



NGF Temadag – Geotekniske parametere

Treaksforsøk

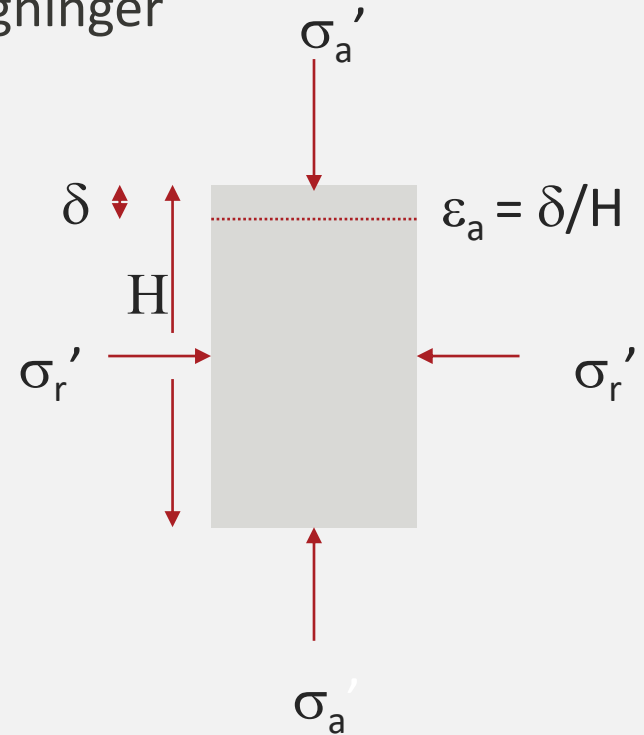
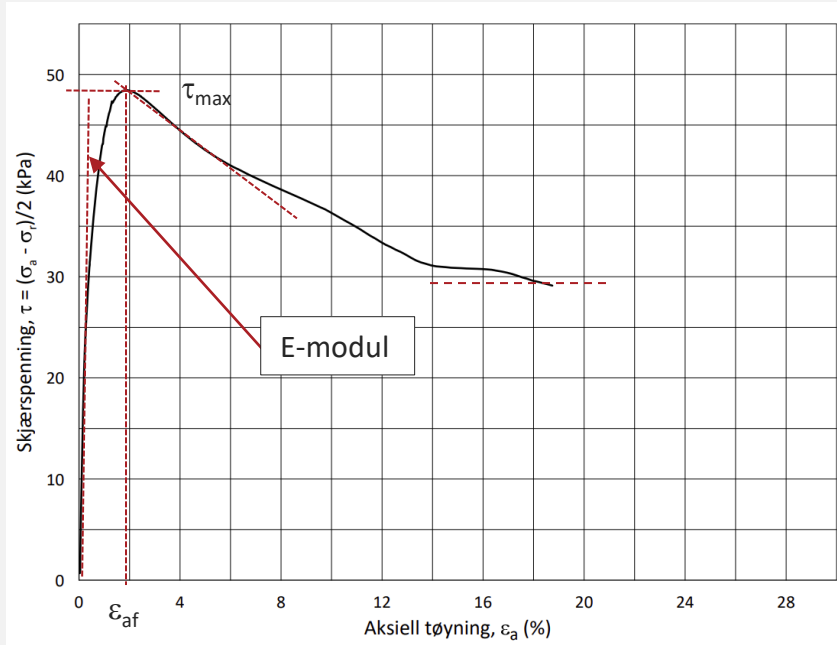
Vidar Gjelsvik, Pasquale Carotenuto - NGI

Innhold

- ↗ Formål
- ↗ Utstyr
- ↗ Forsøksprosedyre
- ↗ Konsolideringsspenninger
- ↗ Presentasjon av resultater
- ↗ Evaluering av kvalitet
- ↗ Tolkning av resultater

Formål

- Måle materialets spennings-tøyningsoppførsel ved belastning fra in situ spenningstilstand – bruk i beregninger



Utstyr og forsøksprosedyre

Triaxial Testing at the
Norwegian Geotechnical Institute

By
Toralv Berre

1981

Suzanne Lacasse¹ and Toralv Berre¹

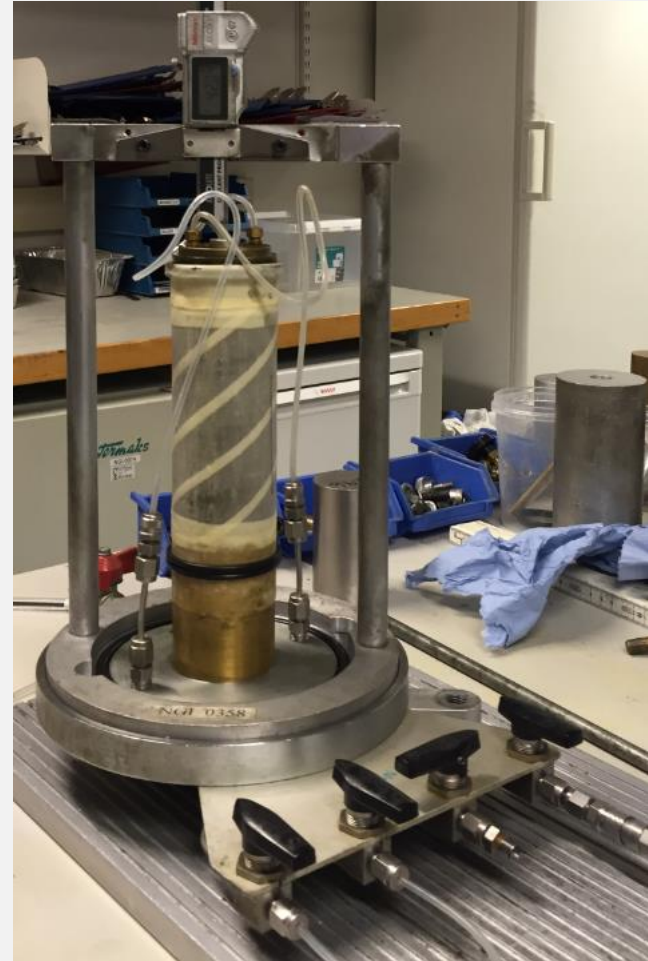
STATE-OF-THE-ART PAPER

Triaxial Testing Methods for Soils

1988

The basic equipment

- Cell - fluid
- Top cap and filters
- Membrane
- Sensors (later)



The basic equipment

↗ Load frame



Basic controls

↗ Direct control:

- cell pressure (radial and axial stresses)
- axial load (axial stresses)
- pore pressure (effective stresses)
- axial displacements (axial strain)
- volume changes (volumetric strain)

$$\sigma_r, \sigma_a$$

$$\sigma_a$$

$$\sigma'_a, \sigma'_r$$

$$\varepsilon_a$$

$$\varepsilon_v$$

Cells



Basic I/O - Input

Input - Specifications

Vital

- Consolidation stresses
- (Dr sand)
- Static or cyclic
- Compression or extension
- Drained or undrained

Secondary

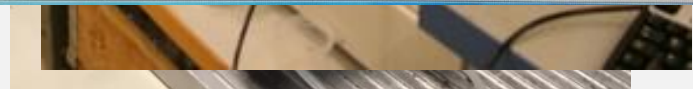
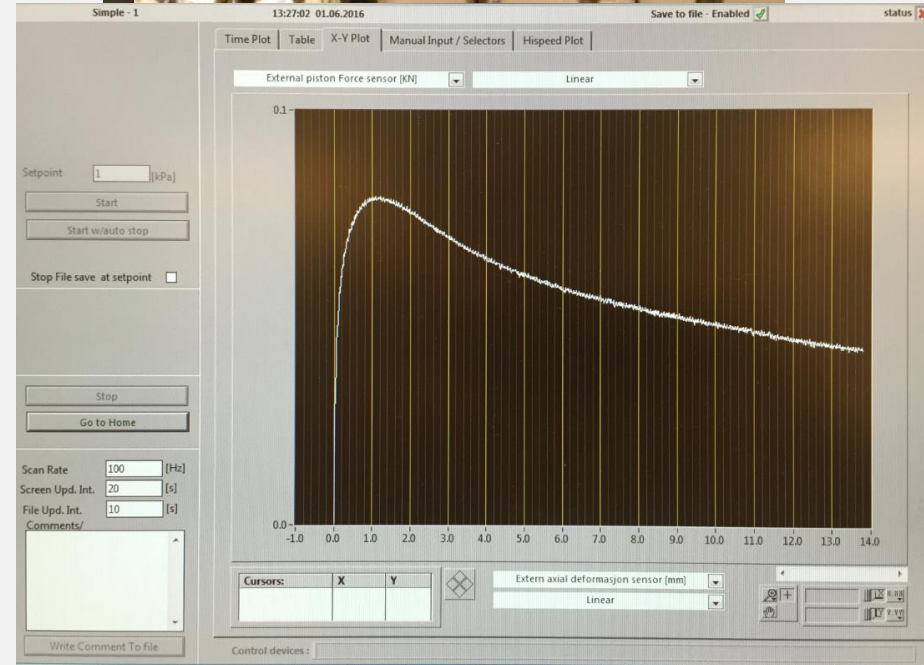
- Unit weight of solid particles (w_c , e , S_r)
- Salt content
- Shearing speed for monotonic loading



Specifications for a triaxial test				Template:	P:\Intern\Avdelingen\Geoteknik\testing\Spesifikasjoner og bestillinger\TX_SpecificationsRev03_000.xls
Responsible:		KLo		Made by:	PCa
Date/Rev.no.:		2023-10-09/03_V01		Checked by:	PCa/KLo
General info: This sheet contains input data needed for triax tests. All grey cells are filled in by the user and the results are given in cells containing red bold numbers.					
Sample and test identificaton				Test name	---
Project name	NGF Temadag			Depth	10.00 [m]
Project year	TX			P_c'	100.0 [kPa]
Project no	TX			Diameter	72 [mm]
Report no				Salt content	30 [g/l]
Boring	Static/cyclic			γ_s	27.0 [kN/m ³]
Tube	Test type			Field description	
Part	Lab procedure			Sample condition	
Test	Prep. method				
	Language				
	G_{max}				
	Permeability				
	Others (if any)				
Reconstituted specimen				Fig. Nr stress-strain plot	
D_n	[%]			Fig. Nr stress path plot	
γ_{di}	[kN/m ³]			Fig. Nr cyclic, N	
γ_{dmin}	[kN/m ³]			Fig. Nr cyclic, StressStrain	
γ_{dmax}	[kN/m ³]			Fig. Nr cyclic, StressPath	
Consolidation stresses				Assumed swelling pressure	
	Stage 1	Stage 2	Stage 3	final	
σ_{ac}'				100.0	[kPa]
σ_{rc}'				60.0	[kPa]
G_{max}					y/n
Perm.					y/n
K_o				0.60	
τ_c	0.0	0.0	0.0	20.0	[kPa]
				Overconsolidation ratio at first σ_{ac}'	
				Comments:	
Cyclic loading					
τ_a	Preshear	Stage 1	Stage 2		[kPa]
$\Delta\tau_a = \tau_a - \tau_c$					[kPa]
Drainage for $\Delta\tau_a$					
τ_{cv}					[kPa]
Period					[sec]
Drainage for τ_{cv}					
Start direction					
Stop at N_{tot}					
or at $\epsilon_{aa}/\epsilon_{cv}$					[%]
				Comments:	
Monotonic loading (shearing)					
Maximum assumed shear strength	50			Maximum axial strain, ϵ_a	20
	[kPa]				[%]
Rate of strain, ϵ_a	1.4			Inverse deformation rate	
	[%/hr]				[min/mm]

Basic steps

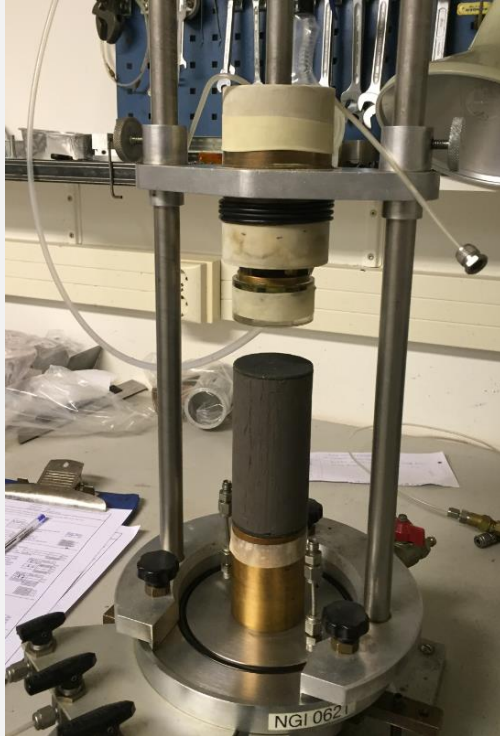
- (Get specs and find sample)
- **Mounting:** set the specimen into the cell
- **Consolidation:** bring the specimen to a defined stress state
- **Shearing to failure:** shear the specimen to failure



Mounting

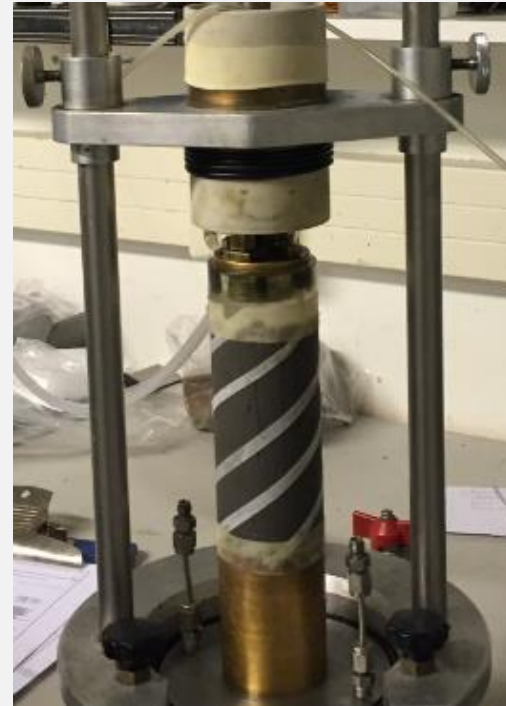
Triaxial – Mounting of specimens (clay)

6 - Lowering top cap – careful control, minimum weight on specimen



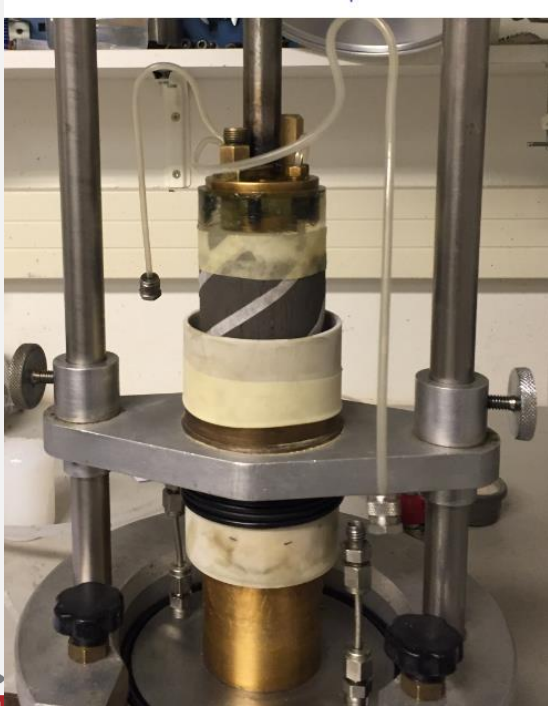
Triaxial – Mounting of specimens (clay)

7 - Filter strips (note: different slope for different shearing modes, no stiffness/strength corrections needed)



Triaxial – Mounting of specimens (clay)

8 - Lowering of membrane – handling minimized



Triaxial – Mounting of specimens (clay)

9 - Cell top mounting



Triaxial – Mounting of specimens (clay)

Final

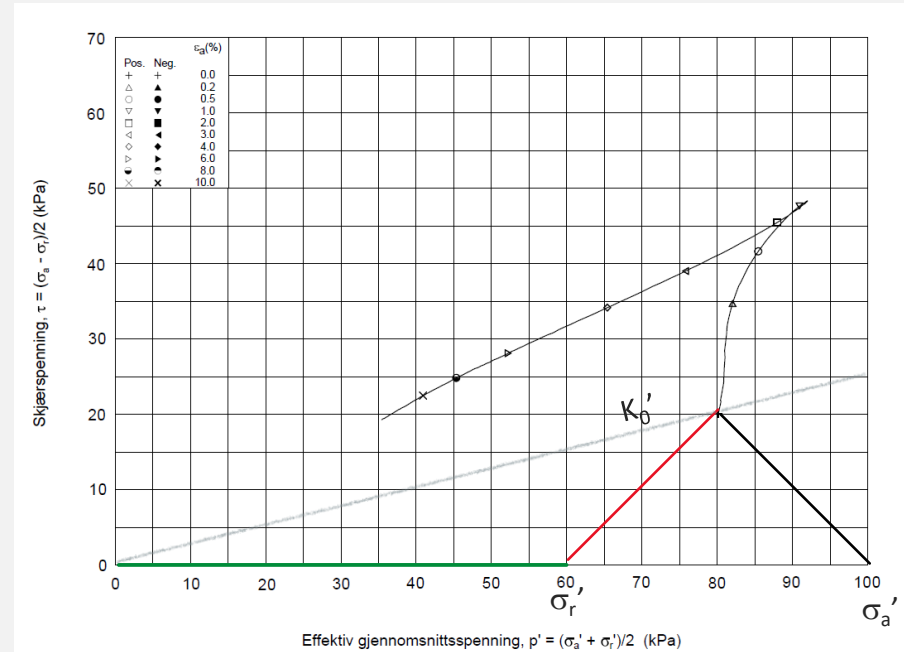


Forsøkestyper

- ↗ Hvilke parametre er vi ute etter?
- ↗ Hva slags analyser skal utføres?
 - Sprøbruddmateriale (leire) → c_{uA} , c_{uP} , $a-\phi$ CIU, CAU
 - Friksjonsmaterialer → $a-\phi$ CID, CAD
 - To forsøk for styring av styrketak?
- ↗ Nærmest mulig in situ effektivspenninger
- ↗ Vanlig i eldre rapporter fra NTNU/Sintef og Rambøll
 - To forsøk med konsolidering til hhv. 2/3 og 4/3 av p_0'
 - Mest egnet for tolkning av drenerte parametre

Konsolidering

- Trinn 1: Celletrykk tilsvarende antatt svelletrykk (minimum negativt poretrykk i prøven). Påføres før filtere mettes
- Trinn 2: Celletrykk (isotrop) til σ_r' – typisk over natt (grønn linje)
- Trinn 3: Påføring av baktrykk for å presse ut luft av prøven. Celletrykk økes tilsvarende (konstant effektivspenning). Baktrykk på 300 – 1300 kPa
 - Skemptions B-faktor måles underveis, bør være minst 0,95
- Trinn 4: Påfør aksial spenning (rød linje)
- Trinn 5: Vent til kryp er under en gitt grense
- Trinn 6: Steng kranene – klar til skjærforsøk

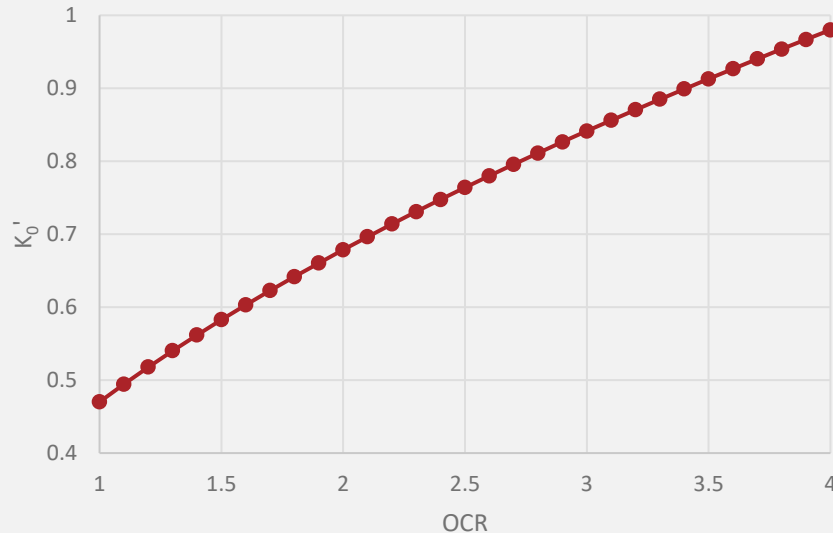


Konsolideringsspenninger

➤ Påføring av spenninger til in situ anisotrop spenningstilstand

$$\text{➤ } K'_0 = \frac{\sigma_r'}{\sigma_a'} = 0,47 \cdot OCR^{0,53}$$

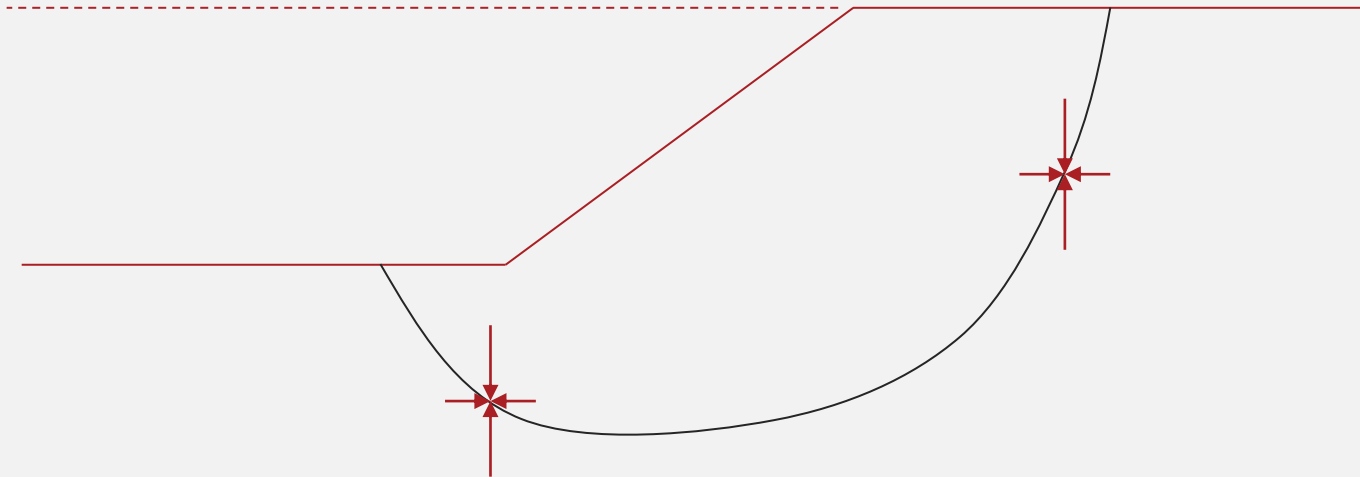
(L'Heureux m.fl. (2017))



- Typisk for norske forhold
- Gjelder for flatt terreng
- Normalt ikke lavere enn 0,55 pga. høy mobilisering
- $K'_0 > 1,0$ kan være aktuelt pga. terrengforhold

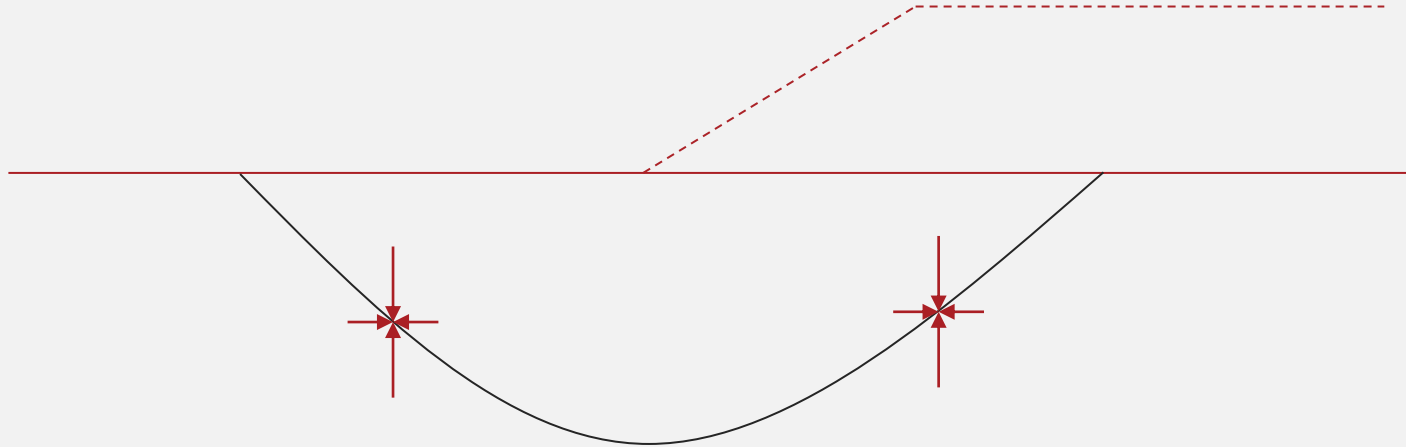
Konsolideringsspenninger

- ↗ Skjæring i flatt terreng
- ↗ Likt utgangspunkt på aktiv og passiv side
- ↗ Avlastning ift. midlere effektivspenning (svelling)
- ↗ Pålastning i skjær



Konsolideringsspenninger

- ↗ Fylling i flatt terreng
- ↗ Likt utgangspunkt på aktiv og passiv side
- ↗ Pålastning ift midlere effektivspenning
- ↗ Pålastning i skjær



Konsolideringspenninger

- Naturlig / permanent skråning
- Horisontalt avlastet over skråningsbunn? → lavere K_0'
- Terrengpåvirkede spenninger → σ_a' og σ_r' i treaks er ikke hovedspenninger
- DSS-forsøk viser effekt på ca. inntil 28% ved konsolidering til $\tau_c / c_{uDSS,0} > 1$ for en NC-leire. Effekten kan være lavere for en OC-leire (Andersen).
- Imidlertid reduseres fastheten over tid med inntil 20% (Lunne, Andersen) – jfr. rateeffekt

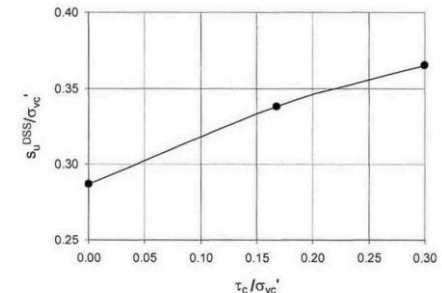
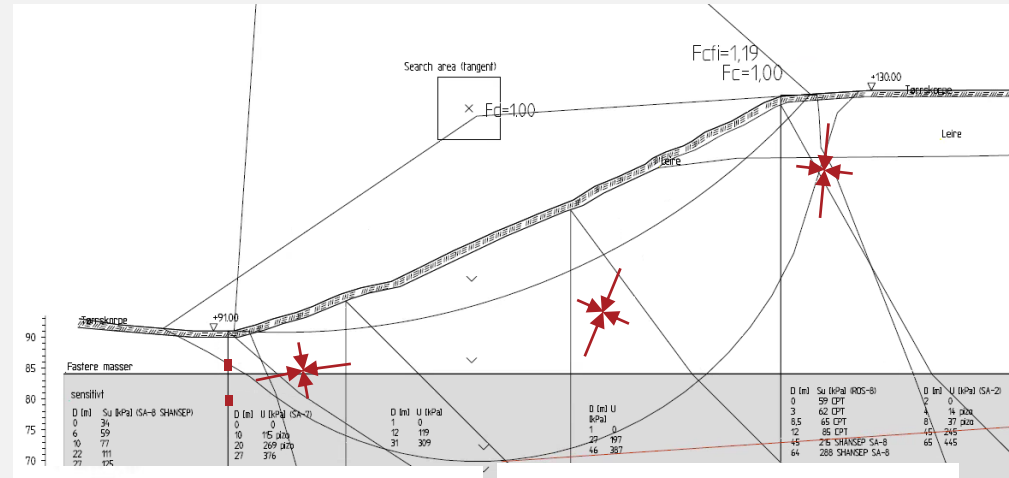


Figure 41. Undrained static DSS shear strength of the quick clay as function of normalized consolidation shear stress, τ_c / σ_{vc}' .

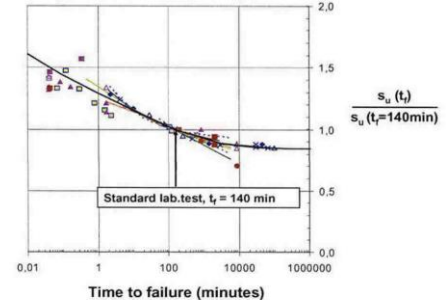


Figure 20. Static shear strength of several clays as function of time to failure (based on Lunne and Andersen, 2007).

Konsolideringsspenninger

Tabell 3.5.4.1—1 — Føringer for valg av K_0' i treksialforsøk

OCR	Flatt terreng	I skråning		Bunn av skråning
		Slak	Bratt	
1-2	0,55 - 0,70	0,55 - 0,65	0,50 - 0,60	0,70 - 1,00
2-4	0,70 - 1,00	0,65 - 1,00	0,60 - 0,85	1,00

- En forsiktig bruk av tabellen vil være å velge de høyeste verdiene for K_0' , da gjerne i kombinasjon med en betraktning rundt det totale spenningsnivået i prøven og eventuelt en nedjustering av aksial konsolideringsspenning
- For prøver med antatt dårlig prøve kvalitet vurderes det å utføre en skånsom konsolidering
- Det anbefales at K_0' ikke blir lavere enn 0,5 for å hindre skjærkryp, prøveforstyrrelse og brudd under konsolidering
- For lave celletrykk (10-30 kPa) vurderes det om det gjøres isotrop konsolidering til in situ gjennomsnittsspenning for å være sikker på å unngå for høy skjærmobilisering
- For prøver tatt i bunn av skråninger kan den eksisterende spenningstilstanden være sammensatt og i mange tilfeller vil største hovedspenning være horisontal, ikke vertikal. Slike tilfeller vurderes enkeltvis av saksbehandler. For skråninger skapt av erosjon kan det være relevant å benytte isotrop konsolidering for å få mest mulig representativ respons.
- Tilfeller med OCR over 4 anbefales det å vurdere i hvert enkelt tilfelle med utgangspunkt i antatt pre-konsolideringshistorie og materialets mekaniske egenskaper

SVV N-V220

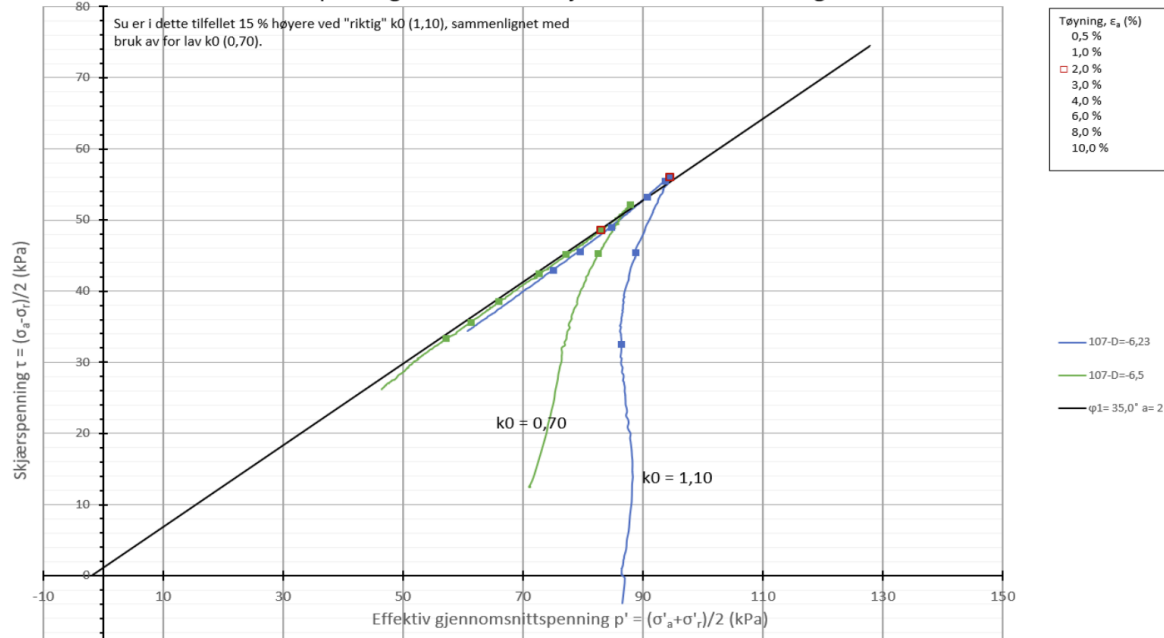
Konsolideringsspenninger

- ↗ Bestemmelse av p_c' (OCR)
 - Ideal: Mål poretrykk og utfør CRS fra samme sylinder først
 - Eventuelt bruk CRS fra nærliggende punkter
 - Alternativt tolke CPTU
- ↗ Likevel mangler ofte nødvendig info når konsolideringsspenningene skal bestemmes
- ↗ Hvordan påvirker K_0' skjærfastheten?
 - De neste siden viser noen eksempler på sammenlignbare forsøk – mottatt fra Amund Augland (GeoVita)

Konsolideringspenninger

107

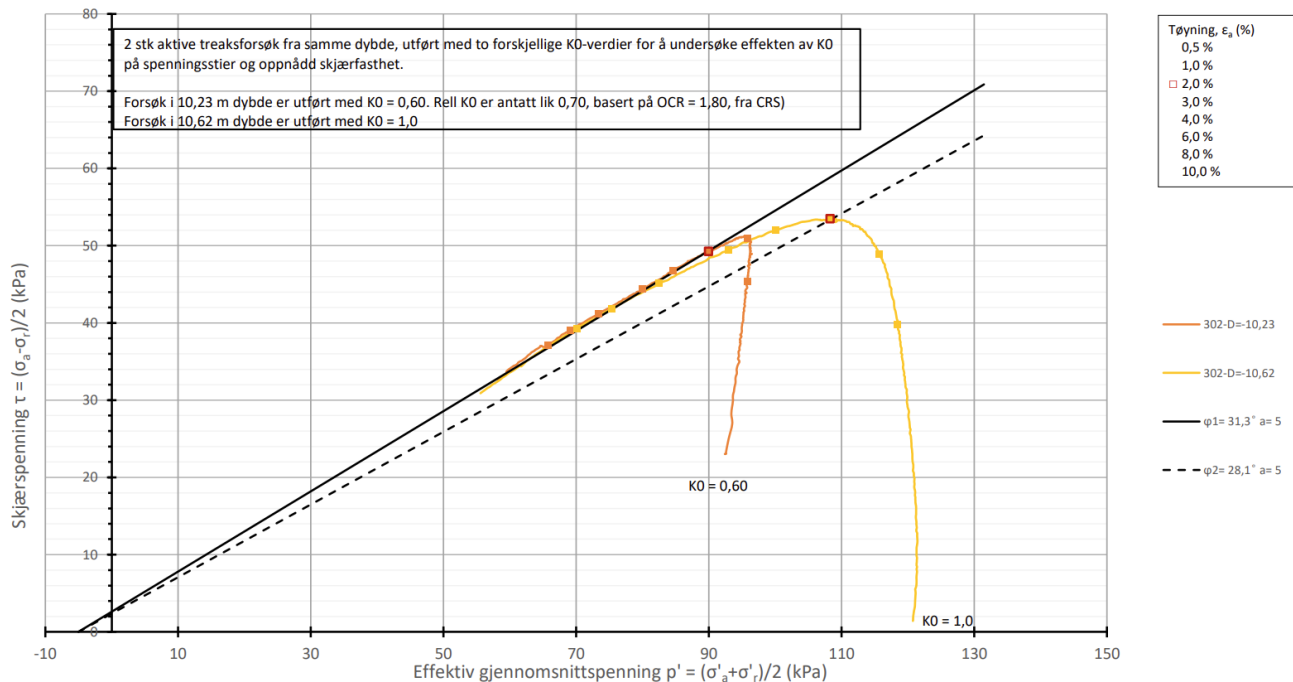
Spenningsstier med variasjon i k_0 ved konsolidering



Hull nr.	Prove diameter	Sylinder Del	Dybde	Jordart	w_l	w_l	w_p	I_p	Leir Innh.	γ_{sat}	Type forsøk	p'_{ov}	σ'_{ac}	σ'_{re}	K'_0	ϵ_{vol}	ϵ_{ac}	w_c	B	$\Delta e/\epsilon_0$	$\Delta e/\epsilon_0$	OCR fra CPT	Prove kvalitet
	mm		m		%	%	%	%	%	kN/m^3		kPa	kPa	kPa		%	%	%	%				
107	75	5-A-1	6,23	Leire	34,80	-	-	-	-	18,50	CAUA	72,9	82,4	90,5	1,10	1,20	0,34	34,00	99,1	0,024	0,023	2,80	Veldig god til utmerket
107	75	5-A-2	6,50	Leire	32,80	-	-	-	-	18,50	CAUA	75,0	83,7	58,6	0,70	0,95	0,58	32,10	99,1	0,020	0,021	2,80	Veldig god til utmerket

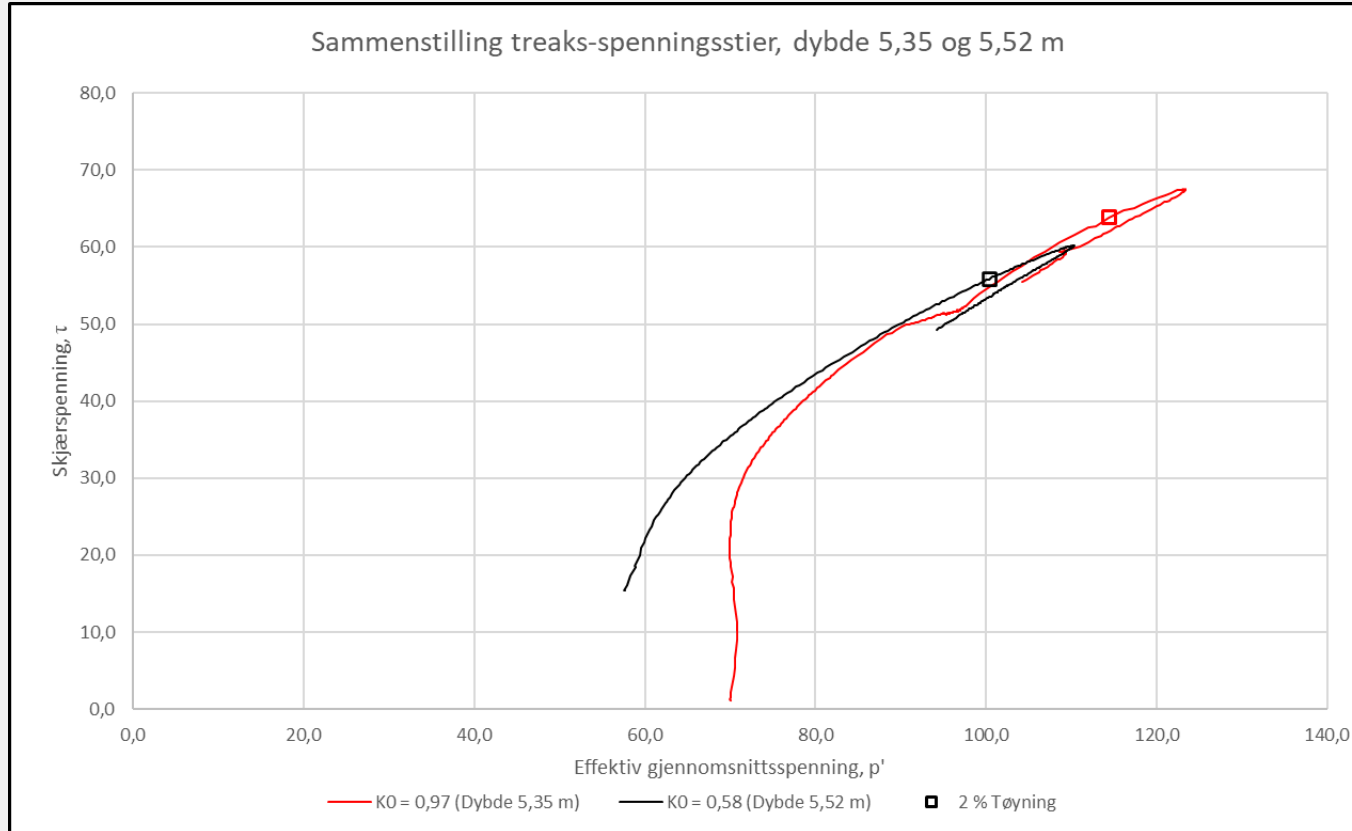
Konsolideringsspenninger

302 - Undersøkelse av effekt av KO



Hull nr.	Prøve diameter	Sylinder Del	Dybde	Jordart	w _i	w _l	w _p	I _p	Leir	γ_{tot}	Type forsøk	p' _{ov}	σ'_{ac}	σ'_{rc}	K ₀ '	ϵ_{vol}	ϵ_{ac}	w _c	B	$\Delta e/\epsilon_0$	$\Delta e'/\epsilon_0$	OCR fra CPT	Prøve kvalitet
	mm		m		%	%	%	%	Innh.	kN/m ³		kPa	kPa	kPa		%	%	%	%				
302	75	10-A-1	10.23	Leire	55,90	-	-	-	-	16,40	CAUA	115,5	116,0	69,6	0,60	1,78	1,27	54,20	100,0	0,029	0,030	1,80	Veldig god til utmerket
302	75	10-A-2	10.62	Leire	57,90	-	-	-	-	16,50	CAUA	118,1	120,4	120,4	1,00	3,44	0,70	54,70	97,8	0,056	0,055	1,80	God til brukbar

Konsolideringsspenninger



Konsolideringsspenninger

↗ Observasjoner av forsøk fra GeoVita

- $c_{uA, KO'=0,6-0,7} / c_{uA, KO'=1,0-1,1} = 0,04 - 0,12$
- Økende med økende OCR
- Normalisering mhp. middelspenning er mer konsistent enn mhp. aksial spenning
- Flere forsøk trengs

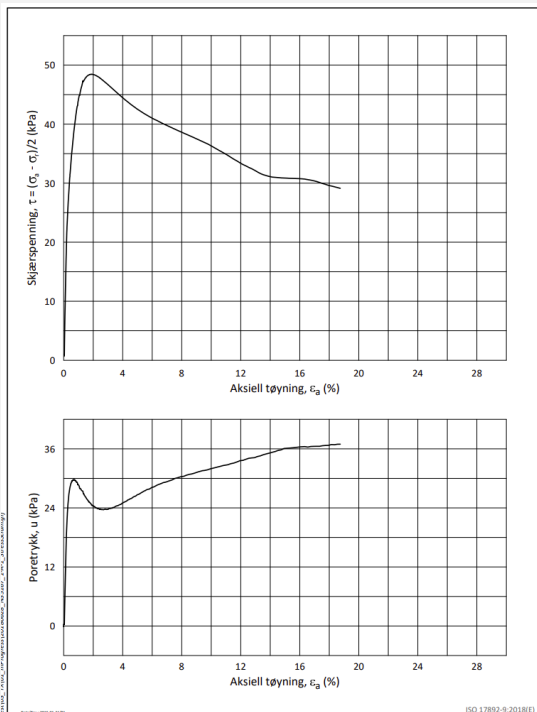
Skjærforsøk

- ↗ Typisk tøyningshastighet ved NGI, $\epsilon_a = 1,4$ %/time
- ↗ Kjøres til ca. 20% vertikal tøyning (ca. 14 timer)

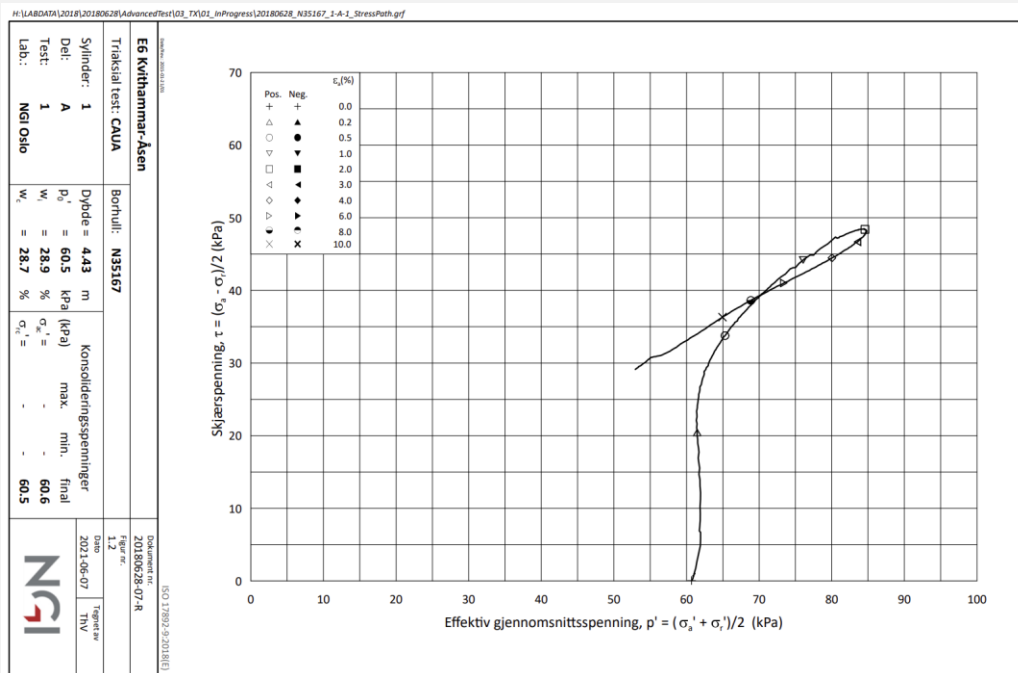
Presentasjon av resultater

- ↗ Spenningssti – deviator/skjærspenning mot normalspenning
- ↗ Tøyningsplott – deviator/skjærspenning mot aksiall tøyning
- ↗ Poretrykksplott – poretrykk mot aksiall tøyning
- ↗ Friksjon – mobilisert friksjon mot aksiall tøyning (forutsetter a eller c' som input)
- ↗ Detaljer fra konsolideringen

Presentasjon av resultater – eksempel NGI

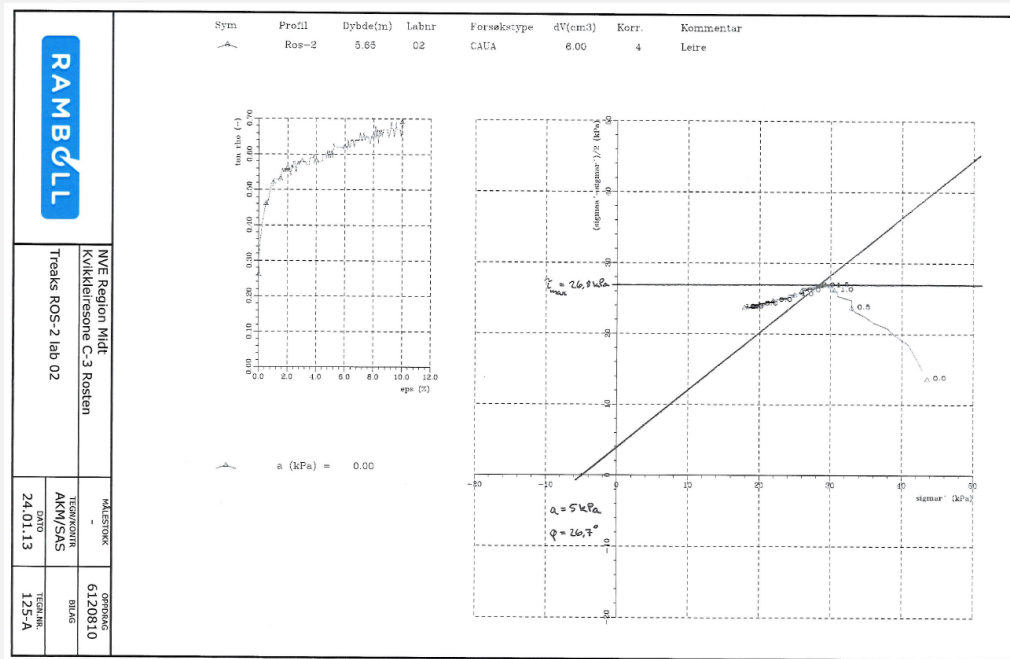
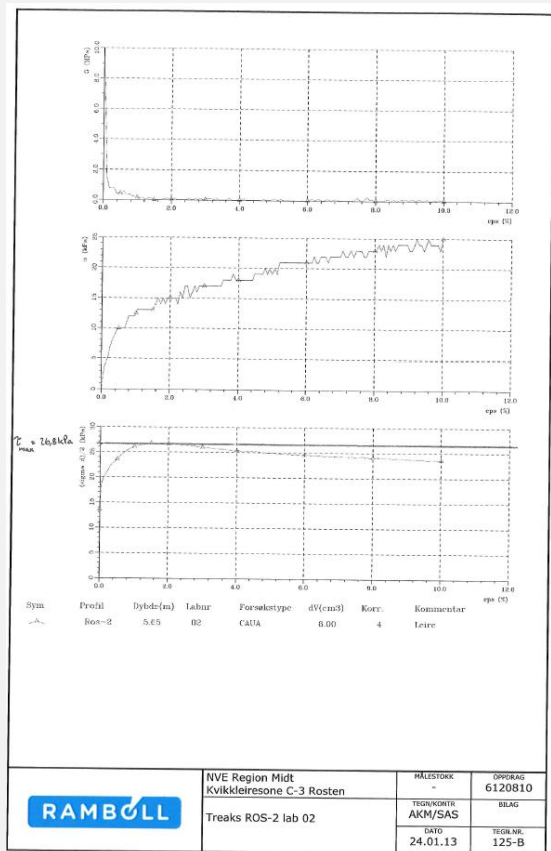


E6 Kvithamar-Åsen		Dokument nr. 20180628-07-R	
Triaksial test: CAUA		Figur nr. 1.1	
Borhull: N35167		Dato 2021-06-07	
Sylinder: 1		Tegnet av THV	
Del: A		Dybde = 4.43 m	
Test: 1		p ₀ ' = 60.5 kPa (kPa) max. min. final	
Lab.: NGI Oslo		w _c = 28.9 % σ _v ' = - 60.6	
		w _c = 28.7 % σ _v ' = - 60.5	

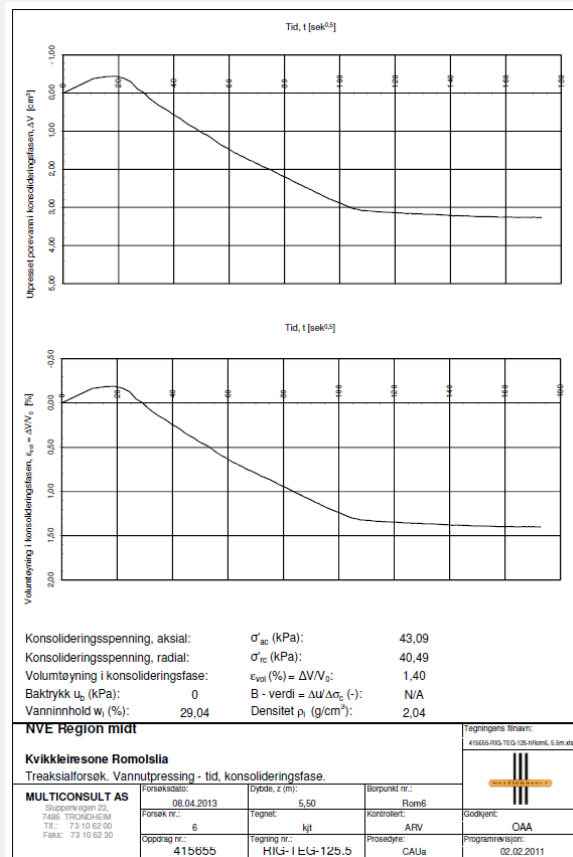
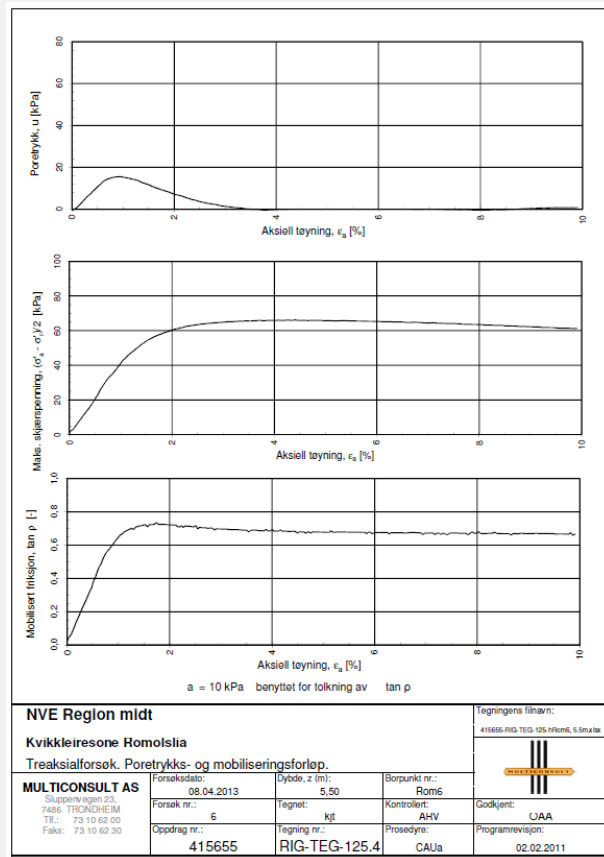


E6 Kvithamar-Åsen		Dokument nr. 20180628-07-R	
Triaksial test: CAUA		Figur nr. 1.1	
Borhull: N35167		Dato 2021-06-07	
Sylinder: 1		Tegnet av THV	
Del: A		Dybde = 4.43 m	
Test: 1		p ₀ ' = 60.5 kPa (kPa) max. min. final	
Lab.: NGI Oslo		w _c = 28.9 % σ _v ' = - 60.6	
		w _c = 28.7 % σ _v ' = - 60.5	

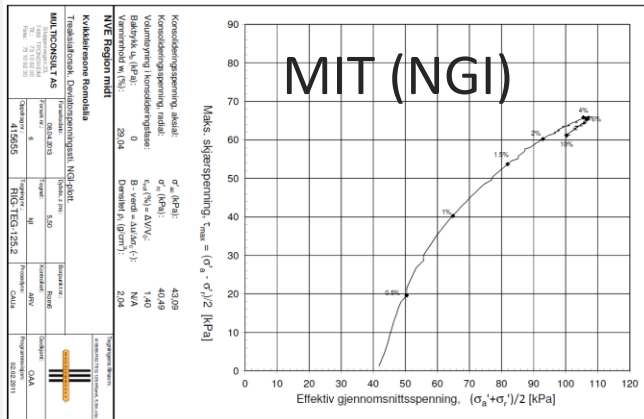
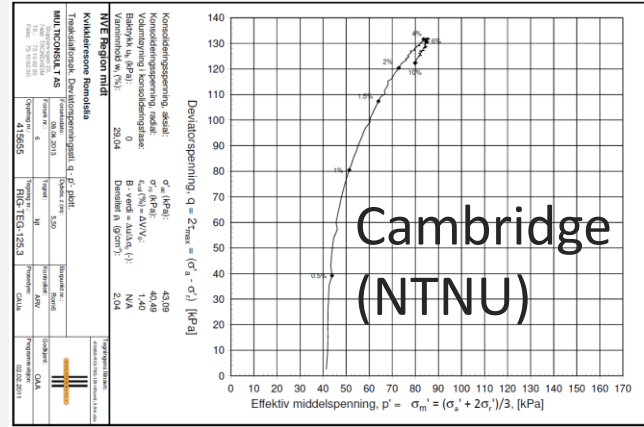
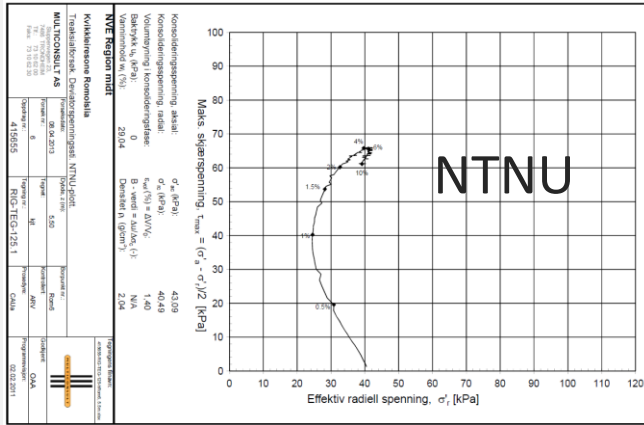
Presentasjon av resultater – eksempel Rambøll



Presentasjon av resultater – eksempel Multiconsult



Presentasjon av resultater – eksempel Multiconsult



Definisjoner

Janbus poretrykksformel

$$\Delta u = \Delta \sigma_m - D \Delta \sigma_d$$

$$\Delta \sigma_m = \frac{\Delta \sigma_a + 2 \Delta \sigma_r}{3}$$

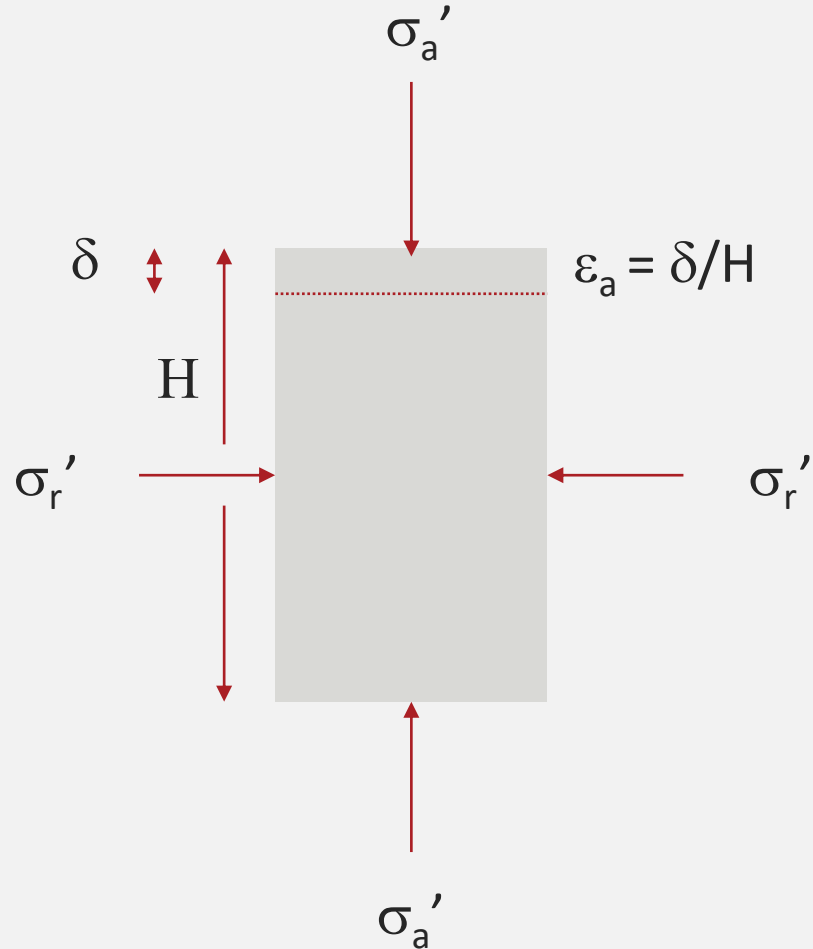
$$\Delta \sigma_d = \Delta \sigma_a - \Delta \sigma_r$$

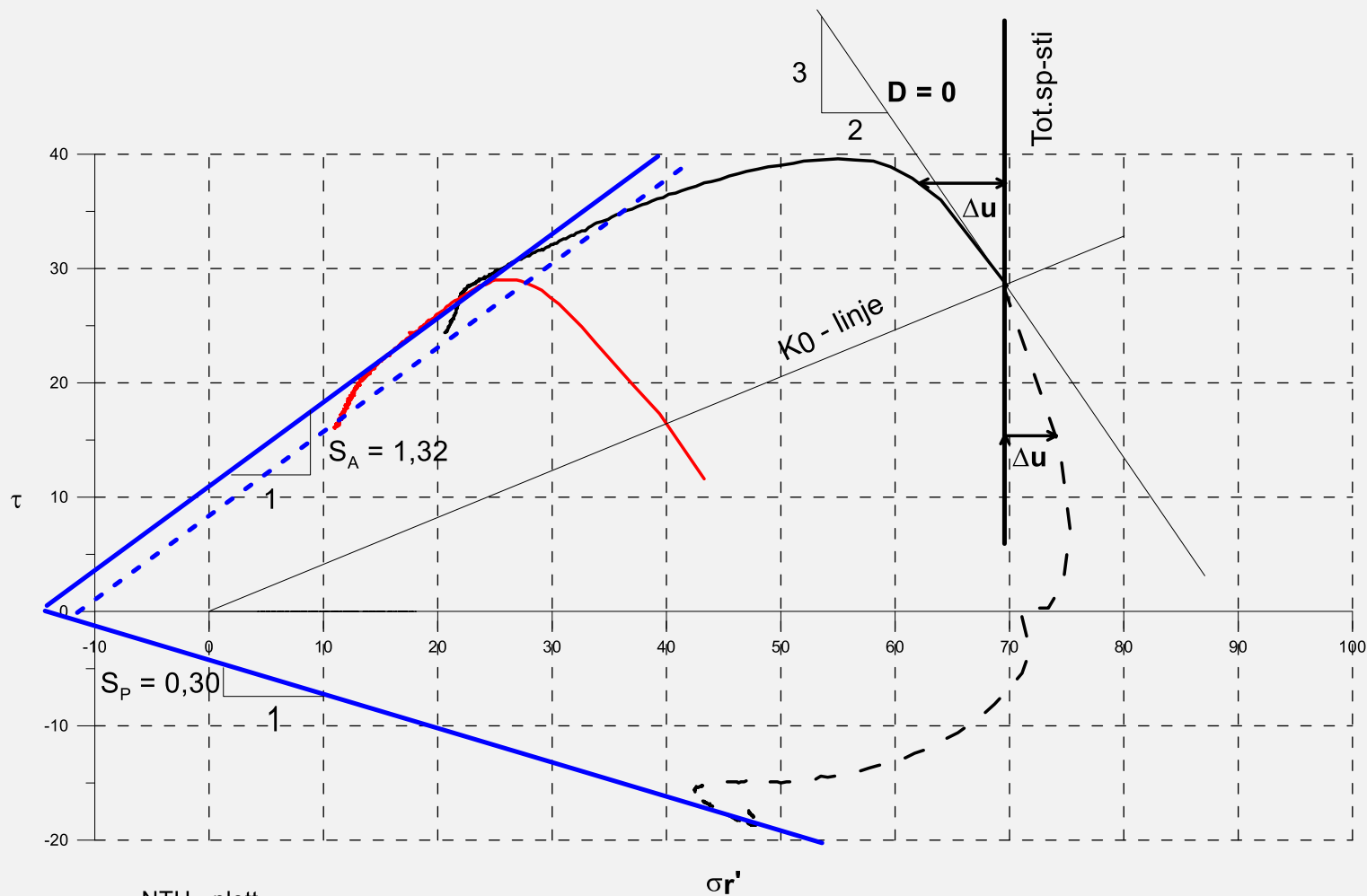
For CAUc og CAUp forsøk

$$\Delta \sigma_r = 0 \quad \longrightarrow \quad \Delta \sigma_m = \frac{\Delta \sigma_a}{3}$$

$$\Delta \sigma_d = \Delta \sigma_a$$

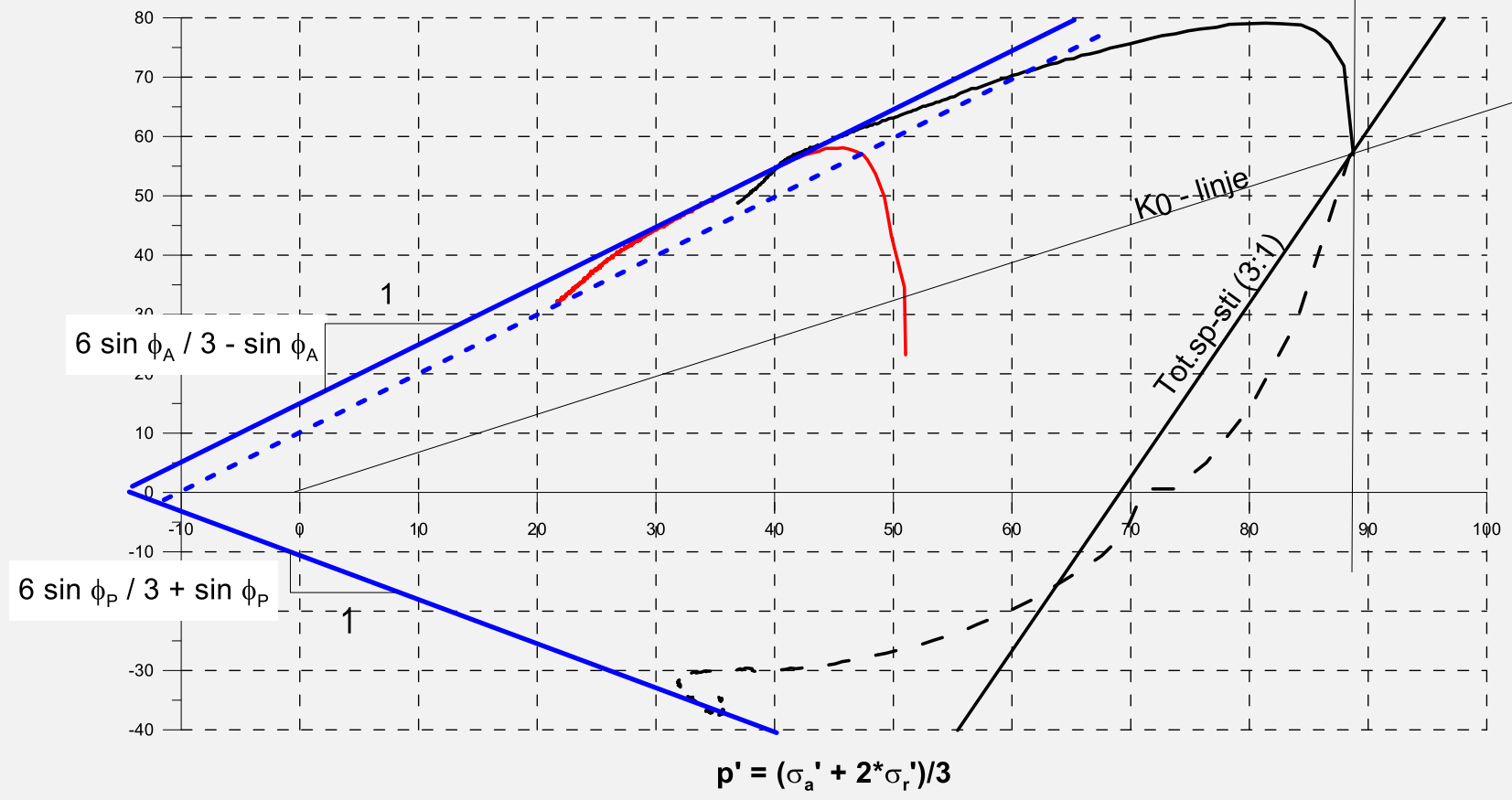
$$\Delta u = \Delta \sigma_a \left(\frac{1}{3} - D \right)$$

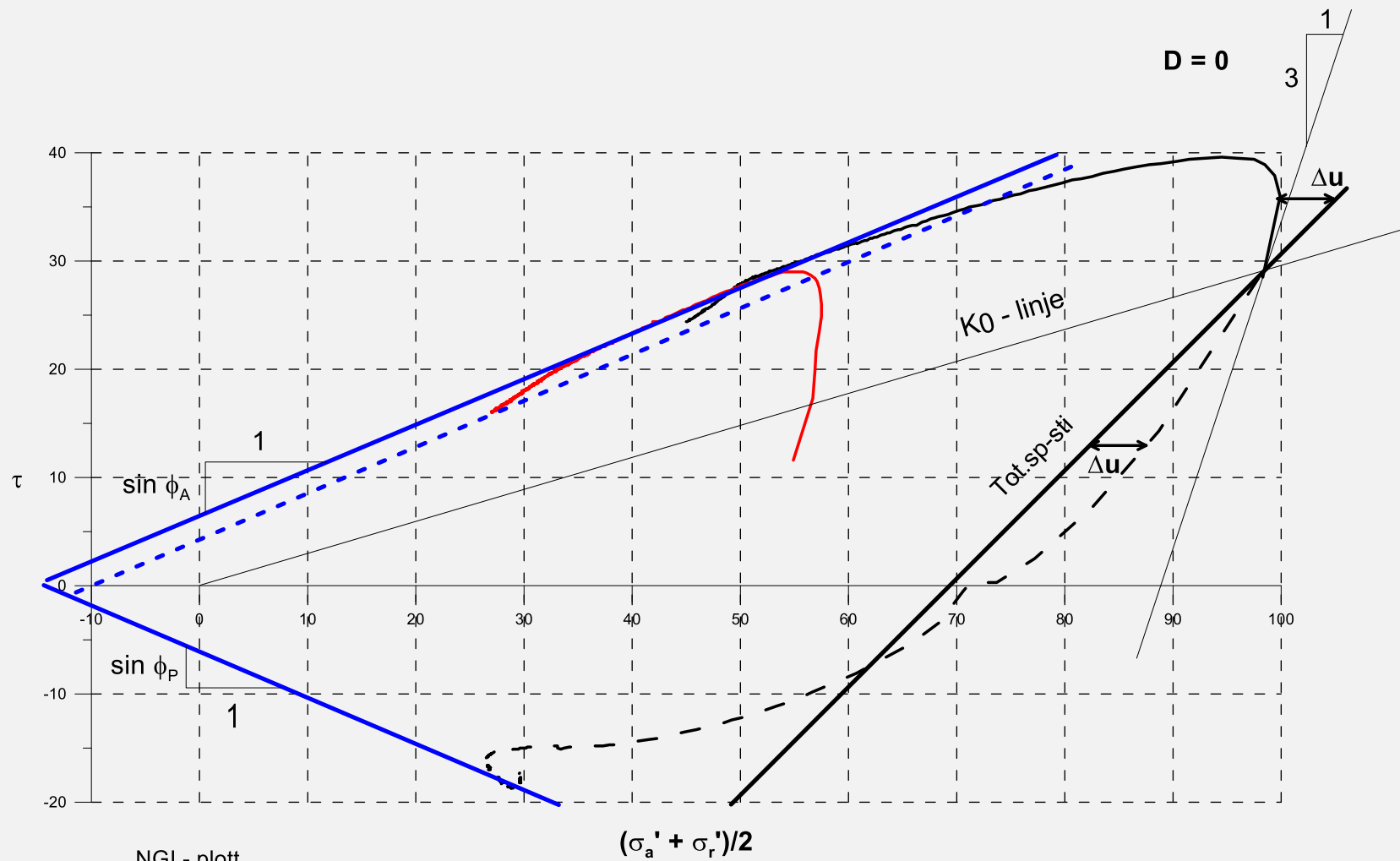




D = 0

$$q = \sigma_a - \sigma_r$$





Evaluering av resultater

- ↗ Effekt av prøvforstyrrelse
- ↗ Forventet oppførsel

Effekt av prøvestyrrelse

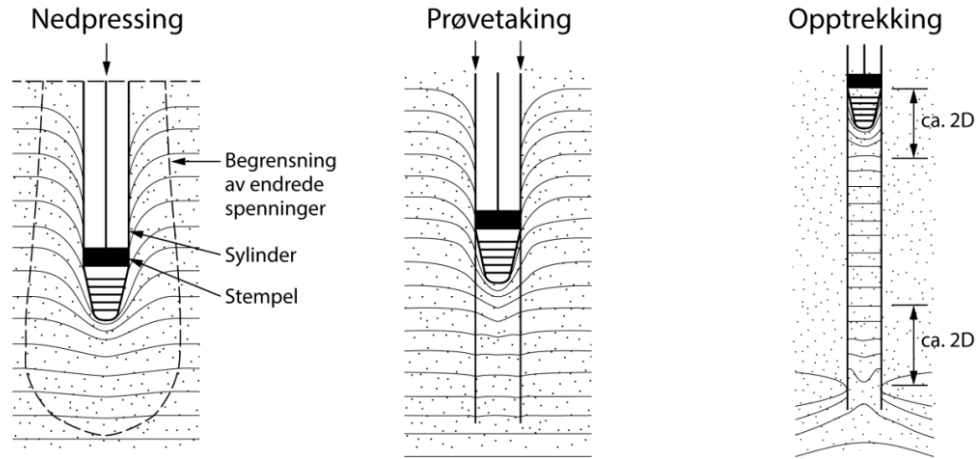
- ↗ Har vært et tema så lenge man har tatt prøver av jord, og er det fremdeles.
- ↗ Sitat gjengitt i Janbu, Grunnlag i geoteknikk

Arthur Casagrande sa i 1932:

" . . . these two simple principles: first, do not disturb the natural structure of the clay; if you do, no human being is able to restore its original strength; second, decide on a certain rate of settlement you do not wish to exceed, . . . "

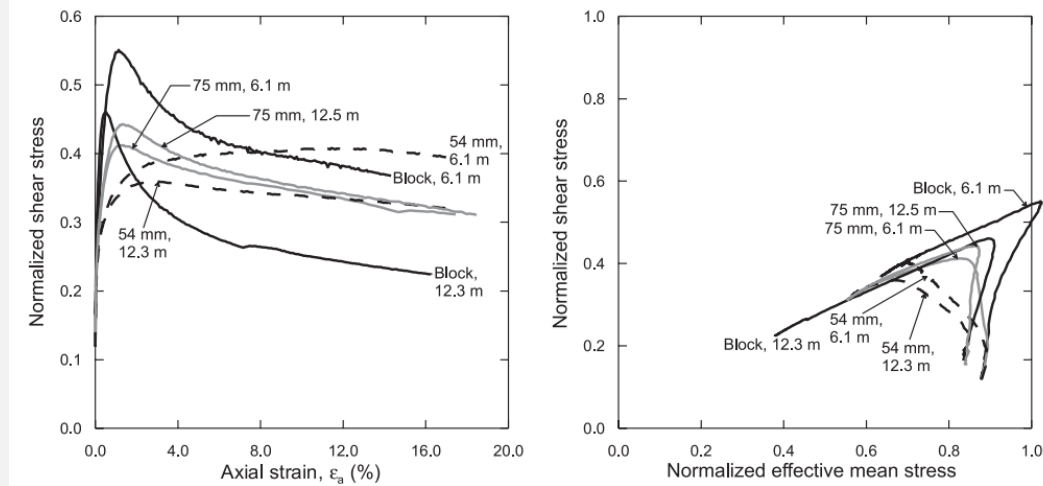
Effekt av prøveforstyrrelse

- De aller fleste prøver tas med stempelprøvetaker
- Fysisk påkjenning under skjæring, opptrekk og utskyvning av prøven
- Påkjenninger under transport mm



Figur 12. Forstyrrede soner rundt prøvetaker ved vanlig stempelprøvetaking.

Effekt av prøveforstyrrelse



Effects of sample disturbance and consolidation procedures on measured shear strength of soft marine Norwegian clays

Tom Lunne, Toralv Berre, Knut H. Andersen, Stein Strandvik, and Morten Sjørnsen

- ↗ Nedbrutt struktur
 - ↗ tap av stivhet og fasthet ved lave tøyninger
 - ↗ lavere τ_{\max} og høyere bruddtøyning
- ↗ Redusert vanninnhold
 - ↗ høyere fasthet ved store tøyninger
- ↗ Gjenkjennes ved endret form på spenningsstien

Evaluering av prøvekvalitet

Table 4. Proposed criteria for evaluation of sample disturbance as quantified by the value of $\Delta e/e_0$.

OCR	Sample quality category			
	Very good to excellent (1)	Good to fair (2)	Poor (3)	Very poor (4)
1–2	<0.04	0.04–0.07	0.07–0.14	>0.14
2–4	<0.03	0.03–0.05	0.05–0.10	>0.10

Note: The description of sample quality refers to use of the samples for measurement of mechanical properties.

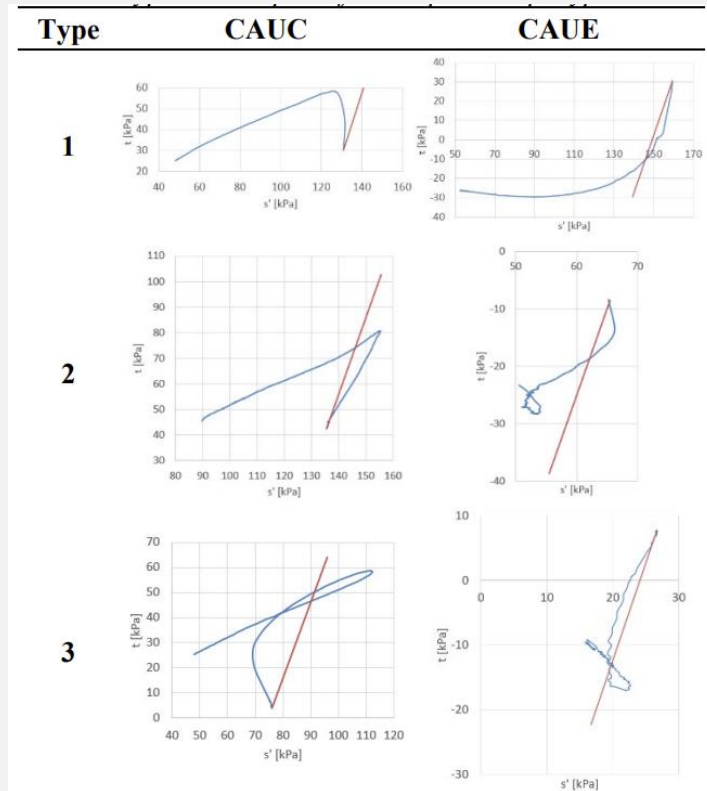
Lunne m.fl. (2006)

Tabell 6. Veiledende kriterier for evaluering av prøvekvalitet basert på endring i porettall.

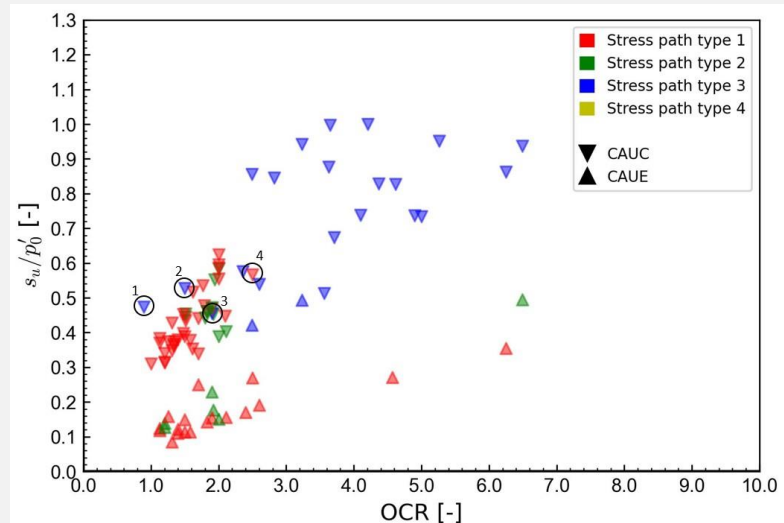
OCR	$\Delta e/e_0^4$			
	Veldig god til utmerket	God til brukbar	Dårlig	Veldig dårlig
1–2	<0,04	0,04-0,07	0,07-0,14	>0,14
2–4	<0,03	0,03-0,05	0,05-0,10	>0,10
4–6	<0,02	0,02-0,035	0,035-0,07	>0,07

NGF melding 11 (2013)

Evaluering av prøvekvalitet

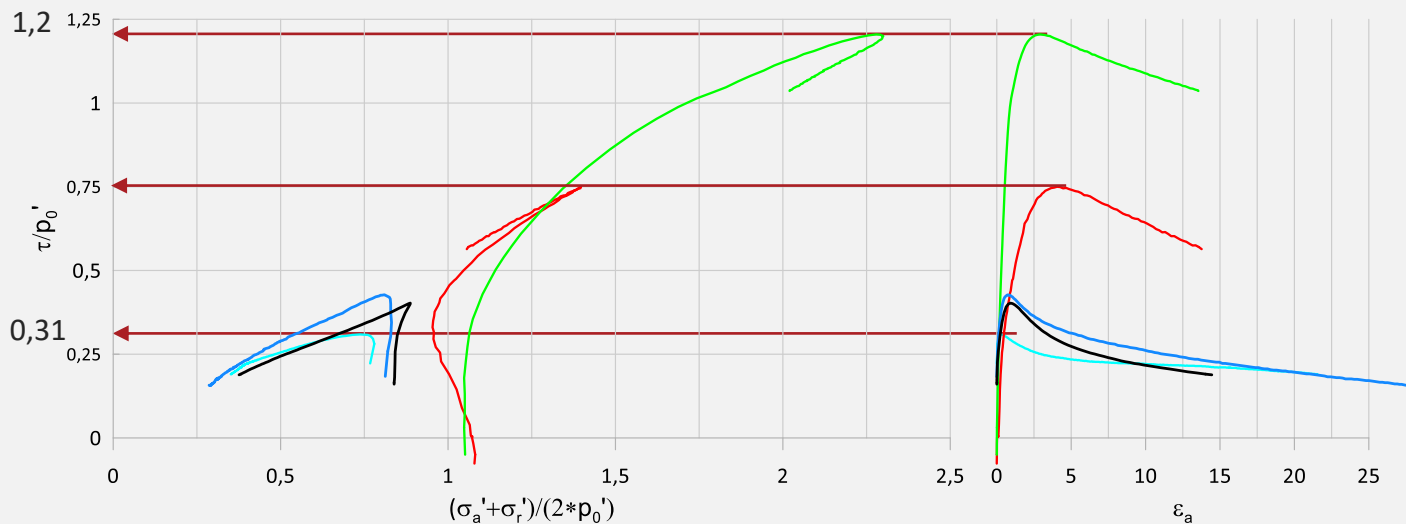


- Resultater fra blokkprøver
- Hvilken oppførsel kan forventes av en god prøve?



Gjelsvik, Kahrs (2024)

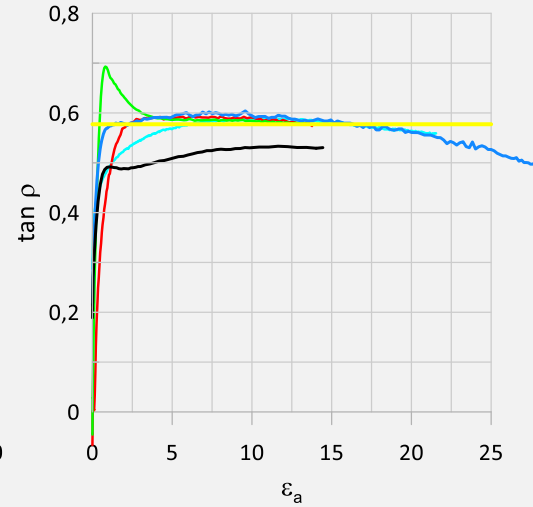
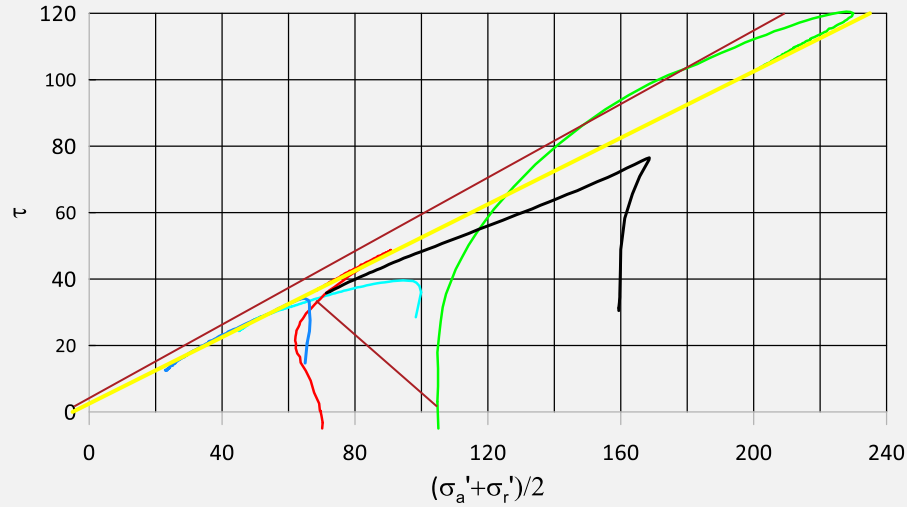
Tolkning av NC/OC – leire, c_{uA}



Legend	
—	Daneviks gt B1 16,17m - OCR=1,2 (w=35%)
—	Onsøy2 BL1 7-A-1 12,6m - OCR=1,3 (w=66,8%)
—	Gardermobanen BL2-2-1 - 12.3m - OCR = 2.1 (w=39%)
—	Klett-Baardshaug 111 7,05m - OCR=4,6 (w=31%)
—	Eidsvoll B116 11,45m - OCR=6 (w=26%)

- $c_{uA} = \tau_{max}$
- $\epsilon_f = 0,1 - 4\%$ (typisk)
- Lavest ϵ_f for sensitive leirer
- $c_{uA}/p_0' = 0,3 - 1,2$

Tolkning av NC/OC – leire, a - ϕ



Legend	
—	Daneviks gt B1 16,17m - OCR=1,2 (w=35%)
—	Onsøy2 BL1 7-A-1 12,6m - OCR=1,3 (w=66,7%)
—	Gardermobanen BL2-2-1 z=12,3m - OCR = 2,1 (w=39%)
—	Klett-Baardshaug 111 BL_1_A_1 7,05m - OCR=4,6 (w=31%)
—	Eidsvoll B116 11,45m - OCR=6 (w=26%)
—	$\tan f = 30^\circ$

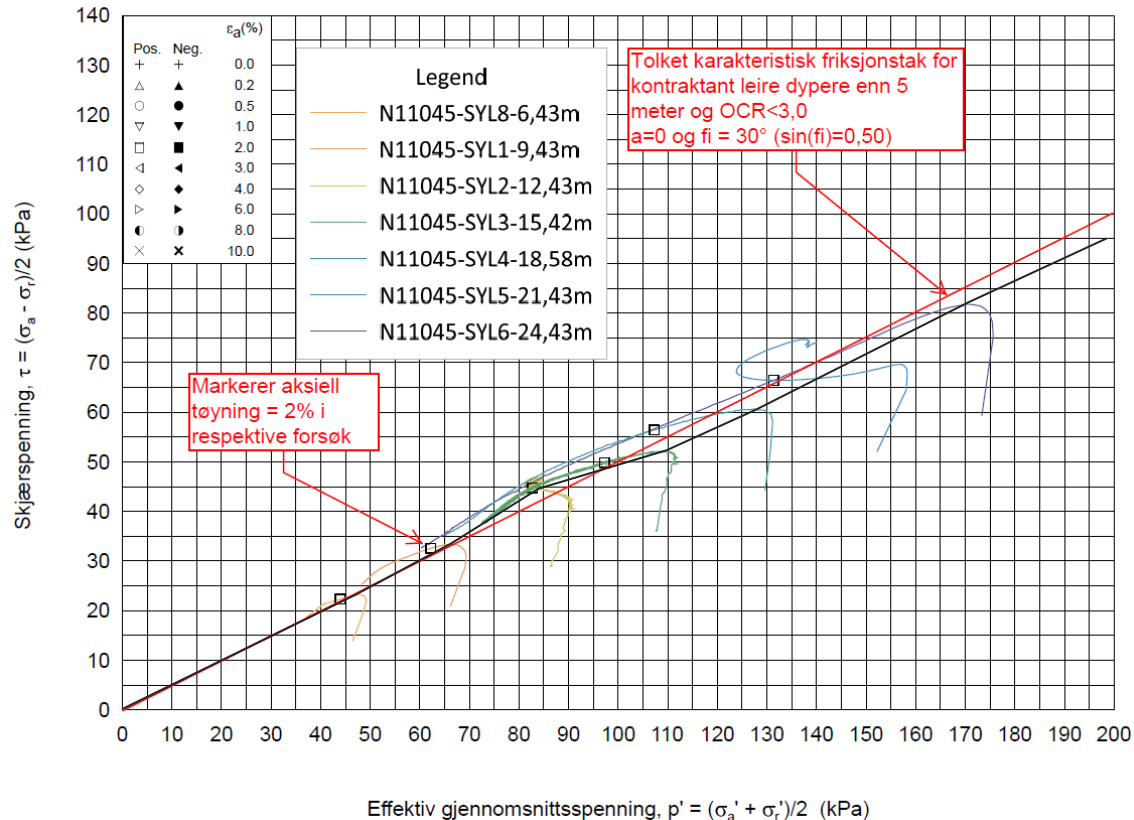
- ↗ $a = 5, \phi = 30^\circ$
- ↗ OK for blå og rød, men høyt for cyan og svart

Tolkning av NC/OC – leire, a - ϕ

Jeg stoppet litt opp på denne setningen i presentasjonen 25.april, da jeg ikke umiddelbart husket sammenhengen. Poenget er at for dilaterende forsøk vil 1-2% tøyning ofte ligge i «grisehalen», og blir da ikke-konservativt. Det er mer relevant (etter min mening) å legge friksjonsvinkelen ved større tøyning, etter τ_{\max} .

- ϕ_{\max} oppnås generelt ved høyere tøyninger enn ved τ_{\max}
- Skill mellom NC-leire/svakt OC og OC-leire
 - NC-leire/svakt OC: vanlig praksis å velge et tøyingsnivå på $\varepsilon_a = 1-2\%$
 - For stabilitetsberegninger hvor deformasjoner ikke er viktig kan det argumenteres å gå høyere
 - Prøver av god kvalitet viser likevel ofte høy mobilisering ved 2%
 - OC-leire: Ta ut for større tøyninger i forsøk som viser vesentlig dilatans før τ_{\max} , «grisehaleforsøk», typisk OCR > 2,5
- Kurvetilpasning, kombinasjon av a og ϕ kan variere med spenning/dybde

Tolkning av NC/OC – leire, $a-\phi$



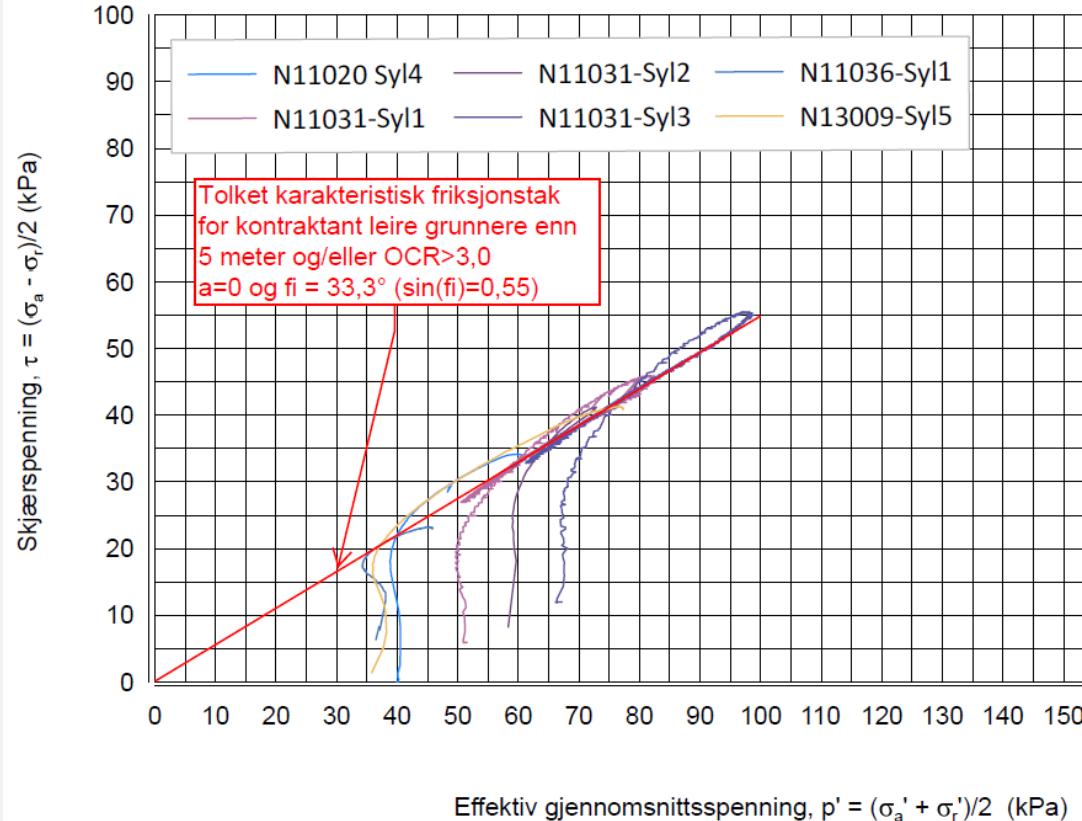
Prosjekteksempel
E6 Kvithammar - Åsen

Rent kontrakterende
materiale for $z > 5$
meter og $OCR < 3,0$

$$a = 0$$

$$\phi = 30^\circ$$

Tolkning av NC/OC – leire, $a-\phi$



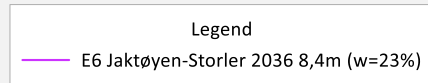
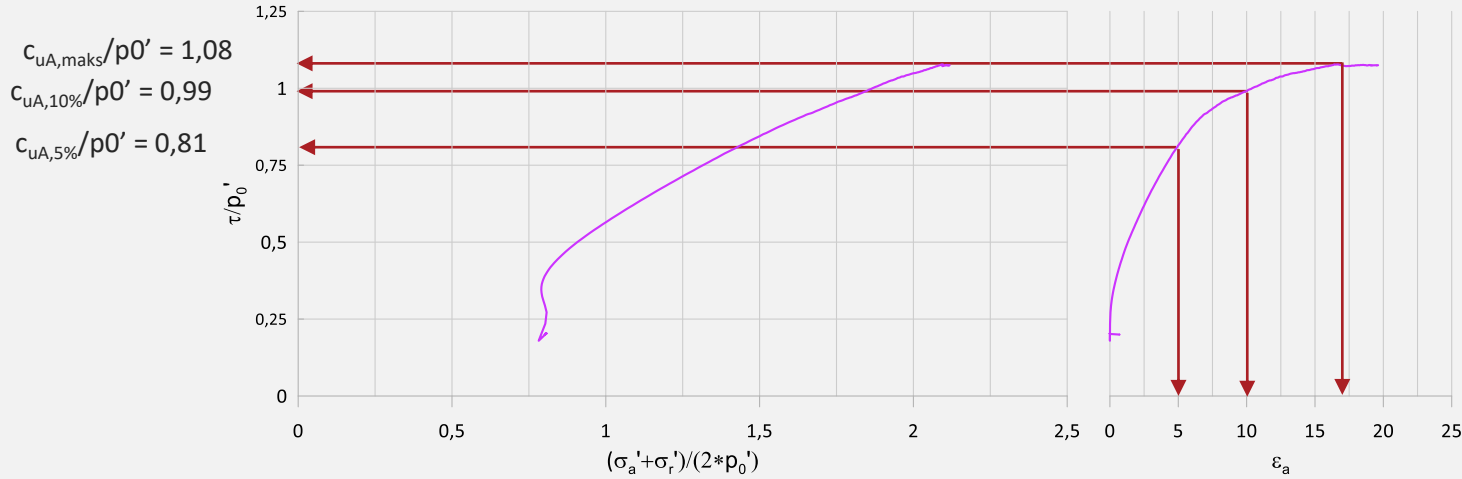
Prosjekteksempel
E6 Kvithammar - Åsen

Dilatans før
kontraktans, typisk
«Grisehaleforsøk» ved
 $z < 5\text{m}$ og $OCR > 3,0$

$$a = 0$$

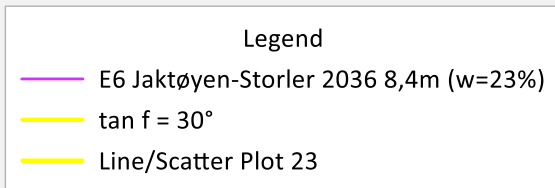
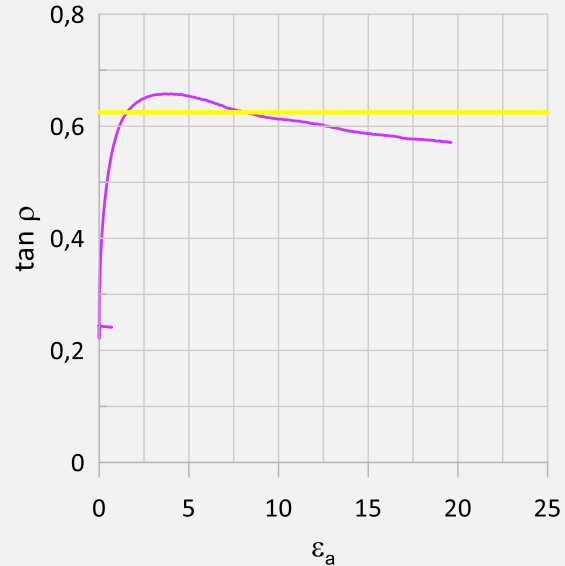
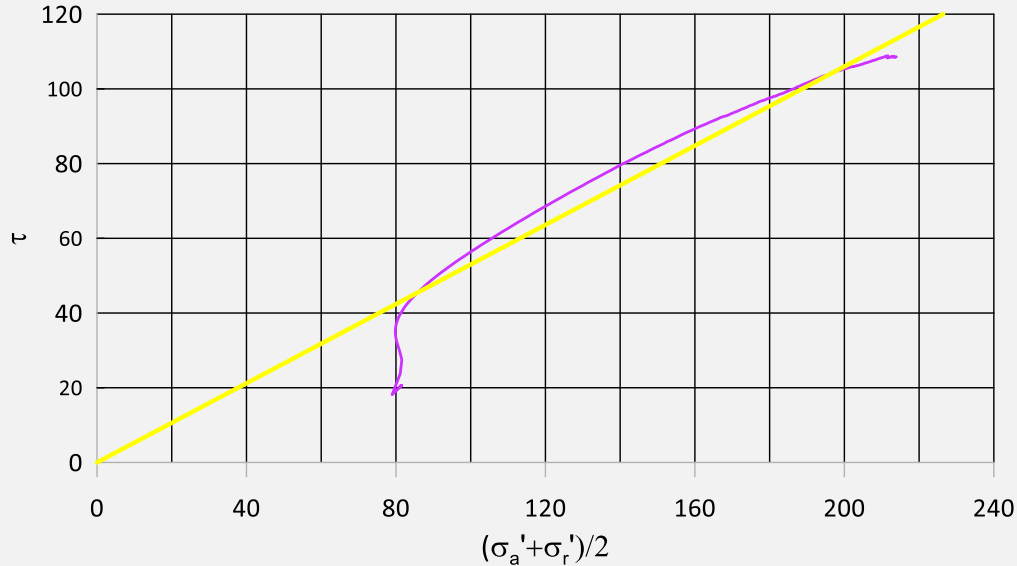
$$\phi = 33,3^\circ$$

Tolkning av leirer med nøytralt/dilatant brudd, c_{uA}



- Skredmateriale/omrørt materiale/sterkt OC?
- Velg ønsket maksimal tøyning
- Tøyningskompatibilitet
- Analyseres som drenert materiale?

4. Tolkning av leirer med nøytralt/dilatant brudd, $a-\phi$



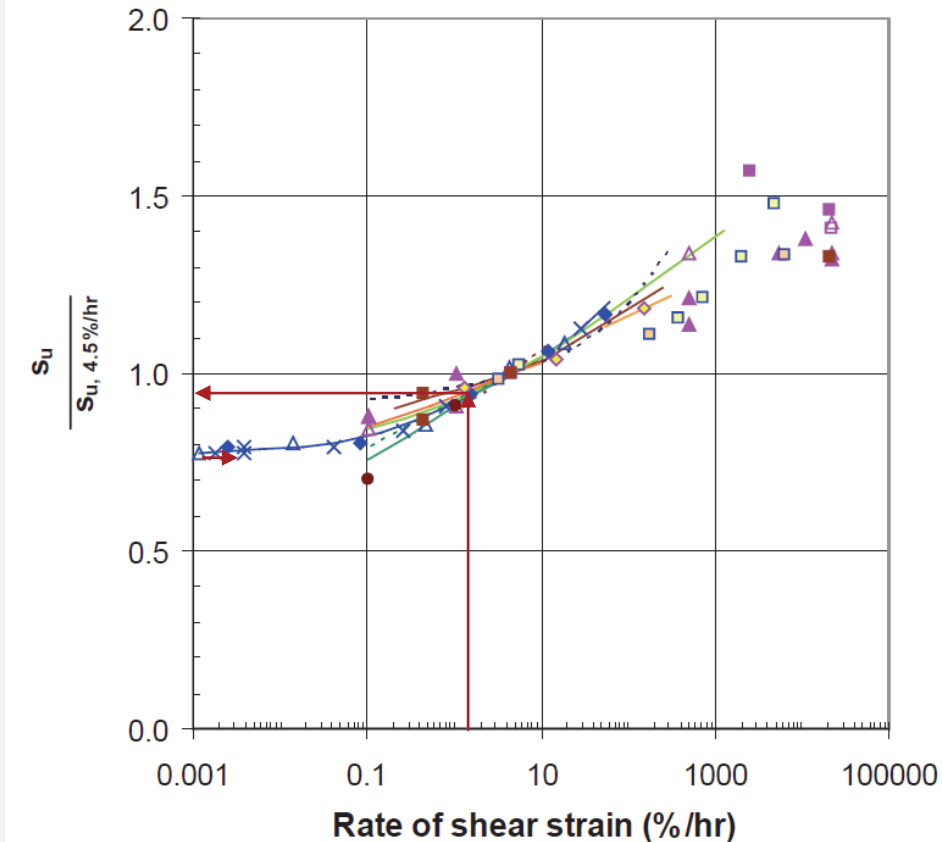
➤ Velg ønsket maksimal tøyning

➤ Eksempel:

➤ $a = 0, \phi = 32^\circ$

➤ $\epsilon_a = 1,5\%$

Tøyningshastighet



- Normal tøyningshastighet på NGI ca. 1,4% pr. time
- Veldig lav tøyningshastighet gir inntil 20% lavere fasthet
- Ingen systematisk effekt av plastisitet eller OCR i området 1 – 4,5
- Tilsynelatende ingen effekt av prøveforstyrrelse

(Lunne og Andersen, 2007)

Plan tilstand vs. Triaxial tilstand

- ↗ $\sigma_2' > \sigma_3'$ vs. $\sigma_2' = \sigma_3'$
- ↗ Høyere midlere effektivspenning når $K_0' < 1$ (ca. 10% for NC-leire)
- ↗ Mulig endret effekt av dilatans / kontraktans
- ↗ Kan teoretisk gå begge veier
- ↗ Resulterende effekt avhengig av K_0' ?
- ↗ Ladd (1991) – triax i gjennomsnitt ca. 10% lavere enn plan tøyning.

- At $\delta = 0^\circ$, $q_f(\text{TC})/q_f(\text{PSC}) = 0.92 \pm 0.05$ (several clays).
- At $\delta = 90^\circ$, $q_f(\text{TE})/q_f(\text{PSE}) = 0.82 \pm 0.02$ (only four clays).

Takk for meg!

- Takk til bidrag fra
 - Pasquale Carutenuto (NGI)
 - Amund Augland (GeoVita)
- Spørsmål – om vi har tid





#påsikkergrunn