

# Sammendrag

De fleste geotekniske vurderingene blir basert på laboratorieundersøkelser. En av den viktigste og mest vektlagte testen er treaksial test. De fleste norske laboratorier følger lik prinsipp for treaksialtesting, dog ikke alle faser i testen blir utført på en lik måte. Det er en allmenn enighet om at trykkøkning i treakscellen skal skje sakte, på en skånsom måte slik at prøven ikke skal forstyrres underveis. Det foreligger imidlertid ingen dokumentasjon som underbygger teorien om at prøven forstyrres og forsøkskvaliteten forringes dersom trykkøkning skjer raskt. Denne oppgaven er en praktisk undersøkelse av prøvens reaksjon på rask trykkøkning under treaksialtesten. All undersøkelsen gjelder kun leiremateriale.

For å få frem om prøven reagerer annerledes ved rask trykkøkning ble det foretatt en rekke parallelle forsøk ved hjelp av to treaksapparater. Testete prøver ble tatt ut fra samme borpunkt fra nærliggende dybder (dybdeforskjell- 10 cm). Begge prøvene ble utsatt for de samme spenningsforholdene der for den ene prøven ble det foretatt en sakte trykkøkning i samsvar med retningslinjer i SVV, den andre prøven ble utsatt for rask trykkøkning. Det ble utført rutineundersøkelser på hver av prøvene for de første 7 parallellene for å bevise at det ikke er store forskjeller på deres geotekniske egenskaper. Det ble deriblant bestemt tyngdetetthet, vanninnhold, korndensitet, plastisitetsindeks, kornfordeling på hver av prøvene. Etter avsluttet treakstesting ble det undersøkt fordeling av vanninnhold på bestemte deler av prøven for å finne ut om rask trykkøkning ville ha noe betydning for jevn utpressing av vann i konsolideringsfasen.

11 parallelle forsøk ble utført på 54mm-prøver og 8 på blokkprøver. For å sjekke om det blir forskjell på resultater ved lik testing av to antatt like prøver, ble det foretatt en kontrolltest når to blokkprøver ble testet etter dagens regler. Etter kontrolltesten ble det bestemt at små forskjeller på resultater er naturlige og skyldes forskjeller på materiale.

54 mm prøver er av lavest kvalitet. Men av økonomiske grunner blir de fleste geotekniske rapportene basert på testresultater for den typen prøver. Testingen for 54 mm prøver ble utført ved det mest aktuelle spenningsforholdet der  $K'_0 = 0,8 - 0,7$ , blokkprøver ble testet ved  $K'_0 = 0,6; 0,65; 0,7; 0,75; 0,8$ .

Resultater av hver parallell ble fremstilt som treaksplotter der det kom frem geotekniske parametere for hver prøve. Prøvekvaliteten ble vurdert ut fra utpresset porevann og endring i poretall etter avsluttet konsolideringsfase, skjærutviklingskurver ble vurdert.

Undersøkelsen viste at en av de viktigste geotekniske parametere som udrenert skjærfasthet, er lik eller nesten lik ved både rask og sakte trykkøkning for spenningsforholdene ved  $K'_0 = 0,8$  og ned til 0,65. Forsøkene utført på blokkprøver konsolidert raskt til spenningsnivå ved  $K'_0 = 0,6$  endte med lavere udrenert skjærfasthet i forhold til forsøkene utført etter dagens regler. Øvrige parametere som attraksjon og friksjonsvinkel viste seg upåvirket av raske trykkøkninger. Prøvekvaliteten ble tolket som den samme eller bedre ved rask trykkøkning i fleste tilfeller for testing av 54 mm-prøver. Når det gjaldt blokkprøver, så ble det registrert en ubetydelig forskjell på kvaliteten der raske tester demonstrerte noe dårligere kvalitet uten at kvalitetsklasse ble endret. Tiden for treaksialt forsøk med blokkprøver utført på en rask måte ble vesentlig redusert.

# Abstract

Most geotechnical assessments are based on laboratory tests. One of the most important and weighted tests is triaxial testing. The same principle for triaxial testing is used across almost Norwegian laboratories, however not all phases in the test are performed in the same way. There is universal agreement that pressure increase in the triaxial cell should occur slowly and in a gentle manner so that the sample is not disturbed along the way. However, there is no documentation that supports the claim that a quick pressure increase disturbs the sample or lessens the quality of the test. This thesis is a practical examination of the reaction of the sample to rapid pressure increase during the triaxial test.

Only clay material has been investigated. To find out if the sample reacts differently in the case of rapid pressure increase, several parallel tests were carried out using two triaxial instruments. Tested samples were taken from the same drill point from nearby depths (depth difference - 10 cm). Parallel samples were subjected to the same stress conditions where for one sample a slow pressure increase was applied as SVV uses according to current rules, the second sample was subjected to rapid pressure increase. Routine examinations were performed on each of the first 14 samples to check that there were no major differences in their geotechnical properties. This included specific gravity, water content, grain density, plasticity index, and grain distribution on each of the samples. Upon completion of the triaxial testing, the distribution of water content on specific parts of the sample was examined to determine whether rapid pressure increase would be of any significance to the distribution of the water content in the sample.

11 parallel experiments were performed on 54mm samples and 8 parallel experiments were performed on block samples. In order to check if there are differences in the results of equal testing of two assumed equal samples, a control test was performed when two block samples were tested according to current rules. After the control test, it was determined that small differences in results are natural and are due to differences in material.

Although 54 mm samples are of the lowest quality, most geotechnical reports are based on test results for that type of sample for economic reasons. The test was performed at the most commonly used stress ratio where  $K_0' = 0.8-0.7$ . The block samples was performed at stress ratio where  $K_0' = 0,6; 0,65; 0,7; 0,75; 0,8$ .

Results of each parallel are presented as graphical plots showing geotechnical parameters for each sample. The sample quality was assessed based on extruded pore water and change in pore numbers after the completion of the consolidation phase.

The study showed that the most important geotechnical parameters, such as shear strength, are equal or nearly equal in both rapid and slow pressure increase for the stress ratio where  $K_0' = 0,8$  and down to 0,65. Geotechnical parameters such as attraction  $a$  and friction angle  $\phi$  are approximately the same in both fast and slow pressure increase. It turns out that the sample quality becomes the same or better by rapid pressure increase in most cases for tests on 54 mm samples. When it came to block samples, a negligible difference in quality was recorded, where rapid tests demonstrated somewhat poorer quality without quality class being changed. The triaxial test for rapid testing of block samples was significantly reduced.

# Forord

Masteroppgaven ble skrevet som resultat av erfaringsbasert masterprogram innen vei, med retning geoteknikk. Jeg har jobbet på laboratoriet i over 9 år, så oppgaven basert på laboratorieforsøk var godt lagt til rette i forhold til mine daglige arbeidsoppgaver.

Det temaet jeg valgte har interessert meg i flere år, dermed var det spennende å få muligheten til å forske og få aldeles interessante resultater.

Jeg vil rette min store takk til min veileder ved Statens vegvesen, Sigurdur Valsson, som var kjempeengasjert i både å skaffe prøver til oppgaven og finne løsninger på praktiske utfordringer. Jeg kunne henvende meg til ham med alle mulige spørsmål og fikk alltid et begrunnet svar. Må også takke seksjonslederen for Lab-og veiteknologi, Wenche Hovin, som viste forståelse over rimelig stor timebruk og bidro med alt jeg kunne ha behov for.

Takker Arnfinn Emdal for en god veiledning gjennom hele arbeidet.

God lesning!



# Innhold

Figurer .....	xi
Tabeller .....	xiv
Forkortelser/symboler .....	xv
1. Innledning.....	1
2. Teori og metode.....	2
2.1. Udrenert aktiv skjærfasthet $CuA$ .....	2
2.2. Treksial test.....	3
2.2.1. Utstyr .....	4
2.2.2. Utførelse .....	7
2.2.2.1. Preparering av uforstyrrede prøver.....	7
2.2.2.2. Klargjøring av forsøksbetingelser .....	7
2.2.2.3. Konsolideringsfase .....	7
2.2.2.4. Metningsfase .....	15
2.2.2.5. B-test.....	17
2.2.2.6. Skjærforsøk .....	18
3. Resultat .....	22
3.1. 54 mm prøver.....	22
3.1.1. Resultater for Fv717 Sund-Bradden. Parallell RK6. Hviletrykkskoeffisient $K_0'=0,7$ 25	
3.1.2. Resultater for Fv717 Sund-Bradden. Parallell BH19_4. Hviletrykkskoeffisient $K_0'=0,73$ .....	28
3.1.3. Resultater for Fv717 Sund-Bradden. Parallell BH20_11. Hviletrykkskoeffisient $K_0'=0,8$ .....	31
3.1.4. Resultater for Fv717 Sund-Bradden. Parallell BH20_10. Hviletrykkskoeffisient $K_0'=0,8$ .....	34
3.1.5. Resultater for Fv717 Sund-Bradden. Parallell BH15_1. Hviletrykkskoeffisient $K_0'=0,8$ 37	
3.1.6. Resultater for Fv717 Sund-Bradden. Parallell BH15_2. Hviletrykkskoeffisient $K_0'=0,75$ .....	40
3.1.7. Resultater for Fv715 Osen. Parallell BH2207. Hviletrykkskoeffisient $K_0'=0,8$ 43	
3.2. Feilkilder. ....	46
3.3. Testing av 54 mm prøver utført på 8 identiske treksapparater. ....	49
3.3.1. Resultater for Fv721 Mebustad. Parallell 1_3. Hviletrykkskoeffisient $K_0'=0,8$ 50	
3.3.2. Resultater for Fv721 Mebustad.Parallell 1_2. Hviletrykkskoeffisient $K_0'=0,8$ 52	

3.3.3.	Resultater for Fv715 Tverdalselvbua. Parallell 1_9. Hviletrykkskoeffisient $K_0'=0,8$	54
3.3.4.	Resultater for Fv715 Tverdalselvbua. Parallell 3_3. Hviletrykkskoeffisient $K_0'=0,8$	56
3.4.	Konsolideringstid for 54 mm-prøver.....	58
	Testing av blokkprøver utført på to identiske treaksapparater. ....	59
3.5.	Resultater for Flotten, parallell 1. Hviletrykkskoeffisient $K_0'=0,8$ .....	61
3.6.	Resultater for Flotten, parallell 2. Hviletrykkskoeffisient $K_0'=0,7$ .....	63
3.7.	Resultater for Flotten, parallell 3. Hviletrykkskoeffisient $K_0'=0,75$ .....	65
3.8.	Resultater for Flotten, parallell 4. Hviletrykkskoeffisient $K_0'=0,65$ .....	67
3.9.	Resultater for Flotten. Parallell 5. Hviletrykkskoeffisient $K_0'=0,6$ .....	69
3.10.	Resultater for Flotten. Parallell 6. Hviletrykkskoeffisient $K_0'=0,6$ .....	72
3.11.	Resultater for Flotten. Parallell 7,8. Hviletrykkskoeffisient $K_0'=0,6$ .....	75
3.12.	Resultater for Flotten. Vurdering av mulighet til å få to identiske bruddlinjer ved testing på like betingelser. Hviletrykkskoeffisient $K_0'=0,6$ .....	78
4.	Oppsummering og konklusjon.....	80
	Referanser .....	83
	Vedlegg.....	84

# Figurer

Figur 1.En typisk design CuA-profil. Designlinje er basert på treaksresultatene (NIFS,2014) .....	2
Figur 2 Prøve etter avsluttet aktivt udrenert forsøk .....	3
Figur 3 Prinsippskisse av treakscelle (SVV, 2015, s.159) .....	4
Figur 4 Treakscelle. Innebygd prøve .....	4
Figur 5 Datastyrt pumpe med innebygd sensor for styring av celletrykk. Pilen viser retning for pumpebevegelse ved trykkøkning i cellen. ....	5
Figur 6 Pumpe for registrering av prøvens volumendring ut fra utpresset porevann. Pilen viser retningen for pumpebevegelse i konsolideringsfasen .....	5
Figur 7 Ramma med innebygd trinnmotor og bevegelsessensor .....	5
Figur 8 Målinger på det aktuelle tidspunktet.....	6
Figur 9 Innstillinger av kriterier for avslutning av konsolidering .....	6
Figur 10 Eksempel på beregning av effektiv vertikal spenning der poretrykker er hydrostatisk (SVV, 2015, s. 160).....	8
Figur 11 Erfaringsdata for $K_0'$ (T.Lunne, P.K.Robertson&J.J.M.Powell, 1946, s.57) .....	9
Figur 12 Prinsippskisse for isotrop konsolideringsfase (NTNU,2016, s.162) .....	10
Figur 13 Utførelsesrapport med sakte økning av konsolideringsspenninger.....	11
Figur 14. Utførelsesrapport med rask økning av konsolideringsspenninger .....	12
Figur 15 Eksempel på utpresset porevann mot kvadratrot av tid under konsolideringsfasen (SVV, 2015, s.161). ....	14
Figur 16 Eksempel på en konsolideringskurve. ....	15
Figur 17 Metningskurve ved rask trykkøkning, her 50 kPa/min.....	16
Figur 18 Metningskurve ved sakte trykkøkning, her 2 kPa/min .....	17
Figur 19 B-test. (SVV, 2015, s.161). ....	17
Figur 20 Prinsipp for treakstesting i udrenert isotrop tilstand. (Emdal A., 2017, s.162)..	18
Figur 21 Prinsipp for valg av hovedtype treaksialforsøk. (SVV, 2015, s.162). ....	18
Figur 22 Eksempel på framstilling av resultater av treaksforsøk (resultater er fått etter praktiske forsøk i forbindelse med oppgaven). ....	20
Figur 23 Eksempel på effekt av prøveforstyrrelse, CAUc forsøk fra Onsøy (NGF, 2013)..	21
Figur 24. Oppdeling av prøven .....	23
Figur 25 Oppdeling av prøven for undersøkelse av vanninnhold i bestemte prøvedeler. .	24
Figur 26 Resultater av treaksforsøk for parallell RK6, Fv717 Sund-Bradden.....	25
Figur 27 Fordeling av vanninnhold i prøvene etter avsluttet forsøk for parallell RK6, Fv717 Sund-Bradden .....	26
Figur 28 Forløp av konsolideringsfasen for parallell RK6, Fv 717 Sund-Bradden, $K_0'=0,7$ .....	27
Figur 29 Resultater av treaksforsøk for parallell BH19_4, Fv717 Sund-Bradden .....	28
Figur 30 Fordeling av vanninnhold etter avsluttet forsøk for parallell BH19_4, Fv717 Sund-Bradden .....	29
Figur 31 Forløp av konsolideringsfasen for parallell BH19_4, Fv 717 Sund-Bradden, $K_0'=0,73$ .....	30
Figur 32 Resultater av treaksforsøk for parallell BH20_11, Fv717 Sund-Bradden .....	31
Figur 33 Fordeling av vanninnhold etter avsluttet forsøk for parallell BH20_11, Fv717 Sund-Bradden.....	32
Figur 34 Forløp av konsolideringsfasen for parallell BH20_11, Fv 717 Sund-Bradden, $K_0'=0,8$ .....	33
Figur 35 Resultater av treaksforsøk for parallell BH20_10, Fv717 Sund-Bradden .....	34

Figur 36 Fordeling av vanninnhold etter avsluttet forsøk for parallell BH20_10, Fv717 Sund-Bradden.....	35
Figur 37 Forløp av konsolideringsfasen for parallell BH20_10, Fv 717 Sund-Bradden, $K_0'=0,8$ .....	36
Figur 38 Resultater av treksforsøk for parallell BH15_1, Fv717 Sund-Bradden .....	37
Figur 39 Fordeling av vanninnhold etter avsluttet forsøk for parallell BH15_1, Fv717 Sund-Bradden.....	38
Figur 40 Forløp av konsolideringsfasen for parallell BH15_1, Fv 717 Sund-Bradden, $K_0'=0,8$ .....	39
Figur 41 Resultater av treksforsøk for parallell BH15_2, Fv717 Sund-Bradden .....	40
Figur 42 Fordeling av vanninnhold etter avsluttet forsøk for parallell BH15_2, Fv717 Sund-Bradden.....	41
Figur 43 Forløp av konsolideringsfasen for parallell BH15_2, Fv 717 Sund-Bradden, $K_0'=0,75$ .....	42
Figur 44 Resultater av treksforsøk for parallell BH2207, Fv715 Osen .....	43
Figur 45 Fordeling av vanninnhold etter avsluttet forsøk for parallell BH2207, Fv715 Osen .....	44
Figur 46 Forløp av konsolideringsfasen for parallell BH2207, Fv 715 Osen, $K_0'=0,8$ .....	45
Figur 47 B-sjekk-fase i den raske og sakte testen .....	47
Figur 48 B-test, parallell BH20_10 .....	48
Figur 49 Resultater av parallell 1_3, Fv721 Mebustad.....	50
Figur 50 Forløp av konsolideringsfasen for parallell 1_3, Fv 721 Mebustad, $K_0'=0,8$ .....	51
Figur 51. Resultater av parallell 1_2, Fv721 Mebustad.....	52
Figur 52 Forløp av konsolideringsfasen for parallell 1_2, Fv 721 Mebustad, $K_0'=0,8$ .....	53
Figur 53. Resultater av parallell 1_9, Fv715 Tverdalselvbua .....	54
Figur 54 Forløp av konsolideringsfasen for parallell 1_9, Fv 715Tverdalselvbua, $K_0'=0,8$ .....	55
Figur 55. Resultater av parallell 3_3, Fv715 Tverdalselvbua .....	56
Figur 56 Forløp av konsolideringsfasen for parallell 3_3, Fv 715Tverdalselvbua, $K_0'=0,8$ .....	57
Figur 57 Preparering av blokkprøve .....	59
Figur 58 Resultater av trekstest for parallell 1 av blokkprøver .....	61
Figur 59 Forløp av konsolideringsfasen for blokkprøve for sakte og raskt forsøk ved $K_0'=0,8$ .....	62
Figur 60 Resultater av trekstest for parallell 2 av blokkprøver, $K_0'=0,7$ .....	63
Figur 61 Forløp av konsolideringsfasen for blokkprøve for sakte og raskt forsøk ved $K_0'=0,7$ .....	64
Figur 62 Resultater av trekstest for parallell 3 av blokkprøver, $K_0'=0,75$ .....	65
Figur 63 Forløp av konsolideringsfasen for blokkprøve for sakte og raskt forsøk ved $K_0'=0,75$ .....	66
Figur 64 Resultater av trekstest for parallell 3 av blokkprøver, $K_0'=0,65$ .....	67
Figur 65 Forløp av konsolideringsfasen for blokkprøve i parallell 4, sakte og raskt forsøk ved $K_0'=0,65$ .....	68
Figur 66 Resultater av trekstest for parallell 5 av blokkprøver, $K_0'=0,6$ .....	69
Figur 67 Siltlag i prøven preparert for rask test .....	70
Figur 68 Prøver oppdelt etter rask og sakte test. ....	70
Figur 69 Forløp av konsolideringsfasen for blokkprøve i parallell 5, sakte og raskt forsøk ved $K_0'=0,6$ .....	71
Figur 70 Resultater av trekstest for parallell 6 av blokkprøver, $K_0'=0,6$ .....	72
Figur 71 Bilde av prøver etter rask (a) og sakte (b) test .....	73



Figur 72 Bilder av prøver i parallellen etter oppdeling, (a)-etter rask test, (b)-etter sakte test.....	73
Figur 73 Forløp av konsolideringsfasen for blokkprøve i parallell 5, sakte og raskt forsøk ved $K_0'=0,6$ .....	74
Figur 74 Resultater av treakstest for parallell 7,8 av blokkprøver, $K_0'=0,6$ .....	75
Figur 75 Bilder av prøver etter rask (a) og sakte (b) test i parallell 7 .....	76
Figur 76 Bilder av prøver i parallell 7 etter oppdeling, (a)-etter rask test, (b)-etter sakte test.....	76
Figur 77 Bilder av prøve etter rask test (c) i parallell 8 .....	77
Figur 78 Forløp av konsolideringsfasen for blokkprøve i parallell 7,8, sakte og raskt forsøk ved $K_0'=0,6$ .....	77
Figur 79 Resultater av treakstest for kontrollparallell av blokkprøver, $K_0'=0,6$ .....	78
Figur 80 Forløp av konsolideringsfasen for blokkprøve, kontrollparallell ved $K_0'=0,6$ .....	79

# Tabeller

Tabell 1 Oversikt over hastigheter for økning av konsolideringsspenninger brukt i norske laboratorier (retningslinjer er oppgitt av fagansvarlige laboranter i Trondheim). .....	11
Tabell 2 Klassifisering av prøve kvalitet etter volumtøyning (SVV, 2015, s.163) .....	13
Tabell 3 Klassifisering av prøve kvalitet etter pore tallforhold (T. Lunne, 1997). .....	13
Tabell 4 Oversikt over hastigheter for trykkøkning i metningsfasen brukt i norske laboratorier (Informasjonen ble oppgitt av fagansvarlige laboranter i Trondheim og Molde/Norconsult). .....	16
Tabell 5 Typer skjærbelastning. (SVV, 2015, s.162).....	18
Tabell 6 Beregninger for tre aksialt aktivt skjærforsøk.....	19
Tabell 7 Prøvedata for 54 mm prøver .....	22
Tabell 8 Forsøksoppsett for 54 mm prøver .....	23
Tabell 9 B-verdi og analyse av kurvens forløp for alle parallellene.....	46
Tabell 10 Prøvedata for 54 mm prøver testet ved hjelp av like tre aksapparatet .....	49
Tabell 11 Oversikt over konsolideringstid for 54 mm-prøver.....	58
Tabell 12 Samlet resultater av tre aksforsøk for alle parallellene.....	80

# Forkortelser/symboler

NIFS	Naturfare -Infrastruktur-Flom-Skred
NTNU	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
NGF	Norsk geoteknisk forening
SVV	Statens vegvesen
SHANSEP	Stress History and Normalized Soil Engineering Properties
$I_p$	Plastisitetsindeks
$S_r$	Skjærfasthet i omrørt stand
CAUc	Udrenert treaksial test med anisotropisk konsolidering
CPTU	Cone penetration or cone penetrometer test
NC	Normal konsolidert
OC	Overkonsolidert
OCR	Overkonsolideringsgrad
$C_{uA}$	Udrenert aktiv skjærfasthet
$C_u, S_u$	Skjærfasthet udrenert
$\varphi$	Friksjonsvinkel
$a$	Attraksjon
$u$	Poretrykk
$\sigma$	Total spenning
$\sigma'_v, \sigma'_a$	Effektiv aksial/radial spenning

$\sigma'_h, \sigma'_r$	Effektiv horisontal/radial spenning
$\sigma_{cell}$	Radiell spenning i treakscelle
$p'_c$	Prekonsolideringsspenning
$K'_0$	Hviletrykkskoeffisient
$q$	Deviatorspenning
$p'$	Middelspenning
$\tau$	Skjærspenning
$\tau_{maks}$	Maksimal skjærspenning
$\delta$	Deformasjon
$\epsilon_a$	Aksiell tøyning
$\epsilon_{af}$	Aksiell tøyning ved brudd
$\epsilon_{vol}$	Volumetrisk tøyning
$V_0$	Initial volum
$\Delta V$	Volumendring
$H_0$	Initial høyde
$A_0$	Initial areal
$A_s$	Korrigert areal
$D$	Dilatant parameter



# 1. Innledning

Denne oppgaven handler om forskning på hvorvidt en leireprøve reagerer på raskere trykkøkning i treaksforsøket i forhold til dagens regler.

Det hersker enighet i det geotekniske fagmiljøet om at rask trykkøkning vil forårsake prøvers forstyrrelser som vil føre til feil resultater og dårligere forsøkskvalitet.

For å kunne underbygge eller avkrefte denne teorien ble det først utført 11 parallelle treaksforsøk for prøver tatt ut med 54 mm stålsylindere og deretter 8 parallelle forsøk med blokkprøver, der den ene prøven i parallellen ble testet i samsvar med dagens regler mens den andre ble utsatt for raskere trykkøkning i to viktige faser i treaksforsøket.

54 mm prøver er kjent med lavest kvalitet, men siden laboratorieundersøkelser av disse blir lagt til grunn i de fleste geotekniske rapportene, var det hensiktsmessig å se på resultater av testingen for denne prøvekategori. Testingen av prøvene med best kvalitet, blokkprøver, ble det lagt spesiell vekt på i denne oppgaven.

De første 7 forsøkene ble først utført på to treaksapparater av ulike utgaver. For å dokumentere at eventuelle forskjeller på materialegenskapene til prøver i en parallell ikke påvirket resultater ble det tatt rutineundersøkelser på hver prøve. Treaksial testene ble utført med mest brukte spenningsforhold der  $K_0$  er lik 0,7-0,8.

Det ene treaksapparatet av eldre utgave ble brukt for tester etter dagens regler. Disse ble kalt i oppgaven for «sakte» tester. Det ble registrert at de fleste forsøkene utført på det instrumentet, skilte seg ut med lavere poretrykk i skjærfasen som hadde betydning for forløpet av spenningsstier. Det gjorde direkte sammenligning av resultater til en utfordrende oppgave.

For å se om tekniske forskjeller på treaksapparater ville ha noe betydning for testing av hver enkel parallell, ble det utført 4 parallelle tester på to helt identiske treaksapparater for prøver tatt med 54 mm stålsylindere og 8 parallelle tester for blokkprøver. Siden ingen av parallellene endte med helt identiske resultater, oppsto det behov for å dokumentere at helt identiske resultater er usannsynlig å få, også ved testing av antatt like prøver ved like betingelser. For dette formålet ble det testet en parallell der to forsøk ble utført etter dagens regler, «sakte».

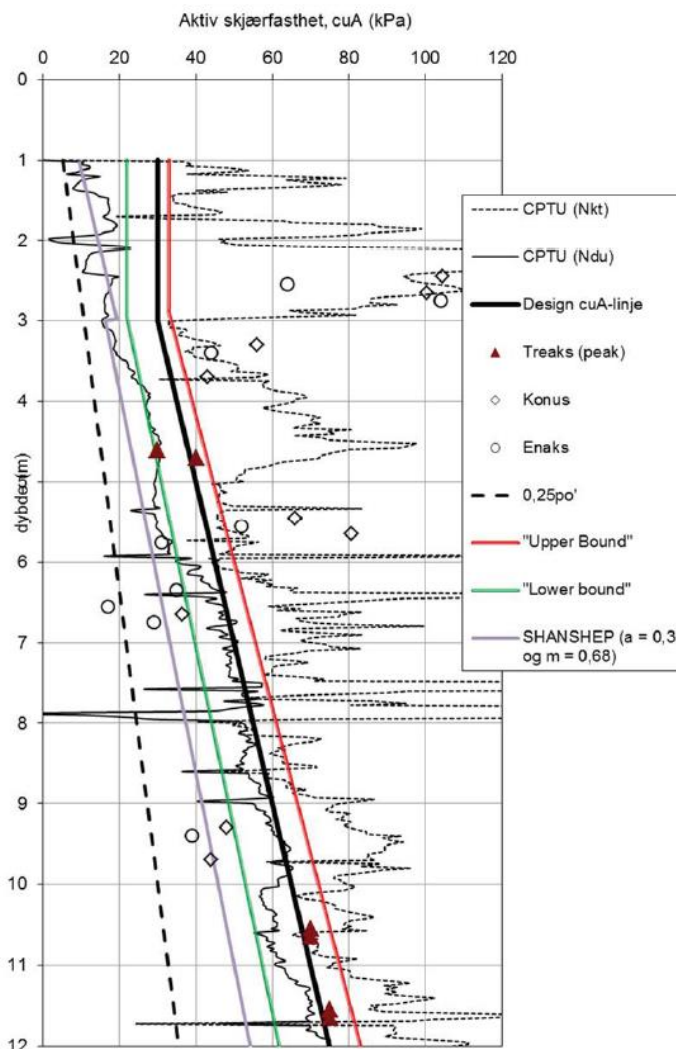
Denne oppgaven ble innledet med en teoretisk innføring som omfatter metoder og prosesser knyttet til treaksforsøk. Deretter resultater av utførte forsøk ble presentert og omdiskutert. Konklusjoner knyttet til hvert resultat følger delvis med ved hver presentasjon av resultater. Oppsummering og endelig konklusjon er presentert i eget kapittel.

## 2. Teori og metode

### 2.1. Udrenert aktiv skjærfasthet $C_{uA}$

Udrenert aktiv skjærfasthet  $C_{uA}$  er en meget viktig geoteknisk parameter som brukes som grunnlag for beregning av sikkerhetsfaktorer i stabilitetsanalyser. Riktig valg av denne parameteren har en stor økonomisk betydning for de fleste byggeprosjektene.

Ved å bestemme  $C_{uA}$  i hvert borpunkt ved forskjellige dybder får man et såkalt  $C_{uA}$ -profil. Det finnes en rekke metoder for bestemmelse av  $C_{uA}$  basert på empirisk metode, felt-og laboratorieundersøkelser, vurderinger av tidligere data. En typisk design  $C_{uA}$ -profil er vist i **Figur 1**.



Figur 1. En typisk design  $C_{uA}$ -profil. Designlinje er basert på treaksresultatene (NIFS, 2014)

Ifølge NIFS-rapporten skal design av  $C_{uA}$ -profilet forholde seg til en bestemt rangering (NIFS,2014). Alle metoder blir etter denne rangeringen delt i grupper etter prioriteringsklasse:

1. Treksforsøk av god kvalitet (kvalitetsklasse 1)
2. CPTU (Anvendelsesklasse 1)
3. Erfaringsverdier ( $\frac{C_{uA}}{P_0}$ , SHANSEP)
4. Konus/Enaks/Vingebor

Denne oppgaven skal omhandle kun treksforsøk som den viktigste metoden for design av  $C_{uA}$ -profilet.

## 2.2. Treksial test

Treksforsøk er en laboratorietest som bestemmer materialets styrkeparametere. De viktigste parametere er udrenert skjærfasthet  $C_u$ , friksjonsvinkel  $\phi$ , og attraksjon  $a$ . Disse blir benyttet i beregninger for stabilitetsanalyser.

En prøvebit bygges inn i en trekscelle som fylles med vann. Prøven holdes adskilt fra vannet med en tynn gummimembran. Under forsøket styres celletrykk, aksialt trykk, baktrykk, samtidig som aksial deformasjon og poretrykksutviklingen blir registrert. Prøven konsolideres til et bestemt spenningsnivå den har i bakken som kalles for in-situ spenningstilstand, eller til en spenningstilstand som er aktuell for en bestemt problemstilling. Volumet av porevannet som blir presset ut av prøven under konsolideringen registreres.

Det finnes aktive og passive forsøk ut fra måten en prøve føres til brudd på, samt at forsøkene kan være drenerte og udrenerte. Ved drenerte forsøk vil porevannledningen være åpent og stengt for udrenert. I fleste tilfeller hvor det benyttes aktive forsøk påføres det vertikalt last ved konstant celletrykk inntil prøven kommer til brudd. Et typisk eksempel på en prøve ført til brudd ved aktiv udrenert treksial test er vist i **Figur 2**



Figur 2 Prøve etter avsluttet aktivt udrenert forsøk



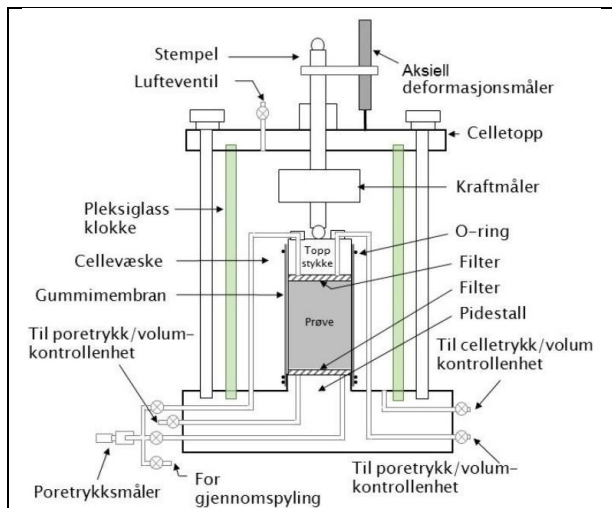
Ved fleste passive forsøk avlastes prøve i vertikal retning under konstant celletrykk. I denne oppgaven vil kun aktivt udrenert trykkforsøk tas i betraktning.

En vanlig prøvebit er 54 mm i diameter og 100 mm i høyden. De fleste laboratoriene i Norge bruker såkalte 54mm-prøver som er rimeligst i forhold til prøveuttak. Disse prøvene tas ut med stålsylindere og er av lavest kvalitet. En blokkprøve eller prøve tatt ut med 76mm stålsylinder anses som prøver med høy kvalitet. Disse skal prepareres-trimmes til diameter 54 mm før testing for å fjerne de mest forstyrrede ytre delene av prøven.

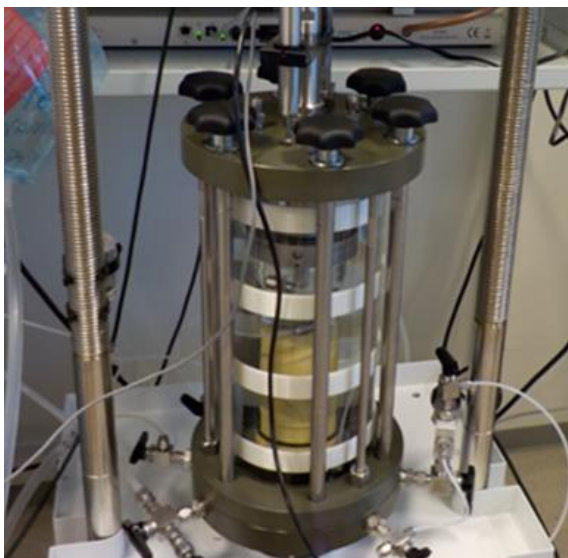
### 2.2.1. Utstyr

Utstyret som ble brukt i oppgaven er en avansert datastyrt maskin der alle operasjonene knyttet til testene ble planlagt før oppstart av forsøkene og utført automatisk uten behov for en operatør.

Prinsippskisse for treakscelle er vist i **Figur 3**. En jordprøve bygges inn mellom pidestallen og toppstykke. Cellen fylles med vann. Prøven er omsluttet med en tynn gummimembran og har filtre (papir og stein) på den ovre og den nedre overflaten. En innebygd prøve er vist i **Figur 4**.



Figur 3 Prinsippskisse av treakscelle (SVV, 2015, s.159)



Figur 4 Treakscelle. Innebygd prøve

Filtrene må være mettet med vann. Alle elementene som inngår i poretrykksystemet, dvs slanger, ventiler, luftfanger skal være luftfrie. Eventuelle luftbobler fjernes ved hjelp av gjennomspyling. (SVV, 2015, s.159). En datastyrt pumpe med innebygd sensor sørger for styring og måling av celletrykket, se **Figur 5**. Pumpen er fylt med vann som presses gjennom slangen inn i cellen for økning av celletrykket. Slangen er omtrent 10 mm i innvendig diameter. Pumpen går i den motsatte retningen enn det er vist i figuren, dersom trykket i cellen skal senkes.



*Figur 5 Datastyrt pumpe med innebygd sensor for styring av celletrykk. Pilen viser retning for pumpebevegelse ved trykkøkning i cellen.*

En lignende pumpe med innebygd sensor brukes for registrering av prøvens volumendring ut fra utpresset porevann, denne er vist i **Figur 6**. Drenering av porevann skjer gjennom filtrene og slangen som er koblet til måleren i pumpen. Slangen er omtrent 5 med mer i innvendig diameter. Under konsolideringsfasen tar pumpen imot utpresset porevann og går i retningen som er vist i figuren. Den går i den motsatte retningen når baktrykket skal økes.



*Figur 6 Pumpe for registrering av prøvens volumendring ut fra utpresset porevann. Pilen viser retningen for pumpebevegelse i konsolideringsfasen*

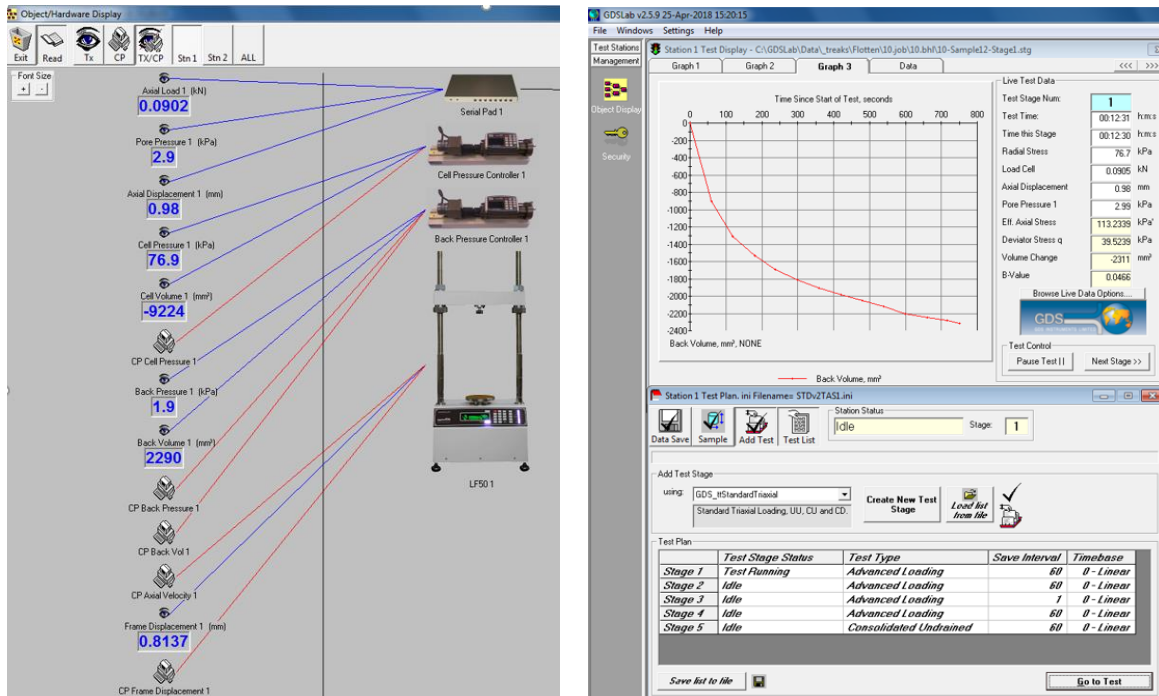
Under pidestallen befinner seg en ramme med innebygd trinnmotor som sørger for vertikal bevegelse av prøven opp mot toppstykke, **Figur 7**. Denne vertikale bevegelsen blir registrert og målt av innebygd bevegelsessensor.



*Figur 7 Ramme med innebygd trinnmotor og bevegelsessensor*

Kraftmåler registrerer påført belastning, deformasjonsmåler oppå cellen registrerer aksial deformasjon. Poretrykket i prøven måles av poretrykksmåleren.

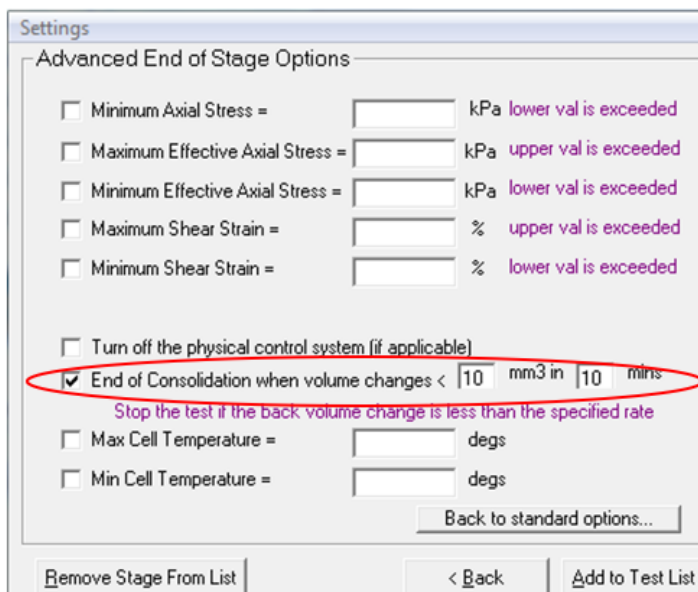
Alle målingene på det aktuelle tidspunktet vises på PC- skjermen, **Figur 8**. Dette lar operatøren ha kontroll over prosessene under forsøket.



Figur 8 Målinger på det aktuelle tidspunktet

Styring av testen skjer automatisk ut fra innstillingene gjort av en operatør. **Figur 9** viser innstillinger av kriterier for avslutning av konsolideringsfasen.

Her må konsolideringen avsluttes når volumet av utpresset porevann holder seg under 10 mm<sup>3</sup> innen 10 minutters tidsintervall.



Figur 9 Innstillinger av kriterier for avslutning av konsolidering

Resultater av testen plottes ved hjelp av Excel ark.

## 2.2.2.Utførelse

Utførelse av treaksforsøket skal være i samsvar med standard NS-EN ISO 17892-9:2018. De fleste norske laboratorier, blant dem er alle laboratorier i Statens vegvesen, Multiconsult og Rambøll, utfører treaksforsøk i 5 trinn:

1. Preparering av prøven, innbygging og klargjøring av forsøksbetingelser.
2. Konsolideringsfasen
3. Metningsfasen
4. B-sjekk
5. Skjærfasen

### 2.2.2.1. Preparering av uforstyrrede prøver.

En uforstyrret prøve fra 54 mm sylindren kan tas direkte fra sylindren. Normalt har en ferdiginnbygget prøve diameter på 54 mm og prøvehøyde 100 mm (Sandven R., 2014, s.19).

Minimal diameter for en trimmet prøve er 34 mm, forholdet mellom prøvehøyde  $h$  og diameter  $\emptyset$  bør være mellom 1,8-2,5 (NS-EN ISO 17892-9, 2018, s.10).

Bløkkprøver og prøver fra 76 mm sylindere trimmes ned til 54 mm.

For å unngå uttørking, bør prøve testes snarest mulig eller lagres i en vannfylt eksikator. (SVV, 2015, s.159)

### 2.2.2.2. Klargjøring av forsøksbetingelser

Prøven bygges inn med papirfiltre og mettede i ultralydbad steinfiltre og omsluttet med gummihud. Cellen fylles med vann. Alle elementene som inngår i poretrykksystemet spyles med luftfritt vann for å fjerne eventuelle luftbobler. Gummihuden skal kontrolleres på forhånd for skader. Den skal ligge i vann i minst 24 timer før bruk. (SVV, 2015, s.159)

### 2.2.2.3. Konsolideringsfase

Prinsippet for konsolideringsfasen er godt beskrevet i datarapport av Institutt for geoteknikk og fundamenteringslære, 1965:

Påfører man en mett leiravsetning en tilleggsbelastning, medfører dette at et poreovertrykk oppstår i de områder av leiren som påvirkes av tilleggsbelastningen. Det vil dermed oppstå potensialforskjeller i porevannet i disse områdene.

Dermed oppstår den hydrodynamiske strømningsprosess som kalles konsolidering; det vil si en porevannstrømning ut av det belastede område. Etter hvert jevnes poretrykket ut og tilleggsbelastningen overføres gradvis til korskjelettet. (s.1)

For å oppnå troverdige resultater etter treaksforsøk, skal prøven settes under en stabil spenningstilstand som er så nær in situ spenningstilstand som mulig. I enkelte tilfeller er det ønskelig å skape spenningstilstand som avviker fra in-situ. Dette kan være aktuelt for visse byggeprosjekter, men vil ikke omtales i denne oppgaven.

Under denne spenningstilstanden skal prøven holdes konstant inntil poretrykket blir utjevnet, med andre ord konsolideres.

Beregninger av konsolideringsspenninger er basert på data om dybde  $z$ , poretrykk  $u_0$  for den aktuelle dybden, total vertikal spenning  $\sigma$  over den aktuelle dybden og

overkonsolideringsgraden (OCR) som man får fra erfaringsdata eller utført ødometerforsøk.

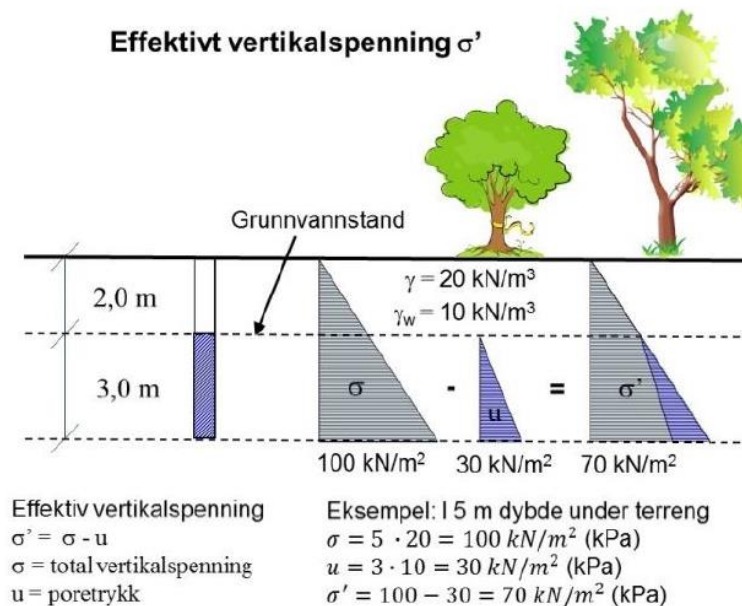
**Figur 10** illustrerer hvordan man beregner effektive vertikale spenninger hvis poretrykket  $u_0$  er hydrostatisk. Om poretrykket ikke er hydrostatisk, bruker man målte verdier for poretrykket.

Formelen for total spenning over den aktuelle dybden der  $\gamma$  er tyngdetetthet for laget over prøven:

$$\sigma = \gamma * z \quad (2.1)$$

Formelen for effektiv vertikal spenning der poretrykket er antatt hydrostatisk eller målt:

$$\sigma'_v = \sigma'_0 = \sigma - u_0 \quad (2.2)$$



*Figur 10 Eksempel på beregning av effektiv vertikal spenning der poretrykker er hydrostatisk (SVV, 2015, s. 160)*

Hvis poretrykket er kjent eller målt, har man normalt en korrekt  $\sigma'_0$ .

Prekonsolideringstrykk  $p'_c$  som man får vanligvis etter utført ødometerforsøk, blir med på beregning av OCR og deretter hviletrykkskoeffisienten  $K'_0$  som står for korrekt spenningsforhold.

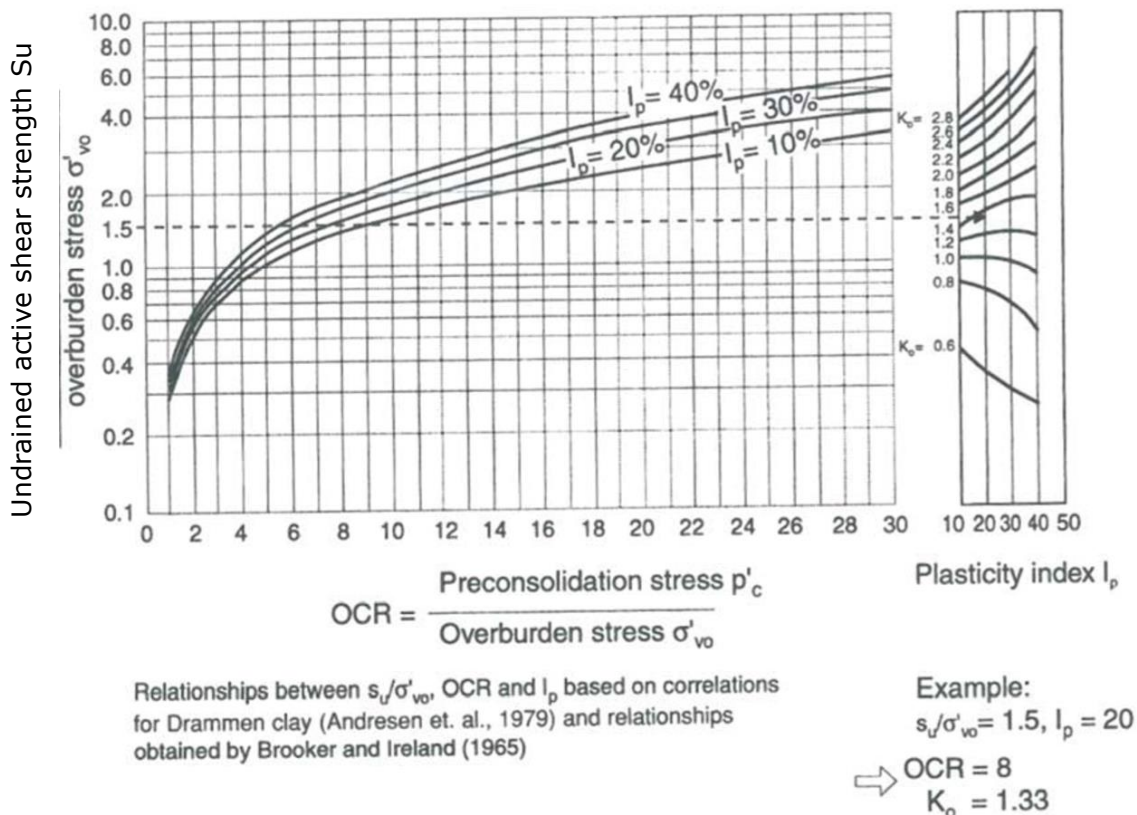
$$OCR = p'_c / \sigma'_0 \quad (2.3)$$

$$K'_0 = (1 - \sin\phi) * \sqrt{OCR} \quad (2.4)$$

Formel 2.4 skal ikke brukes for svært høye verdier av OCR (NIFS,2014).

$K'_0$  kan normalt variere mellom 1 (OC-materiale) ned mot 0,4 -0,5. Man må være oppmerksom på at bruk av altfor lave verdier for  $K'_0$  (som man ofte velger for skrånende

terreng), kan føre til brudd i konsolideringsfasen før skjærforsøket starter. Tillatte verdier for  $K'_0$  kan bestemmes ut fra erfaringsgrunnlag fra parametere som plastisitetsindeks  $I_p$  og OCR-grad (NIFS, 2014). **Figur 11** illustrerer et slikt erfaringsgrunnlag ut fra kanadiske data.



Figur 11 Erfaringsdata for  $K'_0$  (T.Lunne, P.K.Robertson&J.J.M.Powell, 1997, s.57)

Ved konsolidering til in situ spenninger, skal en være forsiktig ved valg av  $K'_0$  for at spenningene i forsøket best mulig gjenspeiler den aktuelle spennings situasjonen.

Når man har beregnet effektiv vertikal spenning  $\sigma'_v$  og bestemt  $K'_0$ , kan man beregne effektiv horisontal spenning  $\sigma'_h$ :

$$\sigma'_h = K'_0 * \sigma'_v \quad (2.5)$$

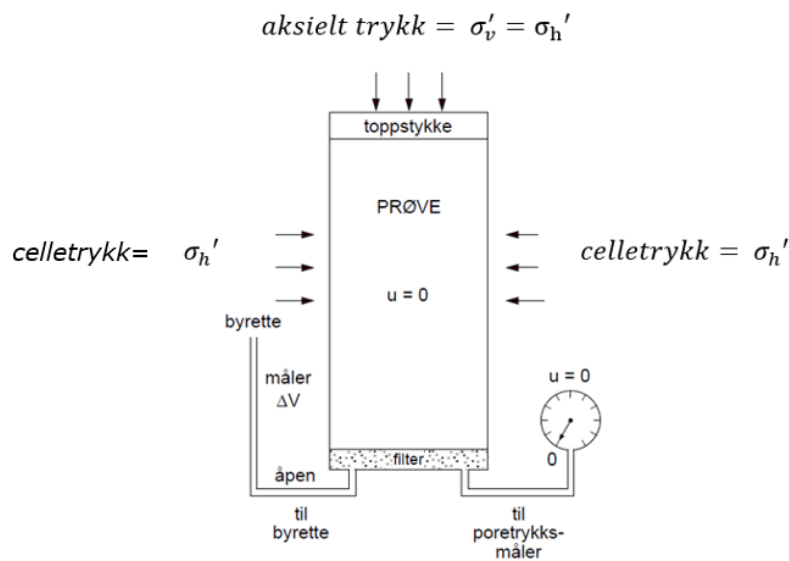
Istedenfor aksiell vertikal spenning brukes det oftest begrep deviator spenning når det gjelder treksforsøk. I anisotrop aktivt treksialt forsøk vil deviator spenning være lik differansen mellom vertikal og horisontal spenning:

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma'_v - \sigma'_h = \sigma'_a - \sigma'_r \quad (2.6)$$

Dersom vertikal spenning  $\sigma'_v$  er lik horisontal spenning  $\sigma'_h$ , blir spenningsforholdet isotrop, og konsolideringsfasen utføres slik at aksial trykk og celletrykk blir like. I dette tilfelle  $K'_0 = 1$ .

Om effektivspenningstilstanden i bakken er anisotrop, kan man etterligne dette ved å øke aksielt trykk tilsvarende effektiv vertikal spenning i jorden.

**Figur 12** viser en prinsippskisse for en isotrop konsolideringsfase.



*Figur 12 Prinsippskisse for isotrop konsolideringsfase (NTNU,2016, s.162)*

Under konsolideringsfasen blir følgende parametere kontrollert og registrert:

- Aksiell spenning,  $\sigma'_a = \sigma'_v$
- Radiell spenning,  $\sigma'_r = \sigma'_h$
- Aksiell tøyning,  $\varepsilon_a$
- Utpresset porevann,  $\Delta V$

Under konsolideringsfasen blir prøvens opprinnelige areal endret. Det er viktig å beregne en korrigert verdig av arealet siden vertikalspenningene er beregnet ut fra last fordelt på prøvens areal.

Korrigert areal  $A_a$  beregnes fra formelen:

$$A_a = A_0 * \left(1 - \frac{\Delta V}{V_0}\right) / \left(1 - \frac{\Delta V}{3V_0}\right) \quad (2.7)$$

der:

$A_0$ -prøvens opprinnelige areal før testing som for 54 mm prøve er lik 23,2 cm<sup>2</sup>

$V_0$ -er prøvens opprinnelige volum før testing som for 100 mm prøvehøyde er lik 232 cm<sup>3</sup>

I samsvar med standarden NS-EN ISO 17892-9 brukes det vanligvis følgende metoder i konsolideringsfasen for anisotrop tilstand:

-Prøve konsolideres isotropt. Etter at konsolideringen ble fullført, starter det endring av aksial spenning til ønsket nivå.

-Aksiale og horisontale spenninger øker parallelt, men med forsinket påføring av aksial spenning i forhold til celletrykk.

Standarden setter ingen krav til hastigheten konsolideringsspenningene skal økes med. Som regel praktiserer norske geotekniske laboratorier å øke spenningene sakte.

Oversikten over hastigheten for økning av konsolideringsspenninger er demonstrert i

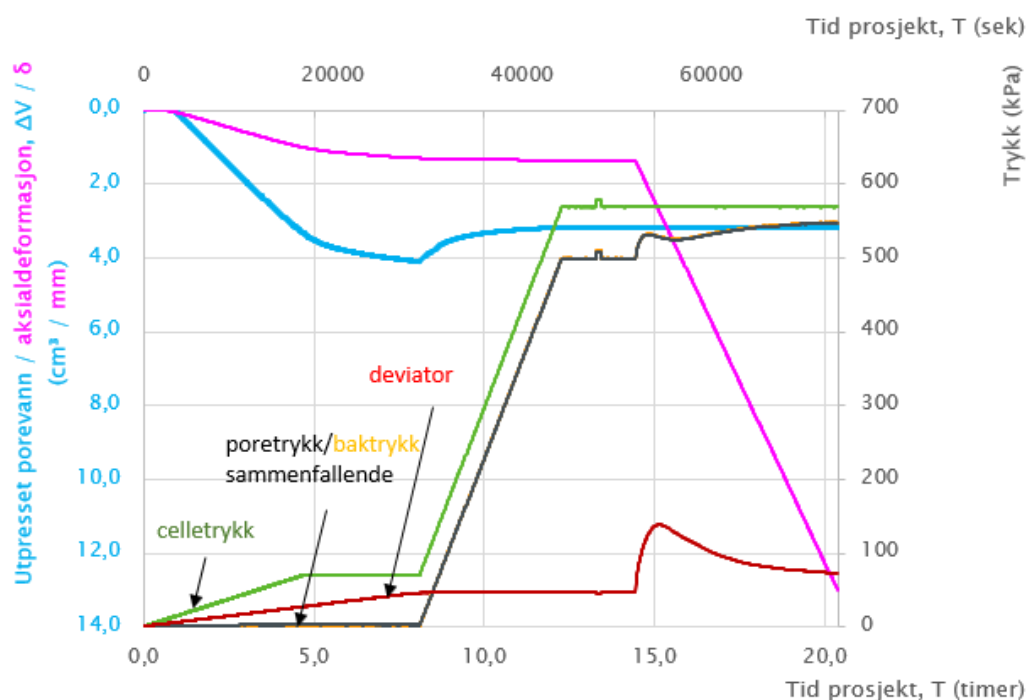
**Tabell 1.**

Laboratorium	Hastighet for økning av konsolideringsspenninger	Dokumentasjon som grunnlag
Statens vegvesen	0,25 kPa/min	Håndbok R210
Multiconsult	Ingen bestemt hastighet. Økning av celletrykket kjøres på 180 minutter uansett spenningsnivå. Deviator spenning nås opp på 240 min uansett spenningsnivå.	Egne retningslinjer
Rambøll	2 kPa/min	Egne retningslinjer
Norconsult	Bruker formelen: ønsket spenning i kPa minus differansen celletrykk/baktrykk, gange dette med 2. Ved konsolidering til 100 kPa, blir konsolideringstiden beregnet slik: $(100 - (360 - 350)) * 2 = 180$ . I dette konkrete tilfelle blir økningen 1,8 kPa/min. Dette fordi Norconsult kjører metningsfasen og B-sjekk før konsolideringsfasen slik at de normalt har allerede utsatt prøven for ca 10 Kpa konsolideringsspenning når de setter denne fasen i gang.	Egne retningslinjer

Tabell 1 Oversikt over hastigheter for økning av konsolideringsspenninger brukt i norske laboratorier (retningslinjer er oppgitt av fagansvarlige laboranter i Trondheim).

Denne problemstillingen vil være et hovedtema i denne oppgaven. Hensikten er å finne ut ved hjelp av praktiske forsøk, hvordan en leireprøve vil reagere om den blir utsatt for raske økninger av konsolideringsspenninger og hvilken betydning det vil ha for resultater av treksforsøk.

Statens vegvesen bruker metoden med parallell økning av konsolideringsspenninger der deviator spenning  $q$  påføres med en liten forsinkelse i forhold til celletrykket. Denne metoden vil bli brukt i praktiske forsøk i oppgaven. **Figur 13** demonstrerer hvordan alle målingene i treksforsøket ser ut. Denne presentasjonen blir kalt for utførelsesrapport i oppgaven.

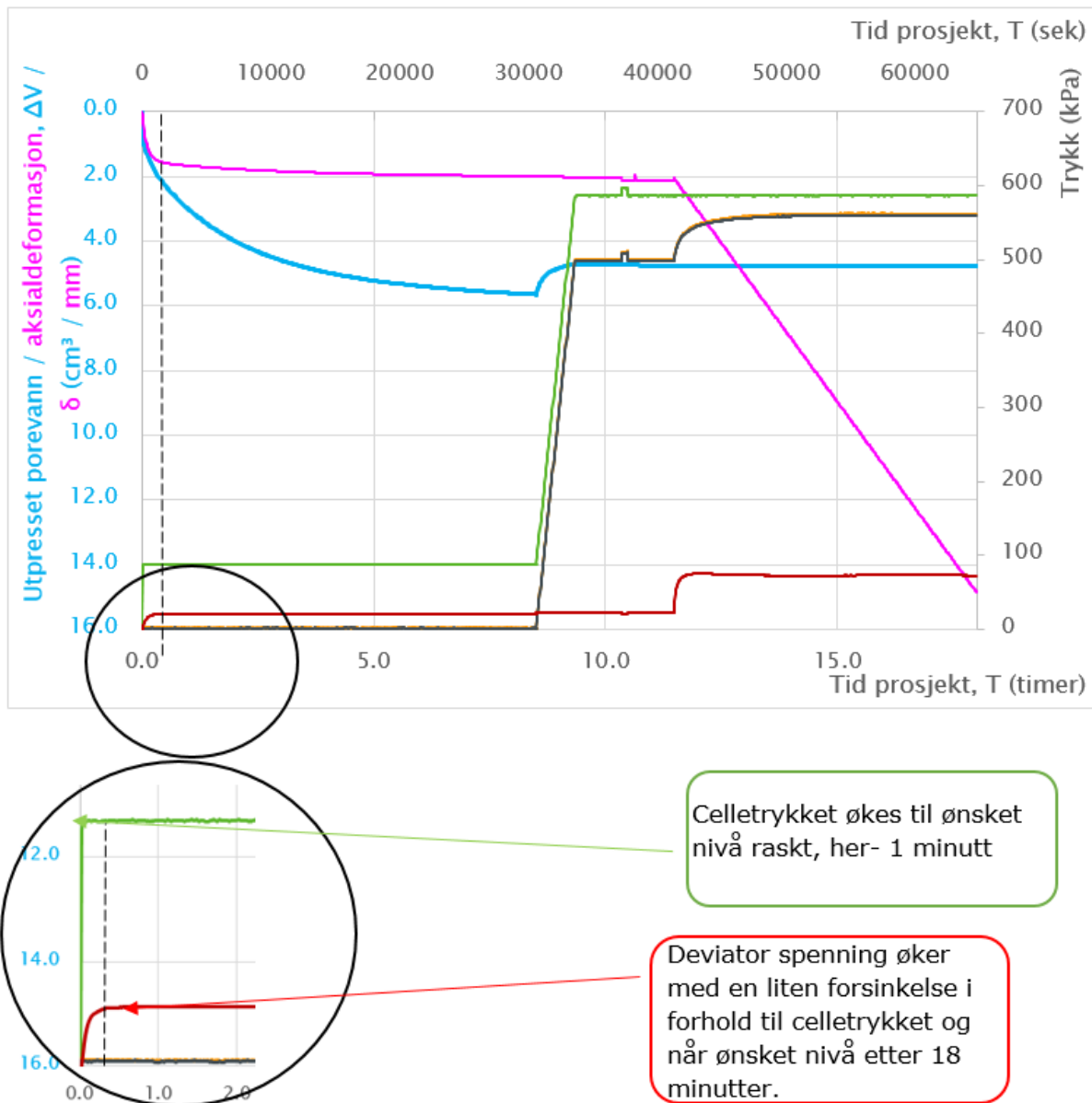


Figur 13 Utførelsesrapport med sakte økning av konsolideringsspenninger



Utførelsesrapporten i **Figur 13** viser en anisotrop spenningstilstand ved sakte økninger av konsolideringsspenninger: celletrykket øker med gitt hastighet (her 0,25 kPa/min), deviator spenning øker med en liten forsinkelse. Ønsket nivå for celletrykket ble oppnådd etter 9 timer, deviator spenning ble oppnådd etter det har gått 13 timer.

Om man velger å sette prøve under konsolideringsspenninger mye raskere, kunne en utførelsesrapport se ut som **Figur 14** viser.



Figur 14. Utførelsesrapport med rask økning av konsolideringsspenninger

Her blir celletrykket nådd opp på ett minutt. Deviator spenning øker med en liten forsinkelse i forhold til celletrykket og når et innstilt nivå på 18 minutter.

Deretter står prøven under disse spenningene og går gjennom konsolideringsfasen på en vanlig måte inntil kriteriene for avslutning av konsolideringsfasen blir tilfredsstillt. I dette eksempelet ble prøven konsolidert anisotropt med  $K'_0 = 0,8$

### 2.2.2.3.1. Prøveforstyrrelse

I utgangspunktet blir alle prøver tatt ut av jorden, mer eller mindre forstyrret. Årsaker til forstyrrelser er selve prøvetakingsmetoder som gjør en viss påkjenning, transport, utskyvning av sylindere (for sylinderprøver), håndtering på laboratoriet. Som sagt blir blokkprøver ansett som prøver med den beste kvaliteten grunnet en mer skånsom prøvetaking og håndtering på lab.

En god indikasjon på prøve kvalitet er mengde av utpresset porevann i konsolideringsfasen. Parameteren  $\Delta V/V_0$  som viser forholdet mellom volumendring etter avsluttet konsolideringsfasen og opprinnelig prøvevolum presentert i **Tabell 2**.

OCR	$\frac{\Delta V}{V_0}(\%)$		
	Godt	Akseptabel	Dårlig
1-2	<2,0	2,0-4,0	>4,0
2-3	<1,0	1,0-3,0	>3,0
3-6	<0,5	0,5-1,0	>1,0

Tabell 2 Klassifisering av prøve kvalitet etter volumtøyning (SVV, 2015, s.163)

En annen parameter for bedømmelse av prøve kvalitet er poreallforhold  $\Delta e/e_0$

**Tabell 3** viser klassifisering av prøve kvalitet ut fra endring i poreall.

OCR	$\frac{\Delta e}{e_0}$			
	Meget god	God til bra	Dårlig	Meget 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

Tabell 3 Klassifisering av prøve kvalitet etter poreallforhold (T. Lunne, 1997).

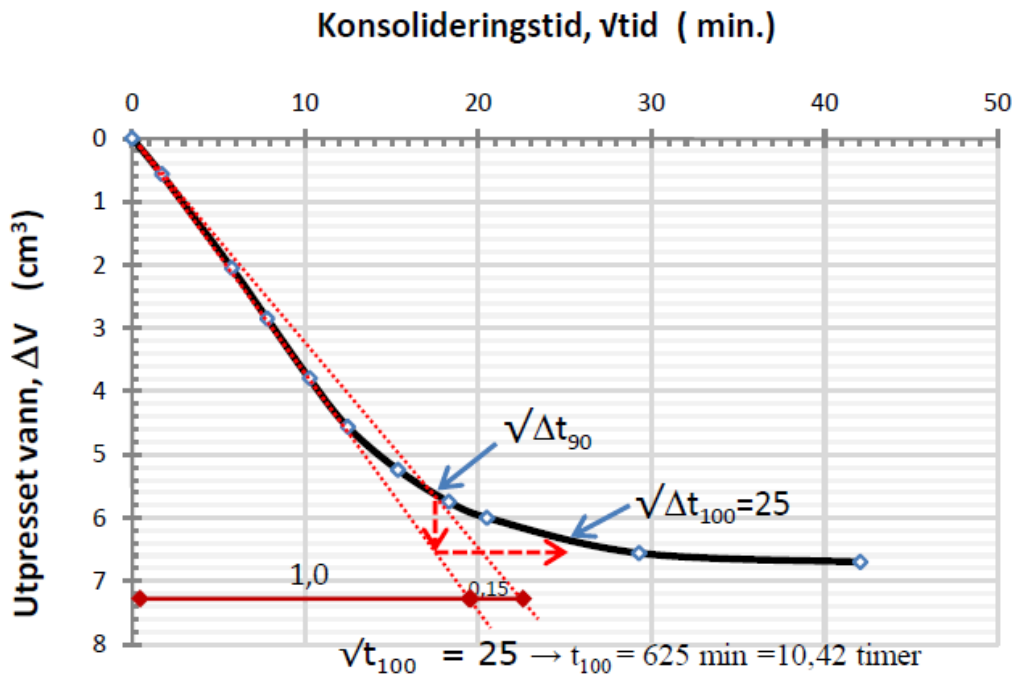
Poreallforholdet i treksforsøket beregnes etter formelen:

$$\frac{\Delta e}{e_0} = \frac{\Delta V}{V_0} * \frac{(1 + w * \rho_s)}{w * \rho_s} \quad (2.8)$$

Ifølge standarden NS-EN ISO 17892-9 bør konsolideringsfasen anses som avsluttet når volumendringen er mindre enn 0,1 % av prøvevolumet per time eller 0,1cm<sup>3</sup> per time avhengig av hvilken verdi er større.

Poretrykket skal være 95% dissipert. Hvis dette kriteriet ikke kan oppfylles, skal konsekvensene for testresultatene vurderes og inkluderes i testrapporten (NS-EN ISO 17892-9, s.13).

For kontroll ved avsluttet konsolidering kan plottet i **Figur 15** være til hjelp.



Figur 15 Eksempel på utpresset porevann mot kvadratrot av tid under konsolideringsfasen (SVV, 2015, s.161).

«Kommentar: I figur 8 trekkes en rett linje langs den første delen av kurven som vist. Deretter trekkes en ny linje med 15% slakere helning.

Der denne linjen krysser kurven i punktet  $\sqrt{(\Delta t_{90})}$ , trekkes en vertikal linje. Der denne vertikale linjen krysser den første linjen som følger den rette delen av kurven, trekkes en horisontal linje. Der denne horisontale linjen krysser kurven finnes punktet  $\sqrt{(\Delta t_{100})}=25..$  ( $t_{100} = 625 \text{ min}$ )» (SVV, 2015, s.161).

For operatører blir denne metoden tungvint siden denne er kun ment for kontroll etter avsluttet konsolideringsfasen.

Normalt har geotekniske laboratorier egne praktisk orienterte kriterier for avslutning av konsolideringsfasen.

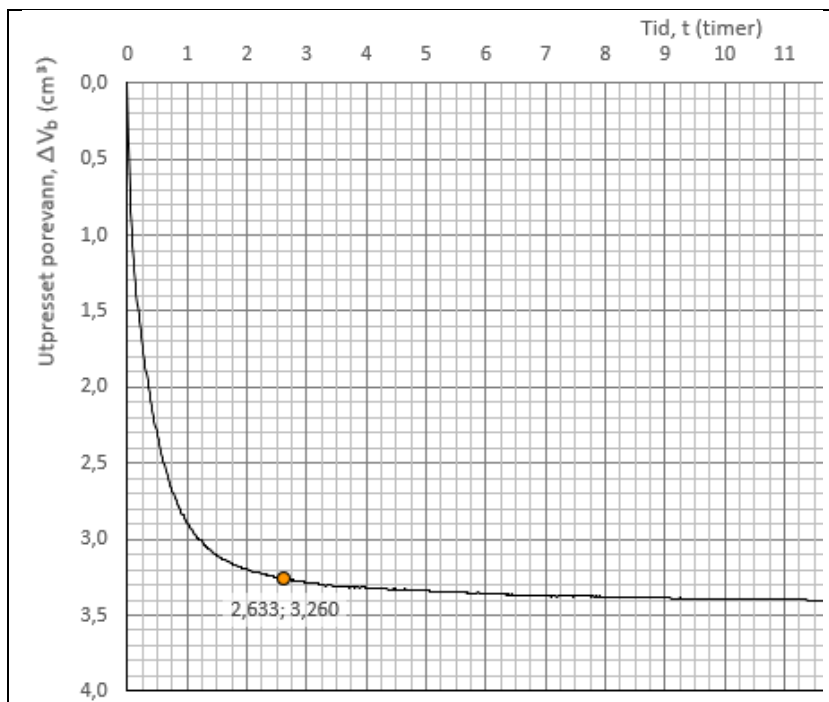
NTNU har en «tommelfingerregel» som lyder slik: «konsolideringstrinnet kan avsluttes hvis vannutpressingen er mindre enn 0,2 cm<sup>3</sup> per 5 minutters tidsintervall. Ved avsluttet konsolidering skal også restporetrykket  $u$  vise en lav og stabil verdi nær 0 kPa» (Sandven R., 2014, s.22).

Statens vegvesen sine laboratorier avslutter konsolideringstrinnet når vannutpressingen er mindre enn 0,01 cm<sup>3</sup> per 10 minutters tidsintervall.

Rambøll bruker regelen 0,04 cm<sup>3</sup> innen 5 min for at konsolideringen blir ansett som avsluttet.

Norconsult avslutter konsolideringsfasen når vannutpressingen blir på 0,05 cm<sup>3</sup> per 5 minutters tidsintervall.

Normalt skal man passe på at konsolideringskurven flater seg ut til en viss grad. Et eksempel på en konsolideringskurve som brukes ved rapportering av resultater på SVV er illustrert i **Figur 16**.



Figur 16 Eksempel på en konsolideringskurve.

Et markert punkt i **Figur 16** viser når det påkrevde kriteriet for avslutning av konsolideringstrinnet er oppfylt. Her kunne konsolideringsfasen avsluttes etter 2,633 timer med registrert utpresset vannmengde 3,260  $\text{cm}^3$ .

#### 2.2.2.4. Metningsfase

Det antas at norske leirer under grunnvannsnivå er mettet slik at det ikke er behov for kunstig metning. Likevel er det en del luftbobler i systemet (slanger, filtre, kraner osv) som kan dempe responsen i poretrykkmålere under skjærfasen.

For å redusere virkning av dette problemet, blir det hensiktsmessig å krysse sammen luftboblene ved å utføre parallell økning av baktrykk og celletrykk. Effektive spenninger oppnådd i konsolideringsfasen skal ikke endres. Denne prosessen kalles blant norske laboratorier som metning.

Standarden NS-EN ISO 17892-9 anbefaler å bruke minst 300 kPa i økning av baktrykket. Standarden setter krav til differansen mellom celletrykk og baktrykk i økningsfasen.

«Den observerte økningen i baktrykket bør være minst 90% av den tilsvarende økningen i celletrykket» (NS-EN ISO 17892-9, s.12). Med andre ord, skal variasjoner på mer enn  $\pm 10\%$  mellom baktrykk og celletrykk, unngås.

Videre krever standarden at for effektive spenninger under 20 kPa skal variasjoner mellom baktrykk og celletrykk holdes under 2 kPa.

Det settes ikke krav til hastigheten for økning av trykket i denne fasen, og dette også vil bli et tema for denne oppgaven.

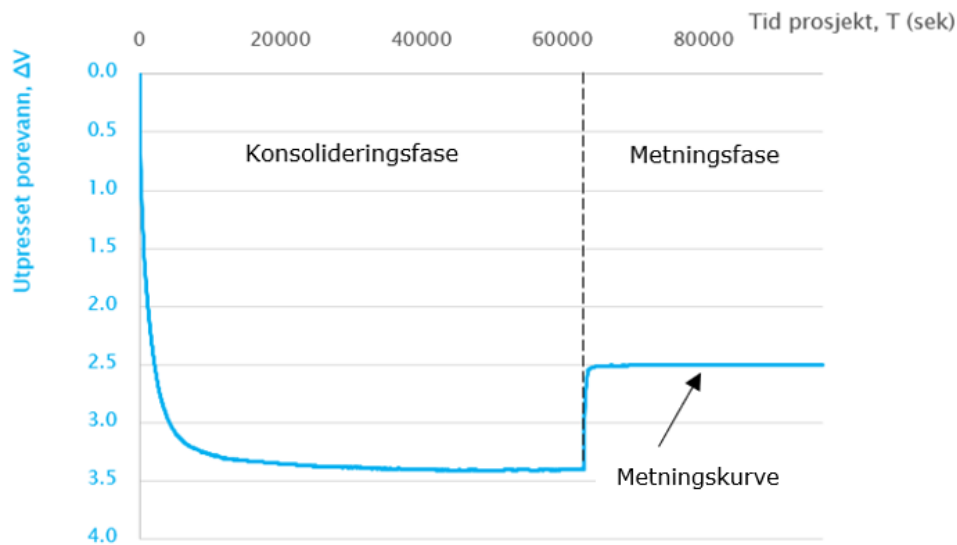
Norske geotekniske laboratorier praktiserer en sakte økning av celle-og baktrykket i metningsfasen.

**Tabell 4** illustrerer en oversikt over hastigheter for økning av trykket i metningsfasen, som bruker kjente i Norge aktører.

Laboratorium	Hastighet for økning av bak-og celletrykket i metningsfasen	Dokumentasjon som grunnlag
Statens vegvesen	2 kPa/min med hviletrinn på 30 min etter at trykket er oppnådd	Håndbok R210
Multiconsult	1,4 kPa/min med hviletrinn på 10 min etter at trykket er oppnådd	Egne retningslinjer
Rambøll	0,5 kPa/min med hviletrinn på 120 min etter at trykket er oppnådd	Egne retningslinjer
Norconsult	3,5 kPa/min med hviletrinn på 100 min etter at trykket er oppnådd	Egne retningslinjer

Tabell 4 Oversikt over hastigheter for trykkøkning i metningsfasen brukt i norske laboratorier (Informasjonen ble oppgitt av fagansvarlige laboranter i Trondheim og Molde/Norconsult).

Om man velger rask trykkøkning vil utførelsesrapporten for metningskurven se ut som det er vist i **Figur 17**.

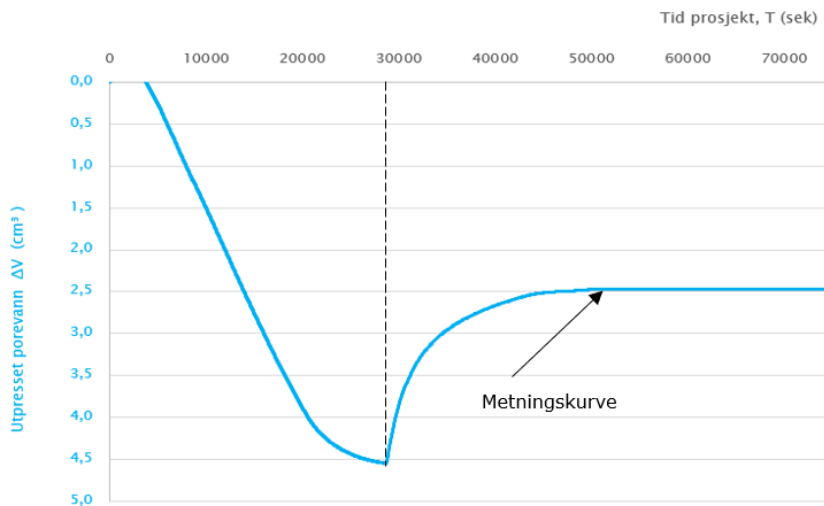


Figur 17 Metningskurve ved rask trykkøkning, her 50 kPa/min.

Kurven i presentasjonen over ser ut som en fortsettelse av konsolideringskurven og skaper en feilaktig oppfatning av at vannet presses inn i prøven under metningsfasen. Det som skjer er at baktrykkstempelen presser vann i slanger og filtre for å øke trykket slik at det blir registrert volumendring i forbindelse med sammenpressing av luft.

I virkeligheten endrer ikke en ferdigkonsolidert prøve sitt volum i metningsfasen. Metningskurven i **Figur 17** er kun ment for å demonstrere dens forløp ved rask trykkøkning der trykket på 500 kPa oppnås på 10 minutter.

Dersom man øker trykket sakte slik det er påbudt etter dagens regler, vil metningskurven se ut som **Figur 18** illustrerer.



Figur 18 Metningskurve ved sakte trykkøkning, her 2 kPa/min

Kurven i presentasjonen over flater seg sakte ut. Det er brukt 250 minutter for å oppnå trykket på 500 kPa.

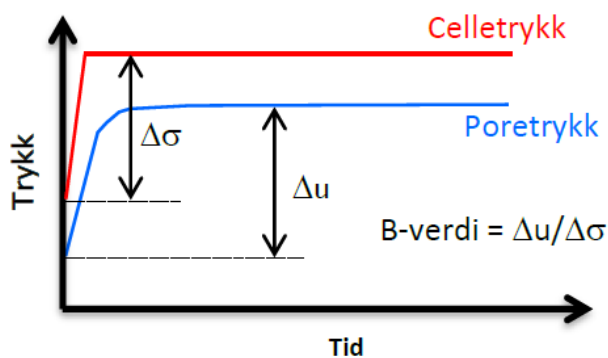
#### 2.2.2.5. B-test

B- sjekk er ment for å dokumentere systemets registrert respons ved spenningsendringer. For å kontrollere om poretrykkmålinger er tilfredsstillende, utføres det en såkalt B-test. Testen utføres ved å øke celletrykket med  $\Delta\sigma$  samtidig som vannutpressing av prøven hindres, tilsvarende økning av poretrykket  $\Delta u$  registreres.

Verdien  $\Delta\sigma$  skal være 10 kPa for NC-leirer og opp til 100 for OC-leirer. (SVV,2015, s 161).

B-testen skal ta ca 2 minutter og ikke vare lenger enn 10 minutter. (SVV,2015, s 161).

**Figur 19** illustrerer hvordan B-verdi beregnes ut fra påført  $\Delta\sigma$  og målt  $\Delta u$ .



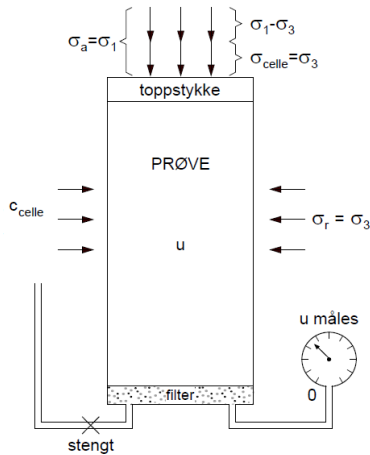
Figur 19 B-test. (SVV, 2015, s.161).

B-verdi må være over 0,95 for at poretrykkmålinger skal anses som tilfredsstillende. Om dette kriteriet ikke er oppfylt, skal metningsfasen gjentas med høyere trykkøkning. (NS-EN ISO 17892-9, s.12). Om B-verdi er nær 0,95 økes baktrykk og celletrykk med 50 % av opprinnelig verdi, men hvis B-verdi er vesentlig lavere enn 95%, økes celletrykk og baktrykk med 100% av opprinnelig verdi (SVV, 2015, s.161). Dersom disse tiltakene ikke endrer B-verdi eller endrer den i liten grad uten at kravet om 0,95 blir tilfredsstillt, kan skjærforsøket likevel starte. (SVV,2015, s.161)

### 2.2.2.6. Skjærforsøk

Den siste fasen i treaksforsøket som resulterer i brudd av testet prøve, er skjærforsøk. Prøven føres til stand der skjærspenninger oppstår. Dette oppnås med å utsette prøven for forskjell i hovedspenningene. Som sagt kan forsøket være drenert og udrenert.

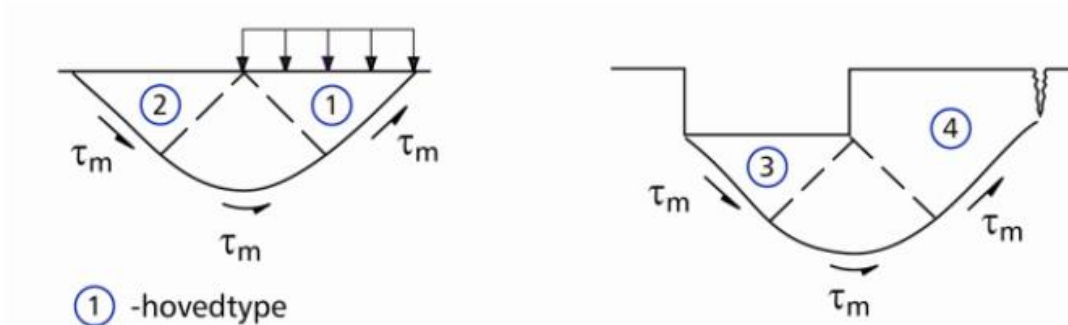
**Figur 20** illustrerer et udrenert aktivt isotropt treaksforsøk. Ved drenert tilstand vil porevannkanalen være åpen.



Figur 20 Prinsipp for treakstesting i udrenert isotrop tilstand. (Emdal A., 2017, s.162).

Ut fra geotekniske problemstillinger kan skjærforsøket utføres ved forskjellig belastningstilstand. (SVV, 2015 s.162)

**Figur 21** illustrerer belastningsforhold der skjærspenninger  $\tau_m$  oppstår.



Figur 21 Prinsipp for valg av hovedtype treaksialforsøk. (SVV, 2015, s.162).

Belastningssoner prøver blir tatt fra, avgjør hvilken hovedtype treaksforsøk blir aktuelt for å utføre. **Tabell 5** viser hvilken oppførsel hovedspenninger demonstrerer ved ulike hovedtyper av treaksforsøk.

Belastningsform	$\sigma_{aksial}$	$\sigma_{radial}$	Type*
Aktiv	øker	konstant	1
Aktiv	konstant	avtar	4
Passiv	avtar	konstant	3
Passiv	konstant	øker	2

Tabell 5 Typer skjærbelastning. (SVV, 2015, s.162).

\* I henhold til **Figur 21**

Denne oppgaven handler kun om hovedtype 1 i **Tabell 5** og gjelder udrenert tilstand.

Skjærspenningsforløpet beregnes ut fra registrerte under forsøket verdier.

**Tabell 6** demonstrerer hvilke verdier blir registrert og hvilke parametere blir beregnet og brukt ved rapportering for aktivt treaksforsøk.

Registrert verdi	Beregnet parameter	Formel for beregnet parameter	Merknad
Aksial deformasjon $\delta$	Tøyning under skjærfasen $\varepsilon$	$\varepsilon = \frac{\delta}{H_0}$	$H_0$ -prøvens høyde ved innbygging
	Korrigert areal $A_s$ under skjærfasen	$A_s = A_a * (1 - \varepsilon)$	$A_a$ - prøvens areal etter konsolidering
Vertikalt last P Celletrykk $\sigma_{cell}$	Vertikal spenning $\sigma_v$	$\sigma_v = \frac{P}{A_s} + \sigma_{cell}$	
Poretrykk $u$	Effektiv vertikal spenning $\sigma_v'$ Effektiv horisontal spenning $\sigma_{cell}'$	$\sigma_v' = \sigma_v - u$ $\sigma_{cell}' = \sigma_{cell} - u$	
	Middelspenning $p'$	$p' = \frac{\sigma_v' + 2\sigma_{cell}'}{3}$	
	Deviatorspenning $q'$	$q = \sigma_1' - \sigma_3' = \sigma_v' - \sigma_{cell}'$	
	Helning for bruddlinjen $S_f$	$S_f = \frac{\sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$	Gjelder NGI-plott
	Helning for bruddlinjen $M_f$	$M_f = \frac{6\sin\varphi}{3 - \sin\varphi}$	Gjelder $p' - q'$ - plott
	Skjærspenning $\tau$	$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1' - \sigma_3')$	
	Dilatantparameter $D$	$D = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta\sigma_3'}{\frac{1}{2}(\Delta\sigma_1' - \Delta\sigma_3')} + \frac{2}{3} \right)$  eller $D = \Delta q / \Delta p'$	$D$ brukes for vurdering om prøven oppfører seg dilatant eller kontraktant.  Kan leses direkte av p-q-plottet

Tabell 6 Beregninger for treaksialt aktivt skjærforsøk.

Resultater av treaksforsøket i skjærfasen fremstilles i diagram som:

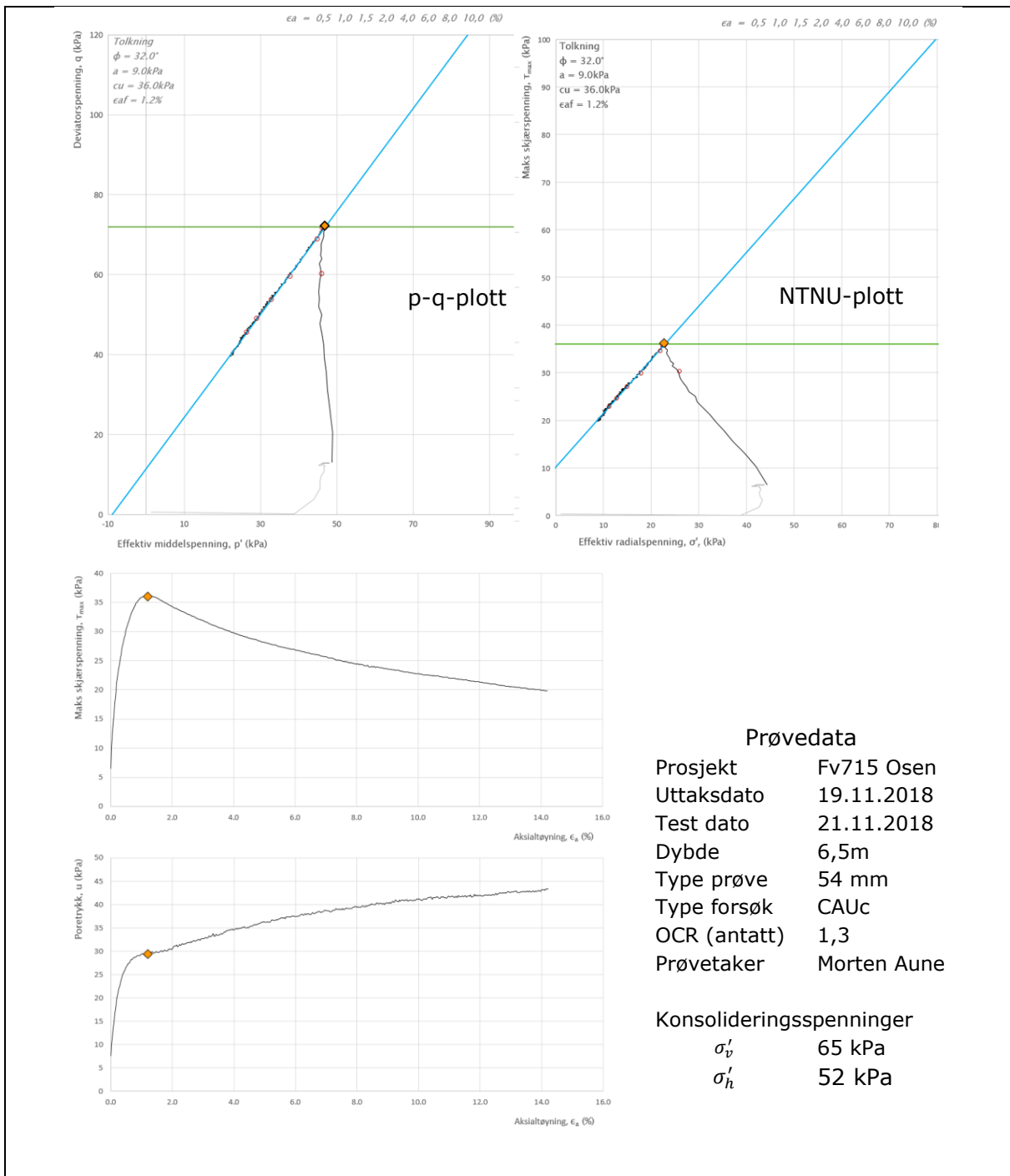


-spenningsstier (NTNU-plott, p-q-plott og/eller MIT/NGI-plott)

-poretrykksutvikling  $u$  mot aksial tøyning  $\epsilon_a$

-maksimal skjærspenning  $\tau_{maks}$  mot aksial tøyning  $\epsilon_a$

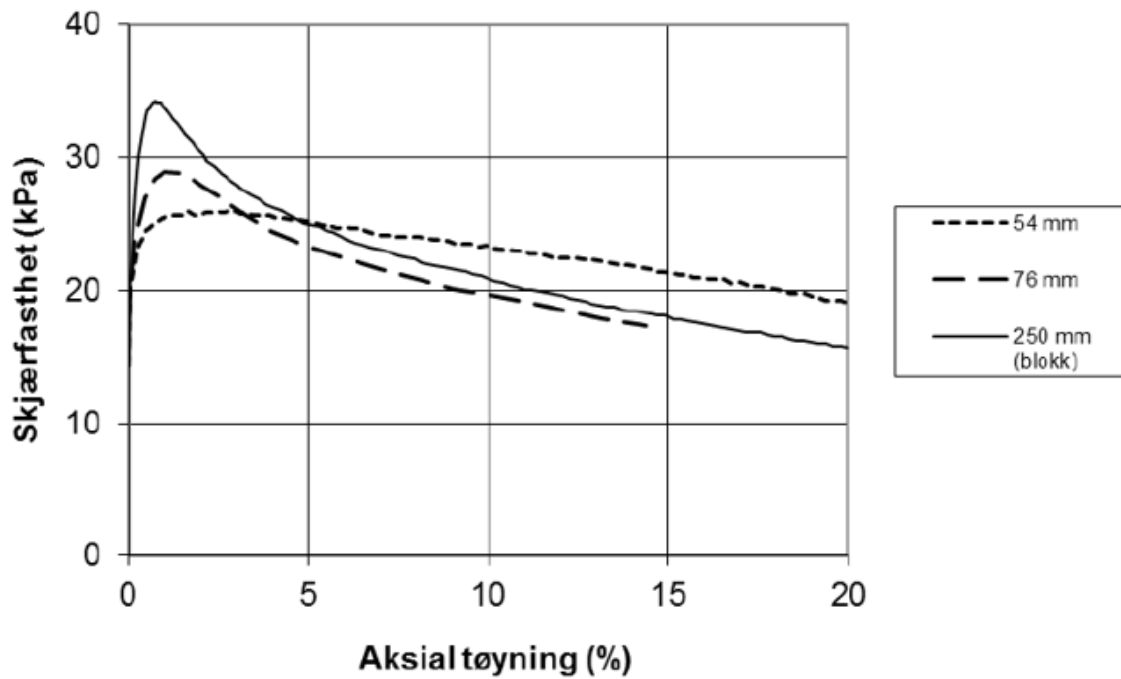
Som resultatet av konsolideringen plottes vannutpressing  $\Delta V$  eller volumtøyning  $\epsilon_{vol}$  mot tid for vurdering av prøve kvalitet. Et eksempel på en rapport av treksforsøket er vist i **Figur 22**.



Figur 22 Eksempel på framstilling av resultater av treksforsøk (resultater er fått etter praktiske forsøk i forbindelse med oppgaven).

Plotter for skjærutvikling kan brukes for bedømmelse av prøve kvalitet. En tydelig bruddlinje med lav bruddtøyning, ingen eller liten dilatering/kontraktering før bruddet indikerer på en god prøve kvalitet.

**Figur 23** viser et eksempel på bruddlinjer for prøver av forskjellige kvaliteter i plottet for maksimal skjærspenning  $\tau_{maks}$  mot aksial tøyning  $\epsilon_a$



Figur 23 Eksempel på effekt av prøveforstyrrelse, CAUc forsøk fra Onsøy (NGF, 2013)

## 3. Resultat

### 3.1. 54 mm prøver

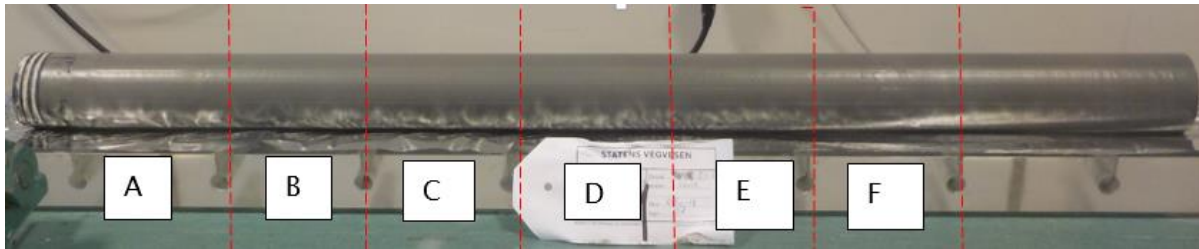
I kapitelet presenteres resultater av utførte laboratorieundersøkelser. De første 7 parallelle forsøk ble utført på 54 mm prøver. Alle testene gjelder reelle SVV prosjekter der resultater av forsøk utført i samsvar med Håndbok R210, kalt i oppgaven for «sakte testing», ble rapportert videre til oppdragsgivere. Prøvedata er presentert i **Tabell 7**.

Oppdrag	Nr.	Dato, prøveuttak	Dato, åpning	Delprøve	Lagring på kjøling i uåpnet stand, dager	Lagring i åpnet stand, timer	Hull nr.	Dybde, m	OCR
Fv717 Sund-Bradden. Prosjekt 407548	1	16.10.2018	24.10.2018	11E	8	0	RK6	18-18.8	1,2
	2	16.10.2018	24.10.2018	11D	8	3	RK6	18-18.8	
Fv717 Sund-Bradden. Prosjekt 407548	3	18.10.2018	25.10.2018	4C	7	0	BH19	3-3.8	2
	4	18.10.2018	25.10.2018	4B	7	4	BH19	3-3.8	
Fv717 Sund-Bradden. Prosjekt 407548	5	18.10.2018	06.11.2018	11D	19	0	BH20	10-10.8	1,5
	6	18.10.2018	06.11.2018	11C	19	1	BH20	10-10.8	
Fv717 Sund-Bradden. Prosjekt 407548	7	18.10.2018	07.11.2018	10D	20	0	BH20	9-9.8	1,5
	8	18.10.2018	07.11.2018	10C	20	3	BH20	9-9.8	
Fv717 Sund-Bradden. Prosjekt 407548	9	25.10.2018	12.11.2018	1D	18	0	BH15	5-5.8	1,5
	10	25.10.2018	12.11.2018	1C	18	1	BH15	5-5.8	
Fv717 Sund-Bradden. Prosjekt 407548	11	25.10.2018	16.11.2018	2D	22	0	BH15	7-7.8	1,5
	12	25.10.2018	16.11.2018	2C	22	1	BH15	7-7.8	
Fv 715 Osen. Prosjekt 405599	13	19.11.2018	21.11.2018	5D	2	0	BH2207	6-6.8	1,3
	14	19.11.2018	21.11.2018	5C	2	0,5	BH2207	6-6.8	

Tabell 7 Prøvedata for 54 mm prøver

Prøver ble delt opp i biter på 10 cm. Bitene fikk et navn i form av bokstav der hver bokstav tilsvarer viss dybde. Bokstav A står for øvre del av prøven og representerer de første 10 cm av prøven etter at 5 cm av enden er kappet av, bokstav F står for nedre del. Endene tas som regel ikke for bestemmelse av udrenert skjærfasthet.

**Figur 24** viser et eksempel på prøveoppdeling. Prøvene testet i denne oppgaven har også bokstavnavn i samsvar med beskrivelsen ovenfor.



Figur 24. Oppdeling av prøven

Den ene prøven i testparallellen ble analysert med sakte trykkøkning etter dagens regler i SVV i samsvar med Håndbok R210, den andre prøven ble utsatt for rask trykkøkning først kun i konsolideringsfasen for de første 2 parallellene, deretter også i metningsfasen. Det forsøket som ble utført ved raske trykkøkninger fikk benevnelse «raskt». Det forsøket som ble utført etter dagens regler, er navngitt som «sakte».

Forsøkene er planlagt slik at begge prøvene i parallellen konsolideres til lik spenningstilstand.

Ved testing av de første to parallellene ble prøver i den raske testen utsatt for økning av konsolideringsspenninger med 10 kPa/min, som er 40 ganger raskere enn det er bestemt i Håndbok R210.

Resten av raske forsøkene er utført slik at det på ett minutt oppnås isotrop tilstand der vertikalt trykk er likt celletrykk. Deretter øker deviator på noen minutter inntil det aktuelle spenningsforholdet oppnås.

Forsøket går over til metningsfasen når kriteriet for avslutning av konsolideringsfasen er til stede. For SVV er dette kriteriet tilfredsstilt når vannutpressing i konsolideringsfasen er mindre enn 0,01cm<sup>3</sup> per 10 minutters tidsintervall.

Forsøksoppsettet for parallellene av 54 mm-prøver er presentert i **Tabell 8**

Nr.	Delprøve	Type testing	Type materiale	Eff. Konsolideringsspenninger, kPa		K0'	Økning av konsolideringsspenninger, kPa/min	Trykkøkning i metningsfasen, kPa/min
				$\sigma'_a$	$\sigma'_r$			
1	RK6_11E	sakte	leire	188	131	0.70	0.25	2
2	RK6_11D	raskt		188	131	0.70	10	2
3	BH19_4C	sakte	leire	34	24	0.71	0.25	2
4	BH19_4B	raskt		34	24	0.71	10	2
5	BH20_11D	sakte	kvikkleire	118	94	0.80	0.25	2
6	BH20_11C	raskt		118	94	0.80	96	10
7	BH20_10D	sakte	leire	108	86	0.80	0.25	2
8	BH20_10C	raskt		108	86	0.80	86	10
9	BH15_1D	sakte	leire	60.29	48	0.80	0.25	2
10	BH15_1C	raskt		60.29	48	0.80	50	10
11	BH15_2D	sakte	leire	79.56	60	0.75	0.25	2
12	BH15_2C	raskt		79.56	60	0.75	62	50
13	BH2207_5D	sakte	kvikkleire	65	52	0.80	0.25	2
14	BH2207_5C	raskt		65	52	0.80	54	50

Tabell 8 Forsøksoppsett for 54 mm prøver

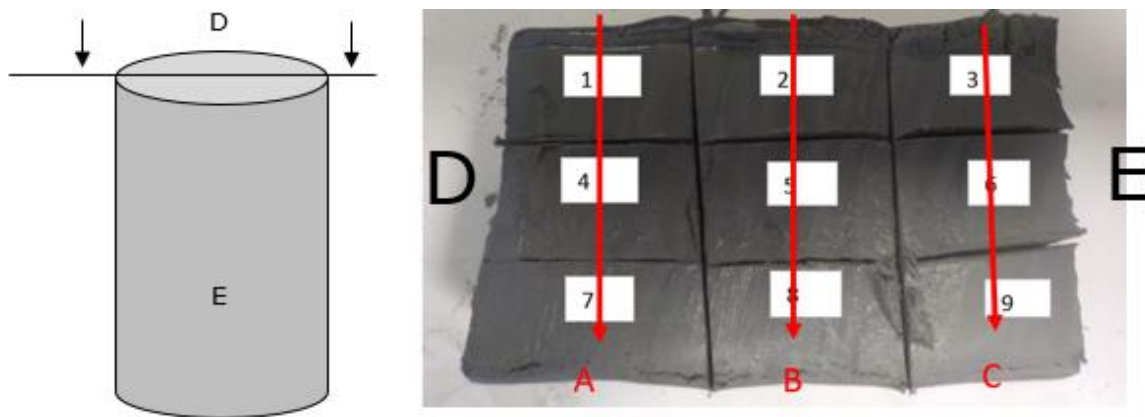
For alle prøvene fra oversikten er det utført rutineundersøkelser for å sjekke om prøvene i en parallell har forskjeller på materialegenskaper som kunne påvirke resultater av

treksforsøk. Bestemte rutineparametere er delvis presentert i tabeller for resultater for hver parallell. Fullstendige resultater av rutineundersøkelser er presentert i bilag 1-7.

Utførelsesrapporter for alle testete paralleller fra oversikten i **Tabell 8** er presentert i bilag 8-14.

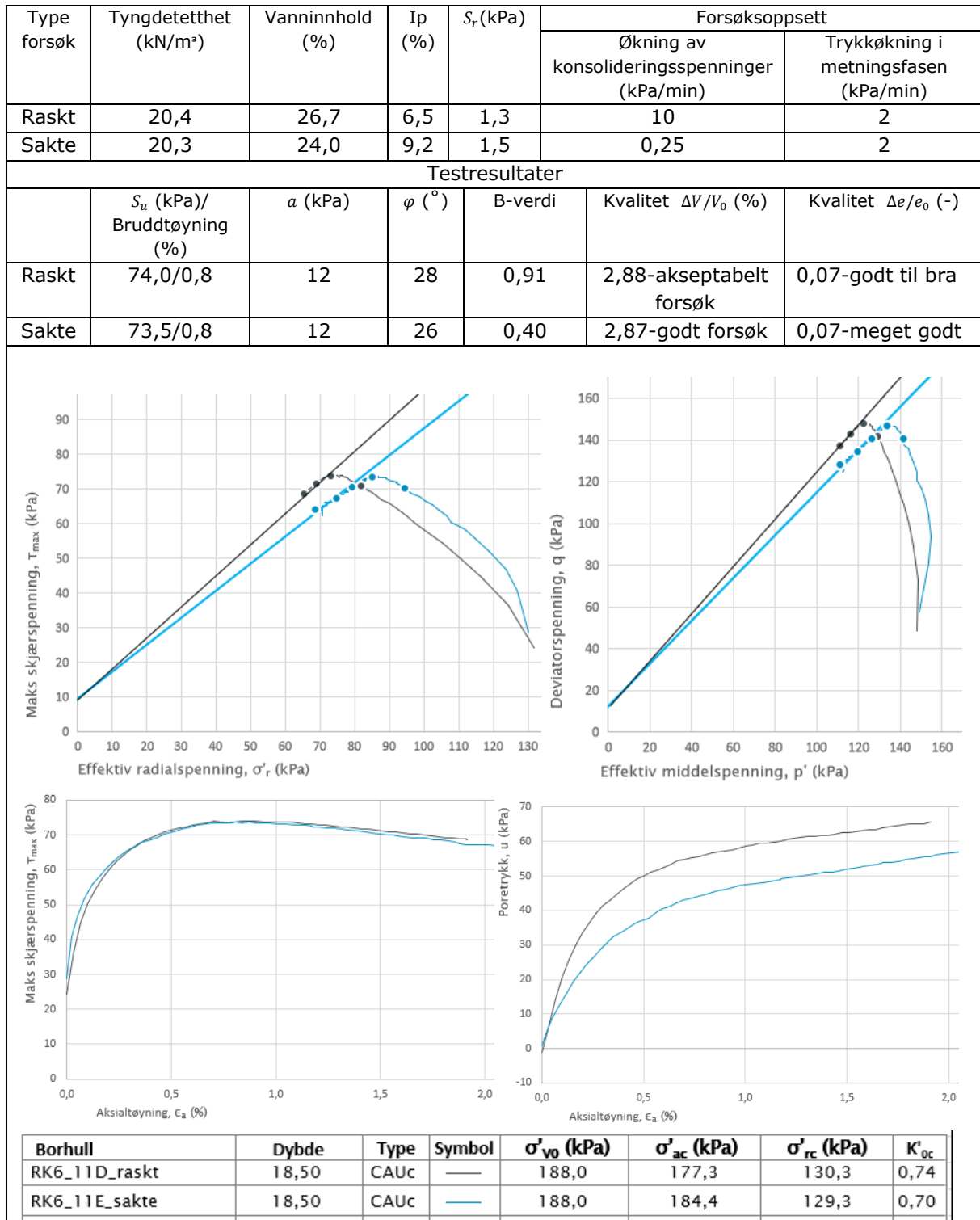
Etter avsluttet forsøk ble begge prøvene i parallell delt opp og undersøkt i forhold til fordeling av vanninnhold i bestemte deler av prøven for å finne ut om det er store forskjeller etter rask og sakte testing.

**Figur 25** viser hvordan prøvene ble delt opp. Nummererte deler av prøven ble det bestemt vanninnhold for, på tvers av prøven: A:1-4-7, B:2-5-8, C:3-6-9.



*Figur 25 Oppdeling av prøven for undersøkelse av vanninnhold i bestemte prøvedeler.*

### 3.1.1. Resultater for Fv717 Sund-Bradden. Parallell RK6. Hviletrykkskoeffisient $K_0' = 0,7$



Figur 26 Resultater av treksforsøk for parallell RK6, Fv717 Sund-Bradden

Figur 26 vise forløp av spenningsstiene som ble plassert med en liten forskyvning i forhold til akse for effektiv radial spenning i NTNU-plottet (effektiv middelspenning

i q-p-plottet). Attraksjon i begge forsøkene ble tolket som lik, friksjonsvinkler har forskjell på 2°.

Prøvene ble konsolidert til forskjellig spenningsnivå, der spenningsforhold ved hviletrykkskoeffisient  $K_0' = 0,7$  ble oppnådd i den sakte testen, mens  $K_0' = 0,74$  gjaldt den raske testen.

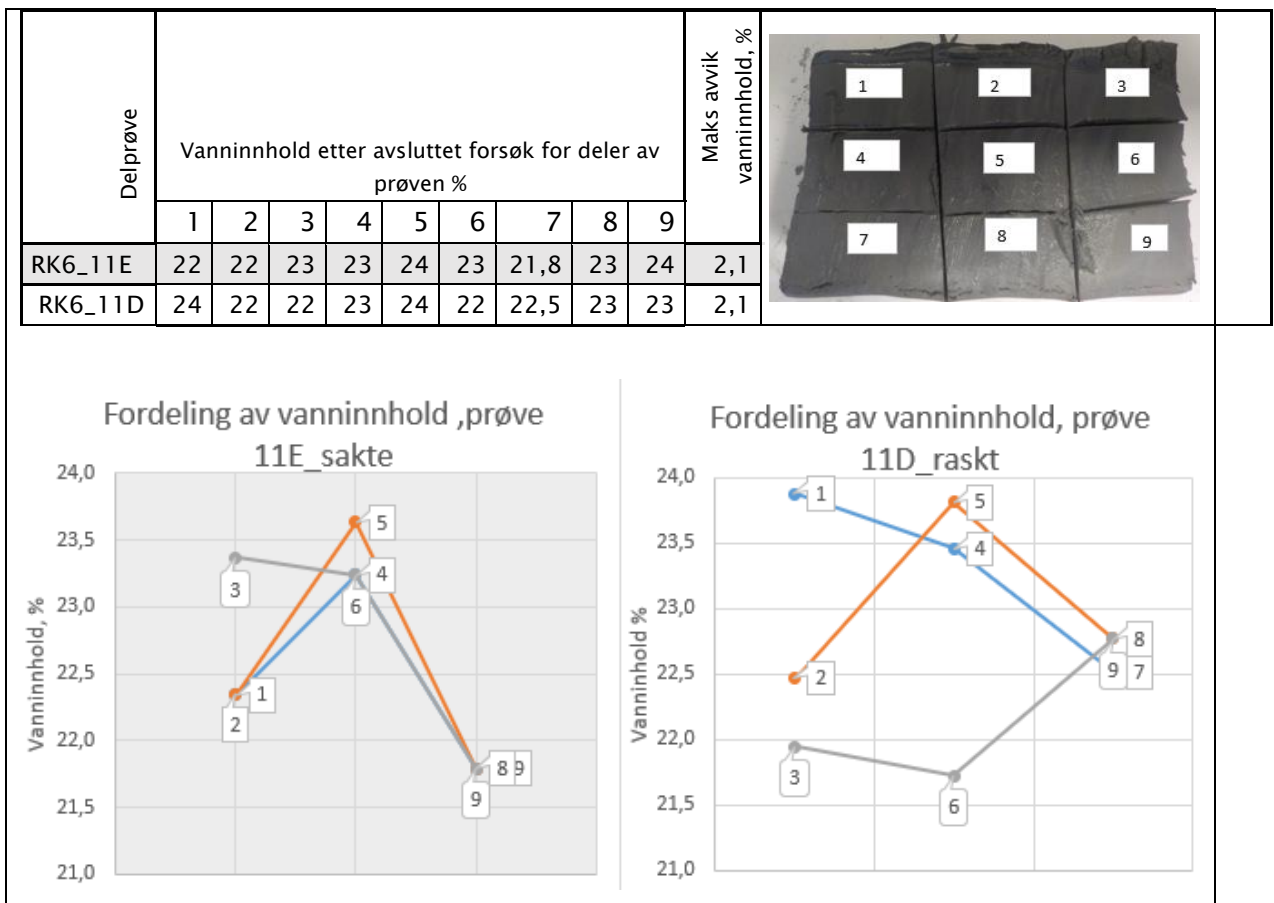
Dette kunne ha betydning for forskyvningen. Skjærfastheten er 0,5 kPa høyere i den raske testen, bruddtøyning og attraksjon er tolket som like for begge testene i parallellen.

Plottetene for skjærutvikling der skjærspenning er plottet mot aksialtøyning er tilnærmet like, mens utvikling av poretrykket i skjærfasen viser at poretrykket i den raske testen er større og øker fortere.

Resultater av fullstendige rutineundersøkelser fra bilag 15 bekrefter at prøvenes materialeegenskaper er tilnærmet like slik at eventuelle forskjeller ikke kunne påvirke testresultater.

Fordeling av vanninnholdet etter avsluttet forsøk for parallell RK6 viser minimale forskjeller for prøver testet ved rask og sakte trykkøkning, se **Figur 27**.

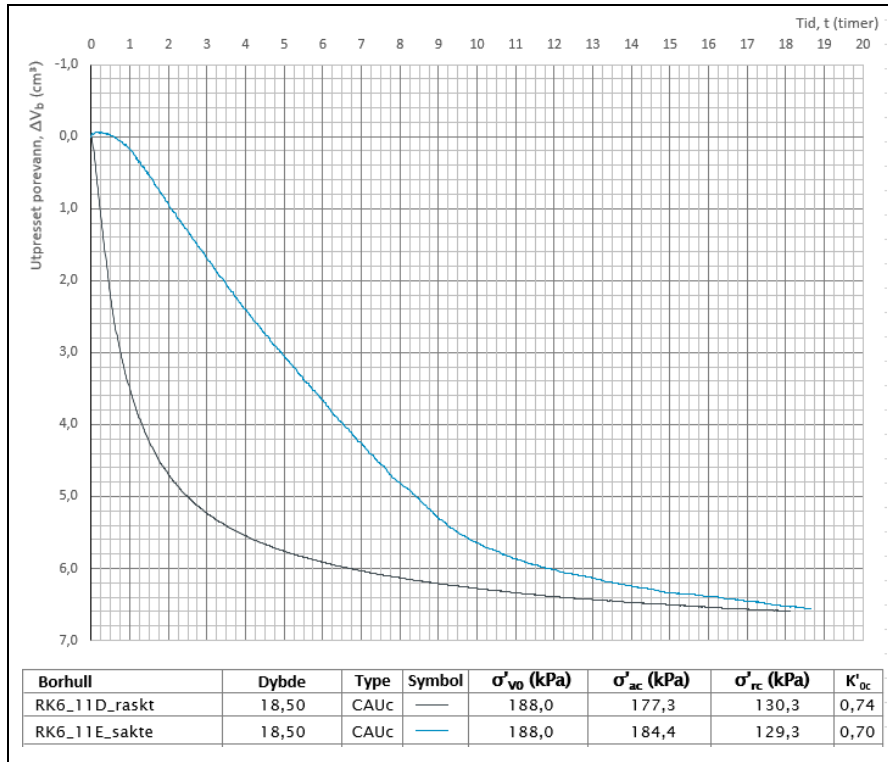
Begge prøvene har tilnærmet likt vanninnhold i de delene av prøven det ble foretatt målinger for, med maksimalt avvik mellom minimum og maksimum verdi på 2,1%.



Figur 27 Fordeling av vanninnhold i prøvene etter avsluttet forsøk for parallell RK6, Fv717 Sund-Bradden

Forløpet av konsolideringsfasen er presentert i **Figur 28**, der konsolideringskurvene ender ved nesten det samme punktet som betyr tilnærmet lik vannutpressing og konsolideringstid for begge forsøkene.

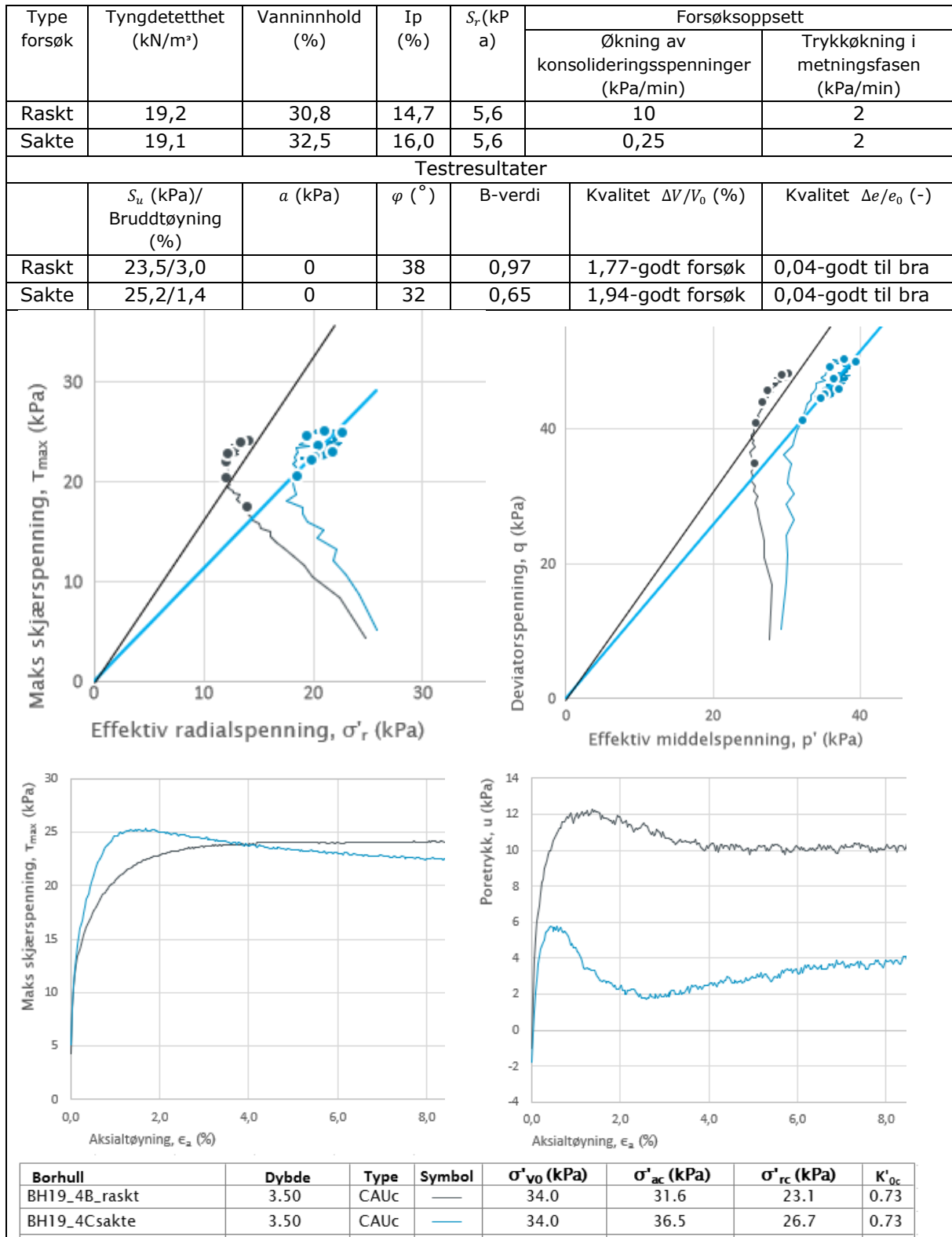
Kvalitetsparameterne presentert i tabell «Testresultater», se **Figur 26**, er nesten like, slik at begge prøvene havnet i den samme kvalitetsklassen.



Figur 28 Forløp av konsolideringsfasen for parallell RK6, Fv 717 Sund-Bradden,  $K0'=0,7$



### 3.1.2. Resultater for Fv717 Sund-Bradden. Parallell BH19\_4. Hviletrykkskoeffisient $K'_{0c}=0,73$

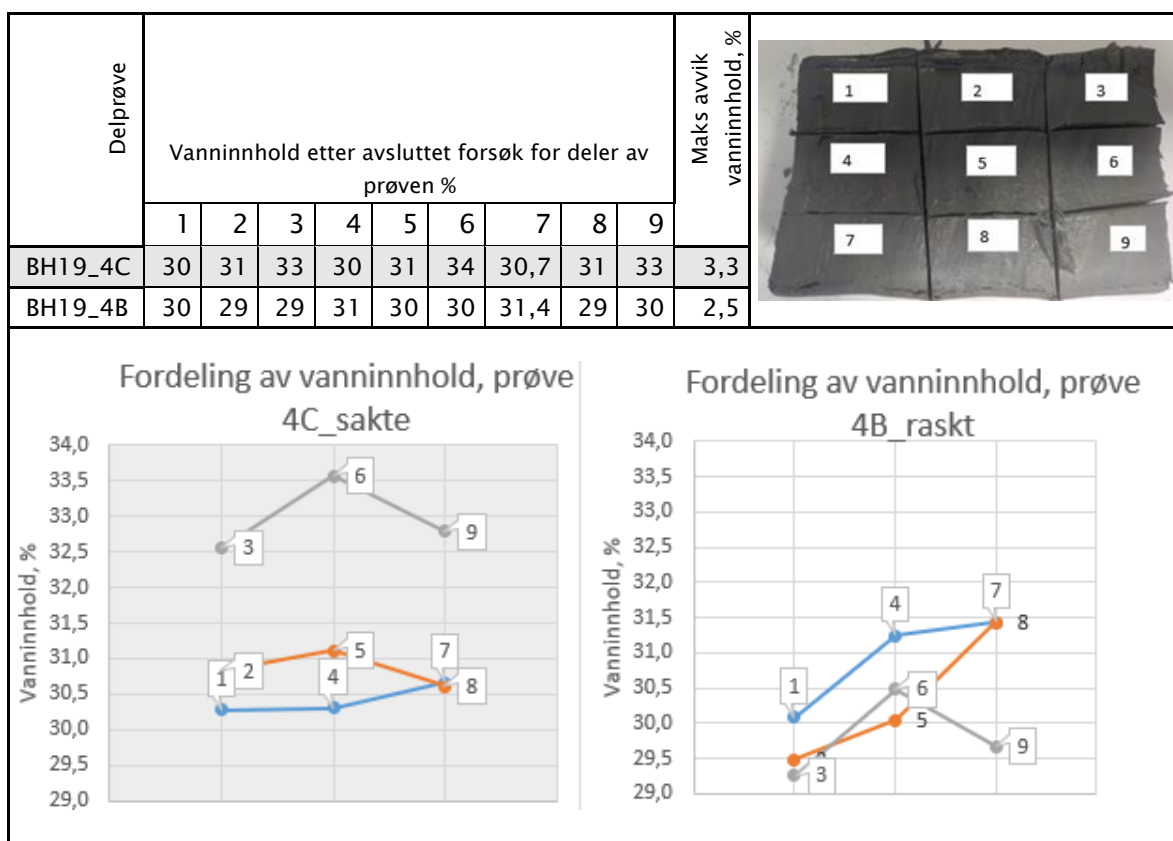


Figur 29 Resultater av treksforsøk for parallell BH19\_4, Fv717 Sund-Bradden

**Figur 29** viser at poretrykksutvikling i skjærfasen er større og øker raskere ved rask testing. Denne raskere enn ved sakte forsøk utviklingen er registrert for de fleste testete parallellene. Det ble diskutert nærmere i eget kapittel om feilkilder. Forskjell på oppnådde konsolideringsspenninger og forskjell på poretrykket i skjærforsøket gjør at spenningsstiene blir plassert med en liten forskyvning i forhold til akselen for effektive spenninger. Forløpet av spenningsstiene ser ellers ganske likt ut. Skjærutviklingskurve er litt tydeligere og «brattere» i sakte testing som indikerer på mindre prøveforstyrrelse slik det er vist i eksempelet i **Figur 23**. Det samme kan man si om bruddtøyning, den er lavere ved sakte testing som tyder på litt bedre prøve kvalitet enn ved rask testing.

P-q-kurve går nesten rett opp inntil bruddpunktet for rask testing med etterfølgende brudd på lik linje som ved sakte testing. Skjærfasthet er 1,7 kPa lavere etter den raske testen. Grunnet forskyvningen ble friksjonsvinkelen i den raske testen 6° større, attraksjonen er tolket som lik for begge testene i parallellen.

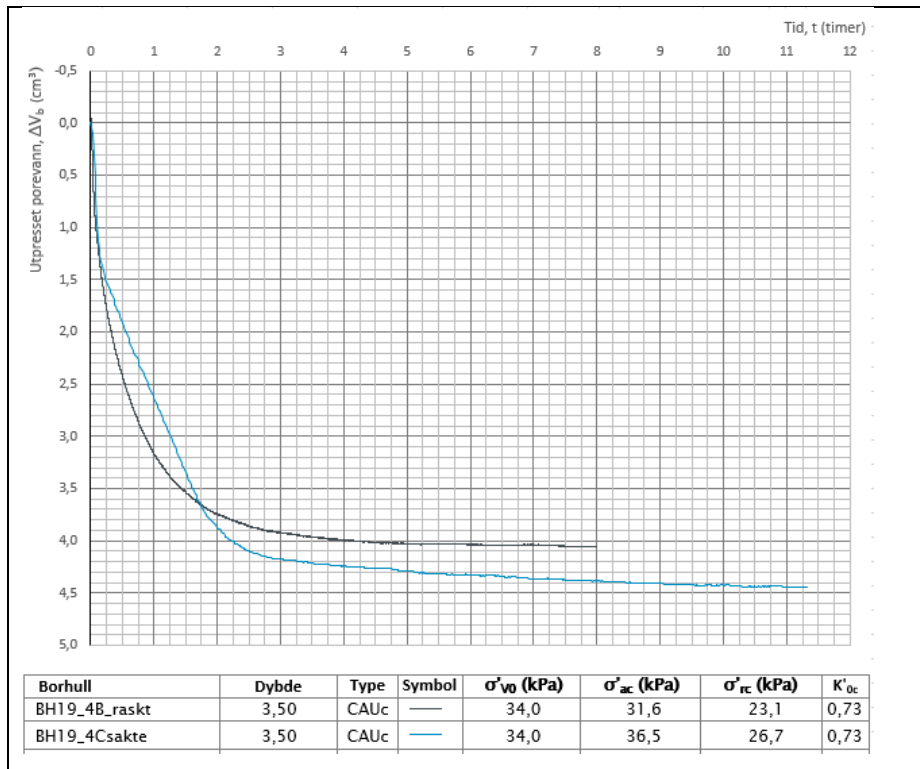
**Figur 30** presenterer fordeling av vanninnholdet for begge prøvene etter avsluttet forsøk. Avviket på minimum og maksimum verdi av vanninnholdet i bestemte deler av prøven er mindre ved rask testing som tyder på at porevannet ble presset ut jevnere enn ved sakte testing.



*Figur 30 Fordeling av vanninnhold etter avsluttet forsøk for parallell BH19\_4, Fv717 Sund-Bradden*

Prøvekvalitet ut fra utpresset porevann ser bedre ut for rask testing. Selv om begge prøvene havnet i lik kvalitetsklasse, ble mengde utpresset porevann ved rask testing noe lavere enn ved sakte testing, men forskjellen er veldig liten. Poretallforholdet er likt for begge, se tabell «Testresultater» i **Figur 29**.

Forløpet av konsolideringsfasen er presentert i **Figur 31**. Konsolideringskurver ser veldig like ut. Kriterier for avslutning av konsolideringsfasen ble tilfredsstilt tidligere ved den raske testingen.



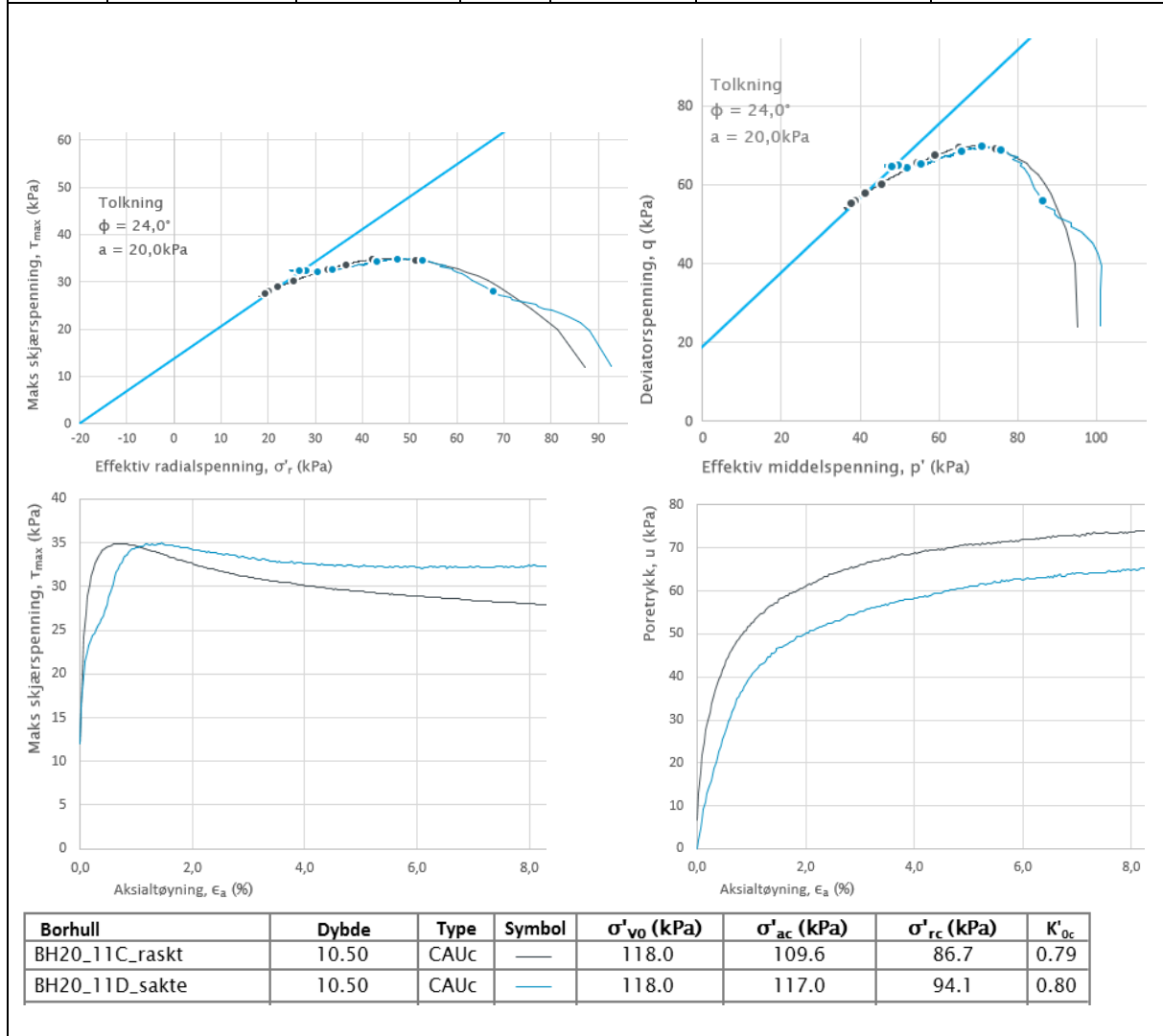
Figur 31 Forløp av konsolideringsfasen for parallell BH19\_4, Fv 717 Sund-Bradden,  $K'_{0c}=0,73$

### 3.1.3. Resultater for Fv717 Sund-Bradden. Parallell BH20\_11. Hviletrykkskoeffisient $K_0' = 0,8$

Type forsøk	Tyngdetetthet (kN/m <sup>3</sup> )	Vanninnhold (%)	I <sub>p</sub> (%)	S <sub>r</sub> (kPa)	Forsøksoppsett	
					Økning av konsolideringsspenninger (kPa/min)	Trykkøkning i metningsfasen (kPa/min)
Raskt	20,1	28,5	8,1	0,6	96	10
Sakte	20,1	30,3	9	0,6	0,25	2

Testresultater						
	S <sub>u</sub> (kPa)/ Bruddtøyning (%)	a (kPa)	φ (°)	B-verdi	Kvalitet ΔV/V <sub>0</sub> (%)	Kvalitet Δe/e <sub>0</sub> (-)
Raskt	35,0/0,8	20	24	1,00	3,46-akseptabelt forsøk	0,08-dårlig forsøk
Sakte	35,0/1,2	-	-	0,35	4,02-dårlig forsøk	0,09-dårlig forsøk



Figur 32 Resultater av treksforsøk for parallell BH20\_11, Fv717 Sund-Bradden

Figur 32 viser at poretrykket utvikler seg raskere i skjærforsøket ved rask test. Spenningsstien for sakte testing har en knekk ved omtrent 25 kPa i skjærspenning på NTNU-plottet. Det kan tyde på et lag i prøven som satte seg under trykket eller noe

annet i materialet som gjorde at kurven endret sitt forløp på den måten. Dette gjør tolkning av resultater til en mer utfordrende oppgave.

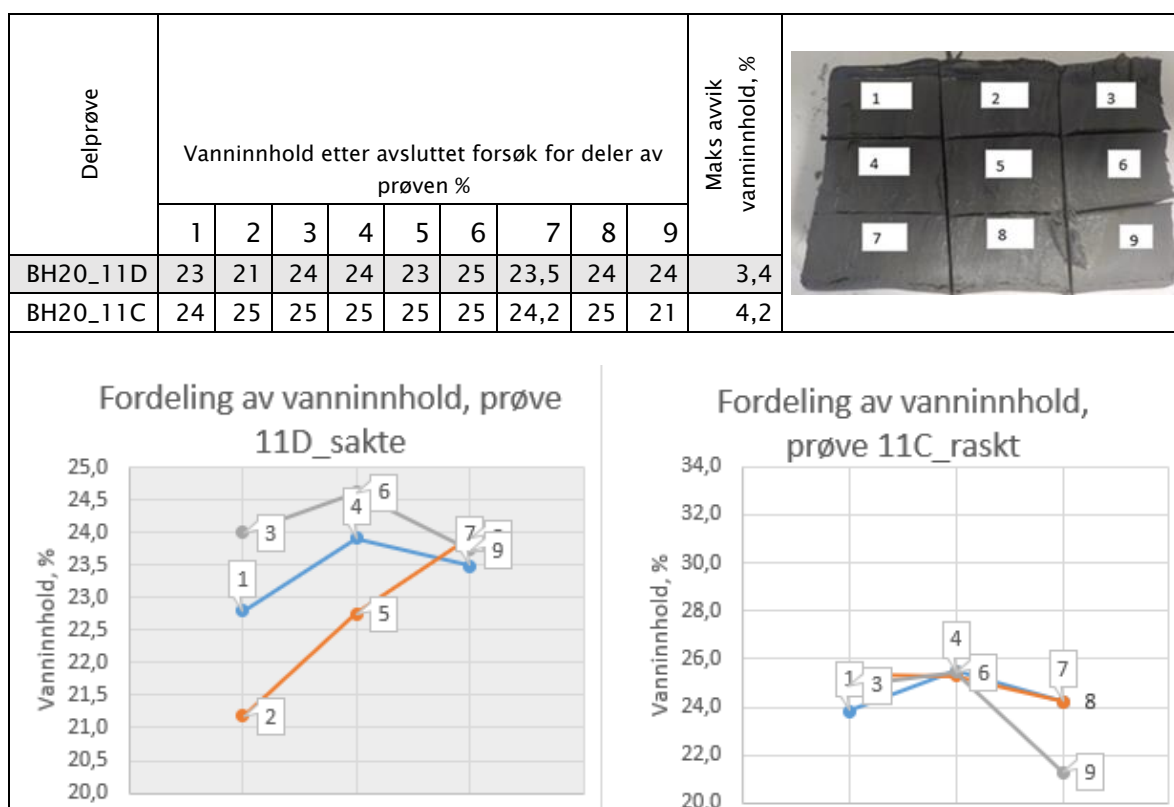
Normalt skulle man forkaste resultater av den testen. I utgangspunktet skal man kun homogene prøver, uten tilslag og lag av andre materialer tas til treakstesting. I enkelte tilfeller er det vanskelig å bedømme hvorvidt en prøve er klassifisert som egnet til denne typen test, når eventuelle lag er lite synlig på overflaten.

Om man ser bort fra knekken i bruddlinjen og rart forløp i retning oppover på slutten av forsøket med sakte trykkøkning, så registrerer man ganske like parametere ved tolkning av resultater for den parallellen.

I plottet skjærspenning mot aksial tøyning for rask testing demonstrerer bruddlinjen et tydelig brudd ved 35 kPa med lav bruddtøyning på 0,8%. Den samme skjærfastheten med bruddtøyning på 1,2% ble registrert ved sakte testing, men bruddlinjen er noe «flatere» enn ved rask testing.

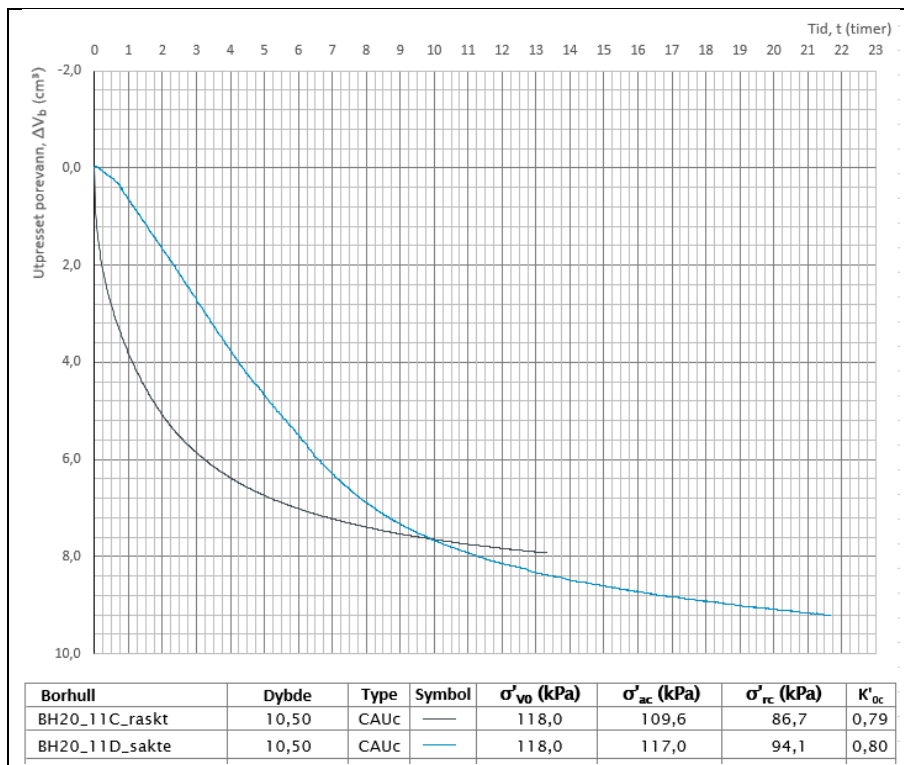
Friksjonsvinkel og attraksjon er vanskelig å tolke for den sakte testen.

Fordeling av vanninnholdet i deler av prøvene etter avsluttet forsøk er presentert i **Figur 33**, der det kommer fram litt større avvik på minimum og maksimum verdi i den raske testen.



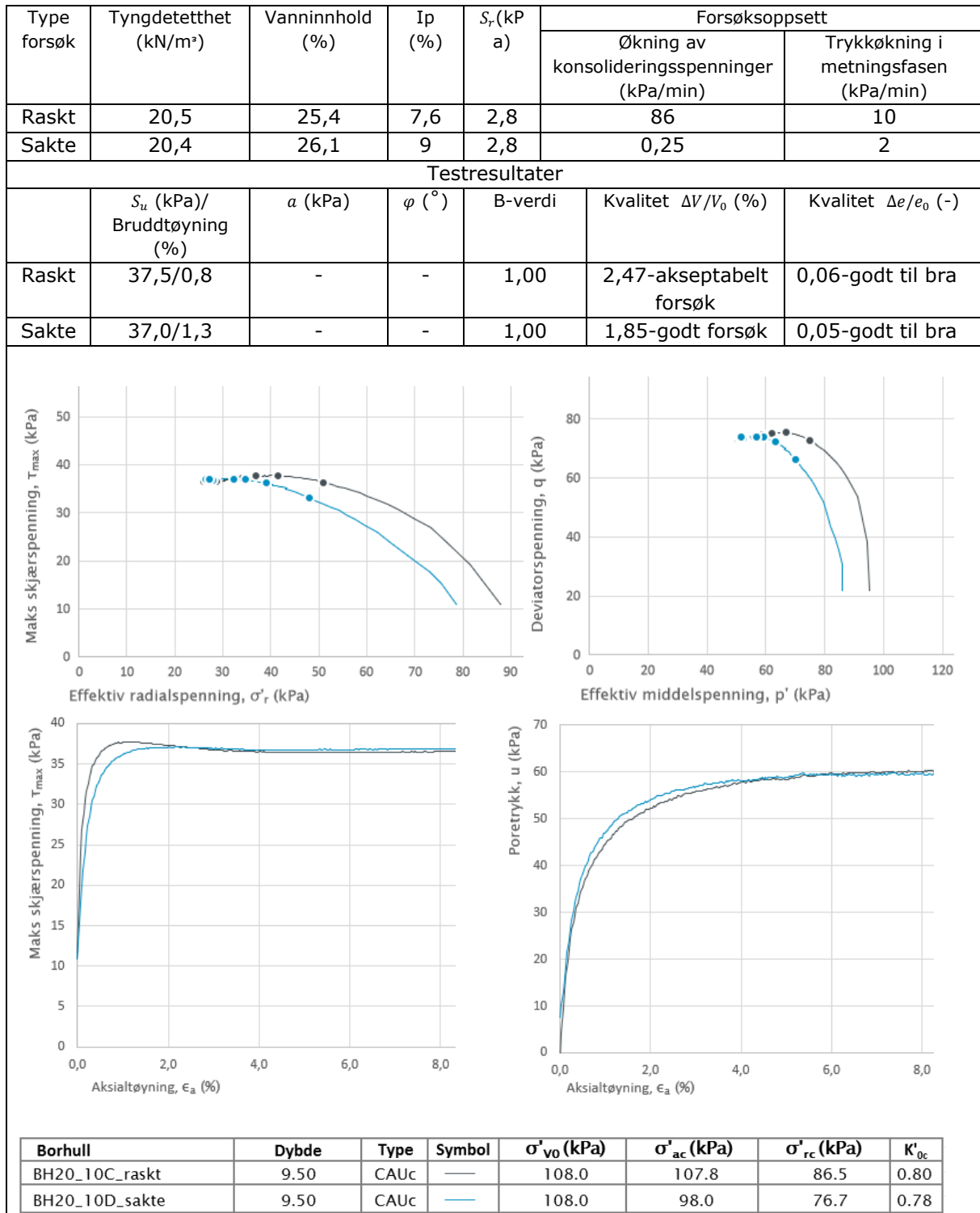
*Figur 33 Fordeling av vanninnhold etter avsluttet forsøk for parallell BH20\_11, Fv717 Sund-Bradden*

Kvalitet for begge prøvene i parallellen er dårlig, men den raske testen har litt bedre utfall i forhold til utpresset porevann etter avsluttet konsolideringen, se tabell «Testresultater» i **Figur 32**. Dette kommer tydelig fram i **Figur 34** der konsolideringskurven for den sakte testen demonstrerer større vannvolum og lengre konsolideringsfase.



Figur 34 Forløp av konsolideringsfasen for parallell BH20\_11, Fv 717 Sund-Bradden,  $K0'=0,8$

### 3.1.4. Resultater for Fv717 Sund-Bradden. Parallell BH20\_10. Hviletrykkskoeffisient $K_0' = 0,8$



Figur 35 Resultater av treksforsøk for parallell BH20\_10, Fv717 Sund-Bradden

Figur 35 viser tilnærmet likt forløp av spenningsstier med liten forskyvning i forhold til akselen for effektive spenninger. Begge bruddlinjene i skjærutviklingsplottet er nesten

«flate», men rask testing ser en del bedre ut i forhold til eksempelet på prøveforstyrrelser i **Figur 23**.

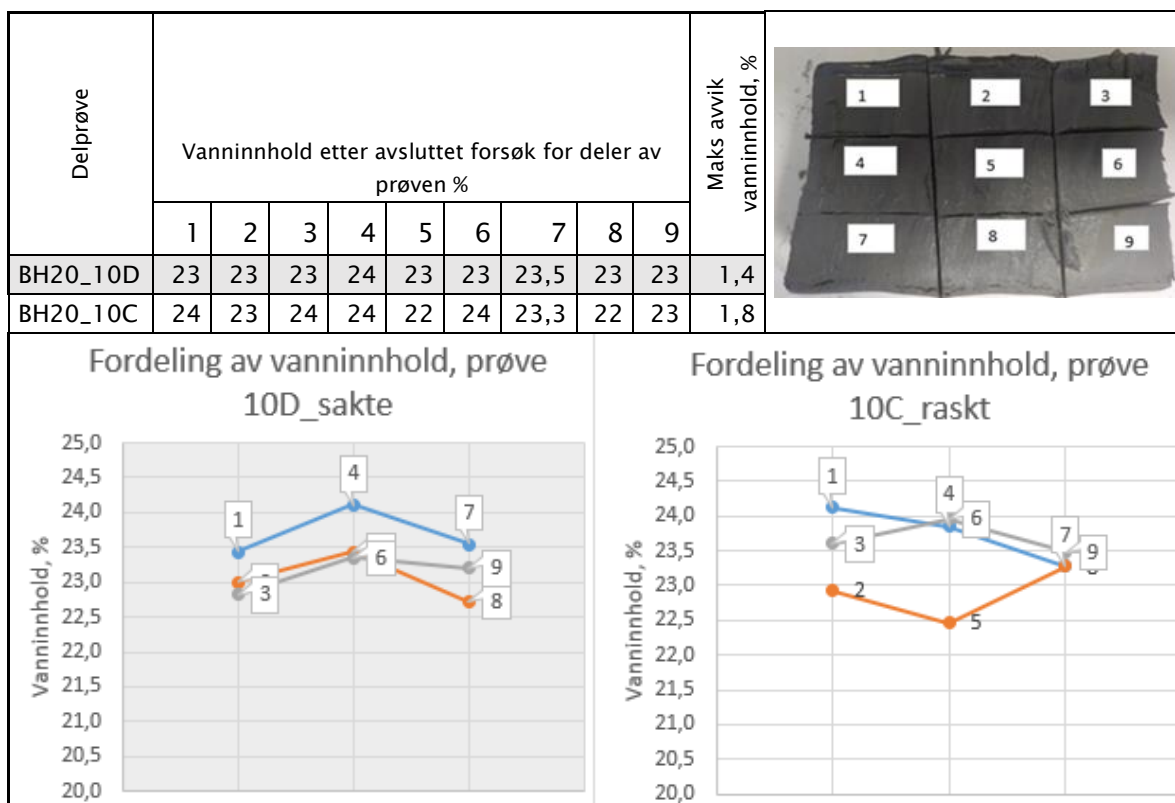
Poretrykksutvikling i skjærforsøket er tilnærmet lik i begge testene.

Den registrerte forskyvningen av spenningsstiene i NTNU-og p-q-plottet skyldes forskjellen på oppnådde konsolideringsspenninger der prøven med sakte testing ble konsolidert til 76,7 kPa i radial spenning, mens spenningene i den raske testen nådde opp til 86,5kPa i radial spenning. Dette kommer tydelig fram fra NTNU-plottet. Antagelig kunne forskyvningen av spenningsstiene vært unngått om startpunktet for skjærforsøket hadde vært likt.

Den raske testen endte med 0,5 kPa høyere skjærfasthet ved lav bruddtøyning på 0,8%.

Resten av parameterne som attraksjon og friksjonsvinkel var vanskelig å bedømme siden bruddlinjene er såpass utydelige at det er nødvendig med flere forsøk fra samme prøveserien med større spredning av spenninger.

Fordeling av vanninnhold i deler av prøvene etter forsøk er ganske lik for begge, se **Figur 36**.

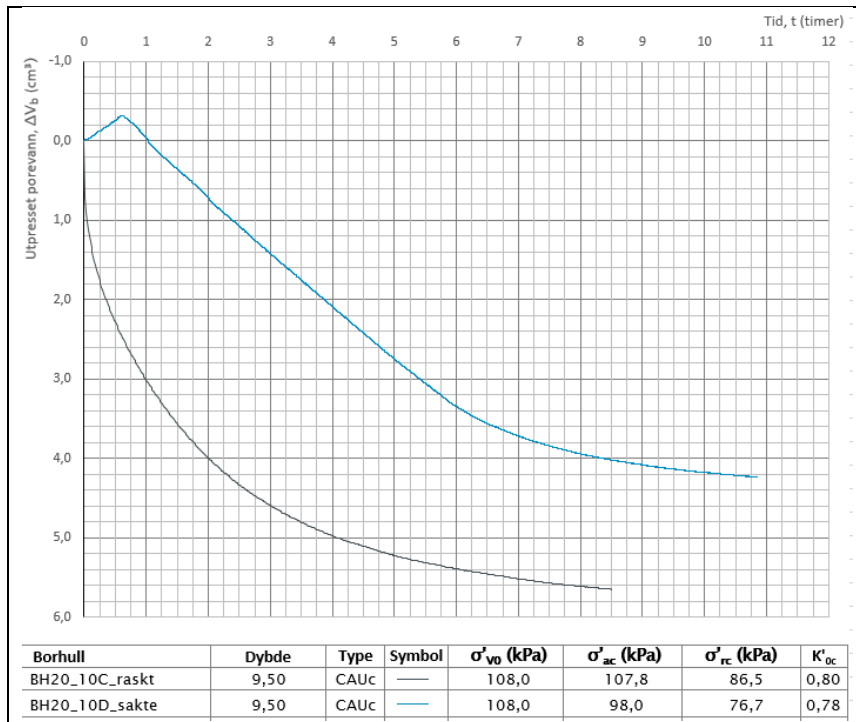


*Figur 36 Fordeling av vanninnhold etter avsluttet forsøk for parallell BH20\_10, Fv717 Sund-Bradden*

Parameterne for prøve kvalitet er bedre for den sakte testen som havnet i bedre klasse ut fra utpresset porevann i konsolideringsfasen, se tabellen for «Testresultater» i **Figur 35**.

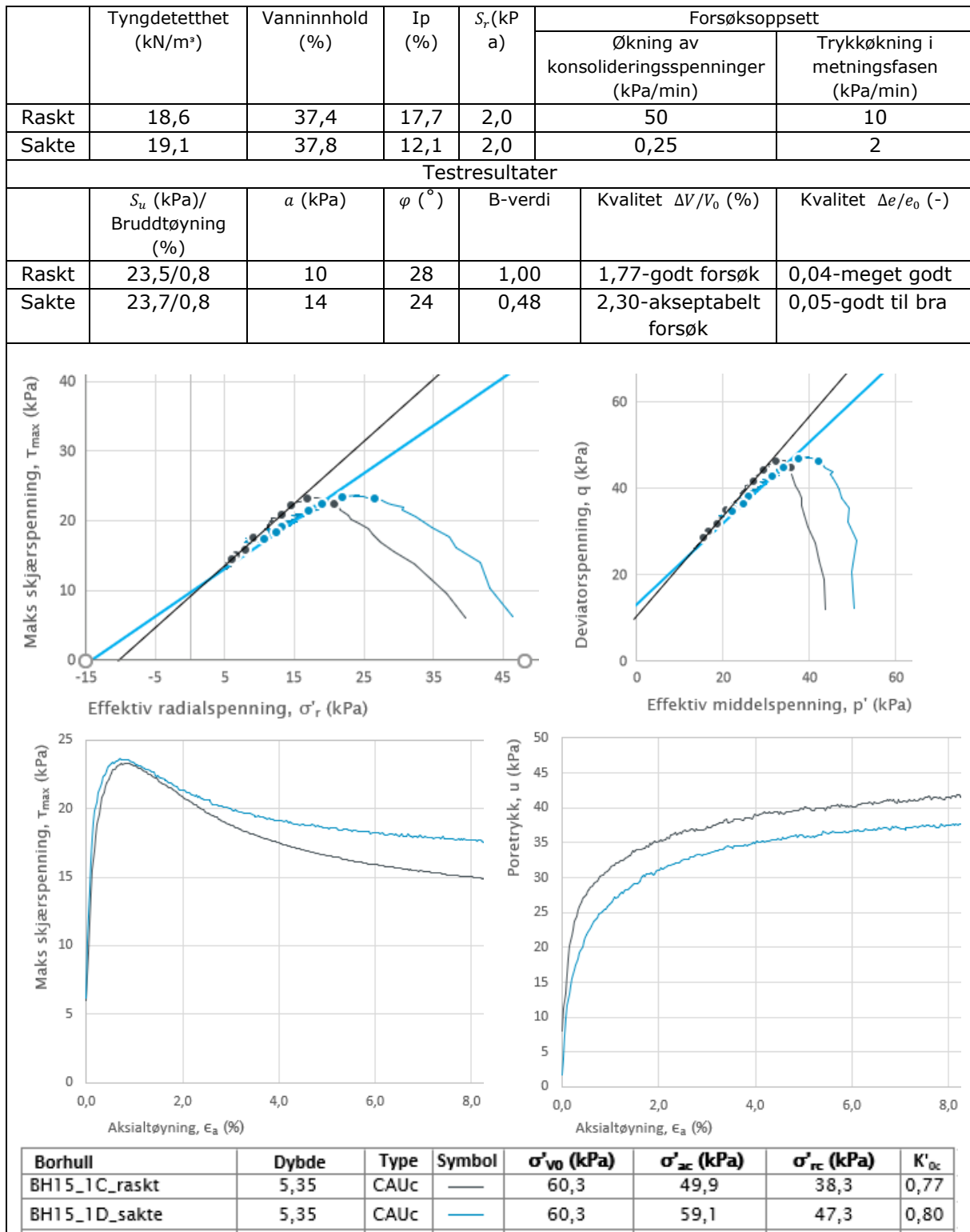
**Figur 37** demonstrerer forløpet av konsolideringsfasen der den raske testen ender dårligere med vesentlig større vannvolum presset ut under konsolideringen.





Figur 37 Forløp av konsolideringsfasen for parallell BH20\_10, Fv 717 Sund-Bradden,  $K'_{0c}=0,8$

### 3.1.5. Resultater for Fv717 Sund-Bradden. Parallell BH15\_1. Hviletrykkskoeffisient $K_0' = 0,8$



Figur 38 Resultater av treksforsøk for parallell BH15\_1, Fv717 Sund-Bradden

**Figur 38** viser at skjærforsøket startet fra forskjellige punkter grunnet forskjellen i oppnådde konsolideringsspenninger: 38,3 kPa for rask testing og 47,3 kPa -for sakte testing. Forskjell på poretrykksutvikling i skjærfasen førte til ytterlig forskyving.

Resultater av treaksforsøk demonstrerer tilnærmet lik skjærfasthet for begge prøvene i parallellen, lik bruddtøyning på 0,8%. Friksjonsvinkel er 4° lavere i den sakte testen, mens attraksjon er 4 kPa større.

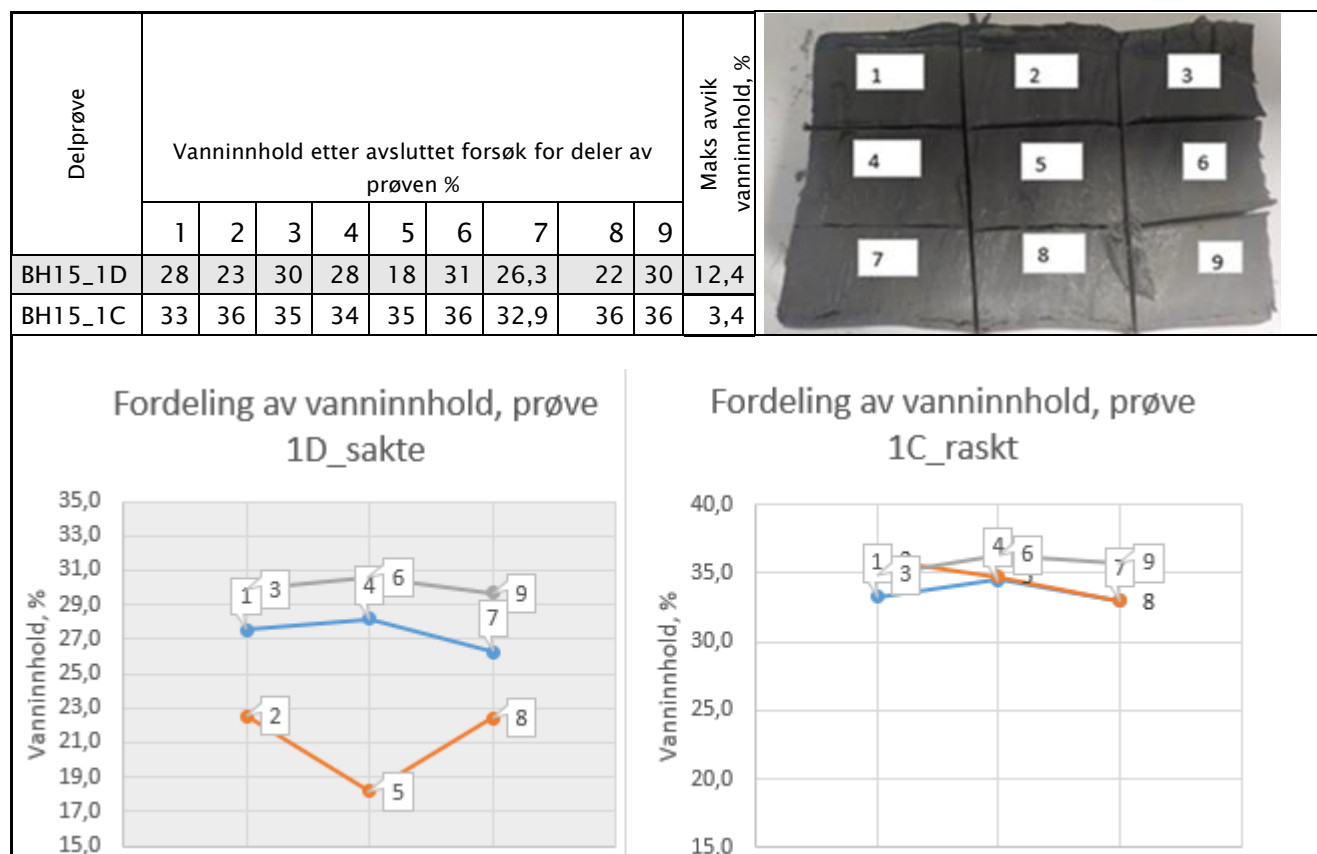
Brudlinje i skjærutviklingsplottet er noe «flatere» i sakte forsøk enn den samme linjen i raske forsøk.

Prøvene havner i forskjellige kvalitetsklasser der den raske testen kommer atskillig bedre ut med både lavere vannutpressing og poretallforhold, se tabellen «Testresultater» i **Figur 38**.

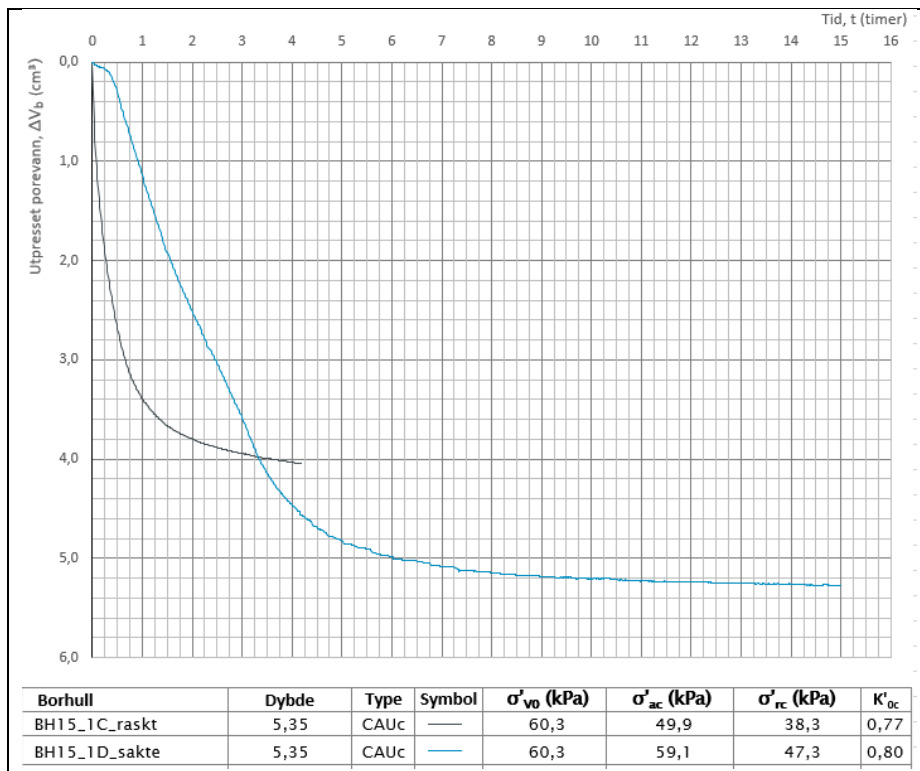
Konsolideringskurvene i

**Figur 40** viser at den raske testen demonstrerer lavere vannutpressing og kortere tid for dissipering av poretrykk.

Fordeling av vanninnhold etter avsluttet forsøk har tilnærmet lik spredning, se **Figur 39**



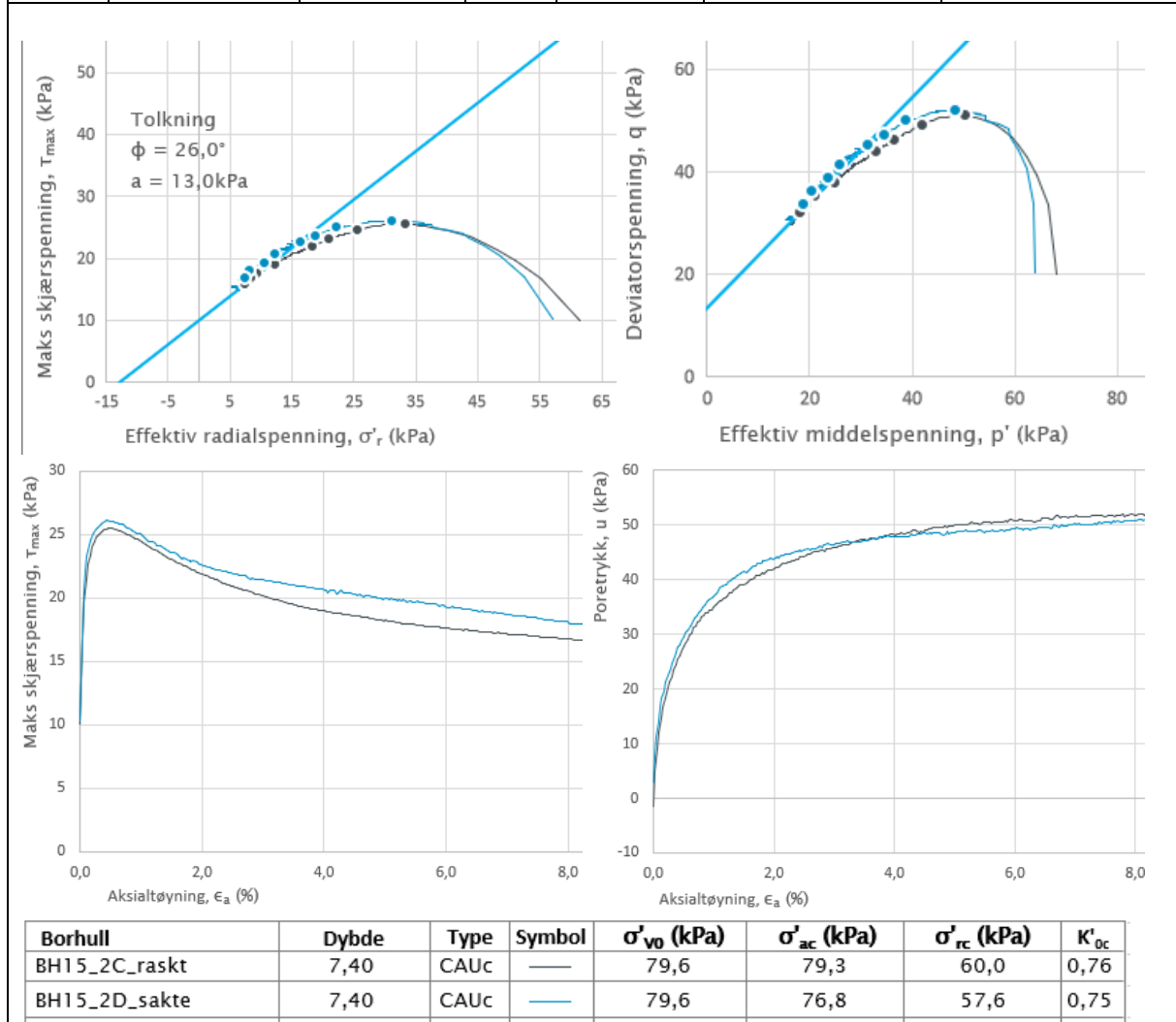
*Figur 39 Fordeling av vanninnhold etter avsluttet forsøk for parallell BH15\_1, Fv717 Sund-Bradden*



Figur 40 Forløp av konsolideringsfasen for parallell BH15\_1, Fv 717 Sund-Bradden,  $K'_{0c}=0,8$

### 3.1.6. Resultater for Fv717 Sund-Bradden. Parallell BH15\_2. Hviletrykkskoeffisient $K_0' = 0,75$

	Tyngdetetthet (kN/m <sup>3</sup> )	Vanninnhold (%)	I <sub>p</sub> (%)	S <sub>r</sub> (kPa)	Forsøksoppsett	
					Økning av konsolideringsspenninger (kPa/min)	Trykkøkning i metningsfasen (kPa/min)
Raskt	19,1	32	11	1,2	62	50
Sakte	19,3	30	9	0,7	0,25	2
Testresultater						
	S <sub>u</sub> (kPa)/ Bruddtøyning (%)	a (kPa)	φ (°)	B-verdi	Kvalitet ΔV/V <sub>0</sub> (%)	Kvalitet Δe/e <sub>0</sub> (-)
Raskt	25,8/0,5	13	26	1,12	4,46-dårlig forsøk	0,09-dårlig forsøk
Sakte	26,2/0,5	13	26	0,49	3,97-akseptabelt forsøk	0,09-dårlig forsøk



Figur 41 Resultater av treksforsøk for parallell BH15\_2, Fv717 Sund-Bradden

**Figur 41** viser tilnærmet likt forløp av spenningsstier for begge forsøkene.

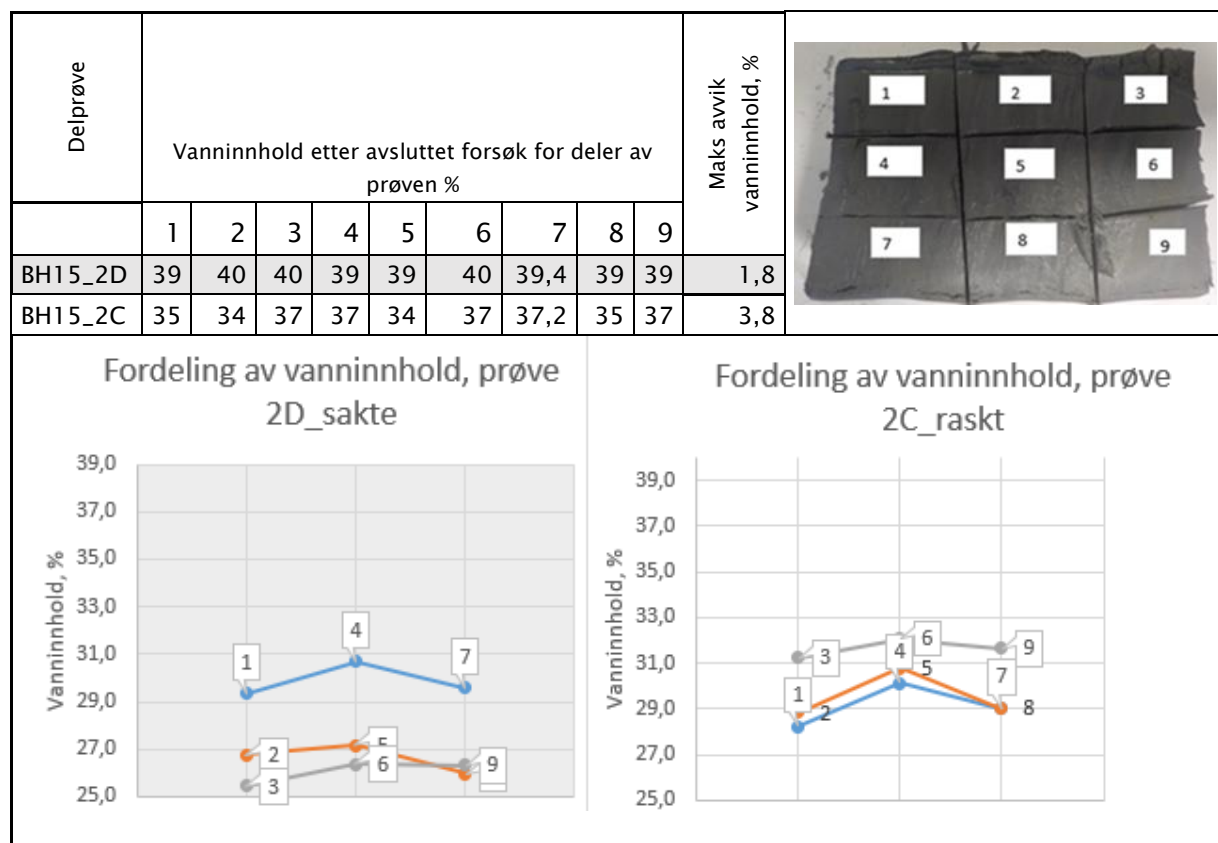
Forskjellig startpunkt for spenningsstiene i NTNU- og p-q-plottene skyldtes forskjellen på oppnådde konsolideringsspenninger med avvik på 2,4 kPa i radial spenning.

Det som ble observert er at på grunn av tilnærmet lik poretrykksutvikling og veldig liten forskjell på oppnådde konsolideringsspenninger, har spenningsstiene gått uten vesentlig forskyvning.

Geotekniske parameterne er like med en ubetydelig forskjell på skjærfasthet.

Det er mindre spredning av vanninnhold etter avsluttet forsøk ved rask testing, se

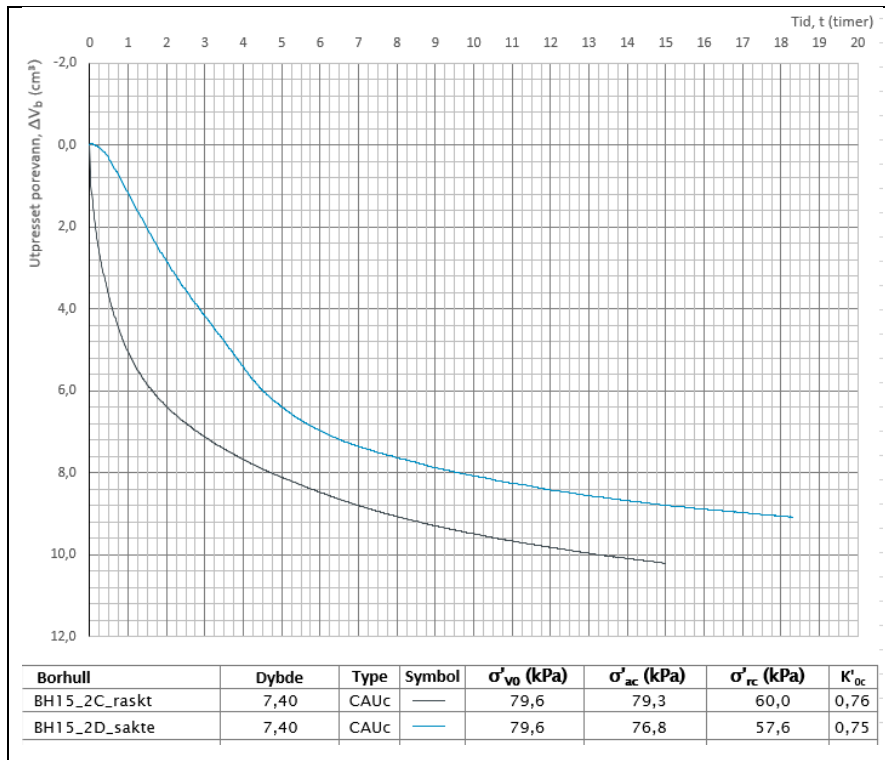
**Figur 42**



*Figur 42 Fordeling av vanninnhold etter avsluttet forsøk for parallell BH15\_2, Fv717 Sund-Bradden*

Ut fra kvalitetsparameterne fra tabell «Testresultater» i **Figur 41** ble den raske testen satt i dårligere kvalitetsklasse.

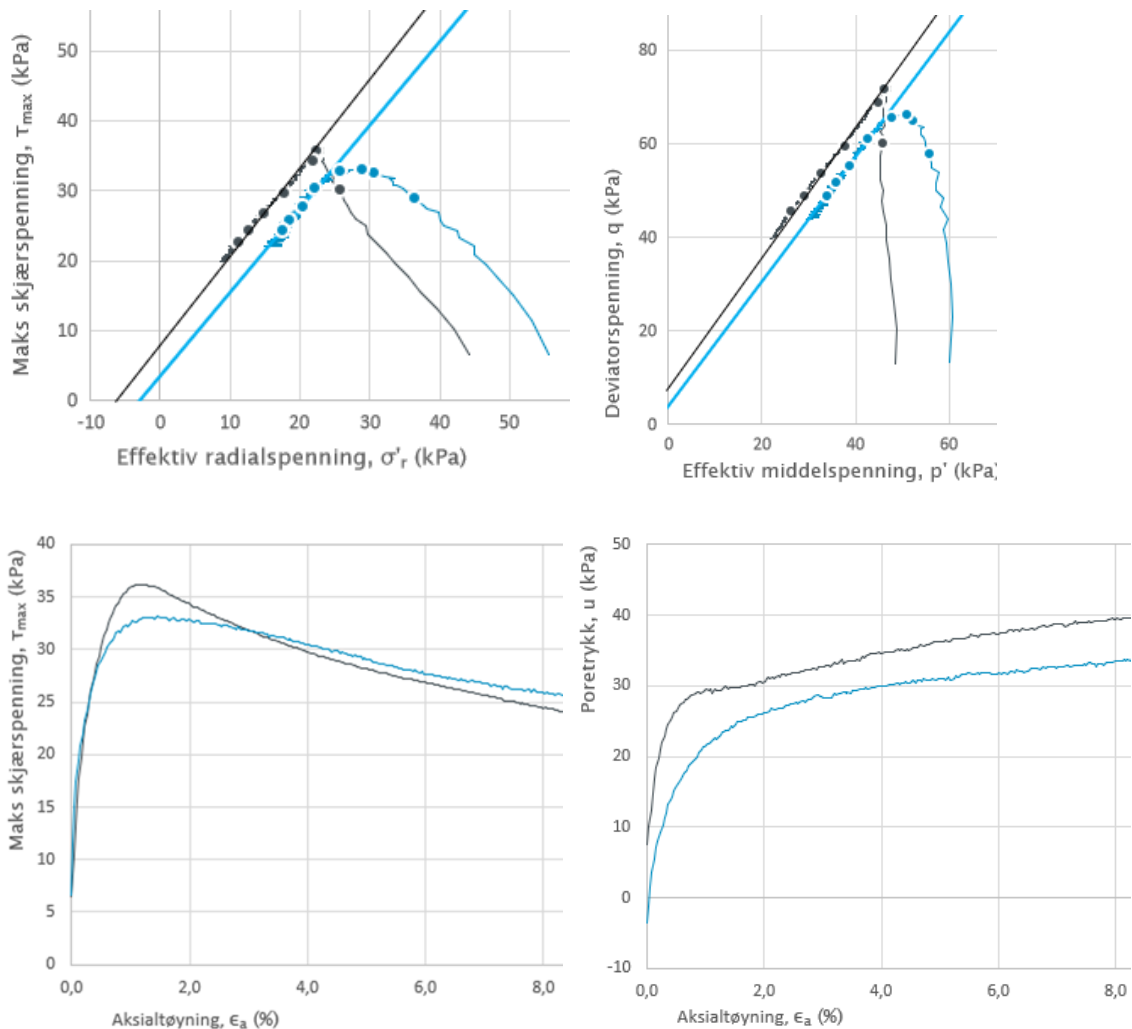
Begge prøver demonstrerer stor vannutpressing under konsolideringsfasen som indikerer på prøveforstyrrelser allerede før testing, se **Figur 43**



Figur 43 Forløp av konsolideringsfasen for parallell BH15\_2, Fv 717 Sund-Bradden,  $K'_{oc}=0,75$

### 3.1.7. Resultater for Fv715 Osen. Parallell BH2207. Hviletrykkskoeffisient $K_0' = 0,8$

	Tyngdetetthet (kN/m <sup>3</sup> )	Vanninnhold (%)	I <sub>p</sub> (%)	S <sub>r</sub> (kPa)	Forsøksoppsett	
					Økning av konsolideringsspenninger (kPa/min)	Trykkøkning i metningsfasen (kPa/min)
Raskt	18,6	39,7	10	0,3	54	50
Sakte	18,1	40,9	10	0,3	0,25	2
Testresultater						
	S <sub>u</sub> (kPa)/ Bruddtøyning (%)	a (kPa)	φ (°)	B-verdi	Kvalitet ΔV/V <sub>0</sub> (%)	Kvalitet Δe/e <sub>0</sub> (-)
Raskt	36,0/1,2	5	35,0	0,98	1,48-godt forsøk	0,03-meget godt
Sakte	33,0/1,3	3	33,0	0,80	2,06-akseptabelt forsøk	0,04-meget godt



Borhull	Dybde	Type	Symbol	$\sigma'_{v0}$ (kPa)	$\sigma'_{ac}$ (kPa)	$\sigma'_{rc}$ (kPa)	$K'_{0c}$
2207_5C_raskt	6,50	CAUc	—	65,0	55,9	43,1	0,77
2207_5D_sakte	6,50	CAUc	—	65,0	72,1	59,3	0,82

Figur 44 Resultater av treksforsøk for parallell BH2207, Fv715 Osen



**Figur 44** demonstrerer en usedvanlig tydelig for 54mm-prøve bruddkurve i det raske forsøket.

Forskyvning mellom kurvene for rask og sakte testing i NTNU-og p-q-plotterne er grunnet forskjellen på oppnådde konsolideringsspenninger og ulik poretrykksutvikling.

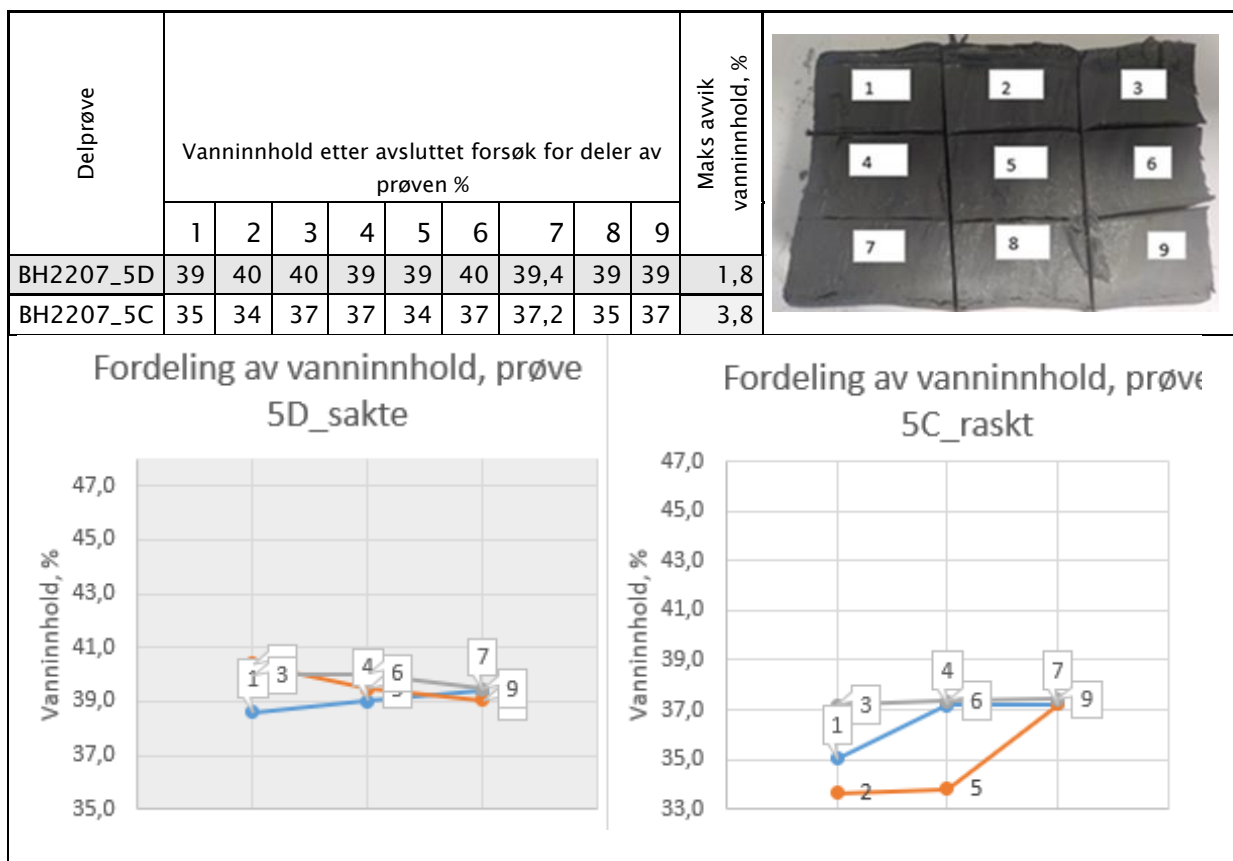
Spenningsstien for rask testing viser høyere skjærfasthet og en «spiss» ved bruddet som indikerer på prøve med god kvalitet.

Bruddlinjene i p-q-plottet går tilnærmet rett opp før de når bruddpunktet som også er et tegn til god kvalitet.

Skjærutviklingskurve er mer tydelig ved rask testing. Aksial tøyning ved bruddet er lav for begge prøvene. Både attraksjon og friksjonsvinkel er noe større ved rask testing i forhold til sakte testing.

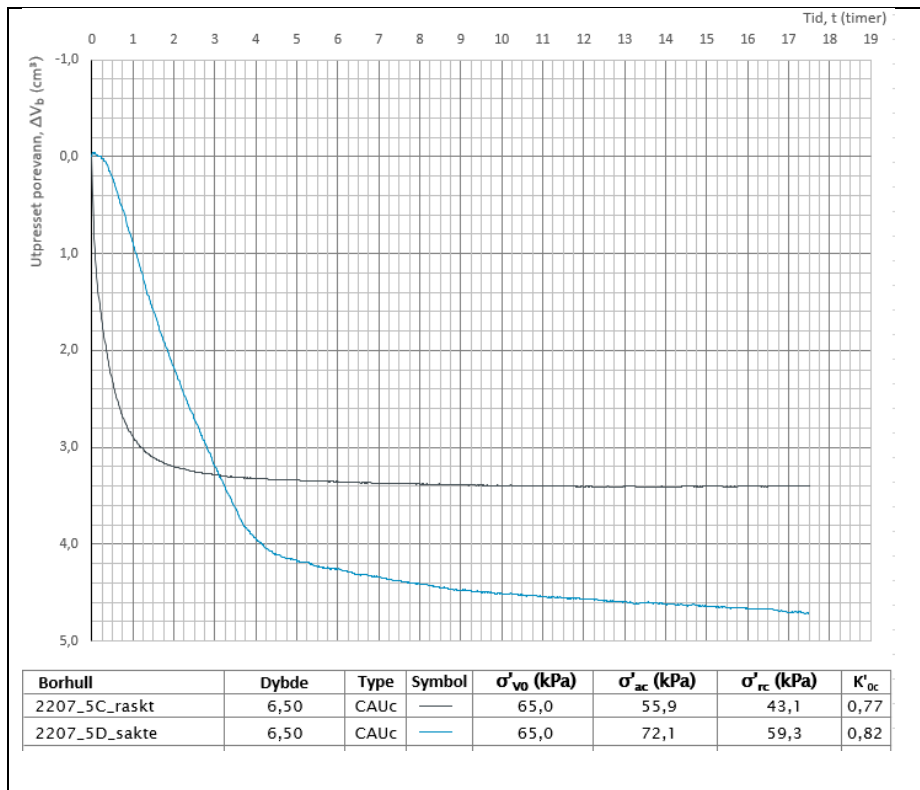
Skjærutviklings plottet viser en mer tydelig og «brattere» bruddlinje ved den raske testen. Den sakte testen endte med en noe «flatere» kurve.

Det er mindre spredning av vanninnhold etter avsluttet forsøk ved sakte testing, se **Figur 45**



*Figur 45 Fordeling av vanninnhold etter avsluttet forsøk for parallell BH2207, Fv715 Osen*

Vurdering av kvalitet ut fra mengde utpresset porevann og poretallforhold satte den raske testen i en bedre klasse, se tabell «Testresultater» i **Figur 44**. Konsolideringsfasen gikk bedre for den raske testen: kortere tid for dissipering av poretrykket og lavere vannutpressing, se **Figur 46**



Figur 46 Forløp av konsolideringsfasen for parallell BH2207, Fv 715 Osen,  $K'_{oc}=0,8$

### 3.2. Feilkilder.

Det var utført 7 parallelle treaksforsøk for 54mm-prøver ved ulike forsøksbetingelser. Det er registrert at de fleste bruddlinjene hadde en forskyvning i forhold til hverandre. Den ene årsaken til dette ble forklart tidligere: forskjell i oppnådde konsolideringsspenninger. Her er det lite en operatør kan gjøre siden denne feilen ligger i instrumentene forsøkene ble utført med.

Den andre årsaken er ulik poretrykksutvikling under skjærforsøket. Poretrykket målt under skjærfasen har en avgjørende betydning for forløpet av spenningsstier. Når poretrykket for de to testene i en parallell utvikler seg likt, vil også bruddlinjene for like prøver følge den samme utviklingen.

For å forstå hvorfor poretrykksrespons for veldig like prøver var så forskjellig ble det analysert hvilken B-verdi ble registrert ved hvert forsøk.

All testingen ble utført på to forskjellige treaksapparater. Det apparatet som ble benyttet for rask testing, er en ny forbedret utgave. Det var enklere å bli kvitt luftbobler etter vanlig gjennomspyling og få til bedre B-verdi.

Testene utført på denne maskina viste en god B-verdi samt at raske tester hadde i fleste tilfeller høyere poretrykk enn det var i sakte tester.

Apparatet som ble brukt for sakte testing var en eldre utgave med enklere kransystem. Det var vanskelig å oppnå et luftfritt system, alle resultatene unntatt en, demonstrerte dårlig B-verdi (under 0,8).

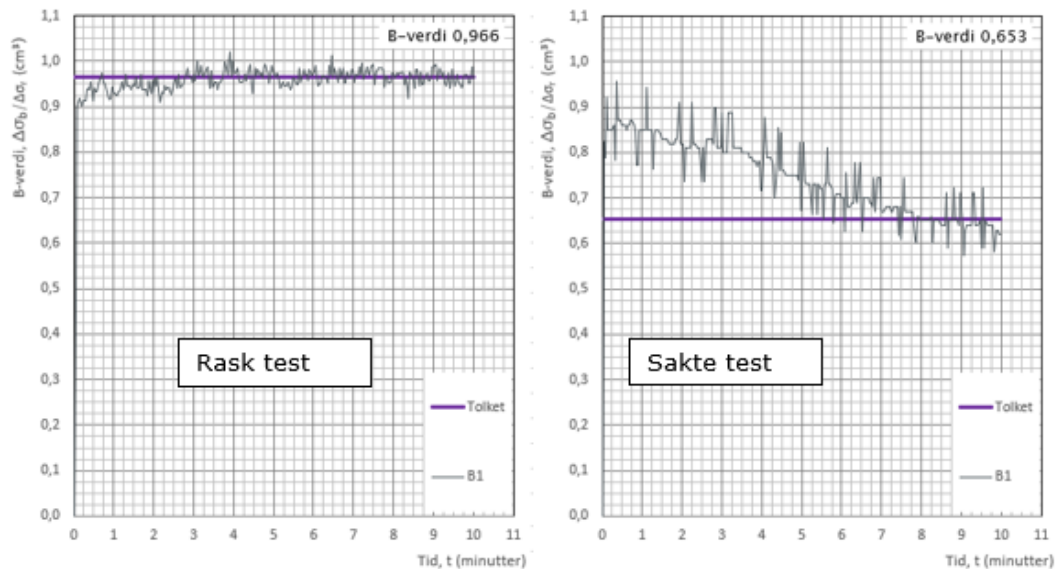
Oversikt over B-verdi tatt fra bilag med undernummer 1 og analyse av forløp av spenningsstier er presentert i **Tabell 9**.

Borhull	B-verdi	Oppnådde radielle spenninger (kPa)	Poretrykksutvikling i skjærfasen	Forløp av bruddkurvene	
RK6	sakte	0,40	129,3	ulik	Nesten lik startpunkt, men forskyvning i forhold til hverandre videre i skjærforsøket
	rask	0,91	130,3		
BH19	sakte	0,65	29,7	ulik	Nesten lik startpunkt, men forskyvning i forhold til hverandre videre i skjærforsøket
	rask	0,97	23,1		
BH20_11	sakte	0,35	94,1	ulik	Ulik startpunkt, forskyvning i forhold til hverandre videre i skjærforsøket
	rask	1,0	86,7		
BH20_10	sakte	1,0	76,7	tilnærmet lik	Ulik startpunkt, men forløpet er ganske likt etterpå
	rask	1,0	86,5		
BH15_1	sakte	0,50	47,3	ulik	Ulik startpunkt, forskyvning i forhold til hverandre videre i skjærforsøket
	rask	1,0	38,3		
BH15_2	sakte	0,50	57,6	tilnærmet lik	Liten forskjell i startpunkt, forløpet er ganske likt etterpå
	rask	1,0	60		
BH2207	sakte	0,80	59,3	ulik	Ulik startpunkt, forskyvning i forhold til hverandre videre i skjærforsøket
	rask	0,99	43,1		

Tabell 9 B-verdi og analyse av kurvens forløp for alle parallellene

**Tabell 9** viser at de fleste forsøkene i en parallell demonstrerer en vesentlig forskjell på B-verdi. Der det ble registrert altfor lav i forhold til kravet B-verdi, ble det målt lavere poretrykk.

Om en ser på tendensen hvordan B-verdi bygges opp under B-testen for de to instrumentene, så ser man at den starter ved lavere verdi og slik forventet øket med tiden i den raske testen. Den gjør det motsatte i den sakte testen som tyder på noen uoverensstemmelser ved målinger. Det er vanskelig å peke på feilen siden man ikke har den tekniske kompetansen om instrumentene, men denne utviklingen avdekker en åpenbar feil.



*Figur 47 B-sjekk-fase i den raske og sakte testen*

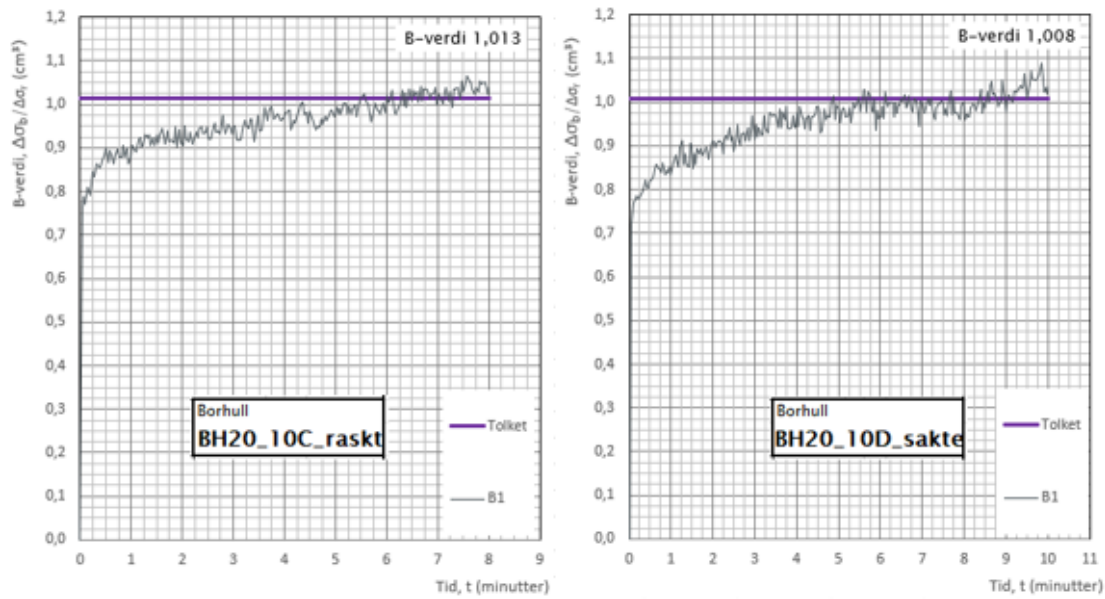
Det er bare to paralleller fra **Tabell 9** som demonstrerer tilnærmet lik poretrykkutvikling under skjærforsøket.

Parallell BH20\_10 ble testet med god B-verdi for begge prøvene. Dette resulterte i tilnærmet likt poretrykkutvikling og forløp av spenningsstier.

Om en sammenligner oppbygging av B-verdi for begge instrumentene mens parallellen BH20\_10 var under testingen, får man en forventet økning med tiden, se **Figur 48**.

Parallell BH15\_2 med dårlig B-verdi i sakte forsøk demonstrerte likevel tilnærmet lik poretrykkutvikling og forløp av spenningsstier.

Oppbygging av B-verdi hadde den samme synkende utviklingen som det er vist i **Figur 47**. Likevel viser det seg at instrumentet hadde målt det samme poretrykket som instrumentet med høy B-verdi. Dette er bare ett tilfelle blant de 7 parallelle testene som ikke lar seg forklare.



Figur 48 B-test, parallell BH20\_10

Mens oppgaven ble skrevet og forsøk utført, skjedde det en del forandringer på laboratoriet: det ble kjøpt et treksapparat til som er av samme type som den nyere utgaven raske forsøk ble utført på.

Kapitel 3.3 og 4 vil handle om testingen som ble utført på de to identiske treksapparatene, der problemet med luft i systemet og dårlig B-verdi ble eliminert.

### 3.3. Testing av 54 mm prøver utført på identiske treaksapparater.

Problemer med oppnåelse av tilstrekkelig B-verdi i tidligere forsøk gjorde direkte sammenligning av resultater til en vanskelig oppgave.

Dette kapitlet presenterer resultater av treakstesting fått ved hjelp av to identiske treaksapparater. Det er utført 4 parallelle treaksforsøk for 54 mm-prøver fra to ulike prosjekter. Prøvene ble tatt fra forskjellige dybder. Det er valgt lik anisotropi for alle forsøkene der  $K0'=0,8$ . Provedata er vist i **Tabell 10**

Oppdrag	Dato, prøveuttak	Dato, åpning	Delprøve	Lagring på kjøling i uåpnet stand, dager	Lagring i åpnet stand, timer	Hull nr.	Dybde, m
Fv721 Mebustad	01.02.2019	14.02.2019	1_3E	13	0	1	6,0-6,8
	01.02.2019	14.02.2019	1_3D	13	0	1	6,0-6,8
	01.02.2019	15.02.2019	1_2E	14	0	1	5,0-5,8
	01.02.2019	15.02.2019	1_2B	14	0	1	5,0-5,8
Fv715 Tverdalselvbua	05.02.2019	16.02.2019	1_9C	11	0	1	10,0-10,8
	05.02.2019	16.02.2019	1_9B	11	0	1	10,0-10,8
	05.02.2019	17.02.2019	3_3E	12	0	3	6,0-6,8
	05.02.2019	17.02.2019	3_3D	12	0	3	6,0-6,8

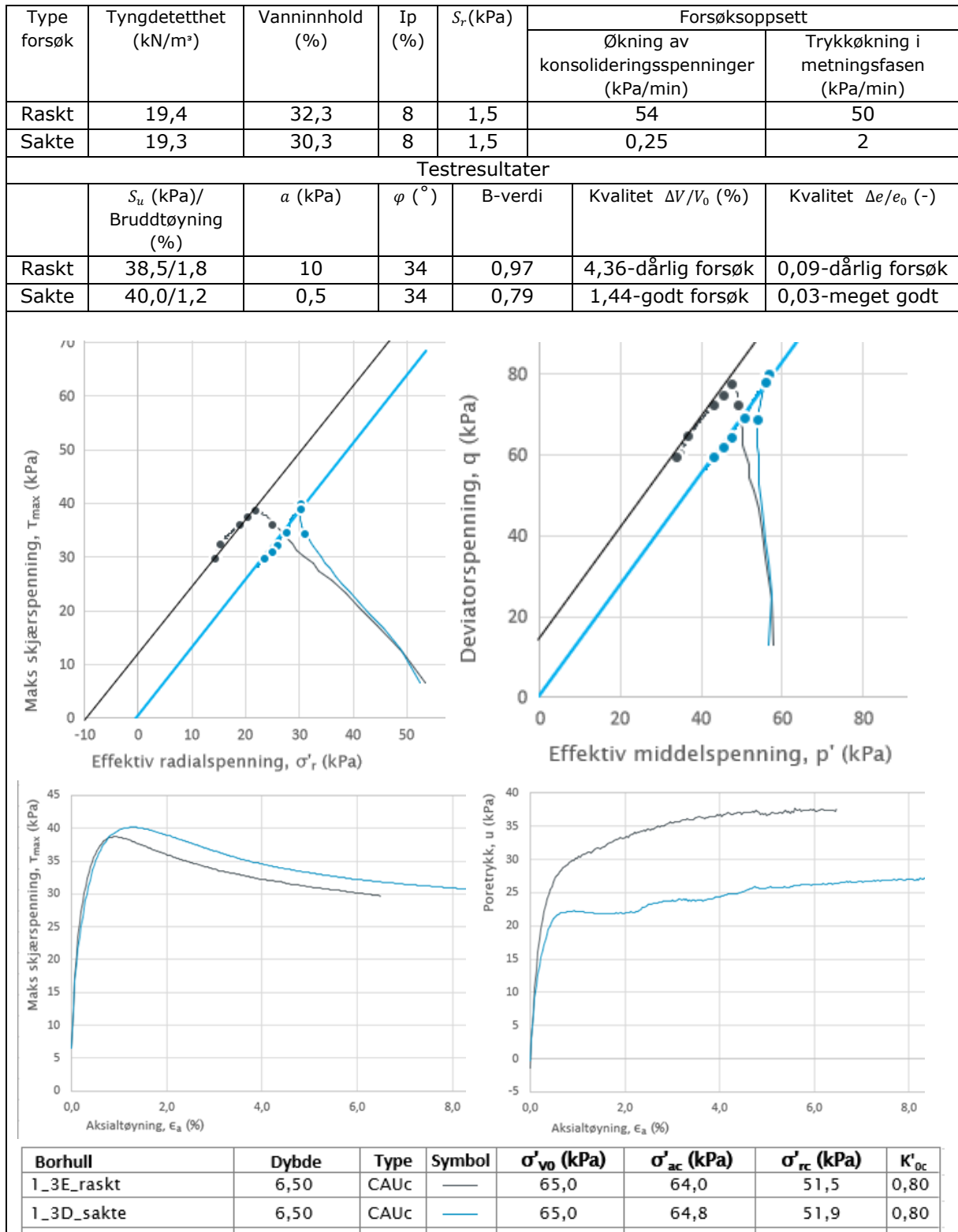
Tabell 10 Provedata for 54 mm prøver testet ved hjelp av like treaksapparater

En del rutineundersøkelser ble utført, blant dem tyngdetetthet, vanninnhold, skjærfasthet i omrørt stand, plastisitetsindeks.

Resultater av forsøkene er presentert i kapitel 3.3.1-3.3.4

Utførelsesrapporter for alle testete paralleller er presentert i bilag 15-18.

### 3.3.1. Resultater for Fv721 Mebustad. Parallell 1\_3. Hviletrykkskoeffisient $K_{0'}=0,8$



Figur 49 Resultater av parallell 1\_3, Fv721 Mebustad

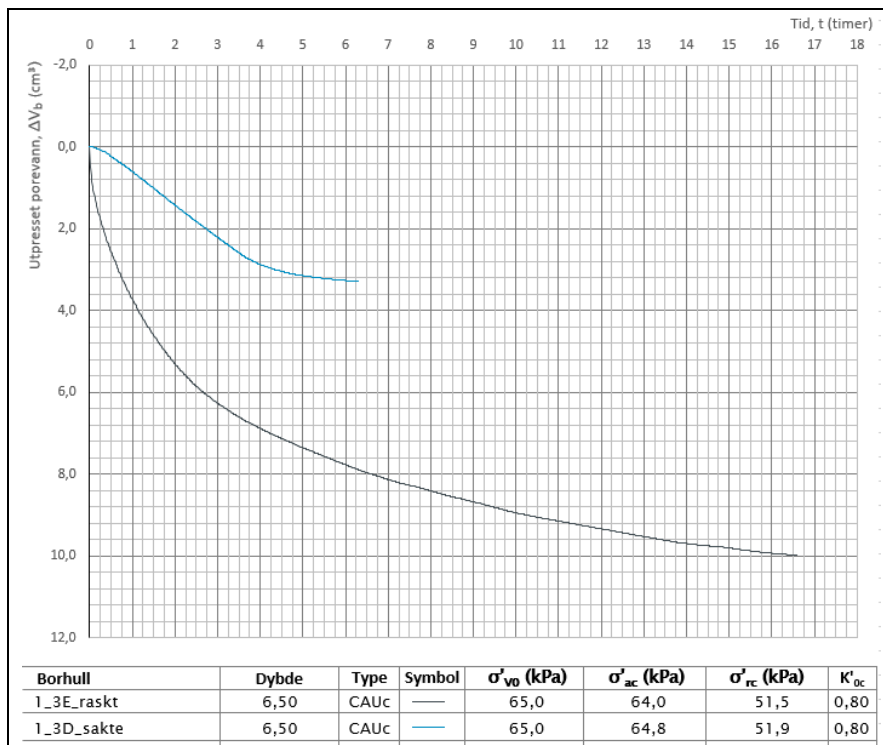
Figur 49 viser at spenningsstiene for begge forsøk starter med tilnærmet likt forløp. Betydelig forskjell på poretrykksutvikling i skjærfasen førte til forskjyving av

bruddkurver og dermed ulik attraksjon. Dette kunne skyldes altfor lav B-verdi i den sakte testen som påvirket poretrykkmåleren.

Den raske testen endte med 1,5 kPa lavere skjærfasthet, friksjonsvinkler er like. Bruddtøyning er litt lavere ved den sakte testen.

Kvalitetsparametere fra tabellen «Testresultater» i **Figur 49** avdekker vesentlig prøveforstyrrelse i den raske testen. Den sakte testen havnet i klassen for best kvalitet, mens den raske er i en dårligst kvalitetsklasse.

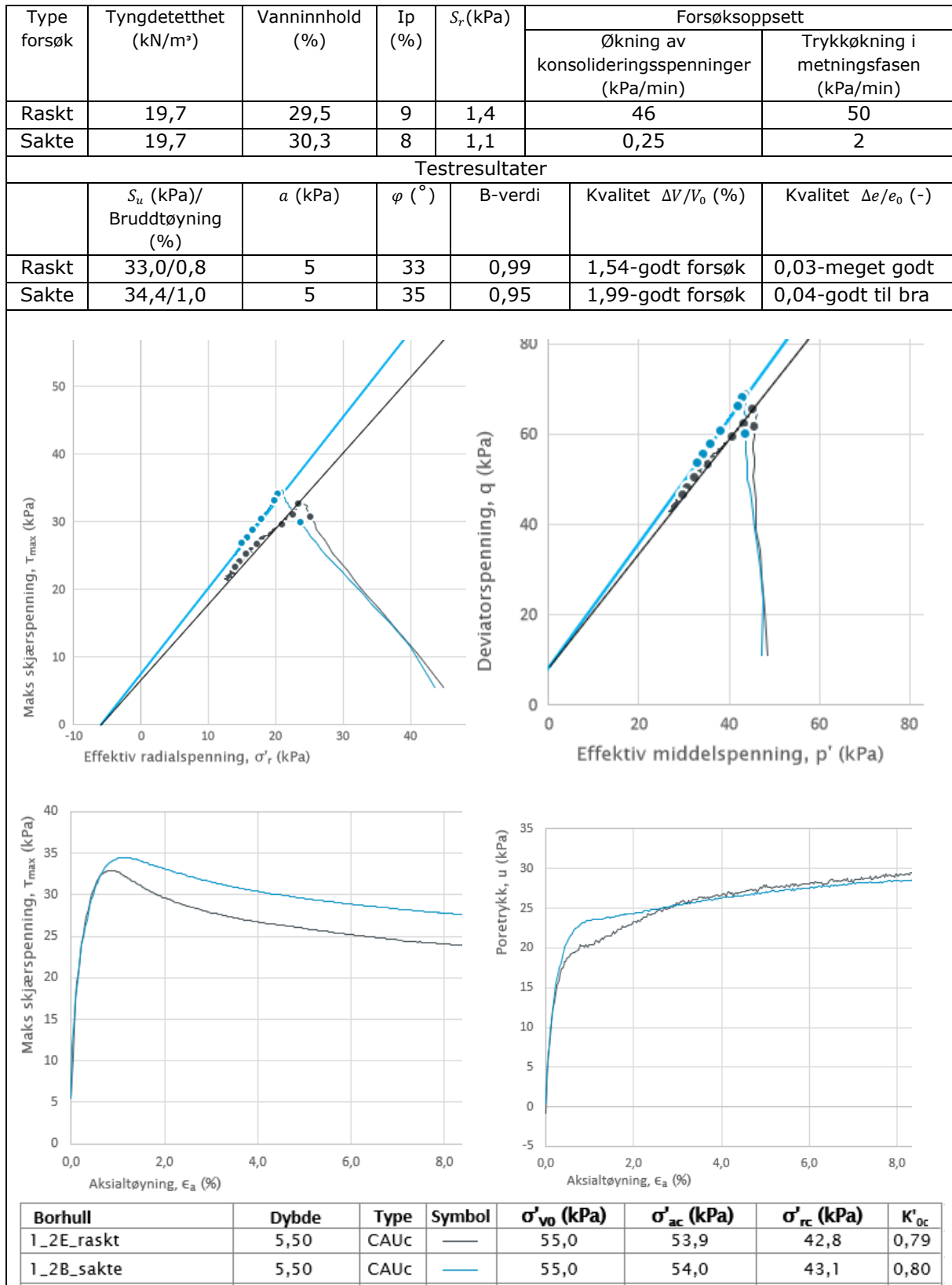
**Figur 50** viser forløpet av konsolideringsfasen for begge prøvene i parallellen, der det kommer fram vesentlig større vannutpressing under konsolideringen i den raske testen, samt at tiden for dissipering av poretrykket er betydelig større.



Figur 50 Forløp av konsolideringsfasen for parallell 1\_3, Fv 721 Mebustad,  $K0'=0,8$



### 3.3.2. Resultater for Fv721 Mebustad.Parallell 1\_2. Hviletrykkskoeffisient $K_0' = 0,8$



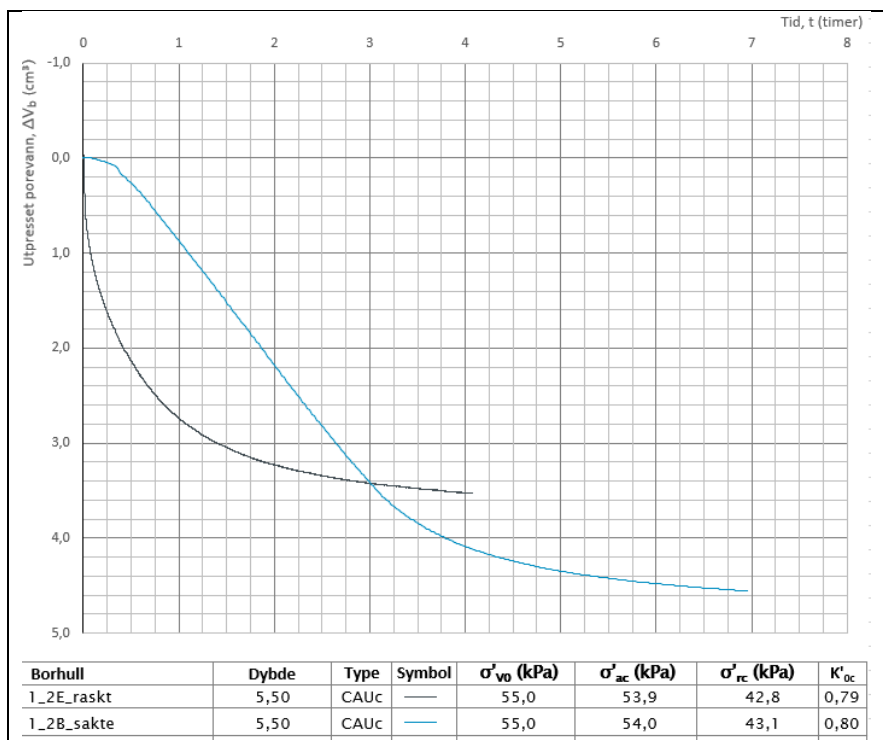
Figur 51. Resultater av parallell 1\_2, Fv721 Mebustad

**Figur 51** viser tilnærmet likt forløp av spenningsstiene for begge forsøk.

Den raske testen endte med 1,4 kPa lavere skjærfasthet i forhold til den sakte testen.

Attraksjonen er tolket som lik for begge testene, friksjonsvinkel er  $2^\circ$  større ved den sakte testen. Poretrykksutvikling i skjærfasen er ganske lik for begge forsøkene inntill bruddpunktet. Forskjellene på resultater er små og høyst sannsynlig skyldes forskjellen på materialelegenskaper.

**Figur 52** viser at konsolideringsfasen i den raske testen ble avsluttet med mindre volum for utpresset porevann som tyder på mindre prøveforstyrrelse i forhold til den sakte testen. Den raske testen havnet i bedre kvalitetsklasse ut fra kvalitetsparametere presentert i tabellen for testresultater fra **Figur 51**



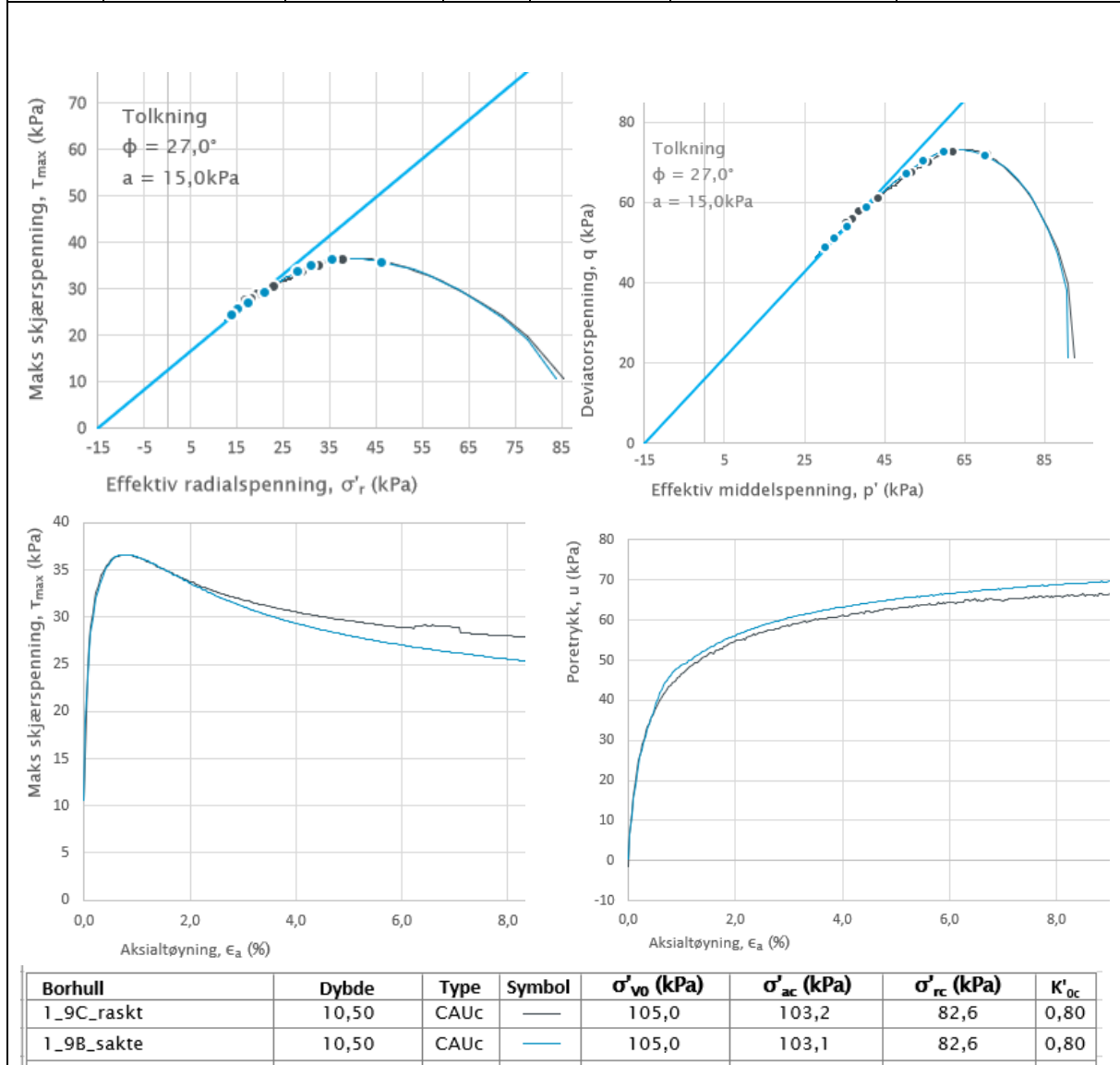
*Figur 52 Forløp av konsolideringsfasen for parallell 1\_2, Fv 721 Mebustad,  $K0'=0,8$*

### 3.3.3. Resultater for Fv715 Tverdelselbrua. Parallell 1\_9. Hviletrykkskoeffisient $K_{0'}=0,8$

Type forsøk	Tyngdetetthet (kN/m <sup>3</sup> )	Vanninnhold (%)	I <sub>p</sub> (%)	S <sub>r</sub> (kPa)	Forsøksoppsett	
					Økning av konsolideringsspenninger (kPa/min)	Trykkøkning i metningsfasen (kPa/min)
Raskt	20,3	26,1	11	2,3	86	50
Sakte	20,3	28,8	11	2,1	0,25	2

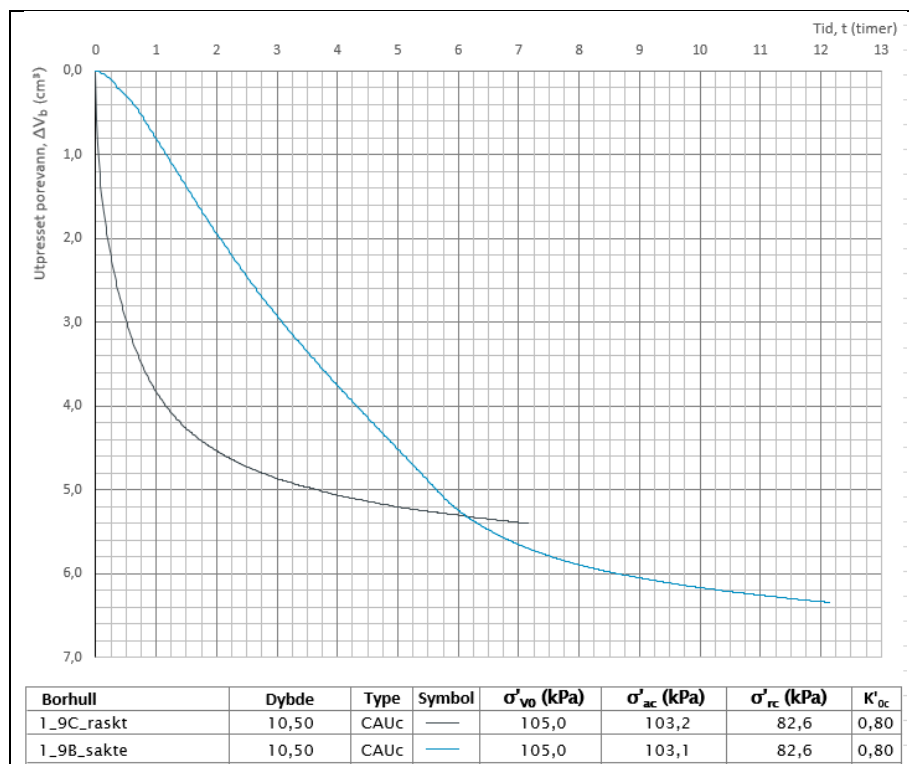
Testresultater						
	S <sub>u</sub> (kPa)/ Bruddtøyning (%)	a (kPa)	φ (°)	B-verdi	Kvalitet ΔV/V <sub>0</sub> (%)	Kvalitet Δe/e <sub>0</sub> (-)
Raskt	36,7/0,7	15	27	0,98	2,36-akseptabelt forsøk	0,06-godt til bra
Sakte	36,7/0,7	15	27	0,96	2,77-akseptabelt forsøk	0,06-godt til bra



Figur 53. Resultater av parallell 1\_9, Fv715 Tverdelselbrua

**Figur 53** viser nesten identisk forløp av spenningsstiene. Poretrykksutvikling er tilnærmet lik. Begge forsøkene endte med like resultater i forhold til skjærfasthet, friksjonsvinkel og attraksjon.

**Figur 54** viser forløpet av konsolideringsfasen der den raske testen demonstrerer mindre volum av utpresset porevann. Kvalitetsparametere fra tabellen «Testresultater» i **Figur 53** er noe bedre for den raske testen, men begge havnet i den samme kvalitetsklassen.

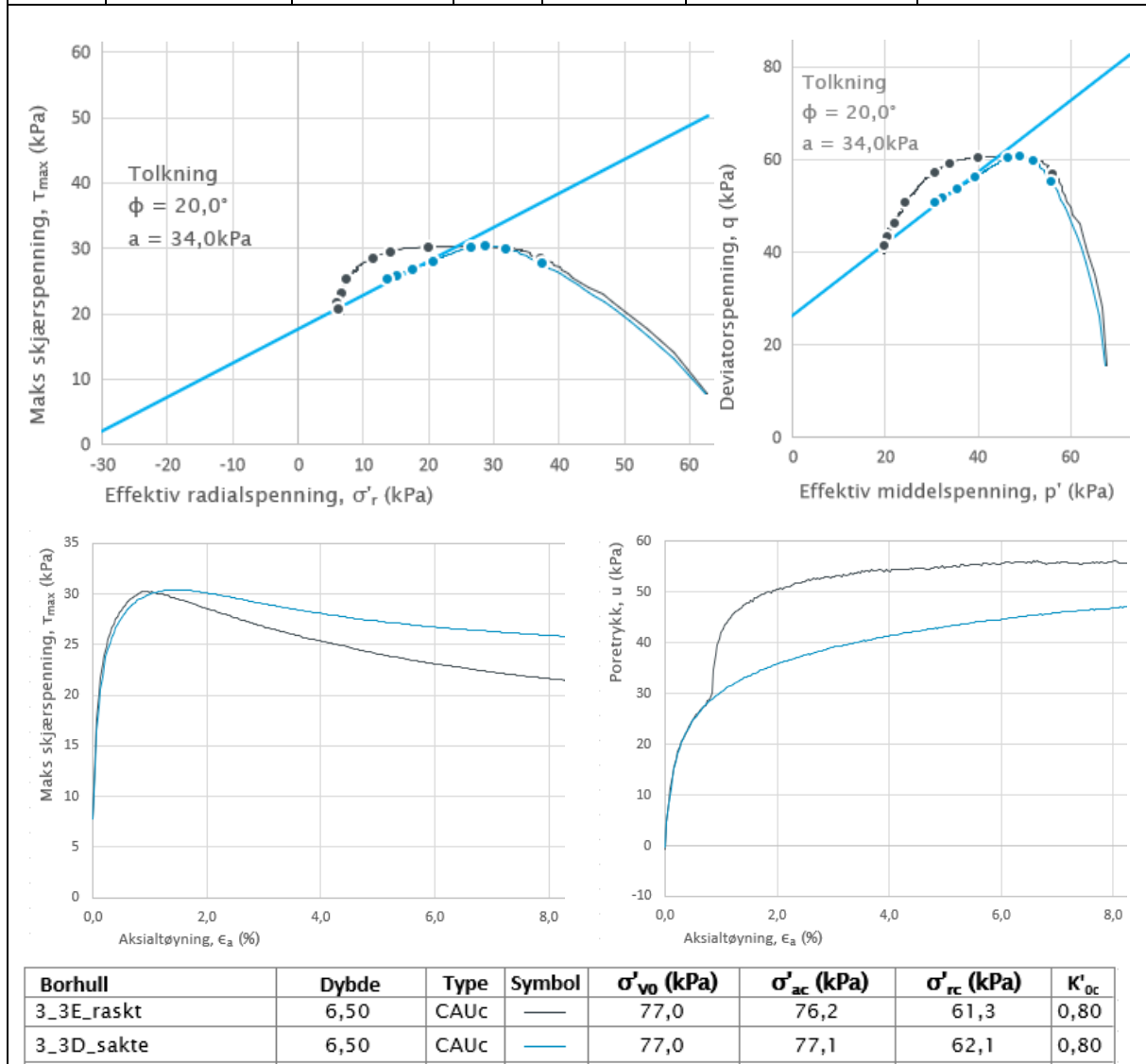


*Figur 54 Forløp av konsolideringsfasen for parallell 1\_9, Fv 715Tverdelselbrua,  $K0'=0,8$*

### 3.3.4. Resultater for Fv715 Tverdelselvbua. Parallell 3\_3.

Hviletrykkskoeffisient  $K0'=0,8$

Type forsøk	Tyngdetetthet (kN/m <sup>3</sup> )	Vanninnhold (%)	Ip (%)	S <sub>r</sub> (kPa)	Forsøksoppsett	
					Økning av konsolideringsspenninger (kPa/min)	Trykkøkning i metningsfasen (kPa/min)
Raskt	18,0	40,1	22	4,2	64	50
Sakte	17,5	45,3	23	4,3	0,25	2
Testresultater						
	S <sub>u</sub> (kPa)/ Bruddtøyning (%)	a (kPa)	φ (°)	B-verdi	Kvalitet ΔV/V <sub>0</sub> (%)	Kvalitet Δe/e <sub>0</sub> (-)
Raskt	30,0/-	-	-	0,96	3,41-akseptabelt forsøk	0,06-godt til bra
Sakte	30,0/1,4	34	20	0,94	2,81-akseptabelt forsøk	0,05-godt til bra



Figur 55. Resultater av parallell 3\_3, Fv715 Tverdelselvbua

Figur 55 viser tilnærnet likt forløp av spenningsstiene og lik poretrykksutvikling inntil bruddpunktet. Skjærfastheten er tolket som lik for begge forsøkene.

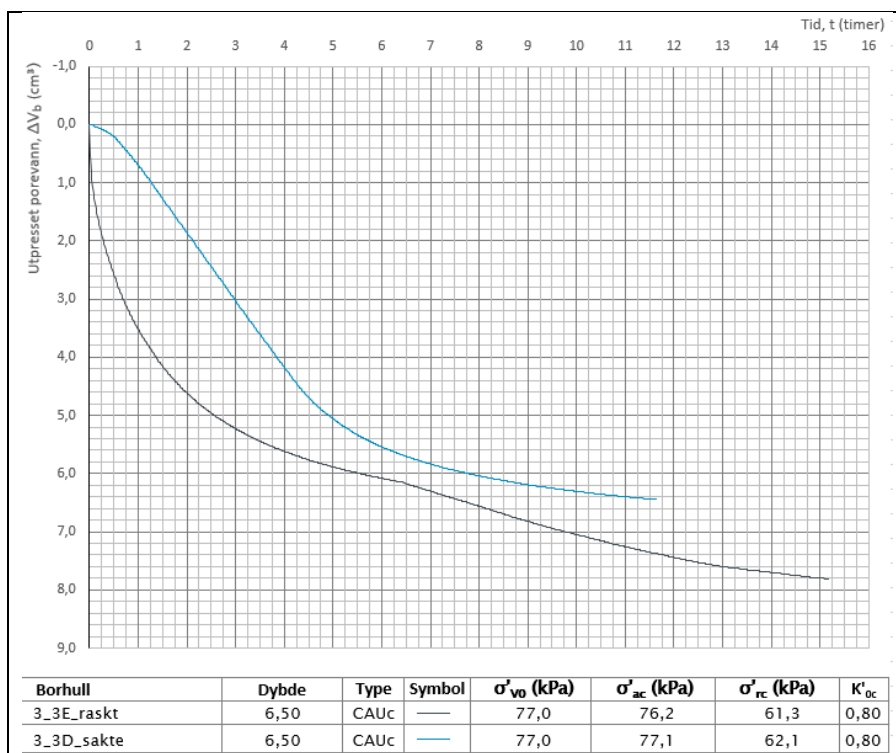
Etter bruddet skjedde noe med prøven i den raske testen: poretrykket økte kraftig, og dette endret forløpet av spenningsstien. Forløpet ser unaturlig ut, spenningsstien går en stund parallelt akse for effektiv radial spenning og deretter «faller» ned.

Det virker som om årsaken til dette kan være en teknisk feil knyttet til utstyret. Noe som påvirket poretrykkmåleren på dette stadiet. Dette gjør at attraksjon og friksjonsvinkel ikke kan tolkes for den raske testen.

Skjærutviklingskurver har tilnærmet likt forløp. Kurven for den raske testen ser noe «brattere» ut.

**Figur 56** viser forløp av konsolideringsfasen for begge testene. Den raske testen demonstrerer større vannutpressing og større varighet av konsolideringsfasen.

Begge testene havnet likevel i den samme kvalitetsklassen, se tabelle «Testresultater» i **Figur 55**



*Figur 56 Forløp av konsolideringsfasen for parallell 3\_3, Fv 715Tverdelsevbrua,  $K'_{oc}=0,8$*

### 3.4. Konsolideringstid for 54 mm-prøver

Hensikten med raske trykkøkninger i treaksiale forsøk er tidsbesparelse uten merkbart kvalitetstap. Man må derfor sjekke om raske trykkøkninger i kun konsolideringsfasen (metningsfasen skal ikke diskuteres her) forkorter testingen.

**Tabell 11** viser en oversikt over konsolideringstiden for hver prøve i parallellene. Konsolideringskurvene for hver parallell er presentert i vedlegg 22-32.

Parallell		Lengde for konsolideringsfasen (timer)	Tidsbesparelse ved bruk av raske testinger (timer/%)
RK6	Rask	8,3	4,4/35
	Sakte	12,7	
BH19	Rask	2,9	0,2/6
	Sakte	3,1	
BH20_11	Rask	11,7	2/14,5
	Sakte	13,7	
BH20_10	Rask	8,5	2,4/22
	Sakte	10,9	
BH15_1	Rask	3,6	2,6/41,9
	Sakte	6,2	
BH15_2	Rask	14	0/0
	Sakte	14	
BH2207	Rask	2,6	2,2/45,8
	Sakte	4,8	
1_3	Rask	16,5	-10,2/0
	Sakte	6,3	
1_2	Rask	3,9	3,1/44
	Sakte	7,0	
1_9	Rask	6,8	5,2/43
	Sakte	12	
3_3	Rask	15	-3,1/0
	Sakte	11,9	

*Tabell 11 Oversikt over konsolideringstid for 54 mm-prøver*

54 mm-prøver er utgangspunktet forstyrret. Dette er årsaken til at konsolideringsfasen ikke ble redusert i vesentlig grad når man «sparer» tid ved å droppe sakte trykkøkning. I 3 av 11 forøk (merket med rød farge i tabellen) ble konsolideringstiden for raske forsøk enten den samme eller enda lengre enn i sakte forsøk. Dette imidlertid ser annerledes ut når det gjelder prøver av god kvalitet, blokkprøver, som blir omtalt i neste kapitel.

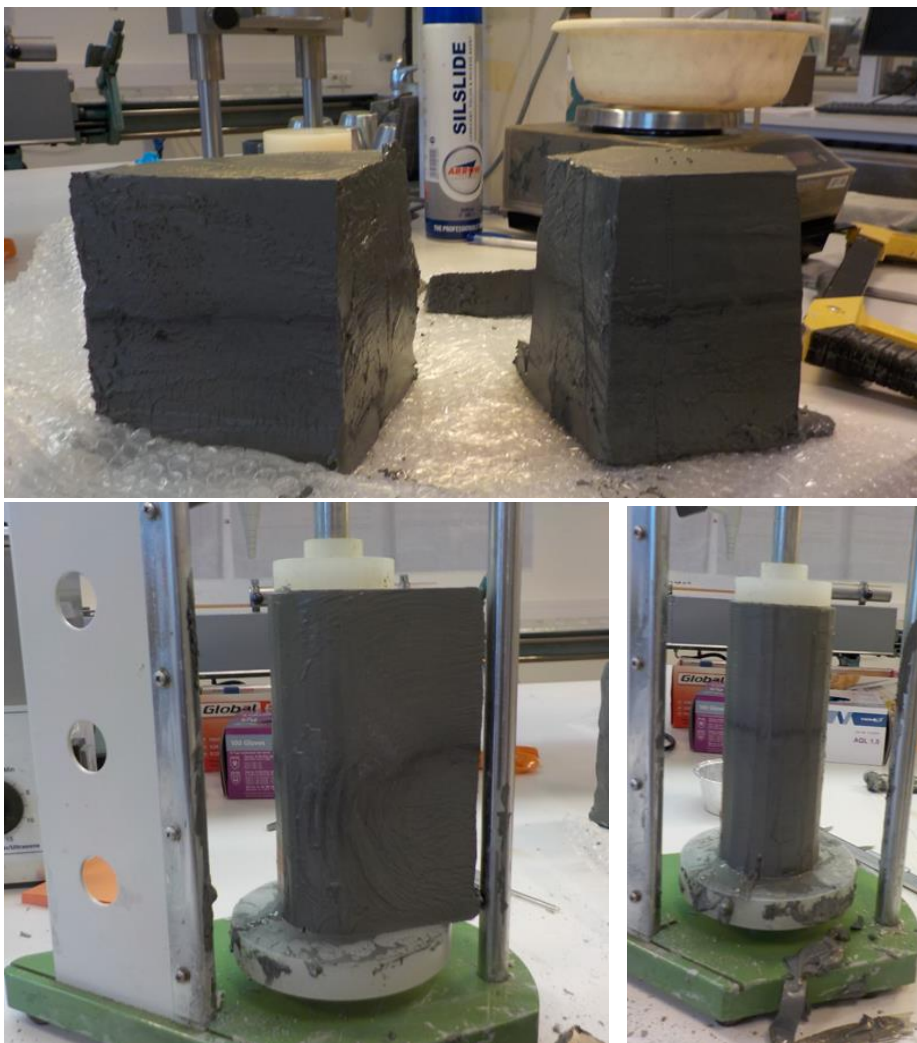
# Testing av blokkprøver utført på to identiske treaksapparater.

Som det var nevnt tidligere, anses blokkprøver generelt å vise den beste kvaliteten. Eventuelle prøveforstyrrelser som er typiske for prøver 54 mm, gjelder i betydelig mindre grad for blokkprøver. Resultater av den testingen blir derfor avgjørende for konklusjonen på slutten av dette arbeidet.

Det ble til sammen utført 8 parallelle forsøk for prøven tatt fra dybde 10,45-10,85m ved spenningsforholdene der anisotropien ble valgt ut fra  $K_0' = 0,8; 0,75; 0,7; 0,65; 0,6$ . Siden spenningsforholdet ved  $K_0' = 0,6$  er ansett som mest utfordrende for raske tester, ble det valgt å utføre 4 parallelle forsøk med denne anisotropien.

Prøven tatt ut på Flotten, var en veldig sensitiv kvikkleire, NC. Håndtering av lignende prøver på laboratoriet er en utfordrende oppgave. Prøven ble delt opp på NTNU og transportert deretter til lab på SVV. Transport av slike sensitive prøver i åpnet stand kunne virke forringende for prøve kvaliteten.

Prøven ble delt opp i biter, hver bit ble deretter trimmet ned til 54 mm i diameter slik det er vist i **Figur 57**. Vanninnhold og tyngdetetthet for preparerte delprøver ble bestemt.



Figur 57 Preparering av blokkprøve



Endene på prøvebiten ble forsiktig avskåret med tråsåg til lengden 100 m. De avkappede endene ble rørt om og skjærfasthet i omrørt stand ble bestemt.

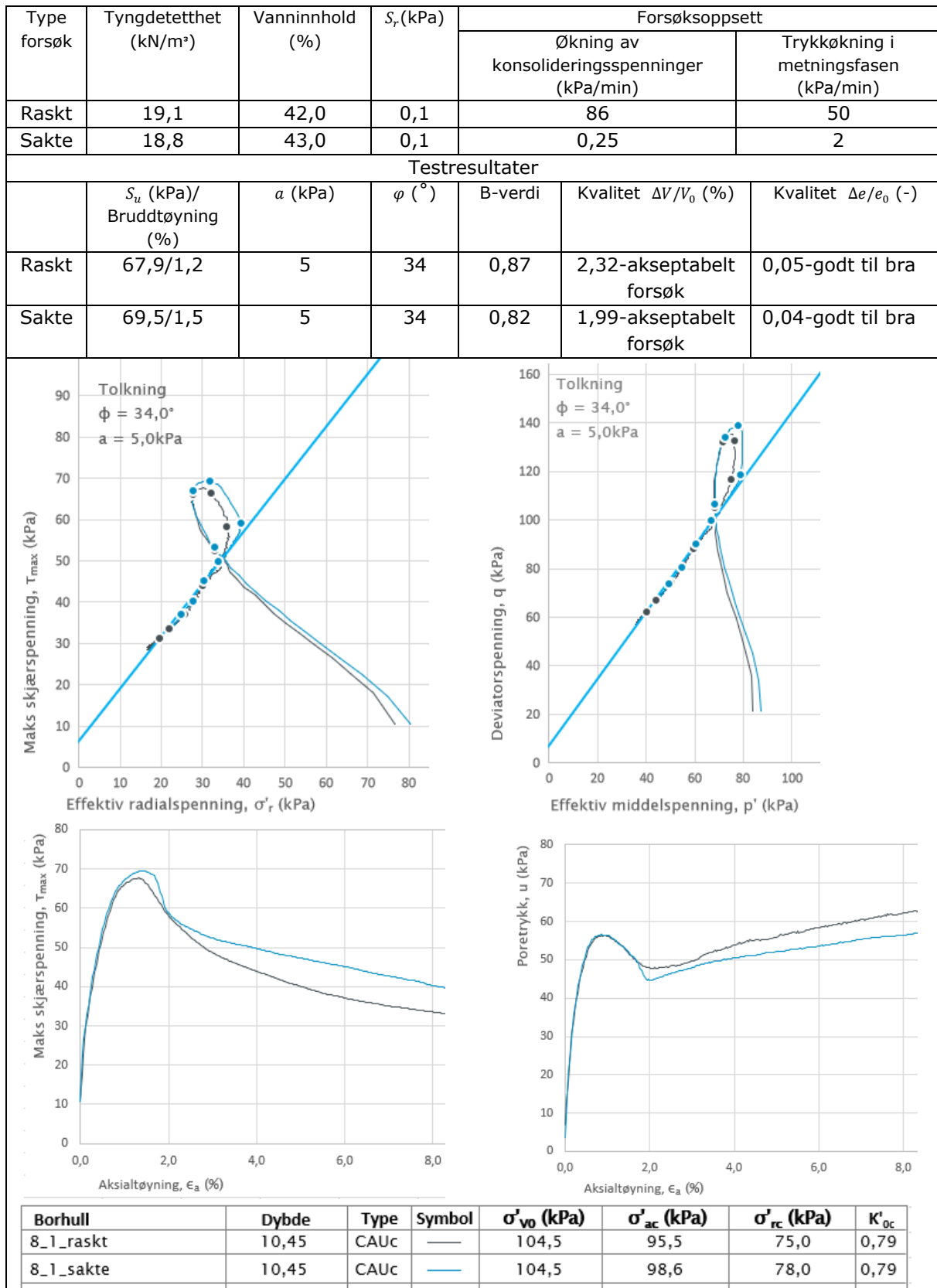
Siden hele oppgaven ble bygget på direkte sammenligning av resultater av forsøk utført på to ulike måter, ble det hensiktsmessig å forsøke ved like betingelser for minst to prøver i en parallell for å finne ut hvor store forskjeller en kan forvente om man tester antatt like prøver.

Denne parallellen ble testet helt på slutten av den praktiske delen av oppgaven.

Resultater av testingen med korte oppsummeringer er presentert i kapitler 4.1 -4.8

Utførelsesrapporter for alle testete paralleller er presentert i bilag 19-26.

### 3.5. Resultater for Flotten, parallell 1. Hviletrykkskoeffisient $K_0' = 0,8$

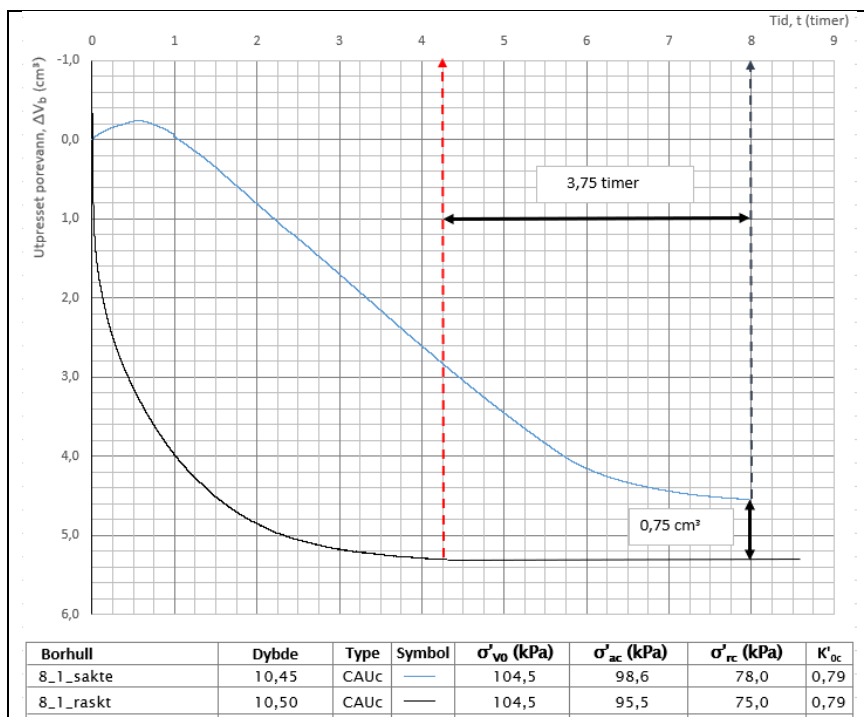


Figur 58 Resultater av treaktest for parallell 1 av blokkprøver

**Figur 58** demonstrerer treaksresultater for parallell 1. Spenningstiene har tilnærmet lik utvikling. Attraksjon og friksjonsvinkel er tolket som like. Rask test endte med 1,6 kPa lavere skjærfasthet ved lavere bruddtøyning i forhold til den sakte testen som mest sannsynlig skyldtes forskjellen på materialeegenskaper.

Forløpet av konsolideringsfasen er vist i

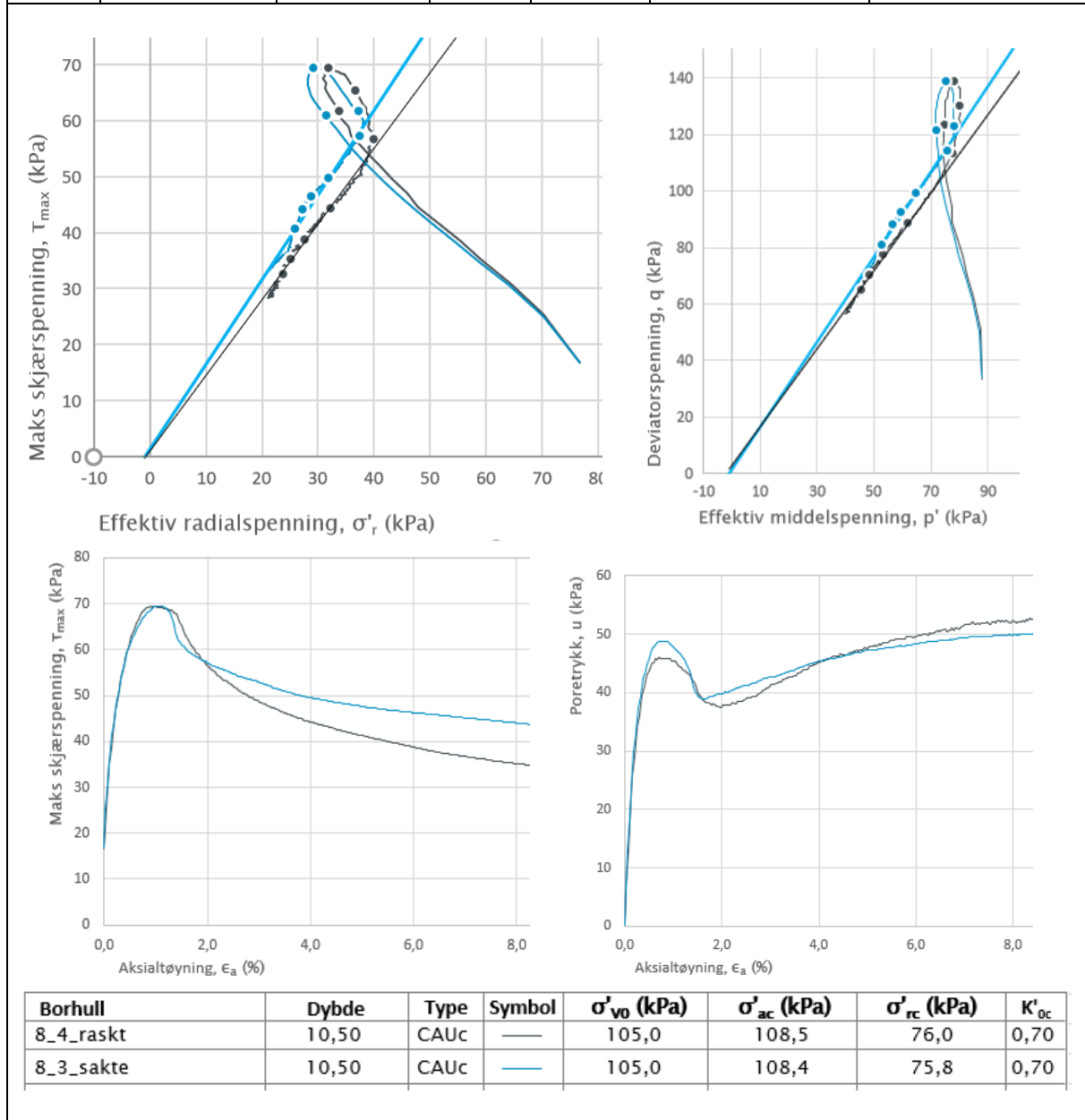
**Figur 59.** Det er registrert 0,75 mm<sup>3</sup> større vannmengde presset ut av prøven under konsolideringen ved rask testing. Konsolideringsfasen ved rask testing ble avsluttet 3,75 timer tidligere enn ved sakte testing.



**Figur 59** Forløp av konsolideringsfasen for blokkprøve for sakte og raskt forsøk ved  $K'_{oc}=0,8$

### 3.6. Resultater for Flotten, parallell 2. Hviletrykkskoeffisient $K0'=0,7$

Type forsøk	Tyngdetetthet (kN/m <sup>3</sup> )	Vanninnhold (%)	$S_r$ (kPa)	Forsøksoppsett		
				Økning av konsolideringsspenninger (kPa/min)	Trykkøkning i metningsfasen (kPa/min)	
Raskt	18,8	43	0,1	79	50	
Sakte	18,9	43,3	0,1	0,25	2	
Testresultater						
	$S_u$ (kPa)/ Bruddtøyning (%)	$a$ (kPa)	$\varphi$ (°)	B-verdi	Kvalitet $\Delta V/V_0$ (%)	Kvalitet $\Delta e/e_0$ (-)
Raskt	69,0/1,0	1	35	0,94	2,63-akseptabelt forsøk	0,05-godt til bra
Sakte	69,0/1,0	1	37	0,84	2,10-akseptabelt forsøk	0,04-godt til bra

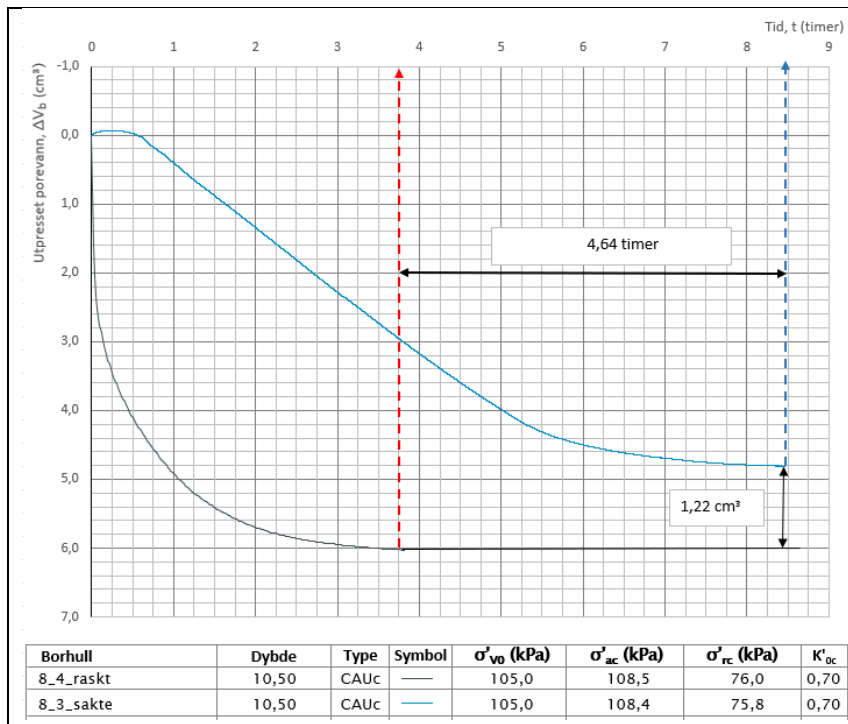


Figur 60 Resultater av treakstest for parallell 2 av blokkprøver,  $K0'=0,7$

**Figur 60** viser resultater av treksforsøk for parallell 2. Spenningsstiene viser tilnærmet lik utvikling. Begge testene endte med lik skjærfasthet ved lik bruddtøyning. Attraksjonen er tolket som lik, friksjonsvinkel er 2 ° høyere ved den sakte testen.

Parameterne for bedømmelse av kvalitet er noe bedre for den sakte testen uten at dette hadde betydning for kvalitetsklassen som er lik for begge testene.

Forløp av konsolideringsfasen er presentert i **Figur 61**, der den raske testen endte med større vannutpressing, men kortere tid for konsolideringsfasen sammenlignet med den sakte testen.



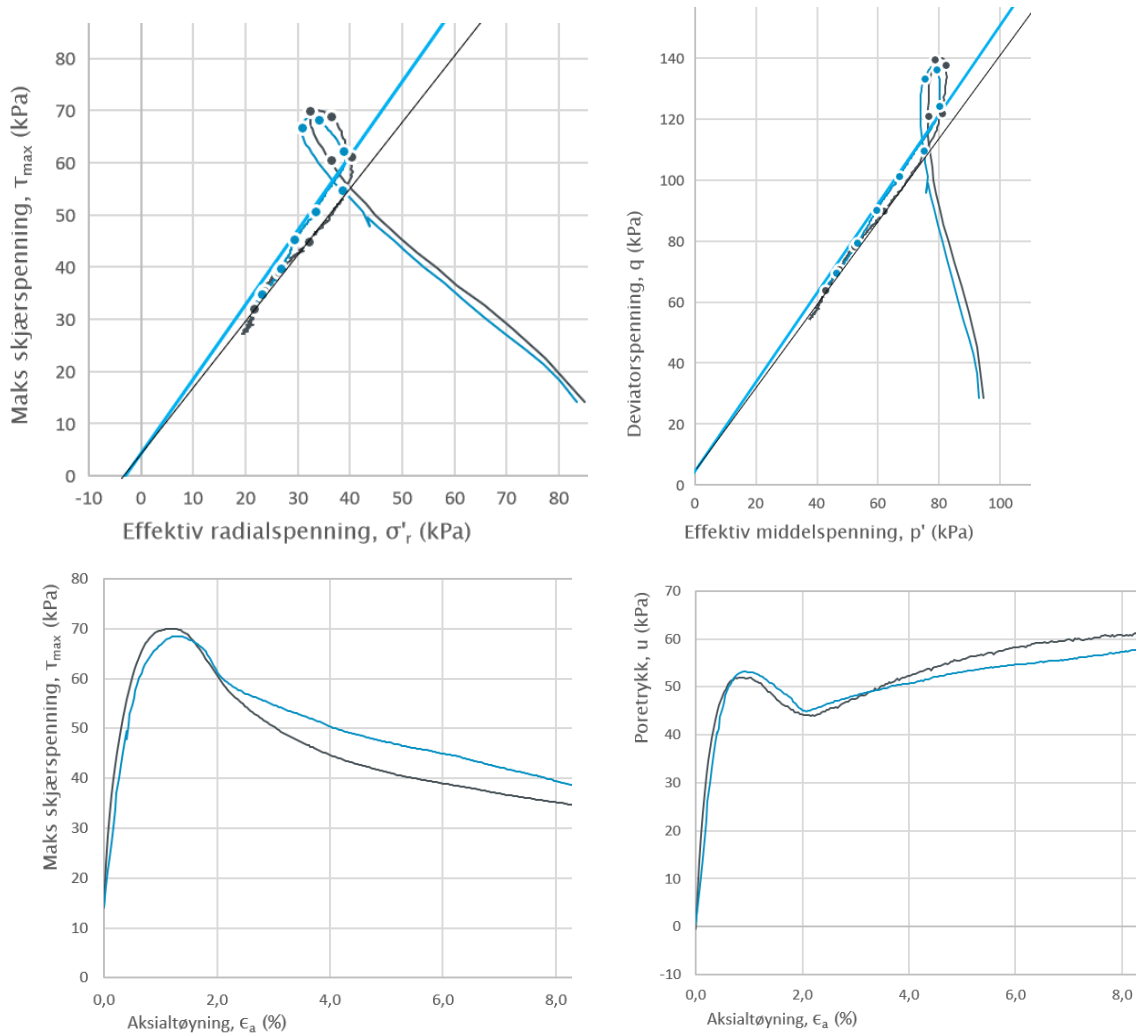
*Figur 61 Forløp av konsolideringsfasen for blokkprøve for sakte og raskt forsøk ved  $K'_{0}=0,7$*

### 3.7. Resultater for Flotten, parallell 3. Hviletrykkskoeffisient $K0'=0,75$

Type forsøk	Tyngdetetthet (kN/m <sup>3</sup> )	Vanninnhold (%)	$S_r$ (kPa)	Forsøksoppsett	
				Økning av konsolideringsspenninger (kPa/min)	Trykkøkning i metningsfasen (kPa/min)
Raskt	18,8	43,6	0,1	86	50
Sakte	18,8	44,1	0,1	0,25	2

Testresultater						
	$S_u$ (kPa)/ Bruddtøyning (%)	$a$ (kPa)	$\varphi$ (°)	B-verdi	Kvalitet $\Delta V/V_0$ (%)	Kvalitet $\Delta e/e_0$ (-)
Raskt	70,0/1,2	3	34	0,92	2,67-akseptabelt forsøk	0,06-godt til bra
Sakte	68,5/1,3	3	36	0,90	2,24-akseptabelt forsøk	0,04-godt til bra



Borhull	Dybde	Type	Symbol	$\sigma'_{v0}$ (kPa)	$\sigma'_{ac}$ (kPa)	$\sigma'_{rc}$ (kPa)	$K'_{0c}$
8_2_raskt	10,65	CAUc	—	106,5	110,1	82,7	0,75
8_2_sakte	10,65	CAUc	—	106,5	110,6	83,1	0,75

Figur 62 Resultater av trekktest for parallell 3 av blokkprøver,  $K0'=0,75$

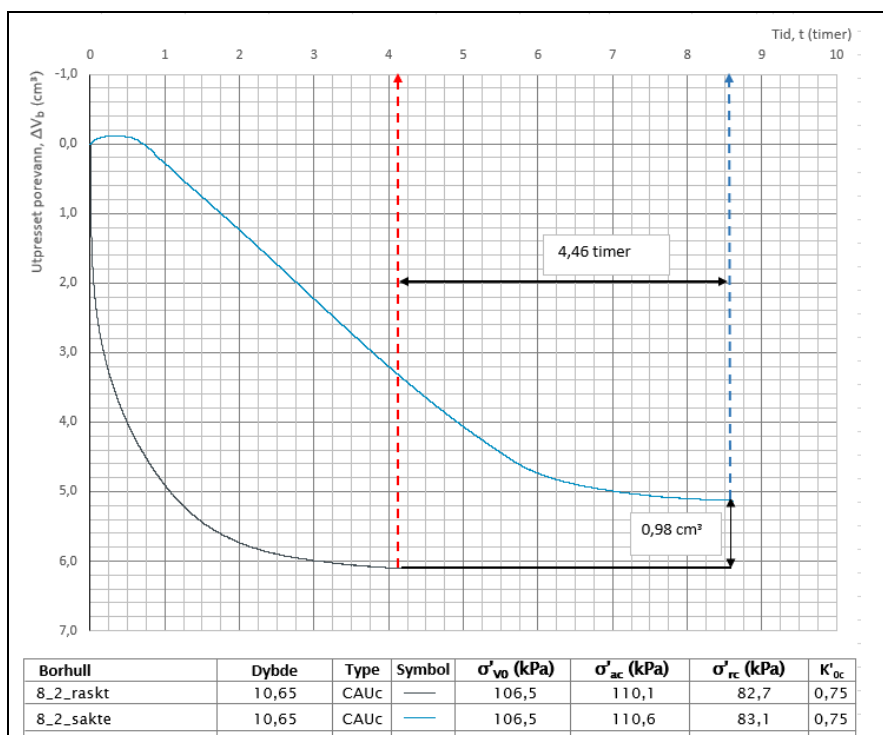
**Figur 62** viser tilnærmet lik utvikling av spenningsstier i begge testene i parallellen. Den raske testen endte med 1,5 kPa høyere skjærfasthet ved noe lavere bruddtøyning i forhold til den sakte testen.

Attraksjonen er tolket som lik for begge testene, friksjonsvinkel er 2° større for den sakte testen. Forskjellene er så små at de mest sannsynlig skyldtes forskjeller på materialegenskaper.

Forløpet av konsolideringsfasen er vist i

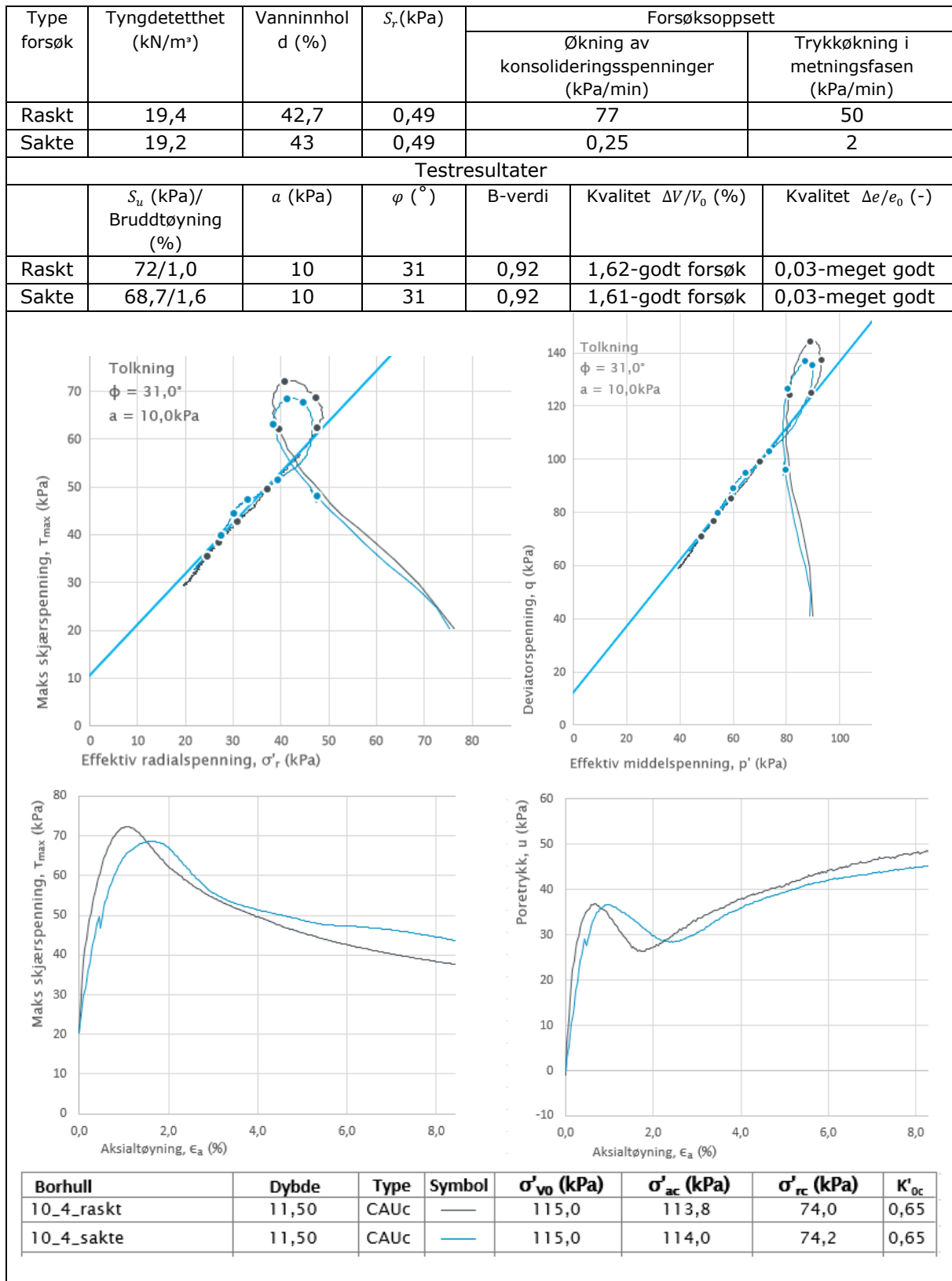
**Figur 63.** Det er registrert 0,98 mm<sup>3</sup> større vannmengde presset ut av prøven under konsolideringen ved rask testing. Konsolideringsfasen ved rask testing ble avsluttet 4,46 timer tidligere enn ved sakte testing.

Etter vurdering av prøve kvalitet ble begge testene satt i samme kvalitetsklasse, se tabell fra **Figur 62**



*Figur 63 Forløp av konsolideringsfasen for blokkprøve for sakte og raskt forsøk ved  $K0'=0,75$*

### 3.8. Resultater for Flotten, parallell 4. Hviletrykkskoeffisient $K'_{0c}=0,65$

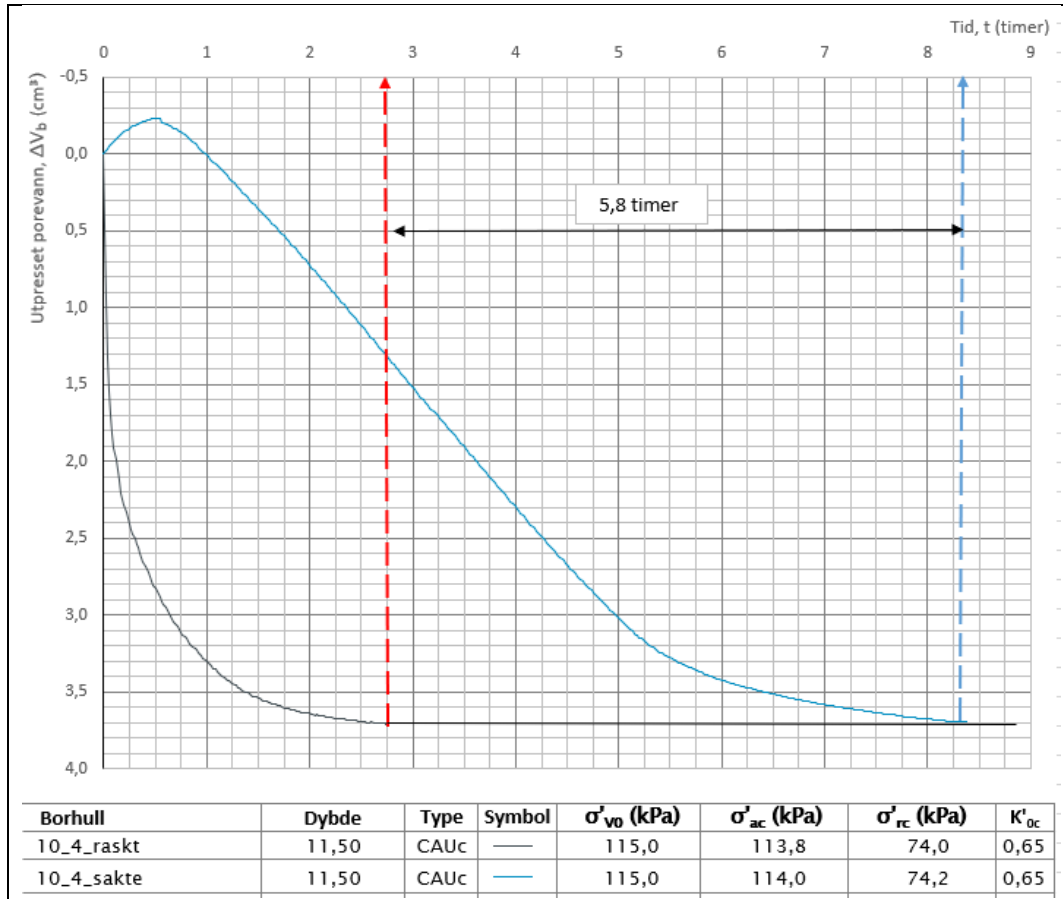


Figur 64 Resultater av trekstest for parallell 3 av blokkprøver,  $K'_{0c}=0,65$



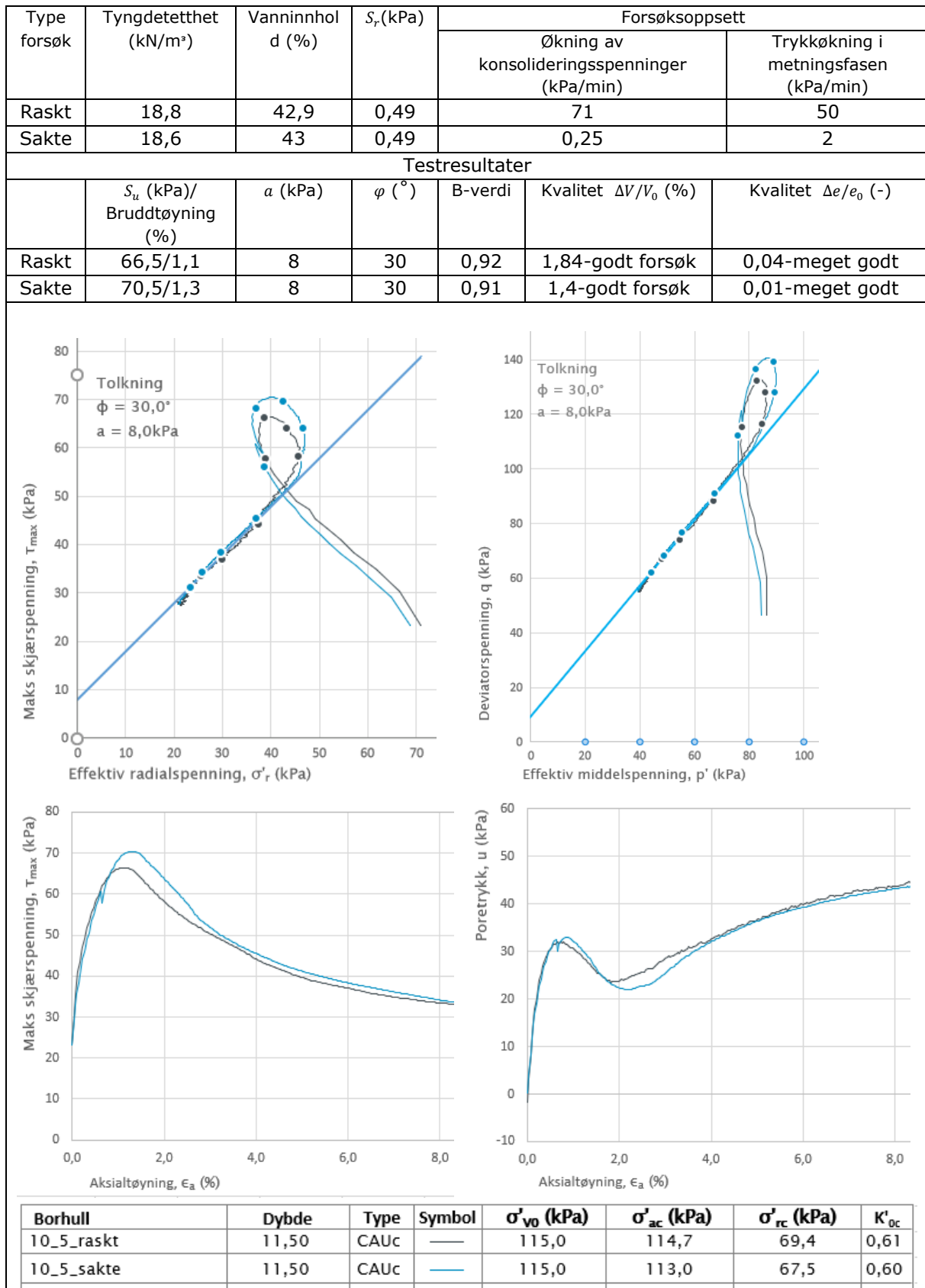
**Figur 64** demonstrerer treacksresultater for parallell 4. Spenningstiene har tilnærmet lik utvikling. Attraksjon og friksjonsvinkel er tolket som like. Rask test endte med 3,5 kPa høyere skjærfasthet ved lavere bruddtøyning i forhold til den sakte testen. Skjærutviklingskurve er noe tydeligere og «brattere» etter rask test.

**Figur 65** viser at vannutpressing er lik for begge prøvene. Kvalitetsparametere er nesten identiske slik at begge prøvene i parallellen havnet i den samme kvalitetsklassen.



*Figur 65 Forløp av konsolideringsfasen for blokkprøve i parallell 4, sakte og raskt forsøk ved  $K'_{oc}=0,65$*

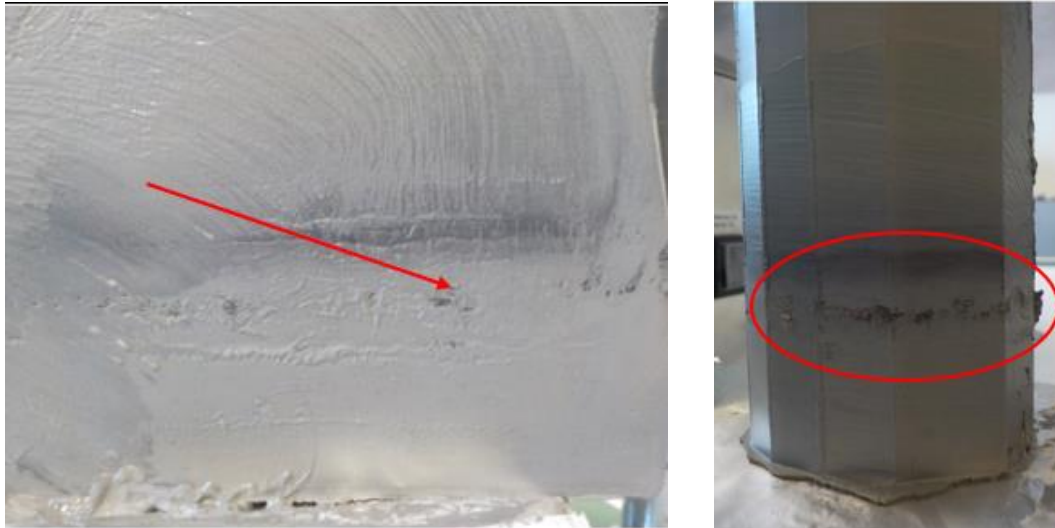
### 3.9. Resultater for Flotten. Parallel 5. Hviletrykkskoeffisient $K_0' = 0,6$



Figur 66 Resultater av trekktest for parallel 5 av blokkprøver,  $K_0' = 0,6$

**Figur 66** demonstrerer spenningsstier som resulterte med lik attraksjon og friksjonsvinkel for begge forsøkene i parallellen.

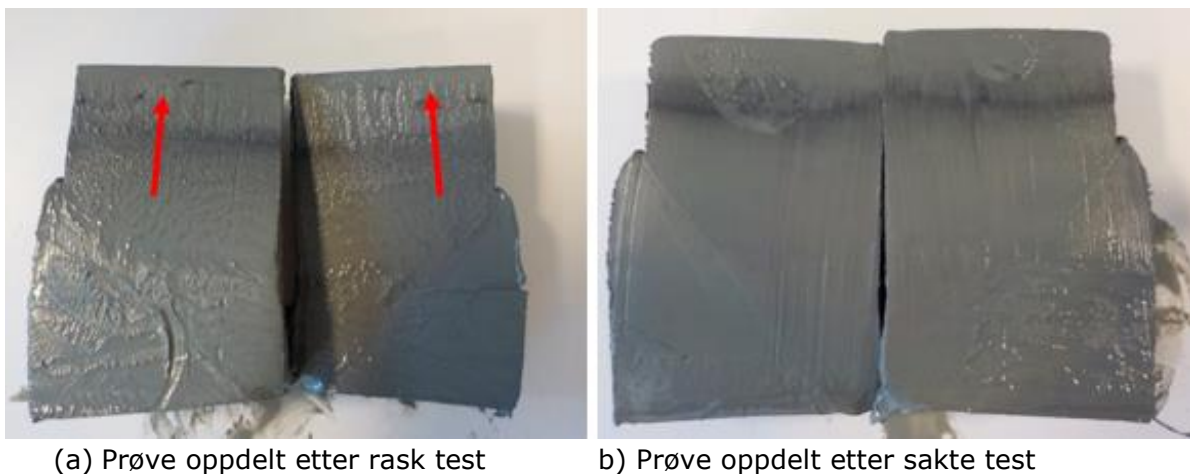
4 kPa i forskjell på skjærfastheten, der den sakte testen endte med høyere verdi, kunne skyldtes et tynt siltlag i prøven den raske testen ble utført på, se **Figur 67**



*Figur 67 Siltlag i prøven preparert for rask test*

Dette siltlaget ble ikke observert ved preparering av prøven som skulle testes etter dagens regler, sakte.

Begge prøvene ble delt opp etter forsøket. Dette tynne siltlaget ble registrert kun i den ene delprøven som ble testet raskt, se **Figur 68**.



(a) Prøve oppdelt etter rask test

(b) Prøve oppdelt etter sakte test

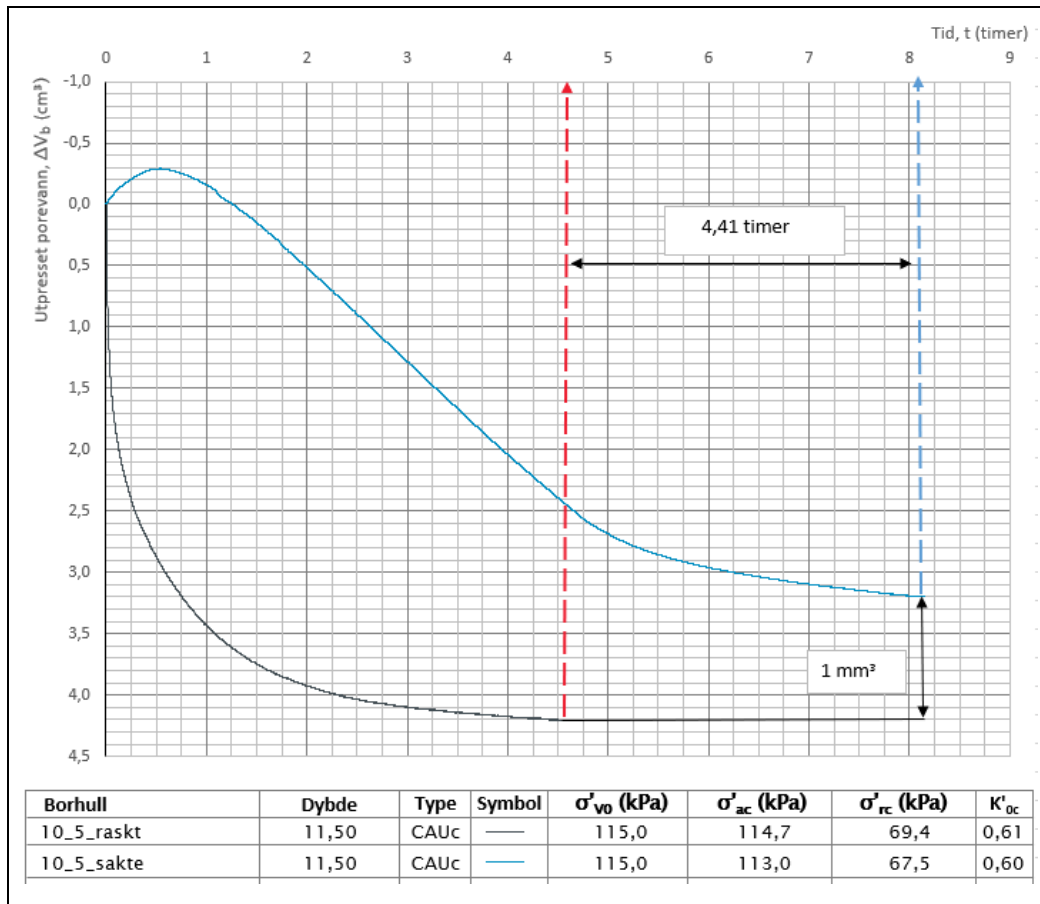
*Figur 68 Prøver oppdelt etter rask og sakte test.*

Bruddlinjene i skjærutviklingsplottet tolkes som tilnærmet like. Poretrykksutvikling i skjærfasen er sammenlignbar.

Ved vurdering av prøve kvalitet havnet begge testene i den samme kvalitetsklassen, men parameterne for bedømmelse av kvaliteten var litt bedre for den sakte testen.

**Figur 69** viser forløpet av konsolideringsfasen for begge prøvene i parallellen. Det kommer tydelig fram større vannutpressing i den raske testen.

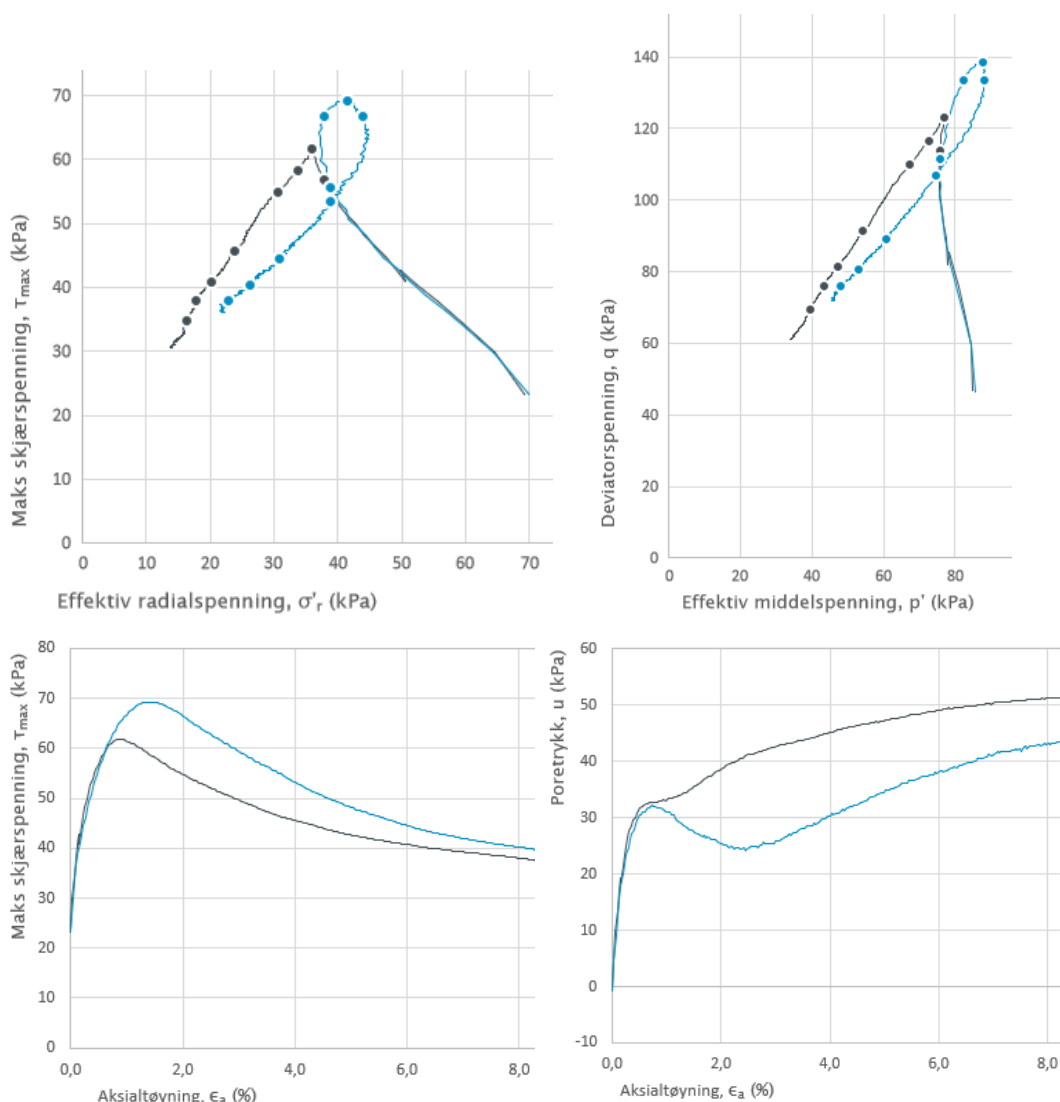
Grunnet den sakte økningen av konsolideringsspenninger i den sakte testen, varte konsolideringsfasen 4,41 timer lenger i forhold til den raske testen.



*Figur 69 Forløp av konsolideringsfasen for blokkprøve i parallell 5, sakte og raskt forsøk ved  $K'_{oc}=0,6$*

### 3.10. Resultater for Flotten. Parallell 6. Hviletrykkskoeffisient $K_0' = 0,6$

Type forsøk	Tyngdetetthet (kN/m <sup>3</sup> )	Vanninnhold (%)	$S_r$ (kPa)	Forsøksoppsett		
				Økning av konsolideringsspenninger (kPa/min)	Trykkøkning i metningsfasen (kPa/min)	
Raskt	18,5	38,2	0,49/0,2	71	50	
Sakte	18,5	38,5	0,49	0,25	2	
Testresultater						
	$S_u$ (kPa)/ Bruddtøyning (%)	$a$ (kPa)	$\varphi$ (°)	B-verdi	Kvalitet $\Delta V/V_0$ (%)	Kvalitet $\Delta e/e_0$ (-)
Raskt	62/1,0	10	35	0,96	1,75-godt forsøk	0,03-meget godt
Sakte	69/1,4	8	32	0,93	1,78-godt forsøk	0,03-meget godt



Borhull	Dybde	Type	Symbol	$\sigma'_{v0}$ (kPa)	$\sigma'_{ac}$ (kPa)	$\sigma'_{rc}$ (kPa)	$K'_{0c}$
10_6_raskt	10,50	CAUc	—	115,0	113,4	68,0	0,60
10_6_sakte	11,50	CAUc	—	115,0	113,3	67,8	0,60

Figur 70 Resultater av treaktest for parallell 6 av blokkprøver,  $K_0' = 0,6$

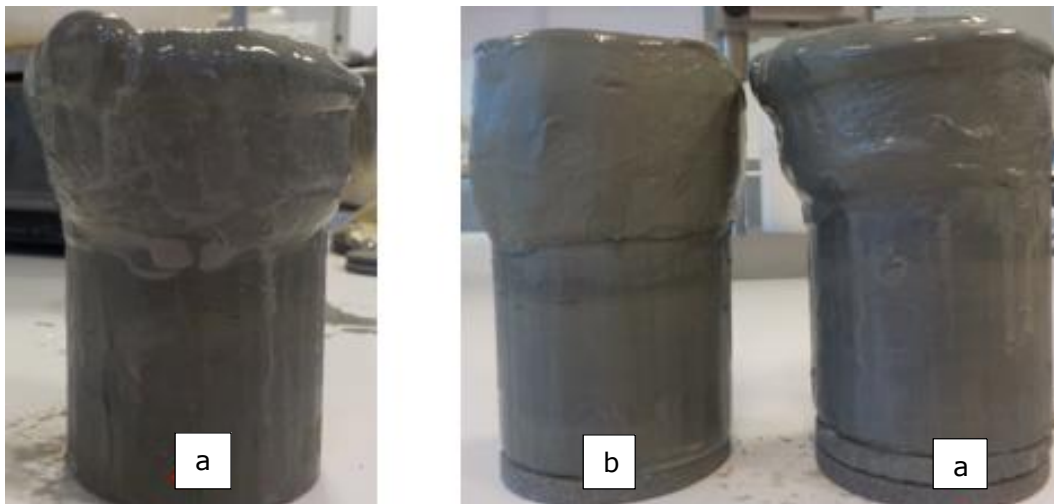
**Figur 70** presenterer resultater av treaksforsøk for parallell 6 av blokkprøver. Konsolideringsspenninger har oppnådd nesten likt nivå for begge testene slik at spenningsstiene hadde tilnærmet lik start i skjærfasen.

Videre ble forløpet av bruddlinjer nesten identisk inntil prøve i den raske testen kollapset ved 1% tøyning. Dette resulterte i vesentlig forskjell på skjærfastheten som utgjorde 7 kPa, mens attraksjon og friksjonsvinkel er tolket som sammenlignbare.

Grunnen til at prøven i den raske testen gikk til brudd for tidlig, kunne være at prøven besto av masser med ulik sensitivitet. Ved bestemmelse av skjærfastheten i omrørt stand ble det registrert at den ene enden hadde skjærfastheten lik 0,49 kPa, mens den andre enden var mye bløtere masse med skjærfasthet på 0,2 kPa. I dette tilfellet kunne prøve gått til brudd i det svake punktet ved overgangen fra lavere til høyere sensitivitet.

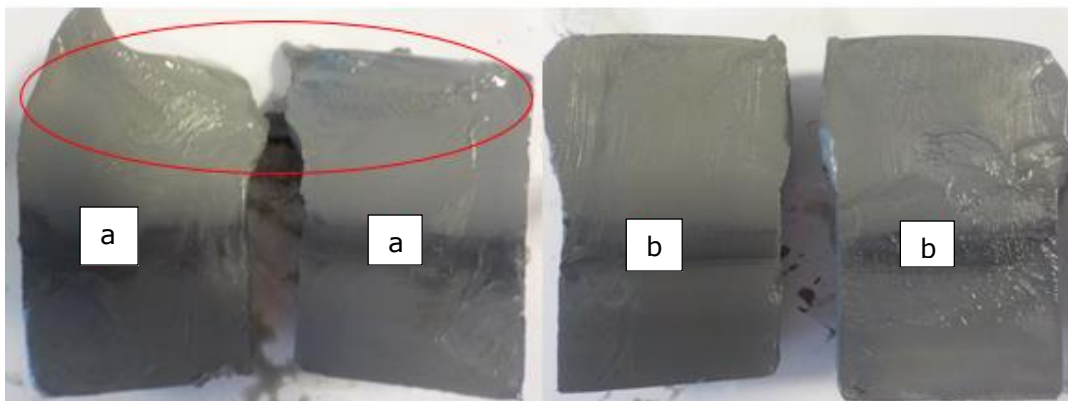
Etter avsluttet forsøk ble begge prøvene undersøkt nærmere.

**Figur 71** viser at den øvre delen av prøven testet raskt, er delvis omrørt. Den holder ikke formen og bekker til side i motsetning til prøven fra sakte test, som ser stabil ut.



*Figur 71 Bilde av prøver etter rask (a) og sakte (b) test*

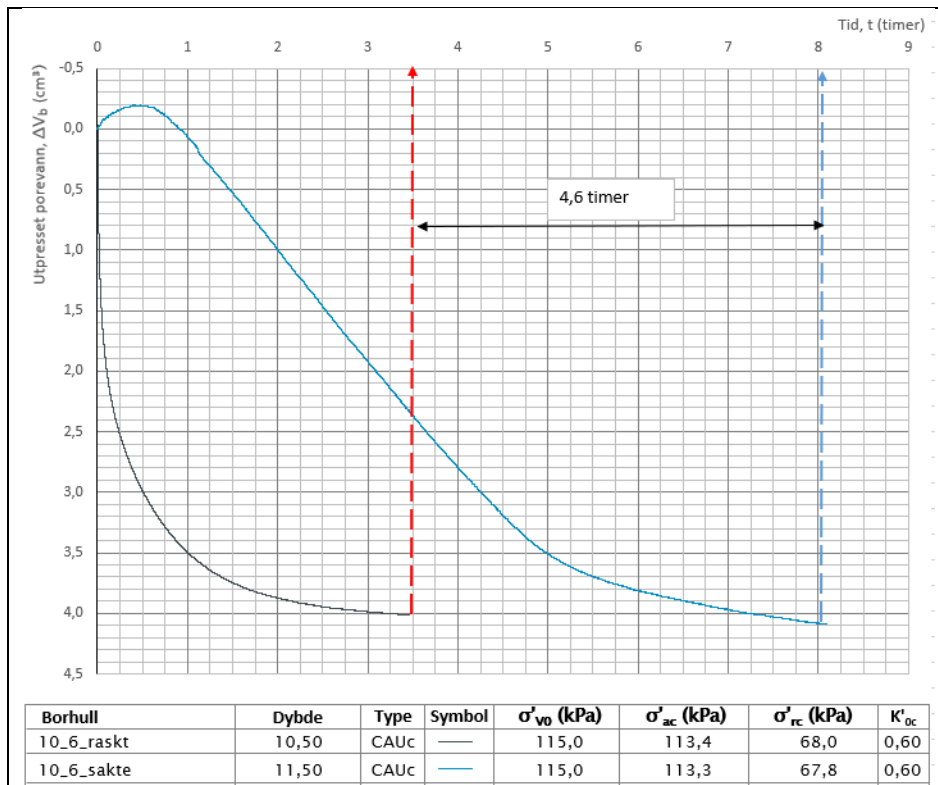
**Figur 72** viser prøver i oppdelt stand. Prøven fra raskt forsøk er forstyrret i den øvre delen.



*Figur 72 Bilder av prøver i parallellen etter oppdeling, (a)-etter rask test, (b)-etter sakte test*

**Figur 73** viser at mengde utpresset porevann i konsolideringsfasen er litt lavere i den raske testen. Parameterne for bedømmelse av prøve kvalitet fra tabellen i **Figur 70** viser

at den raske testen endte med lik kvalitet i forhold til den sakte testen, begge havnet i klassen for best kvalitet.



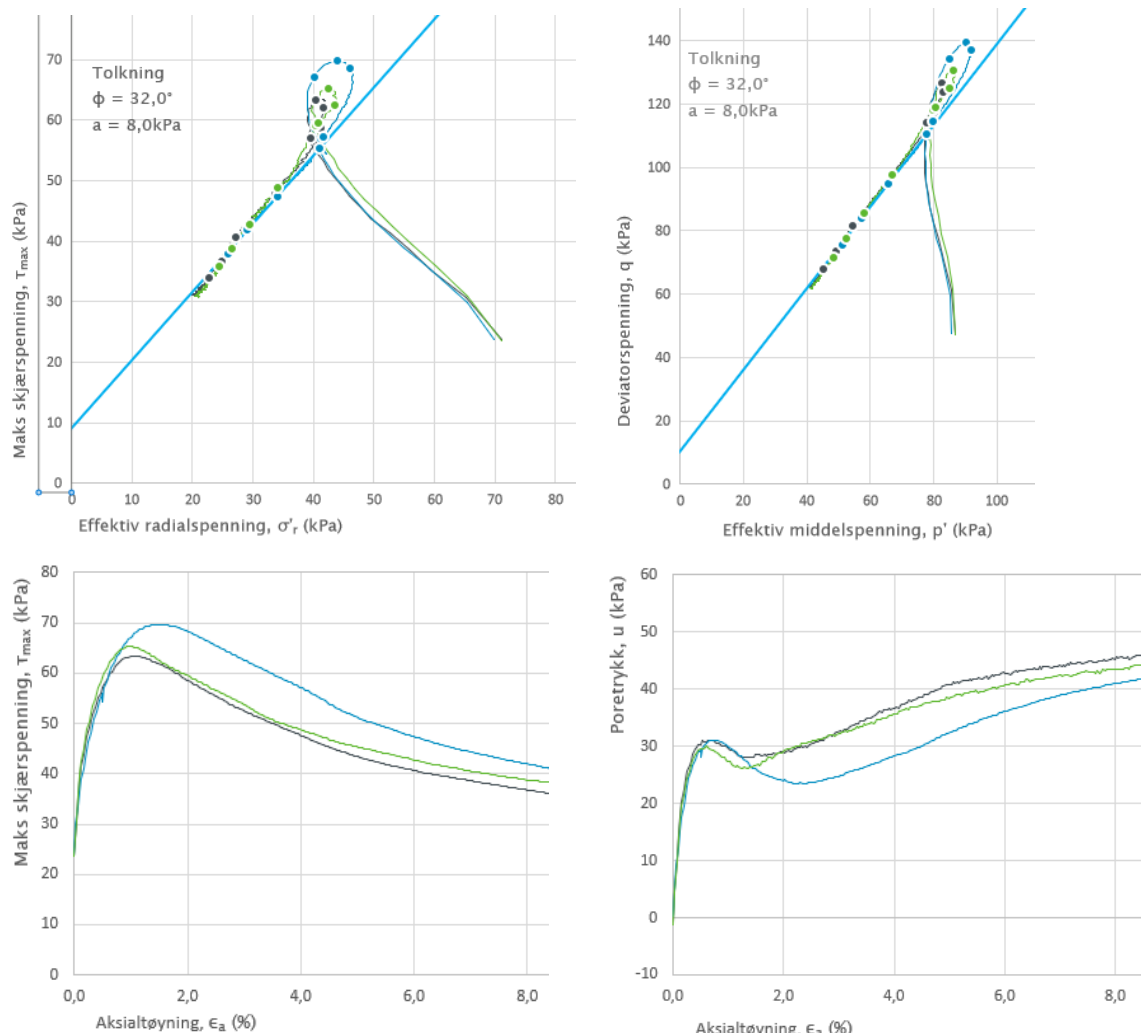
Figur 73 Forløp av konsolideringsfasen for blokkprøve i parallell 5, sakte og raskt forsøk ved  $K'_{oc}=0,6$

### 3.11. Resultater for Flotten. Parallell 7,8. Hviletrykkskoeffisient $K_0' = 0,6$

Type forsøk	Tyngdetetthet (kN/m <sup>3</sup> )	Vanninnhold (%)	$s_r$ (kPa)	Forsøksoppsett		
				Økning av konsolideringsspenninger (kPa/min)	Trykkøkning i metningsfasen (kPa/min)	Merknad
Raskt 1	18,6	40,2	0,2	72	50	Parallell 7
Raskt 2	18,5	39,8	0,2	72	50	Parallell 8
Sakte	18,6	39,7	0,2	0,25	2	Parallell 7

Testresultater						
	$S_u$ (kPa)/ Bruddtøyning (%)	$a$ (kPa)	$\varphi$ (°)	B-verdi	Kvalitet $\Delta V/V_0$ (%)	Kvalitet $\Delta e/e_0$ (-)
Raskt 1	63,5/1,0	8	32	0,96	1,81-godt forsøk	0,03-meget godt
Raskt 2	65,0/1,0	8	32	0,93	2,68-akseptabelt	0,05-godt til bra
Sakte	69,5/1,5	8	32	0,92	1,65-godt forsøk	0,03-meget godt



Borhull	Dybde	Type	Symbol	$\sigma'_{v0}$ (kPa)	$\sigma'_{ac}$ (kPa)	$\sigma'_{rc}$ (kPa)	$K'_{0c}$
10_7_raskt	11,70	CAUc	—	117,0	115,7	69,5	0,60
10_7_sakte	11,70	CAUc	—	117,0	115,6	69,4	0,60
10_8_raskt	11,70	CAUc	—	117,0	115,6	69,7	0,60

Figur 74 Resultater av treakstest for parallell 7,8 av blokkprøver,  $K_0' = 0,6$

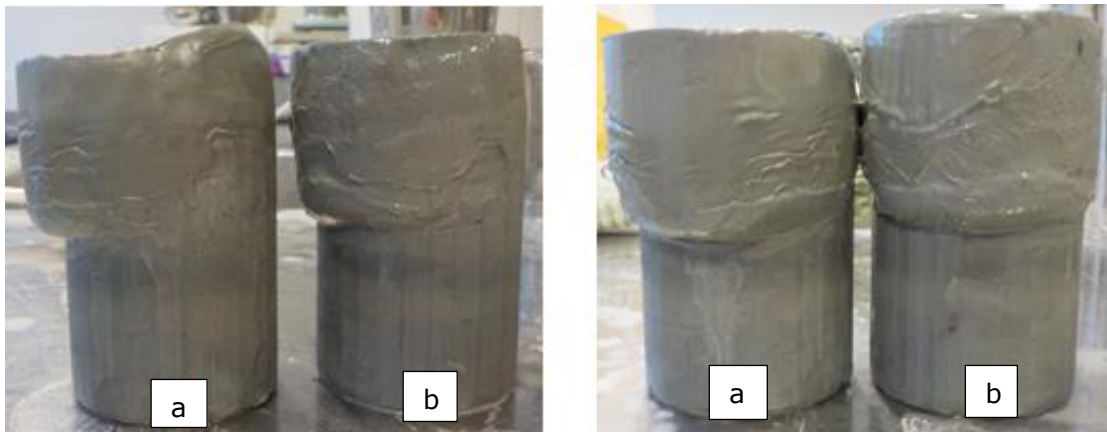


**Figur 74** viser resultater av trekktest for parallell 7 og 8. I parallell 8 ble kun rask test vellykket. Siden de begge parallellene ble testet ved like spenningsforhold og gjaldt prøver tatt fra samme dybde, ble det hensiktsmessig å plote resultatene sammen. Test «Rask 2» fra tabellen i **Figur 74** gjelder den raske testen fra parallell 8.

Spenningsstiene for alle tre prøvene viser tilnærmet lik utvikling. Alle tre testene resulterte i lik attraksjon og friksjonsvinkel.

Det er registrert en merkbar forskjell på skjærfasthet ved sammenligning av raske og sakte tester. Tendensen at raske tester ender med lavere skjærfasthet i forhold til sakte tester gjelder alle parallellene ved hviletrykkskoeffisient  $K_0' = 0,6$ .

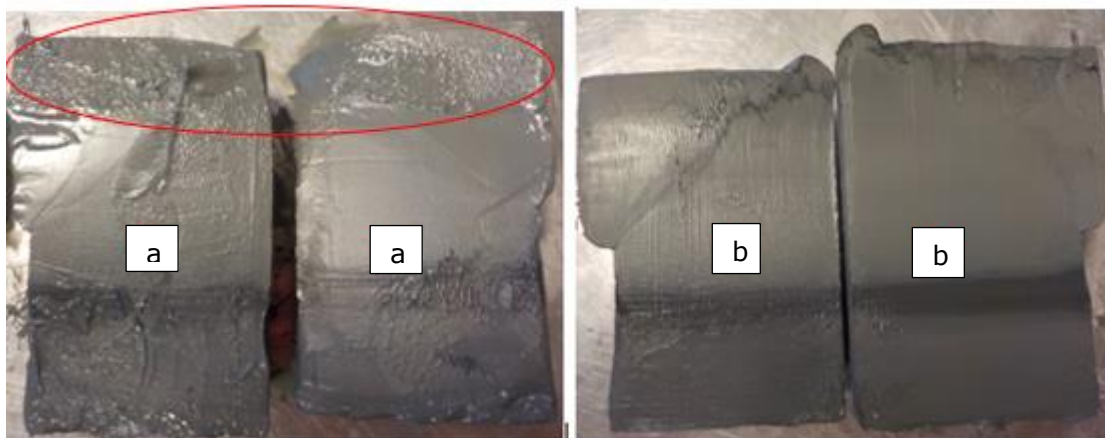
Prøvene ble undersøkt visuelt etter avsluttet forsøk. **Figur 75** og **Figur 76** viser prøver etter rask og sakte test i parallell 7.



*Figur 75 Bilder av prøver etter rask (a) og sakte (b) test i parallell 7*

Prøven testet raskt viste forstyrrelser i den øvre delen av prøvebiten, **Figur 76** (a). Den delen av prøven var delvis omrørt og holdt ikke formen etter oppdeling.

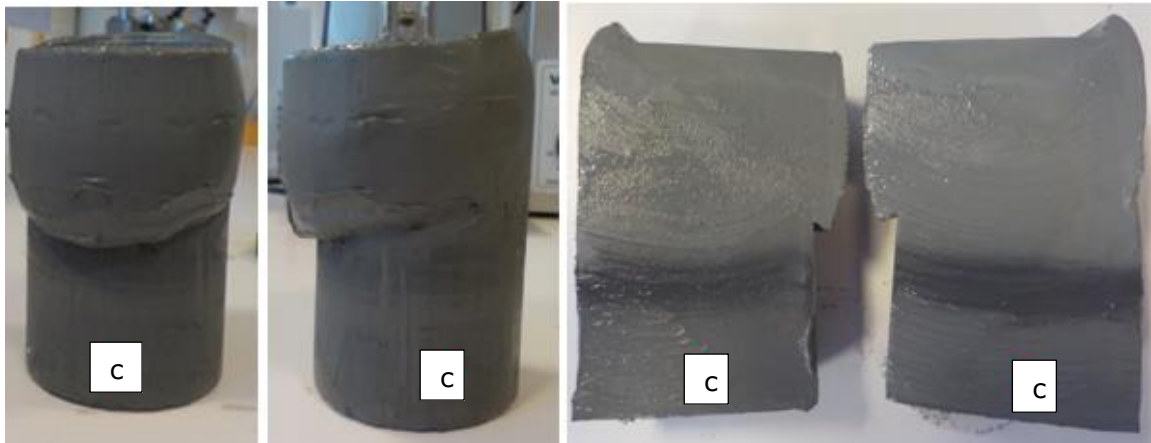
Det var ikke oppdaget lignende forstyrrelser i prøven testet etter dagens regler, **Figur 76** (b).



*Figur 76 Bilder av prøver i parallell 7 etter oppdeling, (a)-etter rask test, (b)-etter sakte test*

Lignende tilstand var forventet for prøven testet raskt i parallell 8. Men visuell undersøkelse har ikke avdekket merkbare forstyrrelser, se **Figur 77** (c).

At prøven ble mindre forstyrret hadde betydning for skjærfastheten som ble noe høyere enn skjærfastheten registrert etter den raske testen i parallell 7.



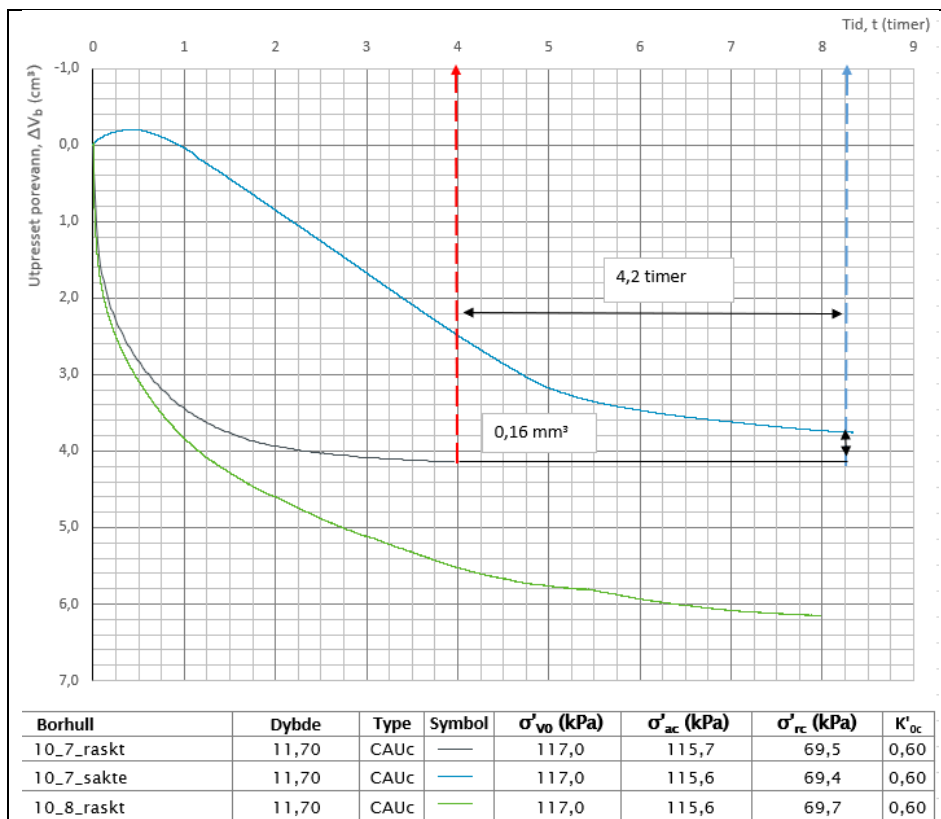
Figur 77 Bilder av prøve etter rask test (c) i parallell 8

Parallell 7 demonstrerte 0,16 mm<sup>3</sup> lavere vannutpressing i konsolideringsfasen ved sakte forsøk, **Figur 78**.

Begge prøvene i parallellen havnet i den samme kvalitetsklassen med uvesentlige forskjeller i kvalitetsparametere, se tabellen i **Figur 74**.

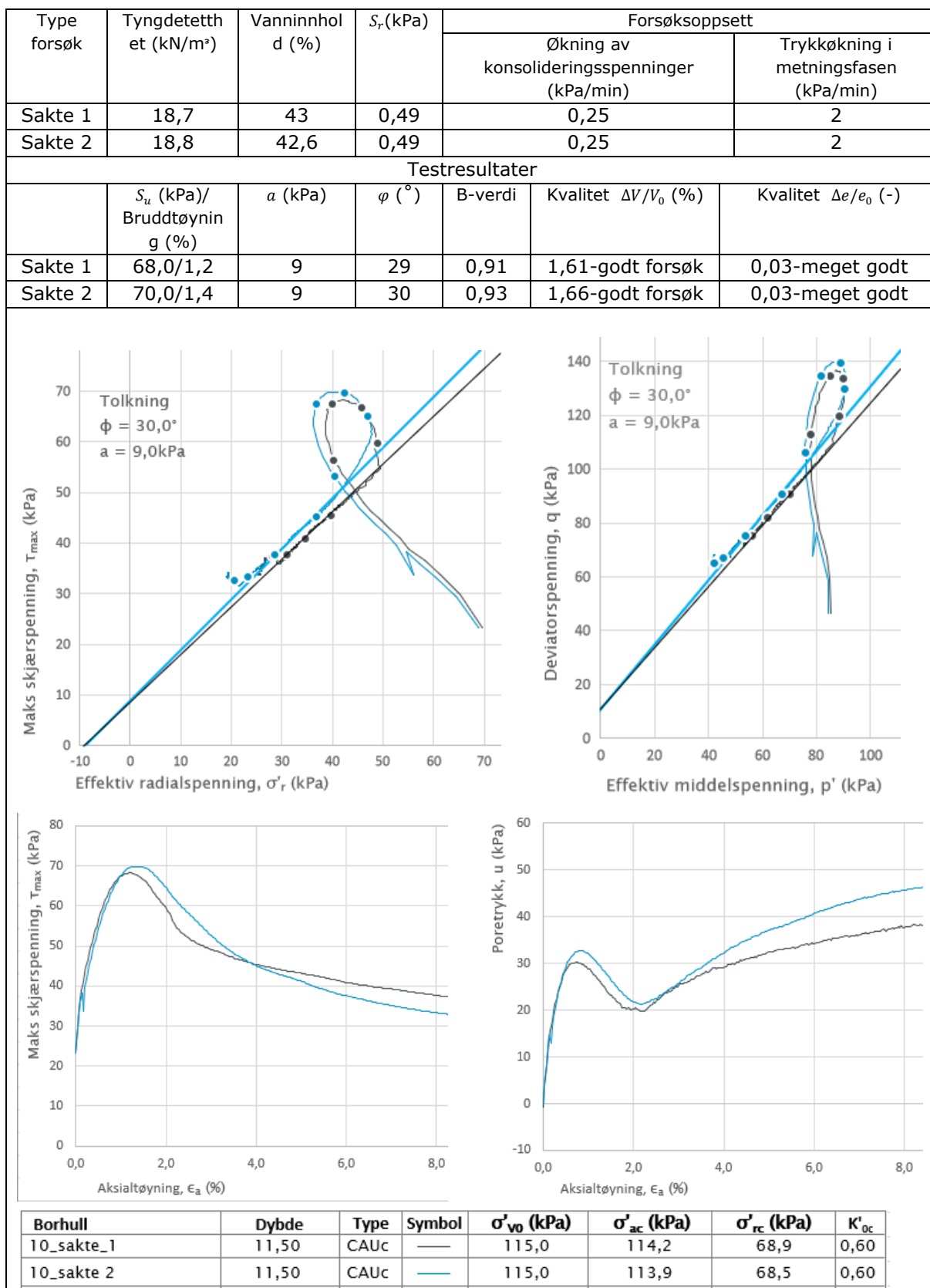
Selv om det ikke ble avdekket visuelle forstyrrelser etter oppdeling av prøven fra parallell 8, viste det seg at den har mye dårligere kvalitet enn prøver fra parallell 7 og etter vurdering av kvalitetsparametere havnet i dårligere kvalitetsklasse, se tabell i **Figur 74**.

Den grønne konsolideringskurven i **Figur 78** viser betydelig større vannutpressing i konsolideringsfasen for prøven fra parallell 8.



Figur 78 Forløp av konsolideringsfasen for blokkprøve i parallell 7,8, sakte og raskt forsøk ved  $K'_{oc}=0,6$

3.12. Resultater for Flotten. Vurdering av mulighet til å få to identiske bruddlinjer ved testing på like betingelser. Hviletrykkskoeffisient  $K_0' = 0,6$ .



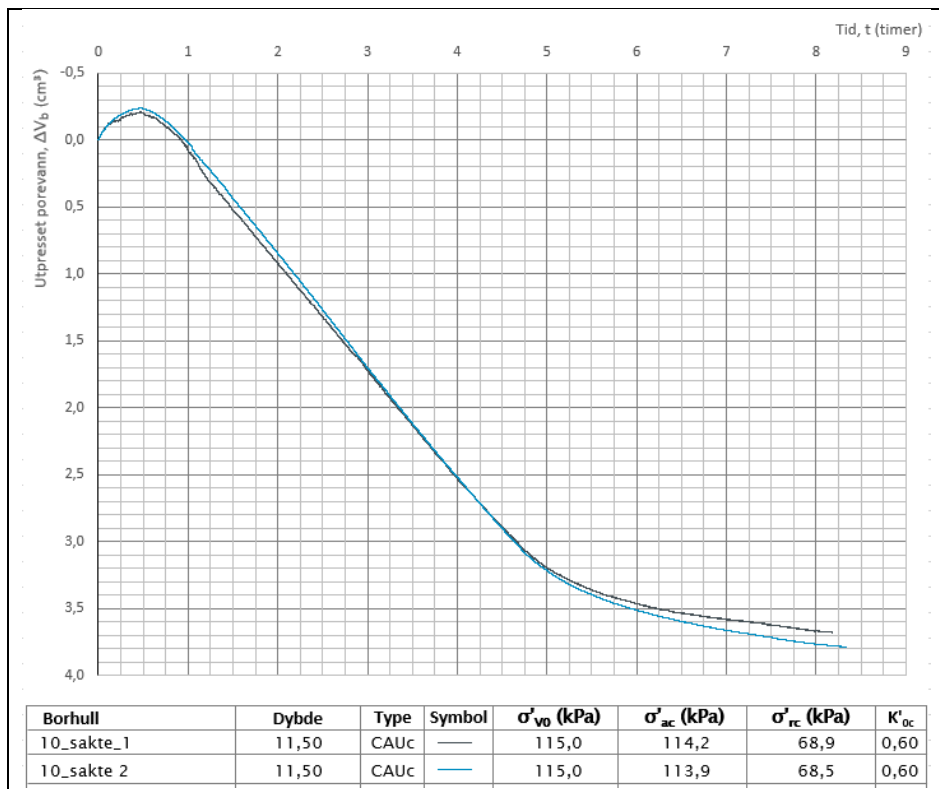
Figur 79 Resultater av treakstest for kontrollparallel av blokkprøver,  $K_0' = 0,6$

**Figur 79** presenterer resultater av treaksforsøk for en parallell der prøver ble testet ved like betingelser i forhold til prosedyre godkjent i SVV.

Begge prøvene ble konsolidert til nesten like konsolideringsspenninger slik at spenningsstiene har nesten lik start.

Forløpet av spenningstiene er tilnærmet likt. Attraksjonen er tolket som lik for begge testene, 1° forskjell på friksjonsvinkel, 2kPa forskjell på skjærfasthet. Slike uvesentlige forskjeller en får etter testing av antatt like prøver er forventet og skyldes naturlige forskjeller på materialeegenskaper.

**Figur 80** viser forløpet av konsolideringsfasen. Konsolideringen av begge prøvene gikk veldig likt både i forhold til utpisset porevann og påløpt tid.



*Figur 80 Forløp av konsolideringsfasen for blokkprøve, kontrollparallel ved  $K0'=0,6$*

## 4. Oppsummering og konklusjon.

Det ble til sammen utført 19 parallelle forsøk for leireprøver med forskjellige materialegenskaper, tatt fra forskjellige dybder. Trykkøkningen i raske tester ble utført med forskjellige hastigheter, i noen tester over 350 ganger raskere enn etter dagens regler. Alle resultatene av betydning ble samlet i **Tabell 12**.

Parallell		Skjærfasthet (kPa)	K0'	Attraksjon, (kPa)	Friksjonsvinkel, (°)	Kvalitetsklasse $\Delta V/V_0$ (%) / $\Delta e/e_0$ (-)
RK6	Rask	74,0	0,7	12	28	Akseptabelt /godt til bra
	Sakte	73,5		12	28	Godt/meget godt
BH19	Rask	23,5	0,73	0	38	Godt /godt til bra
	Sakte	25,2		0	32	Godt/godt til bra
BH20_11	Rask	35,0	0,8	20	24	Akseptabelt/dårlig
	Sakte	35,0		20	24	Dårlig /dårlig
BH20_10	Rask	37,5	0,8	-	-	Akseptabelt /godt til bra
	Sakte	37,0		-	-	Godt/godt til bra
BH15_1	Rask	23,5	0,8	10	28	Godt/meget godt
	Sakte	23,7		14	24	Akseptabelt/godt til bra
BH15_2	Rask	25,8	0,75	13	26	Dårlig/dårlig
	Sakte	26,2		13	26	Akseptabelt/dårlig
BH2207	Rask	36,0	0,8	5	35	Godt/meget godt
	Sakte	33,0		3	33	Akseptabelt/meget godt
1_3	Rask	38,5	0,8	10	34	Dårlig /dårlig
	Sakte	40,0		0,5	34	Godt/meget godt
1_2	Rask	33,0	0,8	5	33	Godt/meget godt
	Sakte	34,4		5	35	Godt/godt
1_9	Rask	36,7	0,8	15	27	Akseptabelt/godt til bra
	Sakte	36,7		15	27	Akseptabelt/godt til bra
3_3	Rask	30,0	0,8	-	-	Akseptabelt/godt til bra
	Sakte	30,0		34	20	Akseptabelt/godt til bra
Blokk 1	Rask	67,9	0,8	5	34	Akseptabelt/godt til bra
	Sakte	69,5		5	34	Akseptabelt/godt til bra
Blokk 2	Rask	69,0	0,7	1	35	Akseptabelt/godt til bra
	Sakte	69,0		1	35	Akseptabelt/godt til bra
Blokk 3	Rask	70,0	0,75	3	34	Akseptabelt/godt til bra
	Sakte	68,5		3	36	Akseptabelt/godt til bra
Blokk 4	Rask	72,0	0,65	10	31	Godt/meget godt
	Sakte	68,7		10	31	Godt/meget godt
Blokk 5	Rask	66,5	0,6	8	30	Godt/meget godt
	Sakte	70,5		8	30	Godt/meget godt
Blokk 6	Rask	62,0	0,6	10	35	Godt/meget godt
	Sakte	69,0		8	32	Godt/meget godt
Blokk 7	Rask	63,5	0,6	8	32	Godt/meget godt
	Sakte	69,5		8	32	Godt/meget godt
Blokk 8	Rask	65,0		8	32	Akseptabelt/godt til bra
Parallell av to sakte forsøk						
Blokk 9	Sakte 1	68,0	0,6	9	39	Godt/meget godt
	Sakte 2	70,0		9	30	Godt/meget godt

Tabell 12 Samlet resultater av treksforsøk for alle parallellene.

De første 7 parallellene av 54 mm-prøver ble utført på treksapparater av ulike utgaver der det ene hadde problemer med oppnåelse av tilstrekkelig B-verdi.

De resterende 12 parallelle forsøk ble utført på to helt identiske treksapparater for både 54 mm-prøver og blokkprøver.

Ved testing av de første 7 parallellene av 54 mm-prøver ble det ofte registrert forskyvning av spenningsstier i forhold til hverandre som i utgangspunktet skyldtes forskjellen på oppnådde konsolideringsspenninger.

Det ble også antatt at luft i systemet og som resultat, dårlig B-verdi, førte til feilmåling av poretrykket under skjærforsøket. Forsøkene med lavere B-verdi skilte seg ut med lavere poretrykk i skjærfasen som var avgjørende for forløpet av spenningsstier og dermed hadde betydning for tolkning av attraksjon og friksjonsvinkel.

Prøver 54 mm ble testet ved spenningsforhold der hviletrykkskoeffisient  $K_0'$  varierte fra 0,8 til 0,7. Slike prøver er forstyrret i utgangspunktet, slik at vurdering av prøveforstyrrelser grunnet raske trykkøkninger blir påvirket av prøvens opprinnelige tilstand.

Ved vurdering av prøve kvalitet demonstrerte forsøkene forskjellige utfall der de raske testene noen ganger havnet i bedre kvalitetsklasse enn de sakte testene og omvendt. Uansett prøve kvaliteten viste det seg at skjærfastheten for utelukkende alle parallellene av 54 mm prøver ikke ble påvirket av raske trykkøkninger, se **Tabell 12** (i gult felt).

Foringet prøve kvalitet som har betydning for resultater må resultere i lavere udrenert skjærfasthet, noe som ikke fant sted ved testing av 54 mm prøver. De fleste parallelle forsøk viste enten høyere skjærfasthet i de raske testene eller like eller uvesentlig lavere med forskjell innen 2 kPa som er naturlig for jordmasser (se resultater av forsøk for to prøver testet ved like betingelser, Blokk 9 i **Tabell 12**).

De øvrige geotekniske parameterne, slike som attraksjon og friksjonsvinkel var i stor grad avhengige av korrekte poretrykksmålinger. Ved vurdering av resultater der begge testene i en parallell hadde tilstrekkelig B-verdi og dermed tilnærmet lik poretrykksutvikling i skjærfasen, kommer en til konklusjon at både attraksjon og friksjonsvinkel ikke blir påvirket av raske trykkøkninger. Avvik på de parameterne ble kun registrert ved testing av de parallellene der B-verdi i en av testene var atskillig lavere enn i den andre testen i parallellen.

Når det gjelder testing av blokkprøver, så bør man først bemerke at prøven var kvikk og svært sensitiv. Det var forventet at en bløt og sensitiv prøve ville reagert markant på raske trykkøkninger om disse virket forringende.

De praktiske forsøkene utført på blokkprøvene støttet teorien om at raske trykkøkninger forringer prøve kvalitet. De fleste (6 av 8) raske forsøk endte med dårligere kvalitetsparametere enn sakte forsøk. Forringelsen var likevel av ingen dramatisk karakter, slik at prøver fra begge testene i parallellen havnet i samme kvalitetsklasse.

Slik resultatene fra **Tabell 12** (i grønt felt) viser har slike geotekniske parametere som udrenert skjærfasthet, attraksjon og friksjonsvinkel i raske tester demonstrert like eller tilnærmet like verdier i forhold til tilsvarende verdier i sakte tester.

Det viser seg at bløte leireprøver av god kvalitet tåler raske trykkøkninger ved spenningsforhold der  $K_0' = 0,8$  og ned til  $0,65$  uten at kvalitetstap blir av betydelig karakter med virkning på resultatene.

Forsøkene utført ved spenningsforhold der  $K_0' = 0,6$  har stabilt demonstrert betydelig lavere udrenert skjærfasthet ved raske forsøk. Prøvene ble delt opp og undersøkt nærmere. I to av fire parallellene kunne en gi forklaring på dette avviket: siltlag i den ene prøven det ble utført rask test på, og overgang til mer sensitivt materiale i den andre prøven. Likevel gjorde prøvene inntrykk av forstyrrelse.

De testede leireprøvene tålte dårlig raske trykkøkninger i konsolideringsfasen ved spenningsforhold der  $K_0'$  var lik  $0,6$ . Rask påføring av deviatorspenning forstyrret prøvene og førte til lavere udrenert skjærfasthet. De øvrige parametere, slike som friksjonsvinkel og attraksjon ble ikke påvirket av raske trykkøkninger ved denne spenningstilstanden.

Konsolideringsfasen i den raske testingen viste seg å være merkbart redusert.

Det viste seg at i raske tester ble poretrykket dissipert på noen få timer. Men grunnet sakte økning av konsolideringsspenninger blir konsolideringsfasen i sakte forsøk kraftig utvidet.

Om man bruker også rask trykkøkning i metningsfasen ( $50 \text{ kPa/min}$  istedenfor  $2 \text{ kPa/min}$  etter dagens regler), vil tidsbruk for testingen kraftig reduseres som har både praktisk og økonomisk betydning. I det konkrete tilfellet med en bløt blokkprøve ble den totale tiden for forsøket redusert med omtrent 8 timer ved bruk av raske trykkøkninger.

Det er for tidlig å påstå at alle leireprøver vil tåle påkjenningen forårsaket av raske trykkøkninger i treakscellen. Forsøkene utført i forbindelse med oppgaven støttet teorien om at forringelsen av prøve kvaliteten vil skje i uvesentlig grad, slik at testresultater blir upåvirket så lenge spenningsforholdene holder seg innenfor betingelser der  $1 \geq K_0' \geq 0,65$ .

For å komme med en sikker påstand om at denne teorien kan anvendes praktisk, bør man foreta flere forsøk med forskjellige jordarter.

# Referanser

Emdal A. (2017) *Introduksjon til geoteknikk*. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.

Institutt for geoteknikk og fundamenteringslære. (1965). Konsolideringstrykkets innflytelse på den udrenerte skjærfasthet i leire. Trondheim: Institutt for geoteknikk og fundamenteringslære.

Lunne T. (1997). Sample disturbance effects in soft low plastic Norwegian clay. Rotterdam.

Lunne T., Robertson P.K.&Powell J.J.M (1946) Cone Penetration Testing. London.

Naturfare-Infrastruktur-Flom-Skred. (2014.) Valg av karakteristisk  $c_uA$  – profil basert på felt – og laboratorieundersøkelser. Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat i et samarbeid med Statens vegvesen og Jernbaneverket

Norsk Geoteknisk Forening. (2013). Veiledning for prøvetaking. Melding nr.11. Oslo: NorskGeoteknisk Forening

NS-EN ISO 17892-9. (2018) Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Consolidated triaxial compression tests on water saturated soils.

Sandven R. (2014). Geoteknikk, materialegenskaper. Utstyr, prosedyrer og parameterbestemmelser. Bestemmelse av styrkeparametere i laboratoriet. Treksialforsøk. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.

Statens vegvesen. (2015). Håndbok R210.Laboratorieundersøkelser. Oslo: Statens vegvesen.

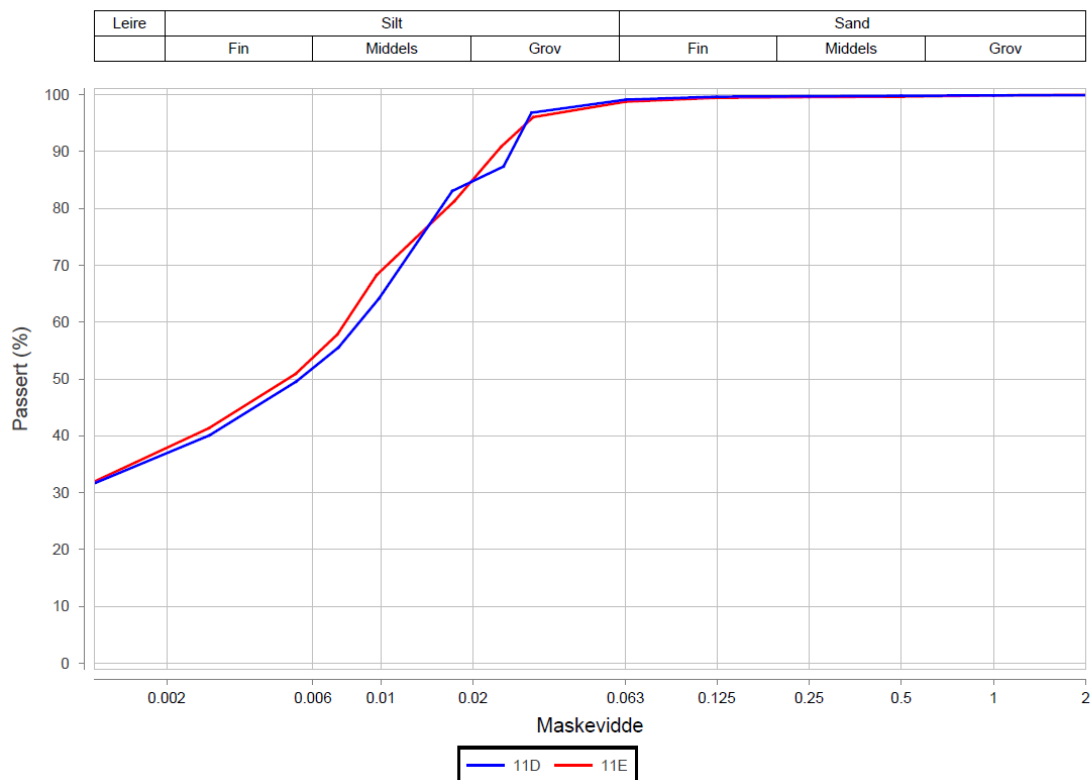


# Vedlegg



Delprøve	Dybde (m)	Tyngdetetthet (kN/m <sup>3</sup> )	Humusinnhold (%)	Vanninnhold (%)	Plastisitetsindeks Ip (%)	Enkelt trykkforsøk(kPa)/ deformasjon (%)	Konus uomrørt, Su (kPa)	Konus omrørt, Sr (kPa)	Korndensitet (g/cm <sup>3</sup> )
A	18.15			23.4					
B	18.25	20.6				45.2/3.8			
C	18.35						57.1	1.3	
D	18.45	20.4	1.2	26.7	6.5			1,3	2.8
E	18.55	20.3	1.3	24	9.2			1,3	2.8
F	18.65					41.1/2.9			

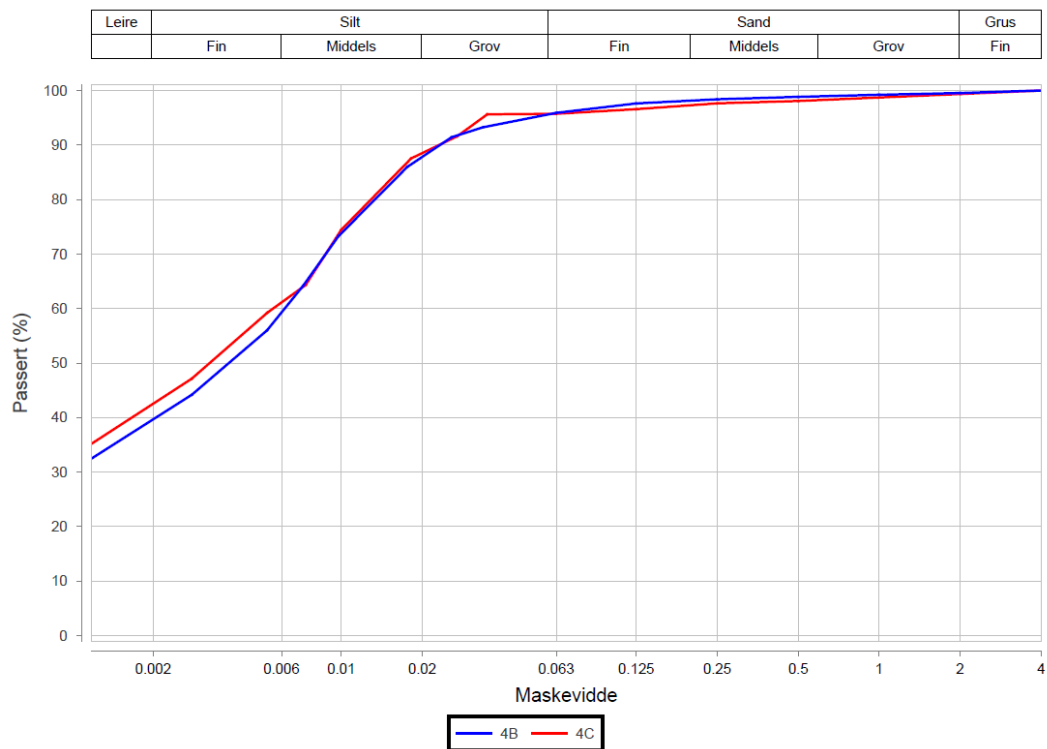
Kornstørrelsesfordeling for de aktuelle delprøvene D og E som ble tatt treksforsøk på.



Prosjekt	Type analyse	Parallell	Bilag
Fv717 Sund-Bradden	Rutineundersøkelser	RK6	1

Delprøve	Dybde (m)	Tyngdetetthet (kN/m <sup>3</sup> )	Humusinnhold (%)	Vanninnhold (%)	Plastisitetsindeks Ip (%)	Enkelt trykkforsøk(kPa)/ deformasjon (%)	Konus uomrørt, Su (kPa)	Konus omrørt, Sr (kPa)	Korndensitet (g/cm <sup>3</sup> )
A	3.15								
B	3.25	19.2	1.7	30.8	14.7			5,6	2.8
C	3.35	19.1	1.7	32.5	16	26.3/14.7		5,6	2.8
D	3.45	20.4		26.8					
E	3.55						43.4	5.6	
F	3.65					30.3/14.9			

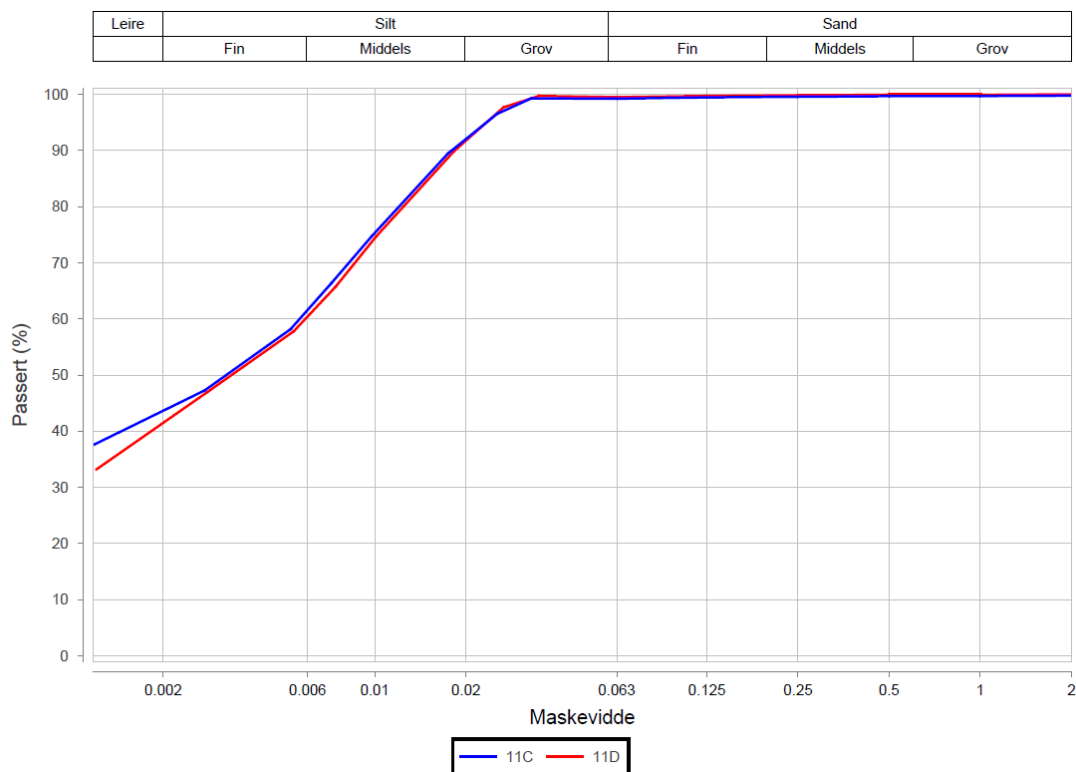
Kornstørrelsesfordeling for de aktuelle delprøvene B og C som ble tatt treksforsøk på.



Prosjekt	Type analyse	Parallell	Bilag
Fv717 Sund-Bradden	Rutineundersøkelser	BH19_4	2

Delprøve	Dybde (m)	Tyngdetetthet (kN/m <sup>3</sup> )	Humusinnhold (%)	Vanninnhold (%)	Plastisitetsindeks Ip (%)	Enkelt trykkforsøk (kPa)/ deformasjon (%)	Konus uomrørt, Su (kPa)	Konus omrørt, Sr (kPa)	Korndensitet (g/cm <sup>3</sup> )
A	10.15			23.6			26.6	0.4	
B	10.25					23.9/5.8			
C	10.35	20.1	0.6	30.3	9				2.8
D	10.45	20.1	0.4	28.5	8.1				2.8
E	10.55					20.2/4.5			
F	10.65			26.9			31.9	0.6	

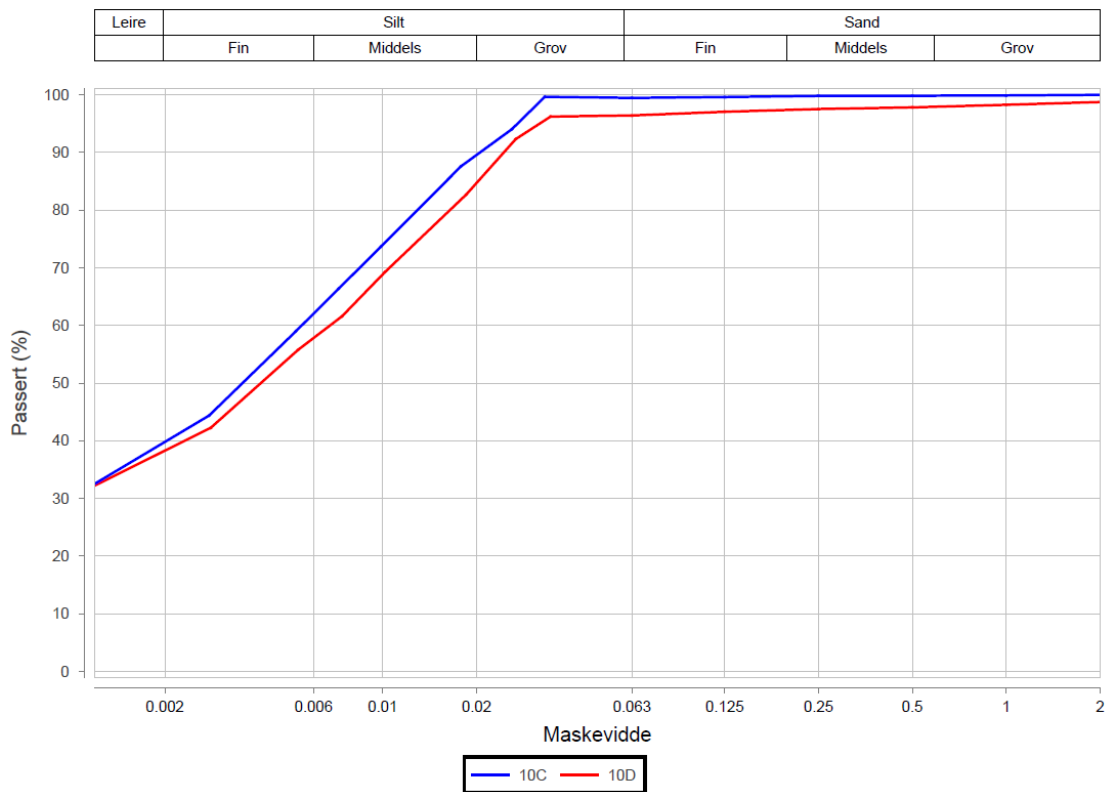
Kornstørrelsesfordeling for de aktuelle delprøvene C og D som ble tatt treksforsøk på.



Prosjekt	Type analyse	Parallell	Bilag
Fv717 Sund-Bradden	Rutineundersøkelser	BH20_11	3

Delprøve	Dybde (m)	Tyngdetetthet (kN/m <sup>3</sup> )	Humusinnhold (%)	Vanninnhold (%)	Plastisitetindeks Ip (%)	Enkelt trykkforsøk (kPa)/ deformasjon (%)	Konus uorrørt, Su (kPa)	Konus omrørt, Sr (kPa)	Korndensitet (g/cm <sup>3</sup> )
A	9.15			23.5			62.3	3.7	
B	9.25					34.9/8.6			
C	9.35	20.4	0.5	26.1	9			2,8	2.8
D	9.45	20.5	0.4	25.4	7.6			2,8	2.8
E	9.55						48.1	2.8	
F	9.65			27.1		32.8/6			

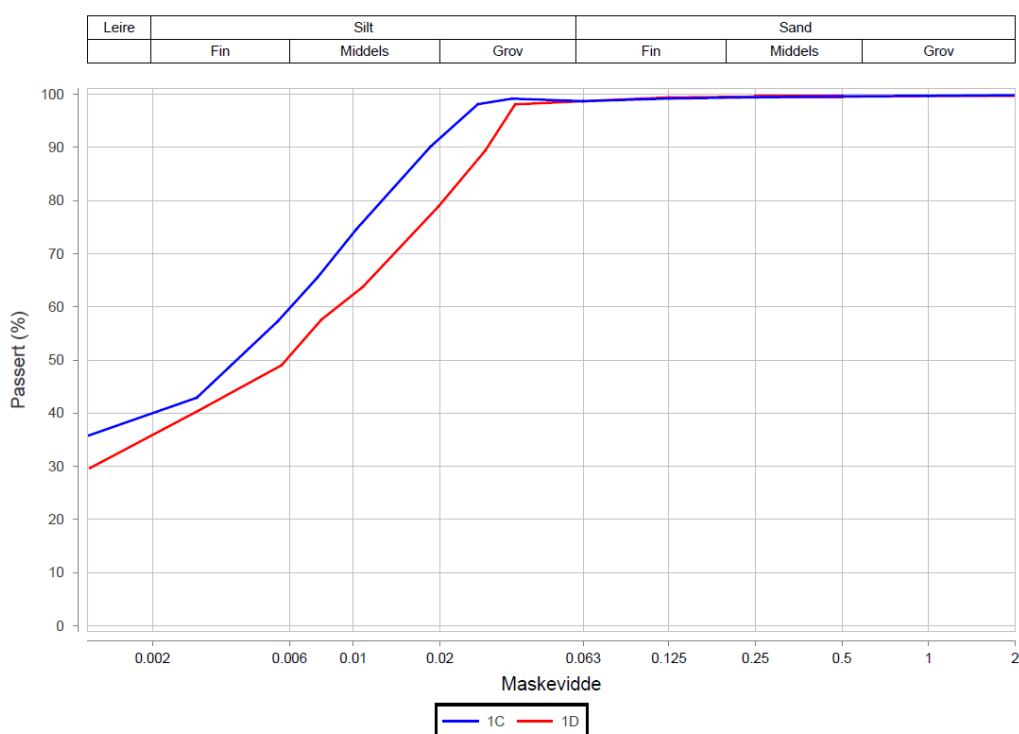
Kornstørrelsesfordeling for de aktuelle delprøvene C og D som ble tatt treksforsøk på.



Prosjekt	Type analyse	Parallell	Bilag
Fv717 Sund-Bradden	Rutineundersøkelser	BH20_10	4

Delprøve	Dybde (m)	Tyngdetetthet (kN/m <sup>3</sup> )	Humusinnhold (%)	Vanninnhold (%)	Plastisitetsindeks Ip (%)	Enkelt trykkforsøk(kPa)/deformasjon (%)	Konus uomrørt, Su (kPa)	Konus omrørt, Sr (kPa)	Korndensitet (g/cm <sup>3</sup> )
A	5.15			34.9			22.9	2	
B	5.25								
C	5.35	18.6	1.7	37.4	17.7	16.5/2		2	2.8
D	5.45	19.1	1.4	37.8	12.1	19.4/2.4		2	2.8
E	5.55								
F	5.65			31.0			17.1	2	

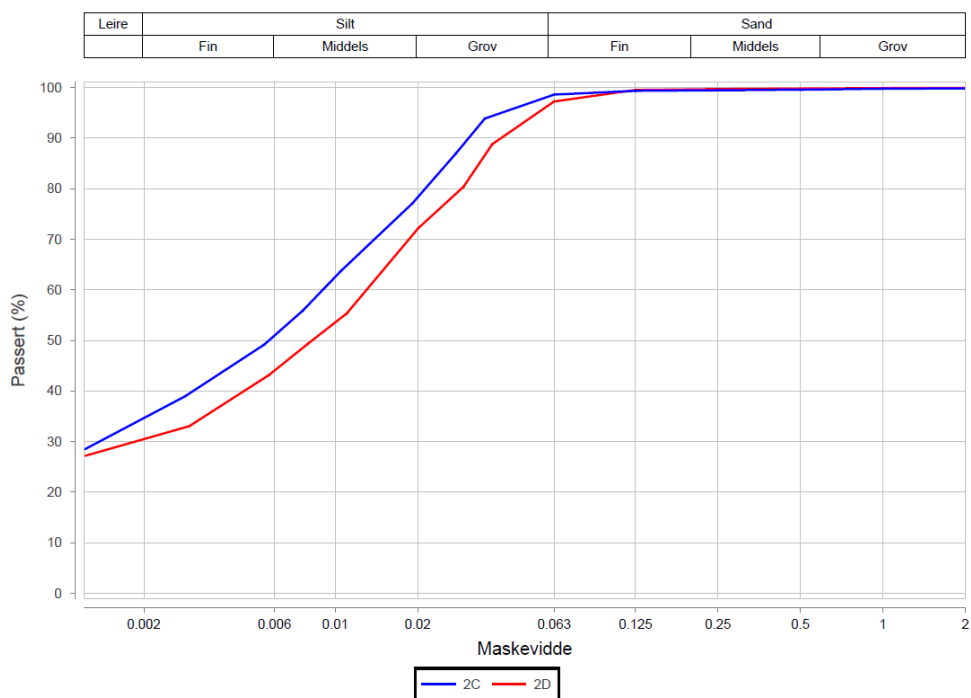
Kornstørrelsesfordeling for de aktuelle delprøvene C og D som ble tatt treksforsøk på.



Prosjekt	Type analyse	Parallell	Bilag
Fv717 Sund-Bradden	Rutineundersøkelser	BH_15_1	5

Delprøve	Dybde (m)	Tyngdetetthet (kN/m <sup>3</sup> )	Humusinnhold (%)	Vanninnhold (%)	Plastisitetsindeks Ip (%)	Enkelt trykkforsøk(kPa)/deformasjon (%)	Konus uomrørt, Su (kPa)	Konus omrørt, Sr (kPa)	Korndensitet (g/cm <sup>3</sup> )
A	7.15			32.4			17.4		2,8
B	7.25					14.4/3.3			
C	7.35	19.1	1.2	32	11			1,2	
D	7.45	19.3	1.5	30	9			0,7	
E	7.55					19.3/2.7			
F	7.65			34.1			14.9		2,8

Kornstørrelsesfordeling for de aktuelle delprøvene C og D som ble tatt treaksforsøk på.

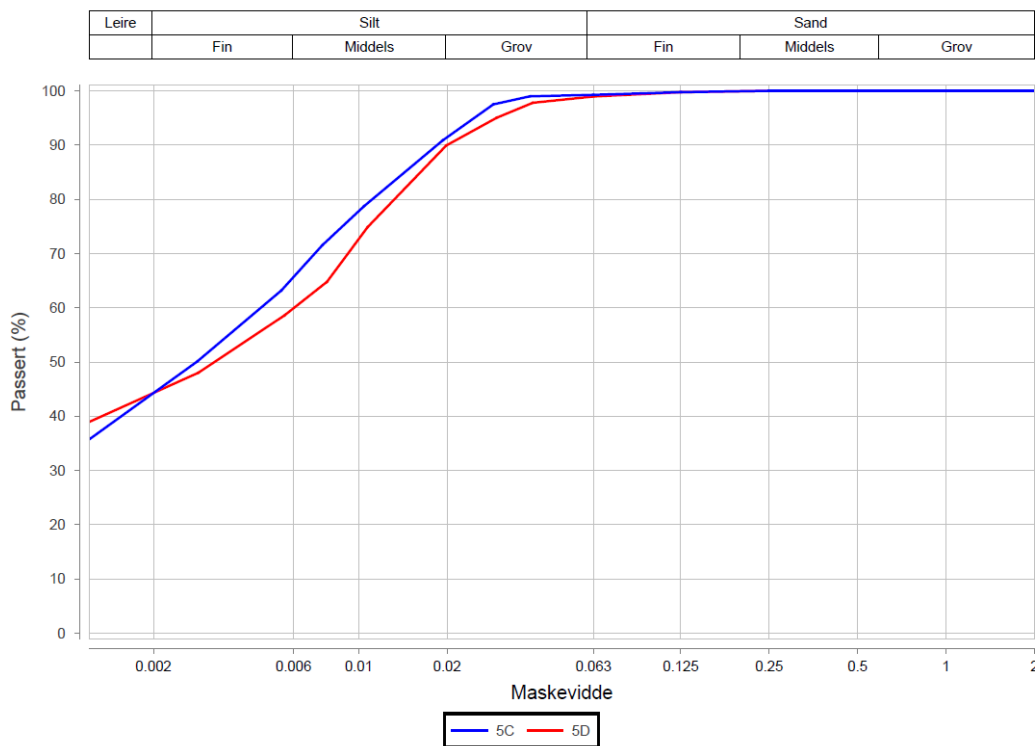


Prosjekt	Type analyse	Parallell	Bilag
Fv717 Sund-Bradden	Rutineundersøkelser	BH15_2	6

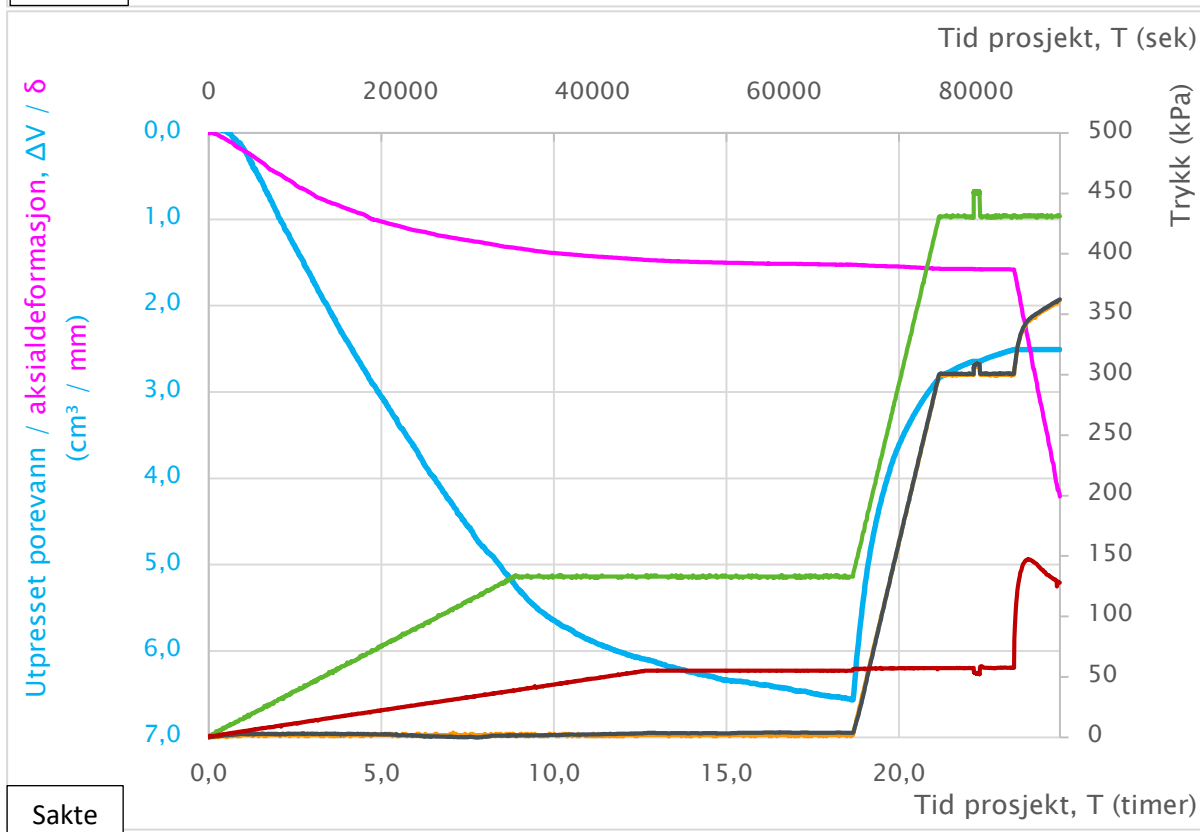
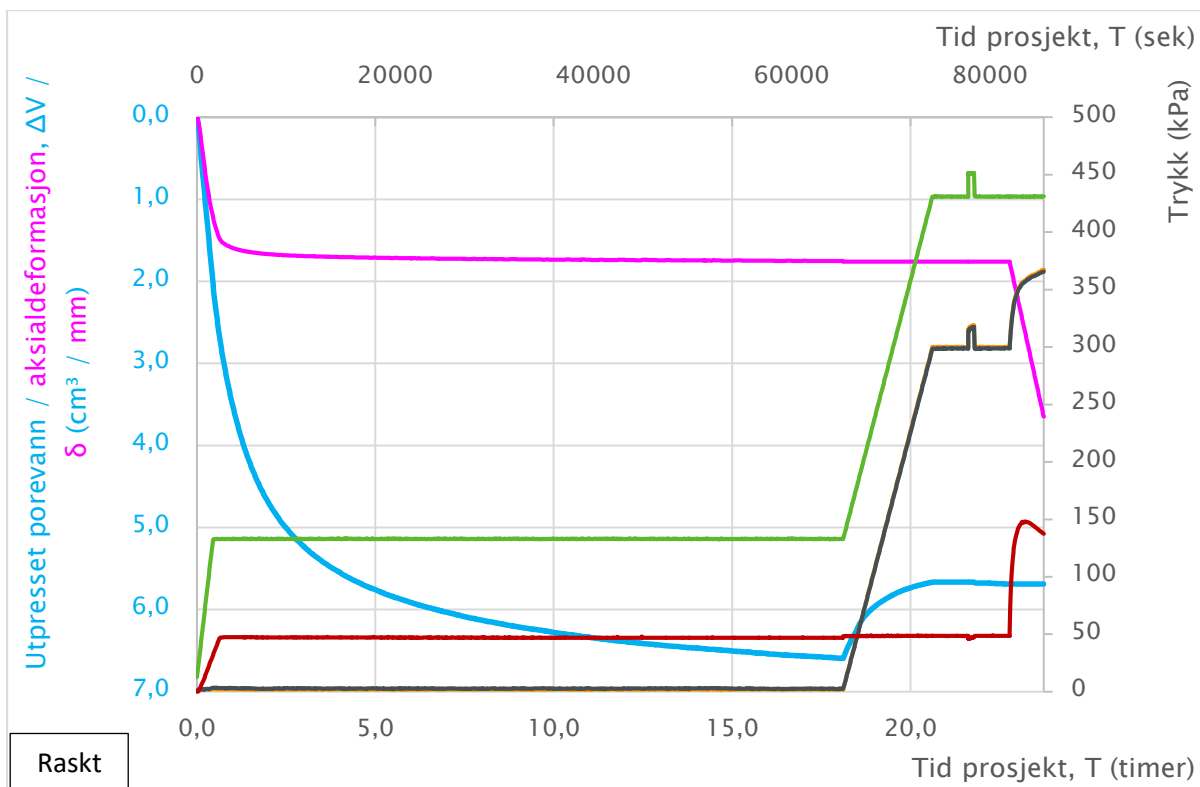


Delprøve	Dybde (m)	Tyngdetetthet (kN/m <sup>3</sup> )	Humusinnhold (%)	Vanninnhold (%)	Plastisitetsindeks Ip (%)	Enkelt trykkforsøk(kPa)/deformasjon (%)	Konus uomrørt, Su (kPa)	Konus omrørt, Sr (kPa)	Korndensitet (g/cm <sup>3</sup> )
A	6.15			34.2		29.1/4.2			
B	6.25				8		31.9	0.3	
C	6.35	18.6	1.2	39.7	10			0,3	2.8
D	6.45	18.1	1.6	40.9	10			0,3	2.8
E	6.55					33.6/1.9			
F	6.65			44.7			32.5	0.1	

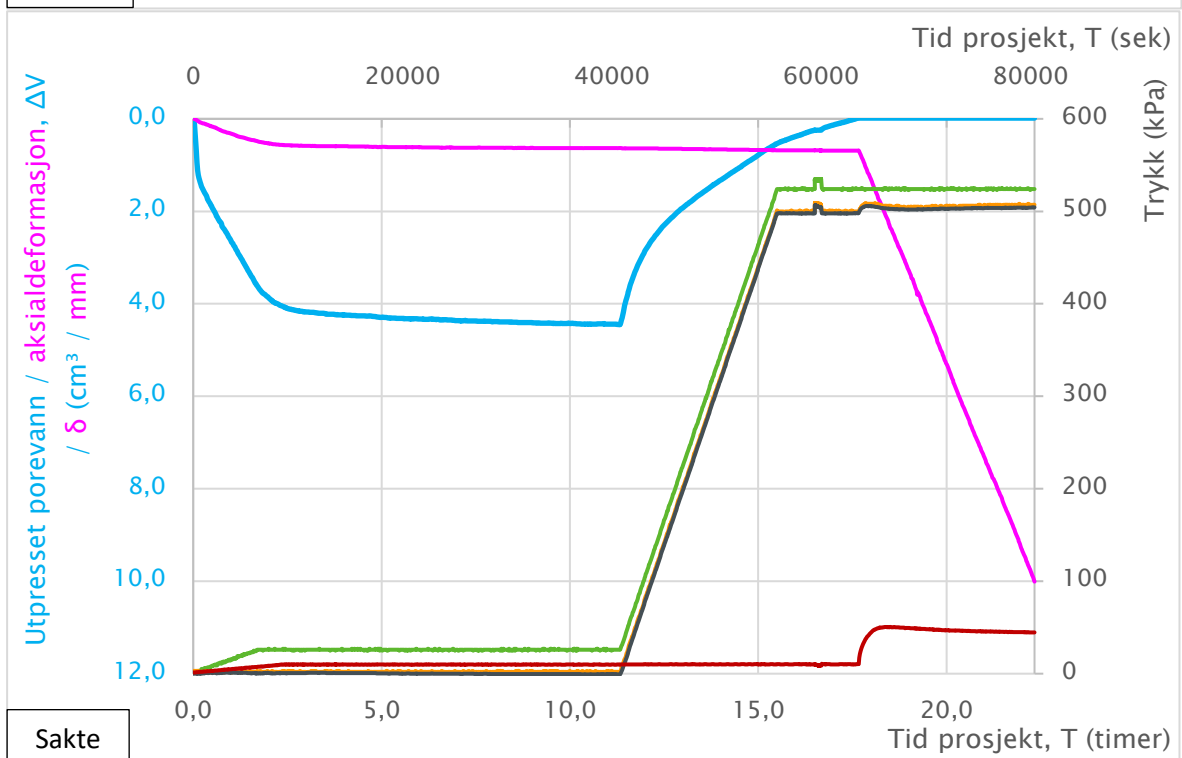
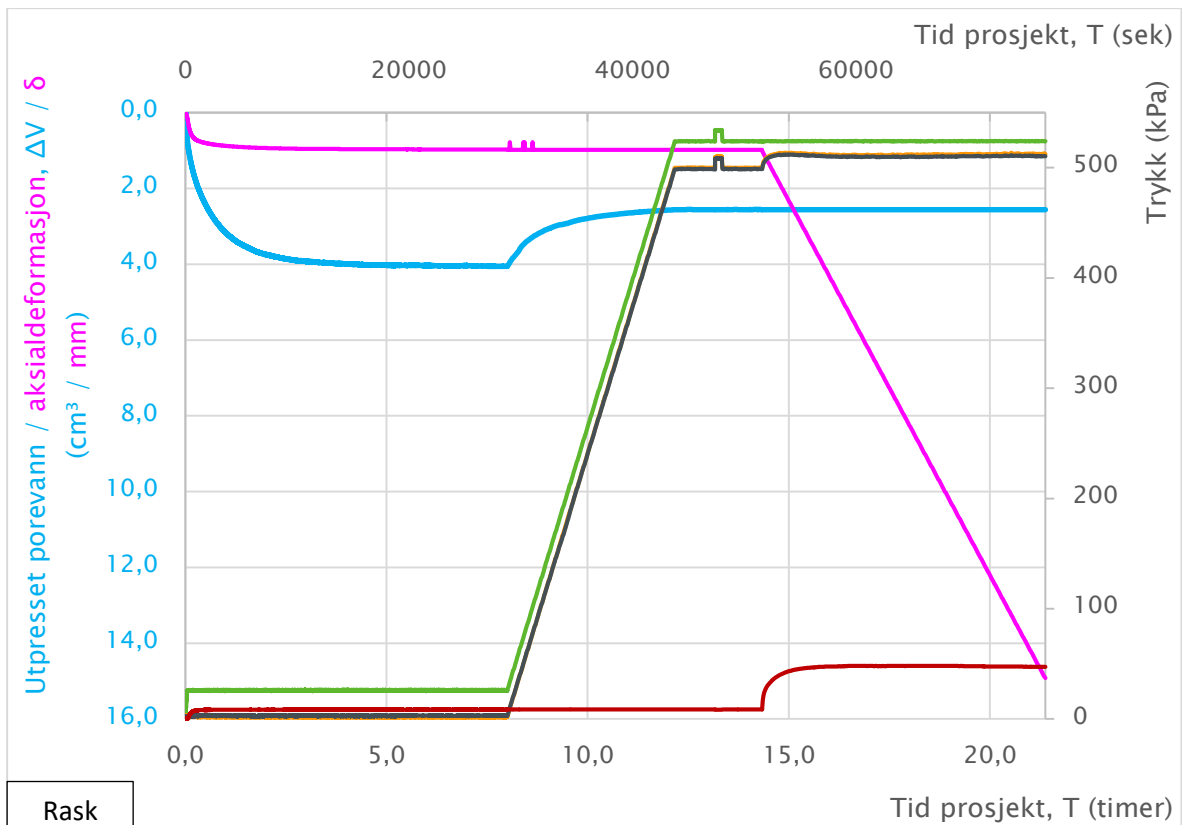
Kornstørrelsesfordeling for de aktuelle delprøvene C og D som ble tatt treksforsøk på.



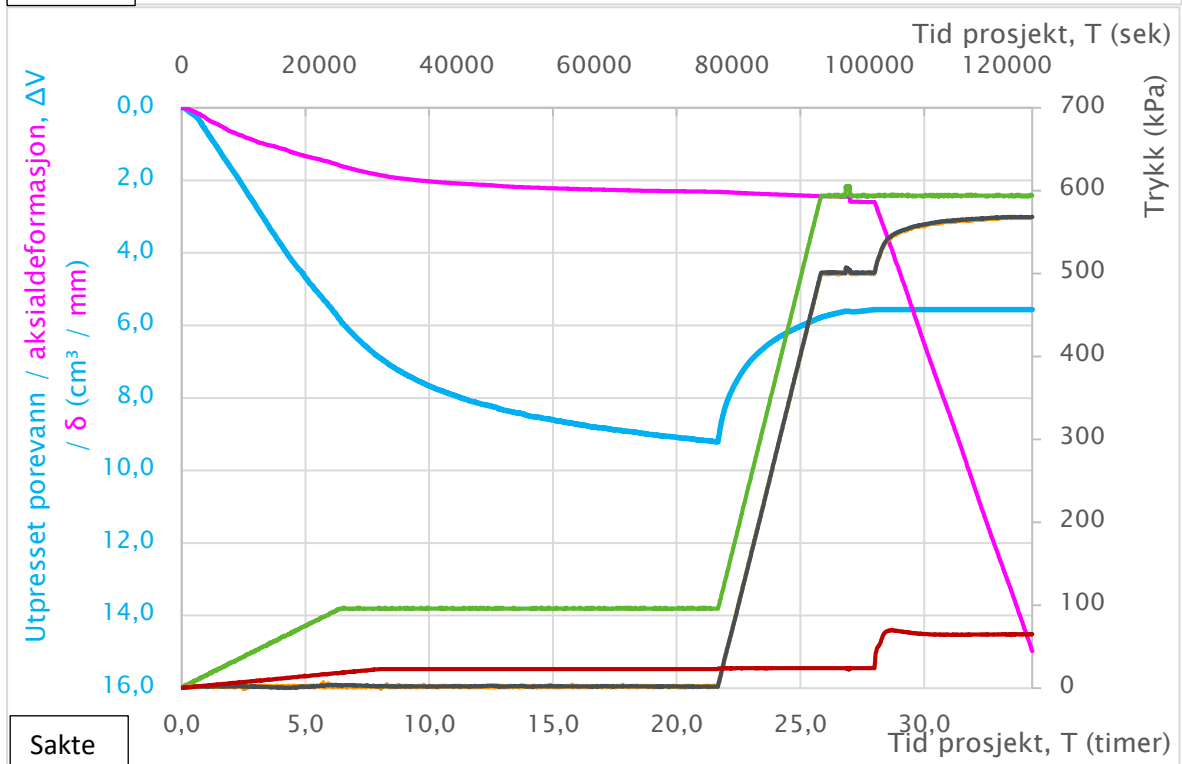
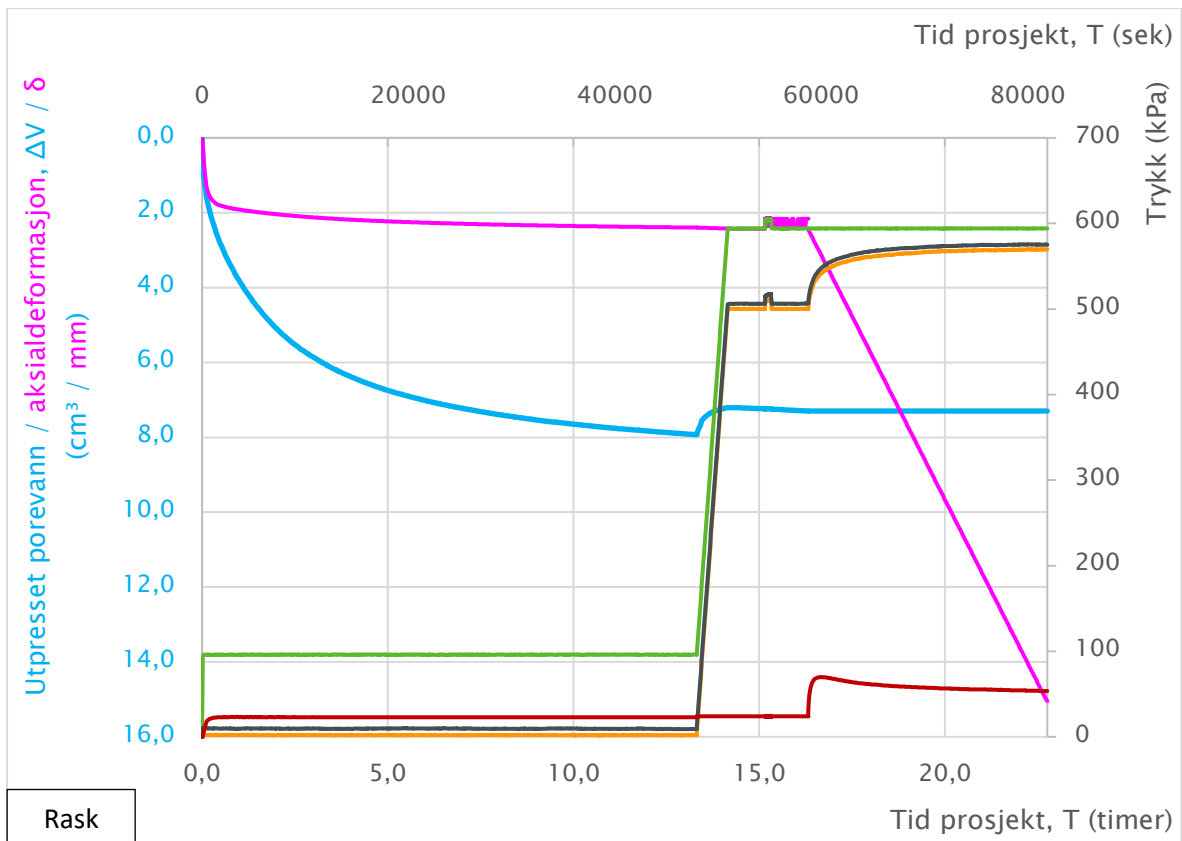
Prosjekt	Type analyse	Parallell	Bilag
Fv717 Sund-Bradden	Rutineundersøkelser	BH2207	7



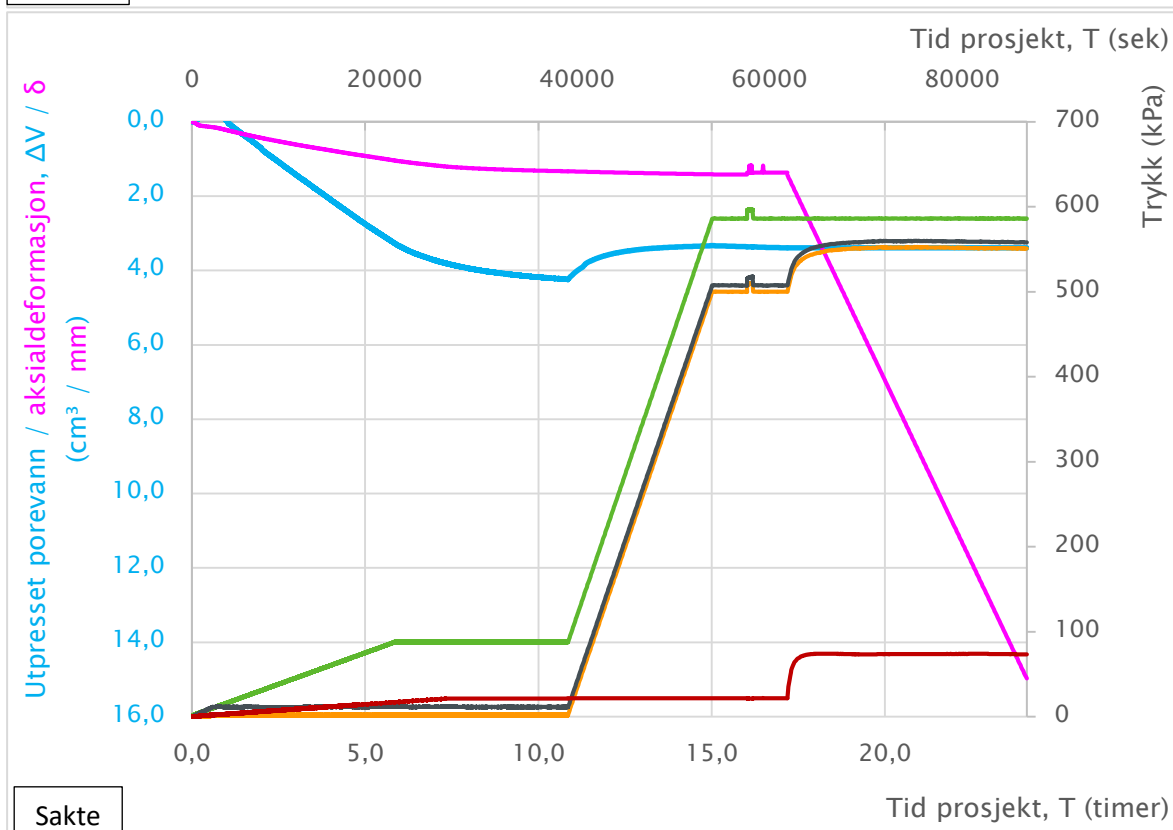
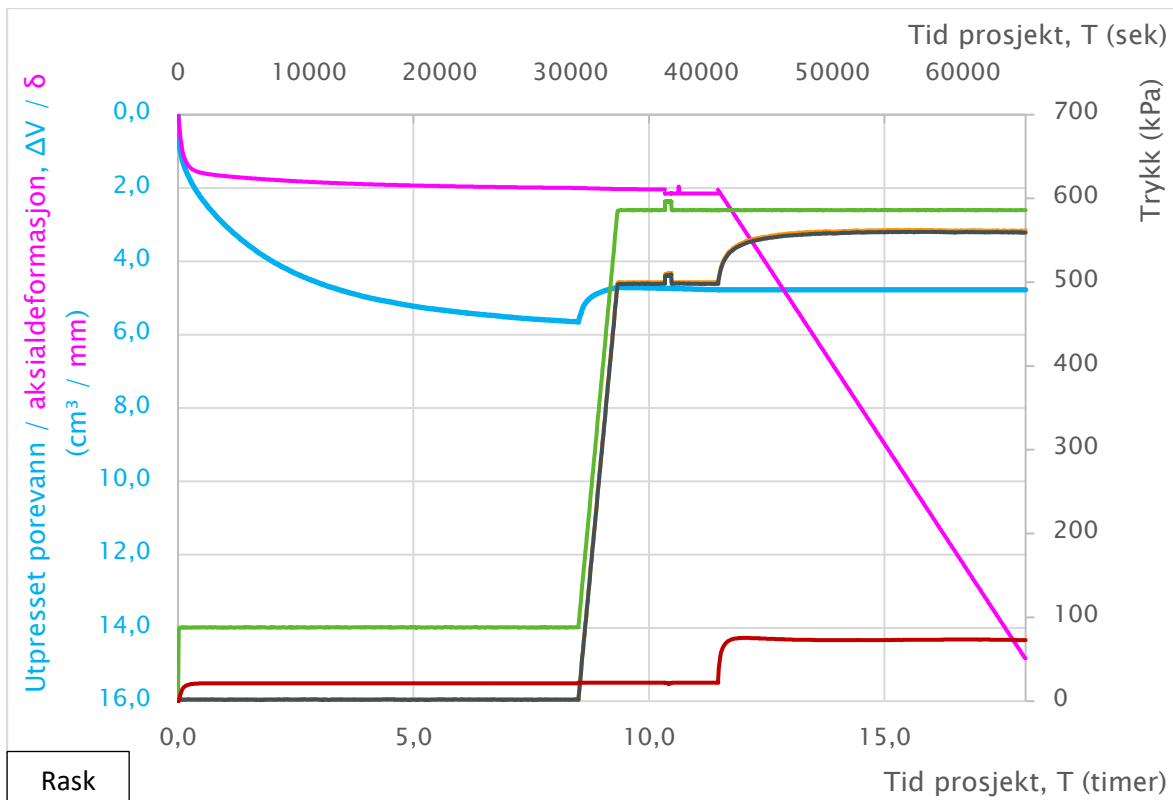
Prosjekt	Type rapport	Parallell	Bilag
Fv717 Sund-Bradden	Utførelsesrapport	RK6	8
	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">—</span> Deviatorspenning</li> <li><span style="color: green;">—</span> Celletrykk</li> <li><span style="color: black;">—</span> Poretrykk</li> </ul>		



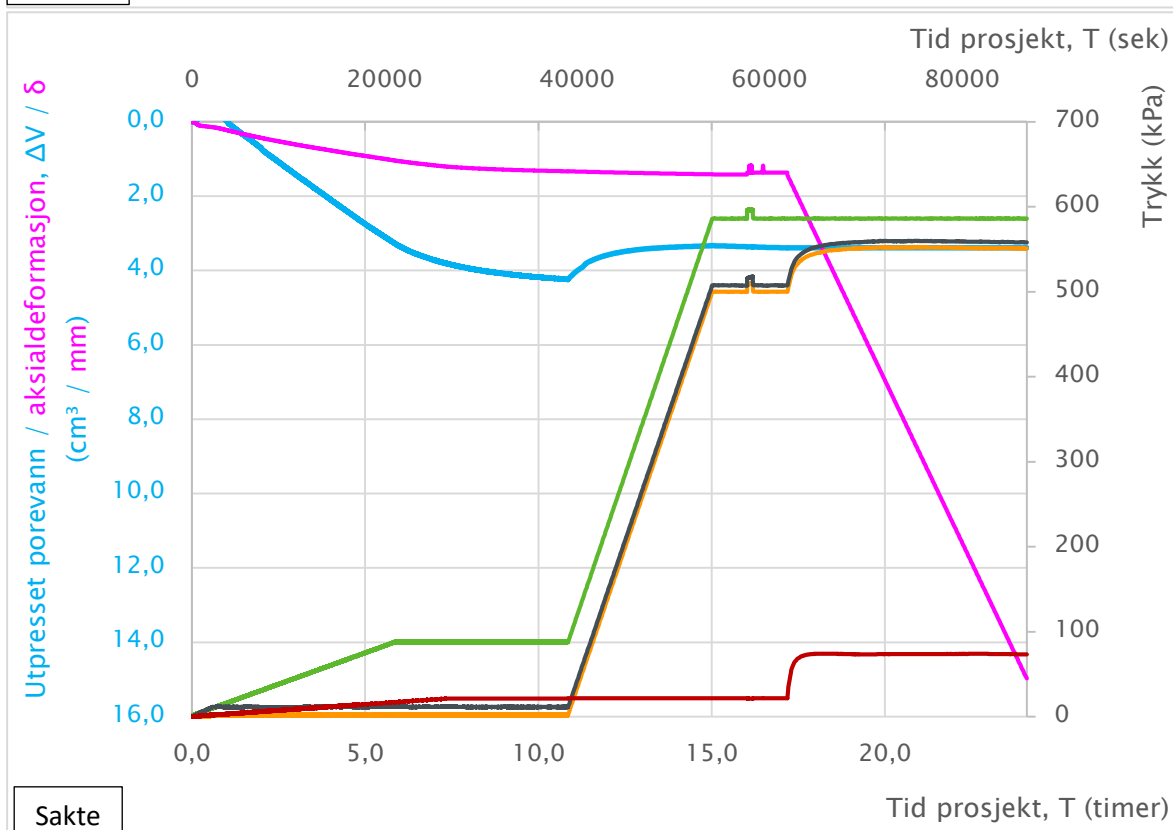
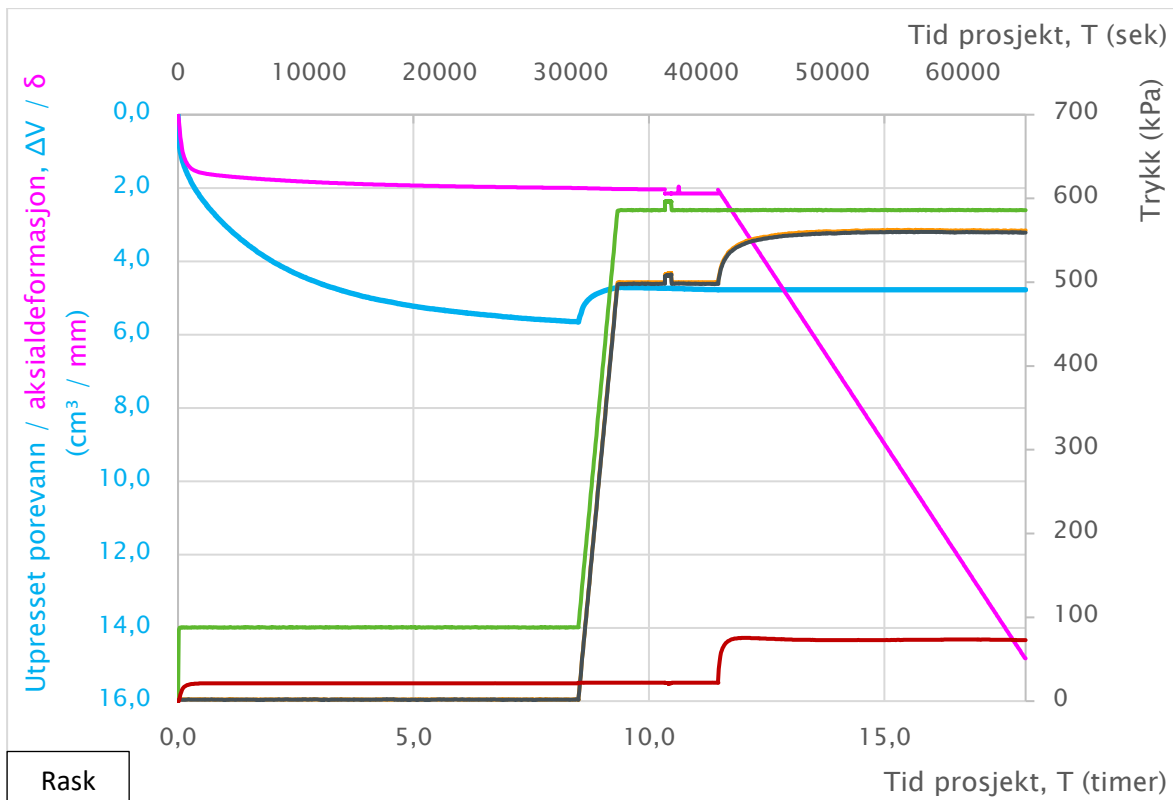
Prosjekt	Type rapport	Parallell	Bilag
Fv717 Sund-Bradden	Utførelsesrapport	BH19_4	9
	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">—</span> Deviatorspenning</li> <li><span style="color: green;">—</span> Celletrykk</li> <li><span style="color: black;">—</span> Poretrykk</li> </ul>		



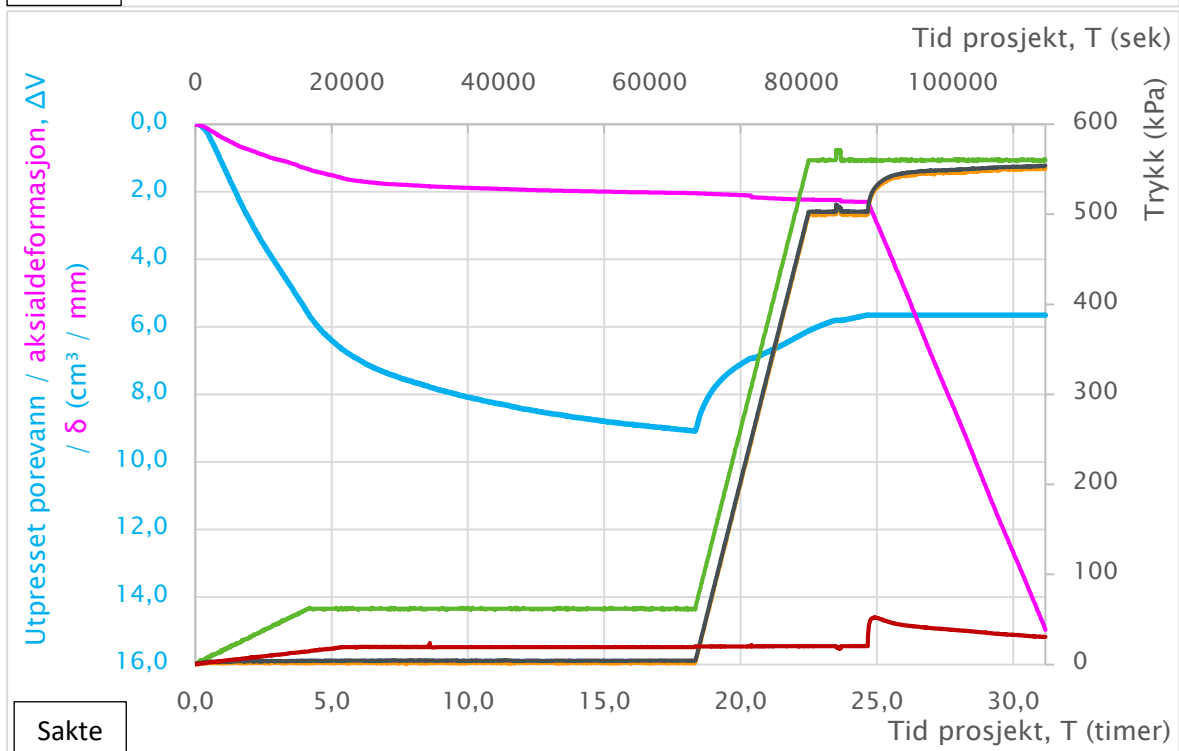
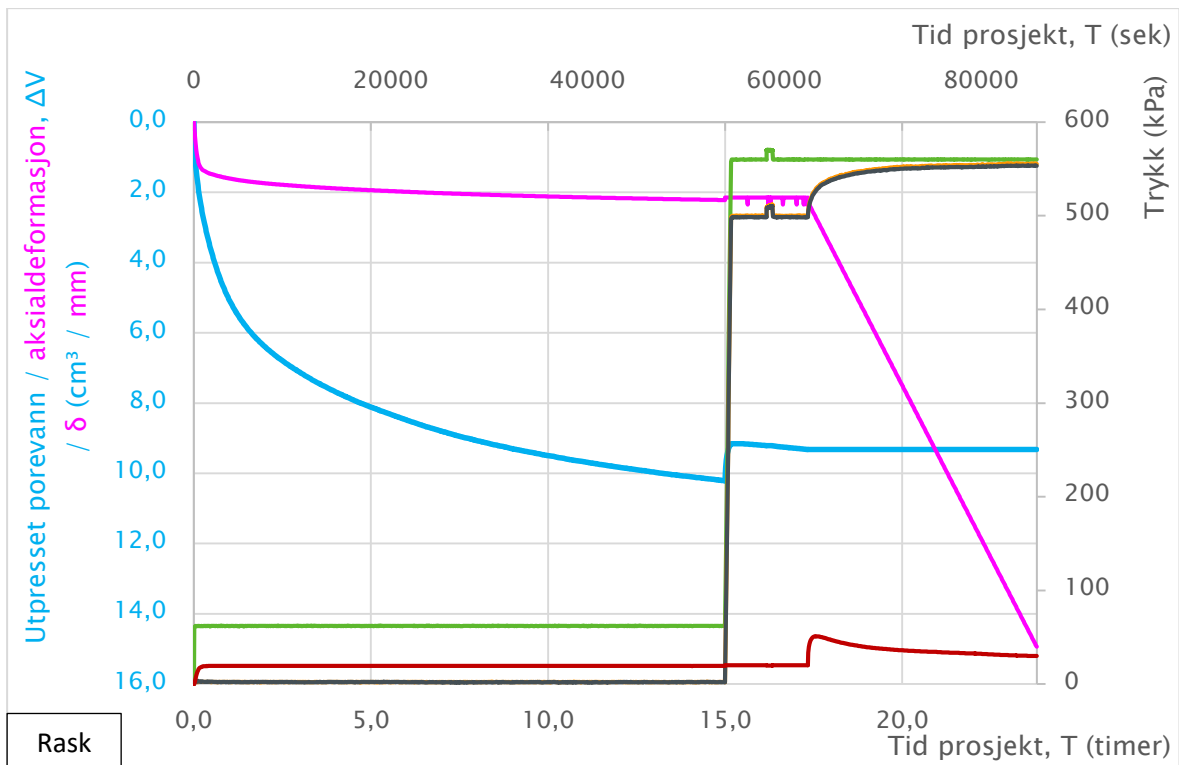
Prosjekt	Type rapport	Parallell	Bilag
Fv717 Sund-Bradden	Utførelsesrapport	BH20_11	10
	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">—</span> Deviatorspenning</li> <li><span style="color: green;">—</span> Celletrykk</li> <li><span style="color: black;">—</span> Poretrykk</li> </ul>		



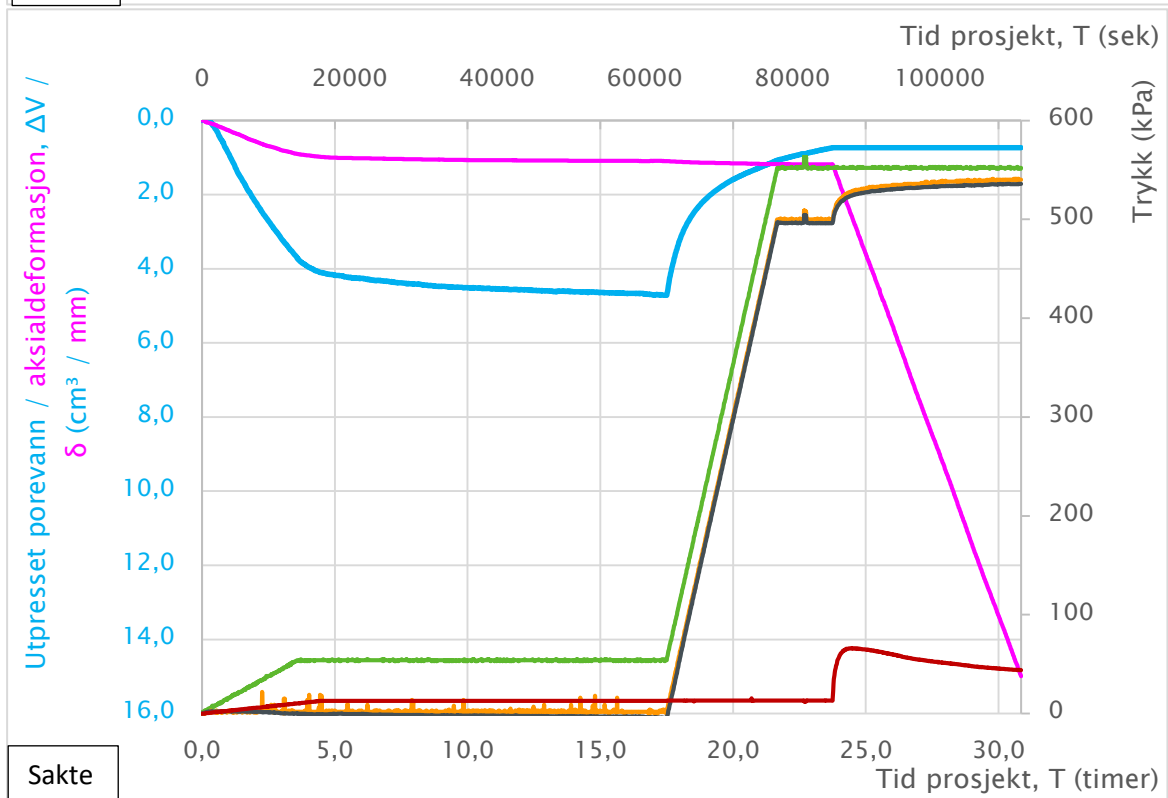
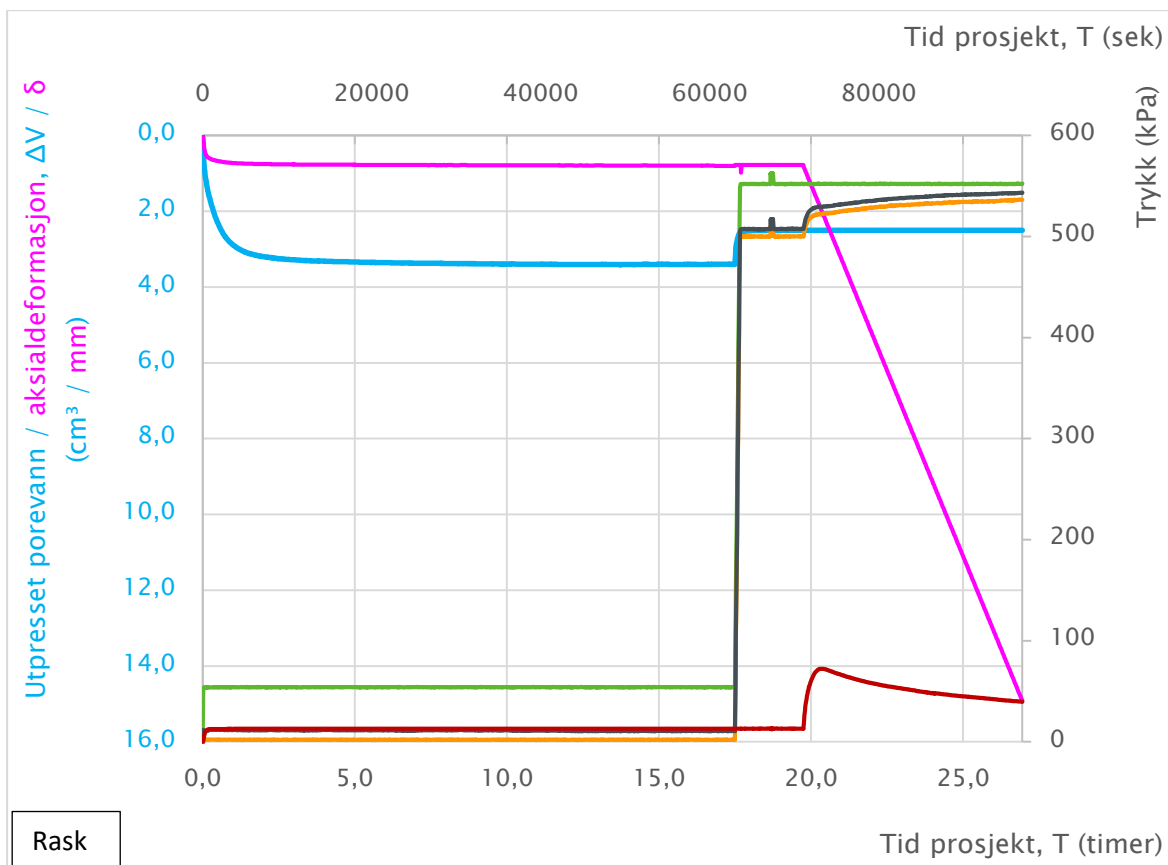
Prosjekt	Type rapport	Parallell	Bilag
Fv717 Sund-Bradden	Utførelsesrapport	BH20_10	11
	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">—</span> Deviatorspenning</li> <li><span style="color: green;">—</span> Celletrykk</li> <li><span style="color: black;">—</span> Poretrykk</li> </ul>		



Prosjekt	Type rapport	Parallell	Bilag
Fv717 Sund-Bradden	Utførelsesrapport	BH20_10	11
	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">—</span> Deviatorspenning</li> <li><span style="color: green;">—</span> Celletrykk</li> <li><span style="color: black;">—</span> Poretrykk</li> </ul>		

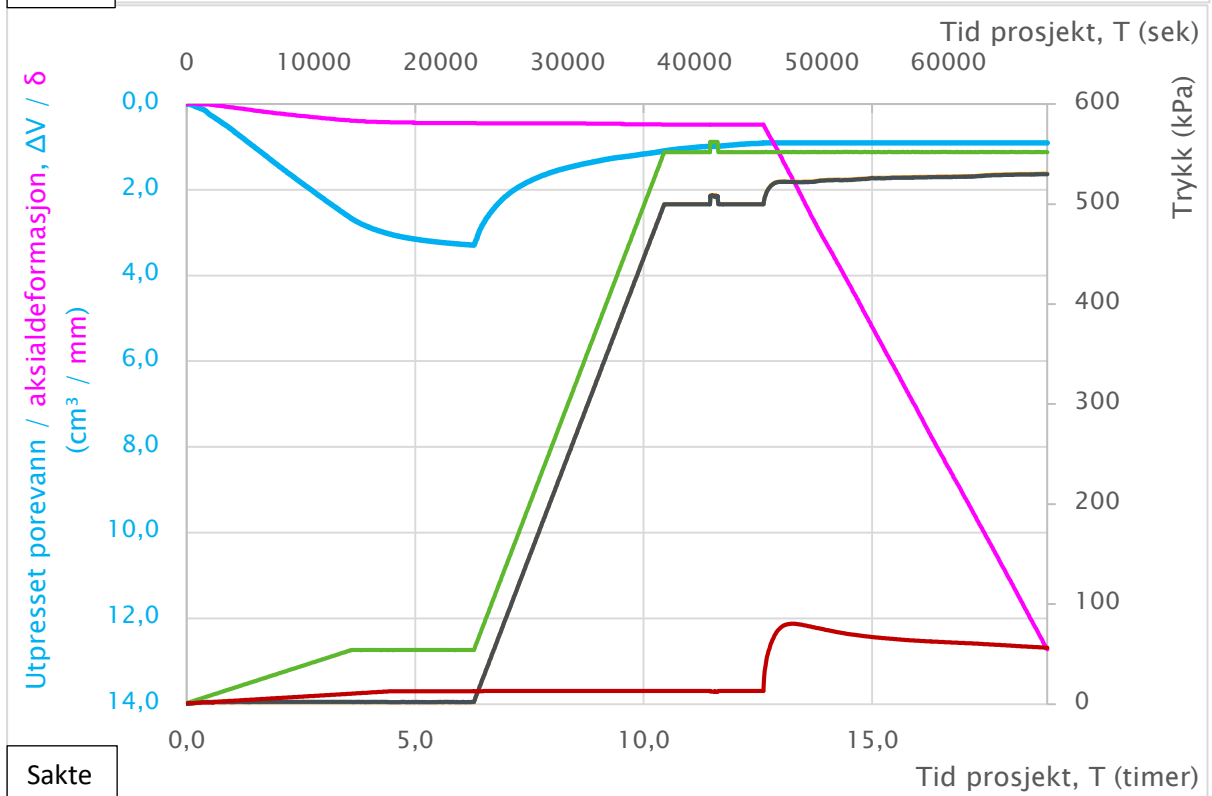
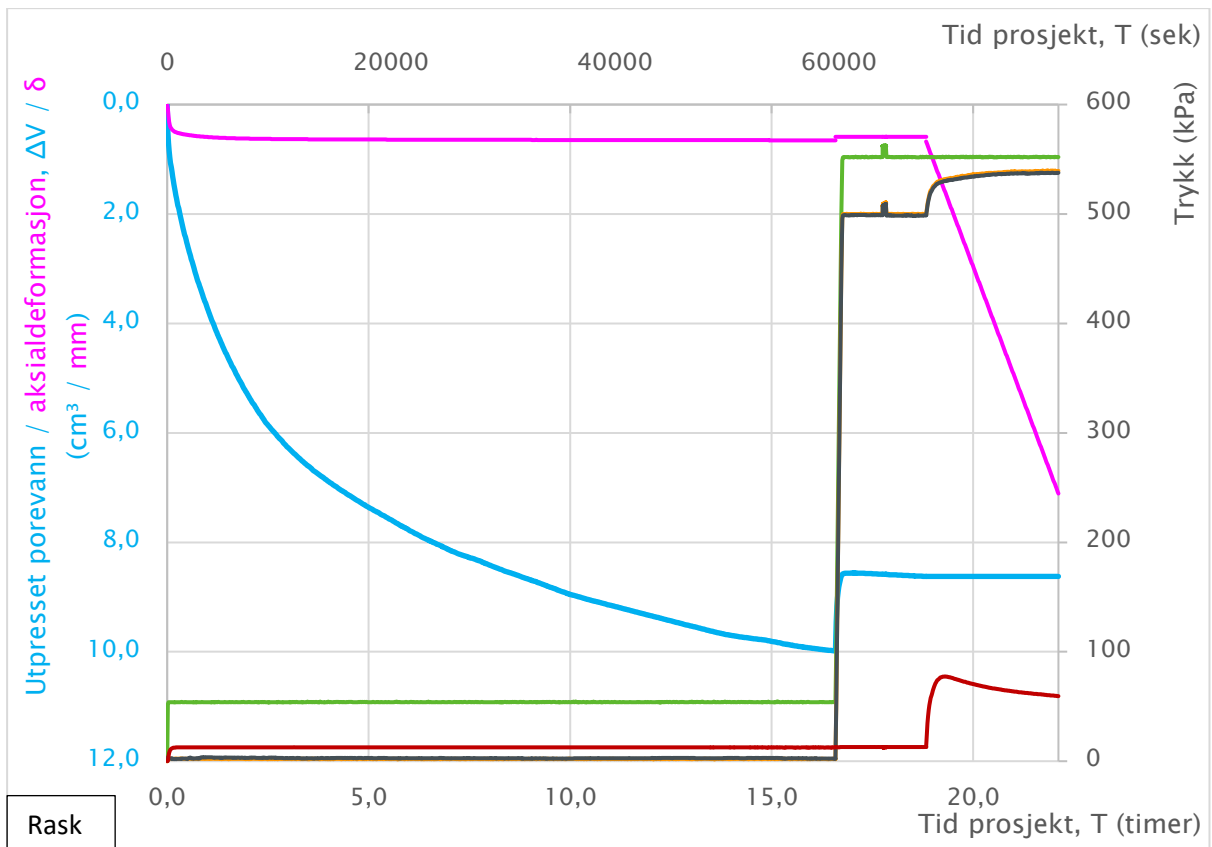


Prosjekt	Type rapport	Parallell	Bilag
Fv717 Sund-Bradden	Utførelsesrapport	BH15_2	13
	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">—</span> Deviatorspenning</li> <li><span style="color: green;">—</span> Celletrykk</li> <li><span style="color: black;">—</span> Poretrykk</li> </ul>		

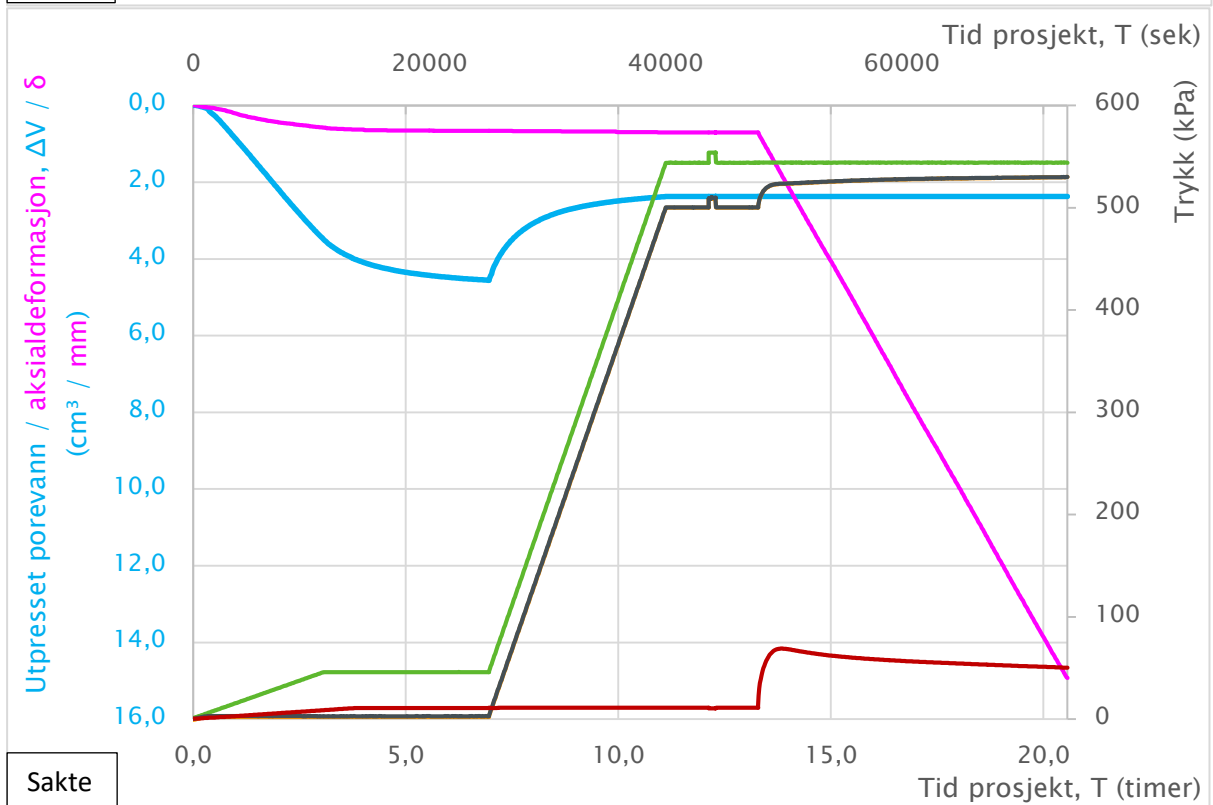
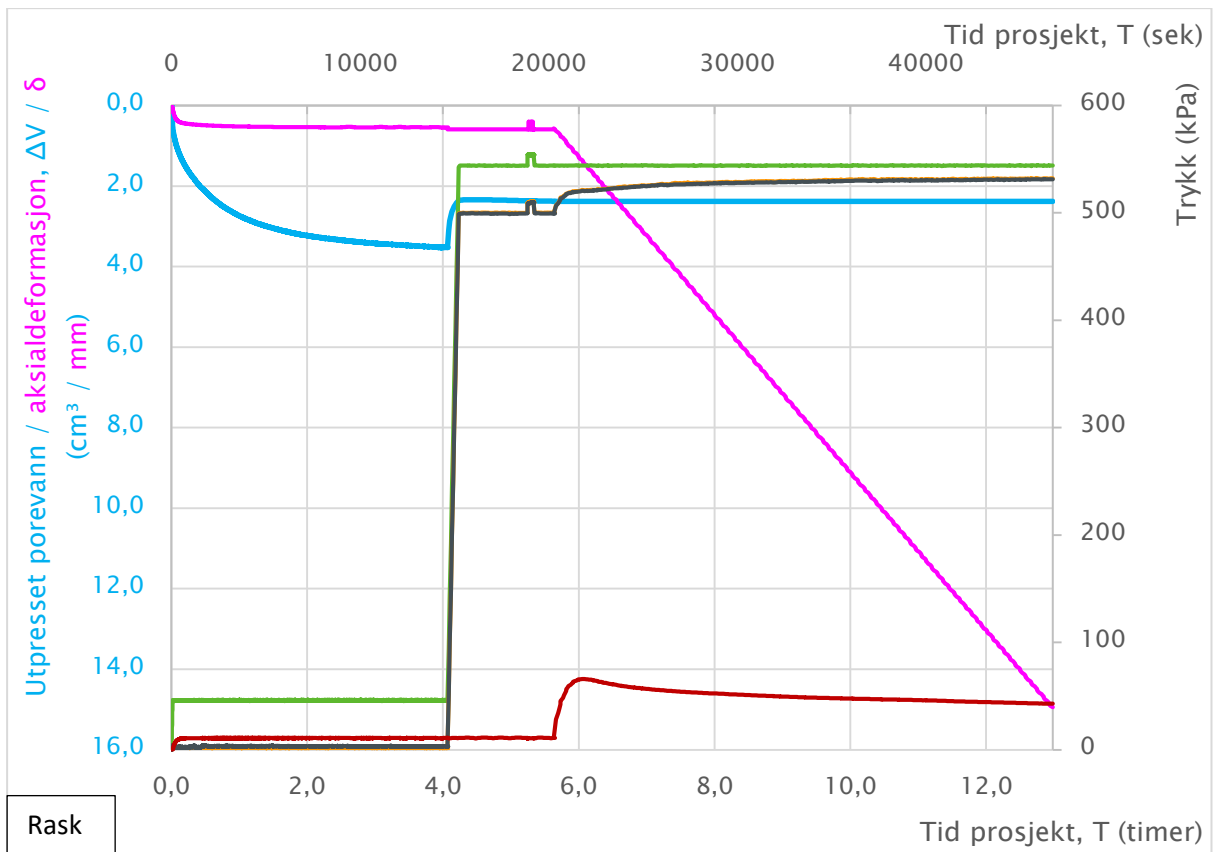


Prosjekt	Type rapport	Parallell	Bilag
Fv717 Sund-Bradden	Utførelsesrapport	BH2207	14
	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">—</span> Deviatorspenning</li> <li><span style="color: green;">—</span> Celletrykk</li> <li><span style="color: black;">—</span> Poretrykk</li> </ul>		

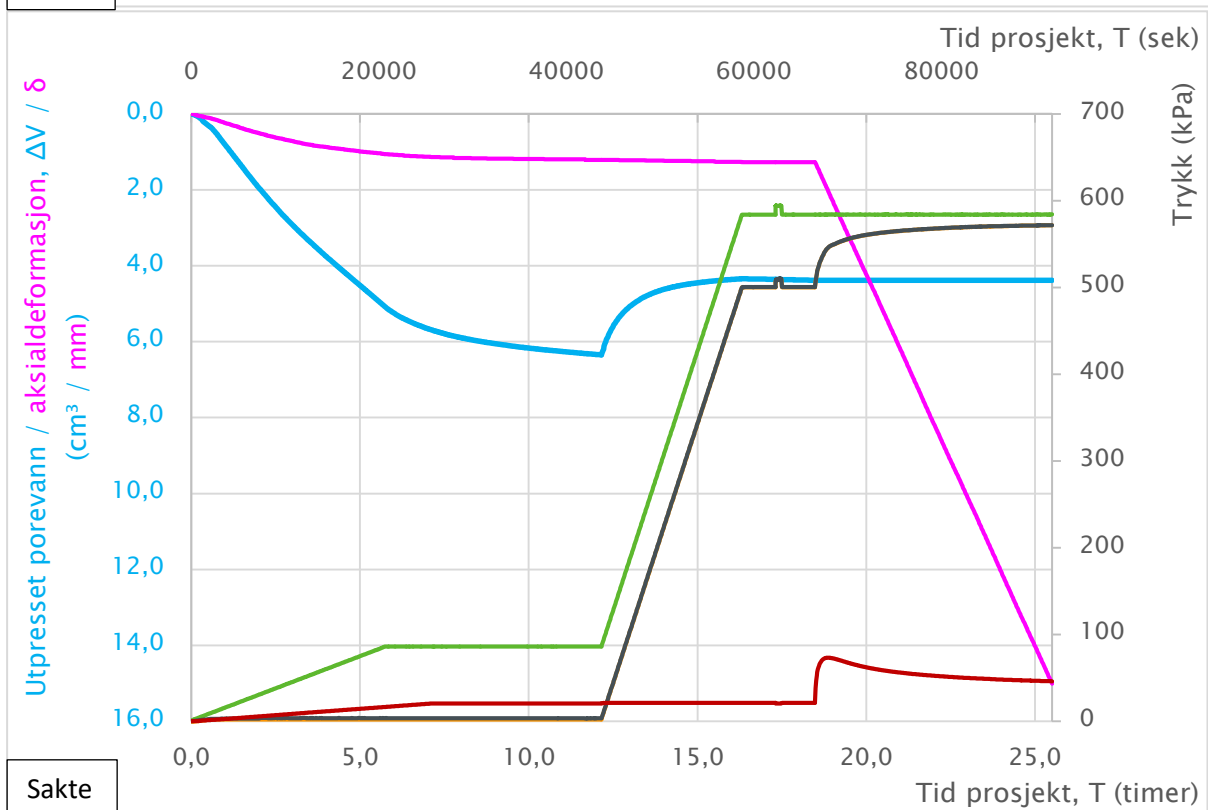
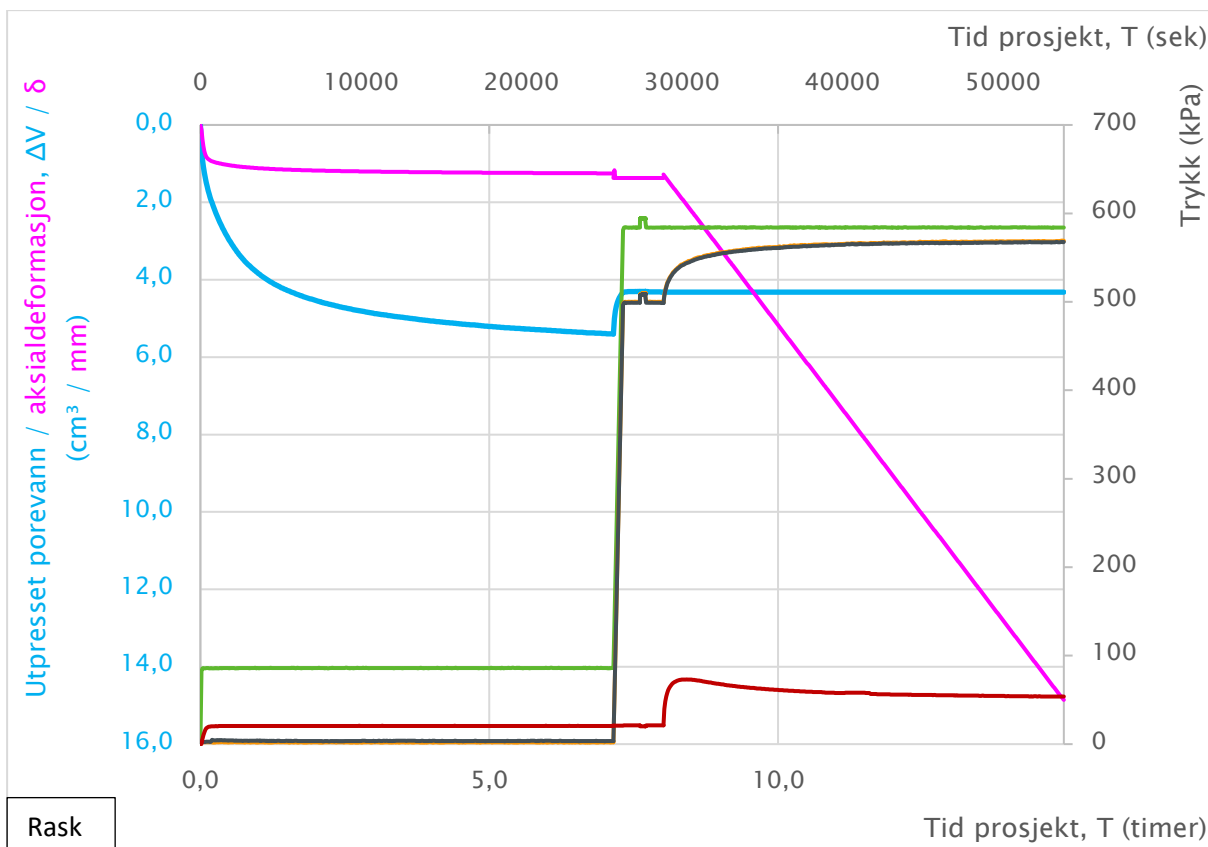




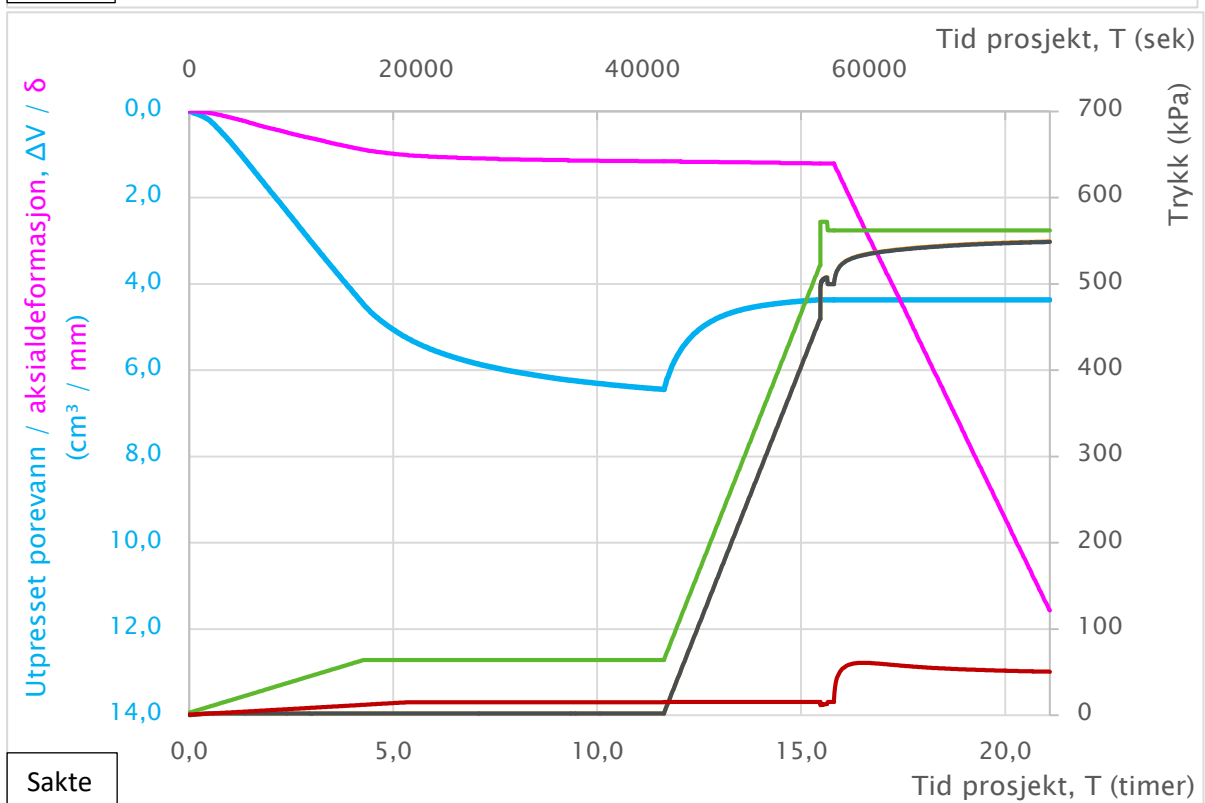
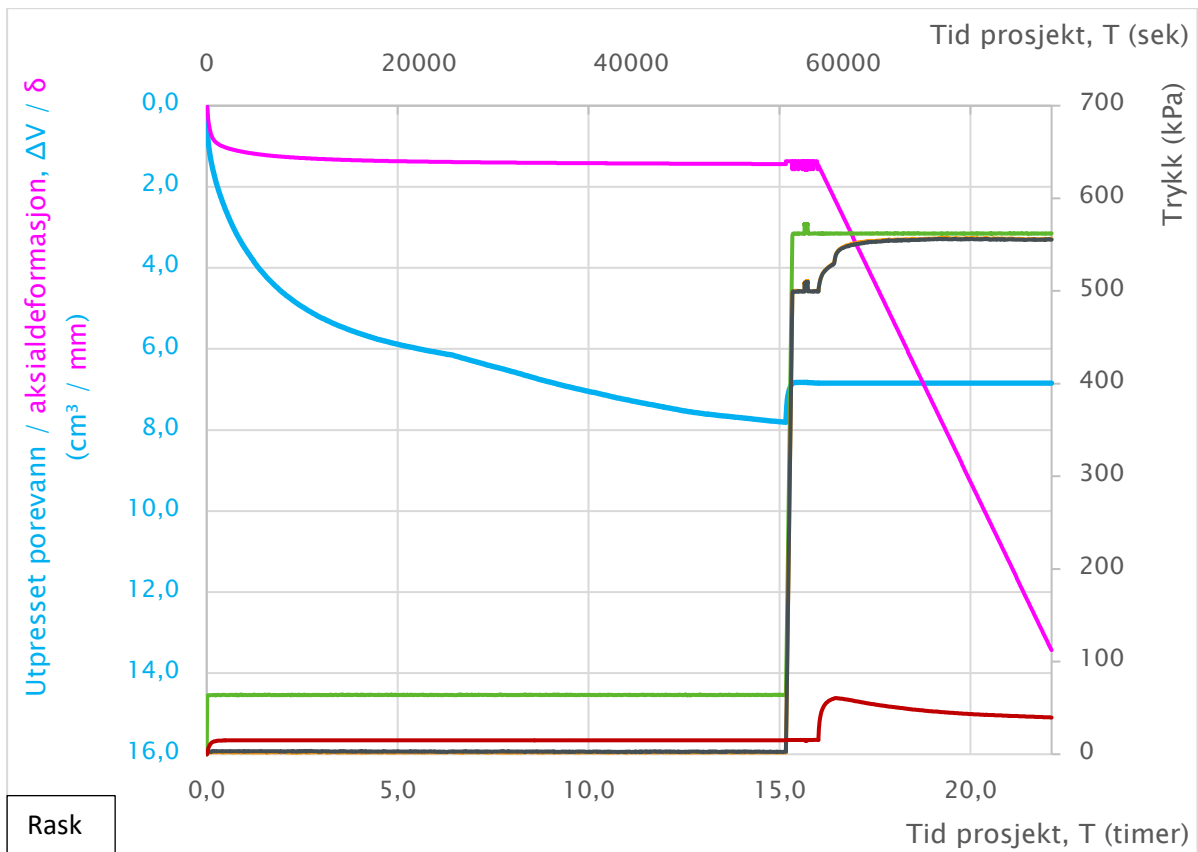
Prosjekt	Type rapport	Parallell	Bilag
Fv721 Mebustad	Utførelsesrapport	1_3	15
	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">—</span> Deviatorspenning</li> <li><span style="color: green;">—</span> Celletrykk</li> <li><span style="color: black;">—</span> Poretrykk</li> </ul>		



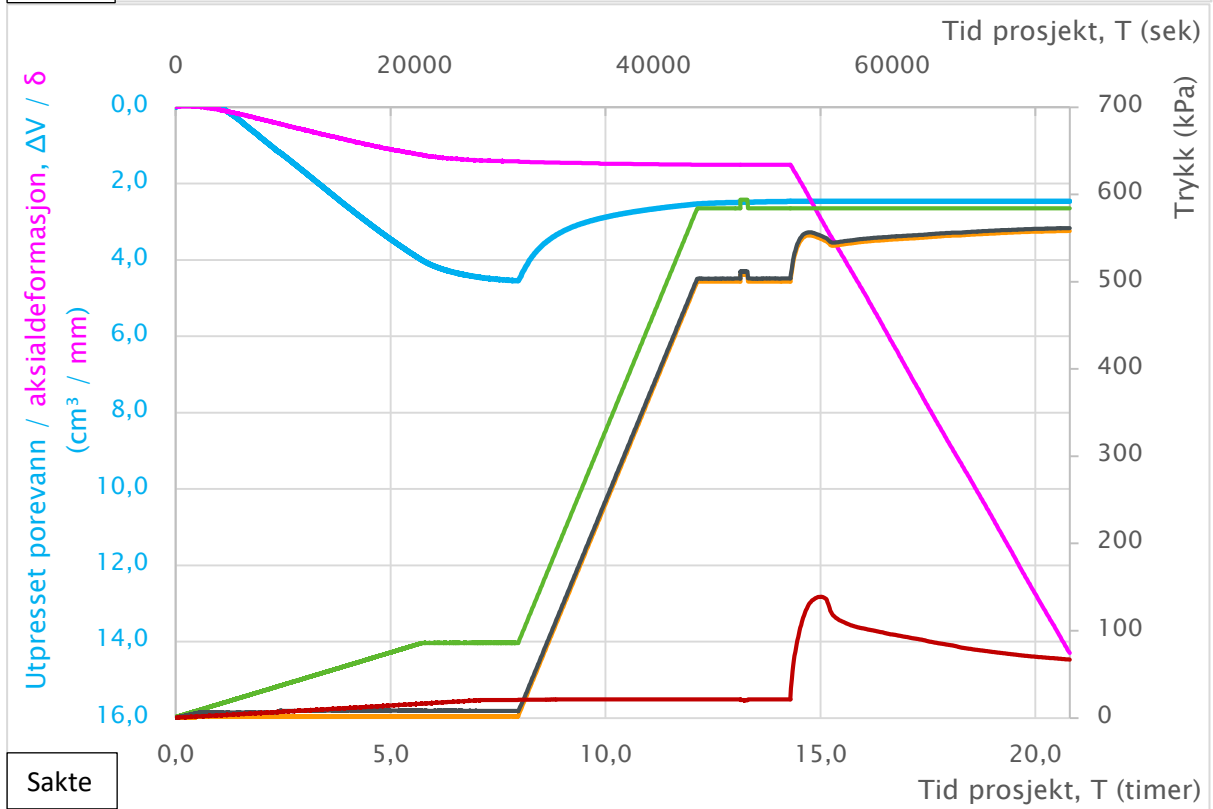
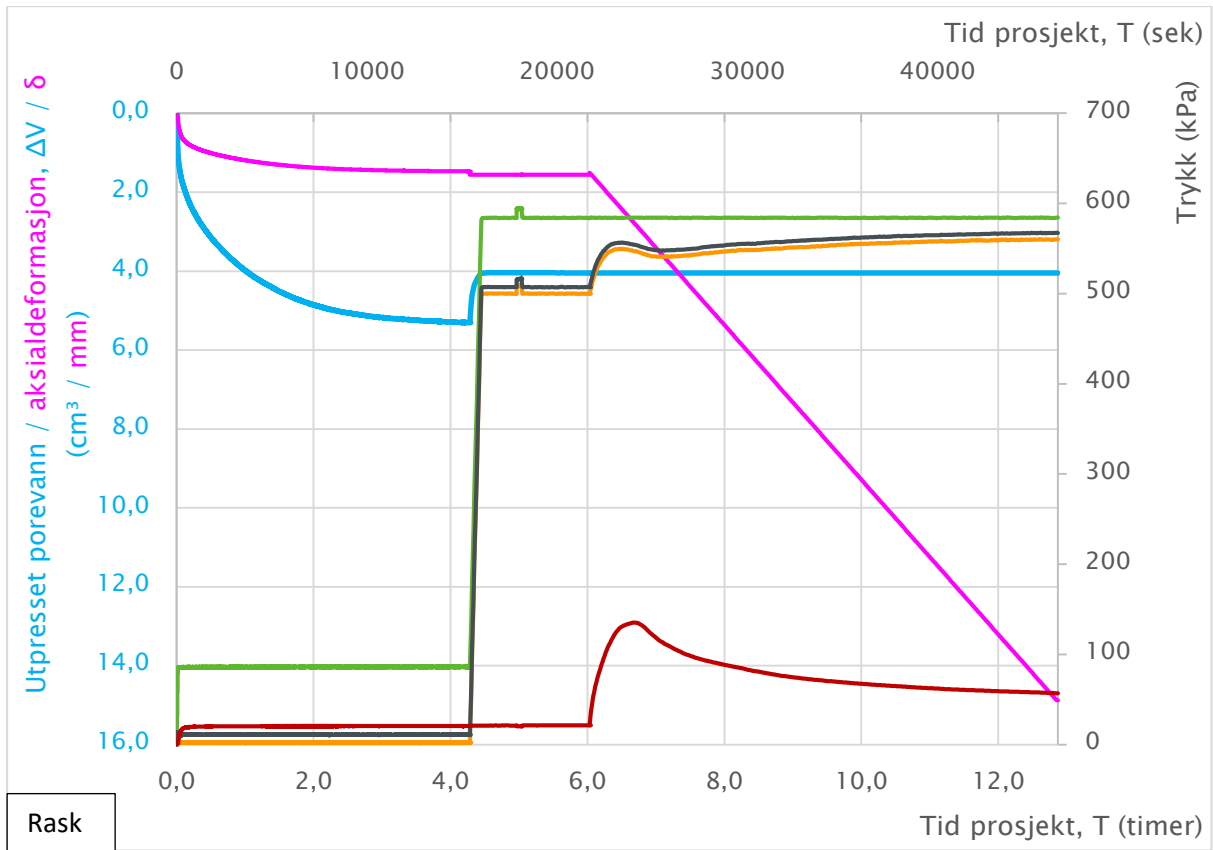
Prosjekt	Type rapport	Parallell	Bilag
Fv717 Sund-Bradden	Utførelsesrapport	1_2	16
	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">—</span> Deviatorspenning</li> <li><span style="color: green;">—</span> Celletrykk</li> <li><span style="color: black;">—</span> Poretrykk</li> </ul>		



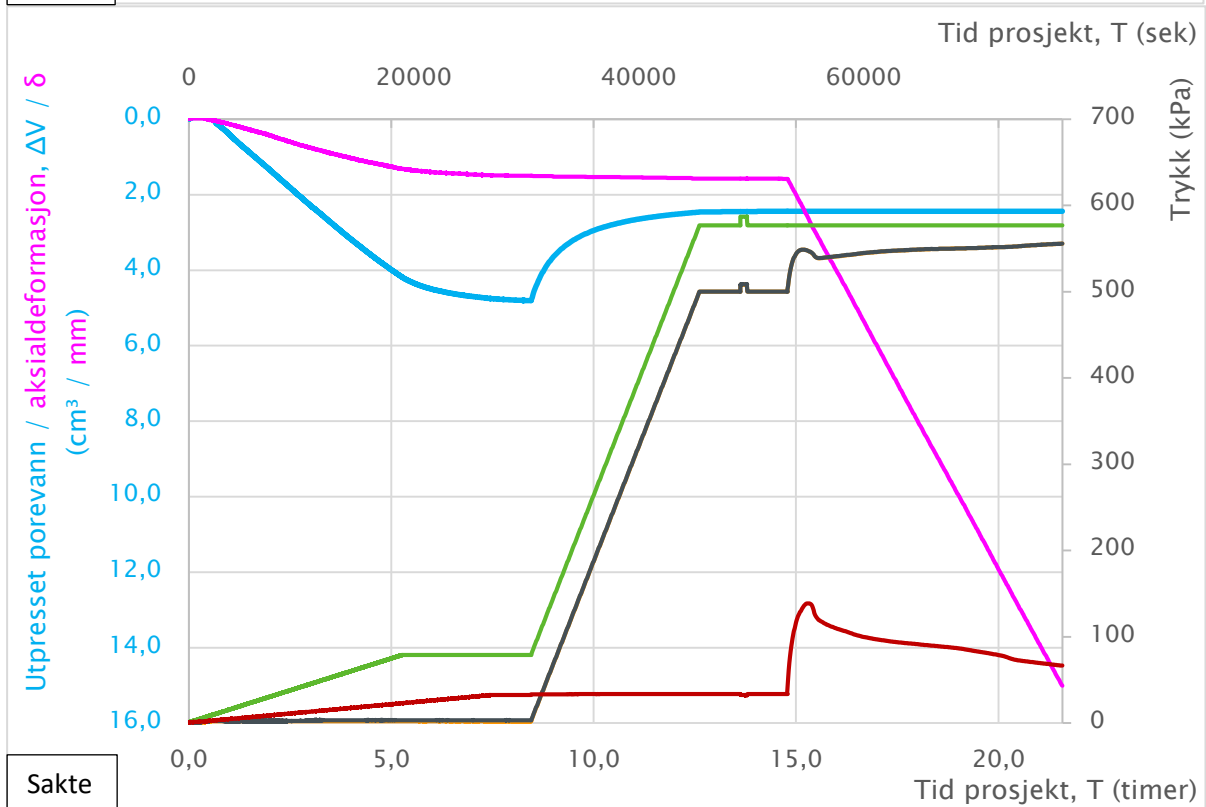
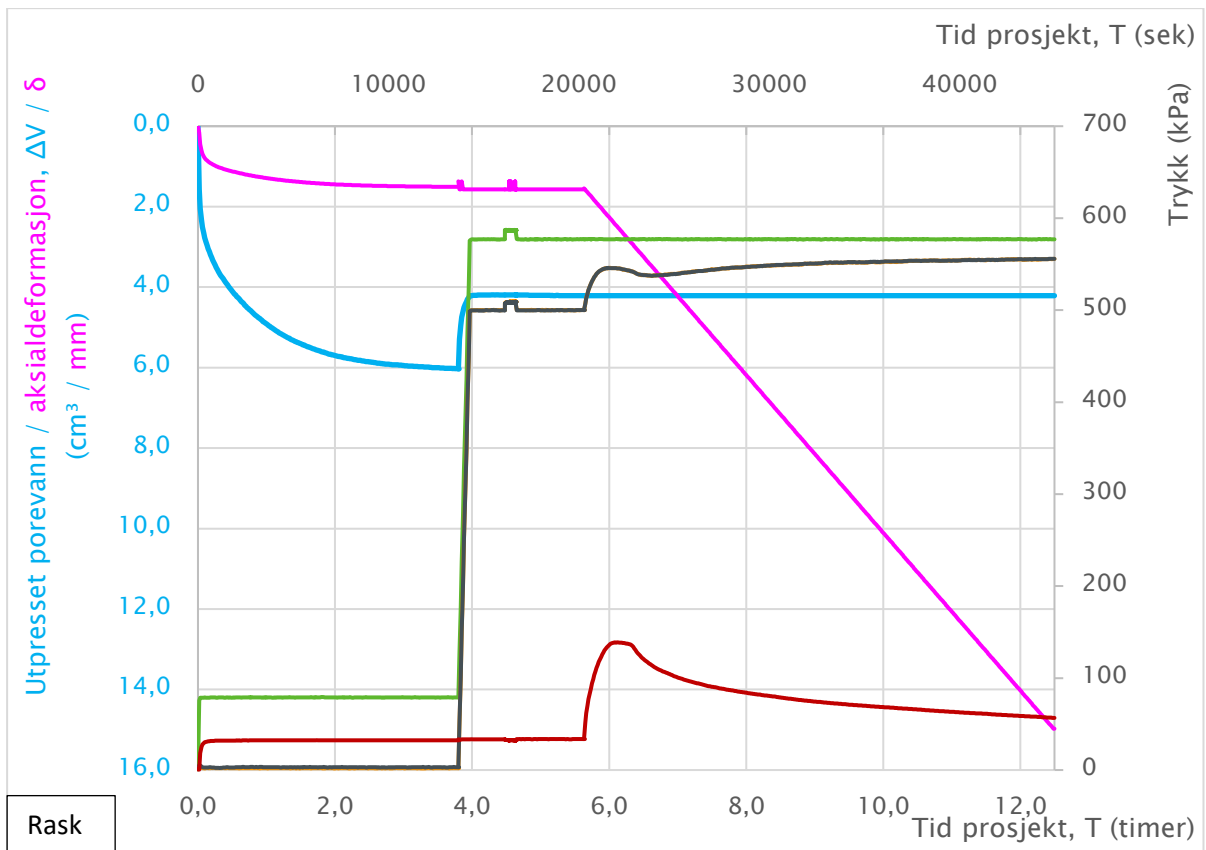
Prosjekt	Type rapport	Parallell	Bilag
Fv715 Tverdalselvbua	Utførelsesrapport	1_9	17
	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">—</span> Deviatorspenning</li> <li><span style="color: green;">—</span> Celletrykk</li> <li><span style="color: black;">—</span> Poretrykk</li> </ul>		



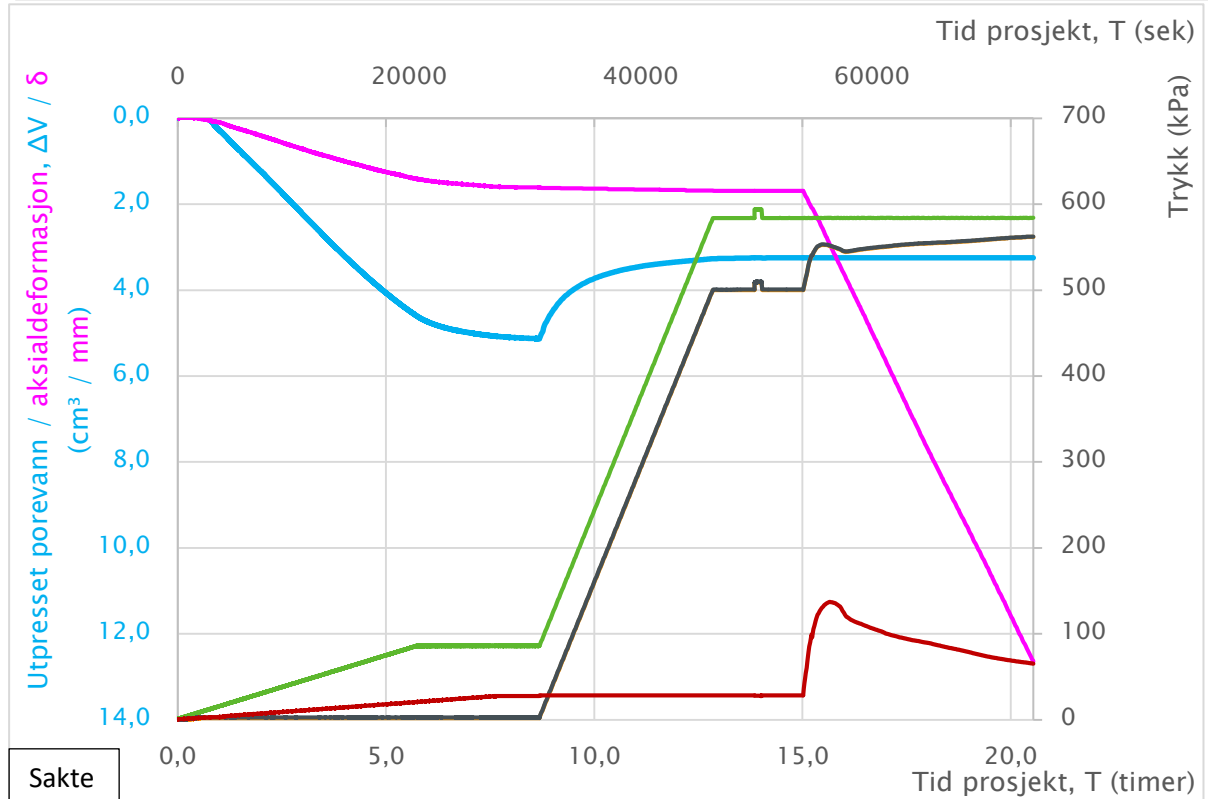
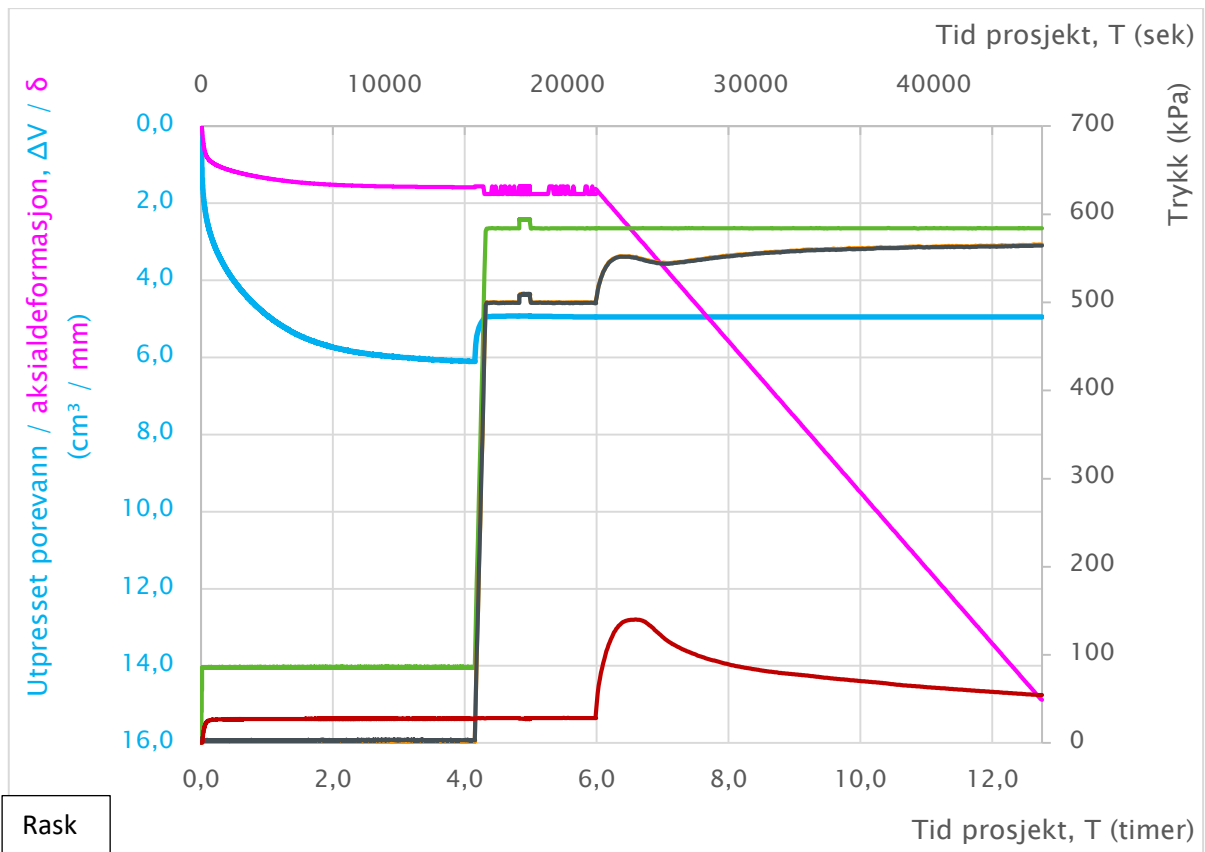
Prosjekt	Type rapport	Parallell	Bilag
Fv715 Tverdalselvbua	Utførelsesrapport	3_3	18
	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">—</span> Deviatorspenning</li> <li><span style="color: green;">—</span> Celletrykk</li> <li><span style="color: black;">—</span> Poretrykk</li> </ul>		



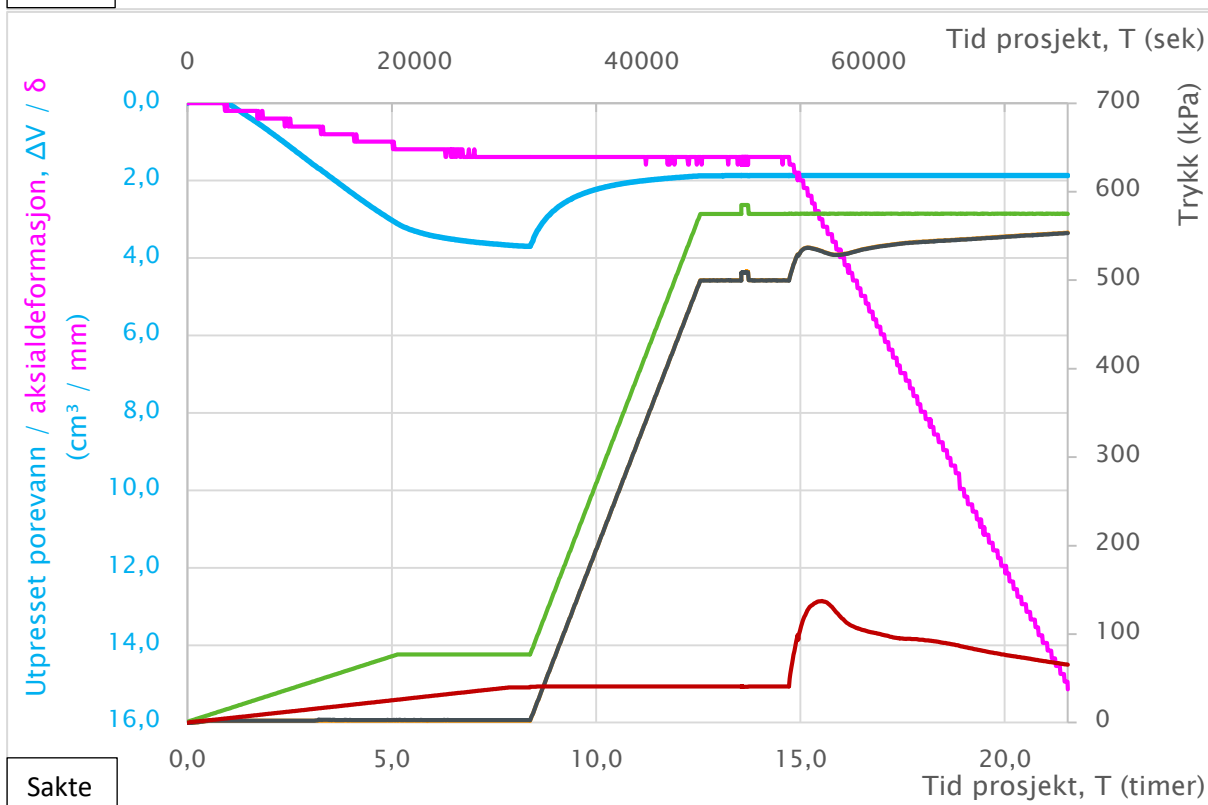
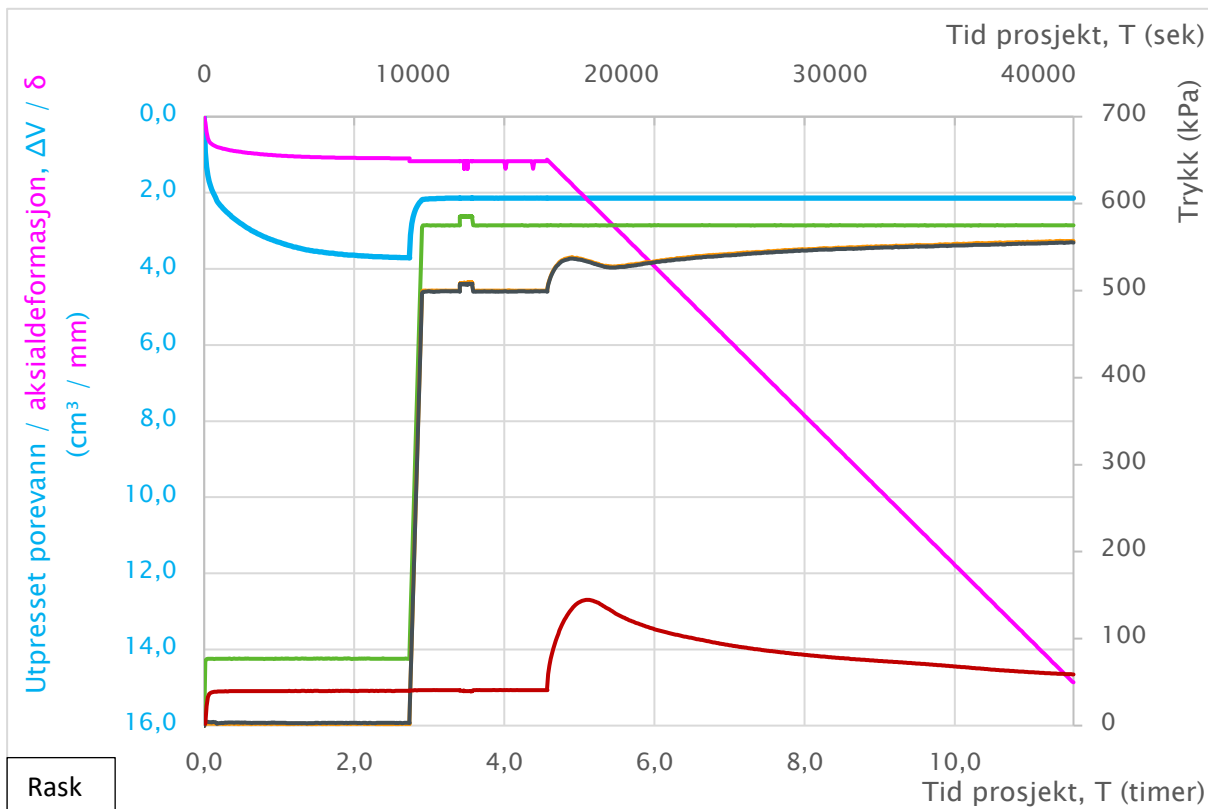
Prosjekt	Type rapport	Parallell	Bilag
Flotten	Utførelsesrapport	Blokk 1	19
	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">—</span> Deviatorspenning</li> <li><span style="color: green;">—</span> Celletrykk</li> <li><span style="color: black;">—</span> Poretrykk</li> </ul>		



Prosjekt	Type rapport	Parallell	Bilag
Flotten	Utførelsesrapport	Blokk 2	20
	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">—</span> Deviatorspenning</li> <li><span style="color: green;">—</span> Celletrykk</li> <li><span style="color: black;">—</span> Poretrykk</li> </ul>		

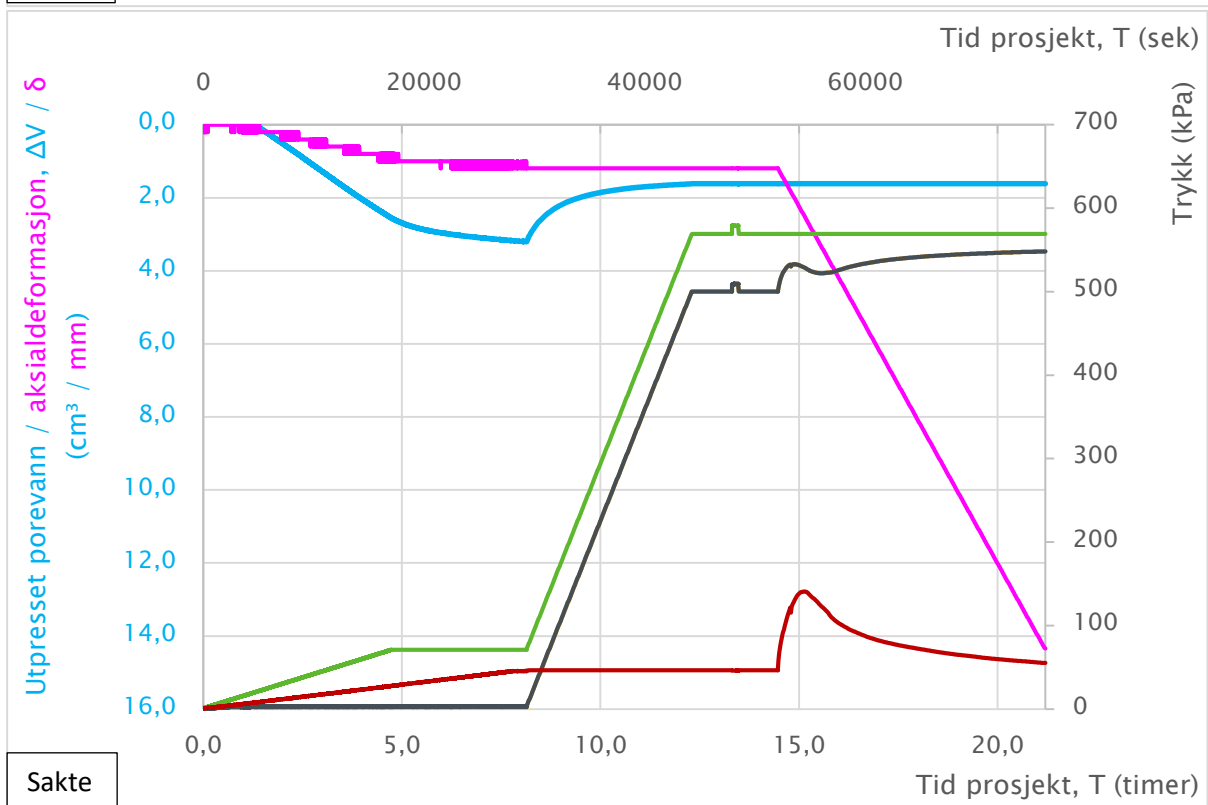
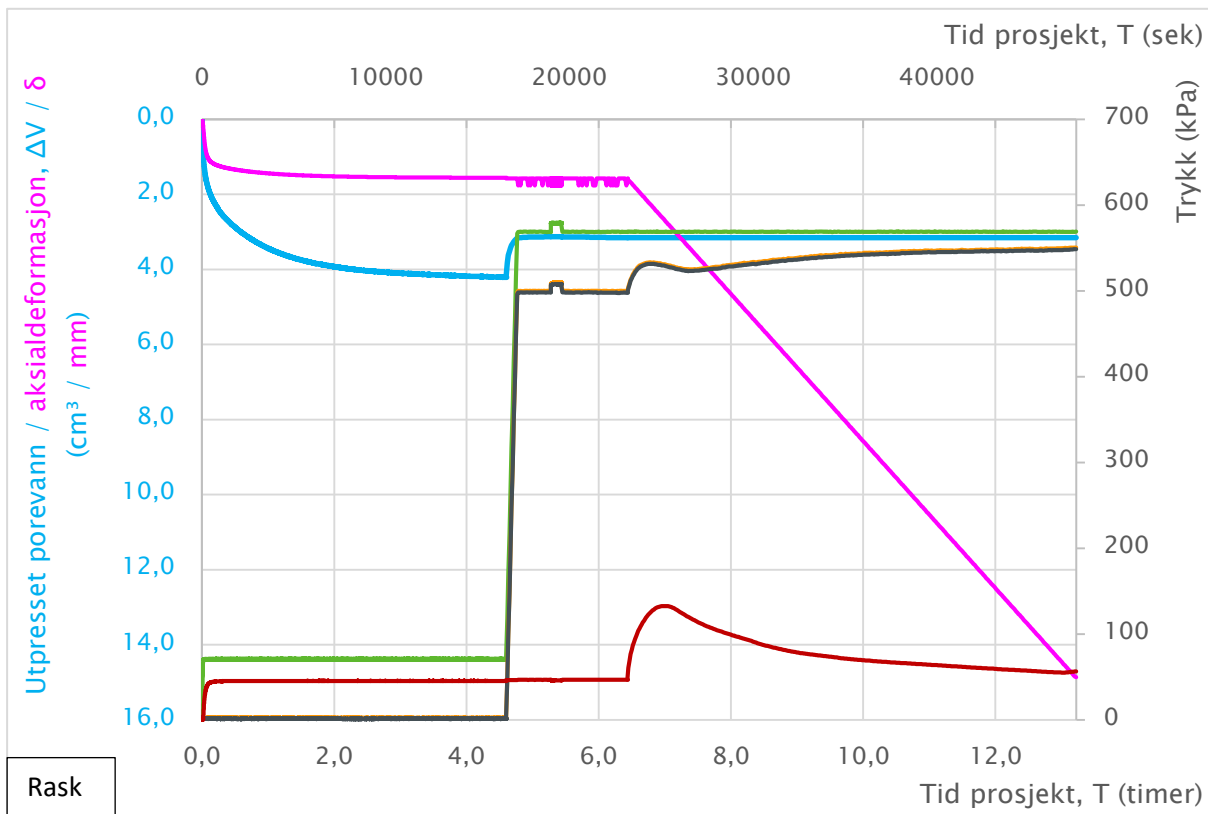


Prosjekt	Type rapport	Parallell	Bilag
Flotten	Utførelsesrapport	Blokk 3	21
	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">—</span> Deviatorspenning</li> <li><span style="color: green;">—</span> Celletrykk</li> <li><span style="color: black;">—</span> Poretrykk</li> </ul>		

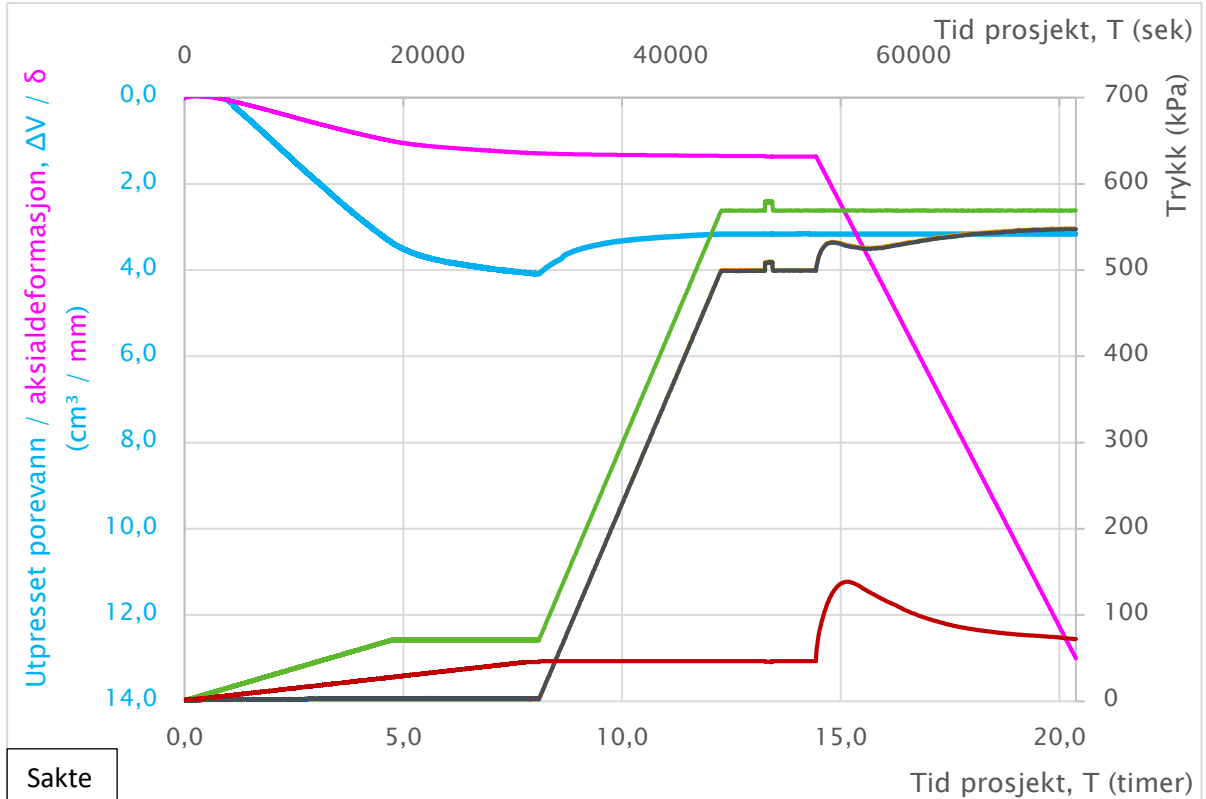
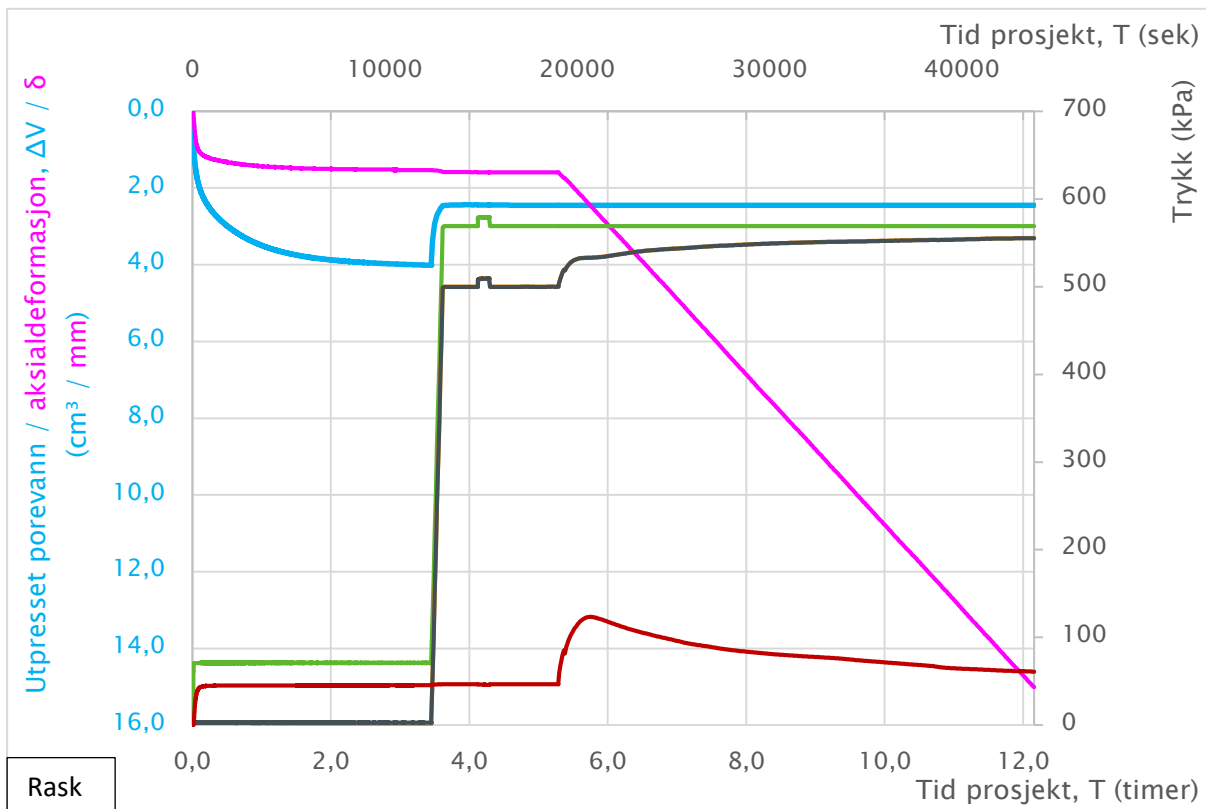


Prosjekt	Type rapport	Parallell	Bilag
Flotten	Utførelsesrapport	Blokk 4	22
	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">—</span> Deviatorspenning</li> <li><span style="color: green;">—</span> Celletrykk</li> <li><span style="color: black;">—</span> Poretrykk</li> </ul>		

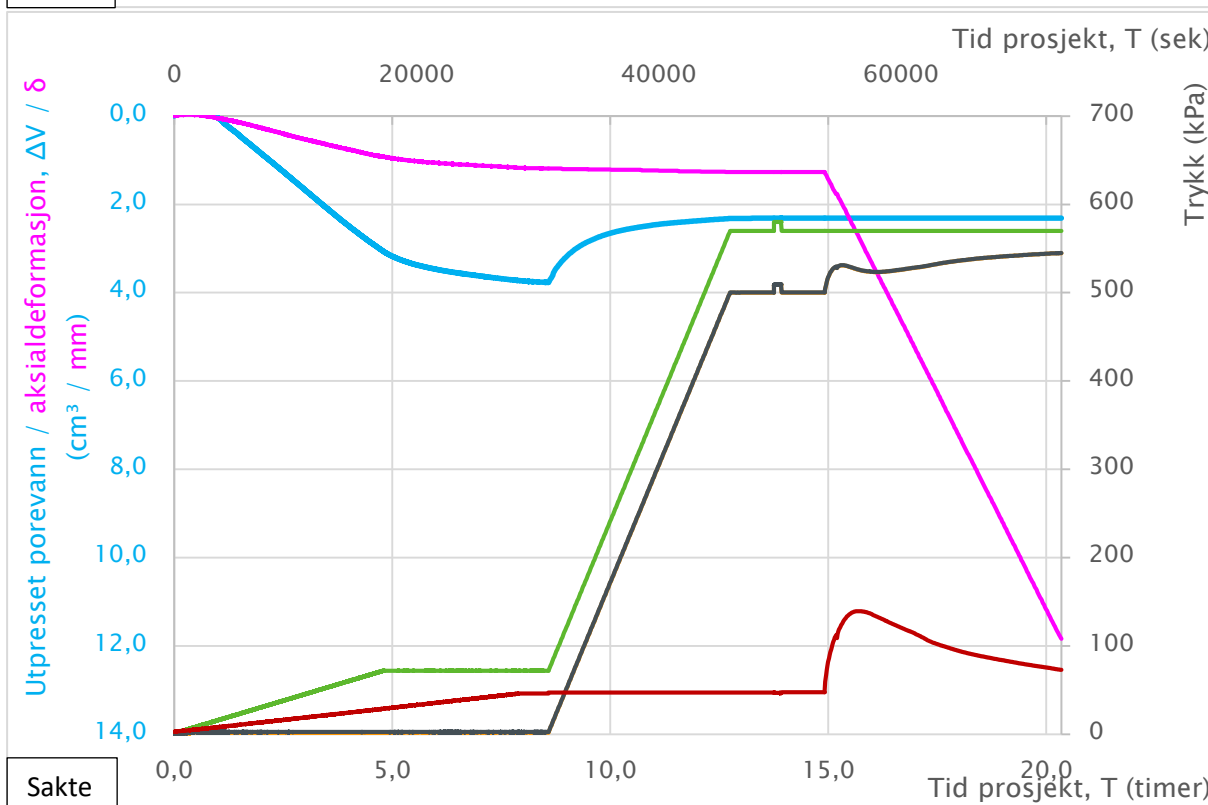
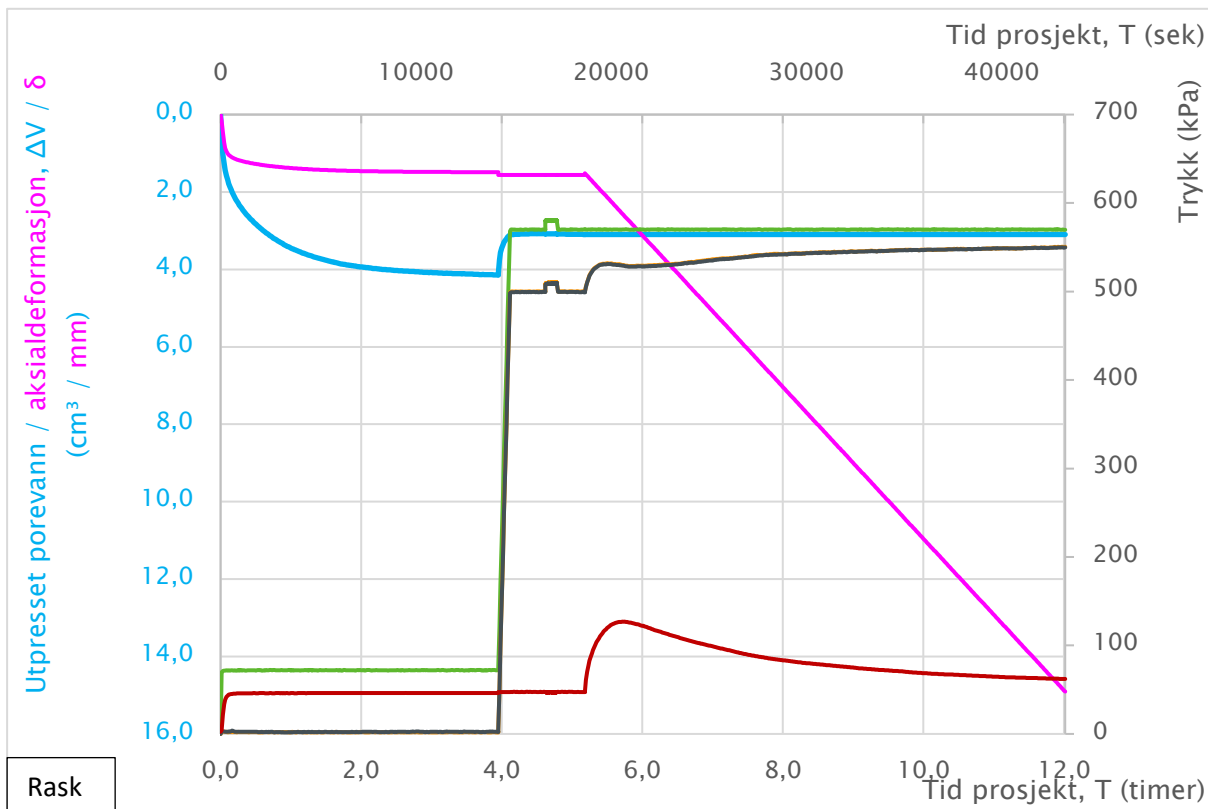




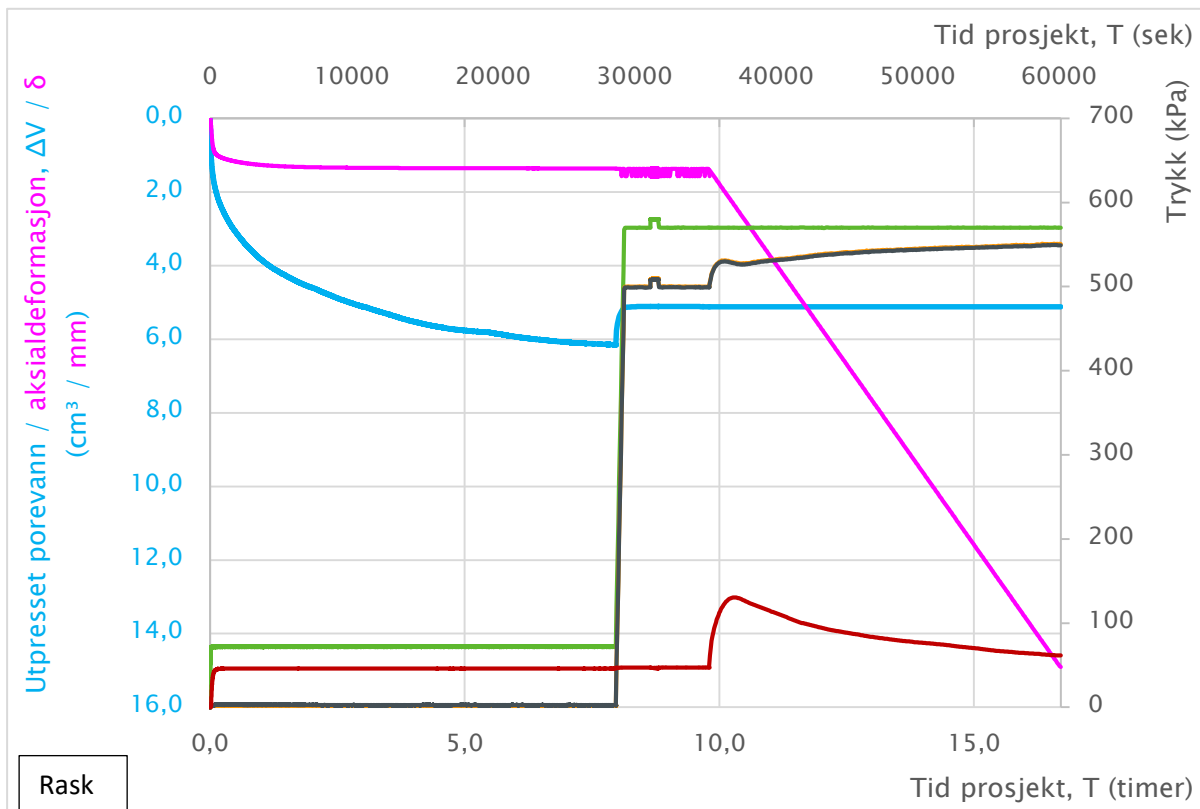
Prosjekt	Type rapport	Parallell	Bilag
Flotten	Utførelsesrapport	Blokk 5	23
	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">—</span> Deviatorspenning</li> <li><span style="color: green;">—</span> Celletrykk</li> <li><span style="color: black;">—</span> Poretrykk</li> </ul>		



Prosjekt	Type rapport	Parallell	Bilag
Flotten	Utførelsesrapport	Blokk 6	24
	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">—</span> Deviatorspenning</li> <li><span style="color: green;">—</span> Celletrykk</li> <li><span style="color: black;">—</span> Poretrykk</li> </ul>		



Prosjekt	Type rapport	Parallell	Bilag
Flotten	Utførelsesrapport	Blokk 7	25
	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">—</span> Deviatorspenning</li> <li><span style="color: green;">—</span> Celletrykk</li> <li><span style="color: black;">—</span> Poretrykk</li> </ul>		



Prosjekt	Type rapport	Parallell	Bilag
Flotten	Utførelsesrapport	Blokk 8	26
	<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">—</span> Deviatorspenning</li> <li><span style="color: green;">—</span> Celletrykk</li> <li><span style="color: black;">—</span> Poretrykk</li> </ul>		