



# Geotekniske laboratorieundersøkelser

**Usikkerheter og feilkilder**

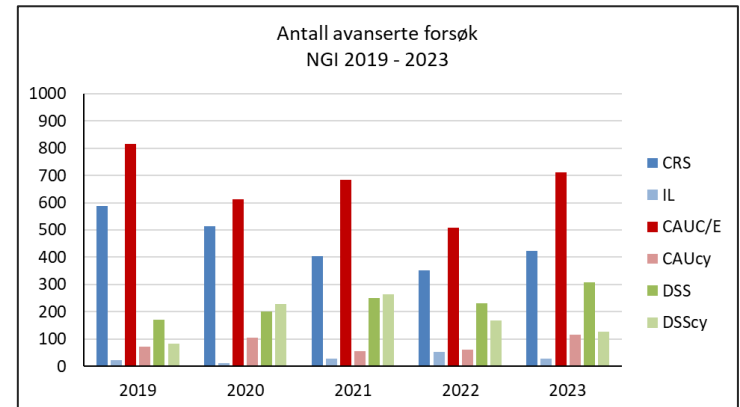
Temadag - Geotekniske parametere

25. april 2024

Øyvind Blaker  
oyvind.blaker@ngi.no  
Senioringeniør, NGI

# NGI Geoteknisk laboratorium

- Oslo, Houston og Perth.
- Alle laboratorier er akkrediterte.
- Typiske geotekniske tester
  - Klassifisering
  - Enkle styrkeforsøk
  - Avanserte spennings-tøynings styrkeforsøk
  - Permeabilitet
- Små til svært store lab prosjekter
- Forskning og utvikling



# Ringtesten 2023

# Ringtesten 2023

- Første ringtest blant alle Norges geotekniske laboratorier
- Organisert av NGI
- **Rutine- og indeks forsøk:**  $w$ ,  $w_p$ ,  $w_L$ ,  $s_{u,rem}$  (konus),  $\gamma$ ,  $\rho_s$
- **Bestemmelse av kornfordeling:** Våtsikt av Hokksund SAND og Hydrometeranalyse av Tiller LEIRE
- **Ødometerforsøk (CRS):** Blokkprøver av Tiller LEIRE



# Bakgrunn

- Heve grunntanken om å kjøre geotekniske lab forsøk
- Forstå variasjonen i resultater fra norske laboratorier (tross standardiserte prosedyrer ISO 1892 serien)
- Bevisstgjøre oss selv og hele lab miljøet i Norge
- Heve kvaliteten på resultatene som leveres
- Bygge tillit til hverandre og kundene



# Deltakere

Laboratory	Address
Geonord	Betongveien 4, 9515 <b>Alta</b>
Multiconsult, Tromsø	Multiconsult, GeoLab Tromsø, Kvaløyveien 156, 9013 <b>Tromsø</b>
Multiconsult, Trondheim	Multiconsult, GeoLab Trondheim, Sluppenveien 23, 7037 <b>Trondheim</b>
Statens vegvesen, Midt	Statens vegvesen, Lab Midt, Vestre Rosten 78, 7075 <b>Tiller</b>
Rambøll, Trondheim	Rambøll Norge AS, Kvenildmyra 4, 7093 <b>Tiller</b>
Norconsult, Molde	Grandfjæra 24, NO-6415 <b>Molde</b>
ERA	ERA Geo, Verftsgata 10, 6416 <b>Molde</b>
Løvlien Georåd	Elvesletta 35, 2323 <b>Ingeberg</b>
Multiconsult, Bergen	Multiconsult, GeoLab Bergen, Nestunbrekka 99, 5221 <b>Nestun</b>
Multiconsult, Oslo	Multiconsult, GeoLab Oslo, Hoffsvveien 1C, 0275 <b>Oslo</b>
NGI	Sandakervein 130, 0484 <b>Oslo</b>
Statens vegvesen, Oslo	Statens vegvesen, Oslo laboratorium, Fyrstikkalèen 3, 0661 <b>Oslo</b>
Statens vegvesen, Skien	Statens Vegvesen laboratorium, Bataljonvegen 15, 3731 <b>Skien</b>
Geostrøm	GeoStrøm AS, Hengsrudveien 855, 3176 <b>Undrumsdal</b>
Multiconsult, Stavanger	Multiconsult, GeoLab Stavanger, Vassbotnen 23, 4033 <b>Stavanger</b>



GeoStrøm AS



Multiconsult



RAMBOLL



# Prøvetaking

- ↗ Prøvetaking utført av Boreskolen
- ↗ 4 stk blokkprøver (2.5 - 4.5m) fra Tiller-Flotten testområde nær Trondheim
- ↗ Distribuert av NGI
- ↗ **Fra blokkprøve:**  $w$ ,  $\gamma$ , CRS
- ↗ **Fra omrørt, homogenisert prøve:**  $w_p$ ,  $w_L$ ,  $S_{u,rem}$ ,  $\rho_s$ , and hydrometeranalyse



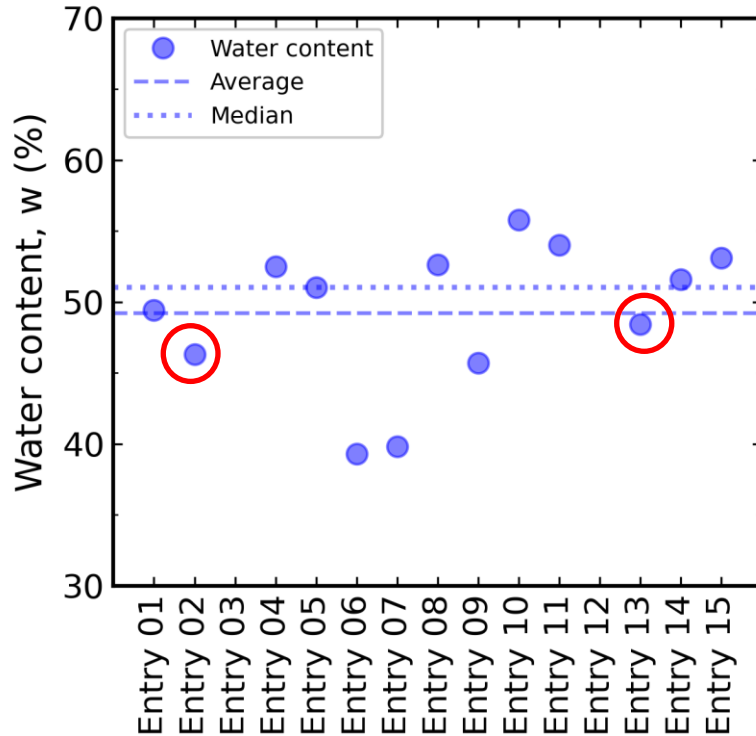
# Notasjon - statistikk

- ↗ Gjennomsnitt –  $\bar{x}$
- ↗ Median – M
- ↗ Standardavvik – s
- ↗ Variasjonskoeffisient – CV  
(=  $\frac{s}{\bar{x}} \times 100$ )

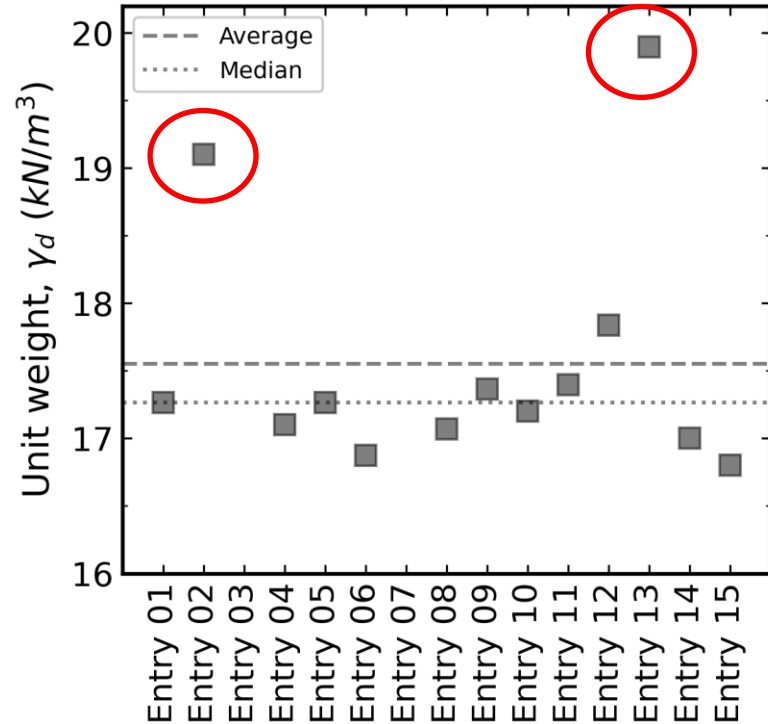




# Klassifikasjonsparametere: w and $\gamma$ (blokk)

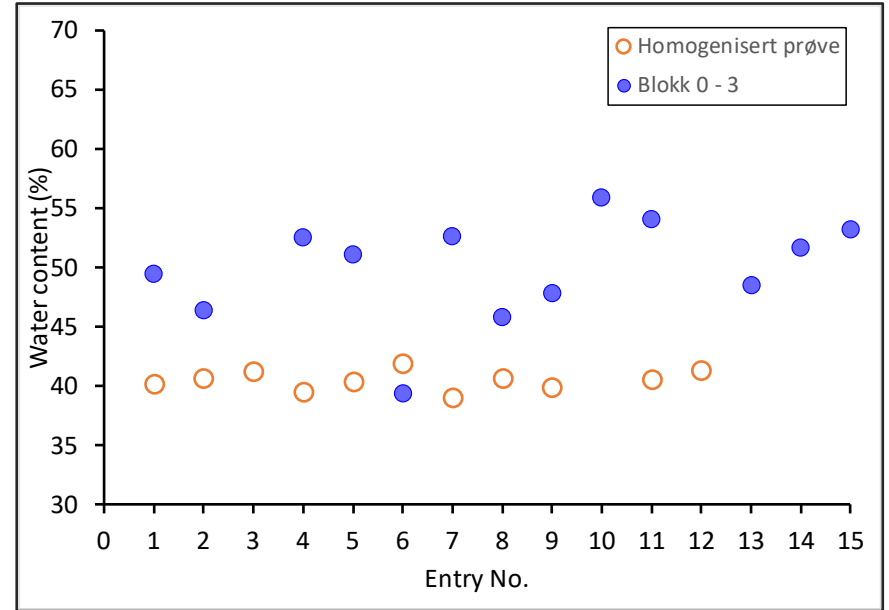
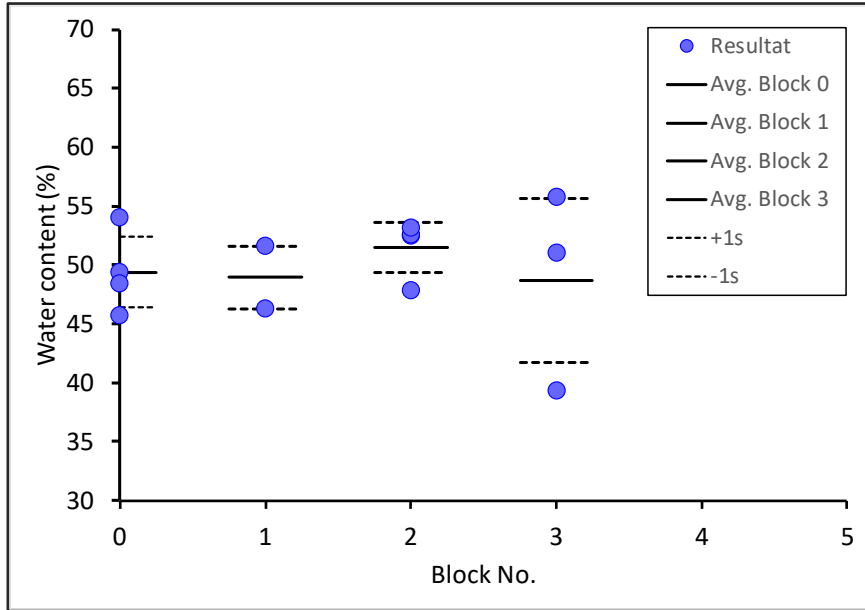


(a)

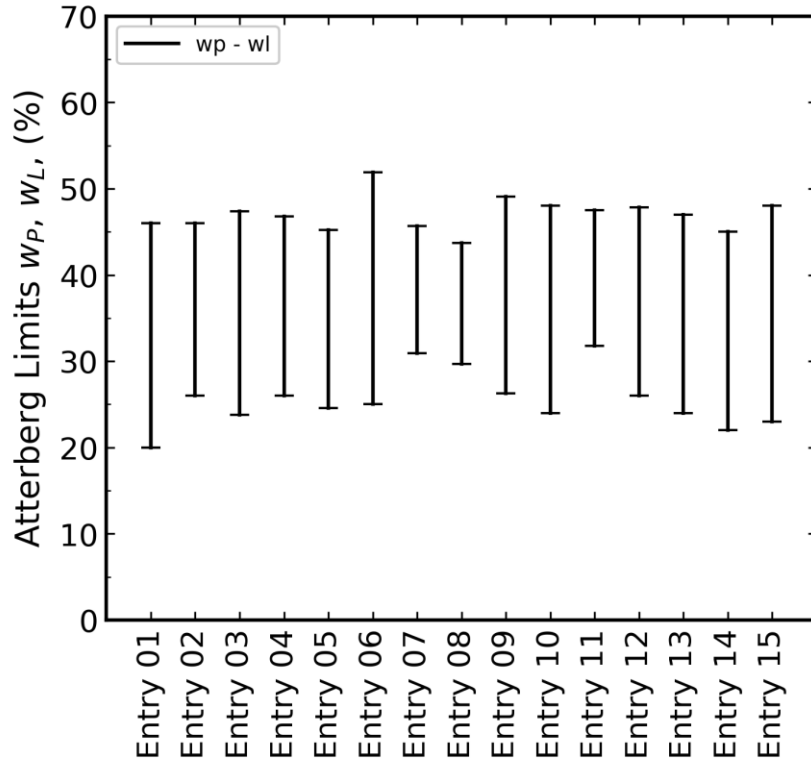


(b)

# Klassifikasjonsparametere: $w$ and $\gamma$ (blokk)

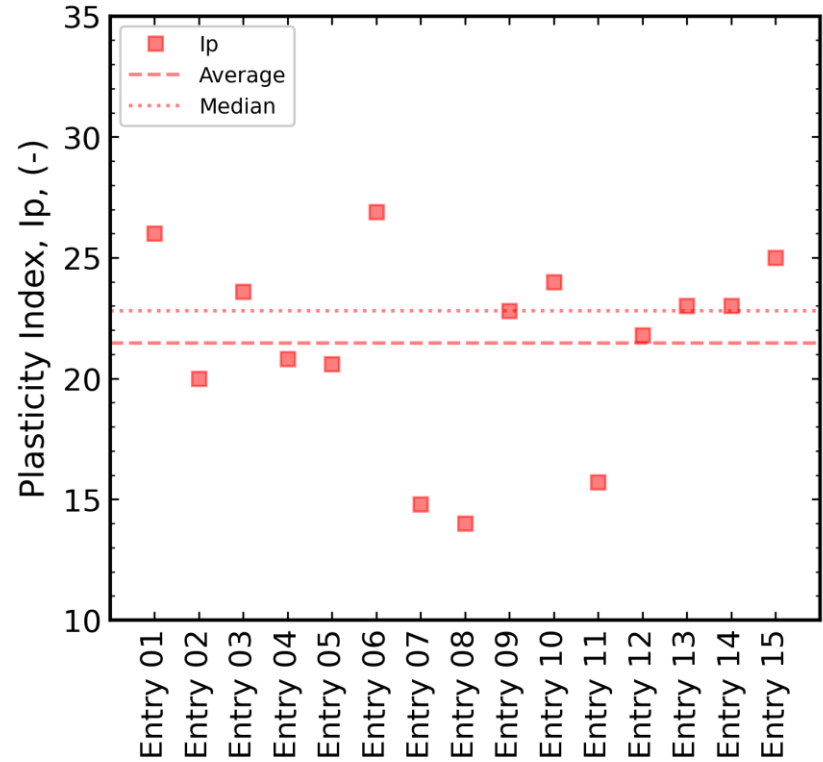


# Klassifikasjonsparametere: $w_P$ , $w_L$ , $I_p$ (h.prøve)



(a)

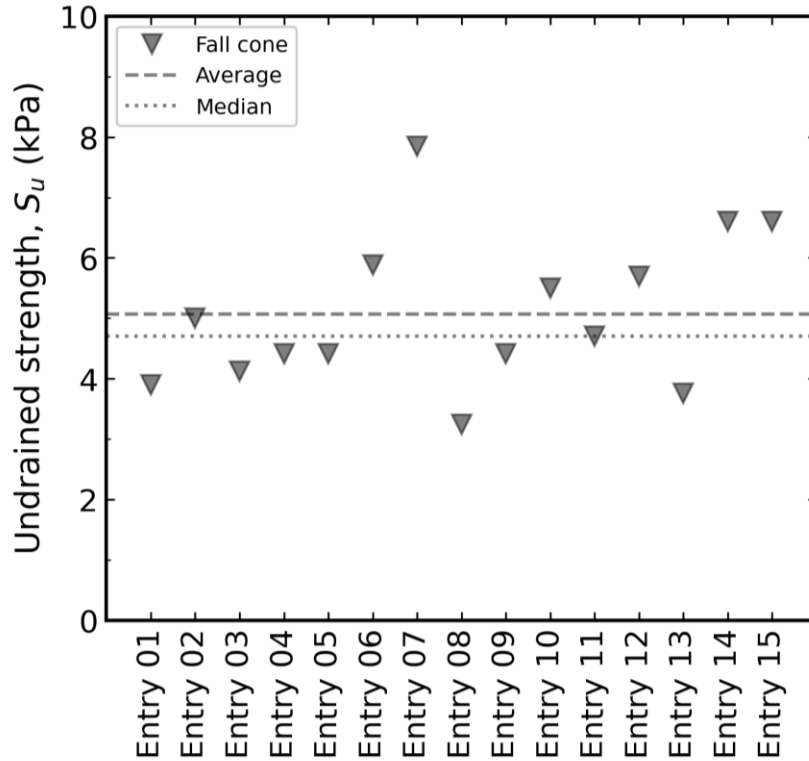
$w_L$ :  $\bar{x} = 47.0\%$ ,  $M = 47.0\%$ ,  $s = 1.9\%$ ,  $CV = 4\%$   
 $w_P$ :  $\bar{x} = 25.5\%$ ,  $M = 25.0\%$ ,  $s = 3.1\%$ ,  $CV = 12\%$



(b)

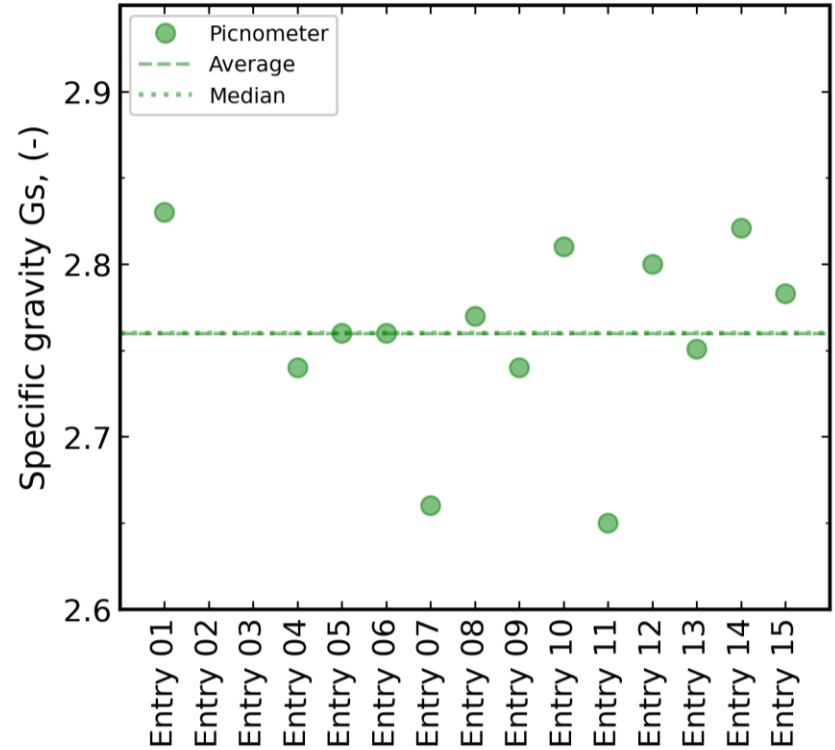
$\bar{x} = 21\%$ ,  $M = 23\%$ ,  $s = 3.8\%$ ,  $CV = 18\%$

# Klassifikasjonsparametere: $s_{u,rem}$ & $\rho_s$ (h.prøve)



(c)

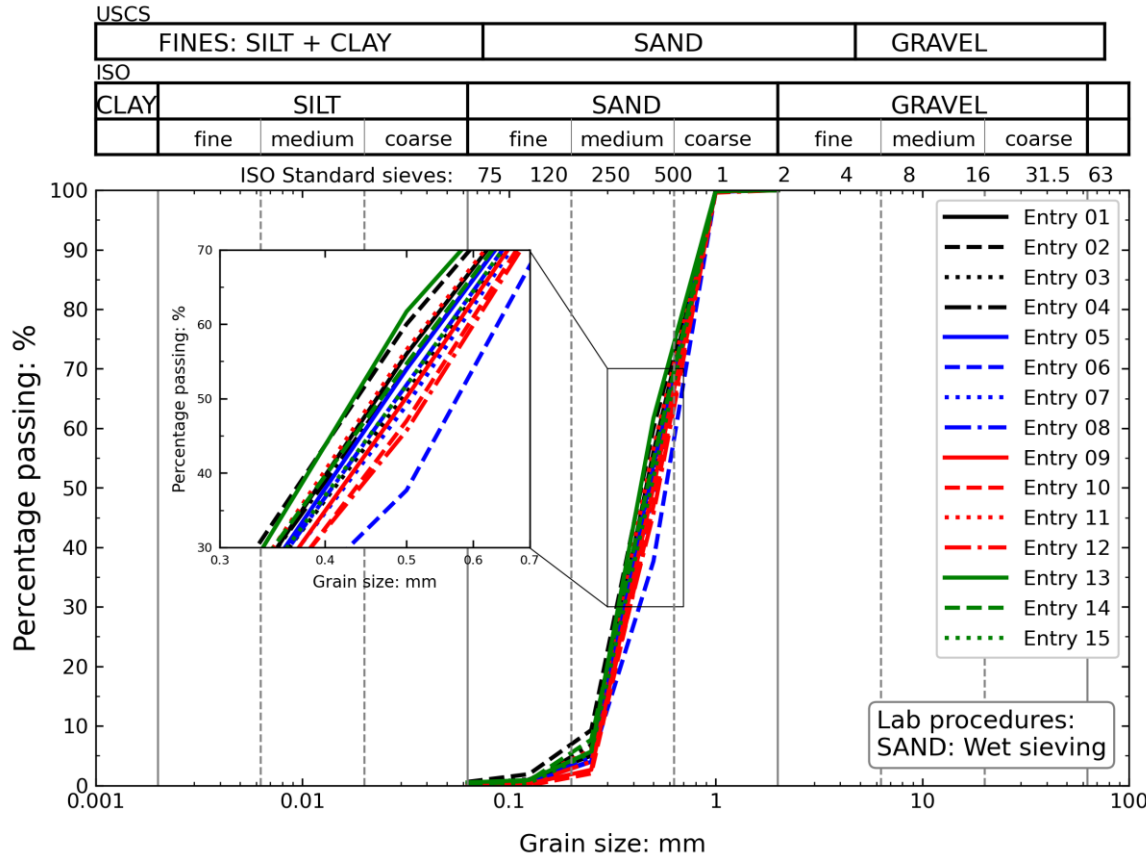
$\bar{x} = 5.1$  kPa,  $M = 4.7$  kPa,  $s = 1.2$  kPa,  $CV = 24$  %



(d)

$\bar{x} = 2.76$  kN/m<sup>3</sup>,  $M = 2.76$  kN/m<sup>3</sup>,  $s = 0.05$  kN/m<sup>3</sup>,  $CV = 2$  %

# Klassifikasjonsparametere: kornfordeling



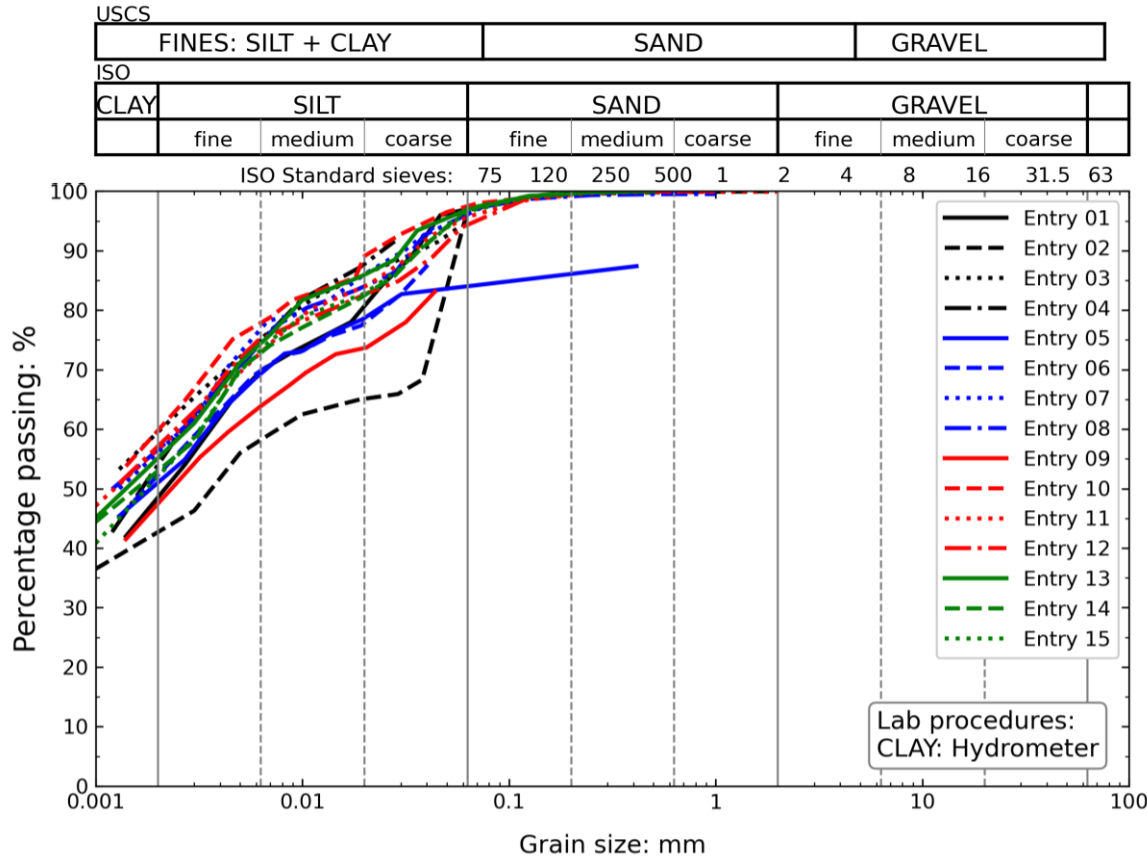
## Hokksund SAND

↗  $D_{50} = 0.45 - 0.60$   
mm

↗  $D_{10} = 0.29 - 0.25$   
mm

↗ % finstoff = 0.2 -  
0.6 %

# Klassifikasjonsparametere: kornfordeling



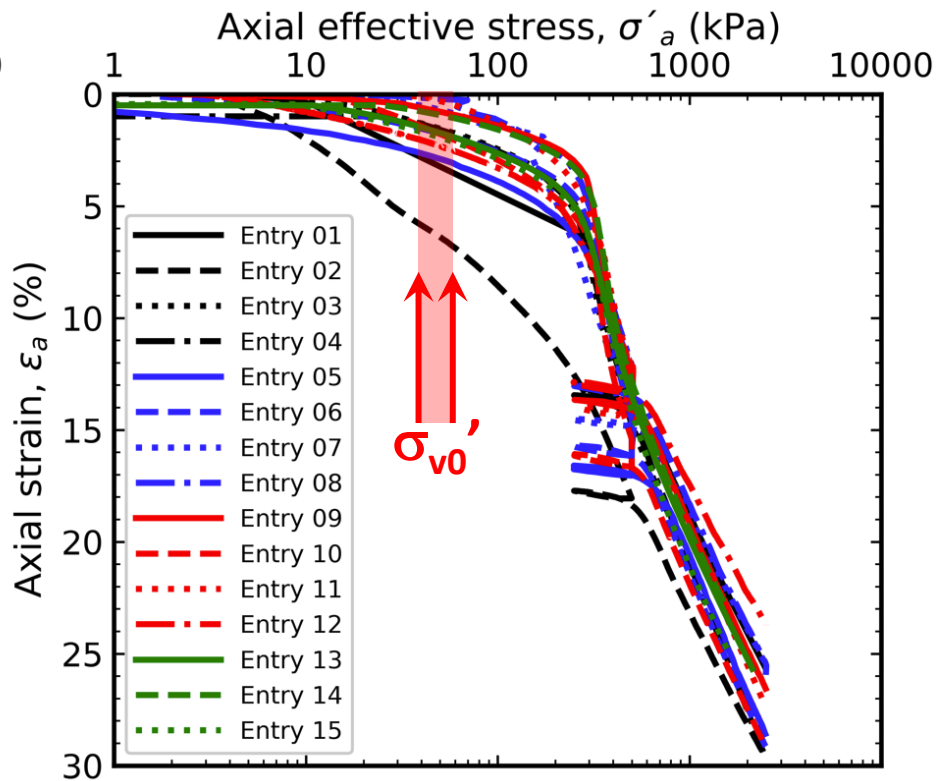
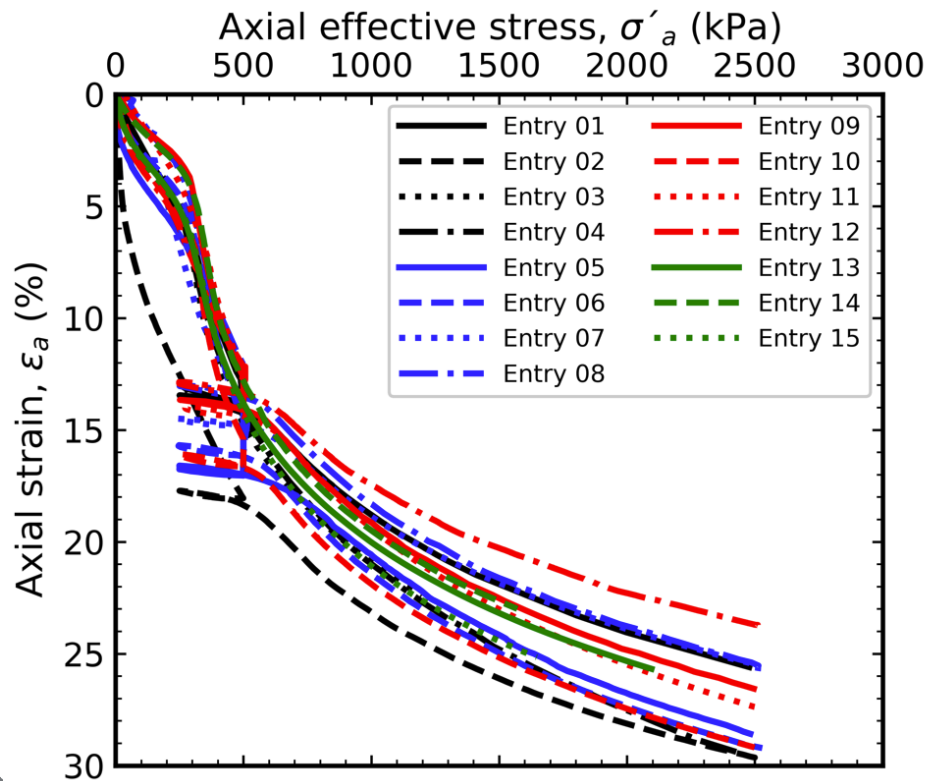
## Tiller LEIRE

- ↗ Store forskjeller
- ↗ % LEIRE 41 % - 59 %  
–  $\bar{x} = 52\%$ ,  $s = 4.5\%$
- ↗ % SILT 38% - 55%
- ↗ % SAND 6% - 3%

# Ødometer

Note: specimens from different Block samples

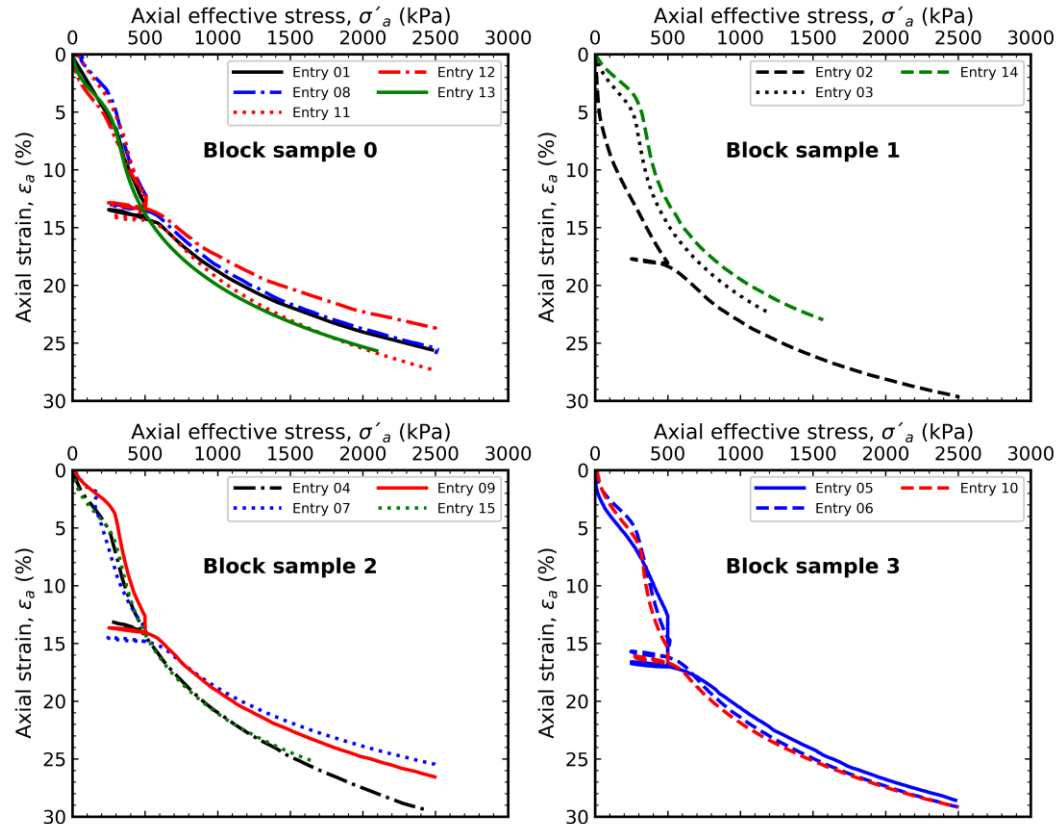
Entry 01, 08, 11, 12,13 – Blokkprøve 0  
Entry 02 03, 14 – Blokkprøve 1  
Entry 04 07, 09, 15 – Blokkprøve 2  
Entry 05 06, 10 – Blokkprøve 3



Forskjeller også innad i same blokkprøve



# Ødometer





# Usikkerheter og feilkilder knyttet til data fra lab

# Litt om geoteknikk og usikkerhet...



Forventning

# Litt om geoteknikk og usikkerhet...



Forventning

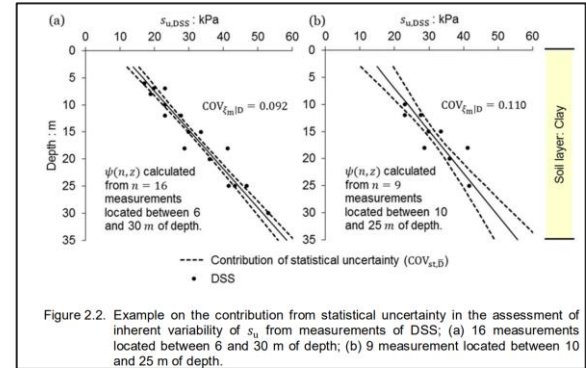


Virkelighet

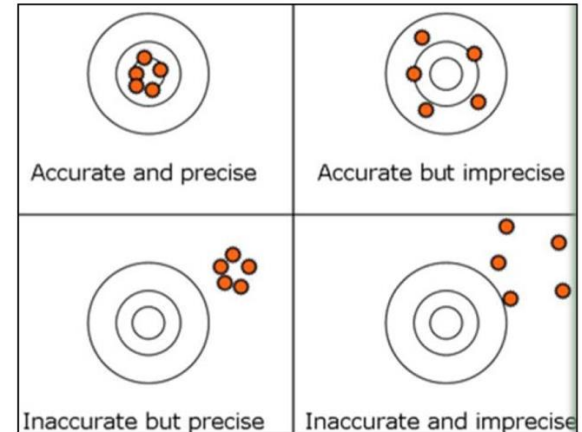
# Feilkilder og usikkerhet

- Usikkerhet vs. Uskikkethet
- To (tre) typer usikkerhet:
  - (menneskelig feil)
  - naturlig variasjon (aleatorisk)
  - mangel på kunnskap (epistemisk)
    - Statistisk usikkerhet
    - **Måleusikkerhet**
    - Modellusikkerhet

Epistemisk usikkerhet kan reduseres!



Prästings (2019)

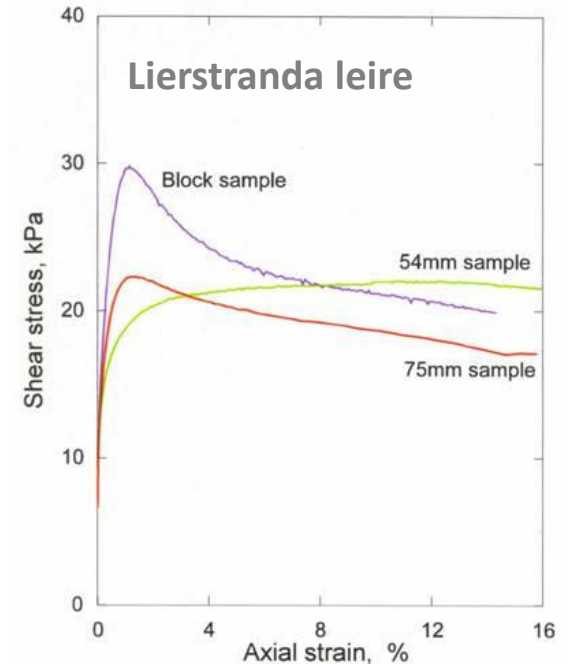


Cohne (2010)

# Feilkilder og usikkerhet

## ↗ Mulige kilder til feil

- Prøveforstyrrelse
- Operatør- eller prosedyre avhengighet
- Falske deformasjoner
- Friksjon i utstyr
- Mangelfull korrigering av målte data
- Mangelfull kalibrering av sensorer og internkontroll
- Temperaturvariasjon
- Forsøksbegrensninger / kommentarer følger ikke med resultatene



Shear stress versus axial strain for CAUC tests at 6.1m depth.

Lunne, Berre, Andersen et al. (2006)

# Feilkilder og usikkerhet

## ↗ Viktigheten av:

- Gode prosedyrer / rutiner for
  - håndtering og lagring av prøver,
  - innbygging
  - opplæring
- Kontroll på operatør(u)avhengighet og utstyr
  - interne ringtester og åpne diskusjoner av feilkilder
  - Kalibreringsrutiner
  - Bestemme målerusikkerhet
  - Kontrollprøver (for eksempel en standard sand) for å sjekke at utstyr og operatører holder «standarden»
- **Kvalitetssikring (KS)**
  - egenkontroll
  - ingeniørkontroll
- **Rimelighetsvurdering**
- **Erfaringsdatabaser**



Bidrag til målerusikkerhet	Merknad (vertikal spenning)	Referanse	u	Bestemt/anslått målerusikkerhet, u (%)	u <sup>2</sup>
Lastmålerens linearity usikkerhet			u1	x	#####
Lastmålerens kalibrering usikkerhet			u2	x	#####
PC-målesystem		KB001	u3	x	#####
Operatør			u4	x	#####
Initial målt prøveareal			u5	x	#####
Membran korleksjon			u6	x	#####
K-verdi			u7	x	#####
				Sum=	#####
Beregnet usikkerhet (kvadrattot av sum)				u (%)=	#VALUE!
Rapportert målerusikkerhet: <± x kPa				(av maksimumverdi)	

# Teknisk akkreditering

*“Akkreditering er den offisielle godkjenningen for at tjenester utføres i samsvar med en internasjonal standard. Akkreditering er en **uavhengig vurdering av en virksomhets kompetanse, integritet og uavhengighet**. Som akkreditert virksomhet viser man til omverdenen at man overholder aktuelle standarder og krav, og dette bekreftes av en uavhengig tredjepart.”*



Noen eksempler



# Ødometerforsøk (CRS) på NGI

- ↗ Typisk ødometer ring har et areal på  $20\text{cm}^2$  eller  $35\text{cm}^2$
- ↗ Prøven bygges inn med tørre filtersteiner
  - Unngå svelling under og etter innbygging
- ↗ 11 CRS
- ↗ 6 IL



# Ødometerforsøk (CRS) på NGI

- Egen rigg for innbygging
- Trimming av leire med kutte-ring som monteres på ødometerringen
- Avretting på overside og underside
- Innbygging av sandprøver typisk ved å stampe inn en gitt mengde sand (moist tamping). 1 lag
- Overflatene avrettes  $h = 20\text{mm}$

Type of test	Area (cm <sup>2</sup> )	Maximum pressure (kPa)
IL	20	4900
	35	2800
CRS	20	12000
	35	7000



# Ødometerforsøk (CRS) på NGI

- ↗ Deformasjon måles direkte mellom toppstykke og bunnstykke
  - Unngå falsk deformasjon påvirker resultat
- ↗ Enveis drenerasje med poretrykk målt i bunn av sokkelen (CRS)
- ↗  $\Delta u_{\text{base}} \leq 10\% - 15\%$  av  $\sigma'_a$  (CRS)
- ↗ Mulighet for av og rebelastningssløyfer
- ↗ Standardiserte formater for leveranse med prøvedata og tidshistorie

Deformasjonsmåler (LVDT)

Drenasje

$\Delta u_{\text{base}}$

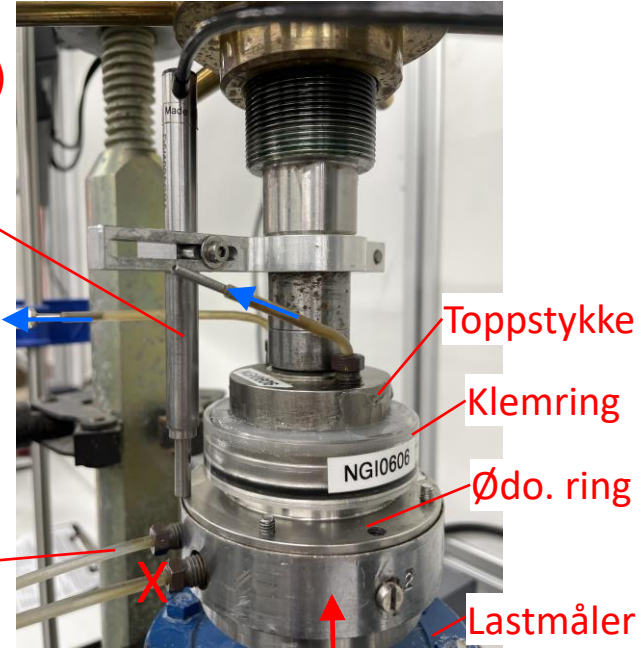
LAST

Toppstykke

Klemring

Ødo. ring

Lastmåler

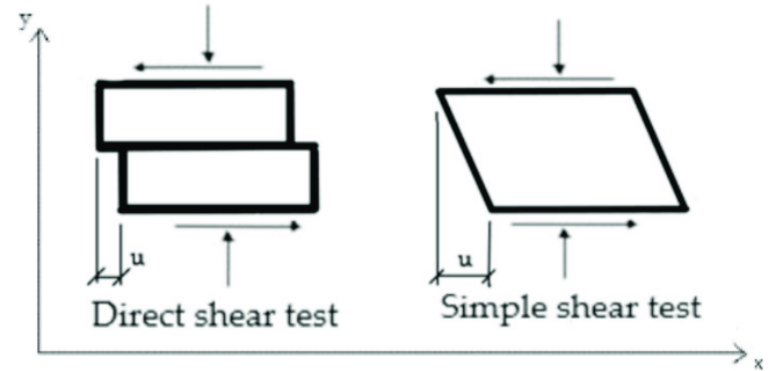


# Direct Simple Shear (DSS)

- Videreutvikling av direkte skjær (DS)
  - relatere jordoppførsel til skjærtøyninger
  - kjøre udrenerte forsøk (konstant volum)
  - bestemme udrenert skjærstyrke,  $s_{uD} = \tau_{h,peak}$
- Topp – eller bunnstykket forskyves og skjærdeformeringen skjer langs hele prøvehøyden
$$\gamma_h = 100 \times \frac{\Delta u}{h}$$
- Fullstendige spenningstilstanden er ikke kjent (i motsetning til triaksialforsøket)
  - Horisontaltøyningen i DSS = 0, spenningene i horisontal retning måles ikke
  - Vertikale spenninger ujevnt fordelt for å forhindre rotasjon av prøven.
- Omslutningen (armert membran/ringer) tillater horisontale skjærtøyning
- DSS komplementerer aktive og passive triaksialforsøk
- Brukes mye i offshore grunnundersøkelser!

$$\gamma_h = ?$$

$$\gamma_h = \Delta u/h$$



Armert membran

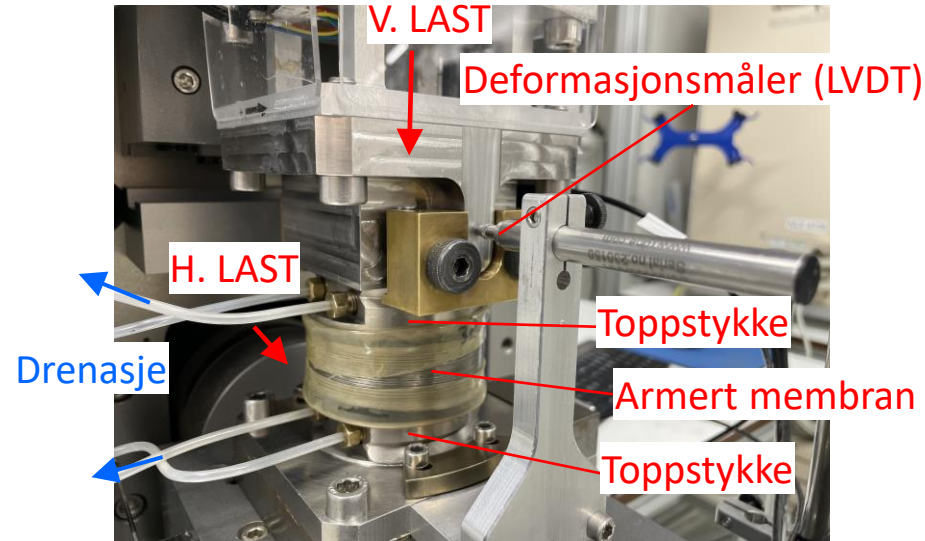
# Direct Simple Shear (DSS)

- ↗ Egen rigg for innbygging
- ↗ Prøvehøyde 16 - 20 mm
- ↗ Prøveareal 20, 35 eller 50 cm<sup>2</sup>
- ↗ Prøven bygges inn med tørre filtersteiner
  - Unngå svelling under og etter innbygging
- ↗ 11 GDS (med NGI modifikasjoner)
- ↗ 3 Geonor
- ↗ Standardiserte formater for leveranse med prøvedata og tidshistorie



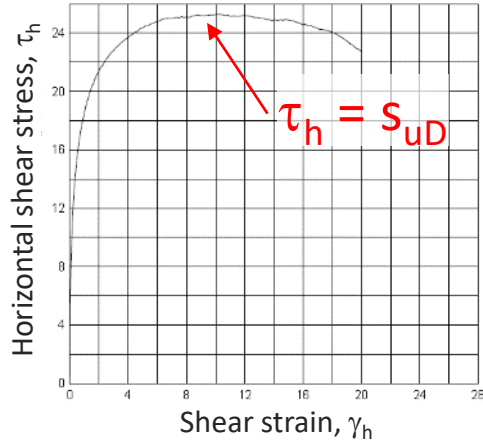
# Direct Simple Shear (DSS)

- ↗ Deformasjon måles direkte mellom toppstykke og bunnstykke
  - Unngå falsk deformasjon påvirker resultat
- ↗ INGEN poretrykksmåler ( $\Delta\sigma_a = \Delta u$ )
- ↗ INGEN mulighet for mottrykk
- ↗ Styring:
  - Konsolidering
    - Vertikal last (vertikalspenning),  $\sigma_a$
    - Vertikal deformasjon (vertikaltøyning),  $\epsilon_a$
    - Radielle/horisontale tøyninger tillates ikke  $\epsilon_r = 0$
  - Skjær
    - Horisontal last (skjærspenning),  $\tau$
    - Skjærdeformasjon (skjærtøyning),  $\gamma$
- ↗ Mulighet for sykliske forsøk (DSScy)
- ↗ Membrankorreksjon for korrigering av skjærspenning

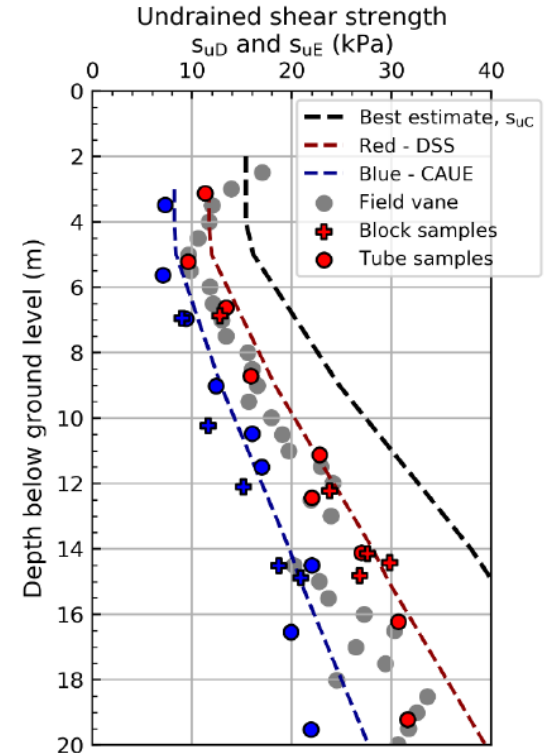


# Direct Simple Shear (DSS)

- Typisk resultat – statisk - undrenert
  - Skjærspenning vs skærtøyning  
(brudd antas ved maksimal hor. skjærspenning)



Onsøy  
 $s_{uD}/s_{uE} \sim 0.74$   
 $s_{uE}/s_{uC} \sim 0.52$



Hva kan man gjøre med en god lab?



# En god lab?

- ↗ Gode opplæringsrutiner sørger for erfaringsoverføring og høy kvalitet
- ↗ Gjennomtenkte løsninger for prøvehåndtering
- ↗ Kontroll på
  - utstyr og sensorer
  - usikkerheter
  - måldata, resultater og formater
- ↗ Utfører (og dokumenterer)
  - interne ringtester og
  - regelmessig kalibrering av utstyr
- ↗ Samarbeid med utstyrsleverandører om FOU evt. modifikasjoner av utstyr
  - God erfaring med GDS utstyr og software.



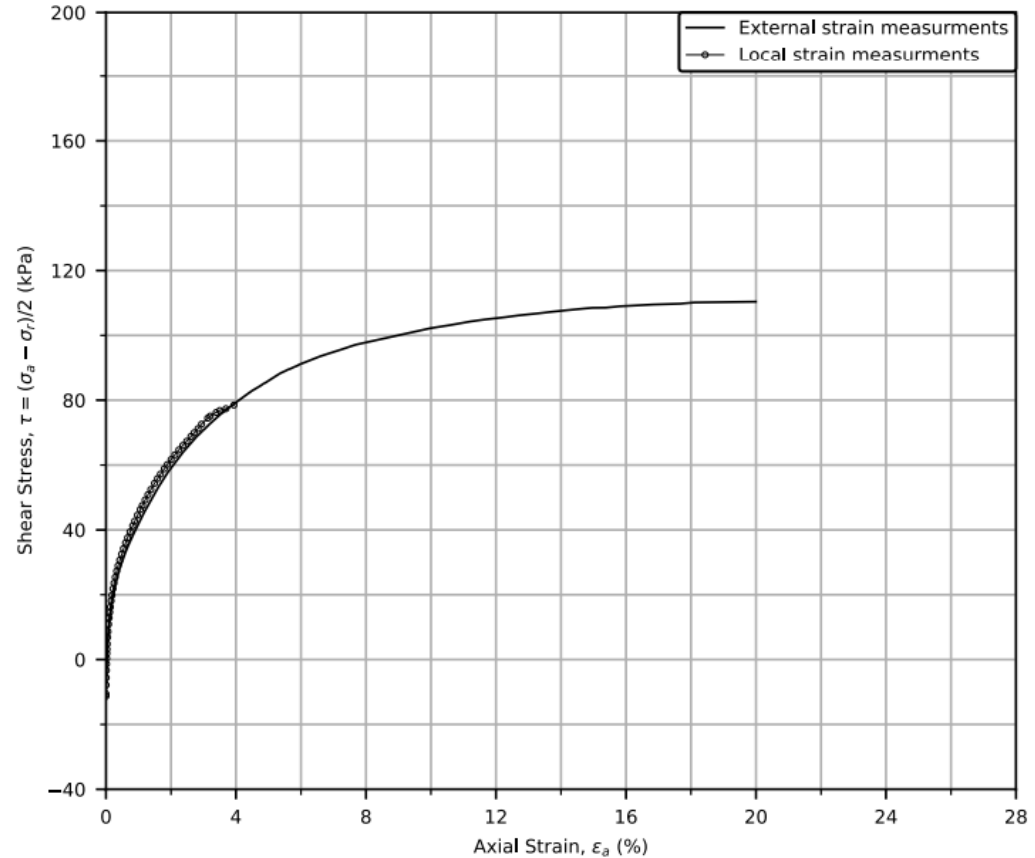
# Hva kan man gjøre med en god lab?

- ↗ Kvalitet over tid - gode kunderelasjoner
- ↗ Kapasitetsøkning, investeringer
- ↗ Levere i flere formater, kontroll på dataene. AGS mest brukt internasjonalt
- ↗ Nyutvikling innenfor automatisering, logging og kontroll (NGI Autolab, SmartLab)
- ↗ Avanserte forsøk
  - DSS
  - Ringskjær
  - Resonant Column og Bender Elements ( $V_s$ ,  $G_{max}$ ,  $D$ )
  - Sykliske tester (CAUcy, CADcy, DSScy)
- ↗ Evaluere resultatene!



# Hva kan man gjøre med en god lab?

- Hvor gjøres målingene?
  - Plassering av def. måler?
- Innvendig vs. ekstern deformasjonsmåler
- Base vs. MH poretrykk
- Bender elements
  - $V_{vh}$  ( $V_{hv}$  eller  $V_{hh}$ )



# Hva kan man gjøre med en god lab?

- CAUcy
- CADcy
- Typisk offshore prosjekter

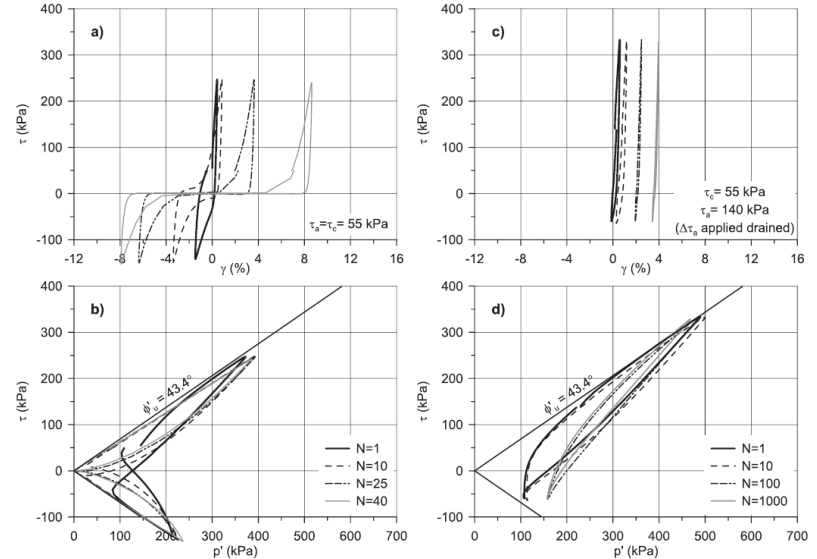
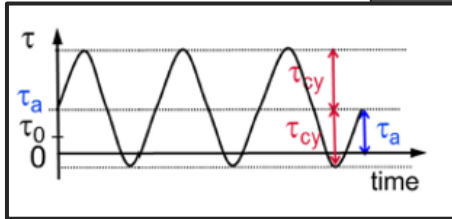
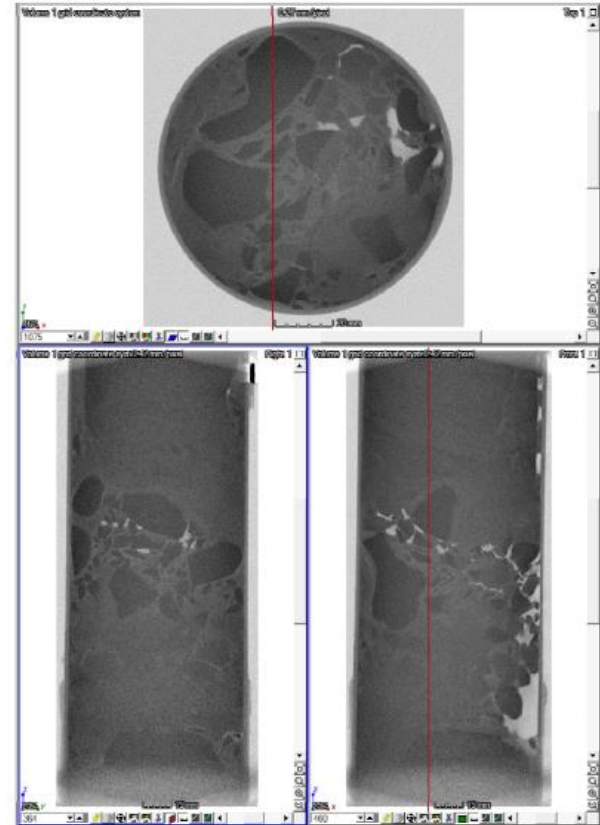
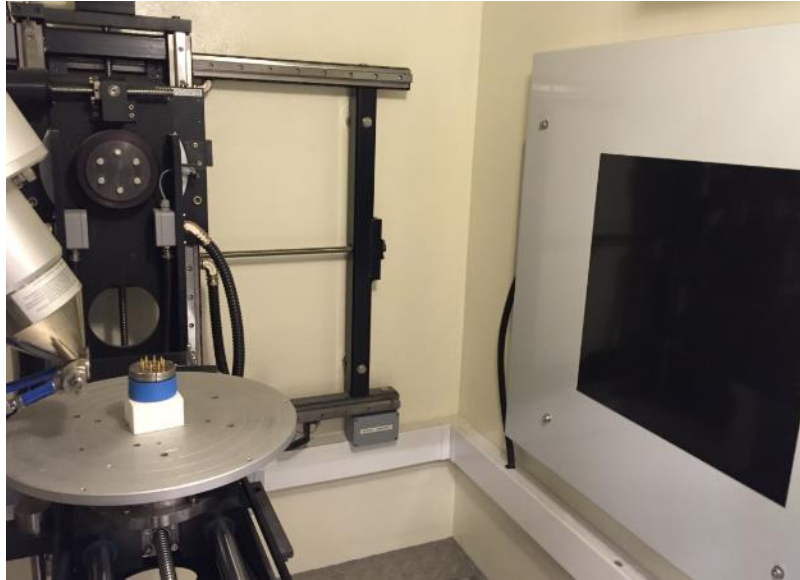


Fig. 4. (a) Stress-strain and (b) effective stress path for a cyclic triaxial test with no change in  $\tau_a$  after consolidation. (c) Stress-strain and (d) effective stress path for a cyclic triaxial test with large positive drained  $\Delta\tau_a$  applied after consolidation. Batch A,  $D_r \approx 95\%$  and  $OCR = 1$ .

Blaker & Andersen (2019)

# Hva kan man gjøre med en god lab?

- CT scanner
  - Rock mechanics analyses: fractures, flow (e.g. CO<sub>2</sub>)
  - Used for soft rocks tested in soil lab (see figure right)
  - Artwork from XIV century
  - Sensors and several type of equipment (see picture below)



# Hva kan man gjøre med en god lab?

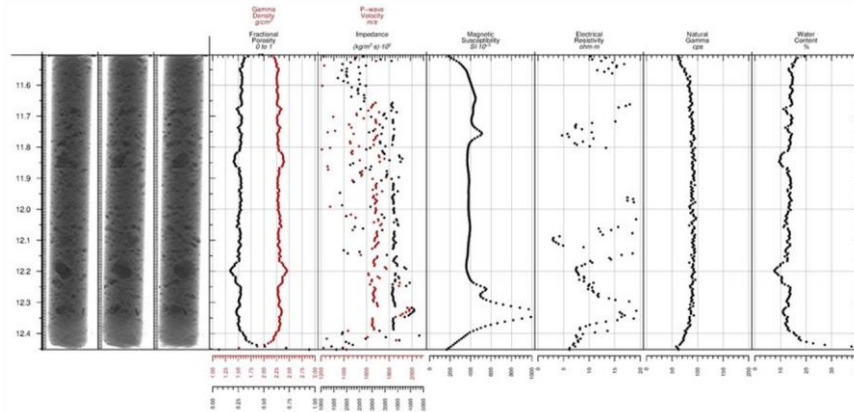
- ↗ Temperatur testing (-10° to 40° C)



# Multi Sensor Core Logger og X-ray



1 m



# Verksted: reperatur og spesialtilpassing av utstyr







#påsikkergrunn