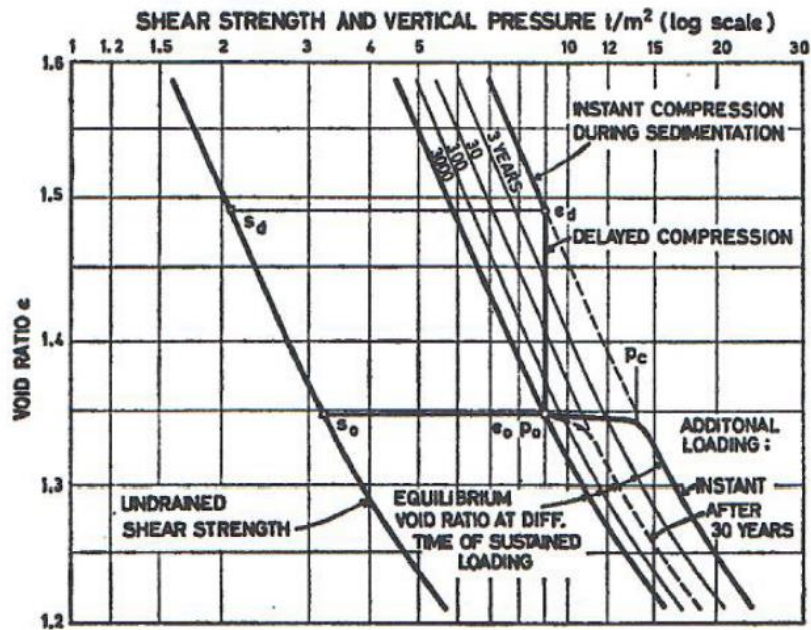
F = värde ur tabell nedan

Drainage conditions during consolidation	Values of F (for $H_i/D_i = 2$)	
	Undrained test	Drained test
from one end	2,1	34
from both ends	8,4	34
from radial boundary and one end	7,2	56
from radial boundary and two ends	9,2	64

De flesta laboratorier följer dock nog tidigare svenska rekommendationer och praxis med en töjningshastighet på 0,6%/h.

3.2 Tidiga observationer om lerans hastighetsberoende (viskösa respons och materialbeteende

Bjerrum (1967) förklarade fenomenet med att leror genom krypning blev svagt överkonsoliderade med hjälp av nedanstående figur. För svenska förhållanden har vi sedan noterat att saltvattenavsatta leror, som på västkusten började avsättas för ca 13 000 år sedan, har ett OCR på 1,25 à 1,3, medan söt- och brackvattenavsatta leror på östkusten, som började avsättas senare och steg ur havet senare samt varit ovan vattenytan kortare tid (i Uppsala ca 2 500 år), har ett OCR på 1,10 à 1,15.



Figur 2. Åldringseffekter på en leras förkonsolideringstryck (Bjerrum, 1973)

På 1960/70-talet uppmärksammades att den bestämda skjuvhållfastheten vid fältvingprovning var starkt beroende av vingens rotationshastighet (Aas, 1965, Torstensson, 1973), se Fig 1. Detta var bland annat en viktig insikt när begreppet kryppålning började användas i större omfattning (Jendeby, 1986), och har sedan varit ett viktigt koncept vid dimensionering av kohesionspålar.

När sedan stegvisa ödometerförsök under 1980-talet i allt större omfattning ersattes av CRS-försök, var studiet av töjningshastighetens inverkan på ödometerkurvans utseende central, och hela utförandet av försöket, utvärderingen av parametrar samt beräkningsmetod byggde på omfattande undersökningar av just töjningshastighetens betydelse (Sällfors, 1975).

När sedan krypdeformationer i lera hamnade i fokus för sättningsberäkning (Larsson, 1986) ägnades lerans viskösa egenskaper återigen stort intresse.

3.3 Forskning om hastighetsberoende för leror de senaste decennierna

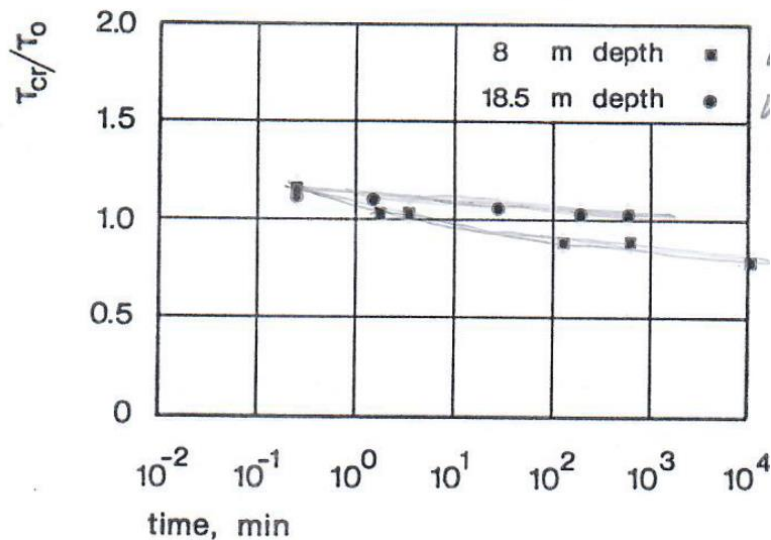
Under de följande decennierna ökade intresset för dessa tidsberoende variationerna enormt, även internationellt (Larsson, 1980, Graham et.al.

1983, Claesson, 2003, Länsivaara, 1999, Lerouelle et.al., 1985, Olsson, 2013, Lacasse och Lunne, 2005, Tornborg, 2020) för att nämna några.

Det skulle föra för långt att redovisa en fullständig genomgång av forskningen inom detta område. Den som vill läsa mer kan med fördel studera några rapporter av bl.a. Länsivaara (1999), och Tornborg (2020). Nedan lyfts några illustrativa exempel fram.

Fältvingprovning

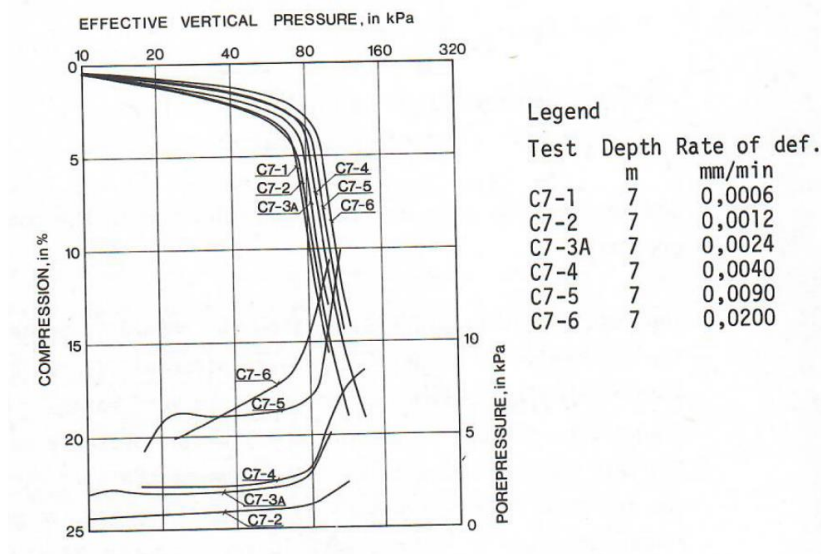
Jendeby (1986) redovisade bl.a. resultat för vingprovning från två olika djup i Uppsala, se Fig 3. Det är intressant att notera att leran från 8 m djup, som har en konflytgräns, w_L , på 90 %, uppvisar ett klart större hastighetsberoende än leran från 18,5 m djup, som har en w_L på 62 %.



Figur 3 Hastighetsberoende vid vingprovning på lera i Uppsala.
 $\tau_0 = 1 \text{ min.}$ (Jendeby, 1986)

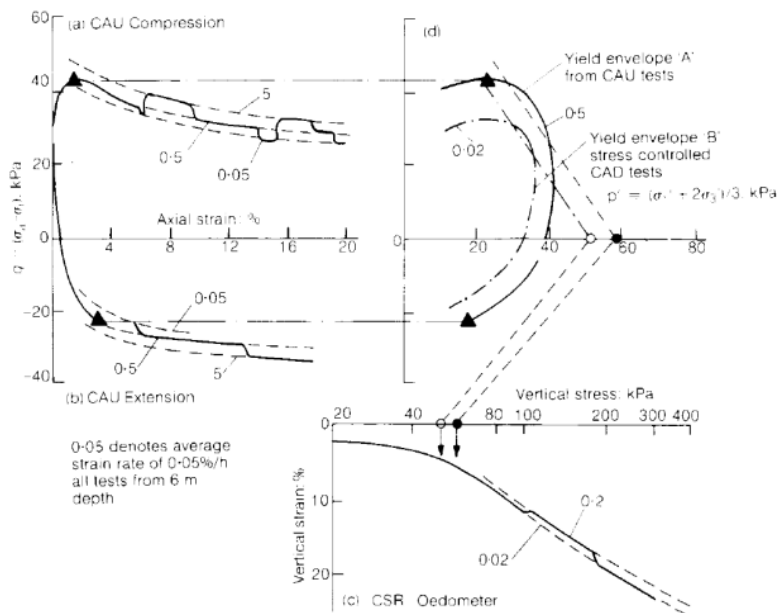
CRS-försök och triaxialförsök

De första CRS-försöken på svensk lera (Sällfors, 1975) visade tydligt hur stor inverkan hastigheten hade på ödometerkurvan. Detta har sedan följts upp i en rad undersökningar av andra forskare och några exempel ges i Fig. 4 till 9.



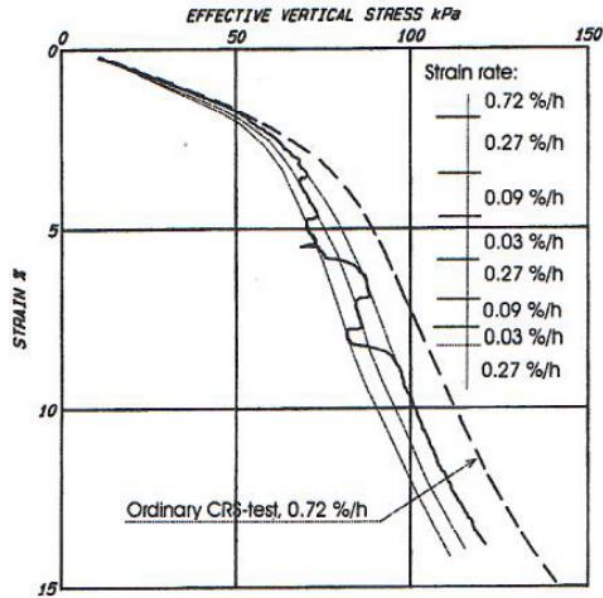
Figur 4. CRS-försök på lera från Bäckebol, 7 m. (Sällfors, 1975)

I figuren redovisas hur spänningstöjningskurvan, samt utvecklingen av portrycken under försöken är beroende töjningshastigheten. Det framgår tydligt att ju högre töjningshastigheten är, desto längre åt höger förskjuts kurvan, samtidigt som de genererade portrycken ökar.



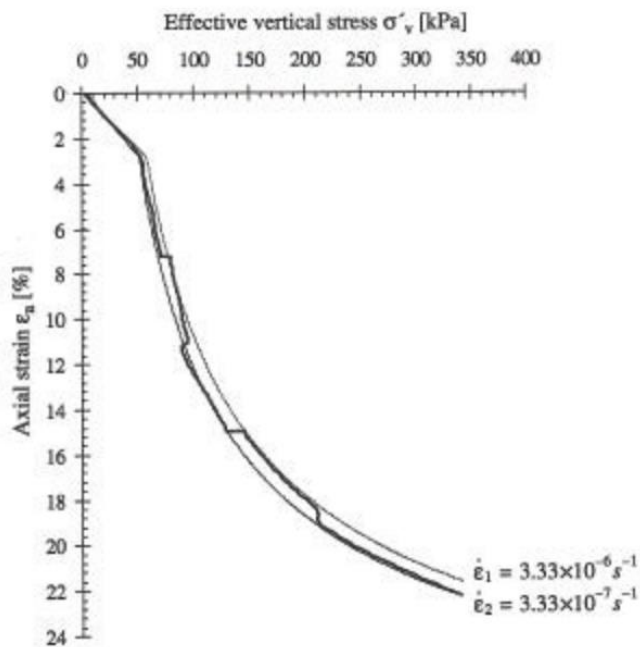
Figur 5. Resultat från triaxialförsök och CRS-försök med olika hastigheter. (Graham, Crooks, Bell 1983)

Graham et.al. varierade töjningshastigheten under ett triaxialförsök, liksom CRS-försök. Det framgår tydligt att kurvans utseende är beroende av töjningshastigheten.

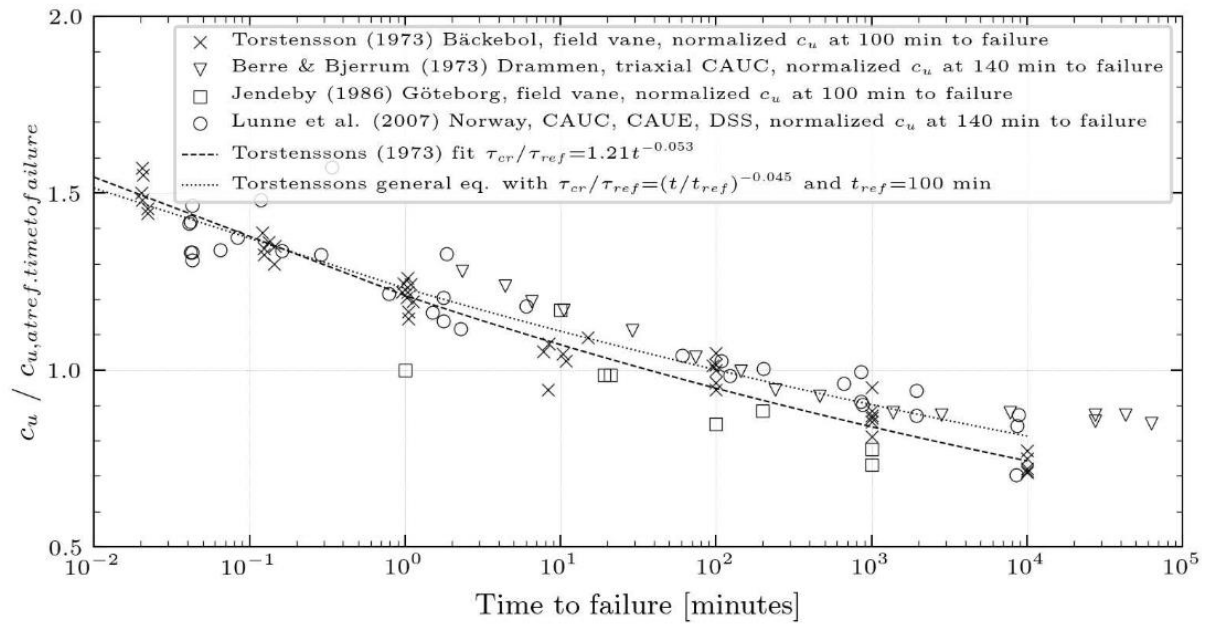


Figur 6. CRS-försök med varierande töjningshastigheter på lera från Änggården, 7 m. (Claesson, 2003)

Även Claesson (2003) och Länsivaara (2011) har redovisat CRS-försök med varierande hastighet, där hastighetsberoendet tydligt framgår.

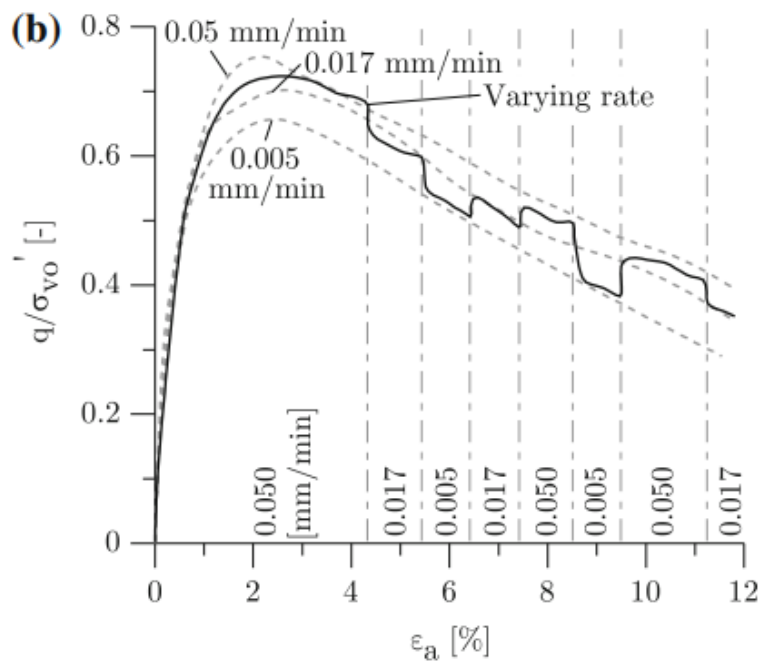


Figur 7. CRS-försök med varierande töjningshastigheter (Länsivaara, 2011)



Figur 8. Effektiv tid till brott på skjuvhållfasthet. Data från Berre och Bjerrum (1973), Jendeby (1986), Lunne och Andersen, (2007) och Torstensson (1973). Från Tornborg, 2020.

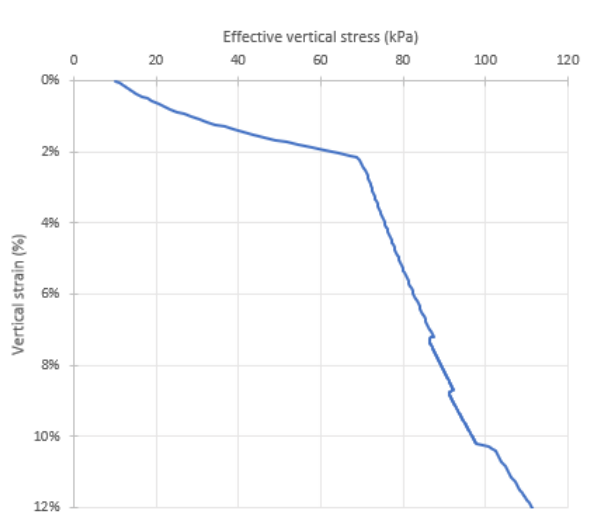
En mer omfattande sammanställning gjordes av Thornborg, 2019, som omfattar några olika metoder för bestämning av den odränerade skjuvhållfastheten.



Figur 9. Resultat från triaxialförsök med varierande hastigheter, data från Gylland et. al., 2014.

3.4 Några exempel på numerisk modellering av hastighetsberoende

Några inledande simuleringar av CRS-försök med PLAXIS och med olika töjningshastigheter har gjorts av Mats Karlsson, Chalmers. Även här framgår hastighetseffekter. Storleken på hastighetseffekterna och tillhörande parametrar diskuteras närmare i kap. 5.



Figur 10. Exempel på hastighetseffekter vid simulering av CRS-försök med olika hastigheter med materialmodell *Soft soil creep*. (modellering utförd av Mats Karlsson, Chalmers)

Modellering med FEM-modellen *soft soil creep*, visar även den att CRS-kurvan flyttas åt höger när töjningshastigheten ökar. Man kan av figuren ana att modulen M_L inte påverkas nämnvärt av töjningshastigheten.

4. Syfte/Hypotes

I ansökan till detta forskningsprojekt återfanns följande text:

Baserat på de försöksresultat från direkta skjuvförsök, triaxialförsök och CRS-försök, som beskrivits ovan, förväntas studien resultera i rekommendationer för hur försöksutförande och utvärdering av materialparameterar, främst odränerad hållfasthet och förkonsolideringstryck, skall modifieras för att ge relevanta värden på dessa parametrar, även för prover från stora djup.

Mellan raderna kan man läsa att w_L , alternativt w_N , torde påverka hastighetseffekten så att den var mer markerad ju högre w_L var. Det fanns antydning om det hos några forskare, medan andra forskare inte ansett sig finna det.

Länsivaara (1999) har föreslagit följande ekvation för hur töjningshastigheten påverkar det utvärderade förkonsolideringstrycket

$$\sigma'_{v1} / \sigma'_{v2} = \sigma'_{evc1} / \sigma'_{evc2} = (\dot{\epsilon}_{c1} / \dot{\epsilon}_{c2})^B \quad \text{ekv. 4.1}$$

där σ'_{c1} och σ'_{c2} är förkonsolideringstrycken vid de två olika töjningshastigheterna

σ'_{c1} och σ'_{c2} är effektivspänningar vid de två olika töjningshastigheterna

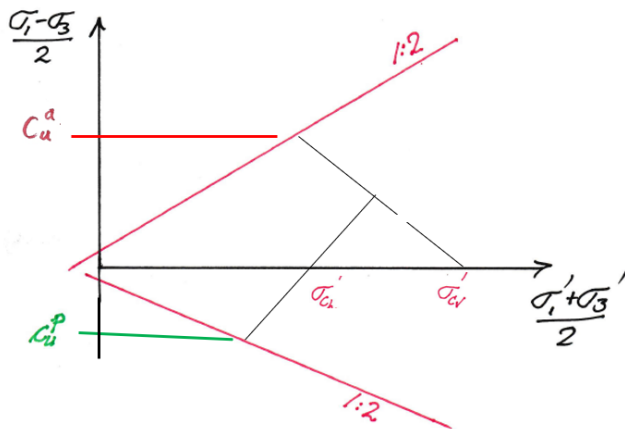
$\dot{\epsilon}_{c1}$ och $\dot{\epsilon}_{c2}$ är de två använda töjningshastigheterna

B = hastighetseffekt (Länsivaara, rate parameter)

Länsivaara (1999) fann att B är i storleksordningen 0,073 för finska leror från ödometerförsök. Claesson (2003) fann, utan att detaljstudera just faktorn B , att storleksordningen 0,06 till 0,08 verkade stämma också för de leror han studerat.

Mesri och Castro (1987) hävdade att, dock med en något annan utgångspunkt, att B var lägre, kanske i storleksordningen $0,04 \pm 0,01$ för leror, medan det för organiska leror kunde antas vara $0,05 \pm 0,01$. Det är dock inte bekant mer exakt vilken typ av lera som dessa undersökningar avser.

Det ligger nära tillhands att, p.g.a. den intima kopplingen mellan förkonsolideringstryck och den odränerade skjuvhållfastheten, anta att motsvarande ekvation är giltig även för den odränerade skjuvhållfastheten, se Fig 11.



Figur 11. Förenklad flytyta, som visar kopplingen mellan σ'_c och c_u^a och c_u^p

Ekvationen för den odränerade skjuvhållfastheten får då följande utseende, vilket är helt i linje med vad Torstensson (1973) föreslog.

$$c_{u1} / c_{u2} = (\dot{\epsilon}_{e1} / \dot{\epsilon}_{e2})^B \quad \text{ekv. 4.2}$$

där c_{u1} och c_{u2} är skjuvhållfastheten vid de två olika töjningshastigheterna $\dot{\epsilon}_{c1}$ och $\dot{\epsilon}_{c2}$

B = motsvarande hastighetseffekt

Detta skulle kunna antas gälla för såväl aktiv, som direkt som passiv skjuvhållfasthet. Det saknas dock egentligen underlag när det gäller passiva triaxialförsök.

I den fortsatta redovisningen och analysen kommer resultaten att redovisas på två sätt

- procentuell minskning av skjuvhållfasthet respektive förkonsolideringstryck vid en halvering av hastigheten respektive en minskning till $1/4$ av hastigheten.
- utvärderat B -värde ur resultaten

med $B = \log (\sigma'_{c1} / \sigma'_{c2}) - \log (\dot{\epsilon}_1 / \dot{\epsilon}_2)$ respektive	ekv. 4.3
$B = \log (c_{u1} / c'_{u2}) - \log (\dot{\epsilon}_1 / \dot{\epsilon}_2)$	ekv. 4.4

Fördelen med att ange ett utvärderat B -värde är att då kan även resultat där ändringen av töjningshastigheten avviker från en halvering användas.

Med detta som bakgrund, kan **hypotesen** omformuleras och skrivas enligt följande:

Hastighetsberoendet för de utvärderade parametrarna förkonsolideringstryck och odränerad skjuvhållfasthet kan skrivas enligt

ovanstående ekv. 4.3 och ekv. 4.4. Parametern B är beroende av lerans tekniska egenskaper och kan förväntas minska med minskande konflytgräns, alternativt vattenkvot.

Det skall här påpekas att det förmodligen är en rad andra egenskaper som skulle kunna ha betydelse för hastighetsberoendet, som t.ex. lerhalt, organisk halt, lermineral, salthalt, töjningsnivå, överkonsolideringsgrad m.fl. Eftersom dessa parametrar är kostsamma och sällan är tillgängliga i traditionella laboratorieprogram, återstår parametrar som vattenkvot och konflytgräns. Dessa bestäms rutinmässigt och finns som regel angivna och möjligen speglar just konflytgränsen och/eller vattenkvoten, åtminstone på något sätt de ovan uppräknade parametrarna.

5. Redovisning av resultat från genomförda försöksserier

De flesta försök som genomförts inom ramen för detta projekt har inneburit att man i CRS-försöken har startat försöken med standardhastigheten och sedan halverat den efter 6 à 7 % töjning. Efter ytterligare 1,5 % töjning har töjningshastigheten halverats ytterligare en gång, för att efter ytterligare 1,5 % töjning återgå till standardhastigheten. I vissa fall har man genomfört två cykler med hastighetsreducering.

Genom detta förfarandet har det varit enklare att med viss ritteknik återskapa töjningskurvor som med skälig noggrannhet kan anses representera de olika töjningshastigheten.

Några försök har också utförts för att, om möjligt, studera effekten av varierande töjningshastighet för spänningar lägre än förkonsolideringstrycket (därmed kan belastningshastighetens påverkan studeras).

För de direkta skjuvförsöken och triaxialförsöken har man förfarit på motsvarande sätt, fast då ändrat töjningshastigheten på motsvarande sätt strax efter det att skjuvspänningen nått sitt maximivärde.

Som påpekats i kap. 4 redovisas resultaten på två sätt

- procentuell minskning av skjuvhållfasthet respektive förkonsolideringstryck vid en halvering av hastigheten respektive en minskning till $\frac{1}{4}$ av hastigheten.
- utvärderat B-värde ur resultaten enligt ekv. 4.3 och 4.4.

Redovisningen av resultaten görs nedan under rubrikerna för respektive laboratorium, som utfört försöken för olika försökslokaler. Därefter redovisas ytterligare några försök. Dessutom redovisas en del B-värden utvärderade ur i litteraturen redovisade försök.

5.1 LabMind

5.1.1 Gunnilse, Borrhål HA 1

Vattenkvoten, w_N :	$0,33 < w_N < 0,64$
Konflytgräns, w_L :	$0,31 < w_L < 0,55$
Odränerad skjuvhållfasthet, c_u :	$46 < c_u < 86 \text{ kPa}$

I denna lokal utfördes en provtagning, vingsonering och CPT inom ramen för detta projekt ner till 24 m av Ingemar Forsgren. Provtagning och laborieförsök var en del av den delfinansiering som Göteborgs stad bekostade.

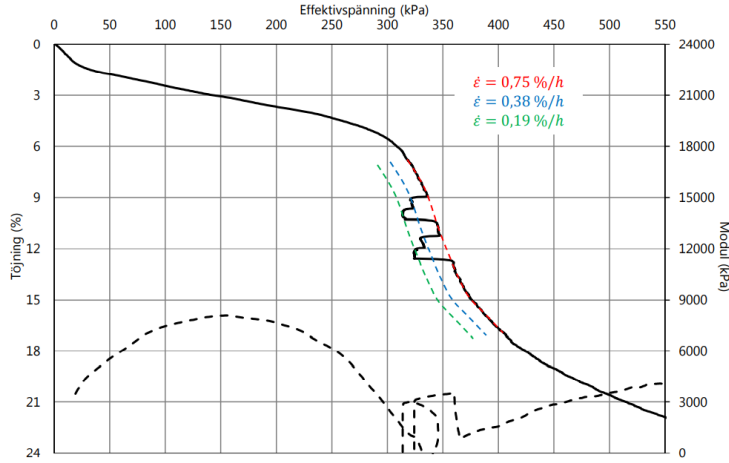
På dessa prover utfördes sedan ett omfattande försöksprogram (LabMind). En mer omfattande redovisning av alla försök återfinns i en separat rapport (MUR, Gunnilse, HA1). Nedan lämnas endast en sammanställning av resultaten från de utförda försöken (CRS, DS samt triax med tillhörande vattenkvoter och konflytgränser). Dessutom visas några exempel på typiska försöksresultat.

Tabell 5.1.1 Resultat från Borrhål HA1, Gunnilse.

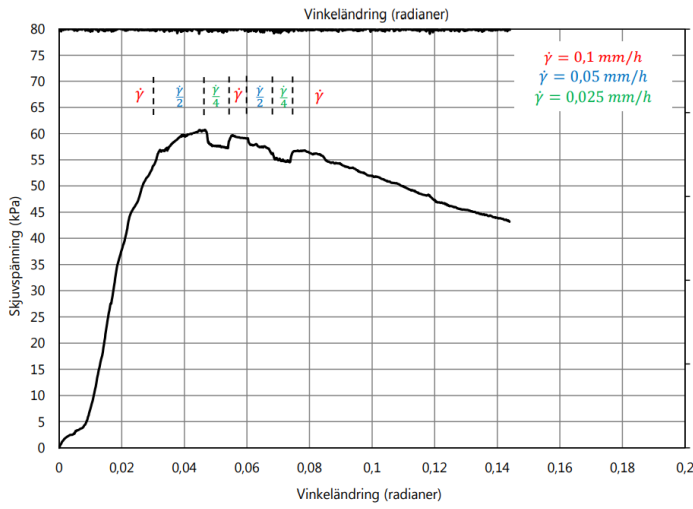
Djup	w_N/w_L	CRS			cuDS	DS			cua	w	Triax		
		$\dot{\epsilon}$	$\dot{\epsilon}/2$	$\dot{\epsilon}/4$		$\dot{\epsilon}$	$\dot{\epsilon}/2$	$\dot{\epsilon}/4$			$\dot{\epsilon}$	$\dot{\epsilon}/2$	$\dot{\epsilon}/4$
6	43/46												
8	45/47												
10	38/43	1,000	0,941	0,889	43	1,000	0,965	0,925					
12	33/31												
14	64/47	1,000	0,956	0,919					86	61	1,000	0,97	0,95
15	53/54								57	61	1,000	0,978	0,965
16	51/53	1,000	0,957	0,918	53	1,000	0,964	0,968					
17													
18	46/45												
18	46/45	1,000	0,954	0,913					74	41	1,000	0,975	0,937
19	47/55				57	1,000	0,969	0,93					
20	56/45	1,000	0,954	0,914					62	55	1,000	0,964	0,955
21													
22	49/41	1,000	0,965	0,927									
23	50/40				58	1,000	0,967	0,921					
24	49/44												
26	37/42												
		1,000	0,957	0,918		1,000	0,966	0,936			1,000	0,972	0,952
	B =		0,06311	0,06001			0,0495	0,04589				-0,0413	0,030
				0,062				0,048					0,036
		$\dot{\epsilon}$	$\dot{\epsilon}/2$	$\dot{\epsilon}/4$	cuDS	$\dot{\epsilon}$	$\dot{\epsilon}/2$	$\dot{\epsilon}/4$	cua	w	$\dot{\epsilon}$	$\dot{\epsilon}/2$	$\dot{\epsilon}/4$
		CRS				DS					Triax		

I tabell 5.1.1 framgår att såväl w_L som w_N ligger i stort sett i ett 10 %-intervall. B -värdena varierar inte särskilt mycket och är i stort sett runt 0,06 för CRS-försöken, 0,045 till 0,050 för direkta skjuvförsöken och ytterligare något lägre, runt 0,035 till 0,04 för triaxialförsöken.

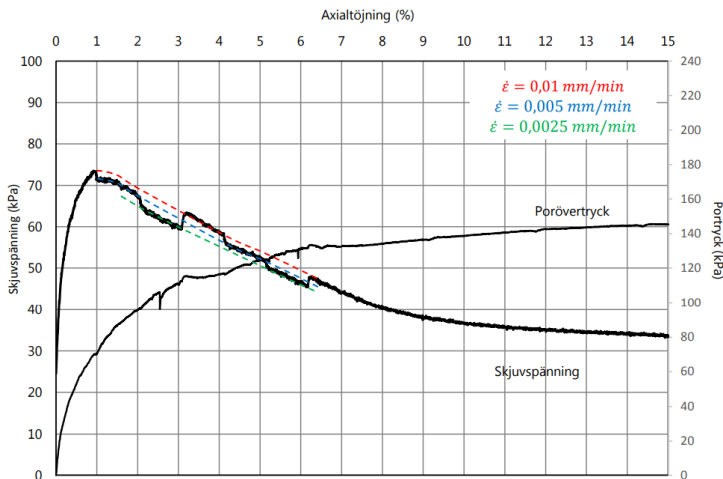
CRS-försök



Direkt skjuvförsök



Triaxialförsök



Figur 12. Exempel på resultat på lera från Gunnilse, HA1. För ett mer detaljerat studium av resultaten hänvisas till Appendix 1.

5.1.2 Börjegatan. Uppsala

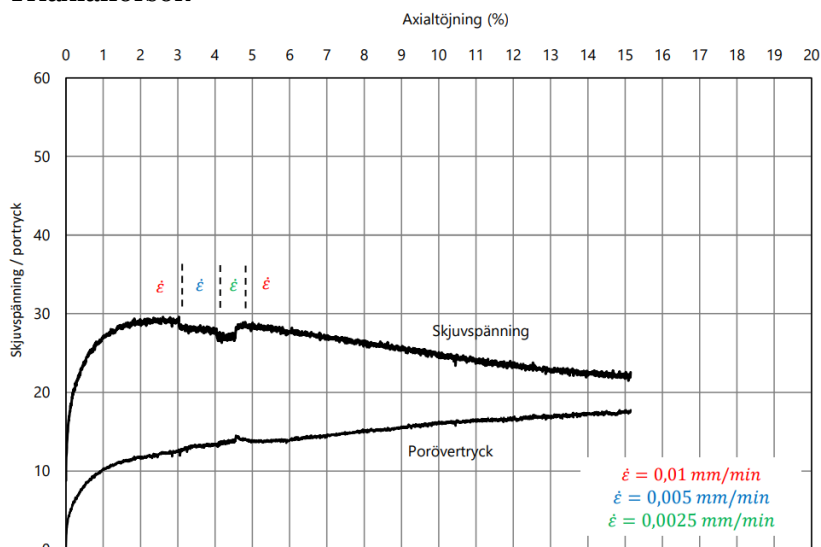
Vattenkvoten, w_N : $0,59 < w_N < 0,87$
 Konflytgräns, w_L : $0,43 < w_L < 0,66$
 Odränerad skjuvhållfasthet, c_u^a : $21 < c_u < 33$ kPa

Tabell 5.1.2 Resultat från Börjegatan, Uppsala.

djup	w_N/w_L	$\dot{\epsilon}$	Triax	
			$\dot{\epsilon}/2$	$\dot{\epsilon}/4$
4 m	52/48	1,000	0,975	0,950
		B =	0,037	0,037
6 m	87/66	1,000	0,960	0,920
		B =	0,059	0,060
8 m	39/43	1,000	0,978	0,952
		B =	0,032	0,035
12 m	55/52	1,000	0,968	0,940
		B =	0,047	0,045

En viss trend kan skönjas i tabell 5.1.2, där B -värdena är lägre ju lägre vattenkvoterna är.

Triaxialförsök



Figur 13. Exempel på resultat på lera från Börjegatan, Uppsala

5.1.3 Sunbyberg

Vattenkvoten, w_N : $0,63 < w_N < 0,89$
 Konflytgräns, w_L : $0,58 < w_L < 0,62$
 Odränerad skjuvhållfasthet, c_u^{DS} : $15 < c_u < 22$ kPa

Tabell 5.1.3. Resultat från Sunbyberg.

Direkta skjuvförsök

djup	w_N/w_L	$\dot{\epsilon}$	$\dot{\epsilon}/2$	$\dot{\epsilon}/4$
6,5 m	89/62	1,000 B =	0,951 0,072	0,906 0,071
8,5 m	63/58	1,000 B =	0,964 0,053	0,940 0,045

5.1.4. Årsta Kyrkby, ett försök

Vattenkvoten, w_N : $w_N = 0,44$
 Konflytgräns, w_L : $w_L = 0,41$
 Odränerad skjuvhållfasthet, c_u^{DS} : $c_u = 60$ kPa

Tabell 5.1.4. Resultat från Årsta kyrkby.

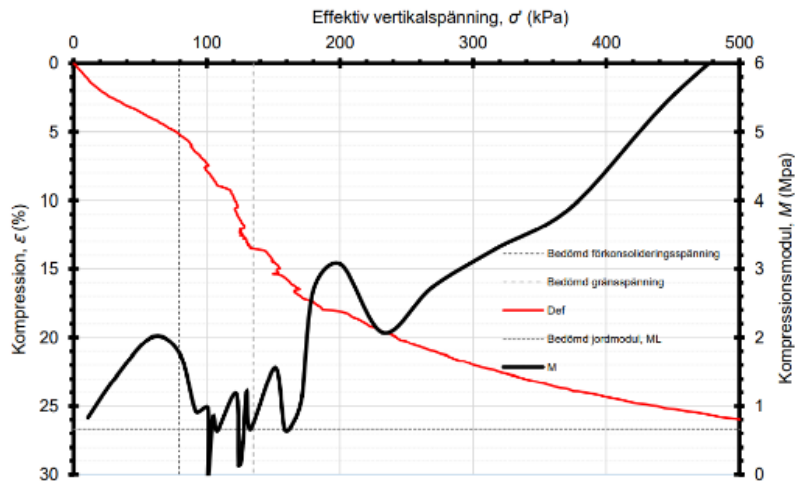
Direkta skjuvförsök

Direkta skjuvförsök				
djup	w_N/w_L	$\dot{\epsilon}$	$\dot{\epsilon}/2$	$\dot{\epsilon}/4$
5 m	44/41	1,000 B =	0,961 0,057	0,923 0,058

5.2. Bjerking

Bjerking har utfört CRS-försök. Leran är från Uppsala.

Vattenkvoten, w_N : $0,33 < w_N < 0,53$
 Konflytgräns, w_L : $0,49 < w_L < 0,50$
 Förkonsolideringstrycken, σ'_c : $78 < \sigma'_c < 162$ kPa



Figur 14. Exempel på resultat från CRS-försök på lera från, Uppsala

Tabell 5.2 Resultat från Uppsala.

St	OCR	Djup m	w_L / w_N	$\dot{\epsilon}$	CRS	
					$2 \dot{\epsilon} / 3$	$\dot{\epsilon} / 3$
		6,5	49 / 53	1	0,9759	0,937
				B =	0,060	0,0592
						0,0587
		22	50/33	1	0,990	0,980
				B =	0,025	0,018
						0,0146

5.3. Bohusgeo

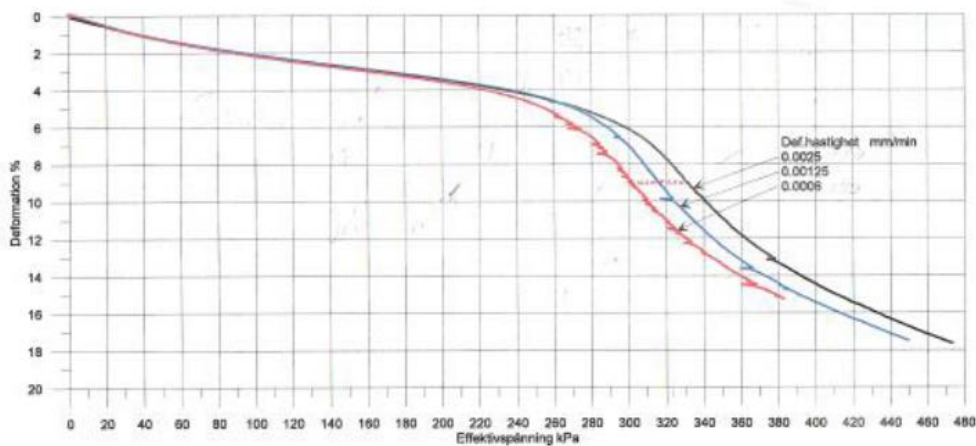
Masthuggskajen

Vattenkvoten, w_N :	$0,57 < w_N < 0,63$
Konflytgräns, w_L :	$0,73 < w_L < 0,77$
Förkonsolideringstrycken, σ'_{vc} :	$265 < \sigma'_{vc} < 650$

Dessa försök utfördes redan innan detta projekt startade. Ett ganska omfattande program med olika hastigheter på lera från stora djup, 35 till 70 m. Observera att samtliga försök har utförts med konstant deformationshastighet och man har således inte varierat hastigheterna under ett enskilt försök. Spridningen i resultaten kan därmed bli lite större eftersom proverna inte är helt identiska. Fördelen är dock att man kan studera hur varierande belastningshastighet för spänningar $< \sigma'_{vc}$ påverkar resultaten.

Tabell 5.3 Resultat från CRS-försök på lera från Masthuggskajen.

	Djup	w_N/w_L	$\dot{\epsilon}$	CRS	
				$\dot{\epsilon}/2$	$\dot{\epsilon}/4$
OBS! olika prover	35	63/74	1,000	0,95	0,904
			B =	0,074	0,073
	40	62/73	1,000	0,981	0,966
			B =	0,0277	0,025
	45	63/76	1,000	0,969	0,919
			B =	0,0454	0,061
	75	57/77	1,000	-	0,955
			B =		0,033



Figur 15. Exempel på resultat från CRS-försök på lera från Masthuggskajen i Göteborg, 35 m djup.

5.4. Multiconsult, Trondheim

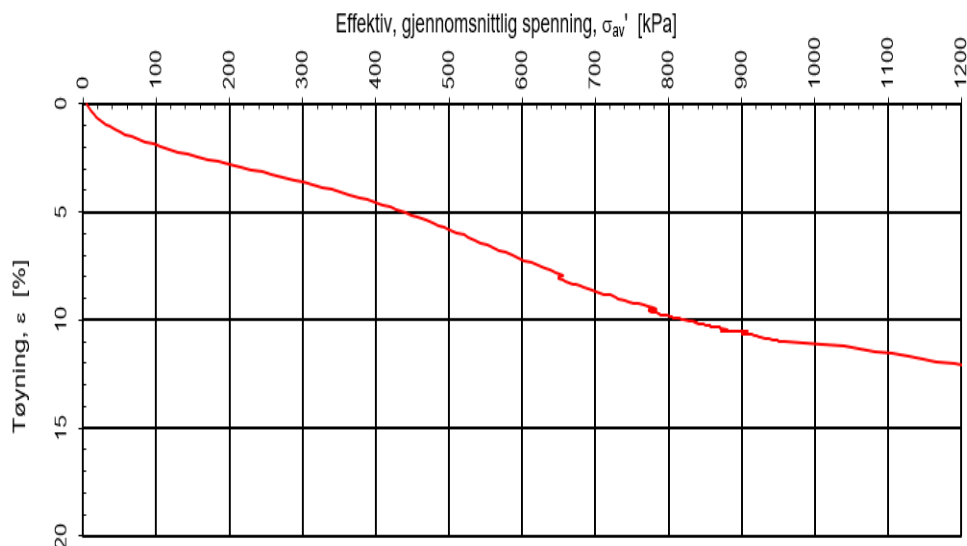
Multiconsult i Trondheim har utført ett antal CRS-førsök på en mycket mager lera med w_N på endast 26 - 29 %. Dessa gav mycket låga B -värden.

Vattenkvoten, w_N : $0,26 < w_N < 0,29$
 Förkonsolideringstrycken, σ'_c : $ca\ 100 < \sigma'_c < 400$

Tabell 5.4 Resultat från CRS-førsök på lera från Trondheim.

Djup m	w_L / w_N	CRS		
		$\dot{\epsilon}$	$\dot{\epsilon}/2$	$\dot{\epsilon}/4$
3,6	- / 28	1	0,969	0,947
		B =	0,045	0,039
3,55	- / 26	1	0,979	0,958
		B =	0,031	0,031
4,5	- / 29	1	0,971	0,960
		B =	0,042	0,029

CRS-førsök



Figur 16. Exempel på resultat från CRS-førsök på lera från Trondheim

5.5 Mitta

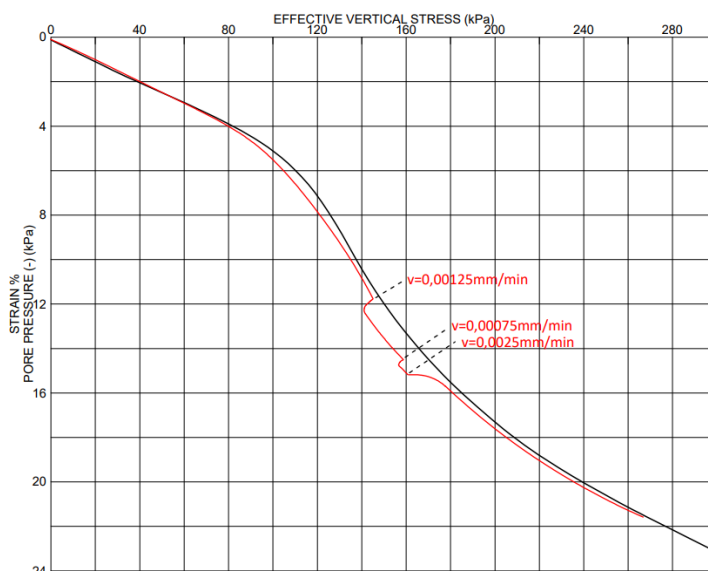
Vattenkvoten, w_N :	$0,58 < w_N < 0,84$
Konflytgräns, w_L :	$0,43 < w_L < 0,80$
Förkonsolideringstrycken, σ'_c :	$60 < \sigma'_c < 440$
Odränerad skjuvhållfasthet, c_u :	$37 < c_u < 46$

På Mittas dåvarande laboratorium i Gottskär, har en del försök utförts, huvudsakligen på lera från Göteborgsregionen.

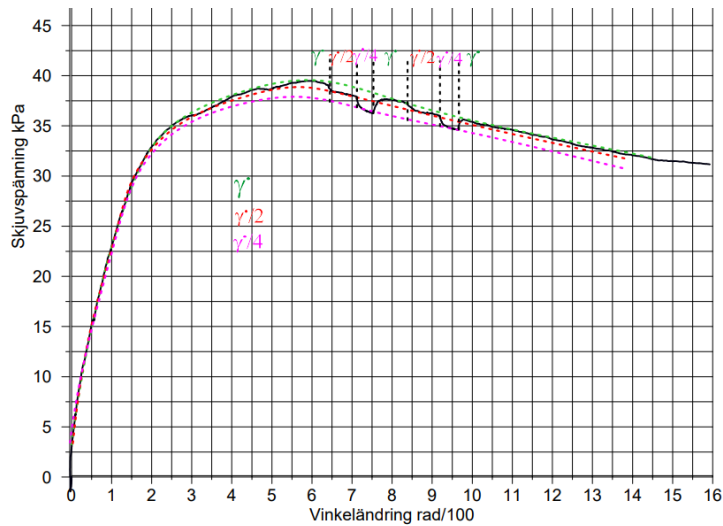
Tabell 5.5.1 Resultat från CRS-försök, direkta skjuvförsök och triaxialförsök på några leror från Göteborgsregionen.

Geogr.läge	Kvalitet	σ'_c	w_N/w_L	OCR	Djup	CRS			$c_u D$	$\dot{\epsilon}$	DS		c_u^a	$\dot{\epsilon}$	Triax	
						$\dot{\epsilon}$	$\dot{\epsilon}/2$	$\dot{\epsilon}/4$			$\dot{\epsilon}/2$	$\dot{\epsilon}/4$				
Test 1		110	76/66	1,3	12	1,000		0,917								
						B =		0,0625								
Test 2			56/45						47					1,000	0,976	0,943
Test 3			59/43		12				40	1,000	0,979	0,956		B =	0,035	0,042
Test 4			58/-		10				47	B =	0,031	0,032	55	1,000	0,967	0,940
												0,032		B =	0,048	0,045
Rv45	OBS!	355	ca 70		40	1,000	0,901	-								
	olika	384	ca 70		45	1,000	0,948	-								
	prover	461	ca 70		50	1,000	0,937	-								
						B =	0,085									

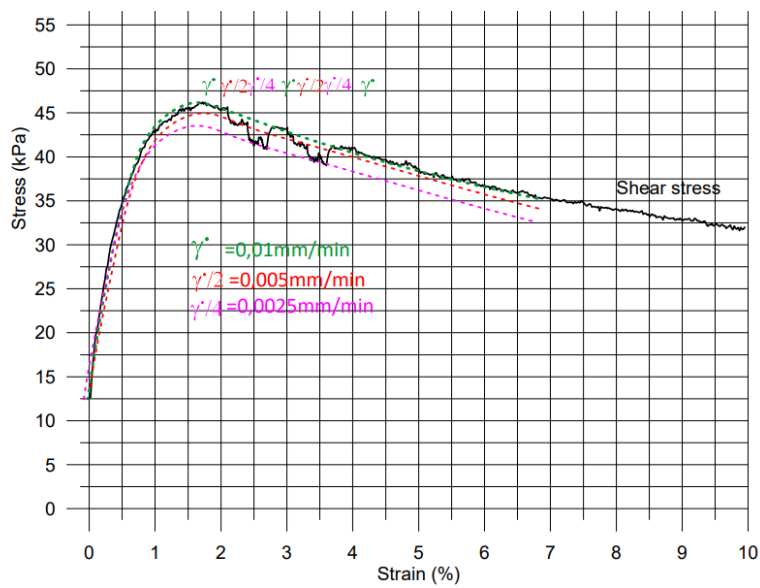
CRS-försök



Figur 17. Exempel på resultat från CRS-försök på lera från Göteborgsregionen



Figur 18. Exempel på resultat från direkt skjuvförsök på lera från Göteborgsregionen



Figur 19. Exempel på resultat från triaxialförsök på lera från Göteborgsregionen

Tabell 5.5.2 Resultat från CRS-försök, Exportgatan, Göteborg

Djup	w_N/w_L	$\dot{\epsilon}$	$\dot{\epsilon}/2$
30 m	59 / -	1,000	0,969
	B =		0,062

Tabell 5.5.3 Resultat från CRS-försök från Ivarslund, vid Göta älv.

Djup	w_N/w_L	$\dot{\epsilon}$	$\dot{\epsilon}/2$	$\dot{\epsilon}/4$
4,25 m	84/80	1,000	0,930	0,900
		B =	0,105	0,076
				0,088
9,16m	84/65	1,000	0,927	0,900
		B =	0,109	0,069
				0,088

5.6 WSP

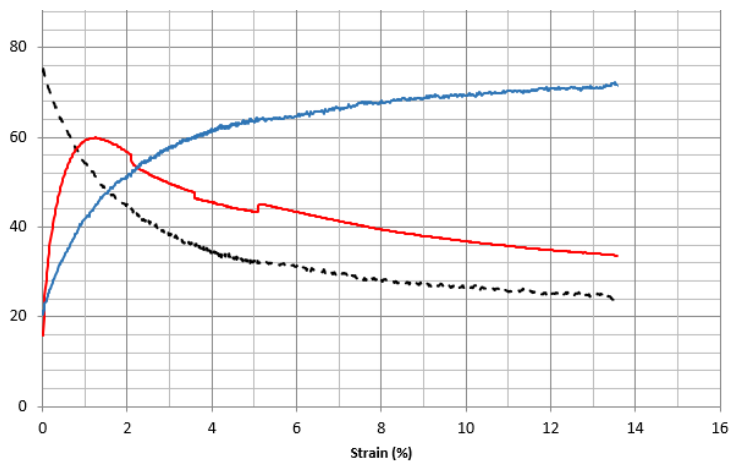
Vattenkvoten, w_N :	$0,41 < w_N < 0,76$
Konflytgräns, w_L :	$0,41 < w_L < 0,66$
Förkonsolideringstrycken, σ'_c :	$110 < \sigma'_c < 130$
Odränerad skjuvhållfasthet, c_u :	$40 < c_u < 79$

5.6.1 Ballsered

Vattenkvoten, w_N :	$0,63 < w_N < 0,70$
Konflytgräns, w_L :	$0,43 < w_L < 0,66$
Odränerad skjuvhållfasthet, c_u^a :	$40 < c_u < 79$

Tabell 5.6.1 Resultat från triaxialförsök på lera från Ballsered vid Göta älv.

Djup m	cua	wl	w	ε̇	Triax	
					ε̇/2	ε̇/4
15	77,4	43	67	1,000 B =	0,977 0,034	0,953 0,035
4	41	64	69	1,000 B =	0,949 0,076	0,905 0,072
8	60	57	66	1,000 B =	0,963 0,054	0,928 0,054
12	70	44	68	1,000 B =	0,970 0,044	0,951 0,036
15	78,7	45	63	1,000 B =	0,977 0,034	0,954 0,034
8	39,8	65	73	1,000 B =	0,966 0,050	0,924 0,057
12	64,2	66	70	1,000 B =	0,973 0,039	0,945 0,041
16	73	50	68	1,000 B =	0,969 0,045	0,940 0,045



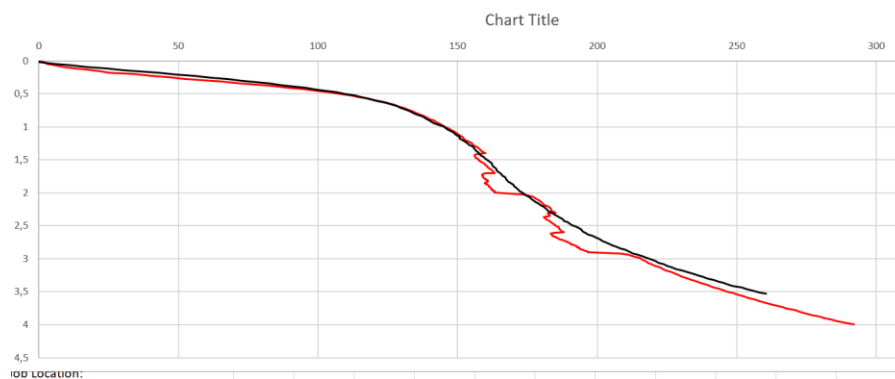
Figur 18. Exempel på resultat från triaxialförsök på lera från Balsered

5.6.2 Forstena

Vattenkvoten, w_N :	$0,41 < w_N < 0,76$
Konflytgräns, w_L :	$0,41 < w_L < 0,56$
Förkonsolideringstrycken, σ'_c :	$110 < \sigma'_c < 130$

Tabell 5.6.2 Resultat från CRS-försök på lera från Forstena vid Göta älv.

w_N/w_L	OCR	Djup	$\dot{\epsilon}$	CRS	
				$\dot{\epsilon}/2$	$\dot{\epsilon}/4$
64/51		7,2	1,000	0,963	0,932
			B=	0,054	0,047
76/56		10,2	1,000	0,965	0,936
			B=	0,051	0,044
41/41			1,000	0,972	0,944
			B=	0,041	0,042

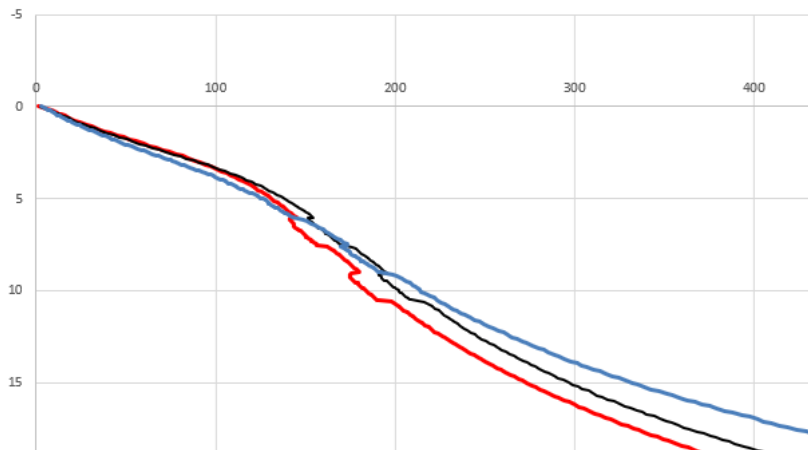


Figur 18. Exempel på resultat från CRS-försök på lera från Forstena, 10m

5.6.3 Fridhems varv, Lysekil

Vattenkvoten, w_N : $w_N = 0,61$
 Konflytgräns, w_L : $w_L = 0,55$
 Förkonsolideringstrycken, σ'_c : ca 120 kPa

Djup	$\dot{\epsilon}$	CRS
		$\dot{\epsilon}/2$
13 m	1,000	0,96
	B=	0,059
	1,000	0,959
	B=	0,060
	1,000	0,957
	B=	0,063



Figur 19. Resultat från CRS-försök på lera Fridhems varv, Lysekil.

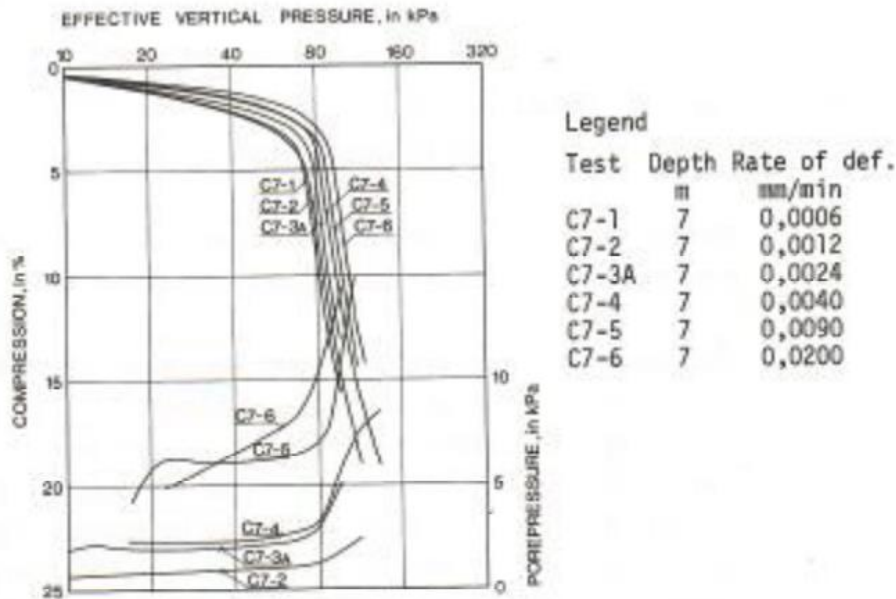
5.7 Några exempel och utvärderade B-värden, från litteraturen

5.7.1 Sällfors (1975)

Vattenkvoten, w_N : $w_N = 1,00$
 Konflytgräns, w_L : $w_L = 1,00$
 Förkonsolideringstrycken, σ'_c : $\sigma'_c = 70$ kPa

Bäckeбол, 7 m. $w_n = w_L = 100$ %

					CRS	w_N/w_L	
Djup	8,3 é	3,75 é	1,67 é	é	0,5 é	0,25 é	100/100
7 m							
	1,163	1,108	1,045	1,000	0,956	0,902	
	0,071	0,078	0,086		0,065	0,074	
	B(average) =		0,075				



Figur 20. Resultat från CRS-försök på lera från Bäckebo, 7 m (Sällfors, 1975)

Kristianstad

Vattenkvoten, w_N : $0,33 < w_N < 0,64$
 Konflytgräns, w_L : $0,40 < w_L < 0,54$
 Förkonsolideringstrycken, σ'_c : $80 < \sigma'_c < 130$

	CRS		w_N/w_L
Djup 3 m	$\dot{\epsilon}$	0,25 $\dot{\epsilon}$	72/69
	1,000	0,92	
		0,060	

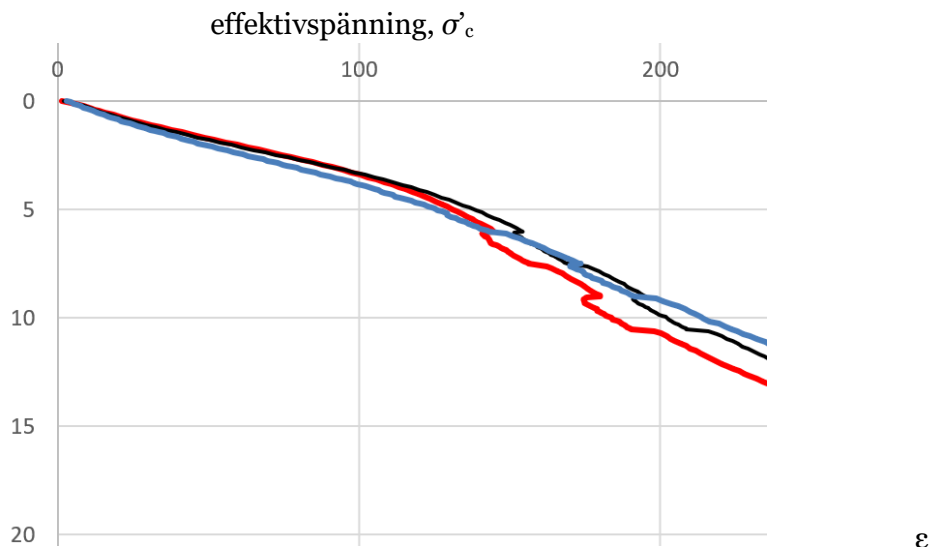
5.7.2 Claesson (2003), Änggården.

Vattenkvoten, w_N : $0,70 < w_N < 0,80$
 Konflytgräns, w_L : $0,40 < w_L < 0,54$
 Förkonsolideringstrycken, σ'_c : $50 < \sigma'_c < 100$

	$\dot{\epsilon}$	$\dot{\epsilon} / 3$	$\dot{\epsilon} / 9$
	1	0,939	0,867
B =		0,057	0,065

5.8 Töjningshastighetens inverkan på M_o och σ'_c .

I stort sett i samtliga fall ovan, har töjningshastigheten för CRS-försöken ändrats efter det att förkonsolideringstrycket passerats. Några försök har dock utförts, där det varit möjligt att utröna hur töjningshastigheten påverkar M_o .



Figur 21. Resultat från CRS-försök på lera Fridhems varv, Lysekil.

De röda och svarta kurvorna i ovanstående figur, startade med samma töjningshastighet, den som gäller som standard. Den blå kurvan startades med halva töjningshastigheten. Av kurvorna framgår även att M_o är densamma, ca 2,30 MPa för de två kurvorna med standardhastighet, medan M_o för det försöket som körts med halva hastigheten är marginellt lägre, ca 2,15 MPa. Det innebär en minskning av M_o med ca 6 %. Förkonsolideringstrycken kunde inte utvärderas med någon större precision, men skillnaden var i samma storleksordning som för M_o . Jämför man detta med den hastighetseffekt som redovisats i avsnitt 5.6.3 finner man, förvånansvärt nog, att hastighetseffekten är marginellt större för spänningar lägre än σ'_c än vad som utvärderats för spänningar större än σ'_c . Detta kan bero på att i detta fallet jämför vi resultat från två olika prover, vilket normalt ger större spridning.

Bohusgeo utförde CRS-försök med olika hastigheter på lera från Mathuggskajen, se avsnitt 5.3. De skillnader som redovisas där, är utvärderade för spänningar större än σ'_c . Eftersom det är olika försök har det varit möjligt att utvärdera effekten av hastigheten också på de utvärderade förkonsolideringstrycken. De så erhållna B-värdena redovisas i nedanstående tabell.

Tabell 8.1 B-värden utvärderade ur försök från Masthuggskajen. Värdena i de tre högra kolumnerna är utvärderade från förkonsolideringstrycken, medan de tre vänstra kolumnerna avser värden utvärderade för spänningar större än förkonsolideringstrycket, på M_L -delen av kurvan.

	CRS					DS		
	Djup	w_N/w_L	$\dot{\epsilon}$	$\dot{\epsilon}/2$	$\dot{\epsilon}/4$	$\dot{\epsilon}$	$\dot{\epsilon}/2$	$\dot{\epsilon}/4$
	35	63/74	1,000	0,95	0,904	1,000	0,96	0,91
OBS!			B =	0,074	0,073	B =	0,0589	0,068
olika	40	62/73	1,000	0,981	0,966	1,000	0,991	0,978
prover			B =	0,0277	0,025	B =	0,013	0,016
	45	63/76	1,000	0,969	0,919	1,000	0,983	0,945
			B =	0,0454	0,061	B =	0,0247	0,041
	75	57/77	1,000	-	0,955	1,000		0,962
			B =		0,033	B =		0,028

Slutsatserna som kan dras, även om värdena hoppar en del, är att B -värdena utvärderade vid förkonsolideringstrycken är ca 70 % av de värden som utvärderats på M_L -delen av kurvorna.

Även resultat från Rv45/ned-sänkningen, som Bohusgeo har genomfört, studerades och gav liknande skillnader, även om resultaten var lite spretigare.

Underlaget är förvisso ganska magert, men det finns en klar tendens till att B -värden utvärderade vid jämförelser av förkonsolideringstrycken ger något lägre B -värden jämfört med när utvärderingen sker på M_L -delen av kurvorna.

6. Analys och kommentarer

Det är tydligt att töjningshastigheten påverkar försökskurvans utseende, såväl för CRS-försök som direkta skjuvförsök och triaxialförsök.

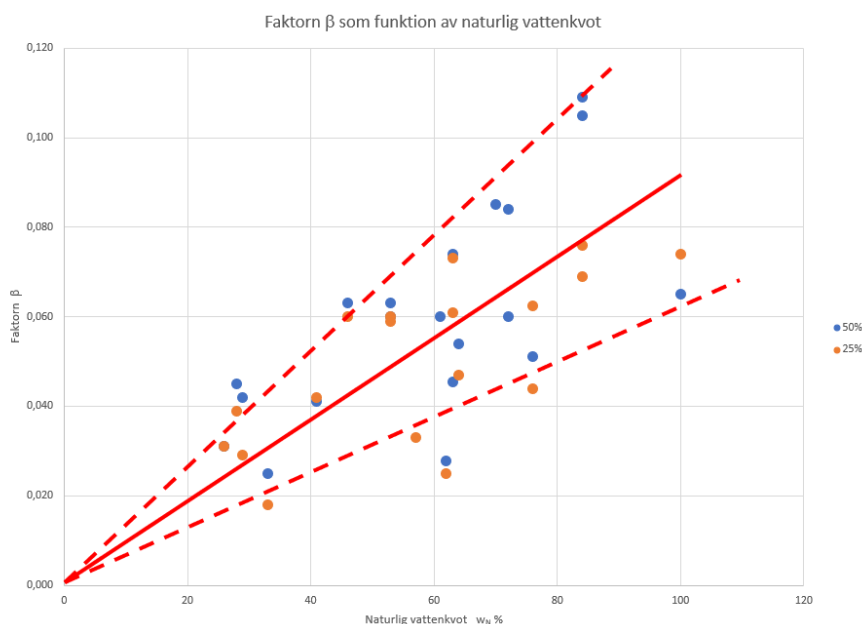
I det följande redovisas B -värdena som funktion, dels av vattenkvoten, dels av konflytgränsen. Resultat från de olika försökstyperna, CRS, Direkta skjuvförsök samt triaxialförsök redovisas i skilda diagram.

Spridningen är förvisso påtaglig, men en tydlig trend innebärande högre B -värde ju högre vattenkvoten är, framgår tydligt i de följande diagrammen.

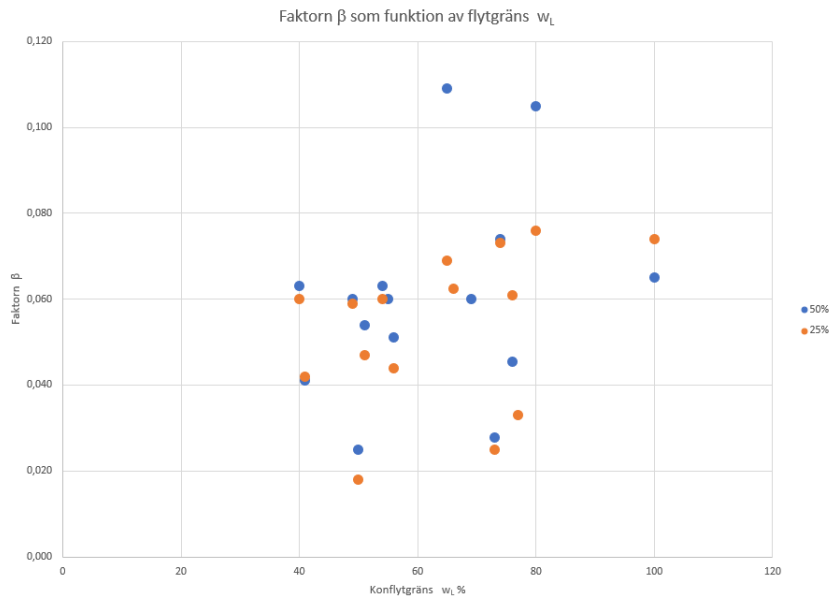
Vidare är det uppenbart att spridningen är påtagligt mindre när B -värdena plottas som funktion av vattenkvoten, jämfört med när de plottas mot konflytgränsen. Fördelen med vattenkvoten är att den speglar ju inte enbart lerhalten, men även i viss mån konsoliderings-förhållandena.

I diagrammen nedan avser siffrorna 50 % och 25 % att B -värdena är utvärderade vid en halvering, respektive en minskning till en $\frac{1}{4}$ av standardhastigheten. I diagrammen har möjliga trendlinjer skissats grovt ”för hand” (heldragna linjer), de streckade linjerna anger ungefärliga 90 procentiga konfidensintervall.

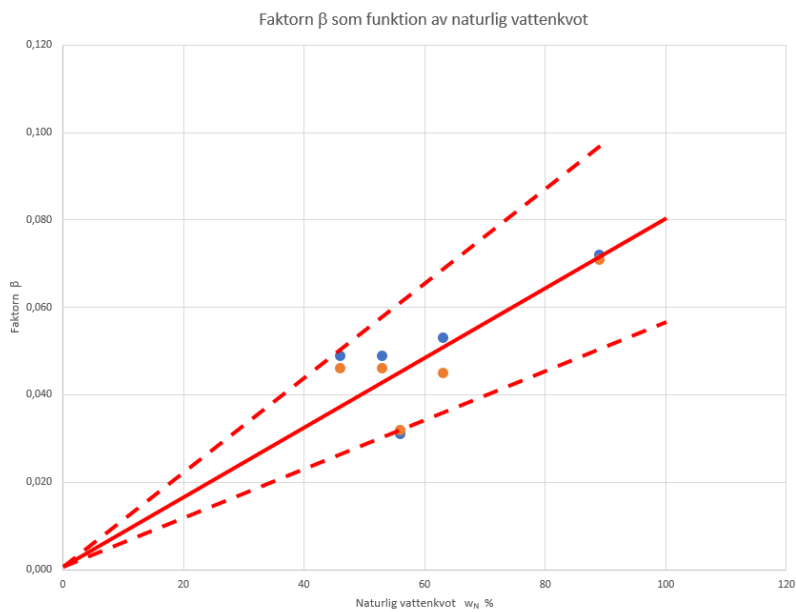
I de diagram, där B -värdet plottats som funktion av w_N , har en ungefärlig trendlinje lagts in, med antagandet om att den går genom origo.



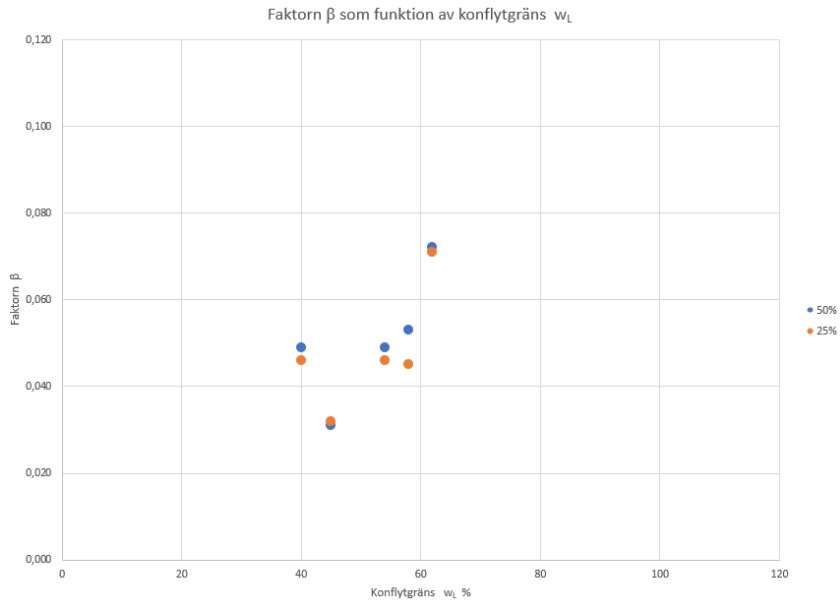
Figur 22. B -värden, som funktion av w_N , utvärderade ur CRS-försök. Den heldragna kurvan motsvarar $B = 0,09 \cdot w_N$



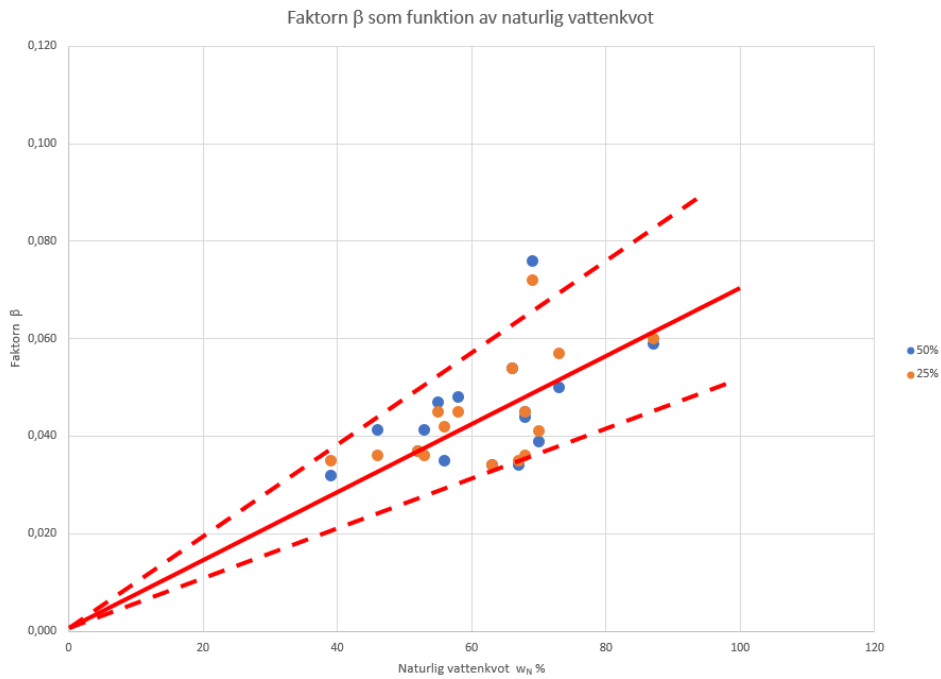
Figur 23. B -värden, som funktion av w_L , utvärderade ur CRS-försök.



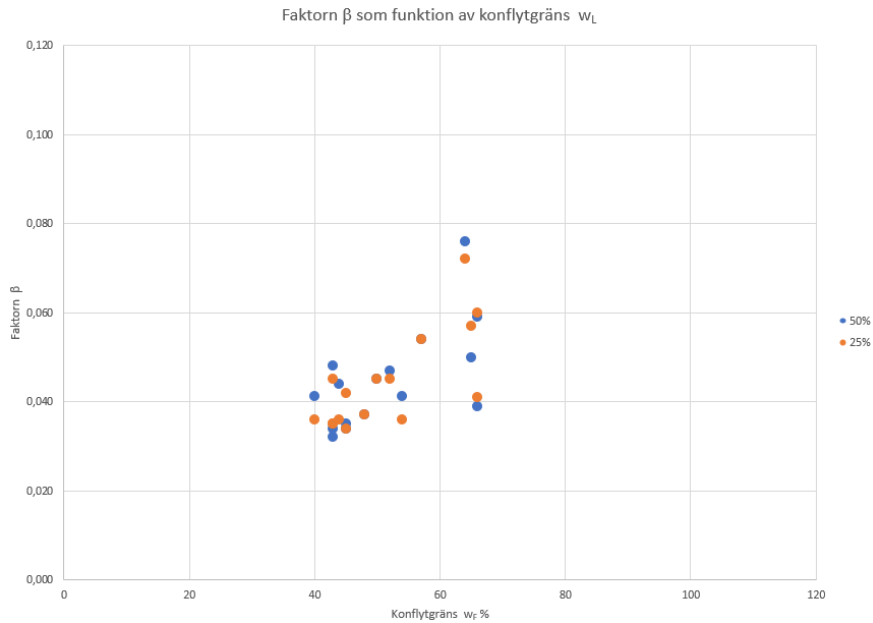
Figur 24. B -värden, som funktion av w_N , utvärderade ur odränerade direkta skjuvförsök. Den heldragna kurvan motsvarar $B = 0,08 \cdot w_N$



Figur 25. B -värden, som funktion av w_L , utvärderade ur direkta skjuvförsök.



Figur 26. B -värden, som funktion av w_N , utvärderade ur odränerade aktiva triaxialförsök. Den heldragna kurvan motsvarar $B = 0,07 \cdot w_N$



Figur 27. B -värden, som funktion av w_L , utvärderade ur triaxialförsök

I diagrammen med B -värdena som funktion av vattenkvoten har en tolkning av trenden för de olika försökstyperna gjorts. Följande funktioner har erhållits:

$$\text{CRS: } B = 0,09 \cdot w_N$$

$$\text{DS: } B = 0,08 \cdot w_N$$

$$\text{triax: } B = 0,07 \cdot w_N \text{ (aktivt försök)}$$

Simuleringarna med FEM, utförda med parametrar för typisk, svagt överkonsoliderad Göteborgs-lera, antyder för CRS-försök mindre hastighetsberoende än vad man funnit med CRS-försök på lera med i stort sett motsvarande egenskaper. Ytterligare simulering kommer att göras men frågeställningen är inte helt trivial och kommer medföra en del funderingar framgent.

Denna observation, i kombination med resultaten från de olika försökstyperna, där triax uppvisar det lägsta hastighetsberoendet, leder tankarna till att störningsgraden skulle kunna vara en faktor som påverkar dessa resultat. Det är ju så att vid ett triaxialförsök rekonsolideras provet före skjuvning till ca 85 % av förkonsolideringstrycket i vertikalled och motsvarande i horisontalled. Ett direkt skjuvförsök rekonsolideras, i alla fall i vertikalled i motsvarande grad, även om det kanske inte sker fullt ut i horisontalled. Vid ett CRS-försök sker ingen rekonsolidering innan försöket startas.

Det finns således skäl att anta att de B -värden som utvärderats ur

laboratorieförsöken är något större än vad motsvarande värden är för leran i fält.

Därför föreslås en viss reducering av det B -värde som skall användas för att kompensera ett försök, som utförts med standardhastighet, och som har påtagligt högre belastningshastighet än vad som tidigare varit fallet för leror tagna på djup ner till ca 20 m.

Därför föreslås följande värden på B -faktorn att användas för viss reduktion av σ'_c och c_u för lera med högre σ'_c än 100 kPa och c_u större än 33, 25 respektive 20 kPa för aktiv, direkt skjuv respektive passiv skjuvhållfasthet :

$$\text{CRS: } B = 0,08 \cdot w_N \quad (\text{istället för } 0,09 \cdot w_N)$$

$$\text{DS: } B = 0,07 \cdot w_N \quad (\text{istället för } 0,08 \cdot w_N)$$

$$\text{triax: } B = 0,06 \cdot w_N \quad (\text{istället för } 0,07 \cdot w_N)$$

Det bör noteras, att utvärderingen av B från DS och triax är något osäker, då B -värdena härletts efter max skjuvspänning (peak) i försöken.

Det förtjänas att också här påpeka att ringfriktionen vid CRS-försök har visat sig öka påtagligt vid höga spänningar, några hundra kPa. För de fall förkonsolideringstrycket är centralt i den geotekniska frågeställningen, rekommenderas att man utför ett konsoliderat, odränerat triaxialförsök vid, då med ett OCR vid konsolidering som är $< 1,5$. Då kan man utvärdera förkonsolideringstrycket ur spänningsvägen, som då är opåverkad av ringfriktion.

7. Rekommendationer

Tendensen är tydlig, töjningshastigheten påverkar försökskurvans utseende, såväl för CRS-försök som direkta skjuvförsök och triaxialförsök. Det innebär också att ju högre belastningshastigheten är, desto högre utvärderat förkonsolideringstryck respektive skjuvhållfasthet. Eftersom rådande svenska försöksutförande och utvärderingsmetoder för lera i princip är baserade på prover tagna ner till ca 20 m djup i svagt överkonsoliderade leror, kan det anses vara rimligt att anta att detta förfarande är någorlunda korrekt så länge $\sigma'_c < 100$ kPa, $c_u^a < 33$ kPa, $c_u^{DS} < 25$ kPa och $c_u^p < 20$ kPa.

Man bör därför överväga att göra någon form av modifiering av, antingen försöksutförandet eller tolkningsmetoden, för att på så sätt beakta att högre belastningshastigheter leder till något förhöjda värden på de utvärderade parametrarna.

Detta kan ske antingen genom att töjningshastigheten i försöken minskas eller genom att införa en reduktionsfaktor på de utvärderade parametrarna förkonsolideringstryck och skjuvhållfasthet. Det senare alternativet är klart att föredra, då man kan utföra försöken med ”standard” töjningshastigheter utan att på förhand veta något om lerans hållfasthets- eller töjningsegenskaper.

Följande rekommendation lämnas därför. Samtliga försök utförs med de töjningshastigheter som anges i respektive standard. Ur laboratorieförsöken erhållna värden på förkonsolideringstryck och skjuvhållfasthet korrigeras enligt ekvation 7.1 – 7.4.

7.1 CRS-försök

För leror med ett utvärderat förkonsolideringstryck < 100 kPa görs ingen korrigerings. Däremot, om det utvärderade förkonsolideringstrycket > 100 kPa görs följande korrigerings:

$$\sigma'_c{}^{\text{korr}} = \sigma'_c{}^{\text{std}} \cdot (100/\sigma'_c{}^{\text{std}})^B \quad \text{ekv. 7.1}$$

alternativt

$$\sigma'_c{}^{\text{korr}} = \exp \{ (1 - B) \log (\sigma'_c{}^{\text{std}}) + 2 B \}^1$$

där $B = 0,07 \cdot w_N$

$\sigma'_c{}^{\text{std}}$ är förkonsolideringstrycket enligt standard-förfarande

$\sigma'_c{}^{\text{korr}}$ är förkonsolideringstrycket korrigerat för hastighetseffekten (notera att $\log(100) = 2,0$)

¹ De angivna ekvationerna är direkt härledda ur ekvation 4.2. Observera att med exp avses här $10^{(\text{funktion})}$

7.2 Odränerade Direkta skjuvförsök

För leror med en utvärderad odränerad skjuvhållfasthet < 25 kPa görs ingen korrigering. Däremot, om den utvärderade skjuvhållfastheten > 25 kPa görs följande korrigering:

$$c_{u}^{DS,korr} = c_{u}^{DS,std} \cdot (25/c_{u}^{DS,std})^B \quad \text{ekv. 7.2}$$

alternativt

$$c_{u}^{DS,korr} = \exp \{ (1 - B) \log (c_{u}^{DS,std}) + 1,4 B \}^1$$

$$\text{där } B = 0,06 \cdot w_N$$

$c_{u}^{DS,std}$ är skjuvhållfastheten enligt standardförfarande

$c_{u}^{DS,korr}$ är skjuvhållfastheten korrigerad för hastighetseffekten
(notera att $\log(25) = 1,4$)

7.3 Odränerade Aktiva triaxialförsök

För leror med en utvärderad odränerad aktiv skjuvhållfasthet < 33 kPa görs ingen korrigering. Däremot, om den utvärderade aktiva skjuvhållfastheten > 33 kPa görs följande korrigering:

$$c_{u}^{a,korr} = c_{u}^{a,std} \cdot (33/c_{u}^{a,std})^B \quad \text{ekv. 7.3}$$

$$c_{u}^{a,korr} = \exp \{ (1 - B) \log (c_{u}^{a,std}) + 1,5 B \}$$

$$\text{där } B = 0,05 \cdot w_N$$

$c_{u}^{a,std}$ är skjuvhållfastheten enligt standardförfarande

$c_{u}^{a,korr}$ är skjuvhållfastheten korrigerad för hastighetseffekten
(notera att $\log(33) = 1,5$)

7.4 Odränerade Passiva triaxialförsök

För leror med en utvärdera passiv skjuvhållfasthet < 20 kPa görs ingen korrigering. Däremot, om den utvärderade aktiva skjuvhållfastheten > 20 kPa görs följande korrigering:

$$c_{u}^{p,korr} = c_{u}^{p,std} \cdot (210/c_{u}^{p,std})^B \quad \text{ekv. 7.4}$$

alternativt

$$c_{u^p, \text{korr}} = \exp \{ (1 - B) \log (c_{u^p, \text{std}}) + 1,3 B \}$$

där $B = 0,05 \cdot w_N$

$c_{cu^p, \text{std}}$ är skjuvhållfastheten enligt standard-förfarande

$c_{cu^p, \text{korr}}$ är skjuvhållfastheten korrigerad för hastighetseffekten

(notera att $\log(20) = 1,3$)

För att erhålla en överblick hur stor korrektion de föreslagna reduktionerna innebär, visas nedan en tabell över vilka korrigerade värden på förkonsolideringstrycket respektive aktiva skjuvhållfastheten som erhålls beroende på valt B -värde.

För förkonsolideringstrycket erhålls

$\sigma'_c \text{std}$ kPa	$\sigma'_c \text{korr}$ $B=0,03$	$B=0,04$	$B=0,05$	$B=0,06$	$B=0,07$
100	100	100	100	100	100
200	196	195	193	192	191
300	290	287	284	281	278
400	384	378	373	368	363
500	476	469	461	454	447
600	569	559	549	539	529

För aktiva odränerade triaxialförsök, blir motsvarande korrektioner

c_u^a kPa	$c_u^{a, \text{korr}}$ $B=0,03$	$B=0,04$	$B=0,05$	$B=0,06$	$B=0,07$
33	33	33	33	33	33
40	39,7	39,6	39,5	39,4	39,3
50	49,3	49,1	48,9	48,6	48,4
60	58,9	58,5	58,1	57,7	57,4
70	68,4	67,8	67,3	66,7	66,2
80	77,8	77,1	76,4	75,7	75

8. Förslag till fortsatt forskning och utveckling.

Det finns en rad tillämpningar där den odränerade hållfastheten samt förkonsolideringstryck används för geoteknisk design. En korrigering av de så utvärderade parametrarna som föreslås i denna rapport får, i vissa fall, även konsekvenser på andra tillämpningar. Det kan röra befintlig empiri, tolkning och utvärdering av CPT eller bestämning av kohesionsspålers bärförmåga.

Det har inte varit möjligt att inom ramen för detta FoI-projekt att utreda och också ovannämnda frågeställningar. Som en första försiktighetsåtgärd skulle man kunna anse att det är rimligt att tro att befintliga designmetoder, som inkluderar lerors odränerade skjuvhållfasthet, också bör tillämpa de här föreslagna reduktionsmetoderna.

9. Referenser

Aas, G., 1965. A study of the effect on the shape of the vane and rate of strain on in situ shear strength of clays. Proceedings 5. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol . 1., pp. 141-145. Montreal.

Bjerrum, L. (1967). Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings. *Geotechnique*, 17, 81–118.

Claesson, P. (2003). Long term settlements in soft clays (Doctoral dissertation, Chalmers University of Technology, Gothenburg).

Graham, J., Crooks, J. H., and Bell, A. L. (1983). Time effects on the stress-strain behaviour of natural soft clays. *Geotechnique*, 33 (3), 327–340. doi:10.1680/geot.1983.33.3.327

Gylland, A., Jostad. H.P., and Nordal, S., 2014. *Acta Geotechnica*, Volume 9 Number 2.

Jendeby, L. (1986). Friction piled foundations in soft clay - a study of load transfer and settlements (Doctoral dissertation, Chalmers University of Technology, Gothenburg).

Larsson, R., 1977. Basic Behavior of Scandinavian Soft Clays. SGI Report No 4. Linköping.

Larsson, R., 1986. Consolidation of soft soils. SGI Report No 29. Linköping.

Lerouelle, S., Kabbaj, M., Tavenas, F. & Bouchard, R., 1985. Stress-strain-strain-rate for the compressibility of sensitive clays, *Geotechnique*, Vol. 35, No. 2, pp. 159-180.

Lunne, T., & Andersen, K. H. (2007). Soft Clay Sear Strength Parameters for Deepwater Geotechnical Design. Proceedings 6th International Conference on Offshore Site Investigation and Geotechnics, OSIG, London UK, (September), 11–13.

Länsivaara, T, 1999. A study of the mechanical behavior of soft clay. (Doctoral dissertation, NTNU).

Länsivaara, T. Proceedings NGM, 2012. Some aspects on creep and primary deformation properties of soft Scandinavian clays.

Mesri, G.& Castro, A., 1987, C_a/C_c concept and K_o during secondary compression. *J Geotech Eng* 113(3):230-247.

Olsson, M., 2013. On Rate Dependency of Gothenburg clay. (Doctoral dissertation, Chalmers University of Technology, Gothenburg).

SGF, Publikation 2:93. Rekommenderad standard för vingförsök i fält.

Sällfors, G. (1975). Preconsolidation pressure of soft, high-plastic clays (Doctoral dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg).

Sällfors, G. (2022). MUR, Gunnilse HA 1.

Sällfors, G. (2022). Appendix, försöksresultat. Anpassning av avancerade geotekniska laboratorieförsök till nya användnings

Tornborg, J., 2019. Personal communication

Tornborg, J., 2020. Midterm Report, Utkast. Chalmers tekniska högskola.

Torstensson, B-A. (1973). Friction piles in soft clay - A field-research on model piles (Doctoral dissertation, Chalmers University of Technology, Gothenburg).