

Niklas Engebretsen

Betydning av K'_0 på styrkeparametere ved treaksialforsøk

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Arnfinn Emdal

Juni 2020

Niklas Engebretsen

Betydning av K'_0 på styrkeparametere ved treksialforsøk

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk
Veileder: Arnfinn Emdal
Juni 2020

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for konstruksjonsteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Sammendrag

Blokkprøver fra Høgskoledalen ved NTNU Gløshaugen ble studert ved hjelp av laboratorieundersøkelser for å undersøke innflytelsen av hviletrykkskoeffisienten på styrkeparametere i forbindelse med treaksialforsøk. Jordprøvene ble utført ifra meget sensitiv leire og kvikkleire. Hovedhensikten med denne masteroppgaven er å gi en oversikt over vanlig norsk praksis og undersøke konsekvensene av feilvalg av hviletrykkskoeffisient ved treaksialforsøk. Derfor har forfatter valgt å se på hvordan oppførselen til jorda endrer seg dersom prosedyren er lik, men med hviletrykkskoeffisient som en varierende parameter.

Generelt varierer forsøksprosedyrer for treaksialtester og spesifikt i konsolideringsfasen. I denne masteroppgaven er hviletrykkskoeffisienten sammenlignet ved hjelp av resultater fra skjærfasen og prøveforstyrrelser. Forsøkene i studien ble utført i såkalte paralleller. Det ble utført identiske prøver fra samme dybde, i samme blokk med ulik hviletrykkskoeffisient mens middelspenningen ble holdt lik in situ middelspenning. Mesteparten av laboratoriearbeidet ble utført av Multiconsult samt forfatter og medstudent, Synnøve Bergsli. Indekstesting, kornfordeling, syv treaksialforsøk og syv ødometerforsøk ble utført i løpet av våren 2020.

Testprogrammet utført av Multiconsult ble nøye planlagt for å tjene flere formål, eksempelvis beregning av skråningsstabilitet i forbindelse med prosjektering av campus-utbygging og også for å gi grunnlag for denne oppgaven.

Området, Høgskoledalen, ble nøye studert gjennom høsten 2019 gjennom emnet Geoteknikk felt og laboratorieundersøkelser og inkluderte en total sondering, to dreietrykksonderinger, tre trykksonderinger, to piezometere og åpning samt indekstesting, ødometeresting og treaksialtesting av 13 54mm sylindereprøver fra dybde 2 til 24 meter. Forfatter deltok i dette emnet og ble da kjent med grunnforholdene i området.

Litteraturstudiet viser en stor variasjon av metoder brukt for å etablere hviletrykkskoeffisienten. Hviletrykkskoeffisienten er en viktig parameter for å estimere horisontalspenning. Studien har vist at formelen for hviletrykkskoeffisienten til L'Heureux er anvendelig og praktisk for data fra Høgskoledalen og generelt for overkonsoliderte kohesjonsjordarter.

Denne studien har vist at dersom man holder middelspenningen konstant, så er hviletrykkskoeffisienten isolert sett *ikke* er en avgjørende faktor for styrkeparametere.

For å etablere en mer generell konklusjon som kan anvendes bredere, er det anbefalt å utføre ytterligere parallelltester der en tar én «fasit»-test med realistisk *hviletrykkskoeffisient* og én test der hviletrykkskoeffisienten blir satt ulikt in situ. Hensikten med dette er å undersøke konsekvensene for styrkeparameterne dersom horisontalspenning avviker, mens vertikalspenning er korrekt.

Abstract

Undisturbed (soil) block samples from Høgskoledalen in Trondheim, near NTNU Gløshaugen campus, were analyzed in laboratories to examine how the coefficient of earth pressure at rest influence the soil strength parameters in triaxial tests. The soil specimens used in this experiment were sensitive clay and quick clay. The main purpose of this master thesis is to give an overview of Norwegian practice and to study the consequences of selecting an inaccurate (incorrect) earth coefficient at rest during triaxial tests. Therefore, the author has chosen to investigate what happens if the procedure is the same, varying the earth coefficient at rest parameter.

In general, triaxial test procedures applied in the industry and specifically in the consolidation phase vary significantly. In this study, the earth pressure coefficient at rest was compared using results from the shearing phase and sample disturbance. The testing was carried out using so-called parallels where identical tests with the same depth and from the same block were tested side by side with different earth coefficients at rest. The total mean stress was kept realistic for all tests. Most of the laboratory work was carried out at Multiconsult geotechnical laboratory, partially performed by the author and a fellow student. The tests included index testing and grain size distribution and oedometer tests in addition to five triaxial tests.

The test program performed by Multiconsult was carefully designed to serve multiple purposes, for example, slope stability calculations in Høgskoledalen and also give the basis of this thesis.

The area, Høgskoledalen was examined extensively during autumn 2019 throughout the course Geotechnics Field and Laboratory Investigations, with one total sounding, two rotary pressure soundings, three cone penetration tests, two piezometers, and opening and index testing, oedometer testing and triaxial testing of 13 54mm cylinders from depths from 2 to 24m. The author participated in this course and considers the area to be well known to whom.

The literary review shows that there are a range of methods used in practice to establish the coefficient of earth pressure at rest. This coefficient is an important parameter used to calculate the effective horizontal stress. This study has shown that L'Heureux's formula is reasonably robust and applicable for data in Høgskoledalen and in general for overconsolidated cohesive materials.

This study has shown that if the real mean stress is held constant, the coefficient of earth pressure at rest will *not* be a governing factor for the strength parameters

To validate above conclusion for more general applications, it is recommended to carry out more parallel tests. These tests should typically include at least one set of tests with a realistic coefficient of earth pressure at rest and one test where the coefficient of earth pressure at rest is set purposely different from in situ. The intent is to study the consequences for the strength parameters if the horizontal stress deviates while the vertical stress is kept fixed.

Forord

Masteroppgaven er en videreføring av arbeidet som ble dokumentert prosjektoppgaven levert desember 2019. Prosjektoppgaven baserte seg på litteraturstudier der det teoretiske og empiriske grunnlaget bak hviletrykkskoeffisienten ble vurdert. I denne masteroppgaven er hviletrykkskoeffisienten til overkonsolidert leire sammenlignet med resultater fra skjærfasen av treaksiale tester med ulike hviletrykk. Tilsvarende undersøkelser ble utført av Jo Forseth Indgaard i 2017, da ved kun bruk av 54mm sylinderprøver. Resultatene fra disse forsøkene ga ikke noe tydelig konklusjonen.

Jeg vil takke Arnfinn Emdal (veileder) for godt samarbeid og god oppfølging. Han sørget for at laboratoriearbeidet kunne utføres uten at jeg var til stede da NTNU stengte som følge av corona-viruset (Covid-19).

Jeg vil takke dr. Kim André Larsen (utviklingsleder og sparringspartner) og Oddny Jørgensen (seksjonsleder) i COWI for ressurser som veiledning, pc, og kontorplass.

Jeg vil også takke Thomas Vestgården for nyttig besøk på NGIs laboratorium i Oslo.

En stor takk rettes også til Multiconsult ved Anders Gylland (vitenskapelig leder for felt- og laboratorieundersøkelser) og Vidar Tøndervik (laborant) for vellykket samarbeid og svar på spørsmål.

Innhold

| | |
|---|------|
| Figurer | xi |
| Tabeller | xii |
| Formler | xiii |
| Forkortelser/symboler | xiii |
| 1 Innledning | 16 |
| 1.1 Bakgrunn | 16 |
| 1.2 Omfang | 16 |
| 1.2.1 Suksesskriterium | 17 |
| 1.2.2 Samfunnsnytte | 17 |
| 1.2.3 Problemstilling | 17 |
| 2 Teori og metode | 18 |
| 2.1 Hviletrykkskoeffisienten, $K'0$ | 18 |
| 2.2 Udrenert aktiv skjærfasthet, S_{uA} | 21 |
| 2.3 Indekstesting og ødometer | 22 |
| 2.3.1 Naturlig vanninnhold | 22 |
| 2.3.2 Romvekt og mineraldensitet | 22 |
| 2.3.3 Plastisitetstgrenser | 22 |
| 2.3.4 Konusforsøk | 23 |
| 2.3.5 Ødometerettest | 24 |
| 2.4 Treaksialforsøk | 24 |
| 2.4.1 Utstyr | 25 |
| 2.4.2 Utførelse | 25 |
| 2.4.2.1 Forberedelse av uforstyrrede prøver | 26 |
| 2.4.2.2 Klargjøring av forsøksbetingelser | 27 |
| 2.4.2.3 Konsolideringsfase | 27 |
| 2.4.2.4 B-test | 30 |
| 2.4.2.5 Skjærforsøk | 31 |
| 2.4.3 Prøveforstyrrelser | 33 |
| 3 Målinger og observasjoner | 35 |
| 3.1 Forsøksområde | 35 |
| 3.2 Poretrykkssituasjon i Høgskoledalen | 38 |
| 3.3 Hviletrykk i Høgskoledalen | 38 |
| 3.4 Spenningstilstand i Høgskoledalen | 43 |
| 3.5 Trykksondering | 46 |
| 3.6 Skjærprofil basert på tidligere grunnundersøkelser og hypotetisk skjærstyrke .. | 48 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.7 | Undersøkelser | 50 |
| 4 | Resultater | 51 |
| 4.1 | Indekstesting og ødometer | 51 |
| 4.1.1 | Romvekt og mineraldensitet | 51 |
| 4.1.2 | Naturlig vanninnhold | 53 |
| 4.1.3 | Plastisitetstegrensene | 53 |
| 4.1.4 | Konusforsøk | 53 |
| 4.1.5 | Ødometertester | 54 |
| 4.2 | Treaksialforsøk | 54 |
| 4.2.1 | Utskjæring og innbygging | 54 |
| 4.2.2 | Metning | 55 |
| 4.2.3 | Konsolidering | 55 |
| 4.2.4 | B-test | 55 |
| 4.2.5 | Hvilesteg | 55 |
| 4.2.6 | Skjærforsøk | 55 |
| 4.2.7 | Prøvekvalitet | 66 |
| 4.3 | Oppsummering av resultater | 67 |
| 5 | Diskusjon | 70 |
| 5.1 | Datagrunnlag | 70 |
| 5.2 | Oppsummering av resultater | 70 |
| 5.3 | Påvirkning av skjærfasthet ved variasjon av p' | 70 |
| 5.4 | Påvirkning av skjærfasthet ved variasjon av K'_o | 71 |
| 5.5 | Påvirkning av friksjonsvinkel og dilatasjon ved variasjon i K'_o | 71 |
| 5.6 | Påvirkning av prøvevalitet ved variasjon i K'_o | 71 |
| 5.7 | Feilkilder | 71 |
| 5.7.1 | Frakt av prøver fra felt | 71 |
| 5.7.2 | Oppbevaring av prøver | 72 |
| 5.7.3 | Apparatur | 72 |
| 5.7.4 | Operatørferdigheter | 72 |
| 5.7.5 | Prosedyreforskjeller i LAB | 72 |
| 6 | Konklusjoner og anbefalinger | 73 |
| 6.1 | Svar på problemstilling | 73 |
| | Referanser | 75 |
| | Tegninger og vedlegg | 77 |

Figurer

| | |
|--|----|
| Figur 2.1 Sammenheng mellom Hviletrykk (K'_0), plastisitetsindeks (I_p) og overkonsolideringsratio (OCR) (Brooker & Ireland, 1965) | 19 |
| Figur 2.2 Eksempel på bestemmelse av pre-konsolideringsspenning og dermed OCR fra ødometerforsøk (NVE, et al., 2014) | 20 |
| Figur 2.3 En typisk design S_{UA} -profil (L'Heureux, et al., 2017) | 21 |
| Figur 2.4 Prinsippskisse av en treaksecelle (SVV, 2016) | 25 |
| Figur 2.5 Inndeling av prøver fra blokk..... | 26 |
| Figur 2.6 Trimming av blokkprøve | 26 |
| Figur 2.7 Prinsipp bak parallellforsøk med like middelspenninger og ulike hviletrykk | 28 |
| Figur 2.8 Typisk spenningssti for prøver konsolidert etter ødo-triaksprosedyre (Emdal, et al., 2017) | 29 |
| Figur 2.9 Eksempel på utpresset porevann mot kvadratrot av tid under konsolideringsfasen (SVV, 2016) | 30 |
| Figur 2.10 B-test (SVV, 2016)..... | 31 |
| Figur 2.11 Prinsipper brukt i (isotrop) konsolideringsfase og udrenert skjærfase (Type 1) (Emdal, 1999)..... | 32 |
| Figur 3.1 Oversiktskart over prosjektområdet (Google, 2020) | 35 |
| Figur 3.2 Hovedgruppering av løsmasser i Trondheim (Reite, et al., 1999)..... | 36 |
| Figur 3.3 Kvartærgeologisk løsmassekart over prosjektområdet. Området der blokkprøvene er hentet fra er markert i rødt. (NGU, 2019) | 36 |
| Figur 3.4 Utsnitt fra Tegning 3 Detaljert borplan..... | 37 |
| Figur 3.5 Dybdeprofil som viser navngivning av hver blokk (også kalt parallell) i BP BLOKK | 37 |
| Figur 3.6 OCR korrelert ved hjelp av Mayne sin formel fra ødometerresultater | 39 |
| Figur 3.7 K'_0 basert på korrelert CPTU og OCR fra ødometertester ved bruk av Formel 2.6 (Eget, 2019) | 40 |
| Figur 3.8 K'_0 som funksjon av dybde inkludert blokkprøver. Testene gjort på blokkprøver er markert med kvadratiske punkter | 41 |
| Figur 3.9 Grunnlag i valg av hviletrykkskoeffisient for de anisotrope testene | 42 |
| Figur 3.10 Vertikal Spenningstilstand i bunn av skråning i Dødens Dal | 43 |
| Figur 3.11 Horisontal spenningssituasjon i Høgskoledalen..... | 44 |
| Figur 3.12 Middelspenning i Høgskoledalen | 45 |
| Figur 3.13 Robertson friksjonsforhold vs normalisert spissmotstand fra CPTU i BP02 | 46 |
| Figur 3.14 Robertson poretrykksforhold vs normalisert spissmotstand fra CPTU i BP02 .. | 47 |
| Figur 3.15 Hypotese der K'_0 og σ'_{vc} skal være realistiske for tidligere tester i BP01..... | 48 |
| Figur 3.16 Skjærstyrkeprofil med idealiserte, sannsynlige spenningsstier ekstrapolert fra originale treaksialforsøk | 49 |
| Figur 3.17 Eksempel på avlesning av friksjonsvinkel | 50 |
| Figur 4.1 Fra venstre: leirprøve med porøse filter i topp og bunn installert på en «pidestall», med fuktet filterpapir for raskere konsolidering, med gummimembran og gummiringer, ferdig innstallert i treakscellen og eksempel på prøve etter test (Kornbrekke, 2012). | 55 |
| Figur 4.2 Blokk A1, spenningssti i utvalgte diagrammer (NTNU-plott, NGI-plott og p-q-plott) | 56 |
| Figur 4.3 Blokk B1, spenningssti i utvalgte diagrammer (NTNU-plott, NGI-plott og p-q-plott) | 57 |

| | |
|---|----|
| Figur 4.4 Blokk B2, spenningssti i utvalgte diagrammer (NTNU-plott, NGI-plott og p-q-plott) | 58 |
| Figur 4.5 Blokk C1, spenningssti i utvalgte diagrammer (NTNU-plott, NGI-plott og p-q-plott) | 59 |
| Figur 4.6 Blokk C2, spenningssti i utvalgte diagrammer (NTNU-plott, NGI-plott og p-q-plott) | 60 |
| Figur 4.7 Blokk D1, spenningssti i utvalgte diagrammer (NTNU-plott, NGI-plott og p-q-plott) | 61 |
| Figur 4.8 Blokk D2, spenningssti i utvalgte diagrammer (NTNU-plott, NGI-plott og p-q-plott) | 62 |
| Figur 4.9 Samleplott BLOKK A1 og utvalgte dybder fra BP01 | 63 |
| Figur 4.10 Samleplott BLOKK B | 63 |
| Figur 4.11 Samleplott BLOKK C | 64 |
| Figur 4.12 Samleplott BLOKK D | 64 |
| Figur 4.13 Aktiv skjærfasthet fra triaksiale tester fra BP01 og BLOKK og CPTU fra BP02 | 65 |
| Figur 4.14 Aktiv skjærfasthet fra triaksiale tester fra BP01 og BLOKK og CPTU fra BP03 | 66 |

Tabeller

| | |
|--|----|
| Tabell 2.1 Prioriteringsklasser til valg av S_{uA} -profil (NVE, et al., 2014)..... | 18 |
| Tabell 2.2 Klassifisering av jordstyrke (Emdal, et al., 2017, p. 161) | 23 |
| Tabell 2.3 Klassifisering av sensitivitet (Emdal, et al., 2017, p. 161) | 23 |
| Tabell 2.4 Typer skjærbelastning under skjærfasen av treaksiale forsøk (SVV, 2016) | 31 |
| Tabell 2.5 Oversikt over registrerte verdier og avledede parametere brukt ved rapportering av aktive treaksialforsøk (Lepkowski, 2019) | 32 |
| Tabell 2.6 Vurdering av prøveforstyrrelser basert på volumtøyning (Berre, 1981) | 33 |
| Tabell 2.7 Vurdering av prøveforstyrrelser basert på poreallsending (Lunne, et al., 1997) | 34 |
| Tabell 3.1 Oversikt over spenninger, overkonsolideringsratio og hviletrykkskoeffisient .. | 41 |
| Tabell 3.2 Laginndeling basert på Robertsondiagrammer | 47 |
| Tabell 4.1 Oversikt over resultater fra indekstesting | 51 |
| Tabell 4.2 Romvekt Blokkprøver og BP01 | 51 |
| Tabell 4.3 Mineraldensitet blokk-prøver og BP01 | 52 |
| Tabell 4.4 Naturlig vanninnhold blokkprøver fra BP BLOKK..... | 53 |
| Tabell 4.5 Plastisitetsgrenser..... | 53 |
| Tabell 4.6 Resultater fra konusforsøk | 53 |
| Tabell 4.7 Klassifisering av jordtype basert på skjærstyrke | 54 |
| Tabell 4.8 Prøvekvalitet fra BP BLOKK | 66 |
| Tabell 4.9 Valgt K'_o sammenlignet med K'_o etter at alle ødometerresultatene var klare .. | 67 |
| Tabell 4.10 Kontroll av middelspenninger in situ vs treaksialforsøk | 67 |
| Tabell 4.11 Middelspenning og skjærspenning sammenlignet | 68 |
| Tabell 4.12 Oppnådd skjærfasthet ved kryssing av bruddkriteriet og maksimalt oppnådd skjærstyrke under skjærfasen | 68 |
| Tabell 4.13 Dilatasjon og friksjonsvinkel ved K'_o forskjellig fra in situ | 68 |
| Tabell 4.14 Prøvekvalitet ved K'_o -variasjon | 69 |

Formler

| | |
|--|----|
| Formel 1.1 Forholdet mellom horisontal effektivspenning og vertikal effektivspenning (Abdelhamid & Krizek, 1976) | 16 |
| Formel 2.1 Hviletrykkskoeffisient overslagsformel angitt av Eurokode 7 | 18 |
| Formel 2.2 Overkonsolideringsratio bestemt ved ødometer (CRS eller IL) | 19 |
| Formel 2.3 K'_0 basert på effektiv friksjonsvinkel ϕ' (Jaky, 1944) | 19 |
| Formel 2.4 Enkleste relasjon mellom OCR og K'_0 | 19 |
| Formel 2.5 Hviletrykkskoeffisient (NGI) (L'Heureux, et al., 2017) | 19 |
| Formel 2.6 OCR for kohesjonsjordarter (Mayne, 1986) | 21 |
| Formel 2.7 Beregning av vanninnhold | 22 |
| Formel 2.8 Beregning av romvekt | 22 |
| Formel 2.9 Beregning av mineraldensitet | 22 |
| Formel 2.10 Gjennomsnittlig effektiv vertikalspenning, ødometer | 24 |
| Formel 2.11 Tøyning, ødometer | 24 |
| Formel 2.12 Ødometermodul, M | 24 |
| Formel 2.13 Konsolideringskoeffisienten, ødometer | 24 |
| Formel 2.14 In situ middelspenning | 27 |
| Formel 2.15 Beregning av vertikal konsolideringsspenning | 27 |
| Formel 2.16 Beregning av horisontal konsolideringsspenning | 27 |
| Formel 2.17 Hviletrykkskoeffisienten bestemt ved ødo-konsolidering | 28 |
| Formel 2.18 Stigningstallet til konsolideringsfasen ved K'_0 -konsolidering, ρ tilsvarer mobilisert friksjonsvinkel ved in situ spenningstilstand | 28 |
| Formel 2.19 Metningsgrad | 30 |
| Formel 2.20 Prøvekvalitet basert på volumtøyning | 33 |
| Formel 2.21 Poretall | 34 |
| Formel 2.22 Poretallforhold | 34 |

Forkortelser/symboler

NTNU – Norges Tekniske Naturvitenskaplige universitet

NIFS – Naturfare – Infrastruktur – Flom - Skred

SVV – Statens vegvesen

NVE – Norges Vassdrags- og energidirektorat

CIUa/p-forsøk – konsolidert isotropt udrenert aktivt/passivt

CAUa/p -forsøk – konsolidert anisotropt udrenert aktivt/passivt

CPTU – trykksondering (cone penetration test)

CRS/IL – typer ødometertester (constant rate of strain/incremental load)

In situ – på/i beliggenhet (i felt)

GVS – grunnvannstand

FL – Felt- og laboratorieundersøkelser (emne på NTNU)

BP – Borpunkt

K_0' – Hviletrykkskoeffisient

OCR – overkonsolideringsgrad

S_u^A – Udrenert aktiv skjærstyrke

$S_{u,uomr}$ – Udrenert uomrørt skjærstyrke (konus)

$S_{u,omr}$ – Udrenert omrørt skjærstyrke (konus)

σ_c', p_c' – Prekonsolideringsspenning

σ_{v0}', p_0' – in-situ vertikal effektivspenning

c – effektiv skjærfasthetsparameter (kohesjon) ($c = a \tan(\varphi)$)

a – attraksjon

φ – friksjonsvinkel

$\varepsilon_1, \varepsilon_{vol}$ – vertikal og volumetrisk tøyning

σ_{cell} – totalt celletrykk: trykk i målesystem tilkoblet cellen

σ_1, σ_1' – Største hovedspenning og største effektive hovedspenning¹

σ_3, σ_3' – Minste hovedspenning og minste effektive hovedspenning

q – deviatorspenning ($q = \sigma_1' - \sigma_3' = \sigma_1 - \sigma_3$)

p' – effektiv middelspenning ($p' = 1/3(\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3') = 1/3(\sigma_1' + 2\sigma_3'), \sigma_2' = \sigma_3'$)

ΔV – utpresset porevolum av prøve

$u, \Delta u, u_0$ – totalt poretrykk, endring i poretrykk og poretrykk i prøvens nivå i bakken

$\sigma_{1c}', \sigma_{3c}'^2$ – største og minste effektive hovedspenning ved avsluttet konsolidering

S_r – metningsgrad

w – vanninnhold

$\gamma, \gamma_s, \gamma_w$ – tyngdetetthet (hel prøve, mineral og vann)

ρ, ρ_s – densitet og mineraldensitet/korndensitet

e – poretall

n – porøsitet

B-verdi – resultat fra B-test som registrerer hvordan poretrykket endrer seg når man påfører en endring i celletrykket ($B\text{-verdi} = \Delta u / \Delta \sigma$)

¹ For aktive forsøk vil σ_3' være lik effektiv horisontalspenningen (σ_h') og σ_1' være lik vertikalspenningen (σ_v')

² For aktive forsøk vil σ_{1c}' være vertikal konsolideringsspenning (σ'_{vc}) og σ_{3c}' være vertikal konsolideringsspenning (σ'_{vc})

ρ – mobilisert friksjonsvinkel

τ_{Mf}, τ_{Mf} – skjærspenningen der spenningsstien krysser M_f -linja (flyteflaten)

τ_{max} – skjærspenning ved toppunkt av spenningsstien

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Bygning-, vei- og andre konstruksjonsprosjekter krever pålitelige geotekniske styrkeparametere. Per i dag er vanlig praksis i Norge å prosjektere på bakgrunn av totalsonderinger og CPTU. Blant norske geoteknikere blir det gjerne benyttet en kombinasjon av totalsondering og CPTU for å lage stratigrafiske modeller. CPTU'ene blir tolket for å etablere styrke- og setningsparametere. Prøveserier med indekstester og spesialundersøkelser som ødometertest og treaksiale tester blir brukt til å verifisere antagelser og raffinere CPTU-resultatene fra kritiske lag. Flere undersøkelser benyttes dersom tolkning av CPTU viser at det eksisterer sensitiv leire i området. Treaksiale tester gir mest troverdige resultater deriblant mest treffsikkert grunnlag i valg av skjærstyrkeprofil ifølge NIFS rapport fra 2014 (NVE, et al., 2014).

Denne oppgaven er studie av teori og empirisk grunnlag definert som «Betydning av hviletrykkoeffisienten, K'_0 , på styrkeparametere ved treaksial testing». Videre gir oppgaven en oversikt over hva som er vanlig praksis i valg av hviletrykkskoeffisient samt vurderer de tilhørende konsekvensene dette valget har for styrkeparametere etter utført treaksial test. Formel 1.1 viser hvordan hviletrykket defineres for de fleste praktiske formål. I praksis har man vanligvis ikke oversikt over horisontal spennings situasjon, σ'_{ho} , og det er ikke opplagt hvilken hviletrykkskoeffisient som fører konsolideringsprosedyren nærmest in situ spennings situasjon. Det er sakens kjerne i denne rapporten.

$$K'_0 = \frac{\sigma'_{h0}}{\sigma'_{v0}} \Rightarrow \sigma'_{h0} = K'_0 \cdot \sigma'_{v0}$$

Formel 1.1 Forholdet mellom horisontal effektivspenning og vertikal effektivspenning (Abdelhamid & Krizek, 1976)

Ifølge Abdelhamid og Krizek's studie er in situ horisontalspenning sterkt avhengig av den geologiske historien til jorden. Det er fornuftig å gjøre et skille mellom jord som tidligere har blitt utsatt for et høyere jordtrykk enn in situ i dag og sedimenter som ikke har det. Et høyere jordtrykk fra tidligere forhold blir gjerne kalt pre-konsolideringstrykk og denne overkonsolideringseffekten av jorden kan komme av mange ulike mekanismer som erosjon, skred, utgravning eller smelting av is.

1.2 Omfang

I definisjonen av forsøkene var det et viktig poeng å unngå prøveforstyrrelser. Derfor ble blokkprøver benyttet til alle treaksiale tester. Prøvene ble hentet opp fra Dødens dal på NTNU Gløshaugen i Trondheim kommune, der forfatter har deltatt i et skoleprosjekt i regi av faget felt- og laboratorieundersøkelser. Dette skoleprosjektet bidro med mye viktig data om de forskjellige lagene og blant annet god kjennskap til indeksparametere, OCR og K'_0 . To blokkprøver fra dybder 7,05-8,85m ble åpnet og et prøveprogram ble utført av Multiconsult. Fra hver av blokkprøvene ble tre treaksiale tester utført og tre ødometertester, i tillegg til rutineundersøkelser og kornfordeling. Videre ble to ytterligere blokker åpnet, og det ble utført treaksialforsøk på i laboratoriet på NTNU derav én med tilhørende ødometertest.

1.2.1 Suksesskriterium

Denne studien siktet mot å bekrefte eller avkrefte om aktiv udrenert skjærstyrke og andre styrkeparameterene får signifikant innflytelse fra valgt hviletrykkskoeffisient og vise sammenhengen mellom utpresset porevann og spenningssituasjon ved endt konsolidering.

1.2.2 Samfunnsnytte

Hvis studiet avslører at hviletrykkskoeffisienten spiller liten rolle for resulterende styrkeparametere og prøveforstyrrelser vil man kunne kjøre treksiale tester uten detaljkunnskap om K'_0 på forhånd og vil da kunne slippe å bruke ødometer eller andre metoder for å finne K'_0 før igangsetting av treksiale tester.

1.2.3 Problemstilling

Resultatene fra hver parallell skal sammenliknes. Fra dette skal det fastslås om:

- det er grunnlag til å tro at K'_0 er en avgjørende input-parameter i utførelse av treksiale tester
- det anbefales å benytte isotropisk konsolidering, anisotropisk konsolidering eller K'_0 -konsolidering.
- det finnes en sammenheng mellom valg av K'_0 i konsolideringsfasen og grad av prøveforstyrrelse
- ansvarlig ingeniør vet med sikkerhet at valgt K'_0 og konsolideringsprosedyre gir testresultater som er til å realistiske og troverdige
- hva slags data ingeniørene bør anvende til å finne K'_0 og hvorfor er et gjennomtenkt valg av K'_0 så viktig

2 Teori og metode

2.1 Hviletrykkskoeffisienten, K'_0

Treksiale tester har til hensikt å etablere pålitelige styrkeparametere og består i all hovedsak av følgende tre faser:

Innbygging av prøveeksemplar, konsolideringsfasen og skjærfasen. Når man henter ut en prøver fra jorden tar man den samtidig vekk fra jordens opprinnelige spenningstilstand og hensikten med konsolideringsfasen er å bringe den tilbake til in situ spenningstilstand. Dette gjøres før skjærfasen der en undersøker skjærstyrken, friksjonsvinkel og attraksjon i den tilstanden det forventes at jorden befinner seg i nede i bakken.

Skjærstyrke fra ulike dybder brukes til å lage skjærstyrkeprofiler som mye av den geotekniske prosjekteringen baseres på. Naturfareprosjektet i regi av NVE, SVV og Jernbaneverket bruker følgende prioriteringsklasser, vist i Tabell 2.1, til valg av udrenert skjærstyrkeprofil.

Tabell 2.1 Prioriteringsklasser til valg av S_{uA} -profil (NVE, et al., 2014)

| Prioriteringsklasse | Metode |
|---------------------|--|
| 1 | Treksiale tester av god kvalitet |
| 2 | CPTU |
| 3 | Erfaringsverdier, $\frac{c_{uA}}{p'_{v0}}$, SHANSEP |
| 4 | Konus, enaks, vingebor |

Det kommer frem at treksiale tester blir ansett som det mest treffsikre metoden til å lage karakteristisk skjærstyrkeprofil. Under treksiale forsøk er effektiv vertikalspenning (σ'_{v0}) og hviletrykkskoeffisienten (K'_0) de eneste parameterne som trengs på forhånd. Ved hydrostatisk poretrykkstilstand er effektiv vertikalspenning trivielt å finne. Hviletrykkskoeffisienten er mer komplisert å etablere og blir ofte basert på og erfaringstall eller ingeniørens «magefølelse» i forbindelse med vurdering av treksialforsøk (NVE, et al., 2014).

For å bestemme hvordan en prøve skal konsolideres må hviletrykkskoeffisienten bestemmes. Det finnes mange ulike teorier om hvordan hviletrykket skal beskrives matematisk, både rent teoretisk, empirisk eller som en kombinasjon av disse. Standarden, Eurokode 7 - Geoteknisk prosjektering, presenterer en sammenheng mellom OCR , φ og K'_0 vist i Formel 2.1. Denne sammenhengen er særlig utbredt i norsk praksis. Overkonsolideringsratio (OCR) blir oftest bestemt ved bruk av ødometertest, men kan også estimeres ved bruk av CPTU.

$$K'_0 = (1 - \sin\varphi)\sqrt{OCR}$$

Formel 2.1 Hviletrykkskoeffisient overslagsformel angitt av Eurokode 7

Der,

$$OCR = \frac{p'_c}{\sigma'_{v0}}$$

Formel 2.2 Overkonsolideringsratio bestemt ved ødometer (CRS eller IL)

Prekonsolideringsspenningen, p'_c , leses av som vist på Figur 2.2, og er beskrevet under.

Jaky (1944) presenterte den teoretiske sammenhengen mellom friksjonsvinkel og K'_0 vist i Formel 2.3. Den brukes den dag i dag, men tar ikke hensyn til spenningshistorien til jorden.

$$K'_{0NC} = 1 - \sin\phi'$$

Formel 2.3 K'_0 basert på effektiv friksjonsvinkel ϕ' (Jaky, 1944)

Det har blitt gjort flere forsøk på å etablere en enkel sammenheng for overkonsoliderte jordarter. Tidligere har man trodd at plastisitetsindeksen spiller en viktig rolle. Figur 2.1 viser Brooker og Ireland's plastisitetsdiagram fra 1964 for estimering av K'_0 basert deres omfattende laboratoriestudie. Plastisitetsdiagrammet blir fremdeles hyppig brukt blant geoteknikere i næringslivet. (Brooker & Ireland, 1965)

Figur 2.1 Sammenheng mellom Hviletrykk (K'_0), plastisitetsindeks (I_p) og overkonsolideringsratio (OCR) (Brooker & Ireland, 1965)

Formel 2.4 ble presentert noenlunde likt av to ulike forskere, Schmidt og Alpan, ifølge Mayne. Det var et tidlig forsøk på å finne en sammenheng mellom OCR og K'_0 og har blitt etterprøvd ved flere anledninger blant annet av Mayne og Kulhawy i 1982 (Mayne & H, 1982).

$$K'_0 = K'_{0NC} OCR^\alpha$$

Formel 2.4 Enkleste relasjon mellom OCR og K'_0

Mayne tok arbeidet han hadde gjort med Kulhawy et steg videre og gjorde et forsøk på å finne en sammenheng mellom normalisert udrenert skjærstyrke, S_u/σ'_{v0} og K'_0 basert på OCR (Mayne, 1984).

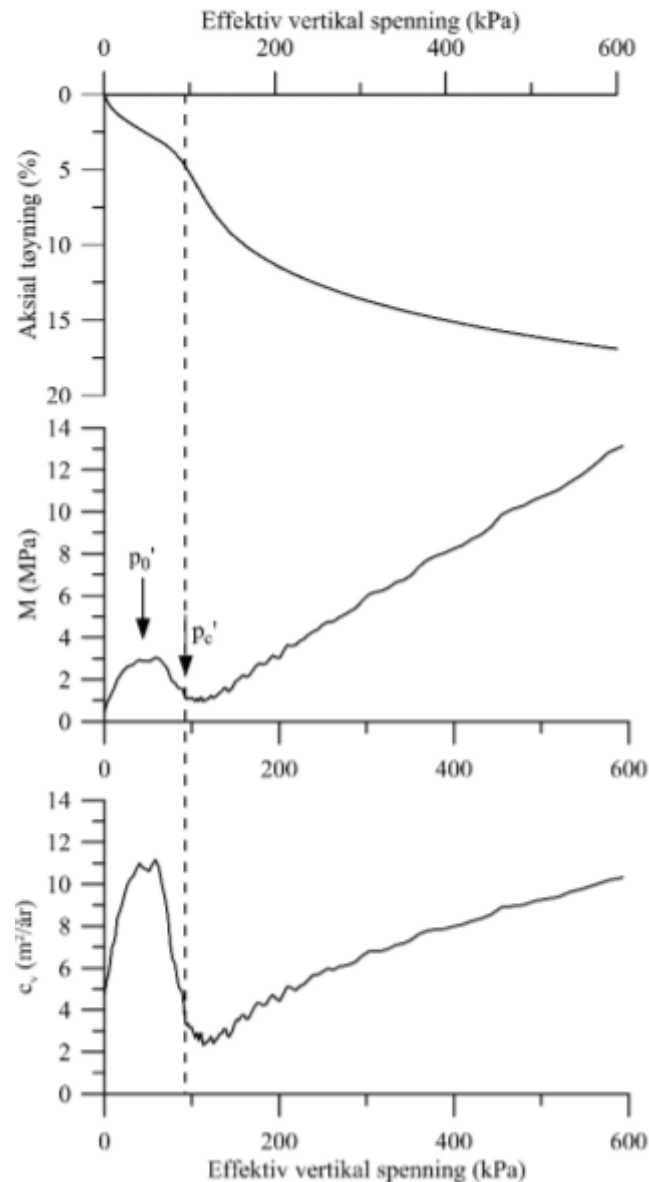
Plastisitetsdiagrammet som Brooker og Ireland etablerte i 1964 ble i 2017 re-visitert av forskere fra NGI. Regresjonsstudiet til NGI på hviletrykkskoeffisienten i norske leirer viste at påvirkningen til plastisitetsindeksen er neglisjerbar (L'Heureux, et al., 2017) Videre anbefalte L'Heureux, en av forskerne fra studien, at innflytelsen K'_0 på leiremateriale burde etterprøves ved hjelp av treaksialforsøk. Slike treaksialforsøk ble utført av Jo Forseth Indgaard, der $K'_0 = 0,6-0,8$ uten at en entydig konklusjon kunne trekkes fra resultatene (Indgaard, 2017). Disse forsøkene ble utelukkende utført med 54mm sylindrerprøver. Forseth anbefalte å videreføre arbeidet ved og utføre tilsvarende studie med større variasjon i K'_0 og dermed undersøke om det vil gi større utslag blant styrkeparameterene. Studiet til L'Heureux kom frem til følgende sammenheng mellom hviletrykkskoeffisienten og overkonsolideringsratio for norske leirer, vist i Formel 2.5.

$$K'_0 = 0.53OCR^{0.47}$$

Formel 2.5 Hviletrykkskoeffisient (NGI) (L'Heureux, et al., 2017)

For norske kohesjonsjordarter må en til vanlig ta spenningshistorien i betraktning. Da er en relasjon som Formel 2.4 for eksempel slik som L'Heureux's Formel 2.5 sin regresjonsformel benyttes. Det er følgende nødvendig å finne prekonsolideringsspenningen for aktuell dybde før overkonsolideringsratio, OCR,

bestemmes ved hjelp av Formel 2.2 og dernest hviletrykkskoeffisienten K'_0 , fastsettes ved å bruke regresjonsformelen (Formel 2.5). Dette gjøres ved å utføre ødometerforsøk for lignende dybde fra samme prøveserie. Figur 2.2 viser hvordan resultatene fra ødometerforsøk blir brukt til å etablere pre-konsolideringsspenningen.



Figur 2.2 Eksempel på bestemmelse av pre-konsolideringsspenning og dermed OCR fra ødometerforsøk (NVE, et al., 2014)

En kombinasjon av CPTU og ødometer er en annen mulighet for å bestemme OCR for et helt dybdeprofil. Den ble presentert av Mayne (1986) til bruk på kohesjonsjordarter (Mayne, 1986). I praksis bestemmes prekonsolideringskoeffisienten, k , ved hjelp av ødometer og så plottes OCR som funksjon av dybde ved hjelp av normalisert spissmotstand, Q_t . Den empiriske faktoren k må bestemmes for hvert lag i jorden der OCR skal bestemmes.

$$OCR = k(q_t - \sigma_v)\sigma'_{v0} = kQ_t$$

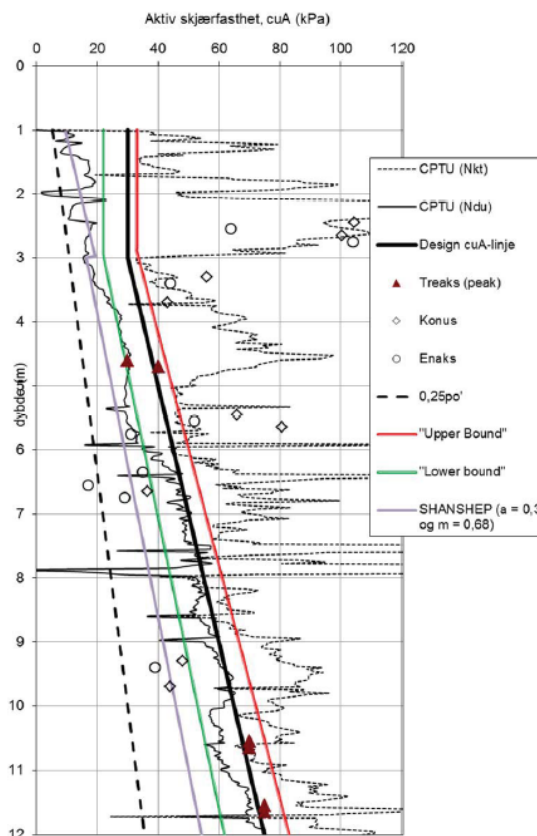
Formel 2.6 OCR for kohesjonsjordarter (Mayne, 1986)

Ifølge en studie gjort av Karlsrud i 2013 viser CRS ødometertester og CAUa triaksialtester med blokkprøver overlegen prøve kvalitet vis av vis 54mm sylindprøver (Karlsrud, et al., 2013). Derfor ble blokkprøver valgt i denne studien for å minimalisere prøveforstyrrelser som kan påvirke resulterende styrkeparametere. Dette er den største forskjellen mellom forfatters studie vis-a-vis Indgaard's studie. Indgaard valgte hviletrykk (K'_0) på 0,6 og 0,8 for lik dybde og sammenlignet to ulike borhull basert på 54mm stempelprøver fra NGTS (Norwegian Geo-Test Site) i Trondheim. Han valgte vertikal konsolideringsspenning først og så beregnet horisontal konsolideringsspenning ved hjelp av Formel 1.1 for valgt hviletrykk. Dette er vanlig praksis. Når det er sagt, hvis en skal velge hviletrykk som er større eller mindre enn in situ hviletrykk, vil dette også føre til en annen middelspenning, p' , enn in situ. Her har forfatter valgt å gå en litt annen retning enn Indgaard. Det reelle hviletrykket (in situ) ble først forsøkt funnet med minst mulig feilmargen. Deretter ble middelspenningen bestemt (in situ) og holdt konstant selv etter valg av K'_0 med avvik fra in situ hviletrykkskoeffisient. Vertikal og horisontal konsolideringsspenning ble regulert slik at de skulle passe med in situ middelspenning og valgt K'_0 .

2.2 Udrenert aktiv skjærfasthet, S_{uA}

Udrenert aktiv skjærstyrke er en sentral geoteknisk parameter som blir brukt som grunnlag for beregning av blant annet skråningsstabilitet og bæreevne.

Vanlig praksis er å bestemme S_{uA} for ulike dybder i et borpunkt for å lage S_{uA} -profil, noe som gir forventede egenskaper til lagene i planområdet. Både in situ feltundersøkelser, laboratorietester og vurdering av tidligere data brukes til å bedømme S_{uA} -profiler.



Figur 2.3 En typisk design S_{uA} -profil (L'Heureux, et al., 2017)

En kan se på Figur 2.3 at treaksial testing ble prioritert ved valg av design S_{UA} -linje i henhold til prioriteringsklassene i Tabell 2.1.

2.3 Indekstesting og ødometer

2.3.1 Naturlig vanninnhold

Måling av naturlig vanninnhold brukes for klassifisering og identifisering av jordarter. Vanninnhold brukes videre til beregning av blant annet porøsitet, poretall og metningsgrad. Egenskapen bestemmes ved hjelp av måling av masse før og etter tørking og er forholdet mellom fritt porevann før tørking og massen av tørkede jordpartikler. (SVV, 2016)

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_s} * 100(\%) = \frac{m_w}{m_d} * 100(\%)$$

Formel 2.7 Beregning av vanninnhold

2.3.2 Romvekt og mineraldensitet

Romvekt eller tyngdetetthet av prøven er viktig for å bestemme overlagingstrykk in situ. Ringdensitet er en egnet metode for bestemmelse av romvekt til homogene leireprøver. En slik densitetsring har kjent volum og masse. Ringen presses inn i uforstyrret masse og renskjæres i endene. Ringen fylt med masse veies (SVV, 2016).

$$\gamma = \rho g = \frac{(m_{tot} - m_{ring}) * g}{V}$$

Formel 2.8 Beregning av romvekt

Mineraldensitet eller korndensitet, ρ_s , kan bestemmes på ulike måter. En egnet metode for å måle mineraldensitet av leiremateriale er pyknometer. Mineraldensitet er definert som partiklenes tørrmasse delt på deres reelle volum.

Mineraldensiteten finner man ved bruk av et kalibrert pyknometer med kjent masse og volum. Pyknometeret fylles med en del av prøven (over 25 g som tørr masse) og luftfritt vann. Deretter settes flasken i en vakuum-eksikator for å fjerne alle luftbobler og fylles igjen med luftfritt vann før massen av pyknometeret, prøven og vannet måles. Videre heller man prøven i en skål og putter det i et varmeskap for tørking. Etter at vannet har fordampet veier man tørr vekt. En kan så beregne mineraldensitet etter Formel 2.9. (Eget, 2019)

$$\rho_s = \rho_w \frac{m_0}{m_1 + m_0 - m_2}$$

Formel 2.9 Beregning av mineraldensitet

m_0 – vekt av tørr prøve

m_1 – vekt av pyknometer fylt med vann

m_2 – vekt av pyknometer fylt med vann og prøve

2.3.3 Plastisitetsgrenser

Plastisitetsgrensen er den nedre grensen av det plastiske området til et jordmateriale. 20 gram av det klargjorte materialet blir delt i to delprøver. Den ene formes til en ball for så å bli rullet mellom en glassplate og to fingre med tilstrekkelig trykk til å forme en tråd på 3,2mm. Hastigheten av rullingen skal være mellom 80 og 90 rullinger pr. minutt, der både frem og tilbake utgjør en rulling. Når tråden er 3,2mm og ikke brister deles trådes i biter, knas sammen og rulles på nytt. Dette gjentas inntil tråden brister før 3,2mm.

Denne delprøven skal så veies umiddelbart og så tørkes for bestemmelse av vanninnhold (SVV, 2016).

Flytegrensen er den øvre grensen av det plastiske området til et jordmateriale. Denne grensen beskriver vanninnholdet der omrørt leire går fra å være formbar til å være flytende (i væskeform). Casagrande's flytegrenseapparat kan benyttes til å bestemme flytegrensen. Dette er en standardisert test som består av en messingskål som bankes ned i en plate ved hjelp av en sveiv. Messingskålen fylles opp så det er 8 mm høyde på midten. Det lages så en rille i prøvematerialet før testingen igangsettes. En sveiv roteres med to omdreininger i sekundet som gjør at messingskålen løftes og slippes ned i bunnplaten. Antall slag telles til rillen lukkes til ca 10mm lengde målt fra enden av rillen. Hvis lengden er ca 10 mm ved 25 slag tas noe av prøven ut av casagrandeapparatet for måling av vanninnhold. Dette kan også gjøres ved hjelp av interpolasjon og avlesning fra en med tre tester der over og under 25 slag blir målt (Emdal, 1999).

2.3.4 Konusforsøk

Konusforsøket blir brukt for å bestemme udrenert skjærfasthet både i uomrørt og omrørt tilstand, som igjen brukes til å beregne av sensitivitet jord. Skjærfastheten til leire er korrelert etter nedtrengning av en metallkonus med kjent masse og spissvinkel. Konusforsøket blir gjennomført på et prøvestykke på Ø54mm høyde på 10 cm. Prøvestykket blir skåret til i en prøvevugge for å sikre plane endeflater. Det tas 3 gyldige konusinstrykk sentralt i endeflaten før det kuttes av et stykke på 5 cm fra endeflaten der testene har blitt gjort.

Tabell 2.2 Klassifisering av jordstyrke (Emdal, et al., 2017, p. 161)

| Klassifisering av jordstyrke | | |
|-------------------------------------|--------------------|----------------------|
| Jordtype | Skjærstyrke | S_u |
| veldig myk | Veldig lav | <12,5 |
| myk | lav | 12,5-25 |
| medium stiv | medium høy | 25,0-50,0 |
| stiv | høy | 50,0-100,0 |
| veldig stiv | veldig høy | >100,0 |

Tabell 2.3 Klassifisering av sensitivitet (Emdal, et al., 2017, p. 161)

| Klassifisering | |
|-----------------------|----------------------|
| Jordtype | S_t |
| lav sensitivitet | < 8,0 |
| middels sensitivitet | 8,0 - 30,0 |
| høy sensitivitet | > 30,0 |

2.3.5 Ødometertest

For bestemmelse av pre-konsolideringsspenningen og overkonsolideringsratioen blir vanligvis ødometertest brukt. Det finnes to ulike varianter. Ødometer med konstant tøyningssrate (CRS) og inkrementell lastøkning (IL). Omtalt her er ødometer med konstant tøyningshastighet. Ødometerapparatet logger vertikal forskyvning, δ , vertikal totalspenning σ_v , og poretrykk u hvert 5 sekund. Dette leder til et stort datasett som behandles i Excel. Først ble gjennomsnittlig effektiv vertikalspenning beregnet ved hjelp av Formel 2.10:

$$\sigma'_v = \sigma_v - \frac{2}{3}u_b$$

Formel 2.10 Gjennomsnittlig effektiv vertikalspenning, ødometer

Tøyningen ble beregnet etter Formel 2.11:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{h_0}$$

Formel 2.11 Tøyning, ødometer

der h_0 tilsvarer prøvens høyde, som ved starten av testen var 20mm. Ødometermodulen, M , ble beregnet basert på endring i spenning og tøyning etter Formel 2.12:

$$M = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

Formel 2.12 Ødometermodul, M

Til slutt ble konsolideringskoeffisienten beregnet ved hjelp av Formel 2.13:

$$c_v = \frac{\Delta\sigma}{\Delta t} \frac{[h_0(1 - \varepsilon)]^2}{2u_b}$$

Formel 2.13 Konsolideringskoeffisienten, ødometer

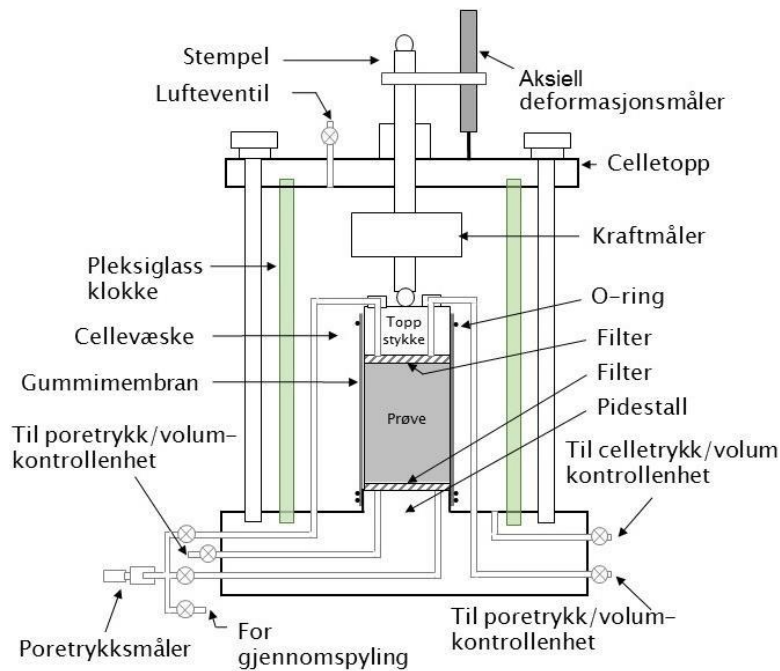
Pre-konsolideringsspenningen ble avlest etter metoden til Janbu vist i Figur 2.2 (Janbu, 1963).

2.4 Treksialforsøk

Udrenerte aktive treksialforsøk av god kvalitet er ifølge NIFS-rapporten den laboratoriemålte parameteren som ligger definisjonsmessig nærmest S_{uA} . For at et udrenert forsøk skal gi riktig skjærfasthet er det helt essensielt å treffe riktig med konsolideringsspenningene (NVE, et al., 2014). Etter at konsolideringsfasen er ferdig, skal spenningene i treksialcellen være tilnærmet like in situ spenningstilstand. Gitt at man har kontroll på poretrykket på gjeldende dybde har man også kontroll på vertikal effektivspenning, σ'_{vo} . Kjennskap til pre-konsolideringsspenningen og dermed også overkonsolideringsgrad er nødvendig for å bestemme hviletrykkskoeffisienten i norske kohesjonsjordarter.

Deviatorspenningen, q , bør holdes relativt mye lavere enn bruddtilstanden under konsolideringsfasen. Ved for høy q er det, ifølge NIFS-rapporten, økt risiko for prøveforstyrrelse før skjærforsøket igangsettes. Bestiller av prøve kan angi til laboratoriet maksimal deviatorspenning som kan tillates. Det vil si at, ifølge NIFS-rapporten, en underestimert K'_o vil øke risiko for prøveforstyrrelser og en overestimert K'_o vil gi høyere gjennomsnittlig effektivspenning i prøven og dermed også for høy fasthet ifølge rapporten (NVE, et al., 2014).

2.4.1 Utstyr



Figur 2.4 Prinsippkisse av en treaksecelle (SVV, 2016)

- belastningsåk (presse)
- treaksialcelle
- gummimembran
- trykk/volumkontrollenhet for påføring av celletrykk, poretrykk og volumendringskontroll
- måle/registreringsutstyr for vertikal deformasjon, celletrykk, poretrykk og vertikallast
- måle/registreringsutstyr for volumendring av cellevæske og prøve
- innbyggingsapparat for plassering av gummihud og toppstykke på prøve
- apparat for nedtrimming av prøver med store dimensjoner
- prøvevugge
- endefiltre
- papirfilter
- luftfritt vann
- ultralydbad
- vannfylt eksikkator
- vekt, nøyaktighet 0,1 g
- trådsag, skyvelære, spatel, kniv og stållinjal

2.4.2 Utførelse

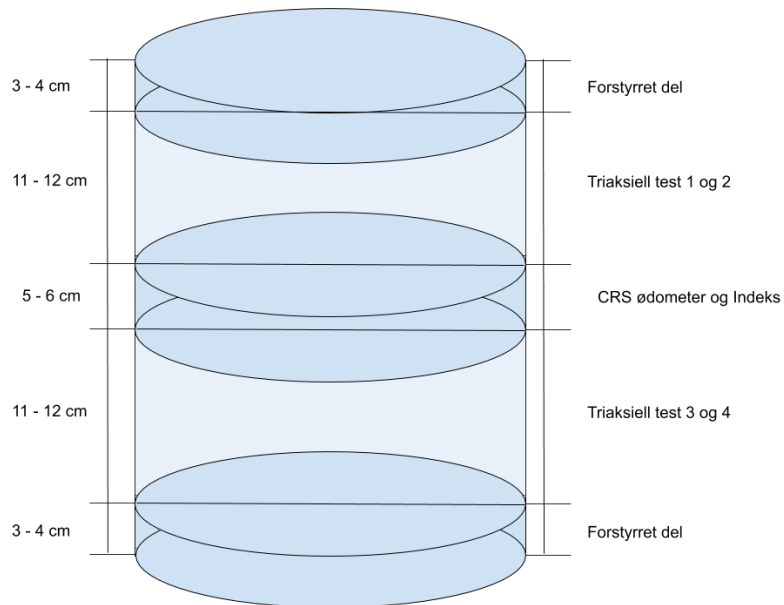
En treaksialtest deles inn i følgende faser:

- Forberedelse av uforstyrrete prøver
- Klargjøring av forsøksbetingelser
- Konsolideringsfase
- Metningsfase med hviletid
- B-test
- Skjærforsøk

Under er fasene beskrevet i korte trekk.

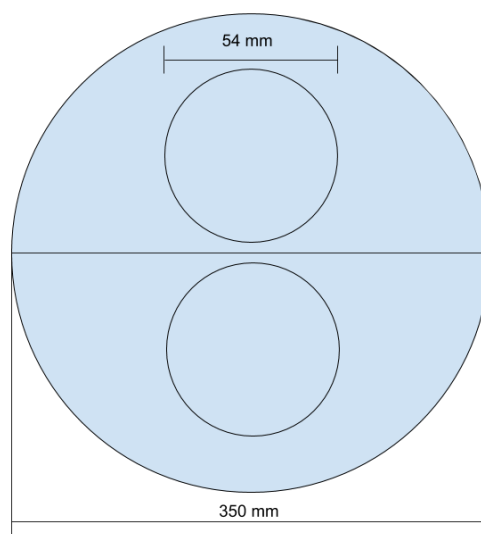
2.4.2.1 Forberedelse av uforstyrrede prøver

Normalt kjøres treaksialtester med prøver på $\text{Ø}54\text{mm}$ med 100mm høyde. Prøven bygges inn med porøse filter i begge ender og fuktet papirfilter i begge ender og rundt prøven. Den omslutes på sidene med gummimembran og har et toppstykke i toppen som vist i Figur 2.4. I denne studien ble testingen utført på blokkprøver med diameter på 35cm og høyde på 35cm . Disse ble skåret ut som vist i Figur 2.5.



Figur 2.5 Inndeling av prøver fra blokk

Hver av blokkene med diameter på 35cm ble delt i midten sett ovenfra deretter trimmet til 54mm sylindere som vist på Figur 2.6.



Figur 2.6 Trimming av blokkprøve

2.4.2.2 Klargjøring av forsøksbetingelser.

Filtrene skal være mettet, ifølge SSV, og poretrykksystemet skal fjernes for luft ved bruk av luftfritt vann. NGI derimot bygger inn prøvene sine med tørre filtre for så å mette de før konsolideringsfasen. Dette er for å unngå svelling i prøven (Vestgården, 2020). Membranen skal være tett og det skal kontrolleres for hvert forsøk. Når membranen påføres prøven skal den være tørr på innsiden.

2.4.2.3 Konsolideringsfase

I denne fasen skal det bli opprettet en stabil spenningstilstand i prøven så lik som mulig som det prøven opplevde i jorden. Konsolideringsspenningene skal oppgis ved bestilling av prøvene eller skal fastslås i samråd med de ansvarlige på laboratoriet (SVV, 2016). In situ poretrykkmålinger eller måling av GVS utføres for å sikre at forsøkene utføres med relevant spenningsnivå og dermed gir grunnlag for beregning av effektivspenninger.

1.1.1.1.1 Isotrop konsolidering

Ved isotrop konsolidering vil $K'_0 = 1,0$ og celletrykket skal justeres slik at effektivspenningen blir lik overlagingstrykket ($\sigma'_0 = \sigma'_{1c} = \sigma'_{3c}$) uten baktrykk (u_0). Det vil si at vi simulerer en spenningstilstand i jorden der vertikalspenningen og horisontalspenningen er like for gitt dybde. Ifølge Statens Vegvesen bør da spenningsendringen skje relativt langsomt (ca. 0,2 – 2 kPa pr minutt). Forskning på NTNU viser at tiden på spenningsendringen i denne fasen har tilsynelatende mindre å si enn SVVs håndbok tilsier og at man kan ved noen tilfeller oppnå bedre prøve kvalitet ved rask konsolidering (Lepkowski, 2019).

1.1.1.1.2 Anisotrop konsolidering

Anisotrop konsolidering, det vil si $K'_0 = \sigma'_{hc}/\sigma'_{vc}$, brukes der en kan anta anisotropi i bakken ($\sigma'_{1c} = \sigma'_{v0}$ og $\sigma'_{3c} = \sigma'_{h0}$). Det kan utføres på følgende to måter:

1. Påføring av både effektivt celletrykk σ'_3 og effektiv aksialspenning σ'_1 utføres med forsinket påføring av σ'_1 vis-a-vis σ'_3 uten baktrykk i poretrykksystemet ($u_0 = 0$). Da bør, ifølge SVV, spenningsendringen skje sakte, for σ'_3 (ca. 0,2 – 2 kPa pr minutt) og for σ'_1 (ca. 0,1 – 0,5 kPa pr minutt) helt til konsolideringsspenningene er nådd.
2. Konsolideringen gjøres i to trinn der prøven først påføres et celletrykk tilsvarende σ'_{3c} mens $u_0 = 0$ med langsom spenningsendring (ca. 0,2 – 2 kPa per minutt), ifølge SVV. Når ønsket σ'_{3c} er nådd, økes σ'_1 til ønsket nivå σ'_{1c} med langsom spenningsendring (ca. 0,1 – 0,5 kPa per minutt).

Middelspenning ble, i alle tilfeller, beregnet først ved bruk av Formel 2.14. Den ble holdt konstant for beregning av konsolideringsspenninger:

$$p'_0 = \frac{1}{3}(\sigma'_{v0} + 2\sigma'_{h0}) = \frac{\sigma'_{v0}}{3}(1 + K'_{0,reell})$$

Formel 2.14 In situ middelspenning

$$\sigma'_{vc} = \frac{3p'_0}{(1 + K'_{0,valg})}$$

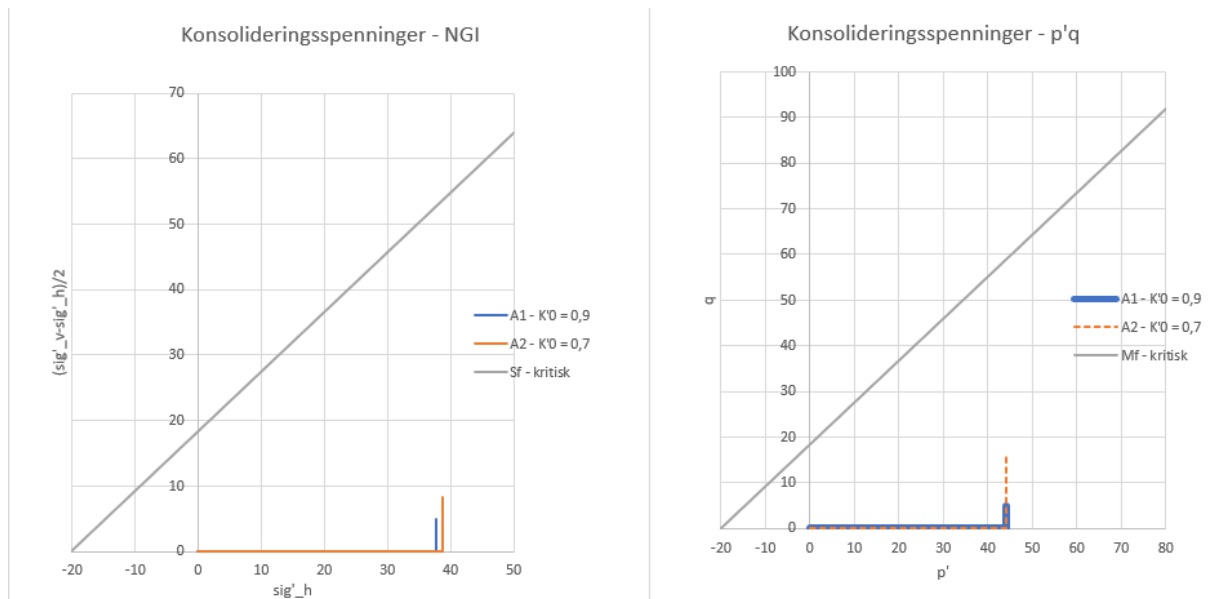
Formel 2.15 Beregning av vertikal konsolideringsspenning

$$\sigma'_{hc} = K'_{0,valg} \cdot \sigma'_{vc}$$

Formel 2.16 Beregning av horisontal konsolideringsspenning

der $K'_{0,reell} \neq K'_{0,valg}$, $\sigma'_{vc} \neq \sigma'_{v0}$ og $\sigma'_{hc} \neq \sigma'_{h0}$. Et visuelt eksempel av beregningsmetoden er vist i Figur 2.7. Figuren viser ellers at alternativ 2 for anisotrop konsolidering ble

brukt. Videre ble spenningsendring på 2 kPa per minutt for påført celledrykk og 0,5 kPa per minutt for vertikal spenningsendring.



Figur 2.7 Prinsipp bak parallellforsøk med like middelspenninger og ulike hviletrykk

1.1.1.1.3 K'_0 -konsolidering

K'_0 -konsolidering er en variant av anisotrop konsolidering. Konsolideringsfasen blir utført slik at prøven ikke får noen horisontale (radielle) tøyninger. Det betyr at arealet forblir som utgangspunktet, A_0 , gjennom hele konsolideringsfasen. Dette lar seg gjøre ved at celledrykket justeres slik at volumet av dissipert porevann og volumet av prøven følger formelen $A_0 \delta_v = \Delta V$, der δ_v er vertikal forskyvning. En typisk spenningssti for ved δ_0 -konsolidering er vist i Figur 2.8. Spenningsstien fra K'_0 -konsolideringen korresponderer med hviletrykkskoeffisienten i et δ_0 -meterforsøk og kan brukes til å bestemme hviletrykket etter Formel 2.17. (Emdal, et al., 2017)

$$K'_0 = \frac{\sigma'_{30} + a}{\sigma'_{10} + a} = \frac{1}{1 + 2S_0}$$

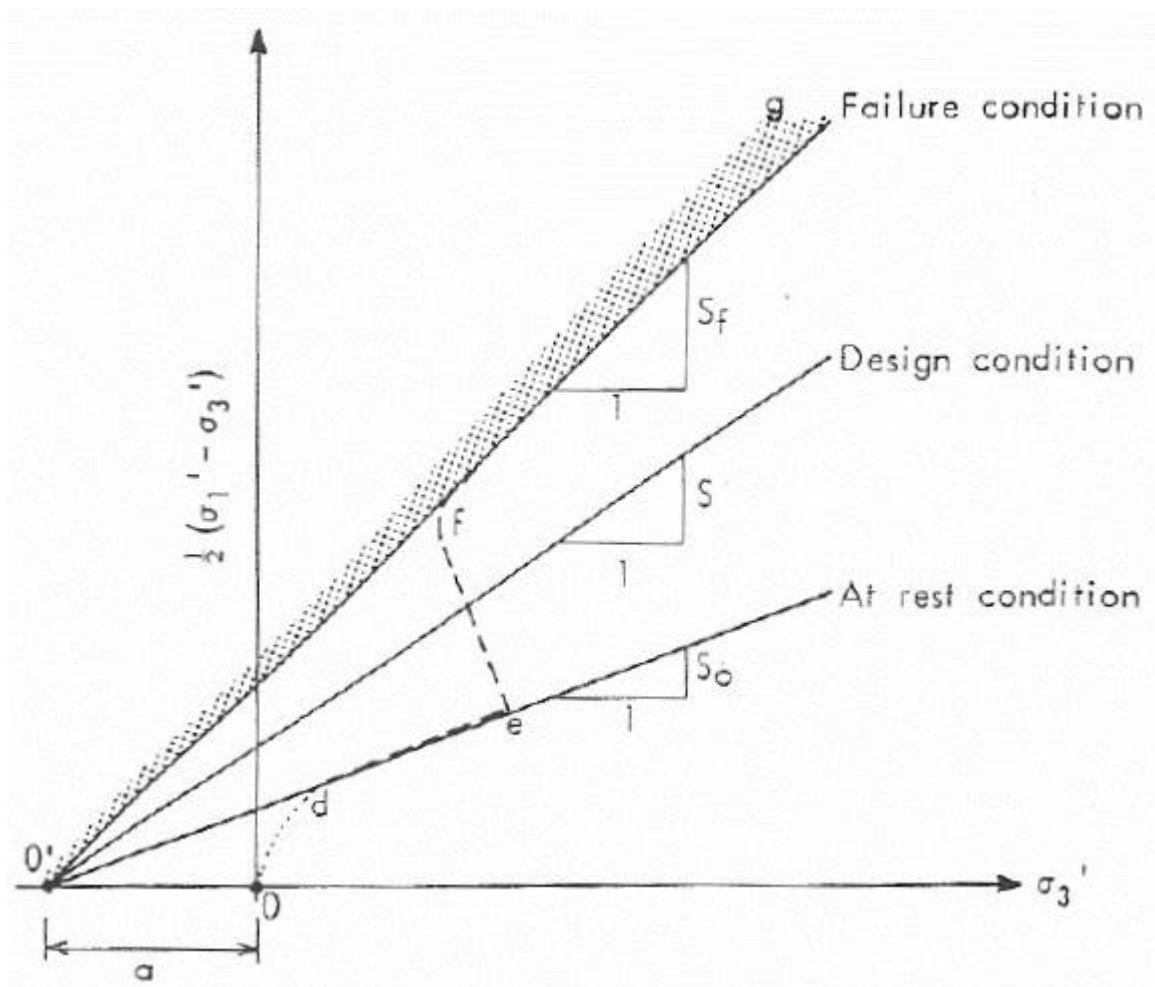
Formel 2.17 Hviletrykkskoeffisienten bestemt ved δ_0 -konsolidering

Der,

$$S_0 = \frac{\sin \rho}{1 - \sin \rho}$$

Formel 2.18 Stigningstallet til konsolideringsfasen ved K'_0 -konsolidering, ρ tilsvarer mobilisert friksjonvinkel ved in situ spenningsstilstand

Etter å ha fullført K'_0 -konsolideringen blir vanlig drenert eller udrenert skjærfase gjennomført.

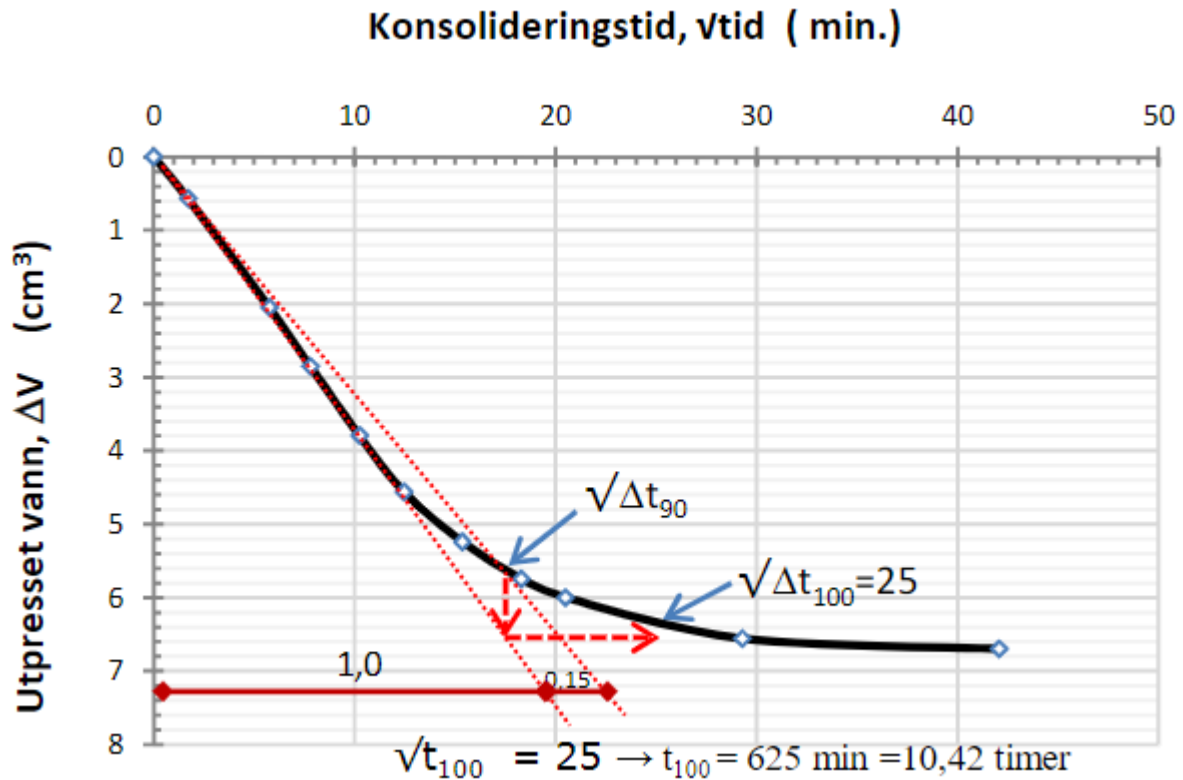


Figur 2.8 Typisk spenningssti for prøver konsolidert etter ødo-triaksprosedyre (Emdal, et al., 2017)

1.1.1.1.4 Avslutning av konsolideringsfasen

Volumendring, ΔV , bestemmer når konsolideringsfasen avsluttes. ΔV plottes mot tid og konsolidering avsluttes når den flater ut. Hvor lang tid det vil ta avhenger av jordmaterialet i prøven. Finere materiale som leire eller leirholdig silt med lav permeabilitet vil kreve lenger tid før grafen flater ut.³

³ Forstyrrede prøver kan tilsynelatende vise seg å ha lang konsolideringstid. Likevel skal fasen avsluttes etter 24t, ifølge SVV



Figur 2.9 Eksempel på utpresset porevann mot kvadratrot av tid under konsolideringsfasen (SVV, 2016)

Vertikaldeformasjonen under konsolideringen måles kontinuerlig ved at stempelet holdes i kontakt med toppstykket gjennom hele fasen.

For å sikre at all luft i filtre, slanger, ventiler etc. blir fjernet skal systemet gjennomspyles med vann på nytt.

2.4.2.4 B-test

Metning av baktrykksystem/poretrykksystem

$$S_r = \frac{w\gamma}{\gamma_w(1 + w - \frac{\gamma}{\gamma_s})}$$

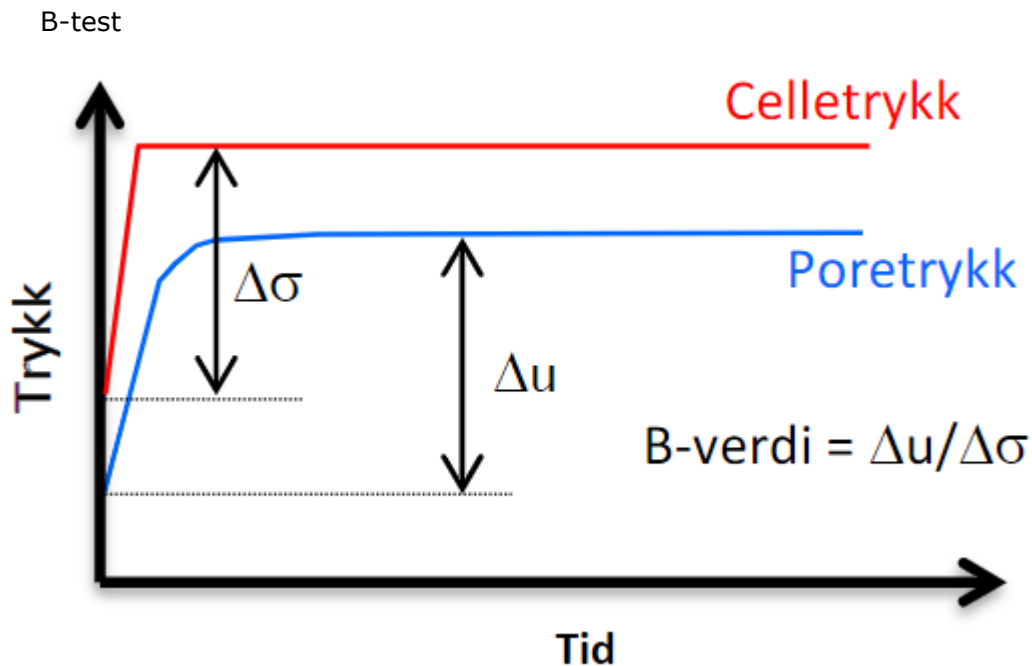
Formel 2.19 Metningsgrad

I forsøk på å oppnå pålitelige målinger av poretrykk ved udrenert brudd bør det, ifølge SVV, legges på et baktrykk på 200-500 kPa⁴⁵. Samtidig skal celletrykket økes like mye, parallelt med baktrykket, med konstant effektivspenning mot slutten av konsolideringsfasen. $\Delta\sigma$ skal være mellom 2 og 10 kPa/minutt. Variasjoner mellom celletrykk og baktrykk blir holdt så lave som mulig, maksimalt $\pm 10\%$. Prøver med lave effektivspenninger (under 20kPa) bør variasjonen holdes under ± 2 kPa.⁶

⁴ Standard baktrykk er 700 kPa på labben til NGI (Vestgården, 2020)

⁵ Standard baktrykk er 500 kPa på labben til Multiconsult (Gylland, 2020)

⁶ SVV's anbefalinger



Figur 2.10 B-test (SVV, 2016)

Når stabilt spesifisert baktrykk og celletrykk oppnås, skal det være en hviletid på 10-30 min før B-test. Under B-testen, som Figur 2.3 viser, påføres en økning $\Delta\sigma$ (10 – 100kPa) avhengig av konsolideringsgrad, *OCR*, mens ΔV holdes lik 0. Man leser av hva denne spenningsøkningen, $\Delta\sigma$, gjør med poretrykket, Δu , og krever en *B-verdi* = $\Delta u/\Delta\sigma$ på minst 0,95. Hvis *B-verdien* er under 0,95 må det dokumenteres at lavere verdier gir tilfredsstillende poretrykksmålinger. Dersom *B-verdien* blir målt rett i underkant av 0,95 skal baktrykk og celletrykk økes med 50% og hvis den er vesentlig lavere enn 0,95 skal baktrykk og celletrykk økes med 100%.⁷ Hvis disse tiltakene endrer *B-verdien* lite, er det dokumentasjon på at skjærforsøket kan settes i gang.

Etter B-testen blir celletrykket redusert tilsvarende $\Delta\sigma$, tilbake til utgangspunktet før B-testen. Deretter skal trykket utjevnes, noe som forventes å ta ca. 1 time (SVV, 2016).

2.4.2.5 Skjærforsøk

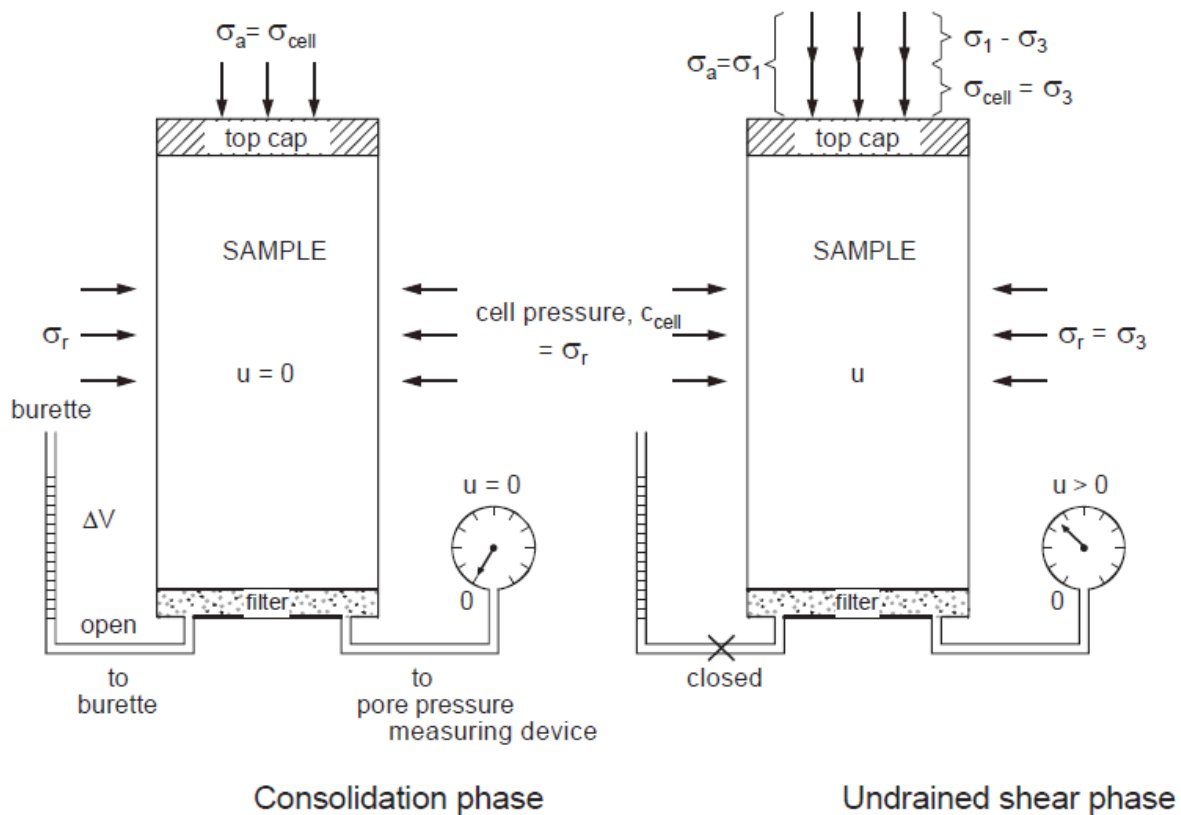
Prøven belastes til brudd ved å øke celletrykket mens baktrykket holdes konstant (Type 1). Dette kan enten gjøres drenert eller udrenert. Valg av drenasjebetingelser må vurderes utfra eksisterende forhold in situ, type jordart og belastningsform. Tabell 2.4 viser hovedtyper av belastningsformer under skjærfasen. Dette er noe som bestemmes utfra hva slags belastningsform som er forventet der prøven tas fra.

Tabell 2.4 Typer skjærbelastning under skjærfasen av treaksiale forsøk (SVV, 2016)

| Belastningsform | σ_{aksial} | $\sigma_{radiell}$ | Type* |
|-----------------|-------------------|--------------------|-------|
| Aktiv | Øker | Konstant | 1 |
| Aktiv | Konstant | Avtar | 4 |
| Passiv | Avtar | Konstant | 3 |
| Passiv | Konstant | Avtar | 2 |

⁷ SVV's anbefalinger

I denne rapporten skal Type 1 utredes. Det er en aktiv belastningsform der celletrykket og baktrykket holdes konstant, mens lastcellen bidrar til at deviatorspenningen øker inntil prøven går til brudd og er det som ofte blir kalt klassisk treaksialt forsøk.



Figur 2.11 Prinsipper brukt i (isotrop) konsolideringsfase og udrenert skjærfase (Type 1) (Emdal, 1999)

Temperaturen skal ikke variere mer enn ± 2 °C ved udrenerte bruddforsøk. Før belastningen blir alle ventiler, slanger og koplinger sjekket for lekkasje, samt synlige vanndråper utenfor treaksialcellen. Eventuelle lekkasjer skal bli reparert før belastning til brudd. Målere blir avlest regelmessig for plotting av spennings-deformasjonskurver og spenningsstier. Tøyningsraten ved alle forsøk i dette studiet var på 1 eller 2 %/time.

Forsøket stoppes vanligvis ved en aksial tøyning, $\varepsilon = 10\%$. (SVV, 2016)

Tabell 2.5 Oversikt over registrerte verdier og avledede parametere brukt ved rapportering av aktive treaksialforsøk (Lepkowski, 2019)

| Registrert verdi | Beregnet parameter | Formel for beregnet parameter | Merknad |
|-------------------------------|---|--|--------------------------------------|
| δ - Aksial deformasjon | ε - Tøyning under skjærfasen | $\varepsilon = \frac{\delta}{H_0}$ | H_0 - prøvens høyde ved innbygging |
| | A_a - Korrigert areal under konsolideringsfasen A_s - Korrigert areal under skjærfasen | $A_a = A_0 \frac{1 - \frac{\Delta V}{V_0}}{1 - \frac{\Delta V}{3V_0}}$ $A_s = A_a(1 - \varepsilon)$ | Gjelder ikke ødo-konsolidering |

| | | | |
|---|---|--|---|
| P - vertikal last σ_{cell} - celletrykk | σ_v - vertikalspenning | $\sigma_v = \frac{P}{A_s} + \sigma_{cell}$ | |
| u - Poretrykk | σ_v' - effektiv vertikalspenning σ_{cell}' - effektiv horisontalspenning | $\sigma_v' = \sigma_v - u$ $\sigma_{cell}' = \sigma_{cell} - u$ | $\sigma_v = \sigma_1$ $\sigma_{cell} = \sigma_3$ |
| | p' - Middelspenning | $p' = \frac{1}{3}(\sigma_v' + 2\sigma_{cell}')$ | |
| | q - deviatorspenning | $q = \sigma_v' - \sigma_{cell}'$ | |
| | S_f - Helningen til bruddlinjen | $S_f = \frac{\sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$ | Gjelder NTNU-plott |
| | Helningen til bruddlinjen | $\sin\varphi$ | Gjelder NGI/MIT- plott |
| | N - Helningen til bruddlinjen | $N = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$ | Gjelder hovedspennings- plot |
| | M_f - Helning til bruddlinjen | $M_f = \frac{6\sin\varphi}{3 - \sin\varphi}$ | Gjelder p' - q - plott |
| | τ - skjærspenning | $\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1' - \sigma_3')$ | |
| | D - Dilatansparameter | $D = \frac{\Delta q}{\Delta p'}$ | D - brukes for vurdering av kontraktans/dilitans Kan kun leses fra p' - q plott |

2.4.3 Prøveforstyrrelser

Vurdering av prøveforstyrrelser er et viktig moment ved treaksiale tester. Det gir stor påvirkning av resulterende parametere og er nødvendig for å vurdere resultatenes troverdighet og kvalitet. En annen måte å vurdere prøvekvalitet ble presentert av Lunne med fler blant annet i NGI sin bok om prosedyrer av treaksialtester.

Tabell 2.7 viser en vanlig metode å vurdere prøvekvalitet basert på volumtøyning, ε_{vol} , og overkonsolideringsratio OCR (Berre, 1981). Kriteriet tilsier at ε_{vol} under 1,0 % for prøver som har OCR 1-2 har akseptabel prøvekvalitet. Tilsvarende for OCR 2-3 må ε_{vol} være mellom 2-3 % for at forsøket skal oppnå akseptabel prøvekvalitet.

$$\varepsilon_{vol} = \frac{\Delta V}{V_0}$$

Formel 2.20 Prøvekvalitet basert på volumtøyning

Tabell 2.6 Vurdering av prøveforstyrrelser basert på volumtøyning (Berre, 1981)

| OCR | Dybde | Perfekt kvalitet | Akseptabel kvalitet | Forstyrret kvalitet |
|--------------------------|-------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| σ_c'/σ_{vo}' | z | $\varepsilon_{vol} <$ | $< \varepsilon_{vol} <$ | $\varepsilon_{vol} >$ |
| [-] | [m] | [%] | [%] | [%] |

| | | | | |
|-----------|--------|------|-------------|------|
| 1,0 - 1,2 | 0 - 10 | 3,00 | 3,00 - 5,00 | 5,00 |
| 1,2 - 1,5 | 0 - 10 | 2,00 | 2,00 - 4,00 | 4,00 |
| 1,5 - 2,0 | 0 - 10 | 1,50 | 1,50 - 3,50 | 3,50 |
| 2,0 - 3,0 | 0 - 10 | 1,00 | 1,00 - 3,00 | 3,00 |
| 3,0 - 8,0 | 0 - 10 | 0,50 | 0,50 - 1,00 | 1,00 |

En annen måte å vurdere prøve kvalitet ble presentert av Lunne med fler blant annet i NGI sin bok om prosedyrer av treaksialtester.

Tabell 2.7 Vurdering av prøveforstyrrelser basert på poreallsendring (Lunne, et al., 1997)

| OCR | Meget god kvalitet | God kvalitet | Dårlig kvalitet | Meget dårlig kvalitet |
|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| σ_c'/σ_{vo}' | $\Delta e/e_0 <$ | $< \Delta e/e_0 <$ | $< \Delta e/e_0 <$ | $\Delta e/e_0 >$ |
| [-] | [-] | [-] | [-] | [-] |
| 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 |

Der,

$$e = \frac{V_p}{V_s} = \frac{\gamma_s(1+w)}{\gamma} - 1$$

Formel 2.21 Poretall

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

Formel 2.22 Poretallforhold

Et viktig moment i denne rapporten er hva slags innvirkning valg av hviletrykkskoeffisient har for utpresset porevann. Velges høyere K_0' enn in situ vil det være høyere middelspenning, p' enn det prøven har opplevd in situ. Det er dermed rimelig å anta at mer porevann vil presses ut. I dette studiet ble denne effekten fjernet ved å holde p' konstant sin in situ-størrelse. Da kan en utelukke at økt utpresset porevann har med middelspenning å gjøre og se nærmere på om variasjonen i hviletrykket, spiller en rolle.

3 Målinger og observasjoner

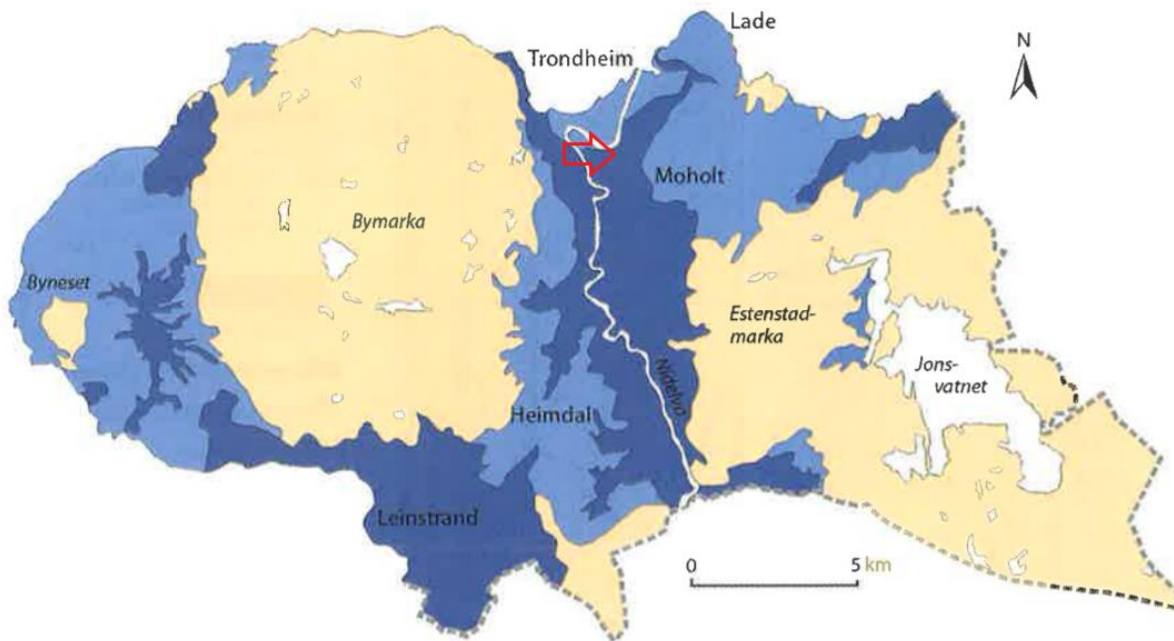
3.1 Forsøksområde

Forsøksområdet ligger i Høgskoledalen, på folkemunne omtalt som «Dødens Dal», i umiddelbar nærhet til NTNU Gløshaugen Campus i Trondheim kommune, vist på oversiktskartet på Figur 3.1. Tilsvarende oversiktskart over er gjengitt i Tegning 1 i Tegninger og vedlegg.



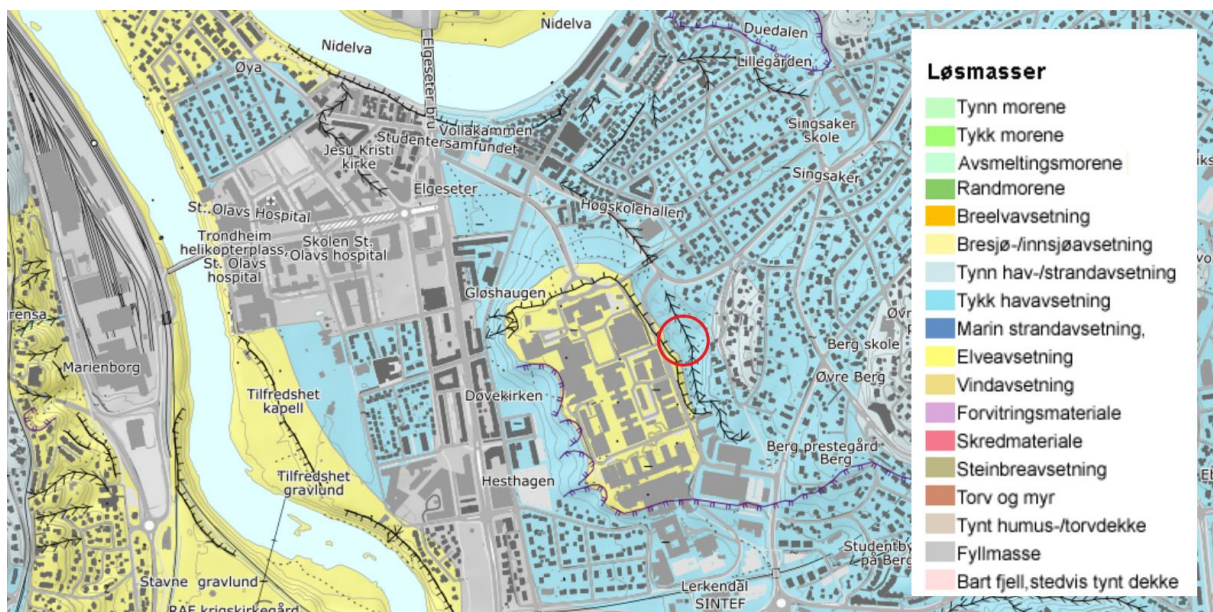
Figur 3.1 Oversiktskart over prosjektområdet (Google, 2020)

Figur 3.2 viser løsmasser under marine grensen i Trondheim. Lys blå beskriver arealer der den gamle jevne havbunnen er bevart mens den mørke blåtonen representerer arealer preget av elveerosjon og skred.



Figur 3.2 Hovedgruppering av løsmasser i Trondheim (Reite, et al., 1999)

Figur 3.3 viser kvartærgeologisk løsmassekart fra Norges Geologiske Undersøkelse (NGU). Figuren viser at forsøksområdet ligger i et område tidligere dominert av mektige hav og fjordavsetninger. På toppen av Gløshaugen er det et platå av elveavsetninger primært bestående av siltig sand eller sandig silt



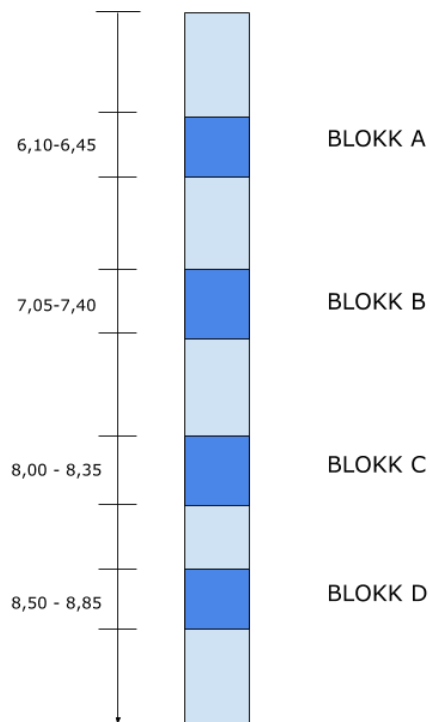
Figur 3.3 Kvartærgeologisk løsmassekart over prosjektområdet. Området der blokkprøvene er hentet fra er markert i rødt. (NGU, 2019)

Et topografisk løsmassekart med er presentert i Tegning 2 og en detaljert borplan er presentert i Tegning 3 i Tegninger og vedlegg og et utsnitt er vist i Figur 3.4.



Figur 3.4 Utsnitt fra Tegning 3 Detaljert borplan

BLOKK er navnet på borpunkt vist i Figur 3.4 og fra dette borpunkt er samtlige blokker hentet. BLOKK A-D er navngivning av blokkene med nummerering innad i hver parallell (BLOKK B1, BLOKK B2 etc).



Figur 3.5 Dybdeprofil som viser navngivning av hver blokk (også kalt parallell) i BP BLOKK

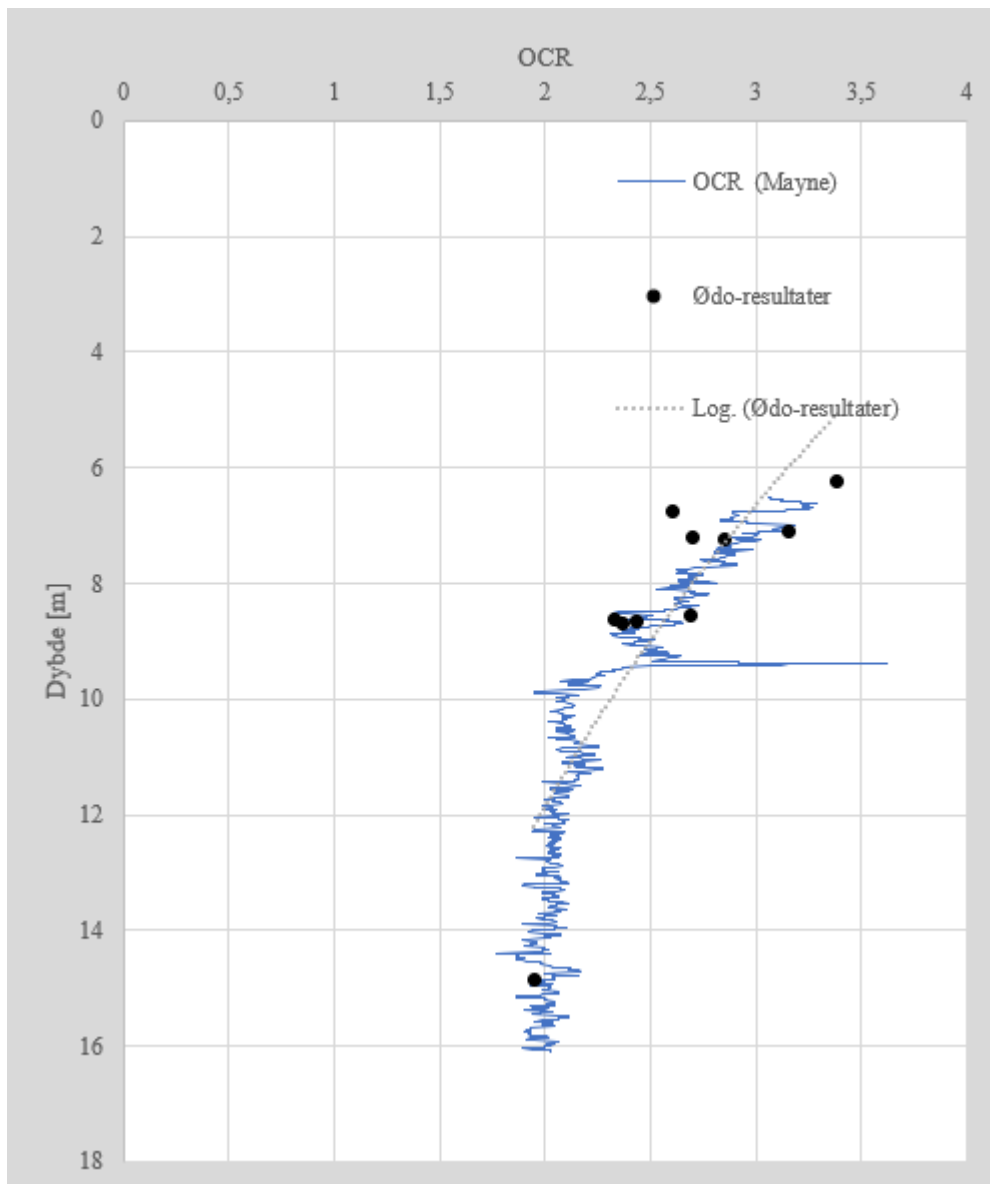
Fra et geoteknisk ståsted er hovedutfordringen med på lokasjonen usikker skråningsstabilitet på nordøstsiden av Campus. En tydelig terrassekant markerer overgangen fra Campus Gløshaugen til ravineområdet Høgskoledalen. Studier av historiske kart har vist at det tidligere har gått en elv gjennom ravinen. «Dødens dal» er i dag et idrettsanlegg primært brukt til fotball og sandvolleyball.

3.2 Poretrykkssituasjon i Høgskoledalen

To piezometere på dybde 5 m og 10 m ble installert i høgskoledalen for å overvåke poretrykkssituasjonen i umiddelbar nærhet av der prøvene ble hentet fra. For å beregne effektivspenninger in situ og dermed vite hva slags spenningsnivå prøven skal konsolideres til, ble poretrykkssituasjonen analysert. Poretrykkssituasjonen i bunnen av Høgskoledalen var, ifølge målinger gjort mellom 09. og 11. september 2019, underhydrostatisk med en hydraulisk koeffisient, $i = -0,14$. Det betyr at man kan forvente at vannet i jorda beveger seg nedover og at det er høyere effektivspenning.

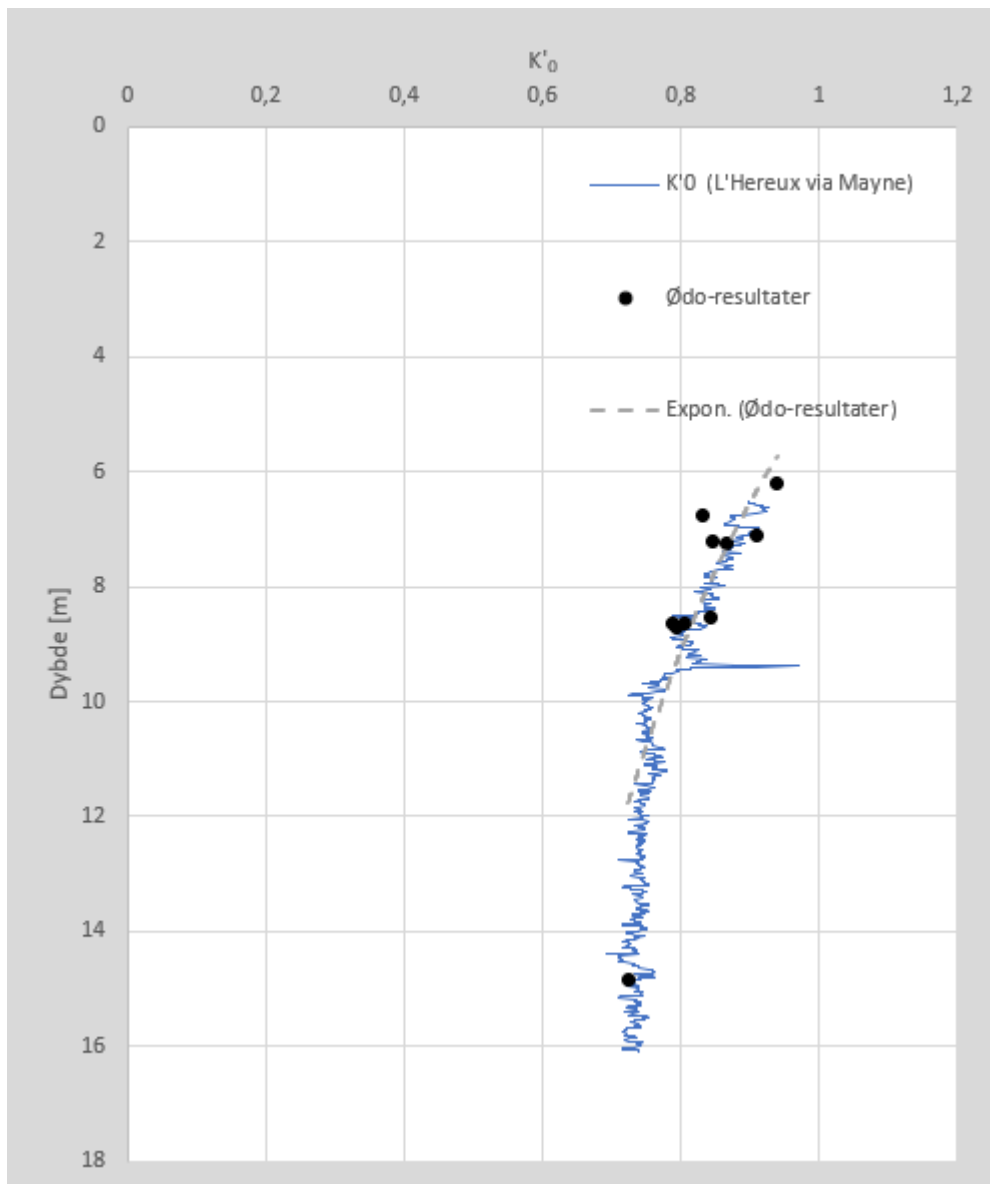
3.3 Hviletrykk i Høgskoledalen

Figur 3.7 viser Hviletrykkskoeffisienten som funksjon av dybden basert på Formel 2.5 og resultater fra ødometertester i Høgskoledalen utført høsten 2019 (Eget, 2019). For å etablere tilsvarende kurve for CPTU har Formel 2.6 blitt korrelert opp mot ødometerresultatene for overkonsolideringsratio, OCR, ved å justere pre-konsolideringsfaktoren, k , for de ulike lagene i jordprofilen.



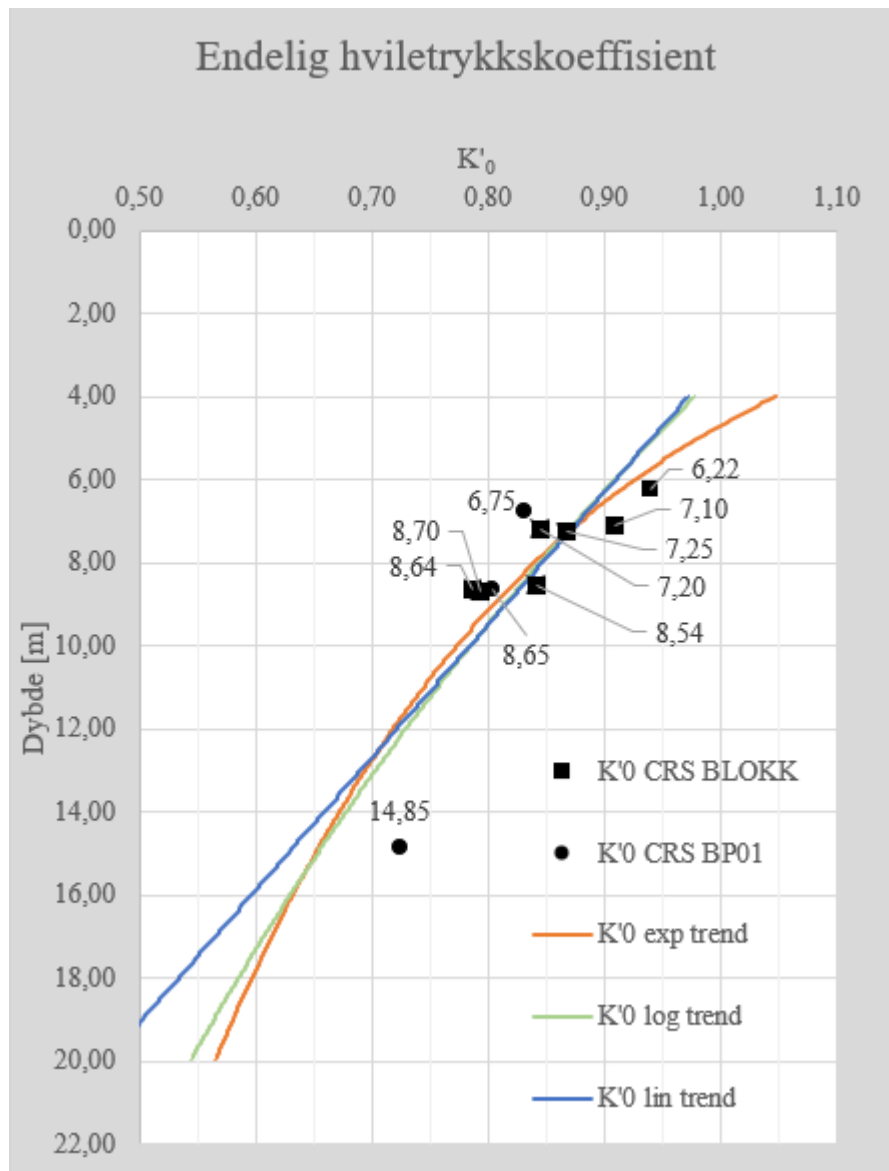
Figur 3.6 OCR korrelert ved hjelp av Mayne sin formel fra ødometerresultater

Figur 3.7 viser hvordan OCR-resultater kan oversettes til K'_o . Her har Formel 2.5 blitt brukt.



Figur 3.7 K'_0 basert på korrelert CPTU og OCR fra ødometertester ved bruk av Formel 2.6 (Eget, 2019)

En fullstendig oversikt over testresultater med ødometer fra blokk gjorde det mulig å etablere en mer raffinert hvilekoeffisientkurve som vist i Figur 3.8.



Figur 3.8 K'_0 som funksjon av dybde inkludert blokkprøver. Testene gjort på blokkprøver er markert med kvadratiske punkter

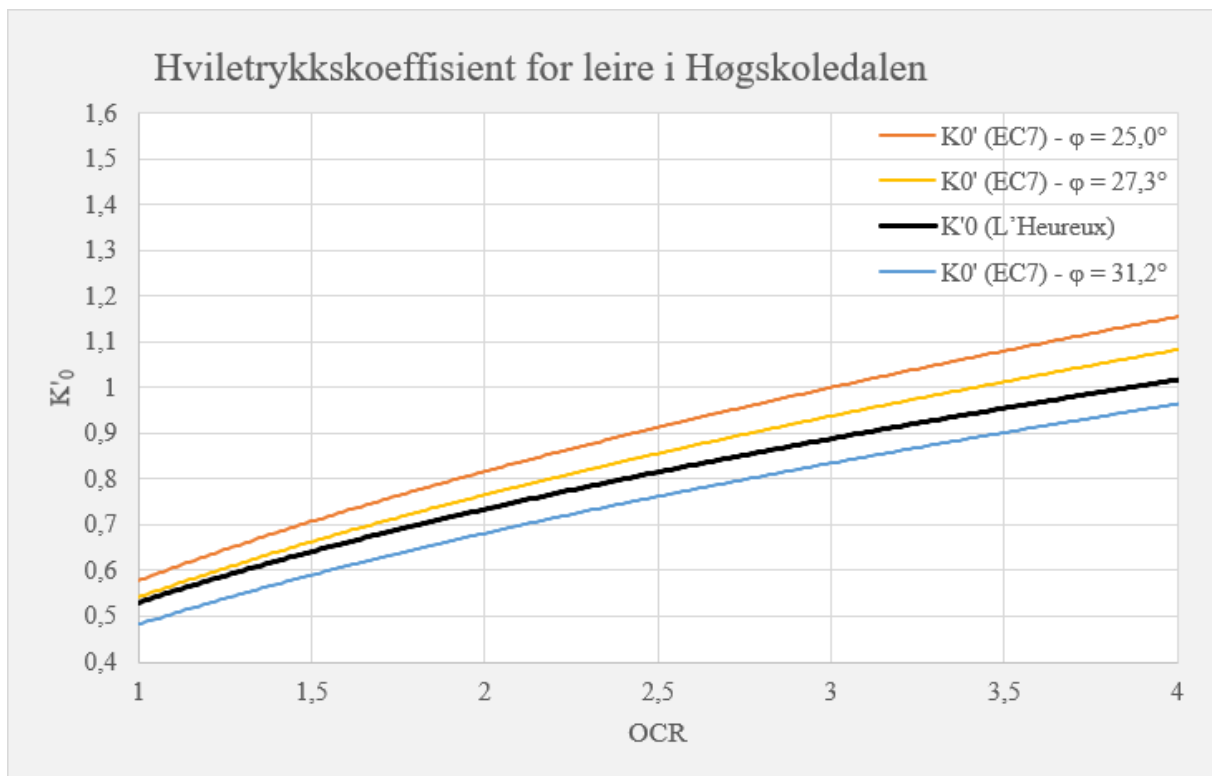
Forfatter brukte logaritmisk trendlinje for OCR vist i Figur 3.6 og Formel 2.5 som basis for å estimere hviletrykkskoeffisient, før ødometerresultatene fra blokkene ved forskjellige dybder var klare. Dette estimatet ble så sammenlignet med resultatene der ødometerresultatene var inkludert.

Tabell 3.1 Oversikt over spenninger, overkonsolideringsratio og hviletrykkskoeffisient

| Borpunkt ID | dybde | σ_y | u | σ'_y | p'_c (tolket) | OCR | K'_0 (beregnet) |
|-------------|-------|------------|-------|-------------|-----------------|------|-------------------|
| [-] | [m] | [kPa] | [kPa] | [kPa] | [kPa] | [-] | [-] |
| BLOKK | 6,22 | 114,6 | 46,7 | 67,9 | 230 | 3,38 | 0,94 |
| BP01 | 6,75 | 124,1 | 51,2 | 72,8 | 190 | 2,61 | 0,83 |
| BLOKK | 7,10 | 130,3 | 54,3 | 76,0 | 240 | 3,16 | 0,91 |

| | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-----|------|------|
| BLOKK | 7,20 | 132,1 | 55,1 | 77,0 | 208 | 2,70 | 0,85 |
| BLOKK | 7,25 | 133,0 | 55,5 | 77,4 | 221 | 2,85 | 0,87 |
| BLOKK | 8,54 | 156,0 | 66,7 | 89,3 | 240 | 2,69 | 0,84 |
| BLOKK | 8,64 | 157,7 | 67,5 | 90,2 | 210 | 2,33 | 0,79 |
| BP01 | 8,65 | 158,0 | 67,7 | 90,3 | 220 | 2,44 | 0,80 |
| BLOKK | 8,70 | 158,8 | 68,1 | 90,7 | 215 | 2,37 | 0,79 |
| BP01 | 14,85 | 268,5 | 121,2 | 147,3 | 287 | 1,95 | 0,72 |

Tidligere treaksiale tester gjort i undervisningssammenheng i faget Felt- og laboratorieundersøkelser antydnet at friksjonsvinkelen på leira i Dødens dal er om lag 28,5°. Blokkprøvene viser at φ ligger mellom 25,0 og 31,2°. Figur 3.9 viser sammenhengen mellom bruk av Formel 2.1 og Formel 2.3 for valget av hviletrykkskoeffisient. Den «gule» kurven er basert på overslagsformel i Eurokode 7 mens den «sorte» er etablert uavhengig av friksjonsvinkel, men viser likevel rimelig godt samsvar.

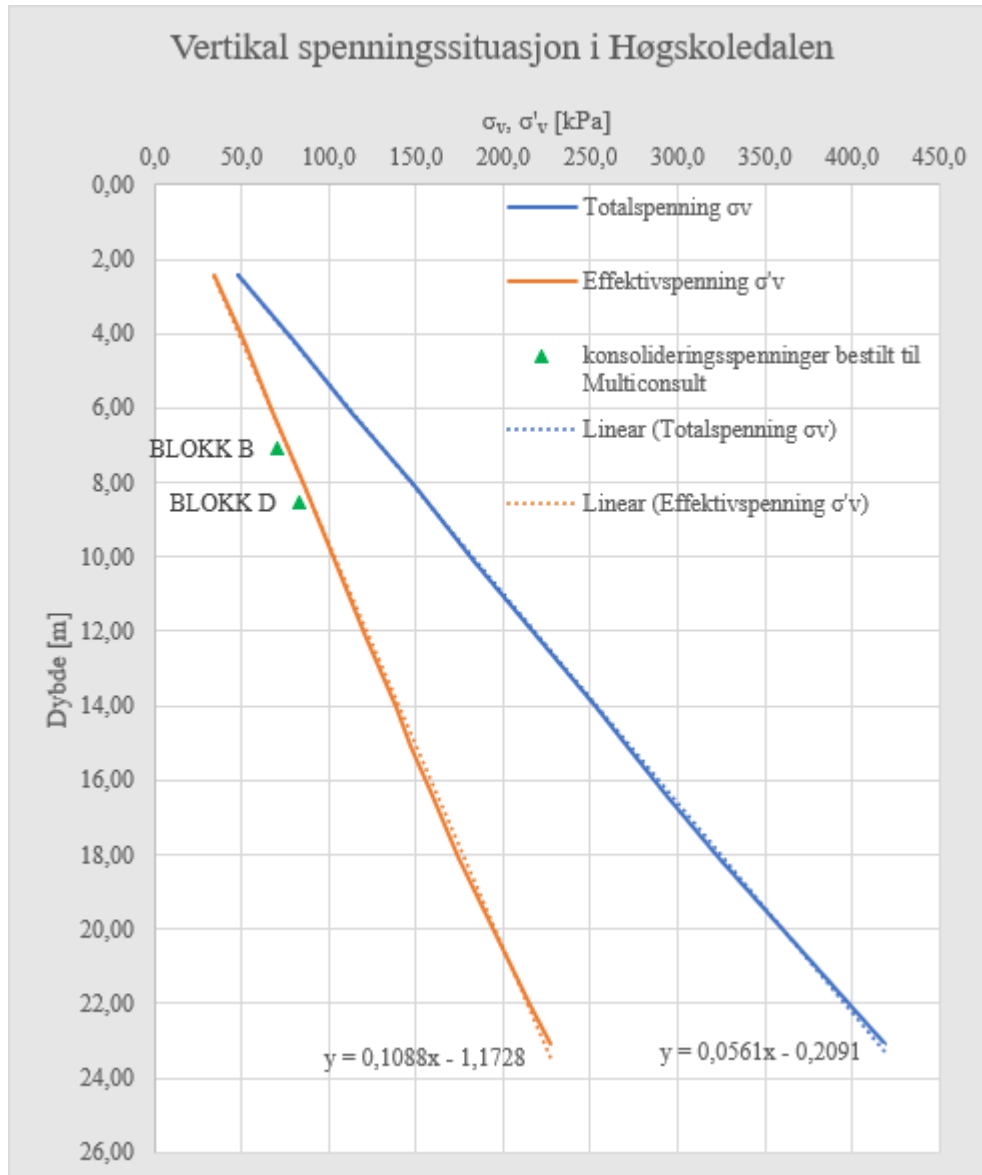


Figur 3.9 Grunnlag i valg av hviletrykkskoeffisient for de anisotrope testene

Som en kan se av Figur 3.9 er det godt samsvar mellom Formel 2.5 og Formel 2.1 for leiren i Høgskoledalen (DD).

3.4 Spenningstilstand i Høgskoledalen

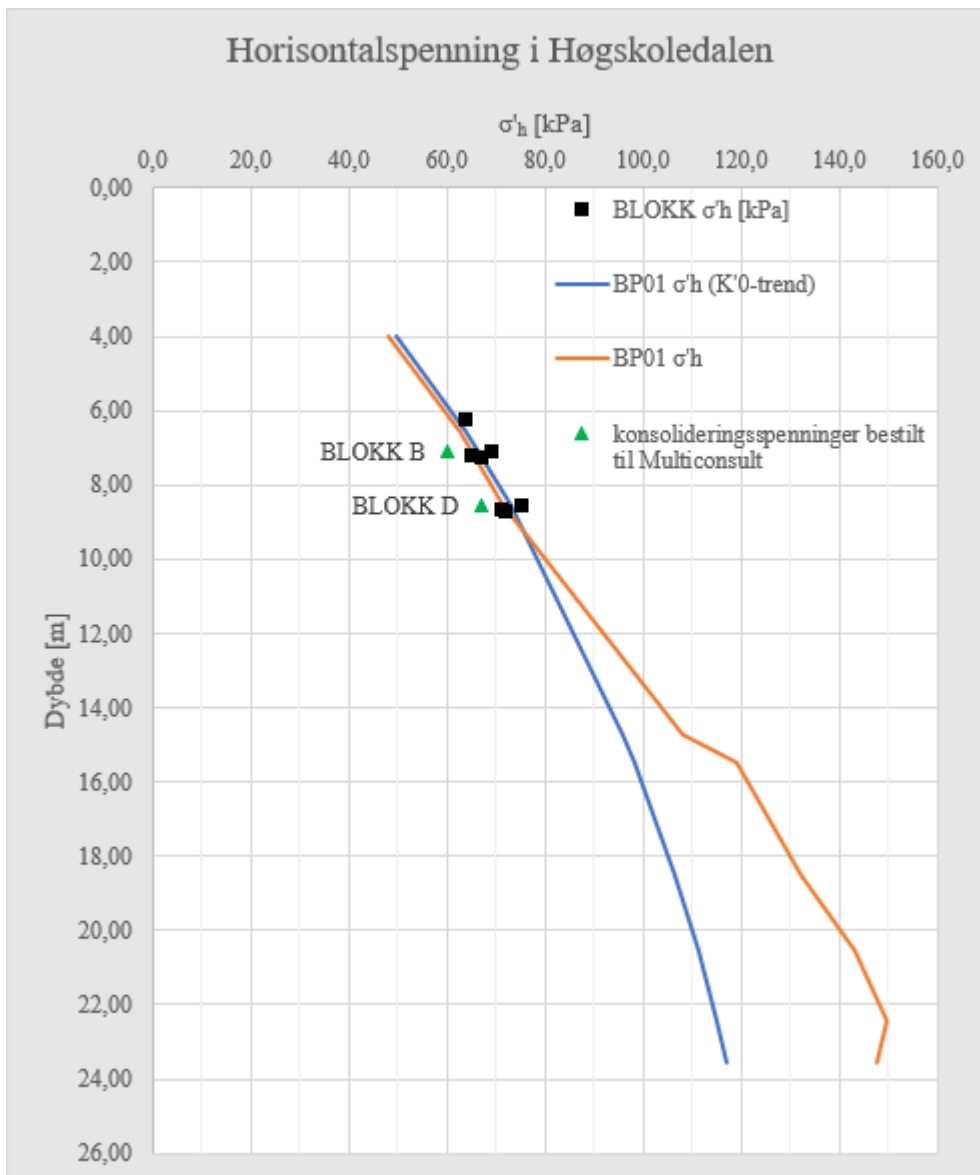
Figur 3.10 viser vertikal spenningstilstand fra jordtestene Høgskoledalen basert på indekstesting (densitet) og poretrykkssituasjonen mellom 5 og 10m. Underhydrostatisk poretrykkssituasjonen er antatt gjennom hele profilet.



Figur 3.10 Vertikal Spenningstilstand i bunn av skråning i Dødens Dal

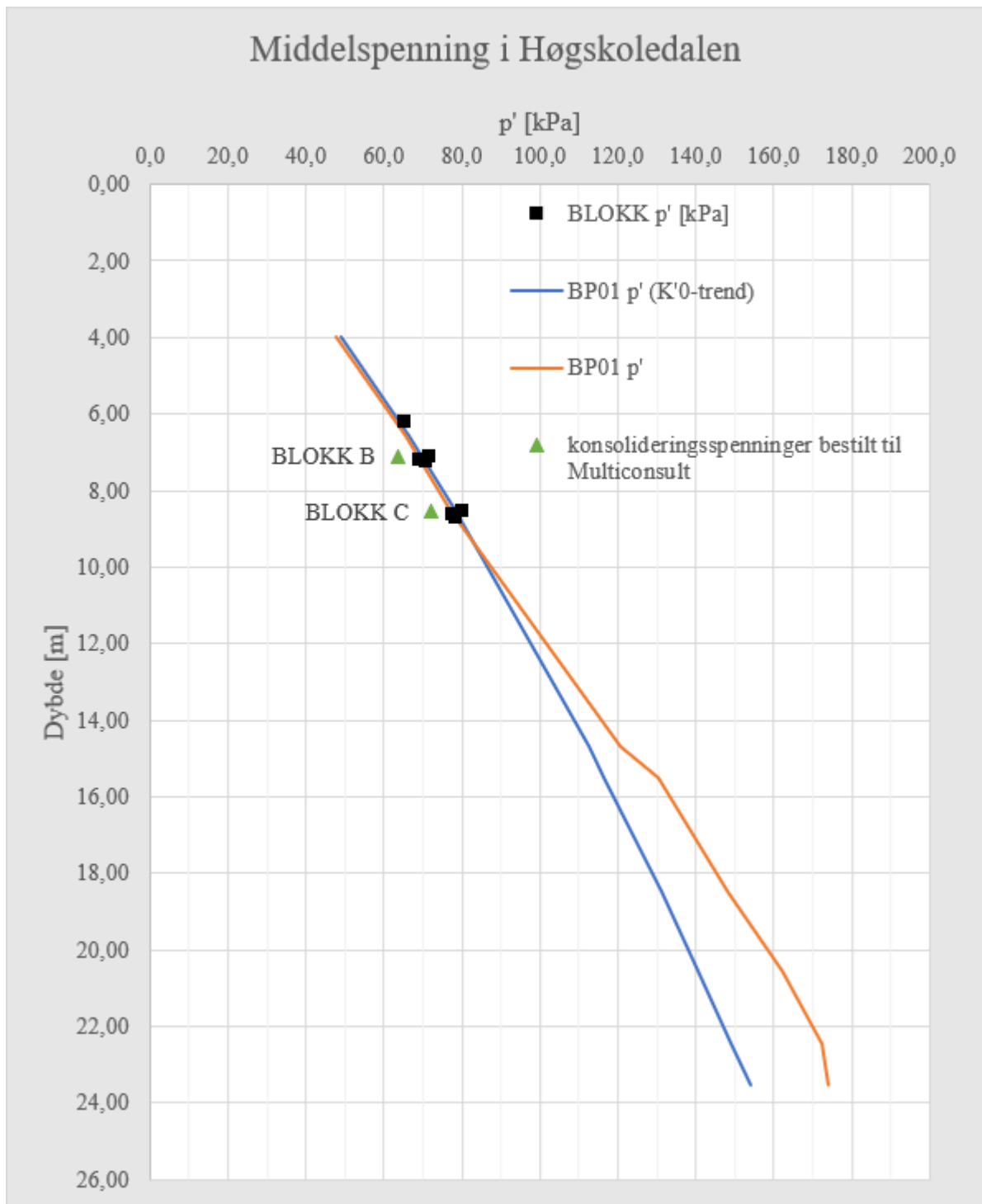
Blokk B og D i bestillingen av laboratorieforsøk hos Multiconsult ble, som vist Figur 3.10, noe underestimert. Vertikalspenningen ble beregnet med grunnvannstand, $GVS = 1m$ og tyngdetetthet, $\gamma = 18,5 \frac{kN}{m^3}$.

En lineær regresjon av effektivspenningen ble brukt som utgangspunkt i CPTU for å estimere for eksempel normalisert spissmotstand, Q_t .



Figur 3.11 Horisontal spenningssituasjon i Høgskoledalen

Horisontalspenning, navngitt «BP01 σ'_h (K'_0 -trend)», i Figur 3.11 er beregnet ved hjelp av eksponentiell trendlinje for K'_0 fra Figur 3.8 og lineær trendlinje for σ'_v fra Figur 3.9 ved bruk av Formel 1.1.



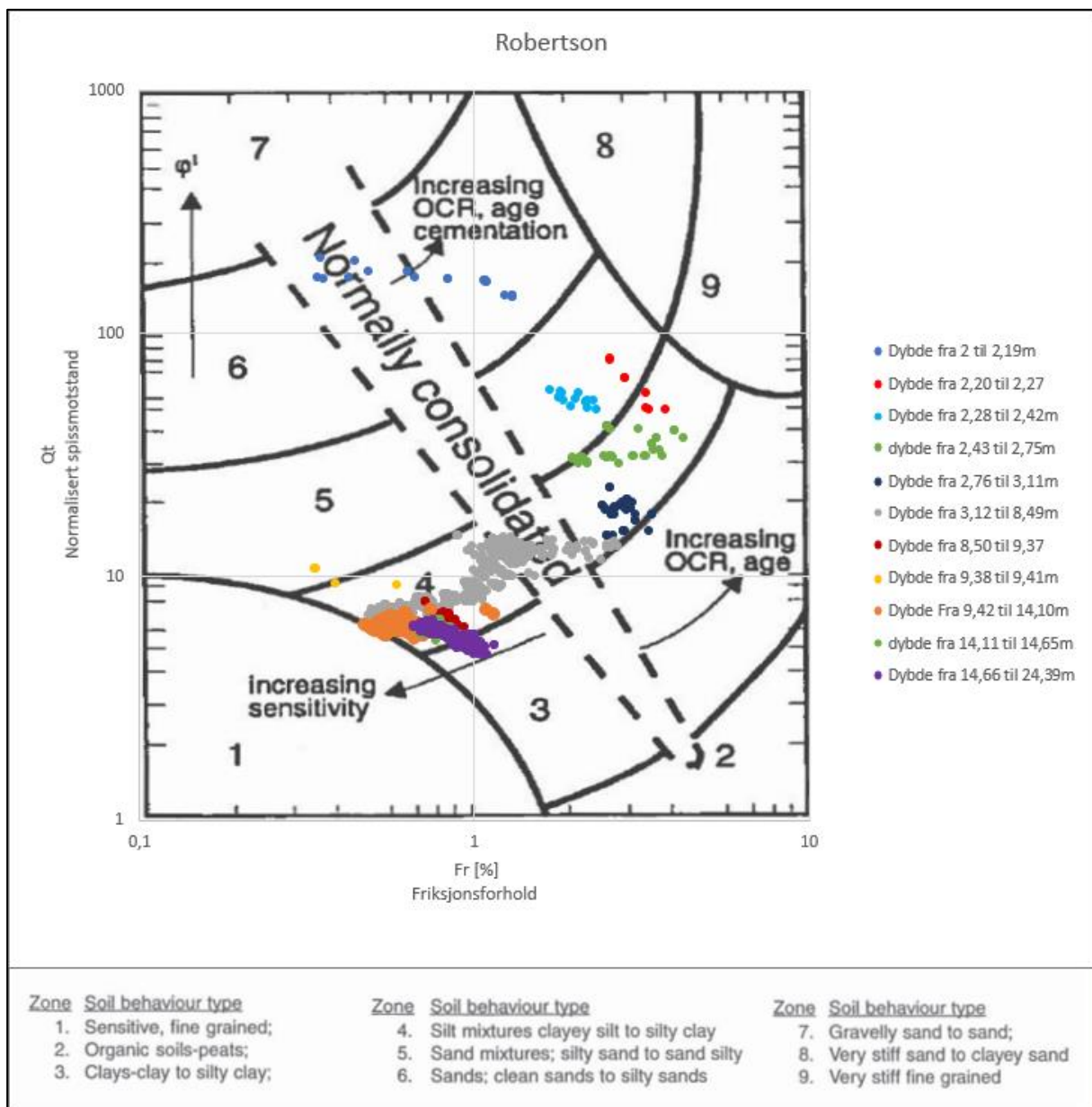
Figur 3.12 Middelspenning i Høgskoledalen

Middelspenningen, p' , blir beregnet fra formelen angitt i Tabell 2.5. Som en kan lese av Figur 3.12 har forfatter truffet litt under antatt reell middelspenning for blokkene som ble undersøkt av Multiconsult. Dette gjelder BLOKK B og BLOKK D. I delkapittel 5.3 vil forfatter betrakte hvilken innflytelse denne noe lavere middelspenningen har på resulterende styrkeparametere fra skjærfasen.

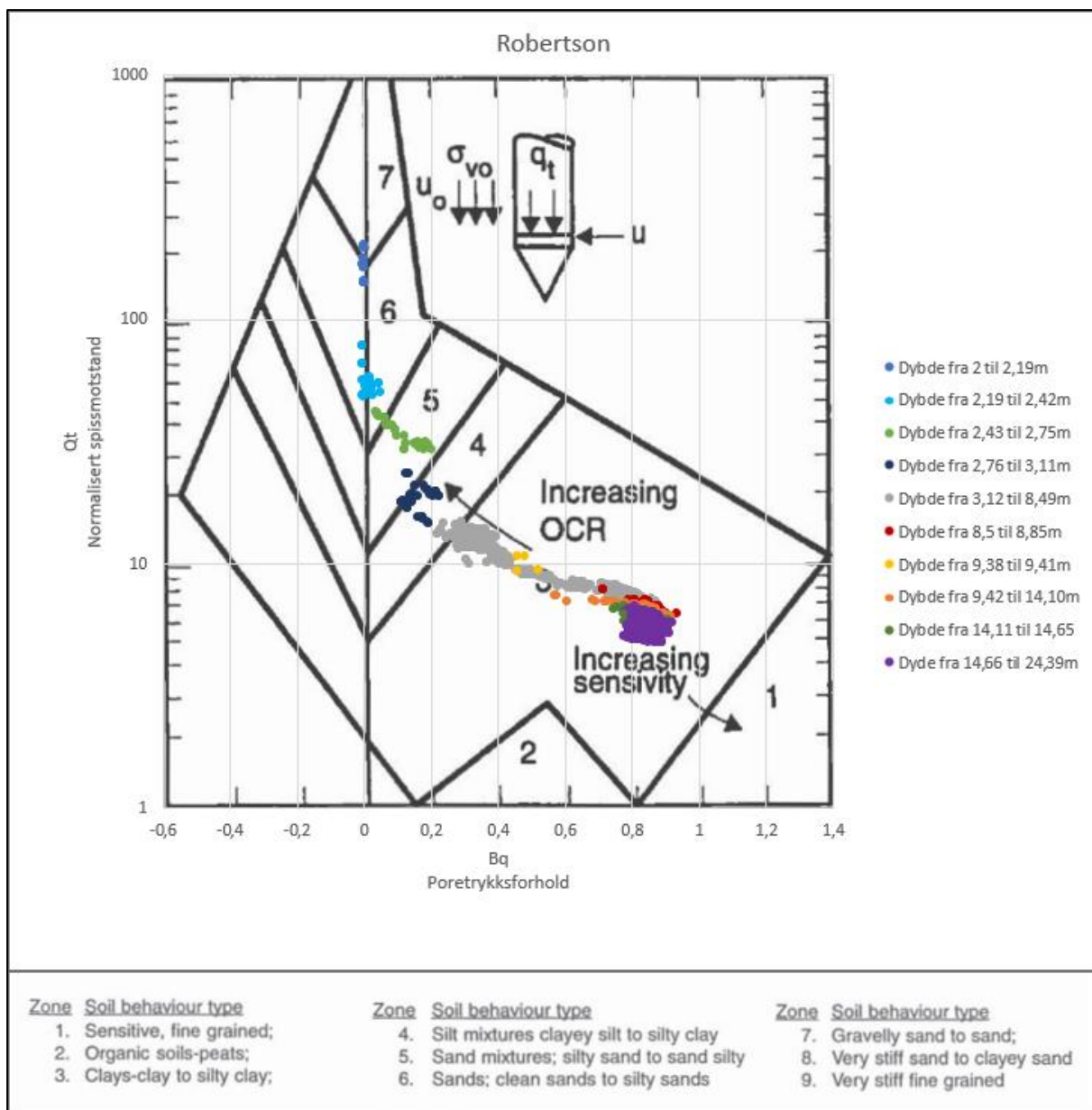
3.5 Trykksondering

I Tegninger og vedlegg vises sonderinger og poretryksmålinger gjort høsten 2019 i forbindelse med Felt- og Laboratorieundersøkelser (emne på NTNU). Robertson-diagrammer ble utviklet av P. K Robertson først kun basert på spissmotstand, $q_{c,r}$, og friksjonsforhold, F_r og ble senere utviklet for bruk med normaliserte parametere. Robertson utviklet verktøyet for enkelt å evaluere jordtype og stratigrafi (Robertson, u.d.). Den moderniserte versjonen basert på normaliserte parametere har vært brukt i denne oppgaven.

CPTU fra BP02 ble analysert ved hjelp av Robertson-diagram som vist i Figur 3.13 og Figur 3.14.



Figur 3.13 Robertson friksjonsforhold vs normalisert spissmotstand fra CPTU i BP02



Figur 3.14 Robertson poretrykksforhold vs normalisert spissmotstand fra CPTU i BP02

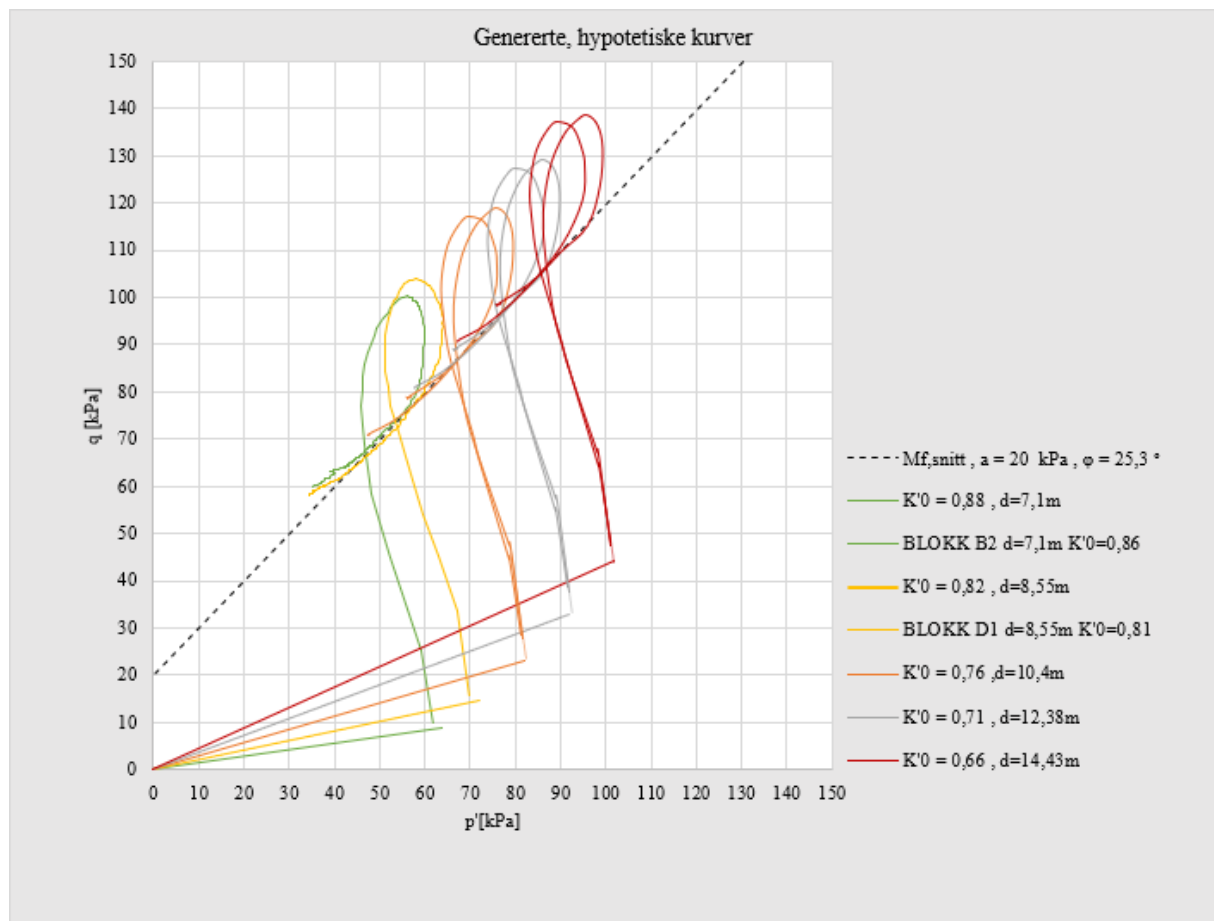
Tabell 3.2 Laginndeling basert på Robertsondiagrammer

| Lag | Fra dybde [m] | Til dybde [m] | Jordtype Bq | Jordtype Fr | Jordtype vurdering |
|-----|---------------|---------------|-------------|-------------|----------------------------|
| 1 | 2,00 | 2,19 | 6 | 6 | Sand |
| 2 | 2,20 | 2,27 | 6 | 5 | Siltig sand |
| 3 | 2,28 | 2,42 | 6 | 4-5 | Sandig silt |
| 4 | 2,43 | 2,75 | 5 | 4 | silt/sandig silt |
| 5 | 2,76 | 3,11 | 4 | 3-4 | leirig silt |
| 6 | 3,12 | 8,49 | 3 | 4 | leire |
| 7 | 8,50 | 8,85 | 3 | 4 | kvikkleire |
| 7 | 9,38 | 9,41 | 3 | 4-5 | sandig silt drenerende lag |
| 8 | 9,42 | 14,1 | 3 | 1 + 4 | sensitiv leire |
| 9 | 14,11 | 14,65 | 3 | 4 | leire |

Generelt ble leiren vurdert som meget sensitiv fra 3,12m og dypere. Den ble påvist kvikk 8,5 – 8,55m ved hjelp av konusforsøk fra BLOKK, og flere andre resultater tilsier at leiren kan være kvikk flere steder i tillegg, uten at det har blitt påvist. BP02 har beliggenhet med kote ca 1m over BP01 og BLOKK. En kan finne igjen det drenerende laget i BLOKK C med dybde mellom 8,0 og 8,35.

3.6 Skjærprofil basert på tidligere grunnundersøkelser og hypotetisk skjærstyrke

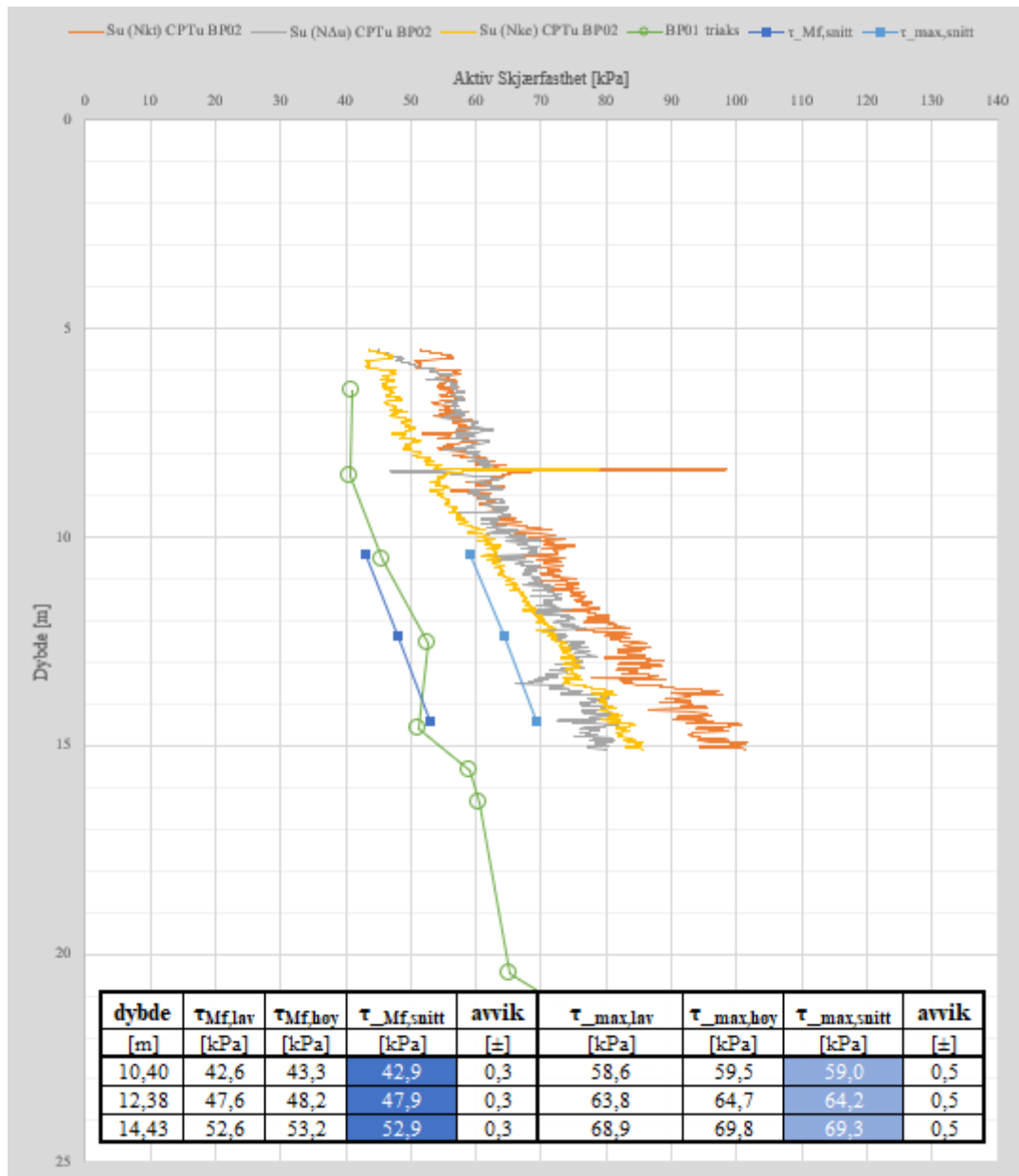
Forfatter ønsket å vite omtrent hvordan et skjærprofil fra BP01 ville sett ut dersom strukturen i det overkonsoliderte området var bevart. Figur 3.15 viser hypotetiske treaksiale tester der spenningsstien fra BLOKK B2 og BLOKK D1, som begge hadde $K_{0, reell}$, har blitt etterlignet for forskjellige dybder. Hviletrykkskoeffisienten er ment å være realistisk, det samme gjelder middelspenningen, p' . M_f ble basert på gjennomsnittlig friksjonsvinkel for BLOKK A, BLOKK B og BLOKK D. Dybdene ble valgt ut ifra hvor det eksisterer tidligere undersøkelser i BP01 slik at en har mulighet til å sammenlikne resultatene.



Figur 3.15 Hypotese der K'_0 og σ'_{vc} skal være realistiske for tidligere tester i BP01

Følgende skjærstyrke ble skissert på bakgrunn av disse scenarioene. For hver av dybdene ($d = 10,4\text{m}$, $d = 12,38\text{m}$ og $d = 14,43\text{m}$) i Figur 3.15 er p' og K'_0 ment å være realistiske. Spenningsstien fra BLOKK B2 og BLOKK D1 er tracet og plassert ved

beregnete konsolideringsspenninger, slik at de treffer M_f , der spenningsstien treffer «seg selv». T_{mf} og T_{max} ble deretter avlest for kurvene og plassert i kategoriene $T_{mf, lav/høy}$ og $T_{max, lav/høy}$ for å beregne et snitt, som er formidlet i Figur 3.16.

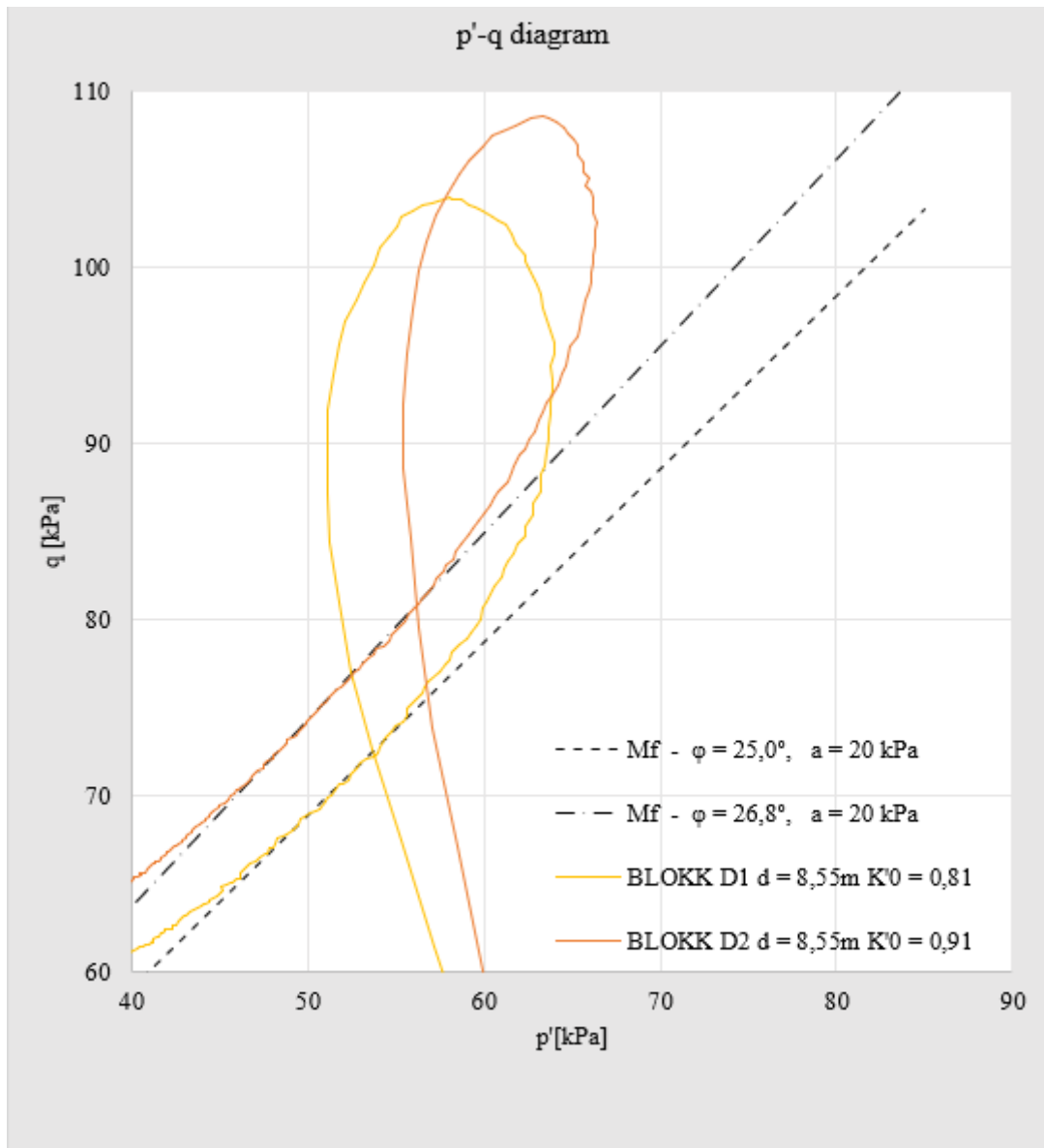


Figur 3.16 Skjærstyrkeprofil med idealiserte, sannsynlige spenningsstier ekstrapolert fra originale treaksialforsøk

Figur 3.16 viser skjærstyrkeprofil fra planområdet med treaksiale tester tatt på 54mm fra BP01, CPTU fra BP02. Hypotesen fra Figur 3.15 har også blitt inkludert i skjærstyrkeprofilen. $T_{mf, snitt}$ og $T_{max, snitt}$ er hypotetiske skjærfastheter der konsolideringsspenningene har blitt vurdert for utvalgte dybder fra BP01 etter omfattende studier av K'_0 for planområdet. $T_{mf, snitt}$ og $T_{max, snitt}$ ble avlest som maksimum og minimumsverdier fra Figur 3.15 og senere omgjort til middelverdier. M_f er Mohr Coulomb-linja og τ_{Mf} er skjærspenningen når spenningsstien krysser M_f . Det ser ut til at disse idealiserte verdiene for T_{max} samsvarer noenlunde med N_{kt} , $N_{\Delta u}$ og N_{ke} fra BP02, dog med lavere verdier.

3.7 Undersøkelser

Det ble utført 5 parallelltester ved bruk av GDSTAS, apparatur brukt til automatisert treaksialtesting. I to av parallellene ble én av prøvene konsolidert med antatt reell K'_0 ($K'_{0, reell}$) og én av prøvene ble konsolidert anisotropt med $K'_0 = K'_{0, reell} \pm 0,1$. Den siste av prøvene fra hver parallell ble kjørt passivt med $K'_{0, reell}$. $K'_{0, reell}$ ble kvalitetssikret ved å kjøre 1 til 3 ødometertester på samme blokk for å fastslå OCR. I denne studien ble friksjonsvinkel og attraksjon tolket fra p' - q -plott slik at M_f skjærer gjennom der spenningsstien møter seg selv som anvist på Figur 3.17.



Figur 3.17 Eksempel på avlesning av friksjonsvinkel

4 Resultater

4.1 Indekstesting og ødometer

Tabell 4.1 Oversikt over resultater fra indekstesting

| Borpunkt ID | d | W_{snitt} | W_p | W_L | γ | γ_s | S_{u,uomr} | S_{u,omr} | S_t |
|--------------------|-------------|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------|
| [-] | [m] | [%] | [%] | [%] | [kN/m ³] | [kN/m ³] | [kPa] | [kPa] | [-] |
| BP01 | 4,00-4,80 | 37,8 | 28,90 | 42,50 | 1,81 | 2,73 | 46,8 | 1,2 | 40,3 |
| BP01 | 6,00-6,80 | 52,5 | 25,63 | - | 1,87 | 2,81 | 25,0 | 0,4 | 64,1 |
| BLOKK A | 6,10-6,45 | - | - | - | - | - | 52,5 | 0,8 | 67,3 |
| BLOKK B | 7,05-7,40 | 51,7 | 25,86 | 40,34 | 1,79 | 2,79 | 21,5 | 0,2 | 134,4 |
| BP01 | 8,00-8,80 | 52,5 | 29,47 | 54,60 | 1,94 | 3,10 | 51,8 | 0,9 | 56,1 |
| BLOKK D | 8,50-8,85 | 45,6 | 24,83 | 37,76 | 1,79 | 2,74 | 31,8 | 0,4 | 85,9 |
| BP01 | 10,00-10,80 | 32,9 | - | 46,00 | 1,93 | 3,01 | 56,4 | 1,7 | 32,4 |
| BP01 | 12,00-12,80 | 47,0 | 22,05 | 45,50 | 1,78 | 2,95 | 68,1 | 3,2 | 21,3 |
| BP01 | 14,00-14,80 | 43,3 | 24,26 | 43,28 | 1,81 | 2,93 | 59,0 | 3,5 | 16,7 |

4.1.1 Romvekt og mineraldensitet

Tabell 4.2 Romvekt Blokkprøver og BP01

| Borpunkt ID | Dybde | γ |
|--------------------|--------------|----------------------|
| [-] | [m] | [kN/m ³] |
| BP01 | 2,40 | 19,8 |
| BP01 | 4,21 | 18,3 |

| | | |
|-----------|-------|------|
| BP01 | 6,07 | 17,3 |
| BLOKK (B) | 7,21 | 17,6 |
| BP01 | 8,10 | 17,7 |
| BLOKK (D) | 8,70 | 17,6 |
| BP01 | 10,07 | 17,4 |
| BP01 | 12,06 | 17,5 |
| BP01 | 14,07 | 17,8 |
| BP01 | 15,06 | 17,2 |
| BP01 | 16,40 | 17,8 |
| BP01 | 18,07 | 17,7 |
| BP01 | 20,09 | 18,9 |
| BP01 | 22,07 | 19,0 |
| BP01 | 23,10 | 19,1 |

Tabell 4.3 Mineraldensitet blokk-prøver og BP01

| Borpunkt ID | Dybde | ρ_s |
|--------------------|--------------|----------------------------|
| [-] | [m] | [g/cm ³] |
| BP01 | 2,50 | 2,69 |
| BP01 | 4,68 | 2,73 |
| BP01 | 6,60 | 2,81 |
| BLOKK (B) | 7,21 | 2,79 |
| BP01 | 8,60 | 3,10 |
| BLOKK (D) | 8,70 | 2,74 |
| BP01 | 10,57 | 3,01 |
| BP01 | 12,58 | 2,95 |
| BP01 | 14,58 | 2,93 |
| BP01 | 16,59 | 3,00 |
| BP01 | 18,57 | 3,06 |
| BP01 | 20,57 | 2,95 |
| BP01 | 22,55 | 2,81 |
| BP01 | 23,59 | 2,69 |

4.1.2 Naturlig vanninnhold

Måling av naturlig vanninnhold for Blokk A og D utgikk grunnet manglende tilgang til fasiliteter knyttet Corona-situasjonen.

Tabell 4.4 Naturlig vanninnhold blokkprøver fra BP BLOKK

| Blokk ID | d | w |
|----------|------|-------|
| [-] | [m] | [%] |
| BLOKK B | 7,10 | 46,97 |
| | 7,22 | 54,00 |
| | 7,26 | 52,97 |
| BLOKK D | 8,54 | 43,71 |
| | 8,71 | 44,57 |
| | 8,66 | 47,49 |

4.1.3 Plastisitetstegrensener

Måling av plastisitetstegrensener for Blokk A og D utgikk grunnet manglende tilgang til fasiliteter knyttet Corona-situasjonen.

Tabell 4.5 Plastisitetstegrensener

| BLOKK ID | d | w_{snitt} | w_p | w_L | I_p | I_L |
|----------|------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| [-] | [m] | [snitt %] | [%] | [%] | [%] | [%] |
| BLOKK B | 7,21 | 51,7 | 25,86 | 40,34 | 14,48 | 1,78 |
| BLOKK D | 8,7 | 45,6 | 24,83 | 37,76 | 12,93 | 1,61 |

For både BLOKK B og BLOKK C var det naturlige vanninnholdet høyere enn flytegrensen. Vegdirektoratet anbefaler i slike tilfeller å sette $w = w_L$ for beregning av I_L .

(Vegdirektoratet, 2010). Da vil flyteindeksen kunstig holdes mellom 0 og 1 hvilket kan være praktisk i beregning av for eksempel poretrykkutvikling ved påføring av vertikallast. Samtidig er en flyteindeks over 1 en indikasjon på kvikkleire noe som er høyst relevant i dette tilfellet (Emdal, 1999).

4.1.4 Konusforsøk

Det er standard å anvende 10cm høye prøvestykker, men forfatter hadde kun 5cm til rådighet.

Tabell 4.6 Resultater fra konusforsøk

| Blokk ID | d | $S_{u,uomr}$ | $S_{u,omr}$ | S_t |
|----------|-----|--------------|-------------|-------|
| [-] | [m] | [kPa] | [kPa] | [-] |

| | | | | |
|---------|------|-------|------|-------|
| BLOKK A | 6,35 | 52,50 | 0,78 | 67,3 |
| | 6,40 | 44,10 | 1,10 | 40,1 |
| BLOKK B | 7,15 | 21,25 | 0,16 | 130,0 |
| | 7,31 | 21,82 | 0,16 | 137,0 |
| BLOKK D | 8,60 | 37,55 | 0,36 | 104,0 |
| | 8,77 | 26,13 | 0,38 | 67,0 |

Tabell 4.6 tilsier at BLOKK A og C hadde en middels stiv jordtype med middels skjærstyrke og høy sensitivitet ifølge klassifiseringssystemet beskrevet i avsnitt 2.3.4. Tilsvarende sensitivitet kan betegnes for BLOKK B, som er karakterisert med en myk jordtype med lav skjærstyrke.

Tabell 4.7 Klassifisering av jordtype basert på skjærstyrke

| Klassifisering | | |
|----------------|-------------|------------|
| Jordtype | Skjærstyrke | S_u |
| veldig myk | Veldig lav | <12,5 |
| myk | lav | 12,5-25 |
| middels stiv | middels høy | 25,0-50,0 |
| stiv | høy | 50,0-100,0 |
| veldig stiv | veldig høy | >100,0 |

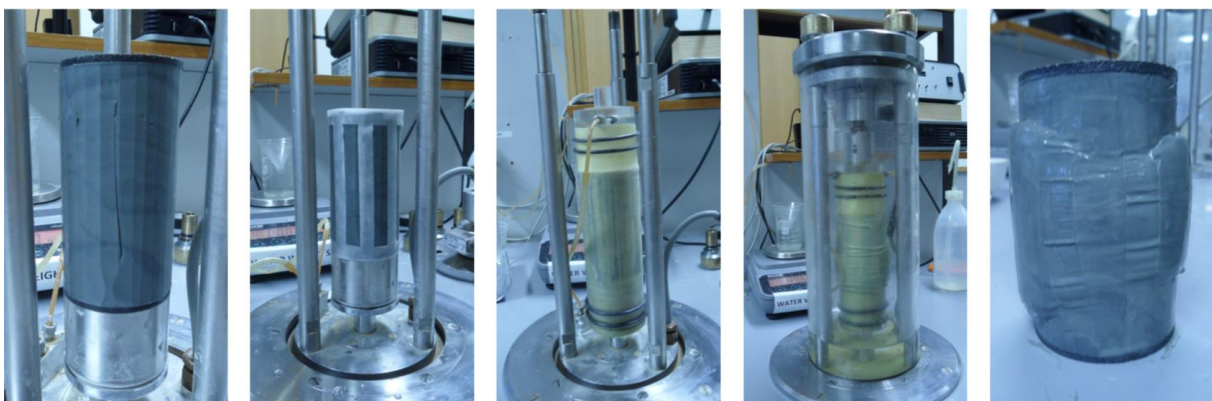
4.1.5 Ødometertester

Ødometertester ble utført i Multiconsults laboratorium i Trondheim. En full beskrivelse av disse testene er inkludert i vedlegg 4: Teknisk Laboratorierapport fra Multiconsult

4.2 Treksialforsøk

4.2.1 Utskjæring og innbygging

Utskjæringen ble utført i henhold til delkapittel 2.4.2.1 og innbygging ble gjort med mettede filtre og fuktete filterpapir.



Figur 4.1 Fra venstre: leirprøve med porøse filter i topp og bunn installert på en «pidestall», med fuktet filterpapir for raskere konsolidering, med gummimembran og gummiringer, ferdig innstallert i treakscellen og eksempel på prøve etter test (Kornbrekke, 2012).

4.2.2 Metning

Metning av prøvene ble gjort med et celletrykk på mellom 5-10 kPa.

4.2.3 Konsolidering

Første del av konsolideringen ble utført isotropisk inntil horisontal konsolideringsspenning, σ'_{hc} , ble oppnådd. Deretter ble deviatorspenningen, q , økt inntil vertikal konsolideringsspenning, σ'_{vc} , ble nådd. Dette ble utført etter SVV's anbefalinger (SVV, 2016, p. 223)

4.2.4 B-test

Det ble satt på 500 kPa baktrykk i metningsfasen for baktrykkssystemet, etter endt konsolidering. Under forsøkene utført på geoteknikklaboratoriet på der B-testen viste for lav B-verdi ble baktrykket økt med 100kPa av gangen helt til grensen på 0,95 (B-verdi) var oppnådd. I tilfeller der dette ikke var mulig, ble det dokumentert at B-verdien ikke kunne økes ytterligere selv etter gjentagelse av prosedyren.

4.2.5 Hvilesteg

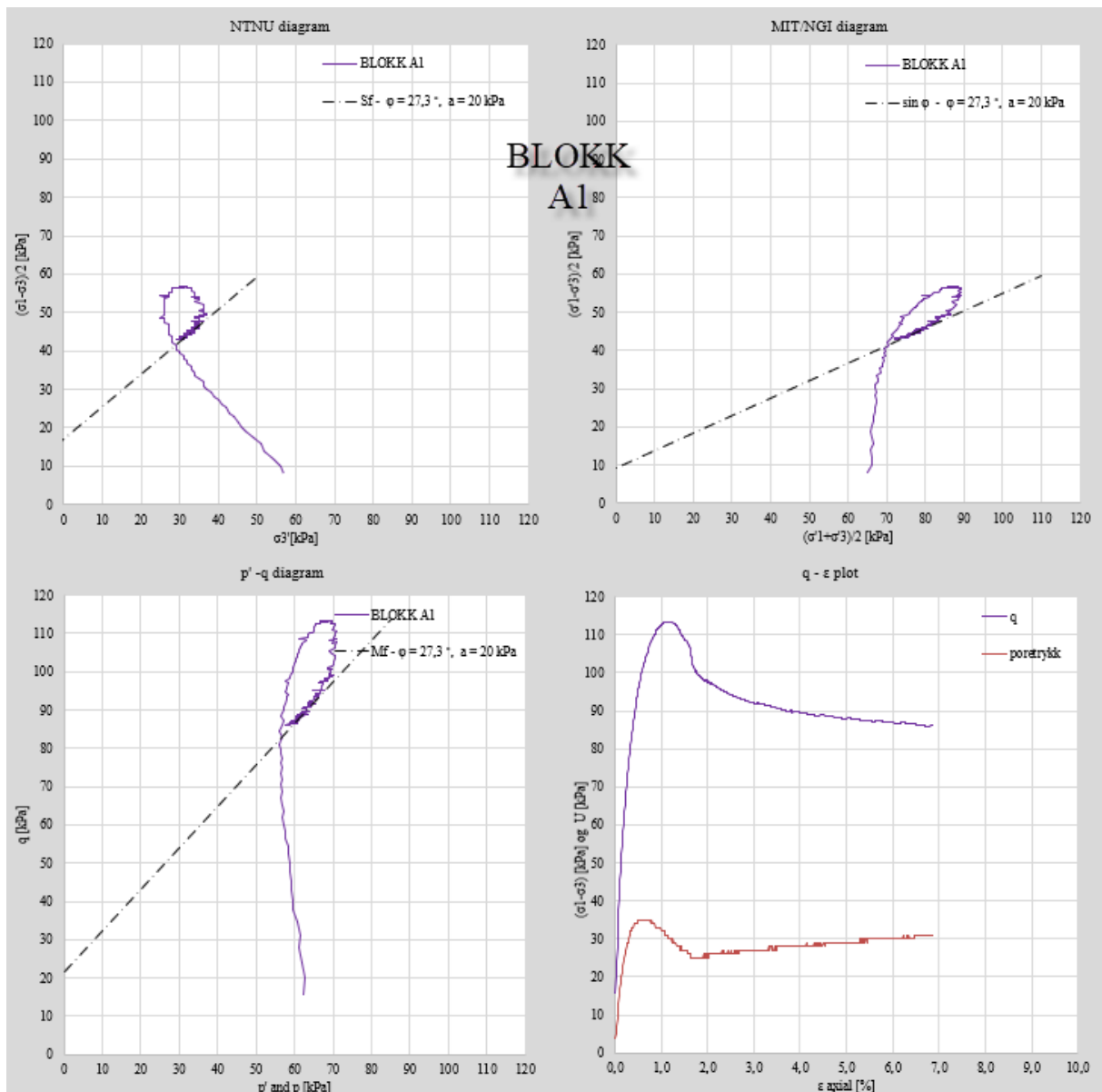
Multiconsult har som standard for sine treaksiale tester å kjøre en hvileperiode etter B-testen. Ved påføring og økning av baktrykk vil det være forskjellig trykk utenpå og inne i senter av prøven når ønsket baktrykksnivå er oppnådd. Det legges inn et hvilesteg for å sikre homogene trykkforhold inne i prøven (Gylland, 2020). Dette hvilesteget ble utført for alle prøver med unntak av BLOKK A.

4.2.6 Skjærforsøk

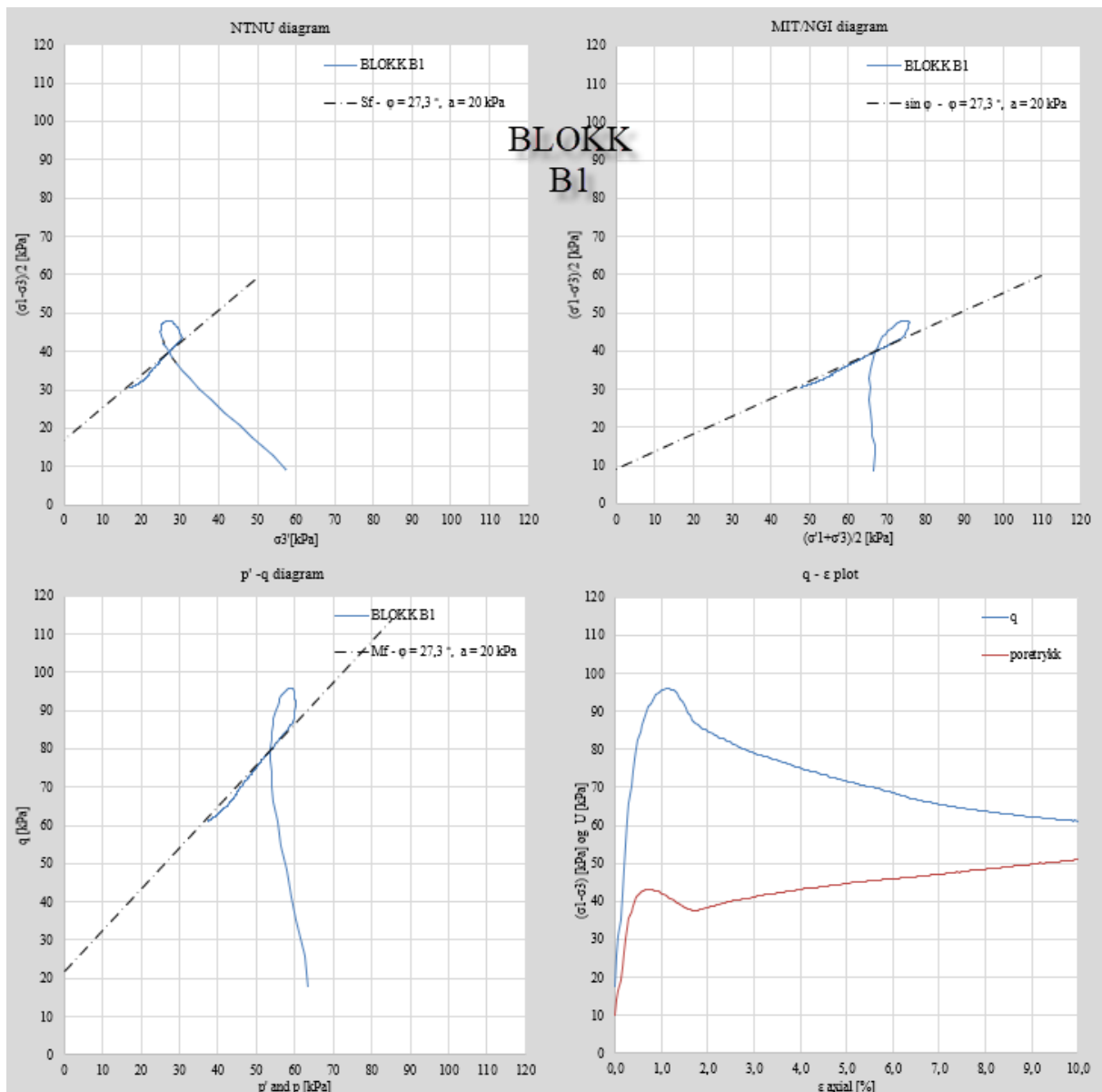
Table 4.1 viser styrkeparametrene som fremkom fra skjærtestingen (markert)

| BLOKK ID | Dybde | $K'_{0, \text{valgt}}$ | $K'_{0, \text{reel}}$ | τ_{max} | a | ϕ | B-verdi |
|----------|-------|------------------------|-----------------------|---------------------|-------|--------|---------|
| [-] | [m] | [-] | [-] | [kPa] | [kPa] | [°] | [-] |
| A1 | 6,35 | 0,80 | 0,909 | 56,67 | 20 | 27,3 | 0,900 |
| B2 | 7,10 | 0,76 | 0,875 | 47,98 | 20 | 27,3 | 0,894 |
| B1 | 7,10 | 0,86 | | 50,09 | 20 | 25,5 | 0,808 |
| C1 | 8,05 | 0,60 | 0,837 | 59,21 | 5 | 31,2 | 0,900 |
| C2 | 8,05 | 1,00 | | 59,84 | 5 | 31,2 | 0,900 |
| D1 | 8,55 | 0,81 | 0,820 | 51,95 | 20 | 25,0 | 0,790 |
| D2 | 8,55 | 0,91 | | 54,28 | 20 | 26,8 | 0,898 |

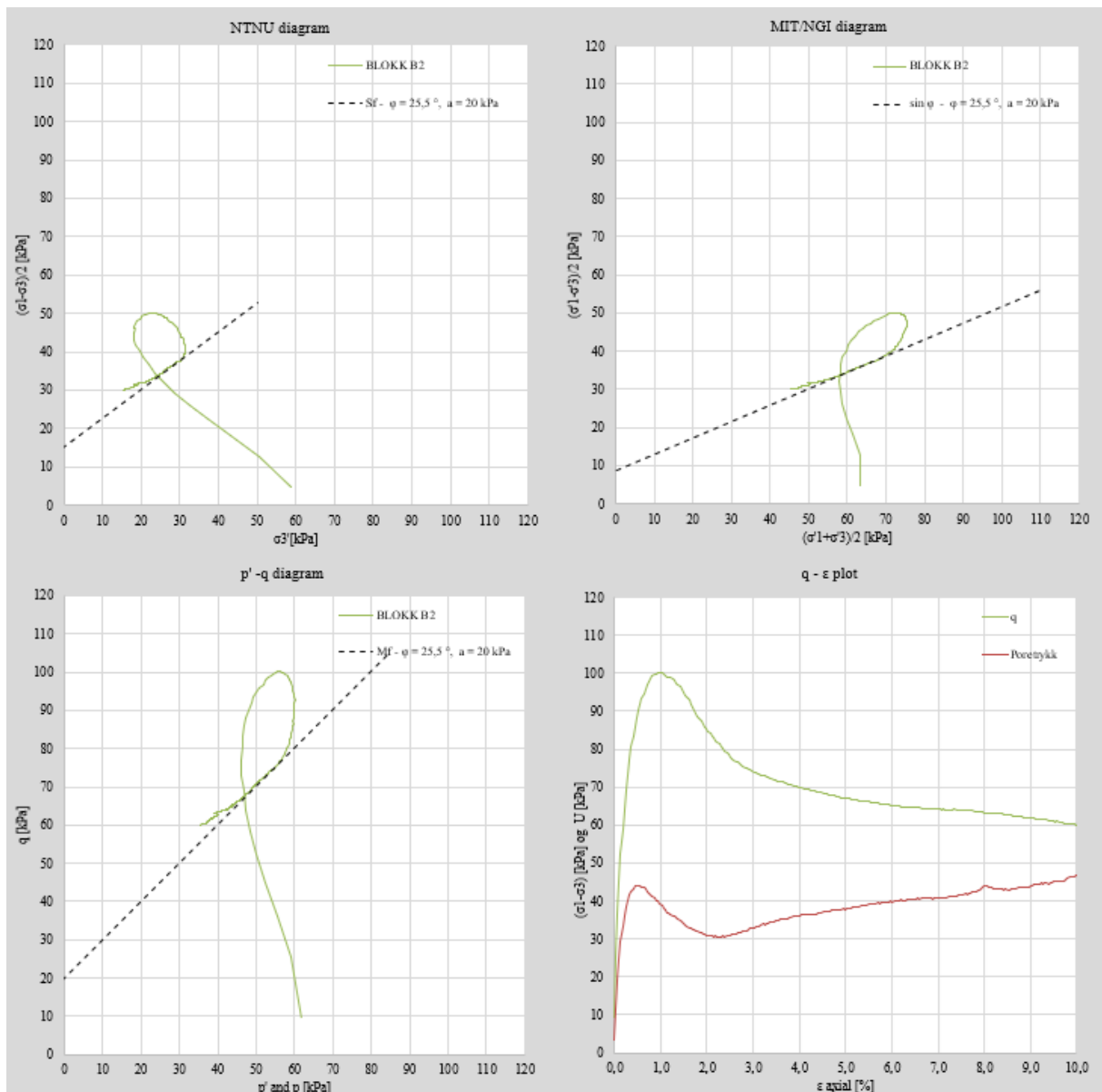
Under, i Figur 4.2 til Figur 4.8 ble hver enkelt test tegnet opp i NTNU-diagram, MIT/NGI-diagram og p' - q -diagram. I tillegg har deviatorspenningen, q , og poretrykket blitt plottet mot aksial tøyning.



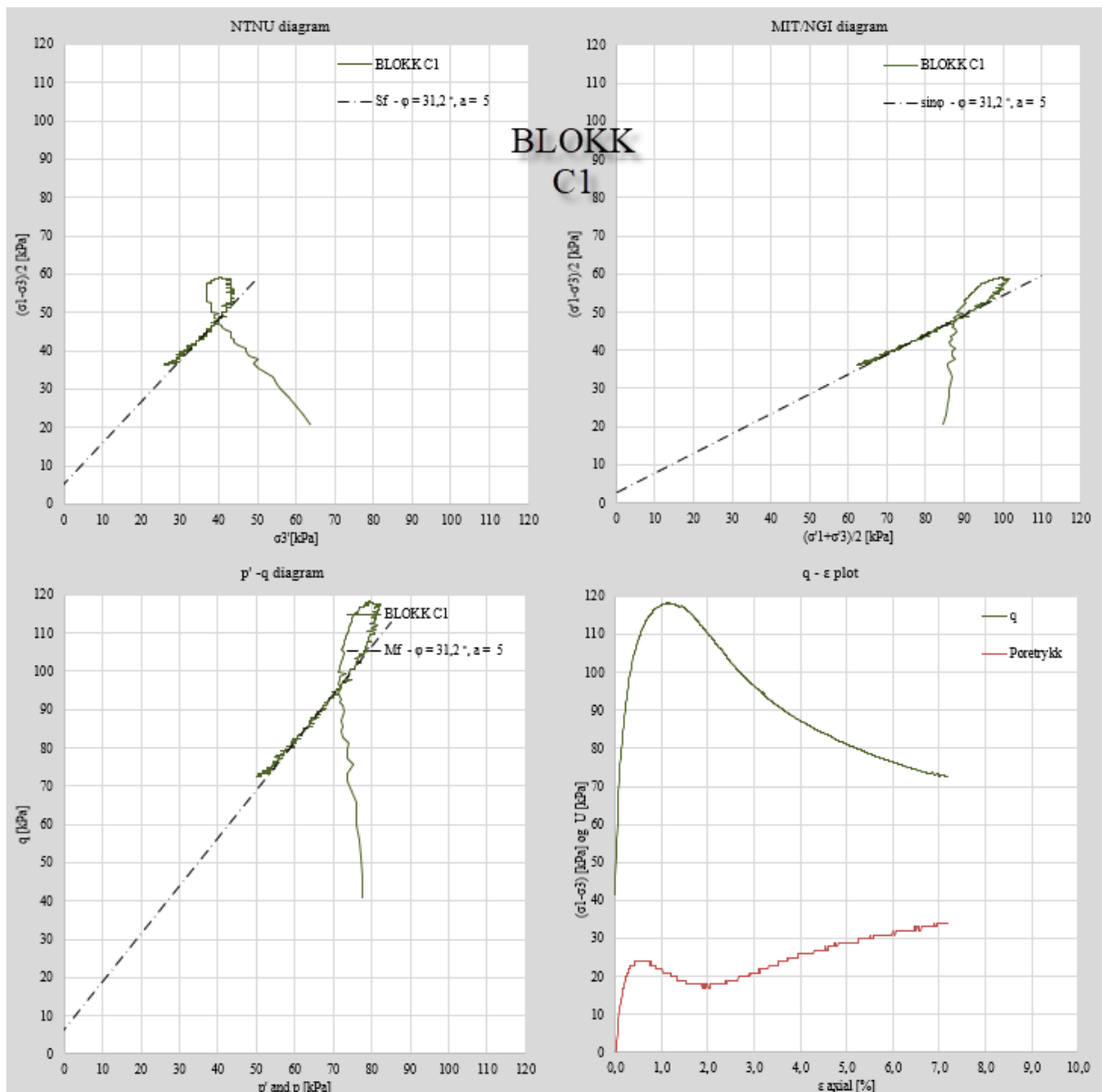
Figur 4.2 Blokk A1, spenningssti i utvalgte diagrammer (NTNU-plott, NGI-plott og p-q-plott)



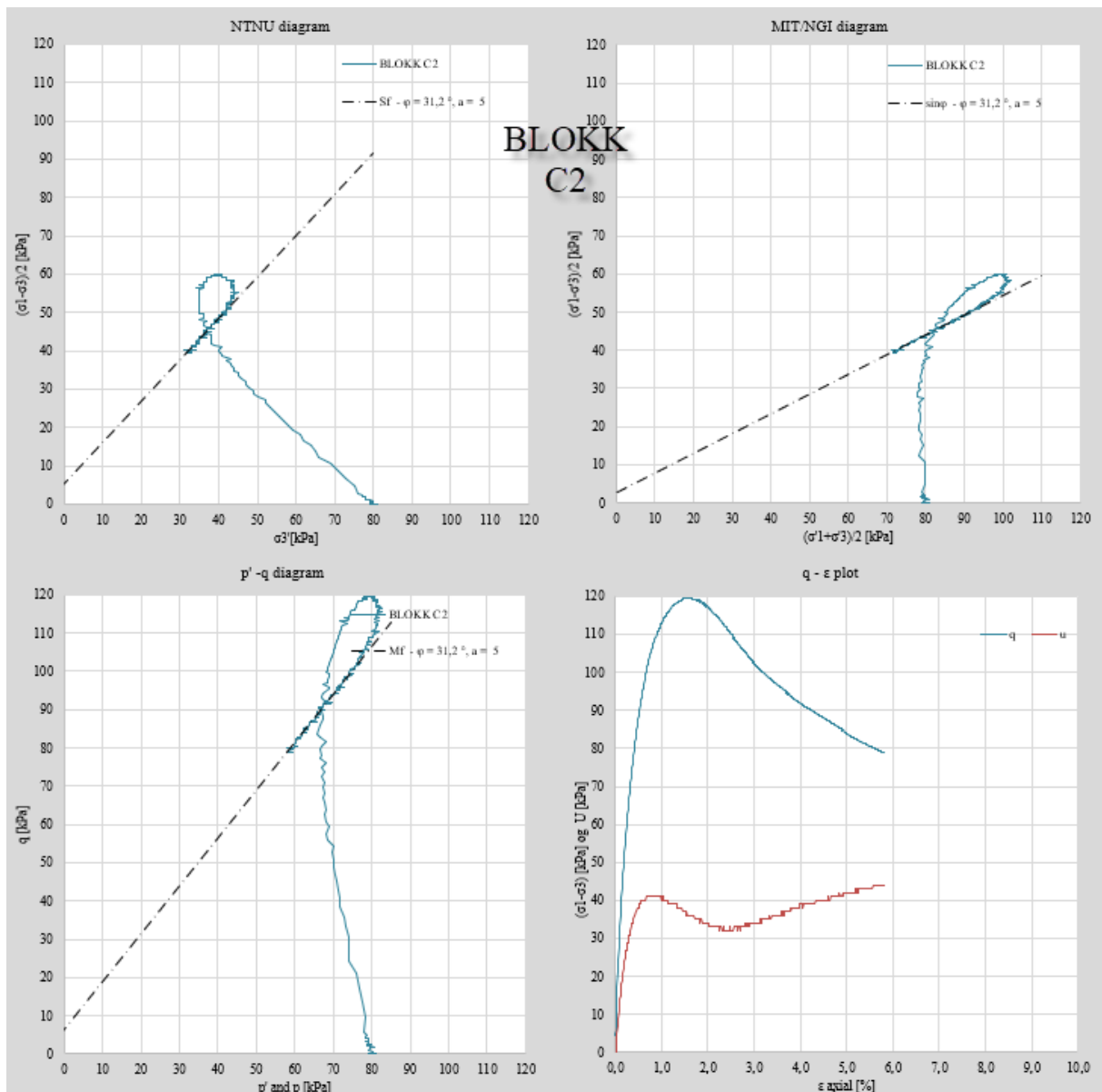
Figur 4.3 Blokk B1, spenningssti i utvalgte diagrammer (NTNU-plott, NGI-plott og p-q-plott)



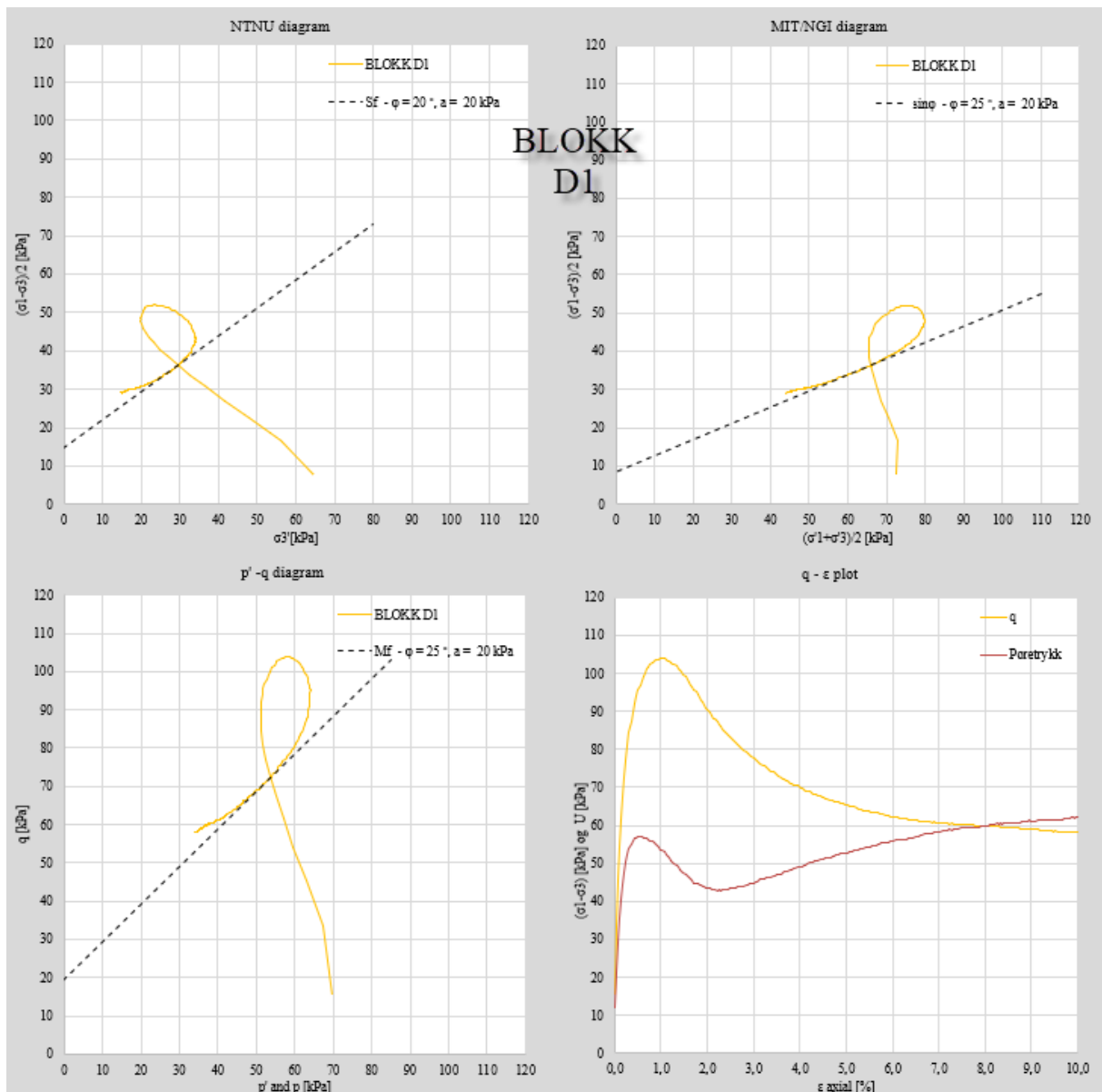
Figur 4.4 Blokk B2, spenningssti i utvalgte diagrammer (NTNU-plott, NGI-plott og p-q-plott)



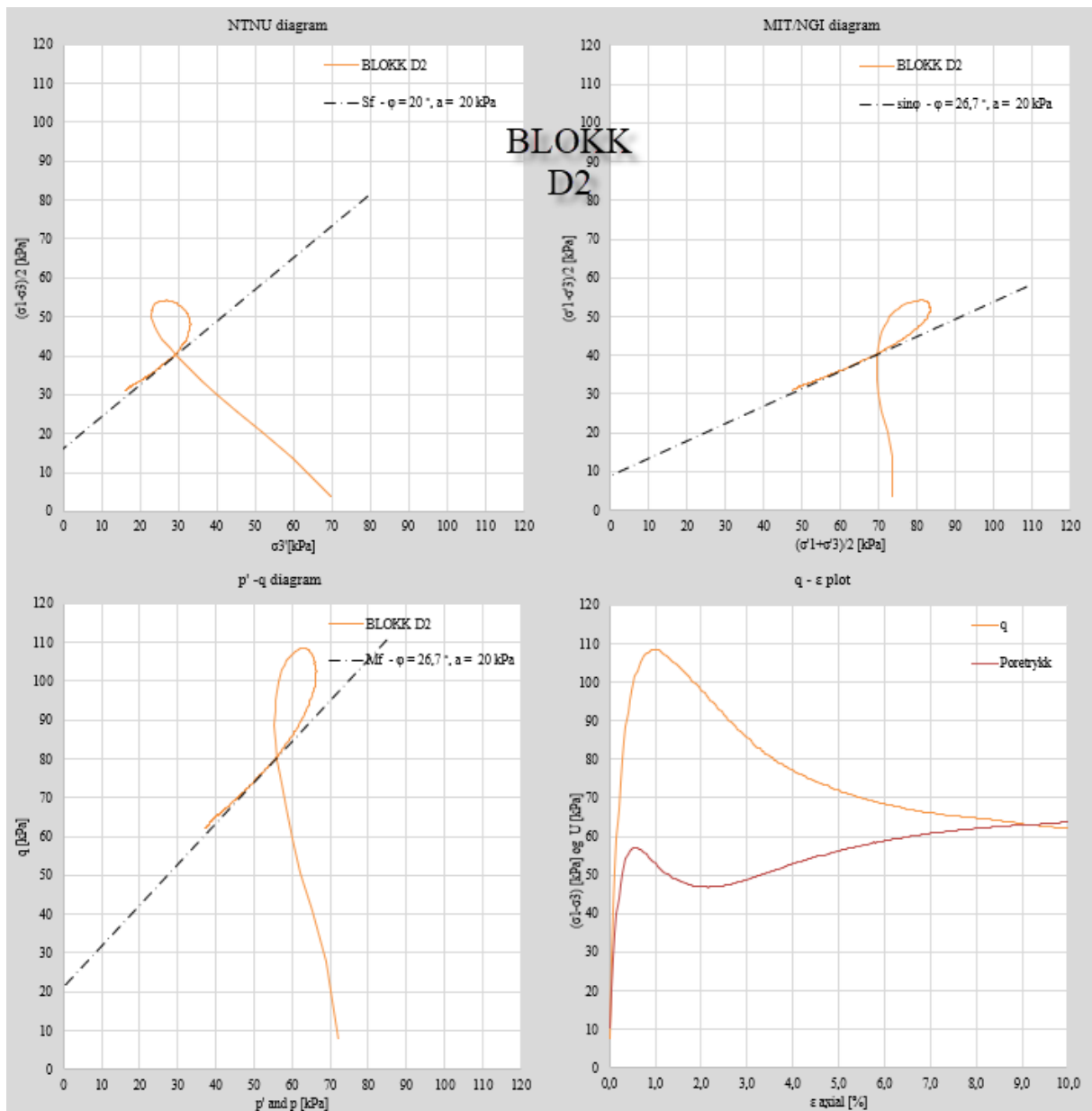
Figur 4.5 Blok C1, spenningssti i utvalgte diagrammer (NTNU-plott, NGI-plott og p-q-plott)



Figur 4.6 Blokk C2, spenningssti i utvalgte diagrammer (NTNU-plott, NGI-plott og p-q-plott)

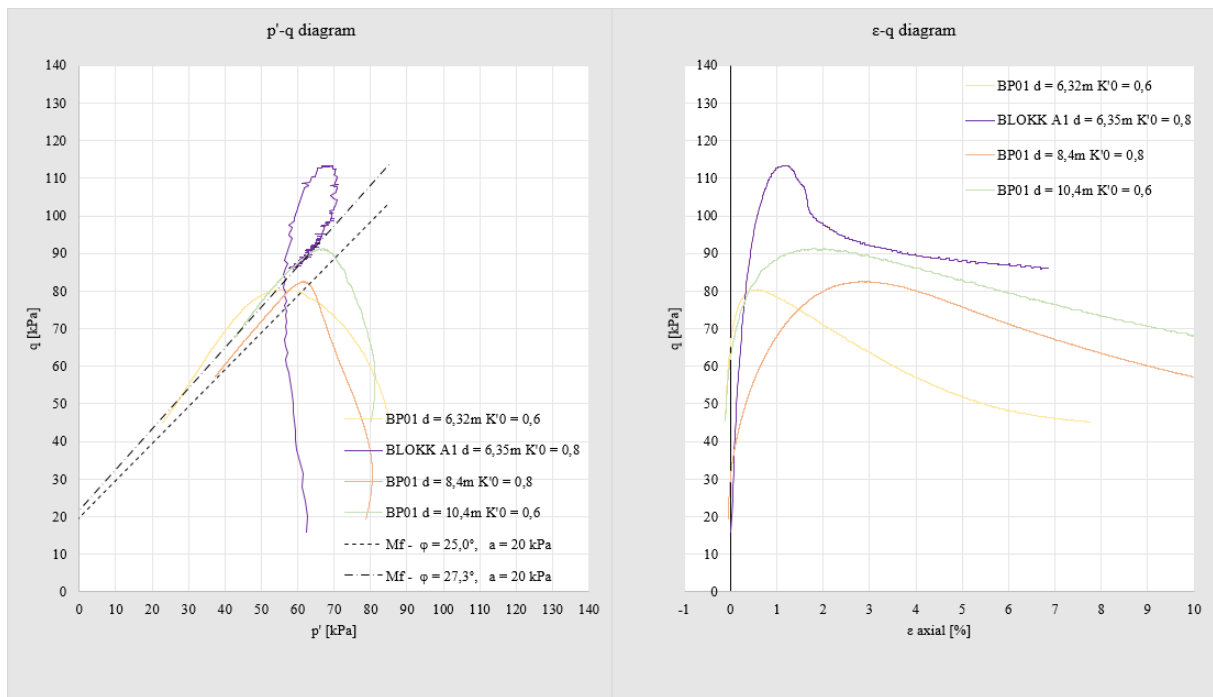


Figur 4.7 Blokk D1, spenningssti i utvalgte diagrammer (NTNU-plott, NGI-plott og p-q-plott)

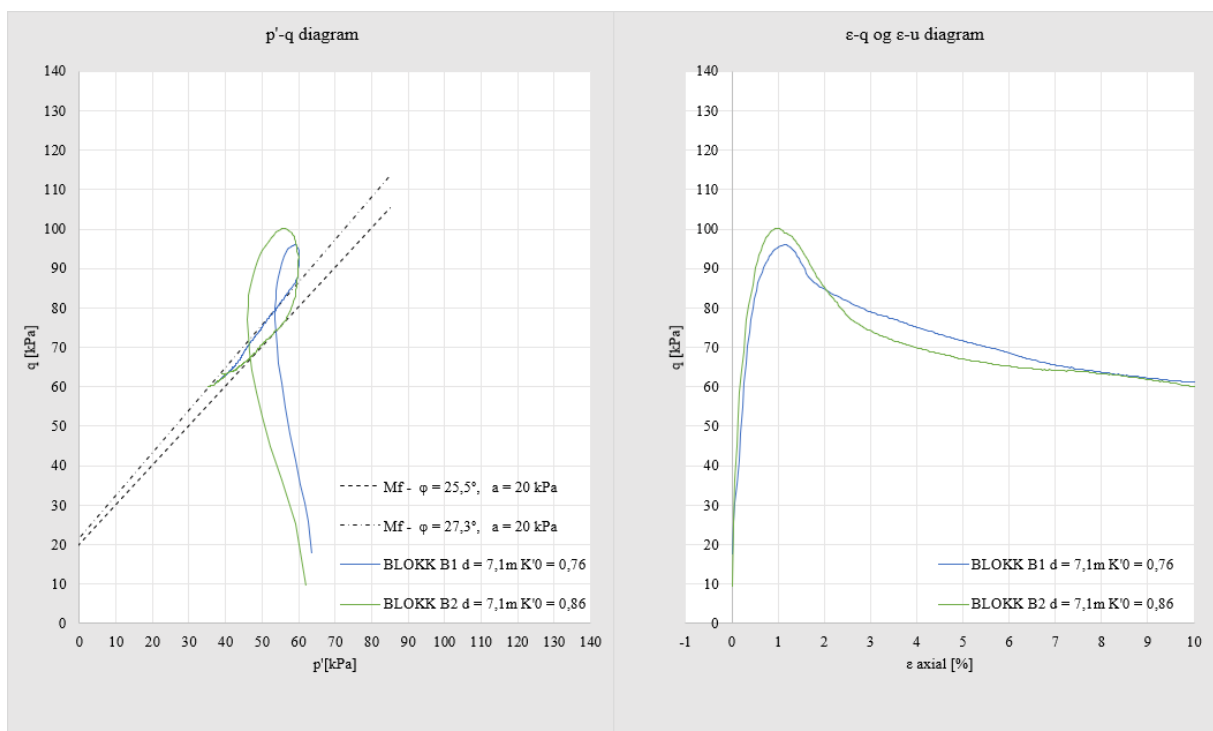


Figur 4.8 Blokk D2, spenningssti i utvalgte diagrammer (NTNU-plott, NGI-plott og p-q-plott)

Figur 4.9 til Figur 4.12 har blitt tegnet opp med hensikt og sammenligne ulike prøver. Med unntak av Figur 4.9 er alle prøver fra samme dybder og har derfor lik hviletrykkskoeffisient og lik middelspenning in situ.

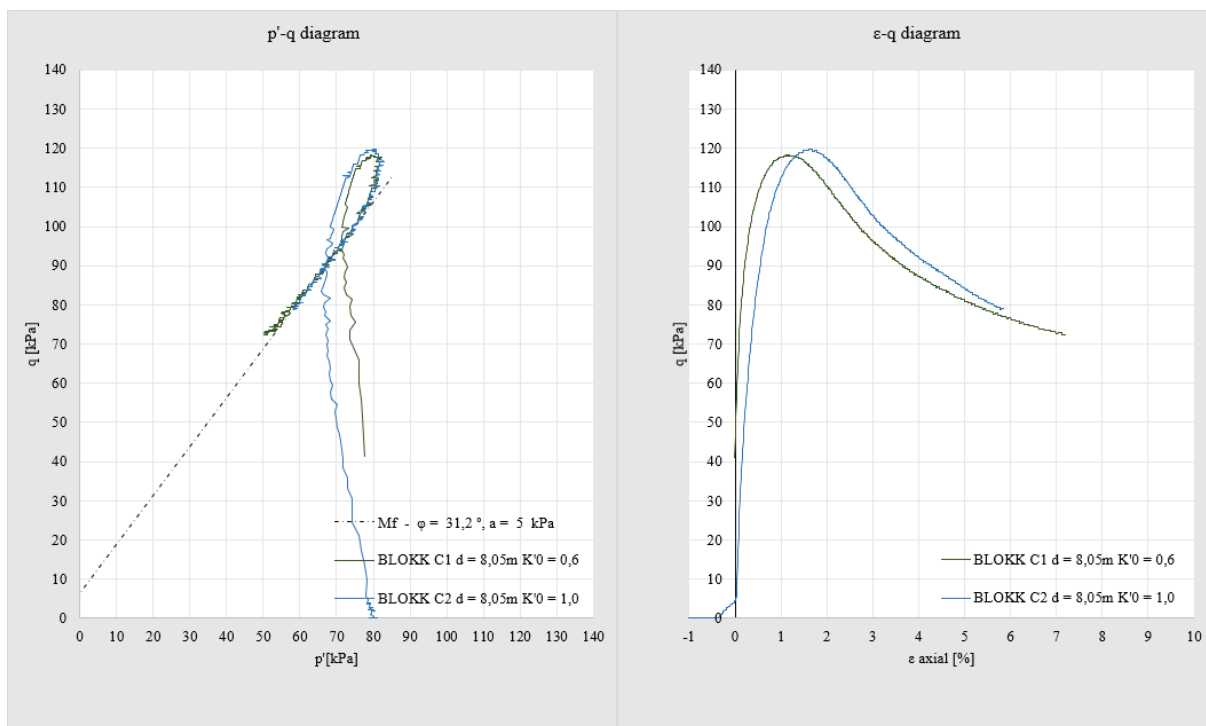


Figur 4.9 Samleplott BLOKK A1 og utvalgte dybder fra BP01



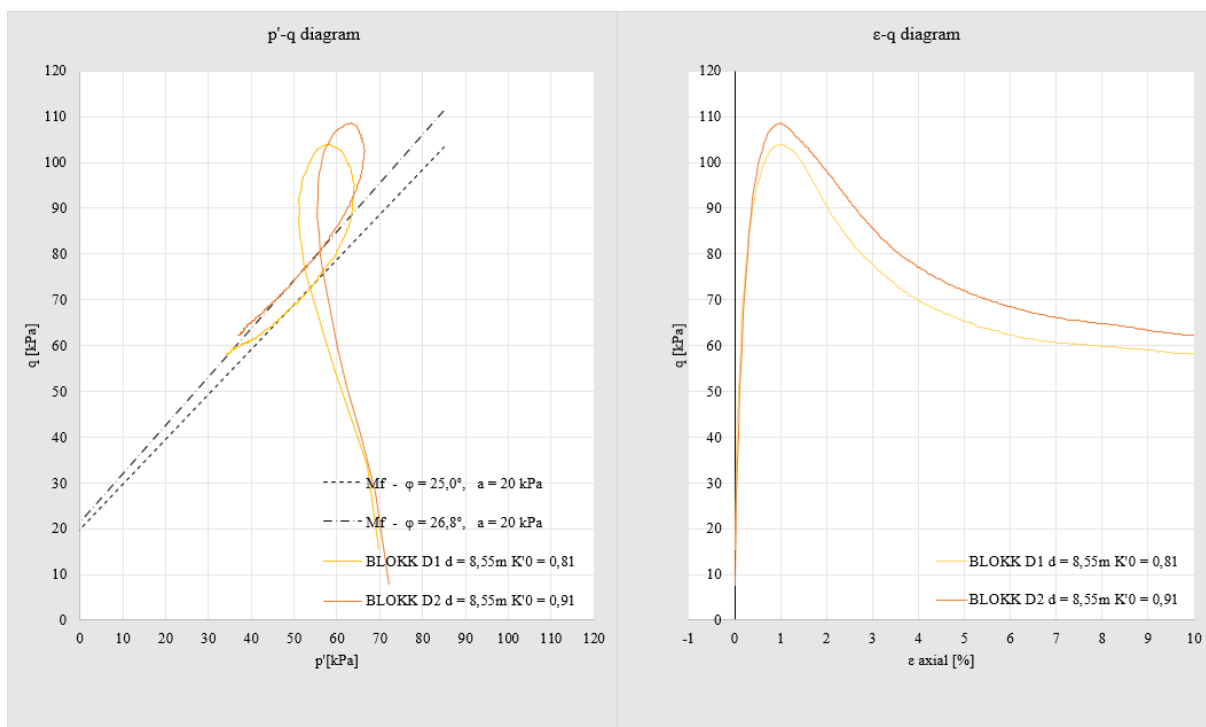
Figur 4.10 Samleplott BLOKK B

Blokk B1, fra Figur 4.3 og Figur 4.10, ser ut til å ha mistet noe av strukturen i det overkonsoliderte området, over M_f -linja.



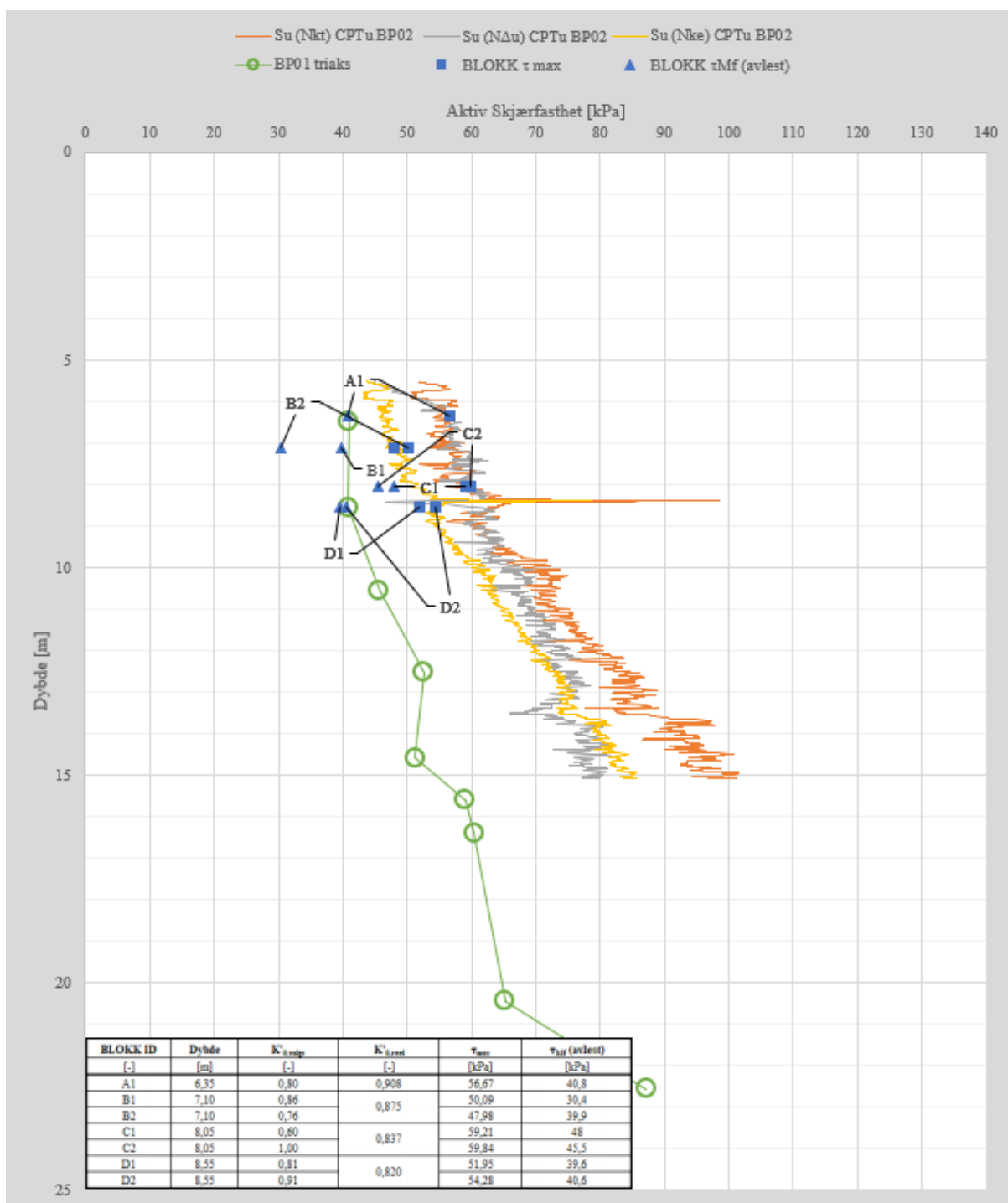
Figur 4.11 Samleplott BLOKK C

Før BLOKK C hadde blitt testet kunne en tenkt seg at strukturen til BLOKK B1 hadde blitt svekket det var på grunn av lav hviletrykkskoeffisient. Etter BLOKK C1 hadde blitt utført fant en ut at det måtte ha en annen grunn ettersom denne prøven hadde lavere hviletrykkskoeffisient enn BLOKK B1 og hadde lignende oppførsel som BLOKK C2.



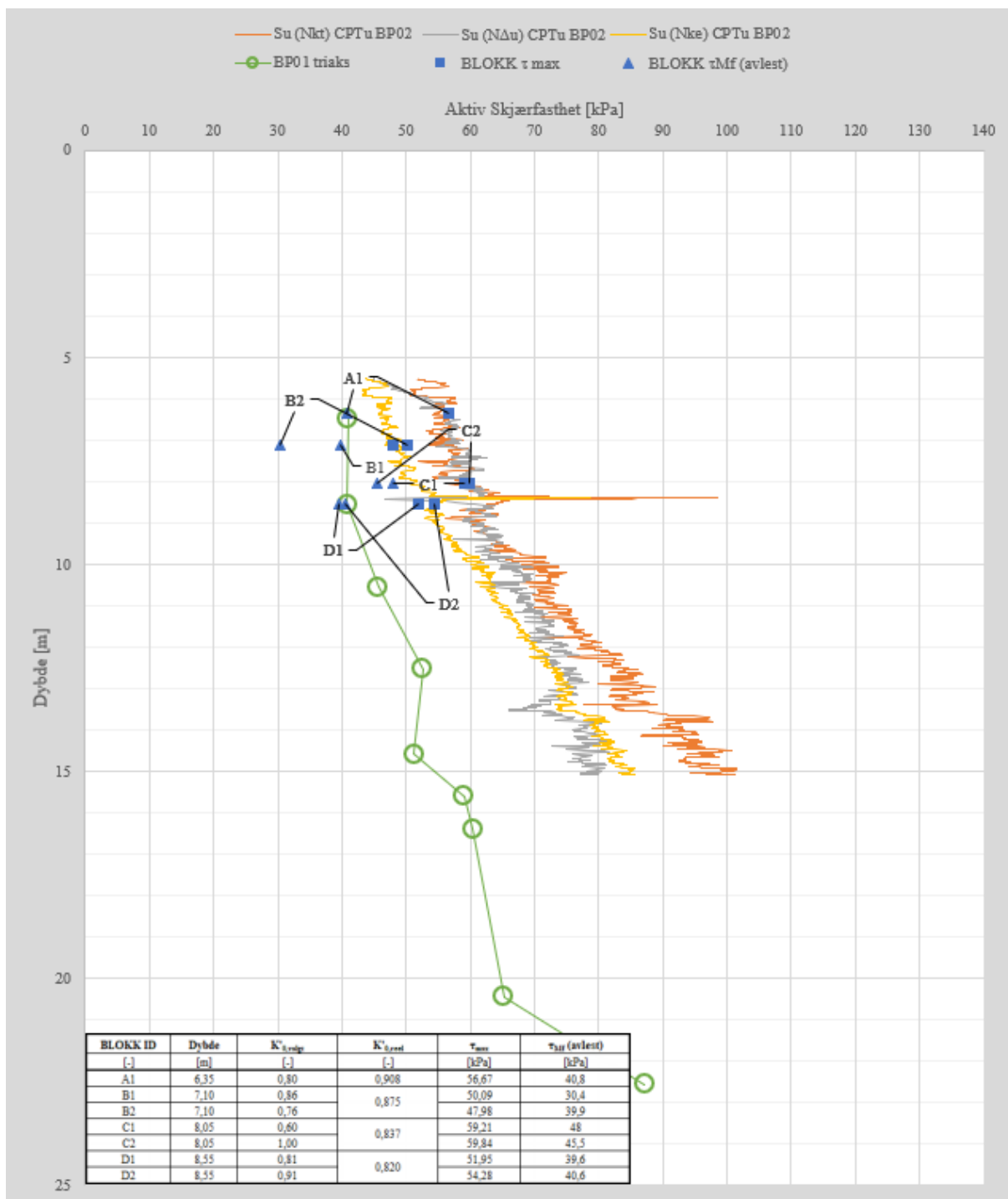
Figur 4.12 Samleplott BLOKK D

Figur 4.13 viser hvordan resultatene kan fremstilles sett i lys av tidligere resultater fra CPTU og triaksiale tester tatt med 54mm stempelprøver fra samme sted.



Figur 4.13 Aktiv skjærfasthet fra triaksiale tester fra BP01 og BLOKK og CPTU fra BP02

Det foreligger også resultater fra CPTU både i tørrskorpen, de øverste lagene og dypere ned. $S_{u,Nkt}$, $S_{u,N\Delta u}$ og $S_{u,Nke}$ er fintilpasset til ødometerresultater fra dybder mellom 6,22 og 14,85m. De er justert i dybden for slik at de stratigrafisk stemmer noenlunde overens med BLOKK. Det gjelder CPTU i Figur 4.13 og Figur 4.14. Triaksiale prøver i BP01 har også blitt justert i dybden.



Figur 4.14 Aktiv skjærfasthet fra triaksiale tester fra BP01 og BLOKK og CPTU fra BP03

4.2.7 Prøvekvalitet

I Tabell 4.8 ble prøve kvaliteten til hver enkelt prøve vurdert etter to ulike kriterier, poreallsendring og volumtøyning. Vurdering av volumtøyning er basert på En annen måte å vurdere prøve kvalitet ble presentert av Lunne med fler blant annet i NGI sin bok om prosedyrer av treaksialtester.

Tabell 2.7 og vurdering av poreallsendring ble basert på Tabell 2.6 fra Kapittel 2.4.3.

Tabell 4.8 Prøve kvalitet fra BP BLOKK

| Blokk ID | d | OCR | ϵ_{vol} | Vurdering | $\Delta e/e_0$ | Vurdering |
|----------|------|------------|------------------|----------------------|----------------|--------------------|
| [-] | [m] | (ln-trend) | [%] | (ϵ_{vol}) | [%] | ($\Delta e/e_0$) |
| A1 | 6,35 | 3,07 | 3,00 | Forstyrret kvalitet | 5,71 | Dårlig kvalitet |
| B1 | 7,1 | 2,89 | 1,68 | Akseptabel kvalitet | 3,25 | God kvalitet |
| B2 | | | 1,48 | Akseptabel kvalitet | 2,87 | Meget god kvalitet |
| C1 | 8,05 | 2,69 | 2,43 | Akseptabel kvalitet | 4,61 | God kvalitet |
| C2 | | | 2,43 | Akseptabel kvalitet | 4,62 | God kvalitet |
| D1 | 8,55 | 2,59 | 1,67 | Akseptabel kvalitet | 3,66 | God kvalitet |
| D2 | | | 1,65 | Akseptabel kvalitet | 3,63 | God kvalitet |

4.3 Oppsummering av resultater

Tabell 4.8 til Tabell 4.14 skal illustrere hvilken effekt K'_0 har på blant annet styrkeparametere og disse blir diskutert i Kapittel 5.

Tabell 4.9 Valgt K'_0 sammenlignet med K'_0 etter at alle ødometerresultatene var klare

| BLOKK ID | $K'_{0, valgt}$ | $K'_{0, reell}$ | $K'_{0, avvik}$ |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| [-] | [-] | [-] | [%] |
| A1 | 0,80 | 0,909 | 12,0 |
| B1 | 0,76 | 0,875 | 13,1 |
| B2 | 0,86 | 0,875 | 1,7 |
| C1 | 0,60 | 0,837 | 28,3 |
| C2 | 1,00 | 0,837 | 19,5 |
| D1 | 0,81 | 0,820 | 1,2 |
| D2 | 0,91 | 0,820 | 11,0 |

I Tabell 4.9 har $K'_{0, reell}$ blitt basert på eksponentiell regresjon.

Tabell 4.10 Kontroll av middelspenninger in situ vs treaksialforsøk

| BLOKK ID | d | in-situ | | | oppnådd | | | $\Delta p'$ |
|----------|------|---------------------|----------------|----------------|-------------|--------|-------|-------------|
| | | $\sigma'_{y, reel}$ | $K'_{0, reel}$ | $p'_{in-situ}$ | σ'_y | K'_0 | p' | |
| [-] | [m] | [kPa] | [-] | [kPa] | [kPa] | [-] | [kPa] | [kPa] |
| BLOKK A1 | 6,35 | 69,14 | 0,91 | 64,94 | 72,87 | 0,78 | 62,29 | 6,11 |
| BLOKK B1 | 7,10 | 76,04 | 0,88 | 69,72 | 75,32 | 0,77 | 63,60 | 6,11 |

| | | | | | | | | |
|----------|------|-------|------|-------|--------|------|-------|------|
| BLOKK B2 | 7,10 | 76,04 | 0,88 | 69,72 | 68,24 | 0,86 | 61,93 | 6,36 |
| BLOKK C1 | 8,05 | 84,77 | 0,84 | 75,59 | 105,05 | 0,61 | 78,34 | 6,43 |
| BLOKK C2 | 8,05 | 84,77 | 0,84 | 75,59 | 79,00 | 1,00 | 79,00 | 2,65 |
| BLOKK D1 | 8,55 | 89,36 | 0,82 | 78,62 | 82,68 | 0,81 | 72,26 | 2,75 |
| BLOKK D2 | 8,55 | 89,36 | 0,82 | 78,62 | 77,26 | 0,90 | 72,19 | 3,41 |

Tabell 4.11 Middelspenning og skjærspenning sammenlignet

| BLOKK ID | d | $p'_{in-situ}$ | σ'_y | K'_0 | p' | $\Delta p'$ | τ_{max} | τ_{Mf} (avlest) |
|----------|------|----------------|-------------|--------|-------|-------------|--------------|----------------------|
| [-] | [m] | [kPa] | [kPa] | [-] | [kPa] | [kPa] | [kPa] | [kPa] |
| A1 | 6,35 | 64,94 | 72,87 | 0,78 | 62,29 | 6,11 | 56,67 | 40,8 |
| B1 | 7,10 | 69,72 | 75,32 | 0,77 | 63,60 | 6,11 | 50,09 | 30,4 |
| B2 | 7,10 | 69,72 | 68,24 | 0,86 | 61,93 | 6,36 | 47,98 | 39,9 |
| C1 | 8,05 | 75,59 | 105,05 | 0,61 | 78,34 | 6,43 | 59,21 | 48,0 |
| C2 | 8,05 | 75,59 | 79,00 | 1,00 | 79,00 | 2,65 | 59,84 | 45,5 |
| D1 | 8,55 | 78,62 | 82,68 | 0,81 | 72,26 | 2,75 | 51,95 | 39,6 |
| D2 | 8,55 | 78,62 | 77,26 | 0,90 | 72,19 | 3,41 | 54,28 | 40,6 |

Tabell 4.12 Oppnådd skjærfasthet ved kryssing av bruddkriteriet og maksimalt oppnådd skjærstyrke under skjærfasen

| BLOKK ID | Dybde | $K'_{0, valgt}$ | $K'_{0, reell}$ | T_{max} | T_{max} (forskjell) | ϵ (T_{Max}) | T_{Mf} (avlest) | T_{Mf} (forskjell) | ϵ (T_{Mf}) |
|----------|-------|-----------------|-----------------|-----------|-----------------------|--------------------------|-------------------|----------------------|-------------------------|
| [-] | [m] | [-] | [-] | [kPa] | [%] | [% ved topp] | [kPa] | [%] | [% ved avlesn.] |
| A1 | 6,35 | 0,80 | 0,908 | 56,67 | - | 1,25 | 40,8 | - | 0,30 |
| B1 | 7,10 | 0,76 | 0,875 | 47,98 | 4,20 | 0,98 | 39,9 | 23,9 | 0,45 |
| B2 | 7,10 | 0,86 | | 50,09 | | 1,17 | 30,4 | | 0,22 |
| C1 | 8,05 | 0,60 | 0,837 | 59,21 | 1,06 | 1,15 | 48,0 | 5,2 | 0,27 |
| C2 | 8,05 | 1,00 | | 59,84 | | 1,67 | 45,5 | | 0,51 |
| D1 | 8,55 | 0,81 | 0,820 | 51,95 | 4,29 | 0,99 | 39,6 | 2,6 | 0,25 |
| D2 | 8,55 | 0,91 | | 54,28 | | 1,00 | 40,6 | | 0,29 |

Tabell 4.13 Dilatasjon og friksjonsvinkel ved K'_0 forskjellig fra in situ

| BLOKK ID | Dybde | $K'_{0, valgt}$ | $K'_{0, reell}$ | D | ϕ |
|----------|-------|-----------------|-----------------|-------|--------|
| [-] | [m] | [-] | [-] | [-] | [°] |
| A1 | 6,35 | 0,80 | 0,909 | -0,12 | 27,3 |

| | | | | | |
|----|------|------|-------|-------|------|
| B1 | 7,10 | 0,76 | 0,875 | -0,20 | 27,3 |
| B2 | 7,10 | 0,86 | | -0,32 | 25,5 |
| C1 | 8,05 | 0,60 | 0,837 | -0,08 | 31,2 |
| C2 | 8,05 | 1,00 | | -0,19 | 31,2 |
| D1 | 8,55 | 0,81 | 0,820 | -0,37 | 25,0 |
| D2 | 8,55 | 0,91 | | -0,22 | 26,8 |

Tabell 4.14 Prøvekvalitet ved K'_0 -variasjon

| Blokk ID | d | OCR | $K'_{0,oppn\ddot{a}dd}$ | $K'_{0,reell}$ | ϵ_{vol} | Vurdering | $\Delta e/e_0$ | Vurdering |
|----------|------|------------|-------------------------|----------------|------------------|----------------------|----------------|--------------------|
| [-] | [m] | (ln-trend) | [-] | [-] | [%] | (ϵ_{vol}) | [%] | ($\Delta e/e_0$) |
| A1 | 6,35 | 3,07 | 0,78 | 0,908 | 3,00 | Forstyrret kvalitet | 5,71 | Dårlig kvalitet |
| B1 | 7,1 | 2,89 | 0,77 | 0,875 | 1,68 | Akseptabel kvalitet | 3,25 | God kvalitet |
| B2 | | | 0,86 | | 1,48 | Akseptabel kvalitet | 2,87 | Meget god kvalitet |
| C1 | 8,05 | 2,69 | 0,61 | 0,837 | 2,43 | Akseptabel kvalitet | 4,61 | God kvalitet |
| C2 | | | 1,00 | | 2,43 | Akseptabel kvalitet | 4,62 | God kvalitet |
| D1 | 8,55 | 2,59 | 0,81 | 0,820 | 1,67 | Akseptabel kvalitet | 3,66 | God kvalitet |
| D2 | | | 0,90 | | 1,65 | Akseptabel kvalitet | 3,63 | God kvalitet |

5 Diskusjon

5.1 Datagrunnlag

I løpet av våren 2020 så har mer data blitt samlet inn og beregningsverktøy for parametere i Høgskoledalen utviklet og videreutviklet. For eksempel har en rekke ødometerforsøk resultert i bedre oversikt over hviletrykkskoeffisienten, som igjen er vesentlig for å forhåndsbergne horisontal konsolideringsspenning. Dermed har den siste parallellen (BLOKK C) et annet grunnlag enn den første (BLOKK A).

Datagrunnlaget er vurdert som tilstrekkelig og vesentlig større enn det en vanligvis har i prosjekteringssammenheng, til tross for manglende CPTU med umiddelbar nærhet til BP BLOKK. De to prøvene der $K'_{0, valgt}$ skulle være lik $K'_{0, reell}$ (B1 og C1) vist i Tabell 4.9

5.2 Oppsummering av resultater

Tabell 4.8 til Tabell 4.14 skal illustrere hvilken effekt K'_{0} har på blant annet styrkeparametere og disse blir diskutert i Kapittel 5.

Tabell 4.9 har avvik på henholdsvis 1,7 og 1,2%. Det vil si at før data fra ødometer fra BLOKK var på plass, var det mulig å velge en realistisk K'_{0} på bakgrunn av tidligere data fra BP01.

5.3 Påvirkning av skjærfasthet ved variasjon av p'

Tabell 4.10 viser at avvik i middelspenning fra in situ middelspenning forekom, selv om det ikke var tiltenkt. Dette ga i midlertidig mulighet til å undersøke hvilken betydning små variasjoner i middelspenningen fra in situ middelspenning, her kalt $\Delta p'$, hadde for skjærfastheten. Ulempen med dette er at en ikke kan utelukke at det er nettopp derfor det ble funnet forskjeller i dilatasjon, skjærfasthet og friksjonsvinkel. BLOKK C hadde i forskjeller i oppnådde styrkeparametere. Dette tyder på at prøvene fra denne parallellen har lavere leir-fraksjon. Ut ifra

| BLOKK ID | d | in-situ | | | oppnådd | | | $\Delta p'$ |
|----------|------|----------------------|-----------------|----------------|-------------|----------|-------|-------------|
| | | $\sigma'_{y, reell}$ | $K'_{0, reell}$ | $p'_{in-situ}$ | σ'_y | K'_{0} | p' | |
| [-] | [m] | [kPa] | [-] | [kPa] | [kPa] | [-] | [kPa] | [kPa] |
| BLOKK A1 | 6,35 | 69,14 | 0,91 | 64,94 | 72,87 | 0,78 | 62,29 | 6,11 |
| BLOKK B1 | 7,10 | 76,04 | 0,88 | 69,72 | 75,32 | 0,77 | 63,60 | 6,11 |
| BLOKK B2 | 7,10 | 76,04 | 0,88 | 69,72 | 68,24 | 0,86 | 61,93 | 6,36 |
| BLOKK C1 | 8,05 | 84,77 | 0,84 | 75,59 | 105,05 | 0,61 | 78,34 | 6,43 |
| BLOKK C2 | 8,05 | 84,77 | 0,84 | 75,59 | 79,00 | 1,00 | 79,00 | 2,65 |
| BLOKK D1 | 8,55 | 89,36 | 0,82 | 78,62 | 82,68 | 0,81 | 72,26 | 2,75 |
| BLOKK D2 | 8,55 | 89,36 | 0,82 | 78,62 | 77,26 | 0,90 | 72,19 | 3,41 |

Tabell 4.11 kan en tyde at middelspenning ikke spiller en viktig rolle for skjærfasthet T_{Mf} eller maksimal skjærspenning ved lave avvik. BLOKK B2 er et unntak fra regelen

ettersom den antagelig har mistet noe av strukturen i prøven et sted på veien og dermed ikke viser forventet oppførsel.

5.4 Påvirkning av skjærfasthet ved variasjon av K'_0

Ut ifra forsøkene gjort i denne studien, dokumentert i Tabell 4.12, ser det ut til at variasjon av K'_0 påvirker resulterende skjærfasthet relativt lite når det kommer til maksimal skjærspenning. Enkelte av forsøksresultatene viser at høyere valgt K'_0 medfører noe høyere maksimal skjærstyrke. Hvis $K'_0 > K'_{0,reell}$ vil også maksimal skjærstyrke kunne være høyere enn reell skjærstyrke, men med små utslag slik en kan se her vil det *ikke* ha kritiske konsekvenser i prosjekteringsammenheng. Når det er sagt er det sjeldent at blokkprøver med intakt struktur og stor «grisehale» blir brukt i prosjekteringsammenheng og nettopp derfor vil vanligvis valgt skjærfasthet ligge under maksimal skjærstyrke, T_{max} . BLOKK B og BLOKK D viste henholdsvis 4,2 og 4,3% høyere maksimal skjærspenning for prøvene gjort med høyere K'_0 . Mindre markant var variasjonen for BLOKK C, som hadde størst K'_0 -variasjon, og en forventet større variasjon i skjærfasthet og maksimal skjærspenning. BLOKK B hadde én prøve med $K'_{0,reell}$ (B2) og en prøve med $K'_0 = K'_{0,reell} - 0,1$ (B1). Resultatene fra Blokk B er mer sammensatt. Det kommer fram fra kurvene at strukturen på B1 er ulik den en skulle forvente. «Grisehalen» på grafen fra Figur 4.3 og Figur 4.10 fikk en annen form enn på øvrige prøver, trolig på grunn av noe tapt struktur. Dette medfører at det er praktisk talt umulig å vite hvordan den egentlig skulle ha respondert til for lav K'_0 . En mulighet er at strukturen ble ødelagt på grunn av den høyere deviatorspenningen i konsolideringsfasen, men det finnes det ikke nok belegg for å påstå.

5.5 Påvirkning av friksjonsvinkel og dilatasjon ved variasjon i K'_0

Tabell 4.13 Blokk B1, med $K'_0 = K'_{0,reell} - 0,1$, viste seg å ha 6,6% lavere friksjonsvinkel enn B2 ($K'_{0,reell}$). Den samme observasjonen ble gjort for Blokk D. Blokk D2, med $K'_0 = K'_{0,reell} + 0,1$, viste seg å ha 6,7% høyere friksjonsvinkel enn D1 ($K'_{0,reell}$). Samtidig ble nettopp dette sett på for BLOKK C der prøvene hadde nøyaktig samme friksjonsvinkel. BLOKK C hadde sannsynligvis lavere leirfraksjon, med lavere attraksjon og høyere friksjonsvinkel, uten at det foreligger noe kornfordelingsanalyse som beviser det. Dette forteller at K'_0 spiller en liten rolle, også når det kommer til tolkning av friksjonsvinkel.

5.6 Påvirkning av prøve kvalitet ved variasjon i K'_0

Forsøkene gjort i denne studien viser at prøve kvaliteten og valg av K'_0 er uavhengige parametere, gitt at p' holdes noenlunde konstant, vist i Tabell 4.14.

5.7 Feilkilder

Det finnes mange mulige feilkilder forbundet med laboratorieundersøkelser. De mest fremtredende i forbindelse med treaksial testing er beskrevet i nedenstående delkapitler.

5.7.1 Frakt av prøver fra felt

For å unngå prøveforstyrrelser må frakt av blokkprøvene fra felt til laboratorium være silkemyk. To av blokkene ble også fraktet videre til Multiconsult etter å ha blitt oppbevart på Geoteknikklabben til NTNU 1,5 mnd. Det kan ha hatt betydning for prøve kvaliteten og var en suboptimal løsning som følge av corona-tiltak.

5.7.2 Oppbevaring av prøver

Blokken står på en plastsokkel og pakkes inn i plastfolie på en slik måte at den ikke kan avgi vann. NGI foreslår at prøvene plasseres i et tett spann inne på et klimarom med temperatur på ca 6°C med 90% luftfuktighet (Karlsruh, et al., 2013). I forsøk på å unngå innvirkning på lagring ble prøvetakingen og laboratorieundersøkelsene utført sekvensielt uten unødvendig mellomlagring. Etter prøveoppdelingen ble prøvene som ikke skulle testes umiddelbart, forseglede med plastfolie og plassert tilbake på kjølerommet.

5.7.3 Apparat

En treaksial celle er et komplekst instrument med mange komponenter. Feil i forbindelse med treaksial testing vil kunne bli plukket opp av operator, men noen små feil i komponentene kan forekomme uten at det blir oppdaget.

Det er antatt at sensorene i treaksial cellen er presise, men ingen test ble utført i forsøk på å utelukke denne feilkilden. Derfor kan det være både systematiske og tilfeldige feil i rådatafilen fra instrumentet. Gjennom laboratorieundersøkelsene ble noen større feil oppdaget med ulike konsekvenser:

1. Feil kalibrering med en faktor på 100 på apparat 2 (NTNU)
2. Lekkasje i gummihud eller mellom o-ring og sokkel
3. Oppdatering av datamaskin over natten ødela BLOKK A2
4. Forskjeller i middelspanning for samme paralleller.

Små forskjeller i apparatur på laboratoriet til Multiconsult vis-a-vis NTNU, kan ha gitt innflytelse på resultatene. De er levert av samme operatør (GDS), men kan likevel inneha små forskjeller. Disse forskjellene er vurdert som ikke signifikante for konklusjonene i denne oppgaven.

5.7.4 Operatørferdigheter

Interaksjon med sensitive leirer kan påføre prøven forstyrrelser hvis prøven ikke behandles varsomt. Inndeling av prøve, innbygging i cellen læres gjennom å prøve og operatør av testene og forfatter av denne oppgaven hadde generelt begrenset erfaring med laboratoriearbeid og treaksial testing, før dette arbeidet. Med hensikt å redusere feilkilden med begrensede praktiske erfaringer ble flere tester utført på vilkårlige leirprøver før testing på blokkprøvene brukt i rapporten.

5.7.5 Prosedyreforskjeller i LAB

Multiconsult har en annen prosedyre enn det som ble utført i LAB av forfatter og medstudent.

1. Lavere baktrykk under metningen av baktrykkssystemet før B-test (Multiconsult)
2. Hviletid etter B-test før skjærfase (Multiconsult)
3. Forskjell i tøyingsrate (2% pr time og 1% pr time)

Disse prosedyreforskjellene er vurdert ikke å ha signifikant betydning for konklusjonene i denne oppgaven.

6 Konklusjoner og anbefalinger

Ut ifra testene som har blitt gjort ser det ut til at maksimal oppnådd skjærstyrke påvirkes i liten grad av hviletrykkskoeffisienten, dersom middelspenningen er realistisk. Testene utført fra samme dybde med ulik K'_0 og lik middelspenning, p' , viste seg å oppføre seg mer eller mindre likt, med små variasjoner i styrkeparametere og poretrykksparametere. For å finne den reelle hviletrykkskoeffisienten på et noenlunde presist nivå trengs omfattende grunnlag, noe som sjeldent er en mulighet i prosjekteringssammenheng. Derfor er det viktig å vite hva som skjer dersom en velger for høy eller lav K'_0 , ved bestilling av triaksiale tester. K'_0 brukes til å bestemme horisontal effektivspenning og derfor også middelspenning. Så hvis en har et tynt grunnlag å basere K'_0 på og velger K'_0 med stort avvik, vil en ende med å bruke konsolideringsspenninger som ikke stemmer med in situ spenninger. Dette skjer antagelig hyppig i prosjekteringssammenheng og derfor må en vite hva som skjer ved feilvalg av K'_0 med større avvik i middelspenningen. Det anbefales og gjøre nettopp dette, altså noe lignende som Ingaard gjorde i 2017. Blokkprøver er et godt utgangspunkt for å få god prøve kvalitet og en må samtidig ha god kontroll på K'_0 og p' . For eksempel kan en gjøre parallelltester med to prøver, derav én «fasitprøve» med reell $K'_{0,reell}$ og p'_0 , og én «avviksprøve» der K'_0 bevisst velges for lav eller høy slik at p' også avviker fra in situ. Slik kan en tydelig se hva som skjer hvis en velger feil K'_0 i utgangspunktet og middelspenning avviker på grunn av feilvalget. Da kunne det være lurt å velge K'_0 både over og under $K'_{0,reell}$.

En annen problemstilling som ansvarlig geotekniker gjerne møter er at laboratoriet anbefaler å øke K'_0 til noe nærmere 1,0 og kanskje argumenteres det med at prøven kan gå til brudd i konsolideringsfasen. K'_0 kan gjerne endres til noe nærmere 1,0, men «en har liten grunn til å bekymre seg for at prøven konsolideres til brudd dersom laboratoriet har god kontroll på pålastningen opp mot konsolideringsspenningen, vel og merke dersom det er prøver av god kvalitet» (Emdal, 2020). Hvis K'_0 likevel endres til nærmere isotropisk anbefales at middelspenning holdes konstant fordi man ikke vet nok om hva som skjer med styrkeparametere når middelspenningen avviker fra in situ.

Temaet som har blitt tatt opp er definitivt noe som bør inspiseres videre. Det trengs et flere treaksiale forsøk med parallelltester der p' holdes konstant, mens K'_0 varierer. I denne rapporten hadde mange av CAUa-testene en forholdsvis lav variasjon i K'_0 , fordi resultatene også skulle brukes i prosjekteringssammenheng. Derfor anbefales det større variasjon og testing både over og under $K'_{0,reell}$ for samme parallell (samme dybde i samme blokk).

6.1 Svar på problemstilling

- Er det grunnlag til å tro at K'_0 er en avgjørende input-parameter i utførelse av treaksiale tester?

Hviletrykkskoeffisienten er ikke en avgjørende input-parameter i seg selv, men den er med å bestemme horisontalspenning og middelspenning hvilket gjør den viktig i

beregningene av konsolideringsspenninger. Gitt at middelspenningen spiller hviletrykkskoeffisienten mindre rolle for styrkeparameterne enn forventet.

- Anbefales å benytte isotropisk konsolidering eller anisotropisk konsolidering?

Både isotropisk og anisotropisk konsolidering kan brukes i mange tilfeller ved testing av overkonsolidert leire, men en bør uansett ha god kontroll på middelspenningen. Når en likevel må finne hviletrykkskoeffisienten for å finne middelspenningen reiser det et annet spørsmål. Hvorfor skal man ikke benytte anisotrop konsolidering, når en likevel har beregnet vertikal og horisontal konsolidering. Gitt at en har apparatur som tillater det, anbefales derfor å bruke anisotrop konsolidering fordi det er ønskelig å tilbakeføre jorden til nærmest mulig in situ forhold.

- Finnes det en sammenheng mellom valg av K'_0 i konsolideringsfasen og grad av prøveforstyrrelse?

Denne studien har antydnet at det ikke er noen sammenheng mellom hviletrykkskoeffisient og prøveforstyrrelser når middelspenningen ligner in situ middelspenning. Dette er dokumentert i Tabell 4.14 og omtalt i Kapittel 5.6.

- Kan ansvarlig ingeniør med sikkerhet vite at valgt K'_0 og konsolideringsprosedyre gir testresultater som er til å realistiske og troverdige?

Med gode prosedyrer og prøver av god kvalitet vil resultatene være realistiske og troverdige selv med $K'_0 = K'_{0, reell} \pm 0,2$ gitt an middelspenningen er realistisk.

- Hva slags data ingeniørene bør anvende til å finne K'_0 og hvorfor er et gjennomtenkt valg av K'_0 så viktig?

Ingeniørene bør, i henhold til dette litteraturstudiet, legge størst vekt på overkonsolideringsratio i valg av hviletrykkskoeffisient for kohesjonsjordarter. L'Heureux sin formel $K'_0 = 0,53OCR^{0,47}$ er tilnærmet lik EC7 sin overslagsformel $K'_0 = (1 - \sin\phi)\sqrt{OCR}$ når friksjonsvinkelen er cirka 28 grader, hvilket stemmer godt for norsk leire og begge gir presise anslag av K'_0 .

Referanser

Abdelhamid, M. S. & Krizek, R. J., 1976. At-Rest Lateral Earth Pressure of Consolidating Clay. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, pp. 721-738.

Berre, T., 1981. *Triaxial testing at the Norwegian Geotechnical Institute*, s.l.: NGI.

Brooker, E. & Ireland, H., 1965. Earth Pressures at Rest Related to Stress History. *Canadian Geotechnical Journal*, |(1), pp. 1-15.

E. a., 2019. *TBA4110 - Parameterrapport gruppe 10*, Trondheim: NTNU.

Emdal, A., 1999. *Introduction to geotechnical engineering (in Norwegian)*. s.l.:s.n.

Emdal, A., 2020. *Konklusjon av masteroppgave [Intervju]* (03 Juni 2020).

Emdal, A., Nordal, S., Grande, L. & Janbu, N., 2017. *Geotechnics Field and Laboratory investigations*. Trondheim: NTNU Geotechnical division.

Google, 2020. *maps.google.com*. [Internett]

Available at:

<https://www.google.no/maps/place/D%C3%B8dens+dal/@63.419458,10.4034506,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x466d31be20747581:0x5e14f8d98eb2679b!8m2!3d63.419>

458!4d10.4056394

[Funnet 07 Februar 2020].

Gylland, A., 2020. *Hvilesteg før skjærfasen* [Intervju] (15 April 2020).

Indgaard, J. F., 2017. *The Effects of Different Earth Pressure Coefficient at Rest in Triaxial Shear Tests on Clay*, Trondheim: Royal Institute of Technology, Masteroppgave.

Jaky, J., 1944. The coefficient of pressure at rest. *J. Soc. Hung. Archit. Eng*, pp. 355-388.

Janbu, N., 1963. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. *Proceedings of European Conference on soil mechanics and Foundation Engineering (ECSMFE)*, pp. 19-25.

Karlsrud, K., Otter, R. & Gjeldsvik, V., 2013. *Rapport nr. 41 State-of-the-art: Blokkprøver*, s.l.: Norges vassdrags- og energidirektorat i et samarbeid med Statens vegvesen og Jernbaneverket.

Kornbrekke, H. A., 2012. *Skråningsstabilitet ved Rein kirke med utgangspunkt i resultater fra Sherbrooke blokkprøver*, Trondheim: NTNU, Masteroppgave.

Lepkowski, O., 2019. *Innflytelse av raske trykkøkninger på resultater av treksforsøk*, Trondheim: NTNU, Masteroppgave.

L'Heureux, J.-S. et al., 2017. *BESTEMMELSE AV HVILETRYKK (K₀) I NORSKE LEIRER – ANBEFALINGER BASERT PÅ EN SAMMENSTILLING AV LAB-, FELT- OG ERFARINGSDATA*, s.l.: s.n.

Lunne, T., Berre, T. & Strandvik, S., 1997. *Sample disturbance effects in soft low plastic Norwegian clays*, s.l.: NGI .

Mayne, P. W., 1984. K₀ - Cu/sig'vo Trends for Overconsolidated clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(10), pp. 1511-1516.

Mayne, P. W., 1986. CPT indexing of in situ OCR in clays. *Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*, p. 780-793.

Mayne, P. W. & H, K. F., 1982. K₀-OCR Relationships in soil. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Juni, pp. 851-872.

NGU, 2019. *ngu.no*. [Internett]

Available at: http://geo.ngu.no/kart/losmasse_mobil/

[Funnet 07 Februar 2020].

NVE, SVV & jernbaneverket, 2014. *Valg av karakteristisk CuA - profil basert på felt- og laboratorieundersøkelser*. Oslo: Norges Vassdrag og Energidirektorat.

Reite, A., Sveian, H. & Erichsen, E., 1999. Trondheim fra istid til nåtid - landskapshistorie og løsmasser. *Gråsteinen 5*.

Robertson, P., u.d. *Soil Behaviour Type from the CPT: an update*, Signal Hill, CA: Gregg Drilling & Testing Inc..

SVV, 2016. *Laboratorieundersøkelser Håndbok R210*. s.l.:Vegdirektoratet.

Vegdirektoratet, 2010. Kapittel 2 Laboratorieundersøkelser. I: *Geoteknikk i vegbygging Håndbok 016*. Oslo: SVV.

Vestgården, T., 2020. *Besøk på NGI sitt laboratorium i Oslo* [Intervju] (29 Januar 2020).

Tegninger og vedlegg

Tegning 1: Oversiktskart

Tegning 2: Topografisk løsmassekart

Tegning 3: Detaljert borplan

Vedlegg 1: Sonderinger fra Felt- og laboratorieundersøkelser fra Høst 2019

| Tegningsnummer | Borpunkt ID |
|-----------------------|--------------------|
| 4 | BP01 |
| 5 | BP02 |
| 6 | BP03 |

Vedlegg 2: Koordinat- og borpunktliste

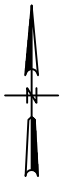
Vedlegg 3: Piezometermålinger

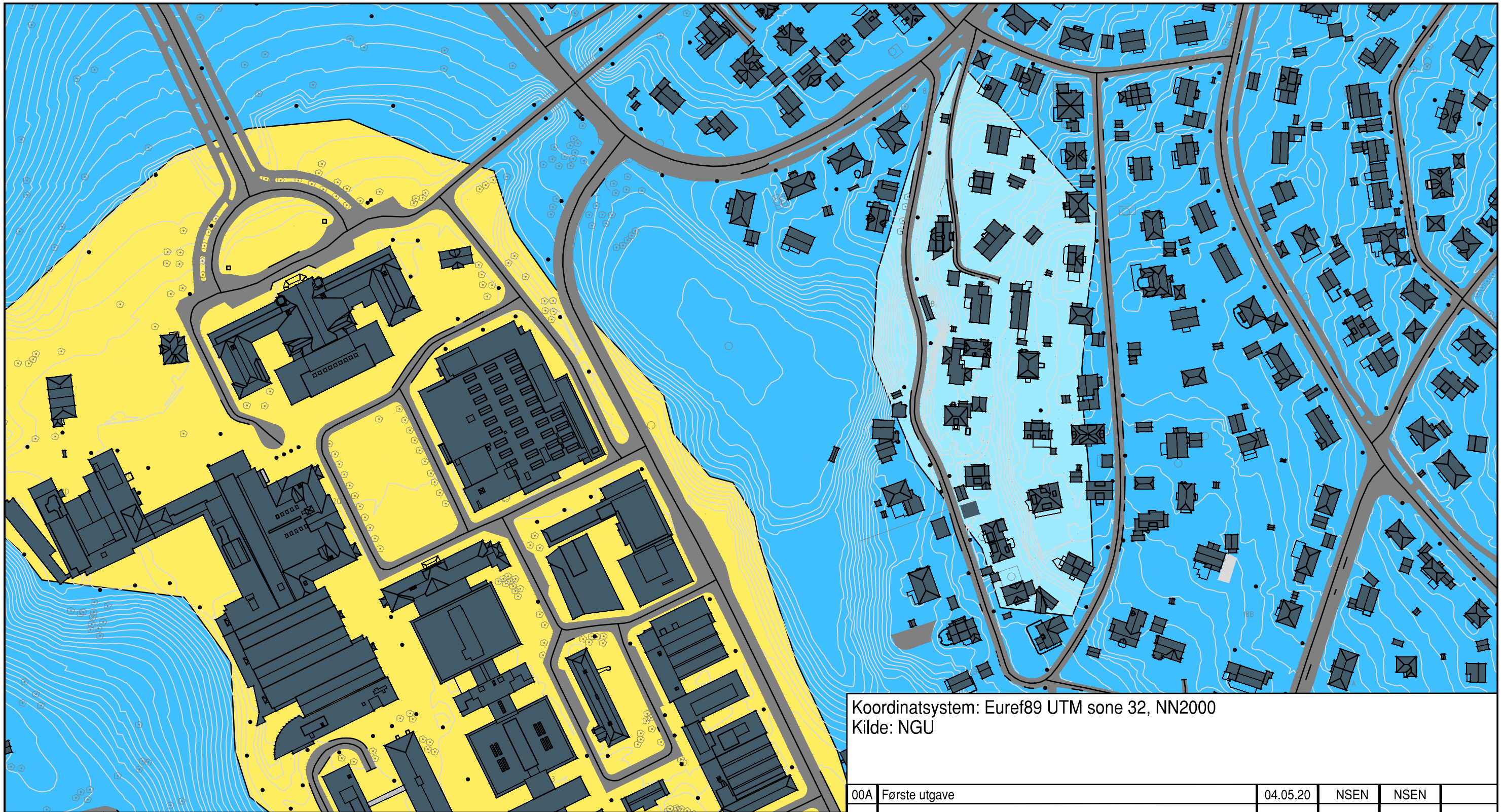
Vedlegg 4: Laboratorierapport fra Multiconsult



□ Undersøkellesområde

| | | | | | |
|--|--------------------|-----------------|-------------------|-------|--|
| 00A | Første utgave | 01.05.20 | NSEN | NSEN | |
| Rev. | Revisjonen gjelder | Dato | Tegnet av | | |
| <p>Høgskoleringen - Høgskoledalen</p> <p>Oversiktskart</p> | | Målestokk: | | | |
| | | - | | | |
| | | Produsent | | | |
| | | Filnavn | Oversiktskart.dwg | | |
| <p>Betydning av K'0 på styrkeparametere ved treksiell testing - Masteroppgave vår 2020</p> | | Tegningsnummer: | | Rev.: | |
| | | 1 | | 00A | |





Koordinatsystem: Euref89 UTM sone 32, NN2000
 Kilde: NGU

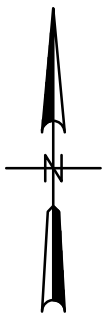
| | | | | | |
|------|--------------------|----------|-----------|----------------|-------------|
| 00A | Første utgave | 04.05.20 | NSEN | NSEN | |
| Rev. | Revisjonen gjelder | Dato | Tegnet av | Kontrollert av | Godkjent av |

Høyskoledalen
 Topografisk løsmassekart

| | |
|---------------|-----------------------------|
| Målestokk: | 1:2000 |
| Oppdragsnr. | |
| Produsent | |
| Prod.tegn.nr. | Topografisk kart 1_2000.dwg |

Betydning av K'0 på styrkeparametere ved treaksiell tesning - Masteroppgave vår 2020

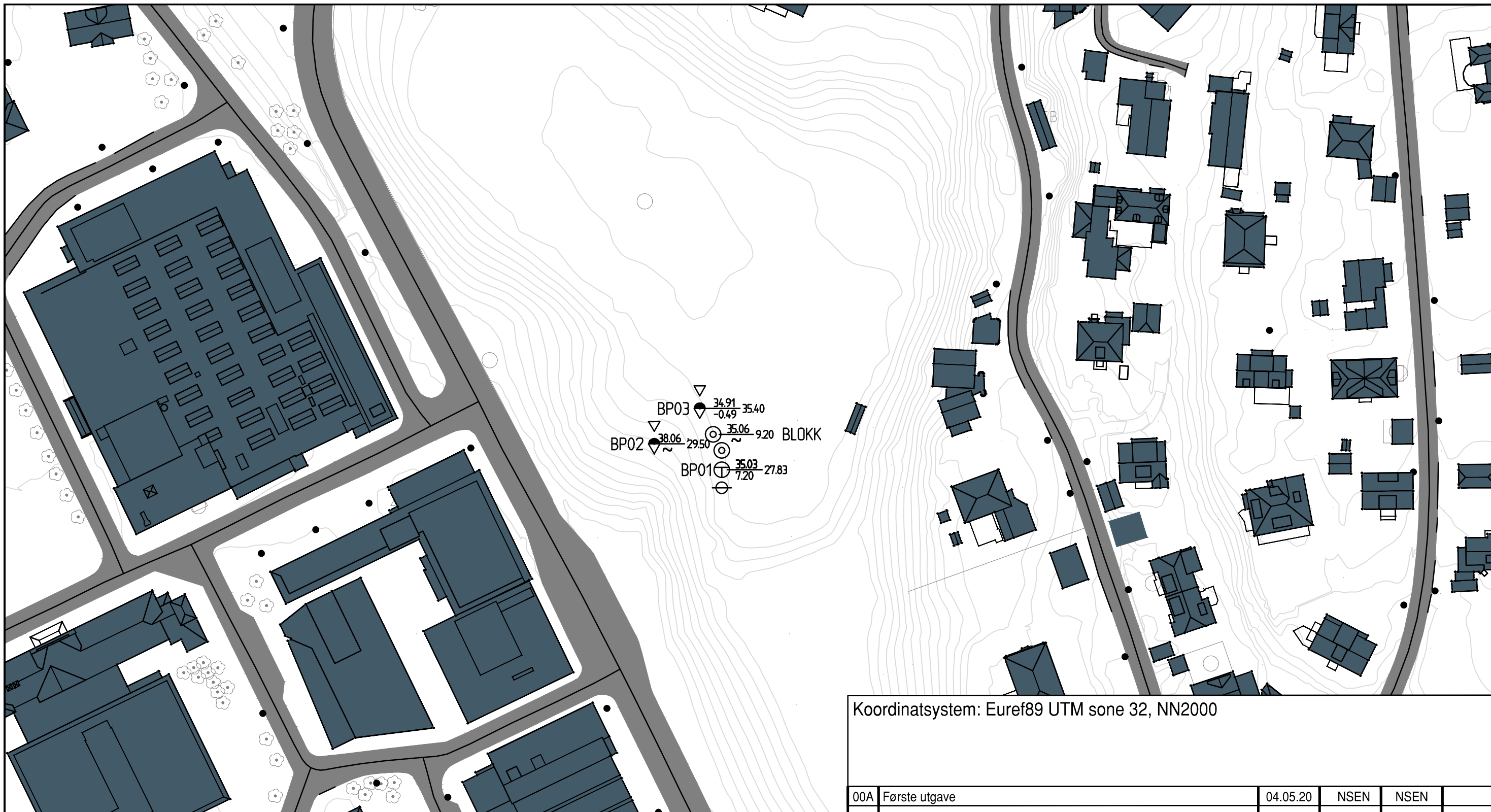
| | | | |
|---------------------|---|-----------|--|
| Tegningsnummer: | 2 | Rev.: | |
| FDV tegningsnummer: | | FDV rev.: | |



Ekvidistanse 1 m

Løsmasser

| | |
|--|----------------------------|
| | Tynn hav- /strandavsetning |
| | Tykk havavsetning |
| | Elveavsetning |



BP03 $\frac{34.91}{-0.49}$ 35.40
 BP02 $\frac{38.06}{-29.50}$ 35.06 9.20 BLOKK
 BP01 $\frac{35.03}{-7.20}$ 27.83

Koordinatsystem: Euref89 UTM sone 32, NN2000

| | | | | | |
|------|--------------------|----------|-----------|----------------|-------------|
| 00A | Første utgave | 04.05.20 | NSEN | NSEN | |
| Rev. | Revisjonen gjelder | Dato | Tegnet av | Kontrollert av | Godkjent av |

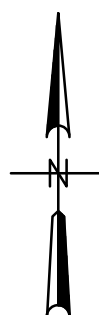
Høyskoledalen

Detaljert borplan

| | |
|---------------|-----------------------|
| Målestokk: | 1:1000 |
| Oppdragsnr. | |
| Produsent | |
| Prod.tegn.nr. | Detaljert borplan.dwg |

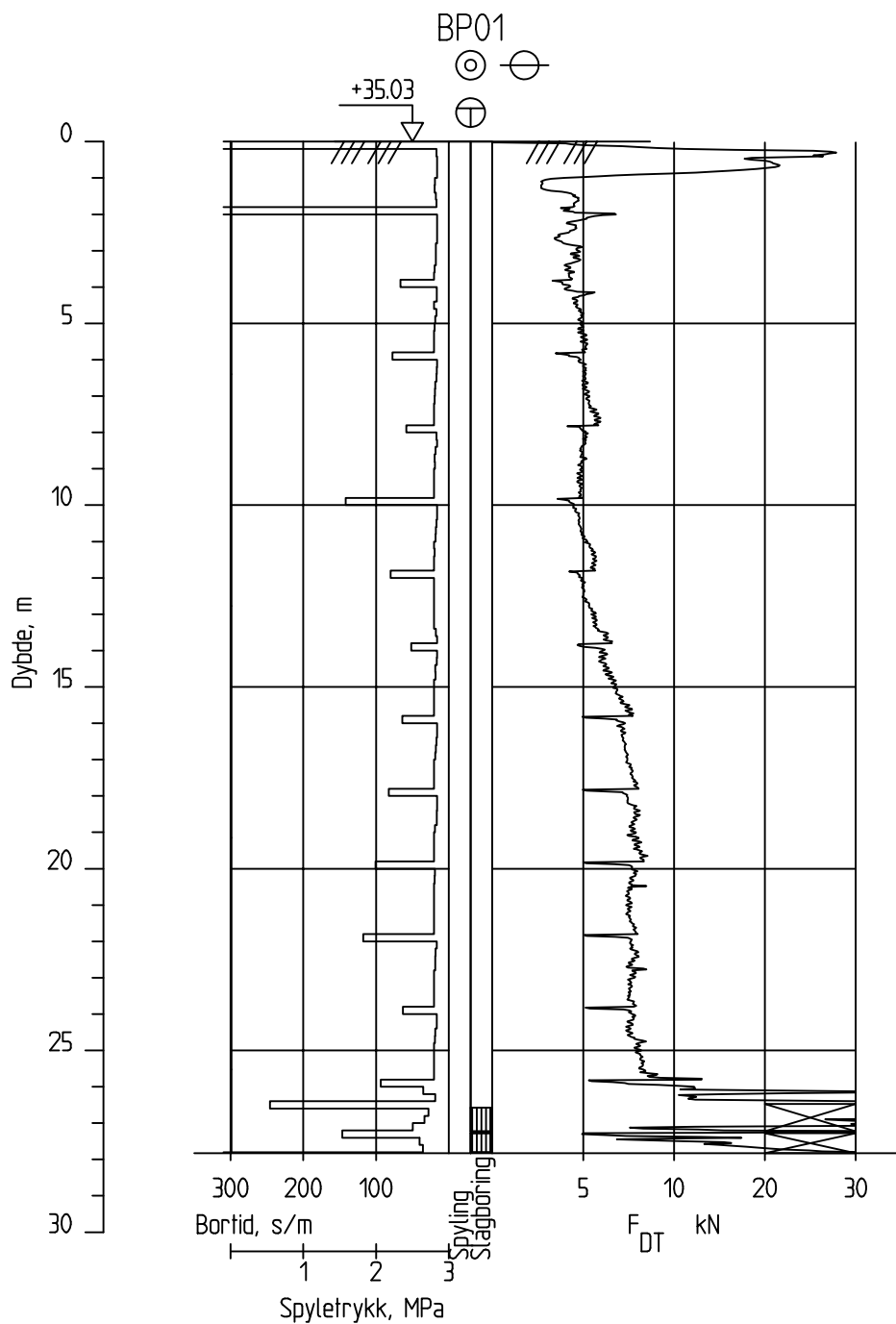
Betydning av K'0 på styrkeparametere ved treaksiell tesning - Masteroppgave vår 2020

| | | | |
|---------------------|---|-----------|--|
| Tegningsnummer: | 3 | Rev.: | |
| FDV tegningsnummer: | | FDV rev.: | |



TEGNFORKLARING

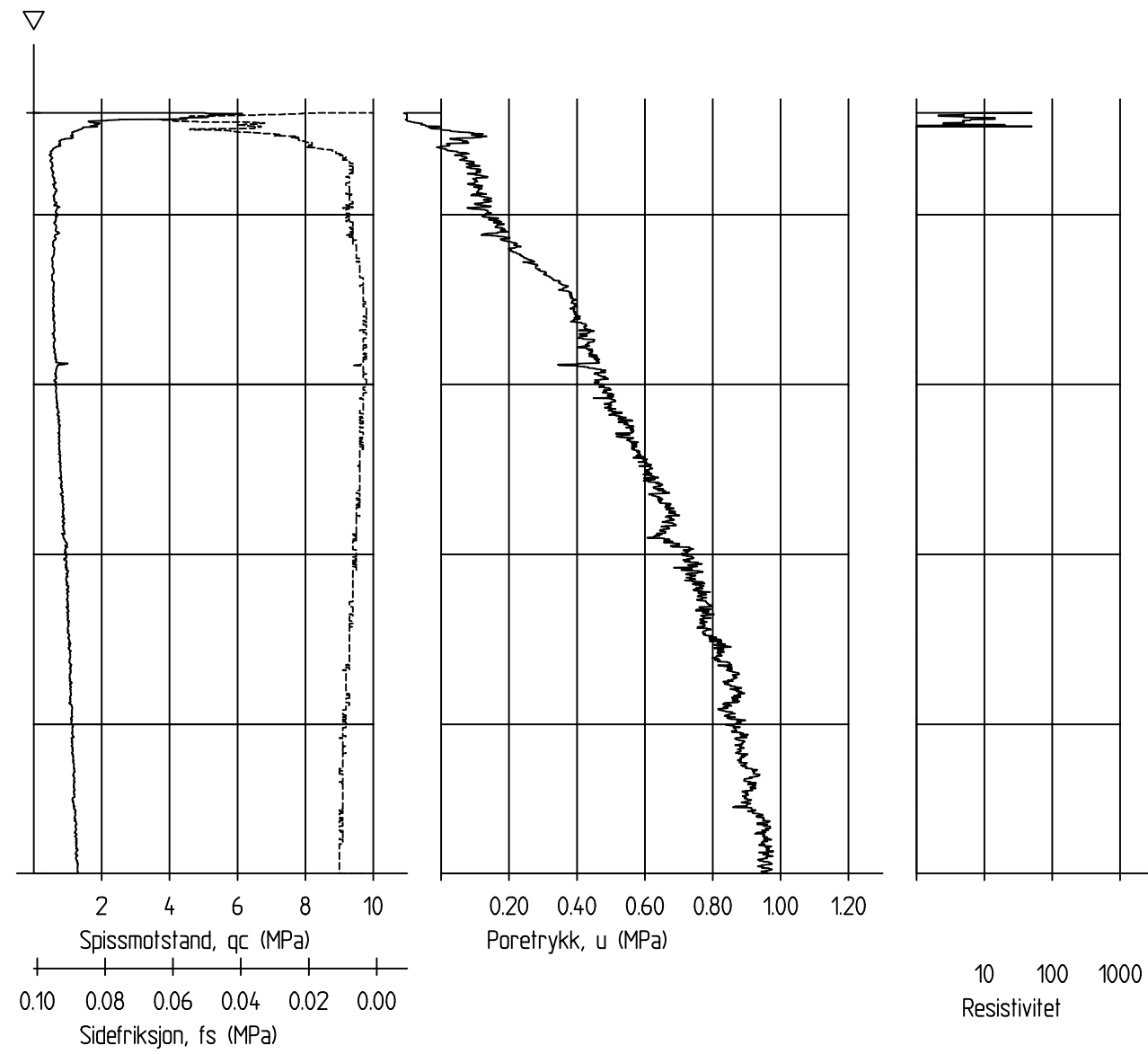
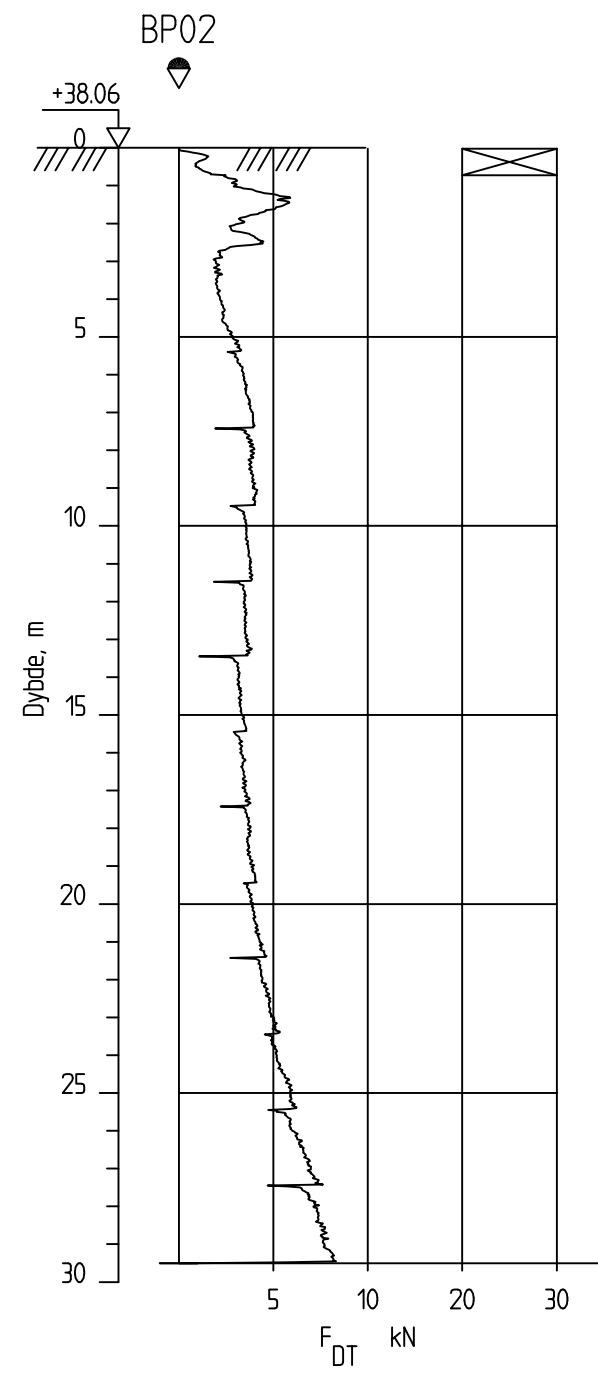
- Dreietrykkssondering
 - Totalsondering
 - Trykksondering
 - Poretrykksmåling
 - Prøveserie
- Borhull nr. $\frac{\text{Terreng (bunn) kote}}{\text{Antatt bergkote}}$ Boret dybde + (boret i berg)
 Ekvidistanse 1 m



Dato boret :22.08.2019

Posisjon: X 7032994.51 Y 5702314.7

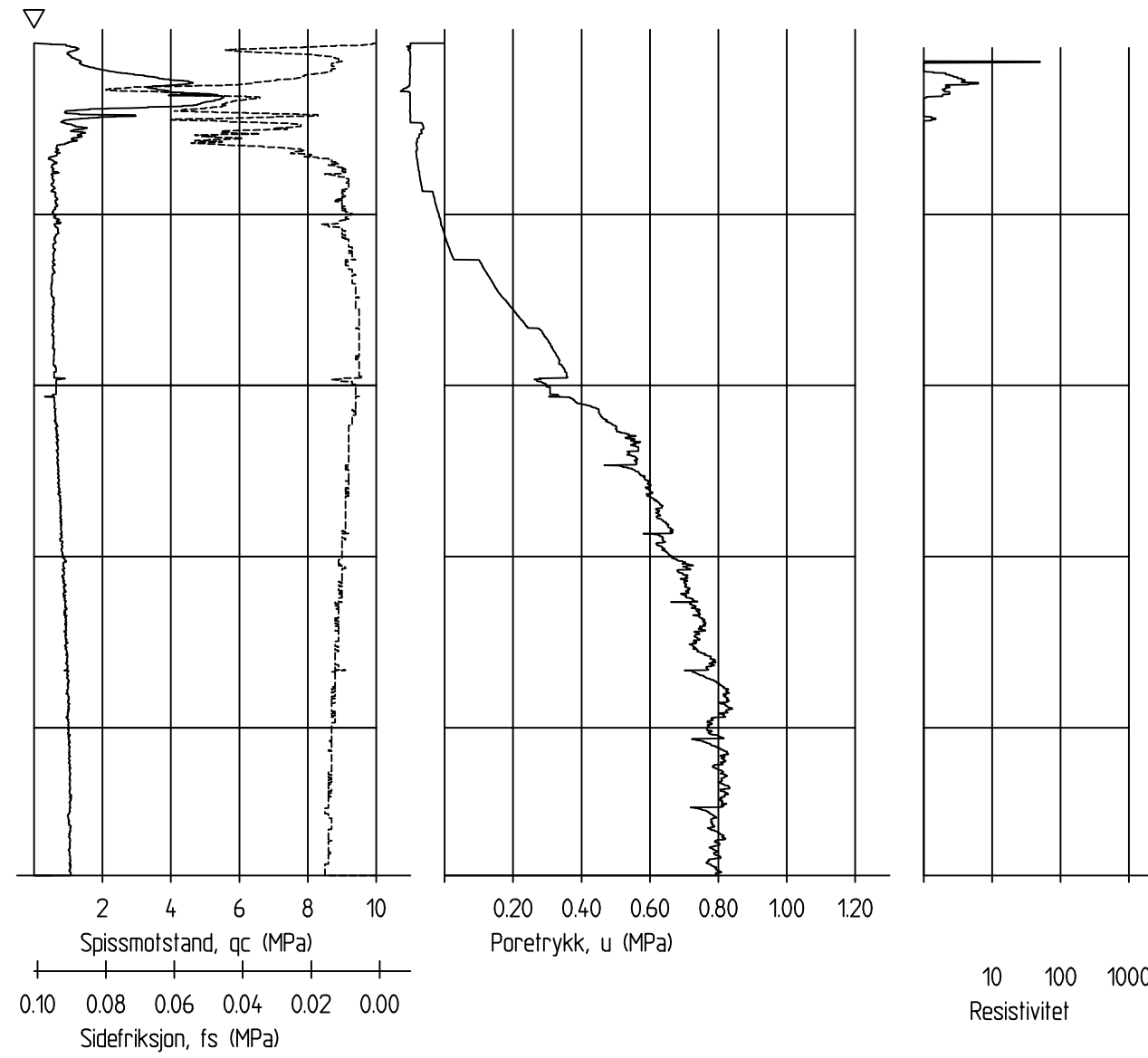
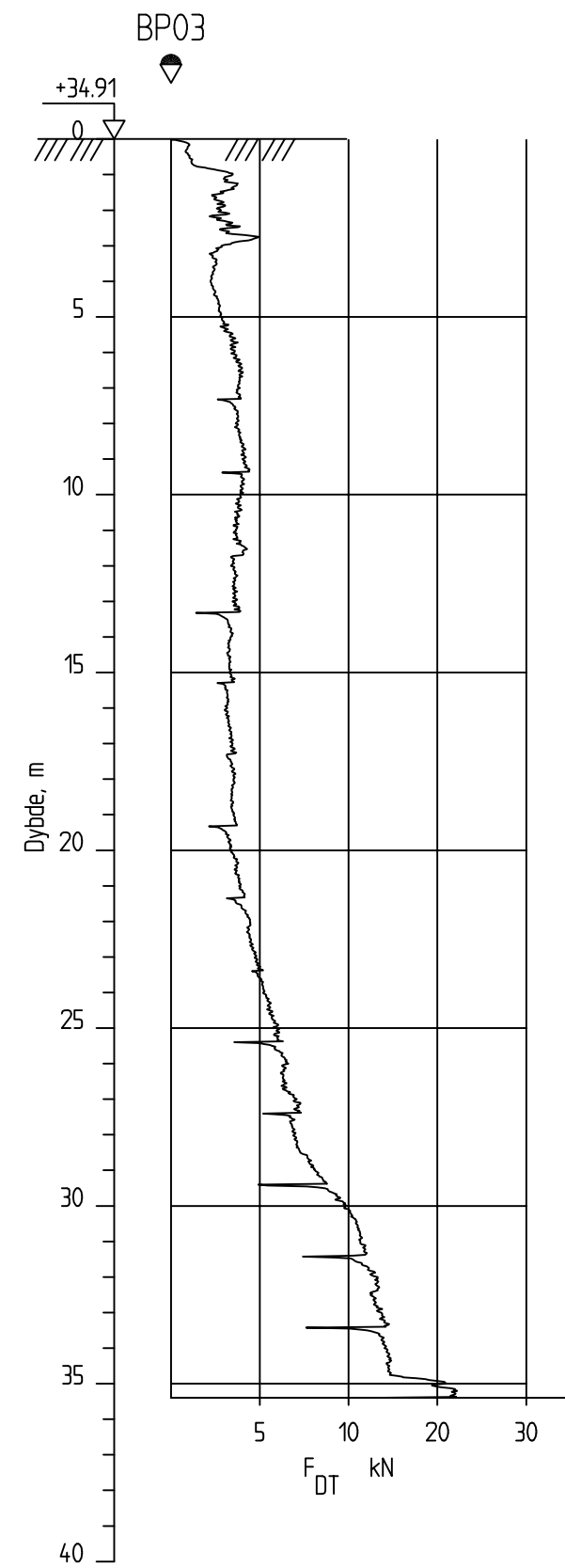
| | | | |
|--|--------------------|----------------------------------|------------------------|
| Totalsondering Borprofil | | Sonderingsnummer Borhull BP01 | |
| Betydning av K_0 på styrkeparametere ved triaksial testing | | Målestokk M = 1 : 200 | Godkjent |
| | | Fag RIG | Sidemanskontr. NSEN |
| Masteroppgave vår 2020 | Dato 30.04.2020 | Format A4 | Saksbehandler NSEN |
| | Oppdragsnr. | Tegningsnr. 4 | Rev. |



Dato boret 11.09.2020

Posisjon: X 7033001.25 Y 570213.86

| | | | |
|--|--------------------|----------------------------------|------------------------|
| Dreietrykksondring CPT-sondring Borprofil | | Sonderingsnummer Borhull BP02 | |
| Betydning av K^0 på styrkeparametere ved triaksial testing | | Målestokk M = 1 : 200 | Godkjent |
| | | Fag RIG | Sidemanskontr. NSEN |
| Masteroppgave vår 2020 | Dato 30.04.2020 | Format A3 | Saksbehandler NSEN |
| | | Tegningsnr. 5 | Rev. |



Dato boret :11.09.2019

Posisjon: X 7033010.49 Y 570225.72

| | | | |
|--|--------------------|----------------------------------|------------------------|
| Dreietrykkssondering CPT-sondering | | Sonderingsnummer Borhull BP03 | |
| Betydning av K_0 på styrkeparametere ved triaksial testing | | Målestokk M = 1 : 200 | Godkjent |
| | | Fag RIG | Sidemanskontr. NSEN |
| Masteroppgave vår 2020 | Dato 30.04.2020 | Format A3 | Saksbehandler NSEN |
| | Oppdragsnr. | Tegningsnr. 6 | Rev. |

Vedlegg 2

Koordinat- og borpunktliste

Betydning av K'_0 på styrkeparametere ved triaksial testing

| Borhull | Dato boret | Metode | Koordinater (EUREF89 UTM sone 32. NN2000) | | | Bergkote [m. o. h.] | Boret i [m] | | |
|---------|------------|----------------|--|-----------|--------|------------------------|-------------|------|-------|
| | | | X | Y | Z | | Løsmasser | Berg | Total |
| BP01 | 22.08.2019 | Total Prøve PZ | 7032994,51 | 570231,47 | +35,03 | - | 27,83 | - | 27,83 |
| BP03 | 11.09.2019 | DrT Cpt | 7033010,49 | 570225,72 | +34,91 | - | 35,40 | - | 35,40 |
| BP02 | 10.09.2019 | DrT Cpt | 7033001,25 | 570213,87 | +38,06 | - | 29,50 | - | 29,50 |
| BLOKK | 02.04.2020 | Prøve | 7033003,74 | 570229,25 | +35,06 | - | 9,20 | - | 9,20 |

Vedlegg 3
Piezometermålinger

Betydning av K'_0 på styrkeparametere ved triaksial testing

| Borhull | Dato satt ned | Terrengekote (moh) | Ror over terreng (m) | Ror under terreng (m) | Spiss under terreng (m) | Spisskote (moh) | Måling 11.09.20 fra topp rør (m) | Vannkote 11.09.20 (moh) |
|----------------|----------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|--------------------------------|
| BH1 | 06.09.19 | +35,02 | 1,0 | 4,0 | 5,0 | +30,02 | 2,41 | +33,61 |
| BH1 | 06.09.19 | +35,02 | 1,0 | 9,0 | 10,0 | +25,02 | 3,09 | +32,93 |

TEKNISK RAPPORT – LABORATORIEOPPDRAG

| | | | |
|---------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|
| OPPDRAG | NTNU Vurdering av byggbarhet | DOKUMENTKODE | 10215021-02-RIG-NOT-001 |
| EMNE | Laboratorierapport | TILGJENGELIGHET | Åpen |
| OPPDRAGSGIVER | Cowi Norge AS | OPPDRAGSLEDER | Anders S. Gylland |
| KONTAKTPERSON | Arnfinn Emdal | SAKSBEHANDLER | Magne Wold |
| KOPI | Niklas Engebretsen | ANSVARLIG ENHET | 3015 Midt Grunnundersøkelser |

1 Bakgrunn

Multiconsult Norge AS har på oppdrag fra Cowi Norge AS utført laboratorieundersøkelser for oppdrag 10215021-02 NTNU Vurdering av byggbarhet. Prøvetaking er utført av studentgrupper ved NTNU medio februar 2020, og materialet ble levert vårt laboratorium uke 13. Foreløpige resultater er tidligere sendt til Arnfinn Emdal og Niklas Engebretsen.

2 Omfang av laboratorieundersøkelsen

Laboratorieundersøkelsen ble utført uke 13 - 14, 2020 og omfatter følgende undersøkelser:

| Undersøkelse | Materiale | Type | Antall |
|---------------|-----------|--------------------------|--------|
| Rutine | Kohesjon | Blokkprøve | 2 |
| Korngradering | Kohesjon | Hydrometer, slemming | 2 |
| Korndensitet | Kohesjon | Blokk | 2 |
| Ip | Kohesjon | | 2 |
| Ødometer | Kohesjon | CRS | 3 |
| Ødometer | Kohesjon | CRS, av- og rebelastning | 3 |
| Treaks | Kohesjon | CAUa | 4 |
| Treaks | Kohesjon | CAUp | 2 |

Undersøkelsen er utført av laborant Vidar Tøndervik og Marthe Sofie Haugan. Opptegning av resultater er inkludert i tegningsvedlegg.

3 Prosedyrer for gjennomføring

Multiconsult utfører sine laboratorieundersøkelser i henhold til Norsk standard NS 8000-serien og relevante ISO-standarder, samt vår interne laboratoriehåndbok som er basert på disse. En oversikt over gjeldende standarder er vist i vedlegg 01.

| | | | | | |
|------|------------|-------------------|-----------------|------------------|------------------|
| | | | | | |
| 001 | 02.04.2020 | Rapport opprettet | Vidar Tøndervik | Marthe S. Haugan | Andes S. Gylland |
| REV. | DATO | BESKRIVELSE | UTARBEIDET AV | KONTROLLERT AV | GODKJENT AV |

Laboratorierapport

Gjennomføringen av oppdraget er kvalitetssikret i henhold til Multiconsults styringssystem. Systemet er bygget opp med prosedyrer og beskrivelser som er dekkende for kvalitetsstandard NS-EN ISO 9000:2000.

4 Kommentarer til utførte undersøkelser

Laboratorieundersøkelsen er utført i henhold til avtalt omfang med følgende kommentarer:

| Sylindernr/dybde | Merknad/avvik/beskrivelse av undersøkelse |
|------------------------------------|---|
| Blokkprøve nr. 1, dybde 7,05-7,40m | Blokkprøven bestod av KVIKLEIRE, enklest meget små skjellrester. Det ble utført 1 stk rutine, 1 stk korngredning, 1 stk korndensitet, 1stk IP, 2 stk CRS, 1 stk CRS med av- og rebelastning, 2 stk CAUa, samt 1 stk CAUp. Blokkprøven ble preparert i henhold til bestilling. |
| Blokkprøve nr. 2, dybde 8,50-8,85m | Blokkprøven bestod av LEIRE. Det ble utført 1 stk rutine, 1 stk korngredning, 1 stk korndensitet, 1stk IP, 1 stk CRS, 2 stk CRS med av- og rebelastning, 2 stk CAUa, samt 1 stk CAUp. Blokkprøven ble preparert i henhold til bestilling. |

Tegningsliste

| | |
|---------------------------------|------------------|
| 10215021-02-RIG-TEG-200 | Geotekniske data |
| 10215021-02-RIG-TEG-300 | Korngredninger |
| 10215021-02-RIG-TEG-420 til 425 | Ødometerforsøk |
| 10215021-02-RIG-TEG-480 til 485 | Treaksialforsøk |

Vedlegg

Metodestandarder og retningslinjer-laboratorieundersøkelser

| Dybde (m) | Beskrivelse | Prøve | Test | Vanninnhold (%) og konsistensgrenser | | | | | ρ (g/cm ³) | ρ_s (g/cm ³) | Organisk innhold (%) | Udrenert skjærfasthet (kPa) | | | | | | | | | St (-) | | | | |
|-----------|--|-------|-------|--------------------------------------|----|----|----|----|-----------------------------|-------------------------------|----------------------|-----------------------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|--------|--|--|--|------------|
| | | | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | | | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | KVIKKLEIRE, enk meget små skjellrester | | Ø T K | | | | | | 1,79 | 2,79 | | ▼0,16 | ▼0,16 | | | ♂ | | | | | | | | | 130 137 |
| | LEIRE | | Ø T K | | | | | | 1,79 | 2,74 | | ▼0,36 | ▼0,38 | ▼ | ▼ | | ♂ | | | | | | | | 104 67 |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Symboler:



Enaksialforsøk (strek angir aksiall tøyning (%) ved brudd)

- Vanninnhold
- Plastisitetsindeks, I_p

ISO 17829-6: 2017

- Omrørt konus
- Uomrørt konus

- ρ = Densitet
- ρ_s = Korndensitet
- S_t = Sensitivitet

- T = Treaksialforsøk
- Ø = Ødometerforsøk
- K = Korngredning

Grunnvannstand: m
Borbok:

PRØVESERIE

Borhull:

1

NTNU

Blokkprøver NTNU

Dato:

2020-04-02

Multiconsult
www.multiconsult.no

Konstr./Tegnet:

vt

Kontrollert:

mash

Godkjent:

ANG

Oppdragsnummer:

10215021-02

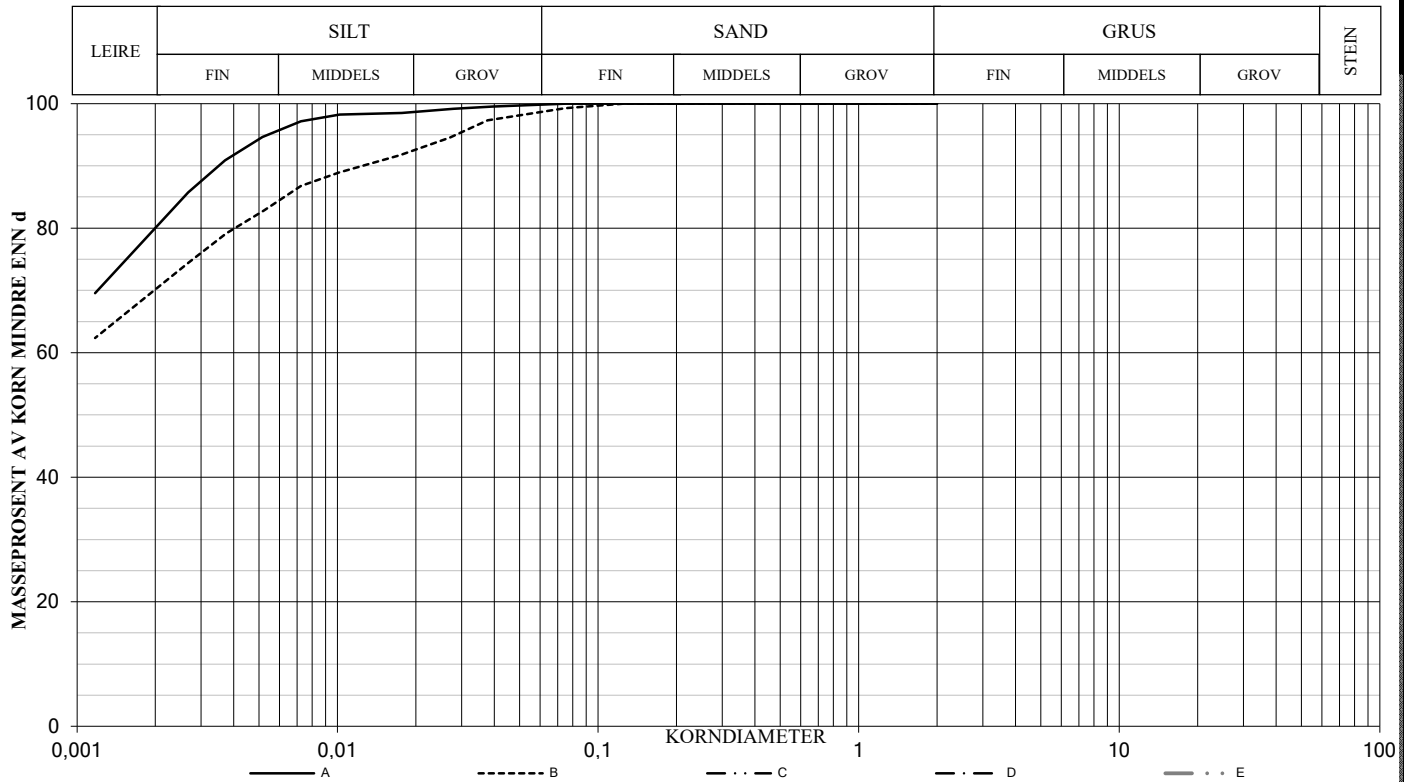
Tegningsnr.:

RIG-TEG-210

Rev. nr.:

00

| SYMBOL | SERIE NR. | DYBDE (m) | JORDARTS BETEGNELSE | Anmerkninger | METODE | | |
|--------|-----------|-----------|---------------------|--------------|--------|----|-----|
| | | | | | TS | VS | HYD |
| A | 1 | 7,2 | LEIRE | KVIKKLEIRE | X | | X |
| B | 1 | 8,7 | LEIRE | | X | | X |
| C | | | | | | | |
| D | | | | | | | |
| E | | | | | | | |



SYMBOL:

Ogl. = Glødetap (%)

Ona. = Humusinnhold (%)

Perm. = Permeabilitet (m/s)

METODE:

TS = Tørr sikt

VS = Våt sikt

HYD = Hydrometer

$$C_z = \frac{D_{30}^2}{(D_{60})(D_{10})}$$

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

| SYM | Tele gruppe | W % | S_u kN/m ² | S_{ur} kN/m ² | Plastisitet | | Glødetap Ogl % | < 0,02 mm % | Tot. densitet kN/m ³ | D_{10} mm | D_{30} mm | D_{50} mm | D_{60} mm |
|-----|-------------|------|-------------------------|----------------------------|----------------|----------------|----------------|-------------|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | | | W _f | W _p | | | | | | | |
| A | | 54,4 | | | | | | | | | | | |
| B | | 47,6 | | | | | | | | | | | |
| C | | | | | | | | | | | | | |
| D | | | | | | | | | | | | | |
| E | | | | | | | | | | | | | |

KORNGRADERING

Cowi
NTNU Vurdering av byggbarhet

Konstr./Tegnet
vt

Kontrollert
mash

Godkjent
ANG

Dato
02.04.20

Multiconsult
www.multiconsult.no

OPPDRAG NR.

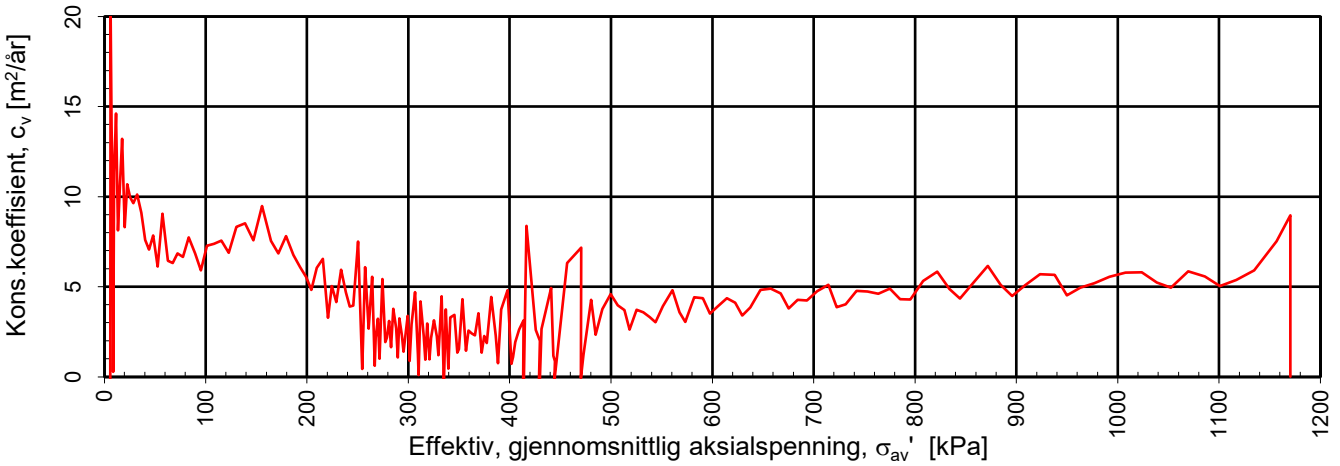
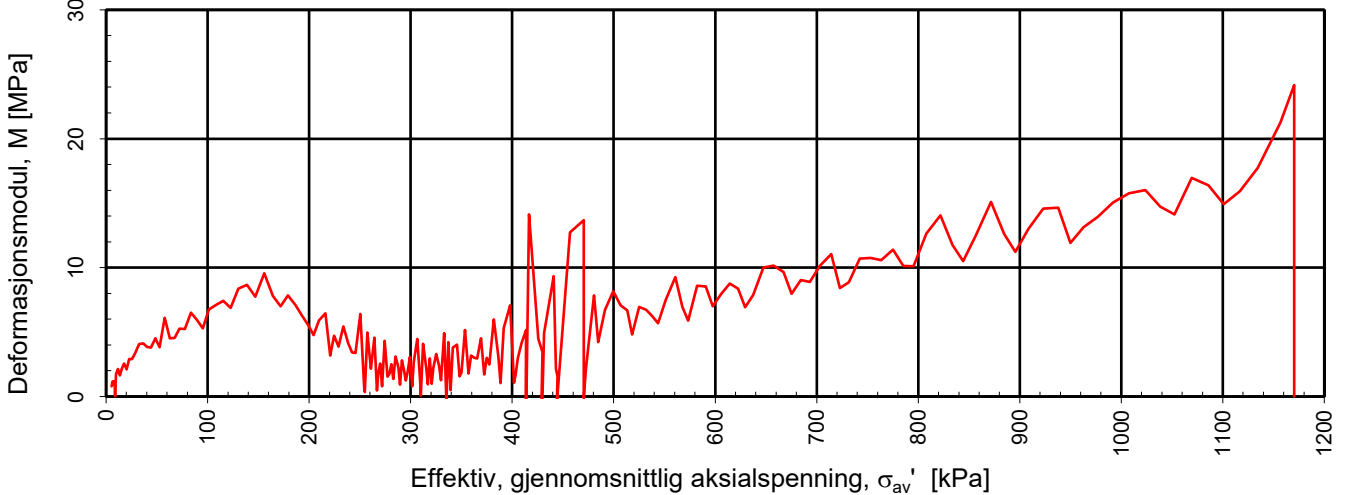
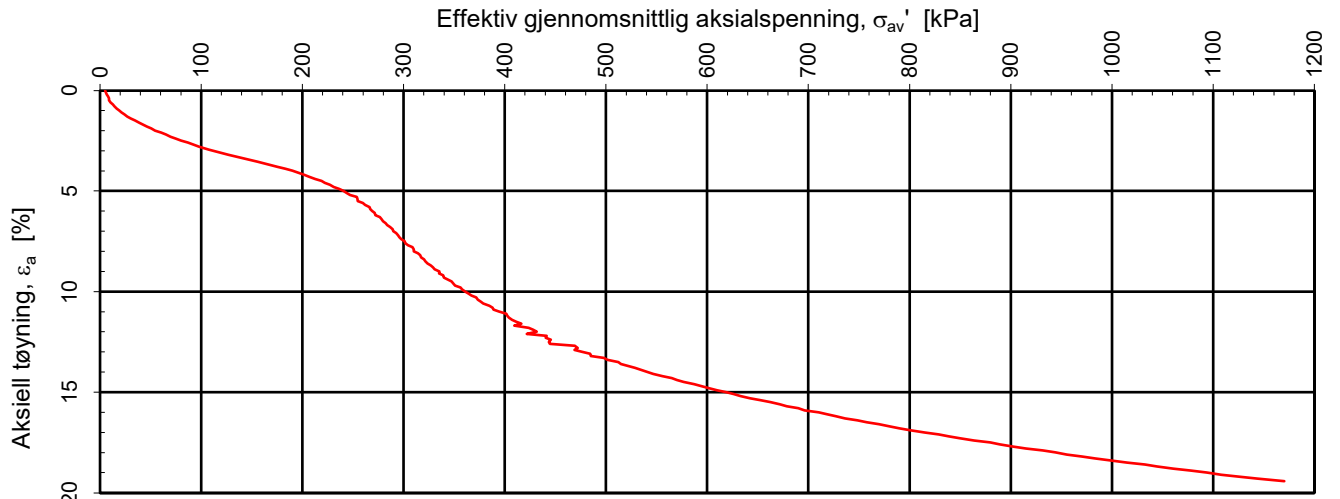
10215021-02

TEGN. NR.

RIG-TEG-320

REV.

00



Densitet ρ (g/cm³): **1,79**
 Vanninnhold w (%): **47,00**
 Effektivt overlagingstrykk, σ_{vo}' (kPa): **60,41**

COWI
NTNU Vurdering av byggbarhet

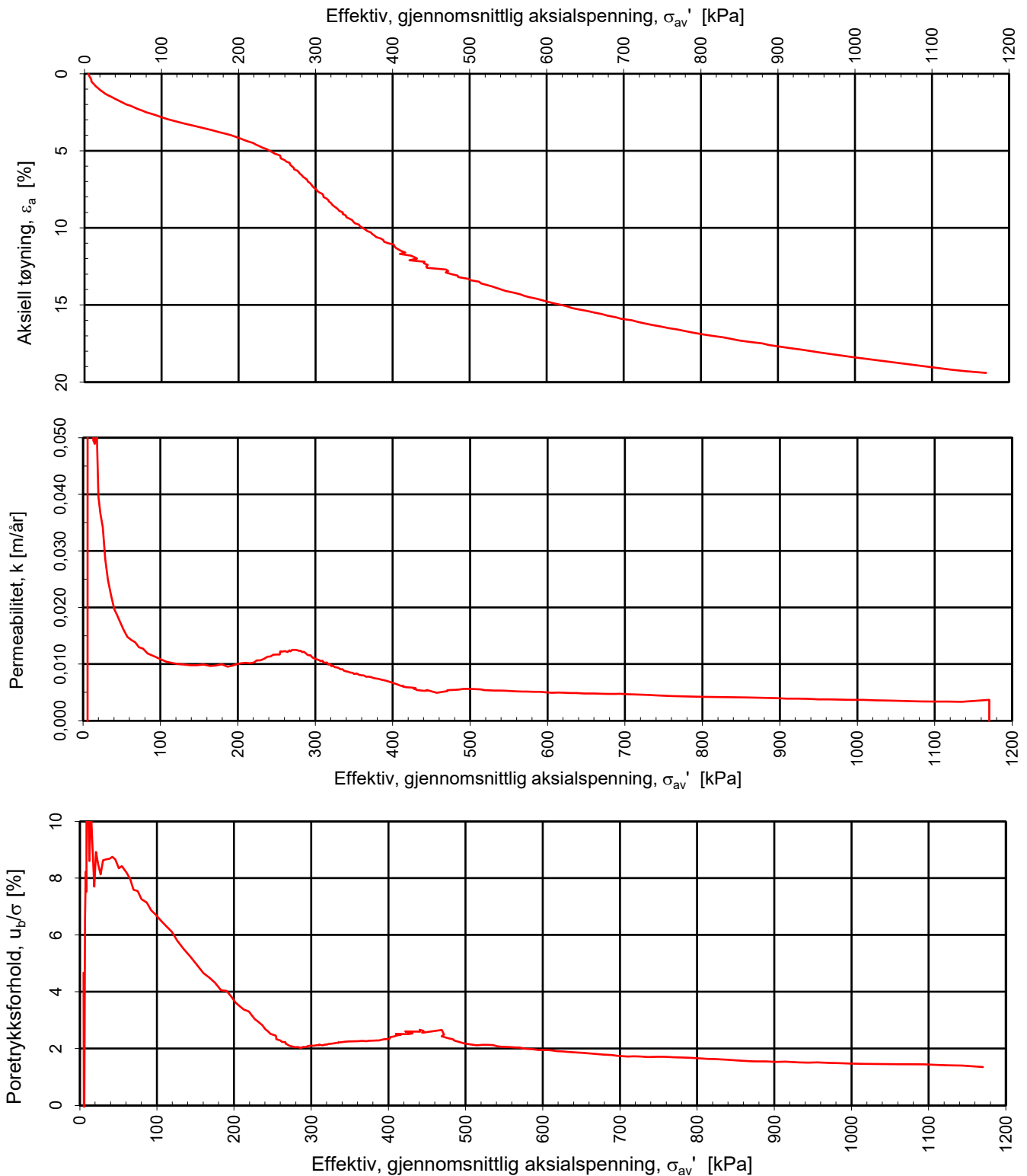
Tegningens filnavn:
 10215021-02-RIG-TEG-400_h1, d7,10m.xlsx

Kontinuerlig ødometerforsøk, CRS-rutine. Plott A: $\sigma_{av}' - \epsilon_a$, M og c_v .

Godkjent: **ANG**
 Programrevisjon: 16.07.2018

MULTICONSULT NORGE AS
 Sluppenvegen 15,
 7486 TRONDHEIM
 Tlf.: 73 10 62 00
 Faks: 73 10 62 30

| | | |
|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Forsøksdato: 25.03.2020 | Dybde, z (m): 7,10 | Borpunkt nr.: NTNU 1 |
| Forsøknr.: 1 | Tegnet av: vt | Kontrollert: mash |
| Oppdrag nr.: 10215021-02 | Tegning nr.: RIG-TEG-420.1 | Prosedyre: CRS |



Densitet ρ (g/cm³):

1,79

Vanninnhold w (%):

47,00

Effektivt overlagingstrykk, σ_{vo}' (kPa):

60,41

COWI

NTNU Vurdering av byggbarhet

Kontinuerlig ødometerforsøk, CRS-rutine. Plott B: $\sigma_{av}' - \epsilon_a$, k og u_b/σ .

Tegningens filnavn:

10215021-02-RIG-TEG-400_h1, d7,10m.xlsx

**MULTICONSULT
NORGE AS**

Sluppenvegen 15,
7486 TRONDHEIM
Tlf.: 73 10 62 00
Faks: 73 10 62 30

Forsøksdato:

25.03.2020

Dybde, z (m):

7,10

Borpunkt nr.:

NTNU 1

Forsøknr.:

1

Tegnet av:

vt

Kontrollert:

mash

Oppdrag nr.:

10215021-02

Tegning nr.:

RIG-TEG-420.2

Prosedyre:

CRS

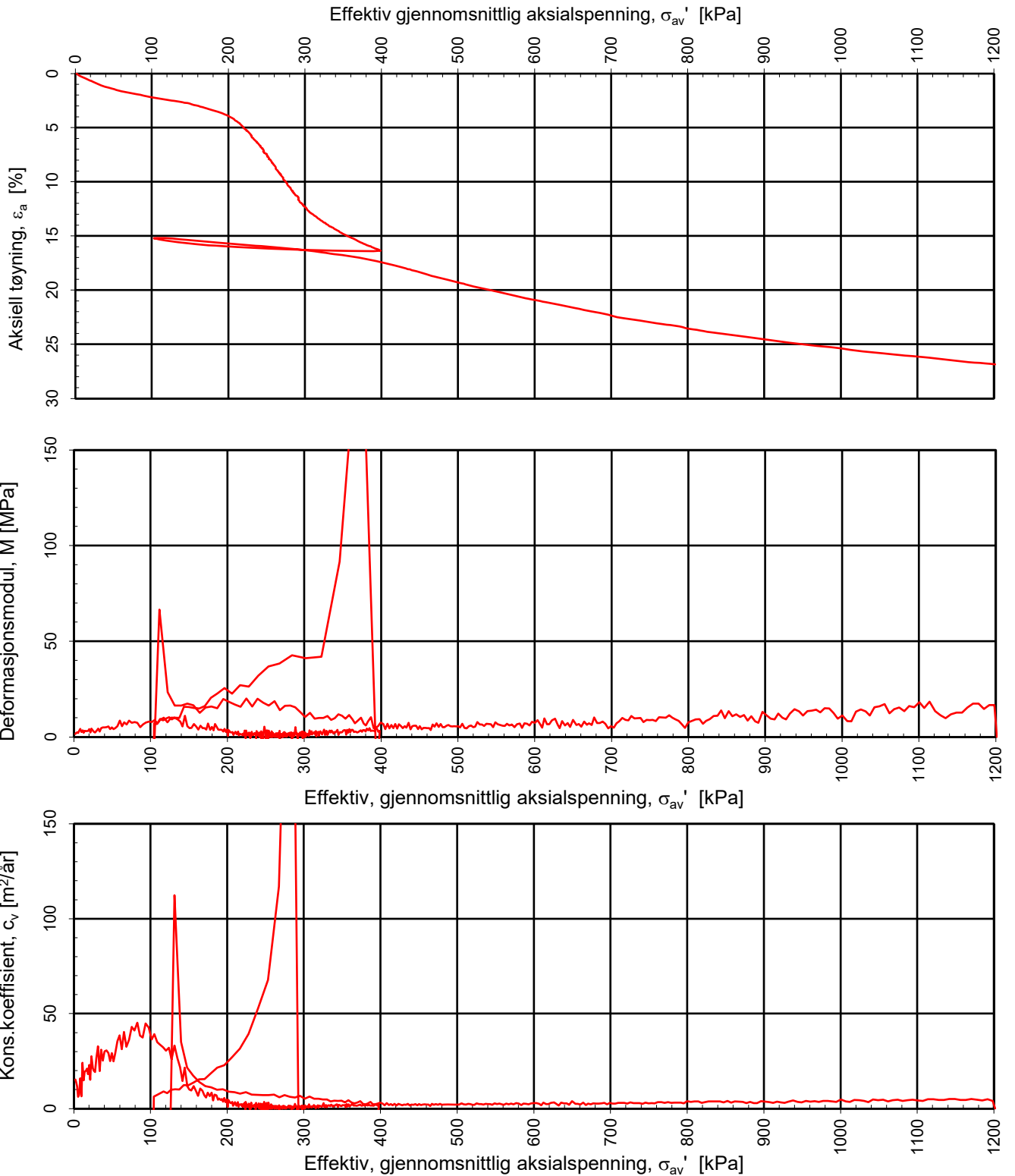
Godkjent:

ANG

Programrevisjon:

16.07.2018

**Multi
consult**



COWI
NTNU Vurdering av byggharhet

Kontinuerlig ødometerforsøk, CRS-rutine. Plott A: $\sigma_{av}' - \epsilon_a$, M og c_v .

Tegningens filnavn:

10215021-02-RIG-TEG-421_h1,d7,20m

Multi
consult

MULTICONSULT
NORGE AS

Sluppenvegen 15,
 7486 TRONDHEIM
 Tlf.: 73 10 62 00
 Faks: 73 10 62 30

Forsøksdato:

25.03.2020

Dybde, z (m):

7,20

Borpunkt nr.:

NTNU 1

Forsøknr.:

2

Tegnet av/kontrollert lab:

vt

Kontrollert:

mash

Godkjent:

ANG

Oppdrag nr.:

10215021-02

Tegning nr.:

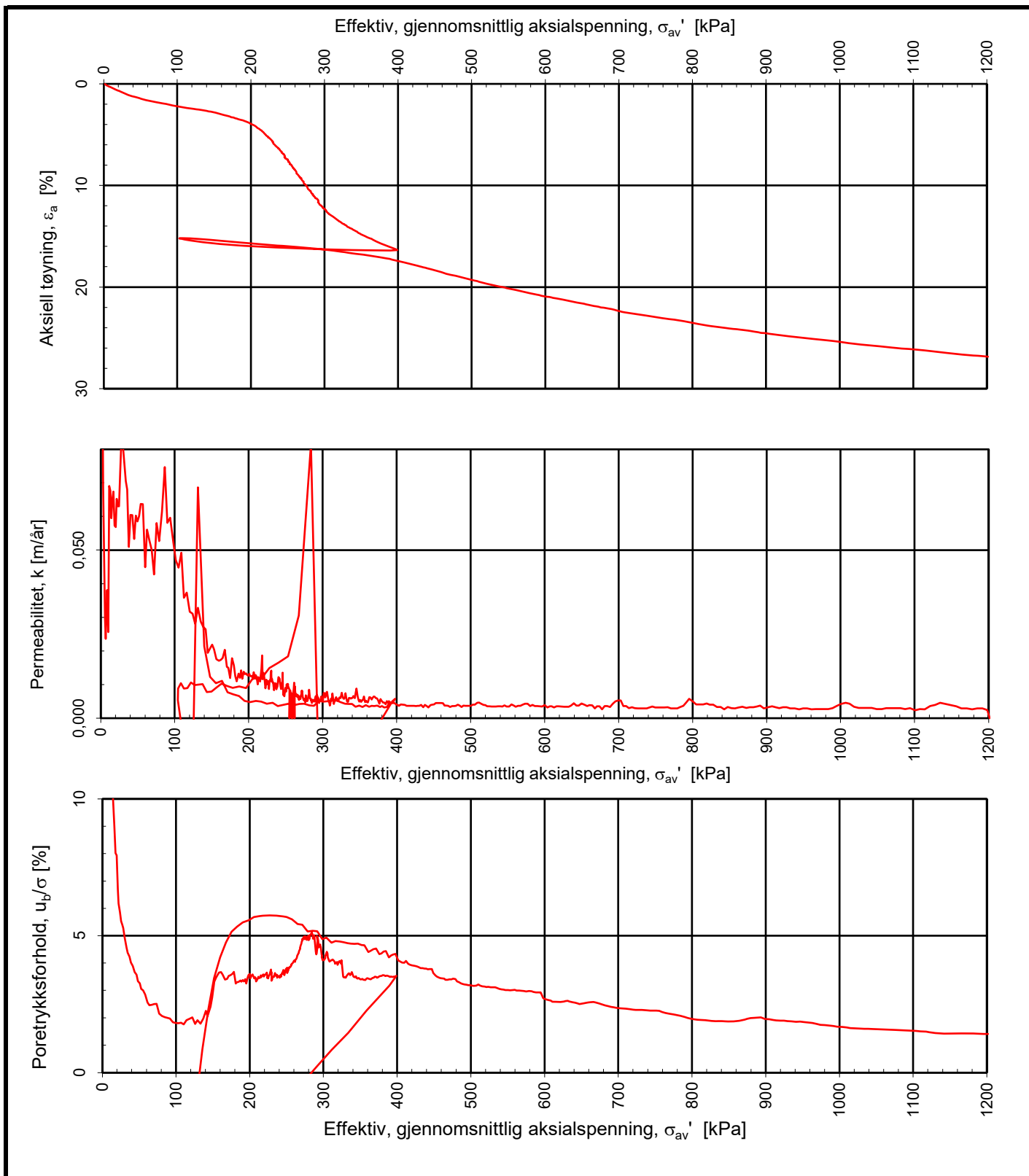
RIG-TEG-421.1

Prosedyre:

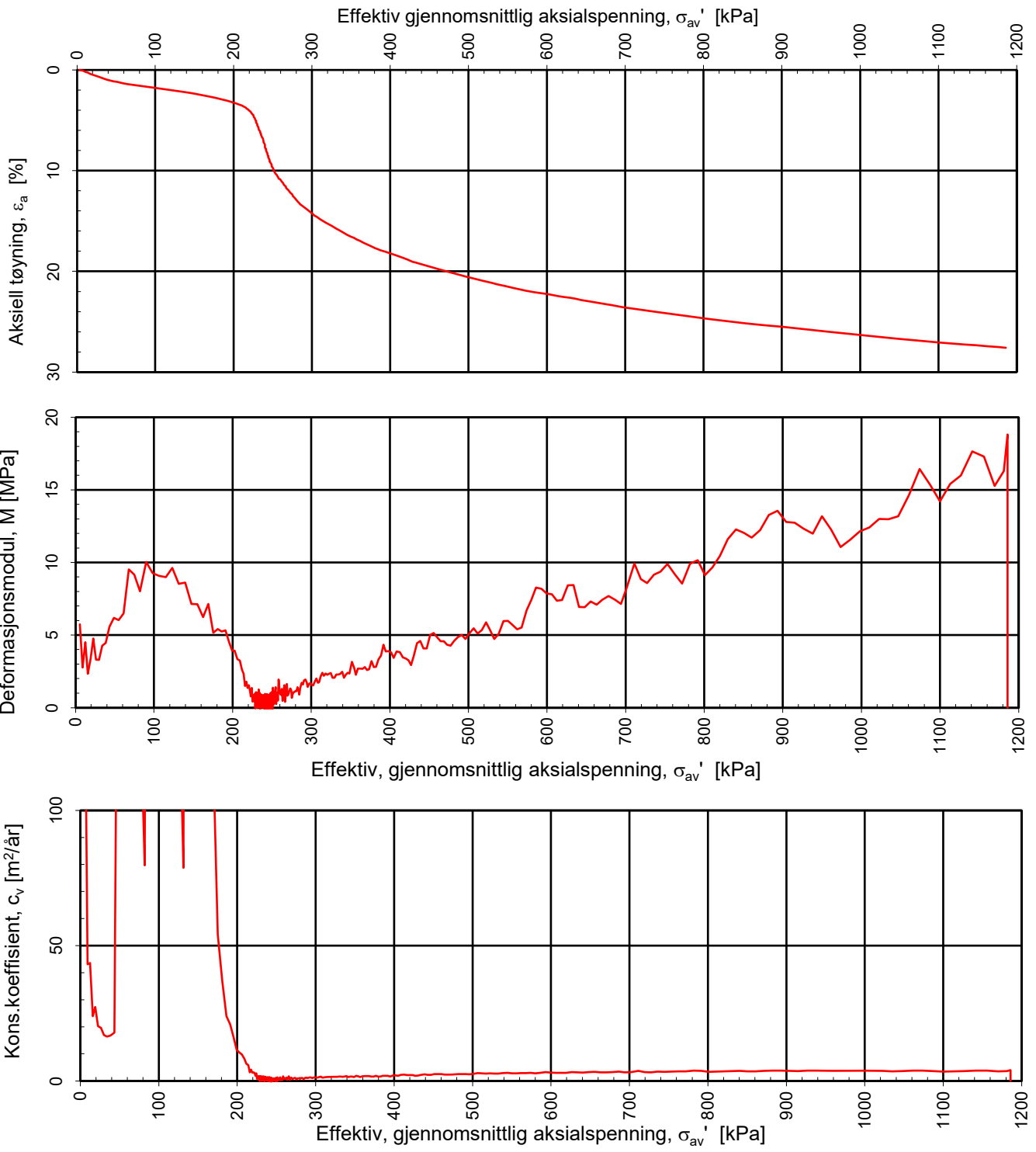
CRS

Programrevisjon:

01.06.2011



| | | | |
|--|-----------------------------|----------------------------------|---|
| COWI NTNU Vurdering av byggharhet Kontinuerlig ødometerforsøk, CRS-rutine. Plott B: $\sigma_{av}' - \varepsilon_a$, k og u_b/σ . | | | Tegningens filnavn: 10215021-02-RIG-TEG-421_h1,d7,20m |
| MULTICONSULT NORGE AS Sluppenvegen 15, 7486 TRONDHEIM Tlf.: 73 10 62 00 Faks: 73 10 62 30 | Forsøksdato: 25.03.2020 | Dybde, z (m): 7,20 | Borpunkt nr.: NTNU 1 |
| | Forsøksnr.: 2 | Tegnet av/kontrollert lab: vt | Kontrollert: mash |
| | Oppdrag nr.: 10215021-02 | Tegning nr.: RIG-TEG-421.2 | Prosedyre: CRS |
| | | | Multiconsult Godkjent: ANG Programrevisjon: 01.06.2011 |



Densitet ρ (g/cm³): **1,79**
 Vanninnhold w (%): **53,10** Effektivt overlagingstrykk, σ_{vo}' (kPa): **64,74**

COWI
NTNU Vurdering av byggbarhet

Tegningens filnavn:
 0215021-02-RIG-TEG-422_h1, d7.25m.xls

Kontinuerlig ødometerforsøk, CRS-rutine. Plott A: $\sigma_{av}' - \varepsilon_a$, M og c_v .

MULTICONSULT
NORGE AS

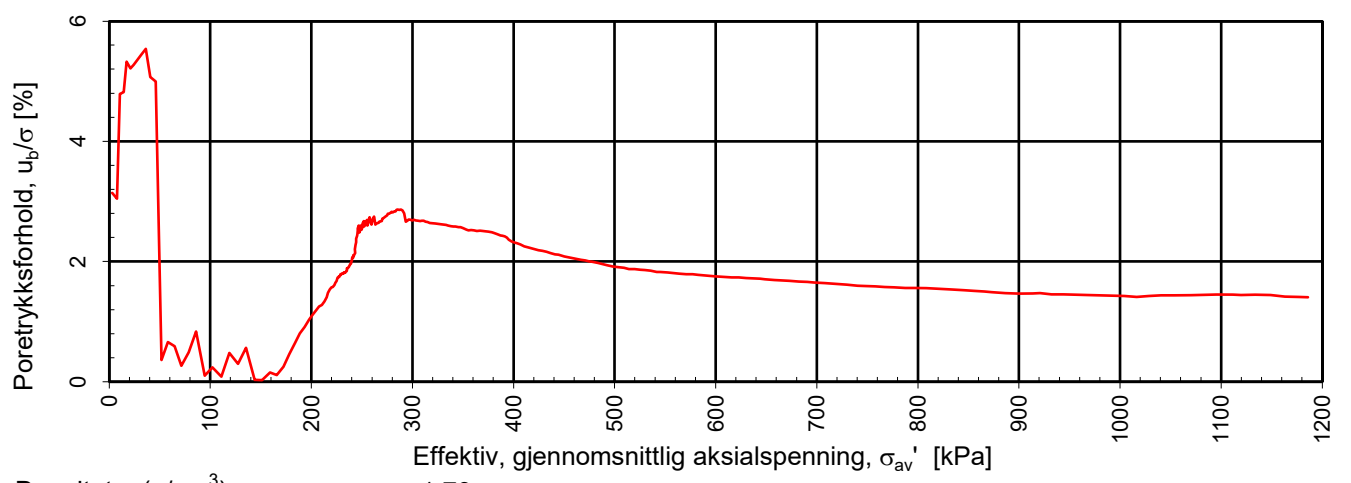
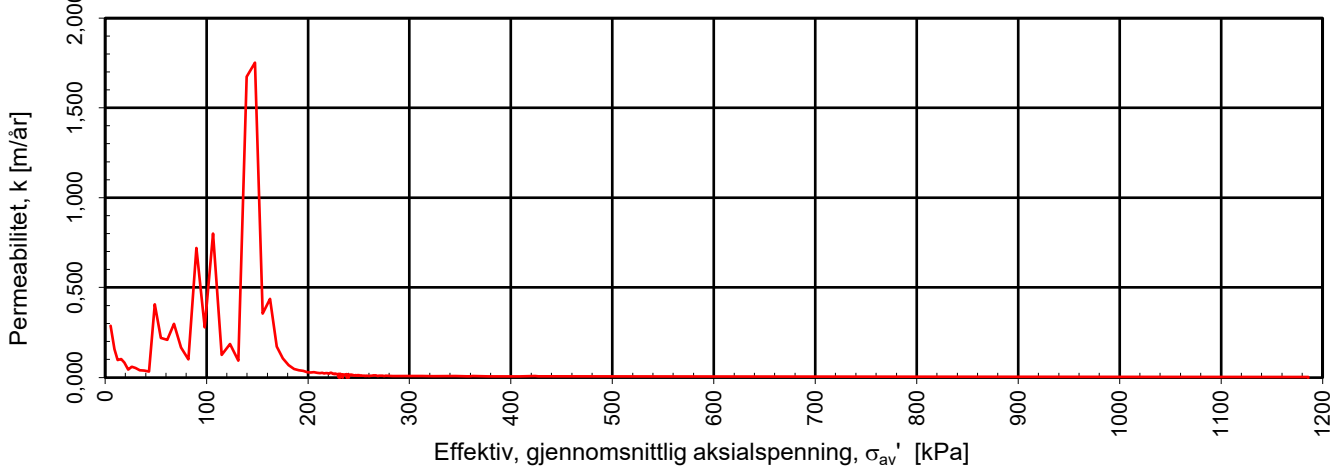
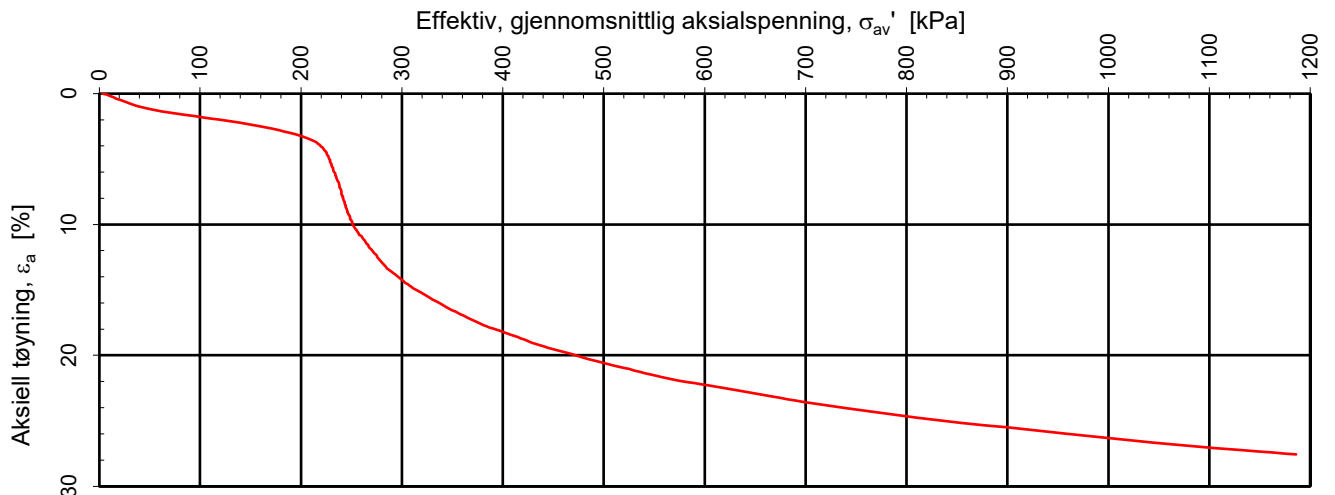
Sluppenvegen 15,
 7486 TRONDHEIM
 Tlf.: 73 10 62 00
 Faks: 73 10 62 30

| | | |
|-----------------------------|-------------------------------|----------------------|
| Forsøksdato: 25.03.2020 | Dybde, z (m): 7,25 | Borpunkt nr.: 1 |
| Forsøknr.: 3 | Tegnet av: vt | Kontrollert: mash |
| Oppdrag nr.: 10215021-02 | Tegning nr.: RIG-TEG-422.1 | Prosedyre: CRS |

Multi
consult

Godkjent:
ANG

Programrevisjon:
 16.07.2018



Densitet ρ (g/cm³): 1,79

Vanninnhold w (%): 53,10

Effektivt overlagingstrykk, σ_{vo}' (kPa): 64,74

COWI
NTNU Vurdering av byggbarhet

Kontinuerlig ødometerforsøk, CRS-rutine. Plott B: $\sigma_{av}' - \varepsilon_a$, k og u_b/σ .

Tegningens filnavn:
 10215021-02-RIG-TEG-422_h1, d7,25m.xls

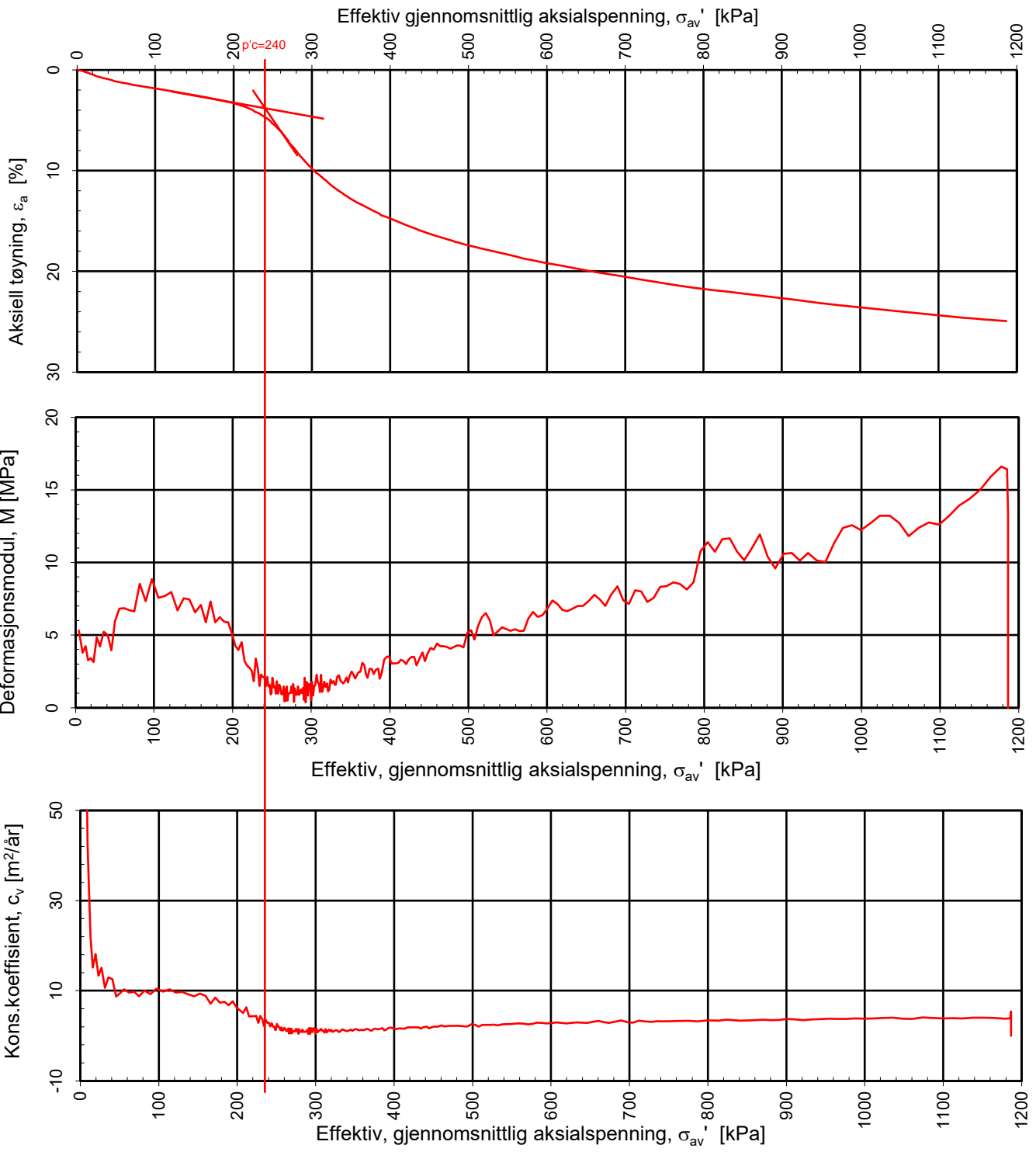
MULTICONSULT
NORGE AS
 Sluppenvegen 15,
 7486 TRONDHEIM
 Tlf.: 73 10 62 00
 Faks: 73 10 62 30

| | | |
|-----------------------------|-------------------------------|----------------------|
| Forsøksdato: 25.03.2020 | Dybde, z (m): 7,25 | Borpunkt nr.: 1 |
| Forsøknr.: 3 | Tegnet av: vt | Kontrollert: mash |
| Oppdrag nr.: 10215021-02 | Tegning nr.: RIG-TEG-422.1 | Prosedyre: CRS |



Godkjent:
ANG

Programrevisjon:
16.07.2018



Densitet ρ (g/cm³): **1,79**
 Vanninnhold w (%): **43,90** Effektivt overlagingstrykk, σ_{vo}' (kPa): **74,48**

COWI
NTNU Vurdering av bygbarhet

Tegningens filnavn:
 10215021-02-RIG-TEG-423_h1, d8.54m

Kontinuerlig ødometerforsøk, CRS-rutine. Plott A: $\sigma_{av}' - \varepsilon_a$, M og c_v .

MULTICONSULT
NORGE AS

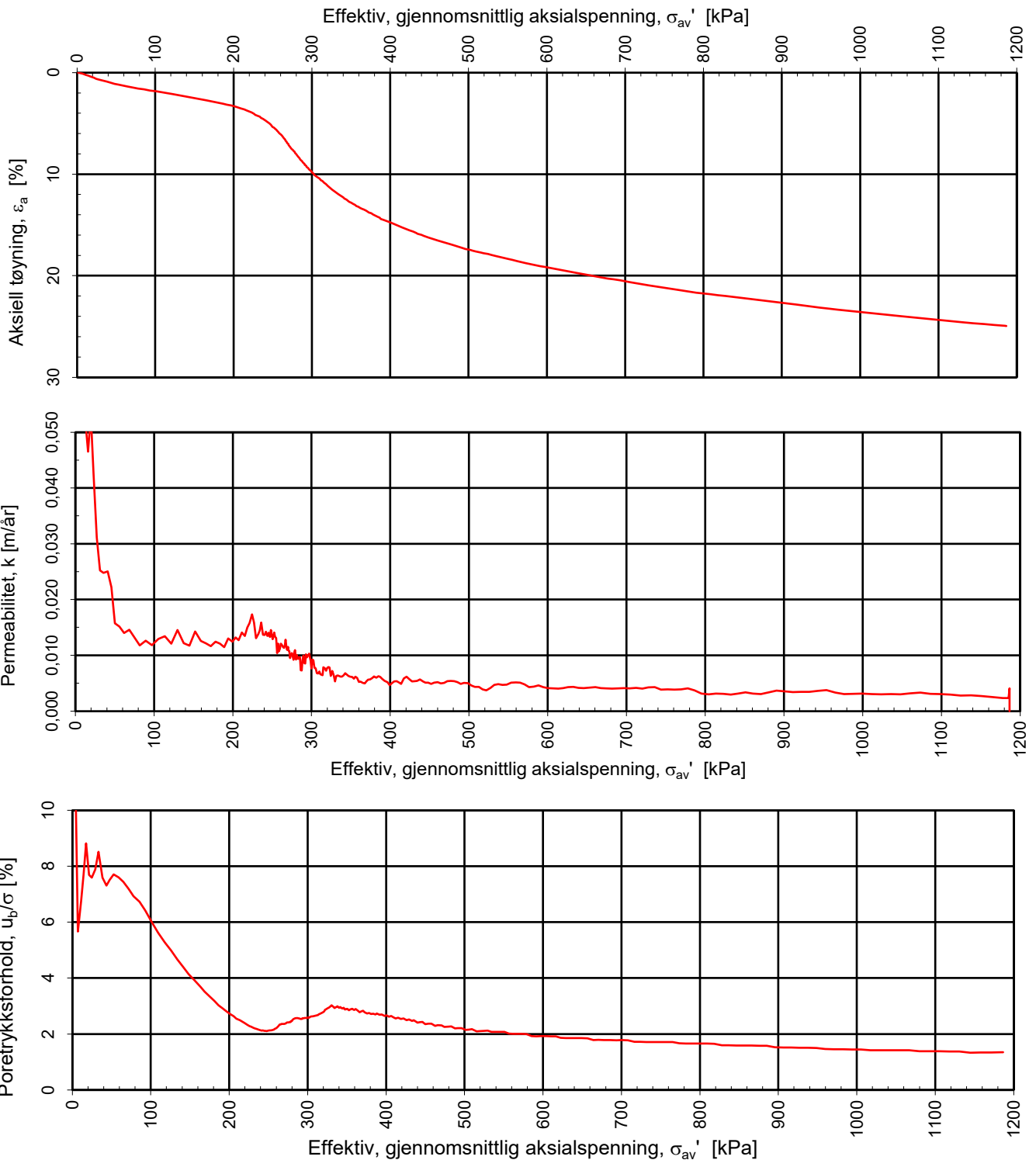
Sluppenvegen 15,
 7486 TRONDHEIM
 Tlf.: 73 10 62 00
 Faks: 73 10 62 30

| | | |
|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Forsøksdato: 30.03.2020 | Dybde, z (m): 8,54 | Borpunkt nr.: NTNU 1 |
| Forsøknr.: 4 | Tegnet av: vt | Kontrollert: mash |
| Oppdrag nr.: 10215021-02 | Tegning nr.: RIG-TEG-423.1 | Prosedyre: CRS |

Multi
consult

Godkjent:
ANG

Programrevisjon:
 16.07.2018



Densitet ρ (g/cm³): 1,79

Vanninnhold w (%): 43,90

Effektivt overlagingstrykk, σ_{vo}' (kPa): 74,48

COWI

NTNU Vurdering av byggbarhet

Kontinuerlig ødometerforsøk, CRS-rutine. Plott B: $\sigma_{av}' - \varepsilon_a$, k og u_b/σ .

Tegningens filnavn:

10215021-02-RIG-TEG-423_h1, d8,54m



**MULTICONSULT
NORGE AS**

Sluppenvegen 15,
7486 TRONDHEIM
Tlf.: 73 10 62 00
Faks: 73 10 62 30

Forsøksdato:

30.03.2020

Dybde, z (m):

8,54

Borpunkt nr.:

NTNU 1

Forsøknr.:

4

Tegnet av:

vt

Kontrollert:

mash

Godkjent:

ANG

Oppdrag nr.:

10215021-02

Tegning nr.:

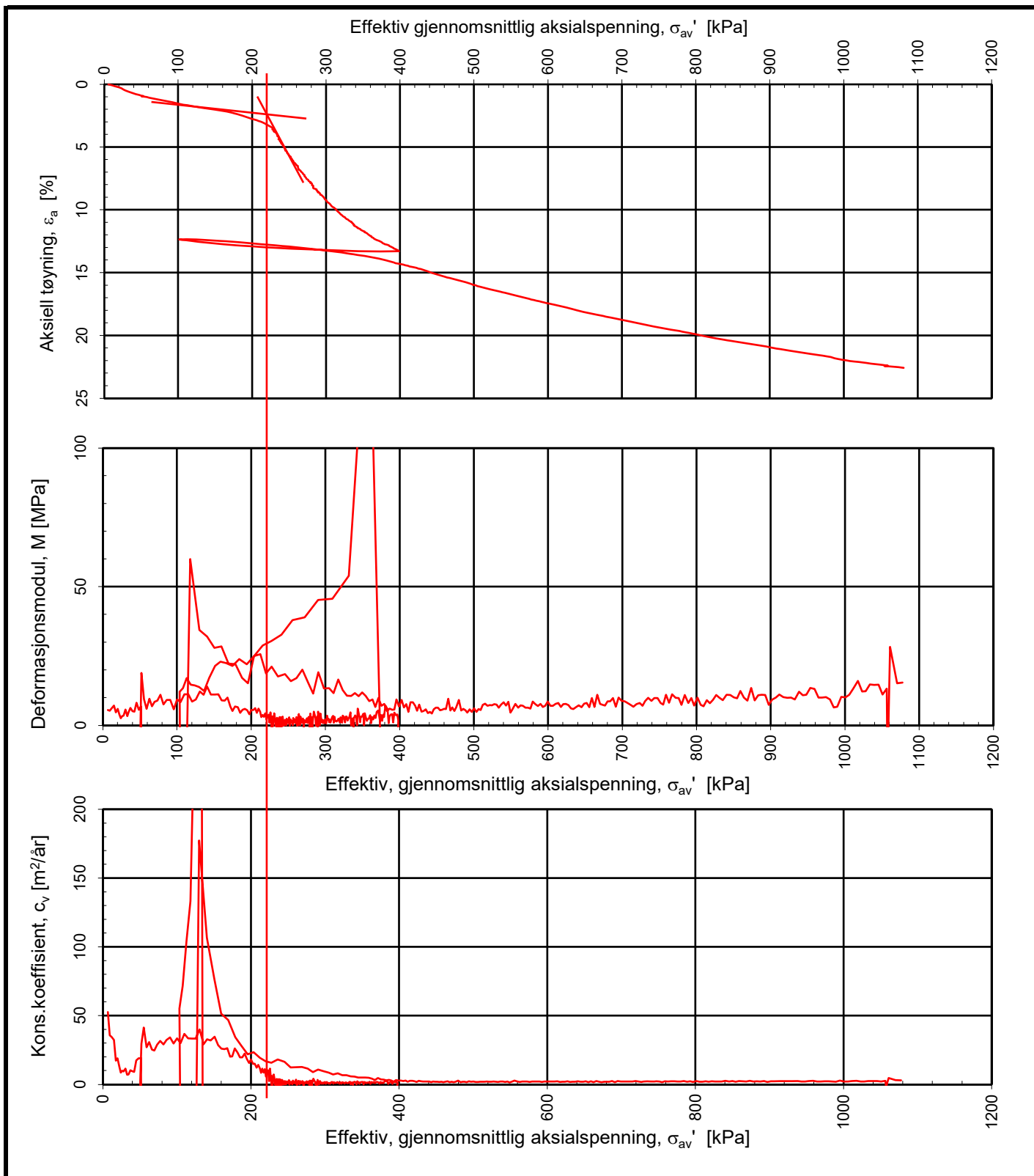
RIG-TEG-423.2

Prosedyre:

CRS

Programrevisjon:

16.07.2018



COWI
NTNU Vurdering av bygbarhet

Kontinuerlig ødometerforsøk, CRS-rutine. Plott A: $\sigma_{av}' - \varepsilon_a$, M og c_v .

Tegningens filnavn:
 10215021-02-RIG-TEG-424_h1, d8.64m



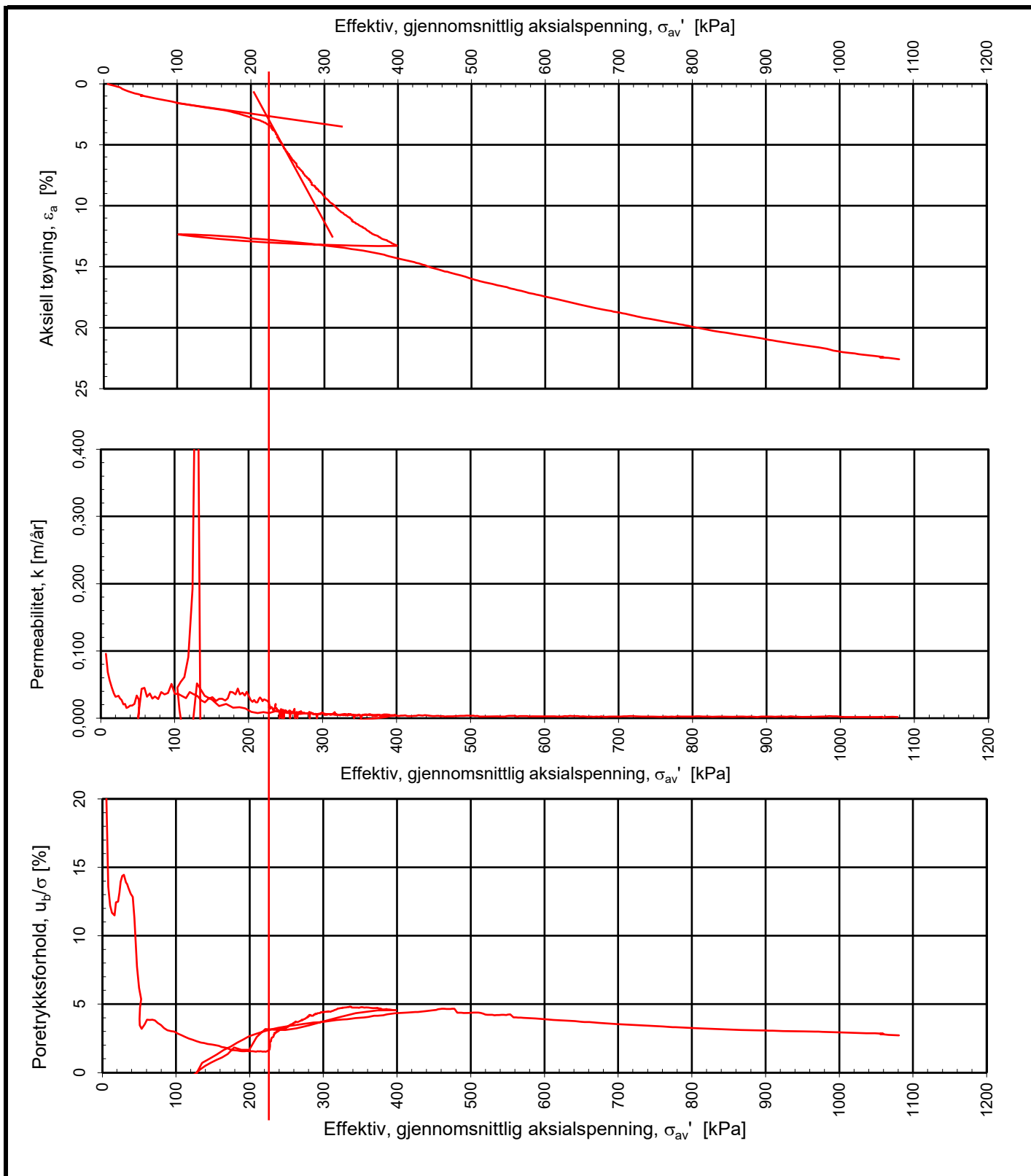
MULTICONSULT
NORGE AS

Sluppenvegen 15,
 7486 TRONDHEIM
 Tlf.: 73 10 62 00
 Faks: 73 10 62 30

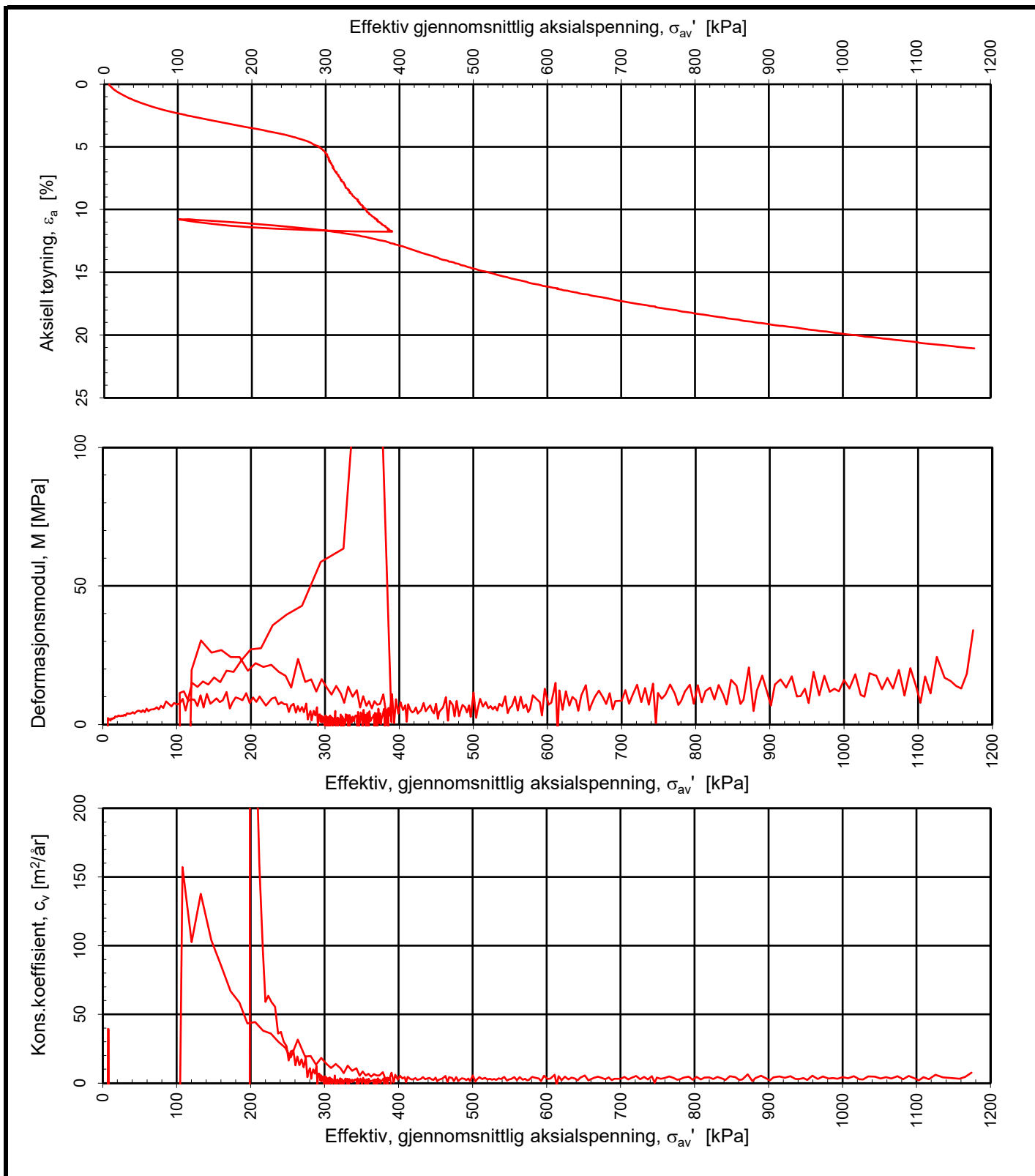
| | | |
|-----------------------------|------------------------------------|------------------------|
| Forsøksdato: 30.03.2020 | Dybde, z (m): 8,64 | Borpunkt nr.: NTNU1 |
| Forsøknr.: 5 | Tegnet av/kontrollert lab: mash | Kontrollert: vt |
| Oppdrag nr.: 10215021-02 | Tegning nr.: RIG-TEG-424.1 | Prosedyre: CRS |

Godkjent:
ANG

Programrevisjon:
 07.01.2014



| | | | |
|---|---------------|----------------------------|------------------------------------|
| COWI NTNU Vurdering av byggbarhet Kontinuerlig ødometerforsøk, CRS-rutine. Plott B: $\sigma_{av}' - \epsilon_a$, k og u_b/σ . | | | Tegningens filnavn: |
| | | | 10215021-02-RIG-TEG-424_h1, d8,64m |
| MULTICONSULT NORGE AS Sluppenvegen 15, 7486 TRONDHEIM Tlf.: 73 10 62 00 Faks: 73 10 62 30 | Forsøksdato: | Dybde, z (m): | Borpunkt nr.: |
| | 30.03.2020 | 8,64 | NTNU1 |
| | Forsøksnr.: | Tegnet av/kontrollert lab: | Kontrollert: |
| 5 | mash | vt | ANG |
| Oppdrag nr.: | Tegning nr.: | Prosedyre: | Programrevisjon: |
| 10215021-02 | RIG-TEG-424.2 | CRS | 07.01.2014 |



COWI
NTNU Vurdering av byggharhet

Tegningens filnavn:
 10215021-02-RIG-TEG-423_h1, d8,70

Kontinuerlig ødometerforsøk, CRS-rutine. Plott A: $\sigma_{av}' - \epsilon_a$, M og c_v .

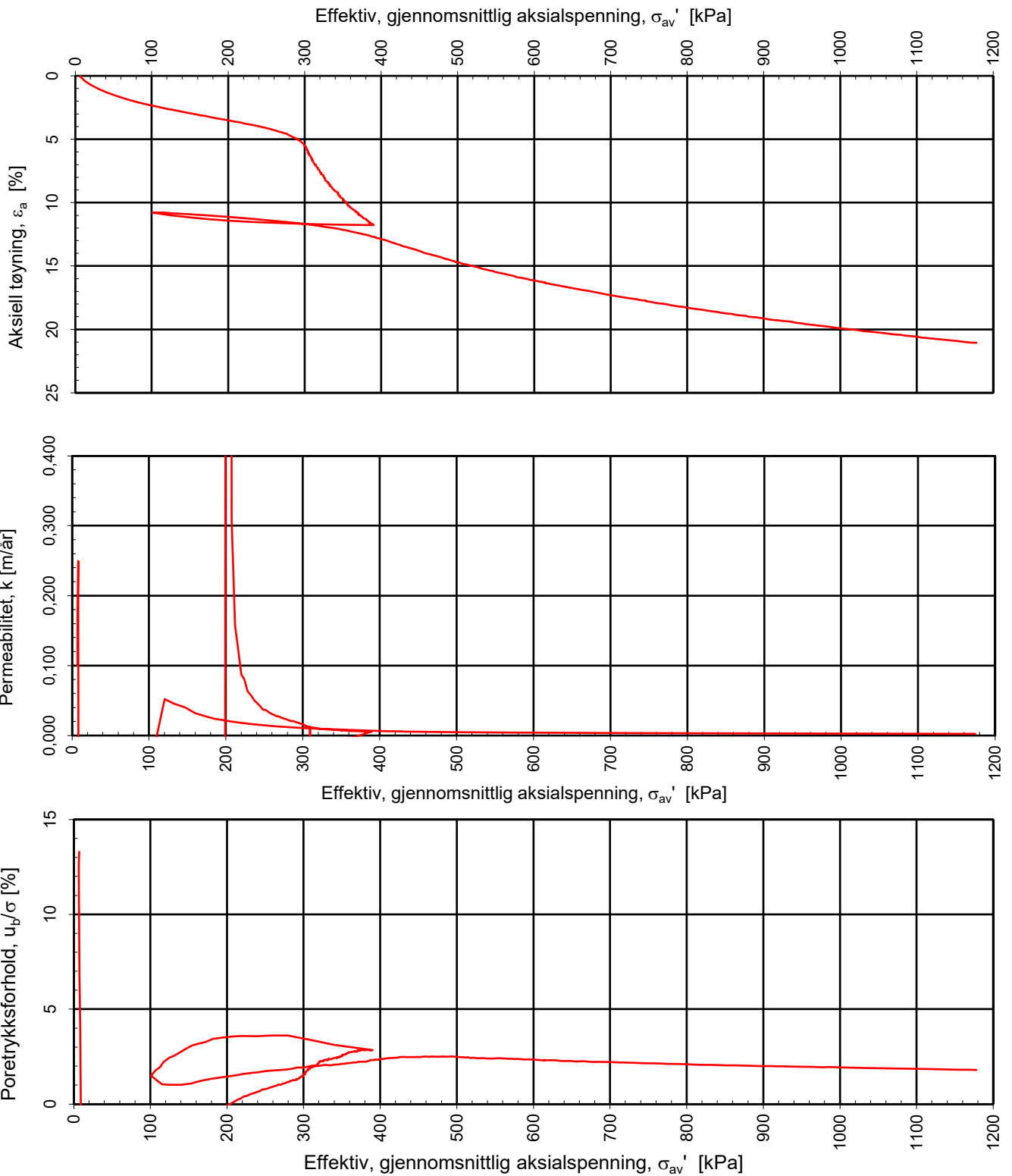


MULTICONSULT
NORGE AS
 Sluppenvegen 15,
 7486 TRONDHEIM
 Tlf.: 73 10 62 00
 Faks: 73 10 62 30

| | | |
|-----------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| Forsøksdato: 30.03.2020 | Dybde, z (m): 8,70 | Borpunkt nr.: NTNU 1 |
| Forsøknr.: 6 | Tegnet av/kontrollert lab: vt | Kontrollert: mash |
| Oppdrag nr.: 10215021-02 | Tegning nr.: RIG-TEG-425.1 | Prosedyre: CRS |

Godkjent:
ANG

Programrevisjon:
 01.06.2011



COWI

NTNU Vurdering av byggbarhet

Kontinuerlig ødometerforsøk, CRS-rutine. Plott B: $\sigma_{av}' - \epsilon_a$, k og u_b/σ .

Tegningens filnavn:

10215021-02-RIG-TEG-423_h1, d8,70



**MULTICONSULT
NORGE AS**

Sluppenvegen 15,
7486 TRONDHEIM
Tlf.: 73 10 62 00
Faks: 73 10 62 30

Forsøksdato:

30.03.2020

Dybde, z (m):

8,70

Borpunkt nr.:

NTNU 1

Forsøknr.:

6

Tegnet av/kontrollert lab:

vt

Kontrollert:

mash

Oppdrag nr.:

10215021-02

Tegning nr.:

RIG-TEG-425.2

Prosedyre:

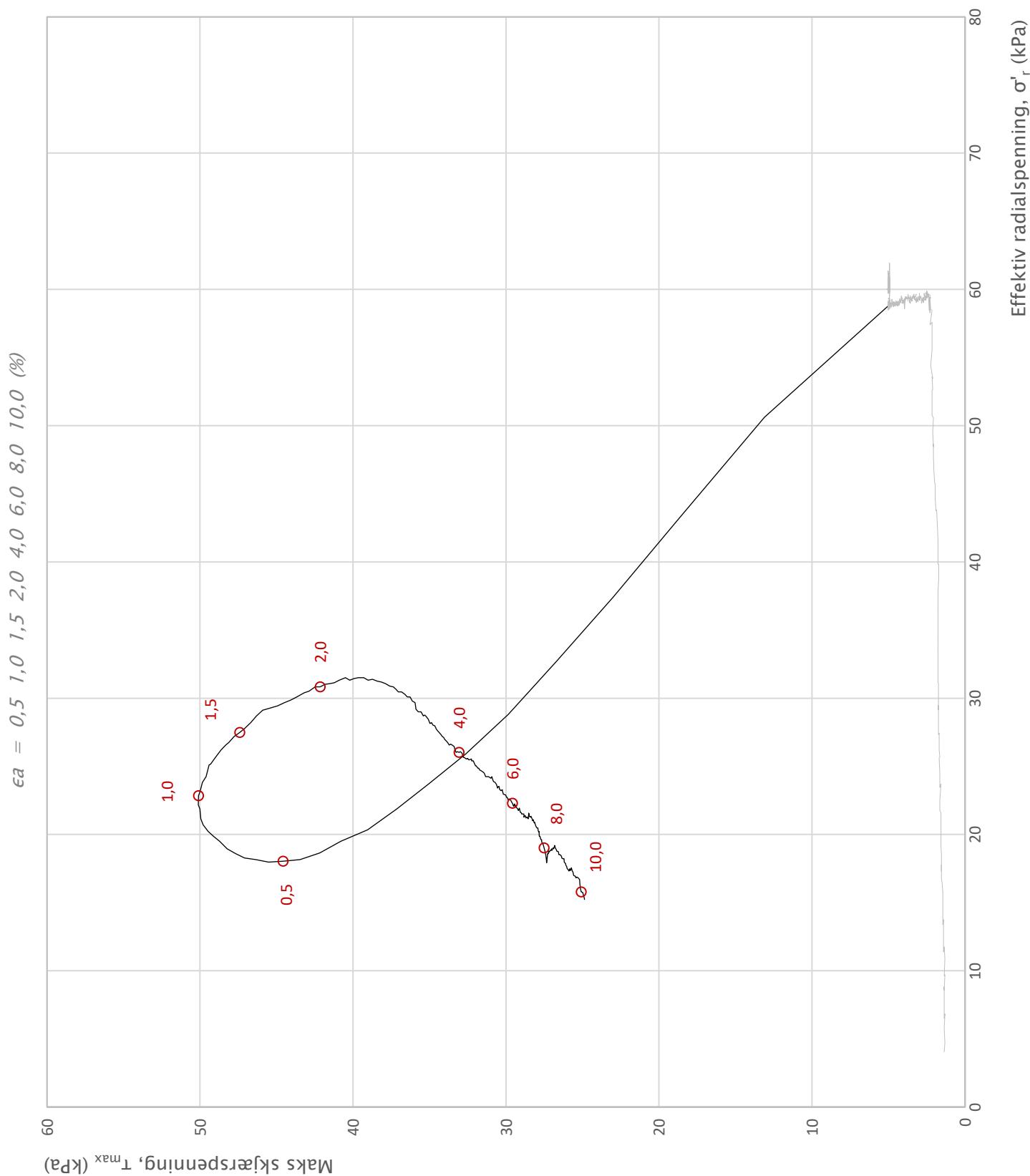
CRS

Godkjent:

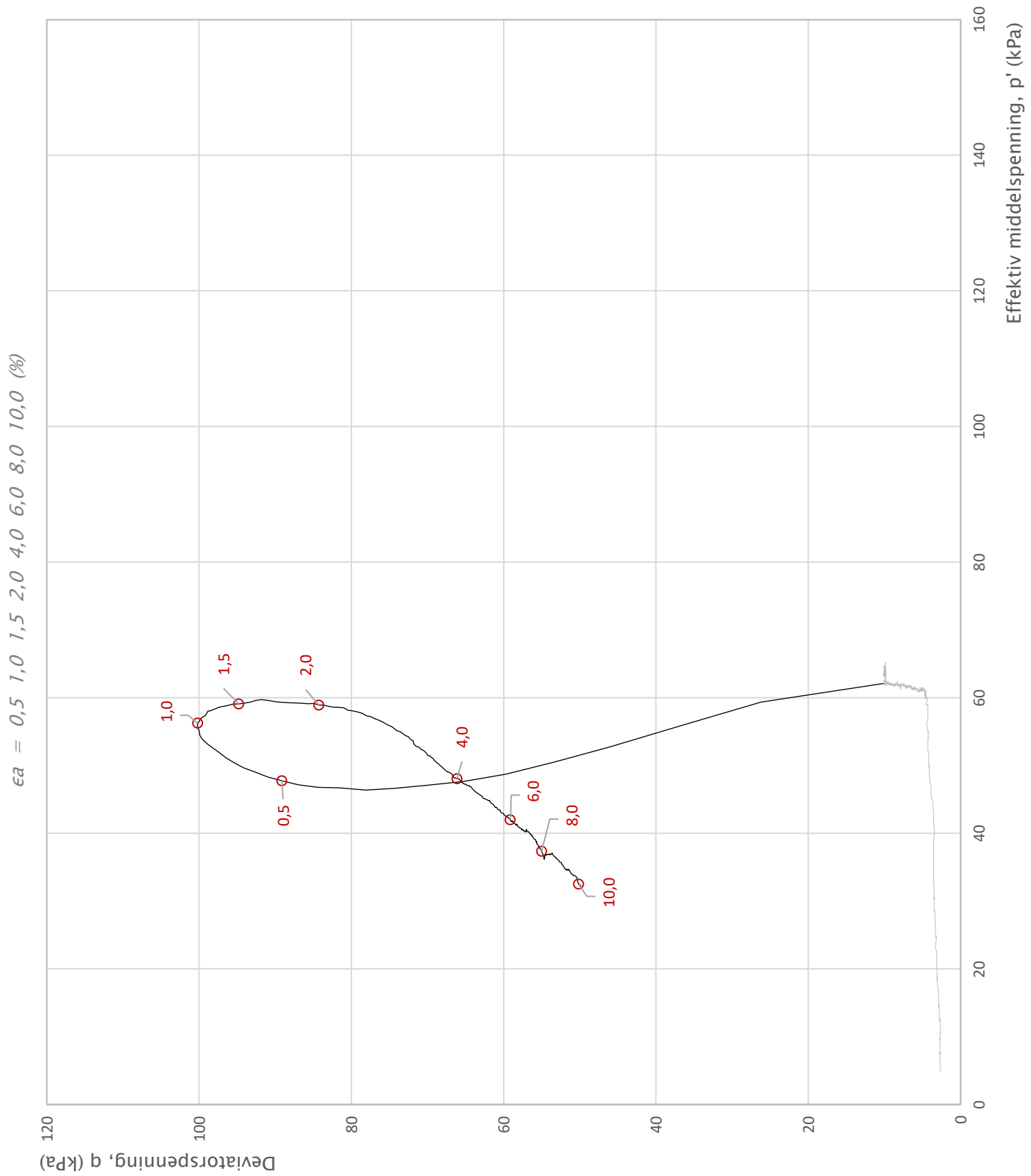
ANG

Programrevisjon:

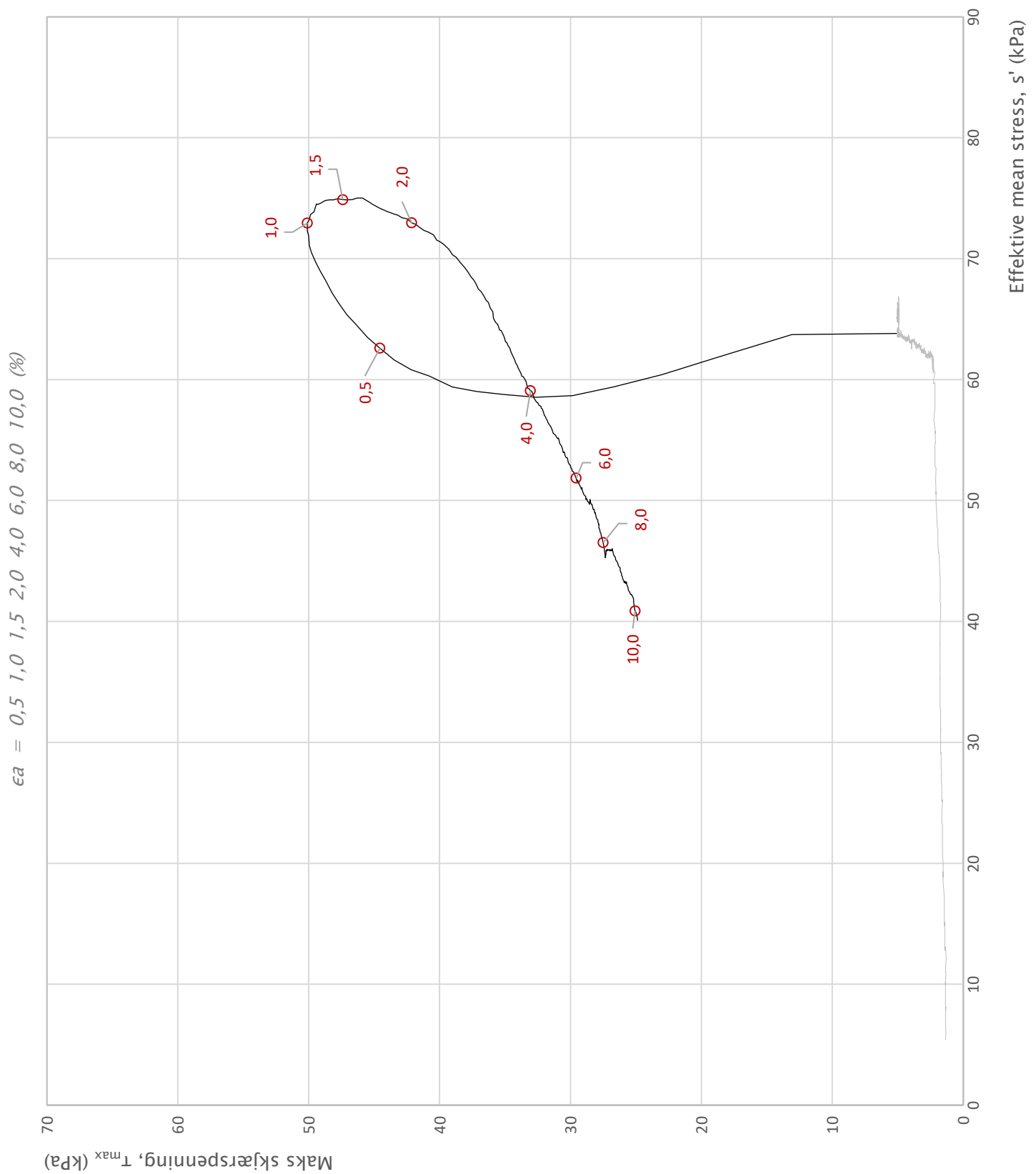
01.06.2011



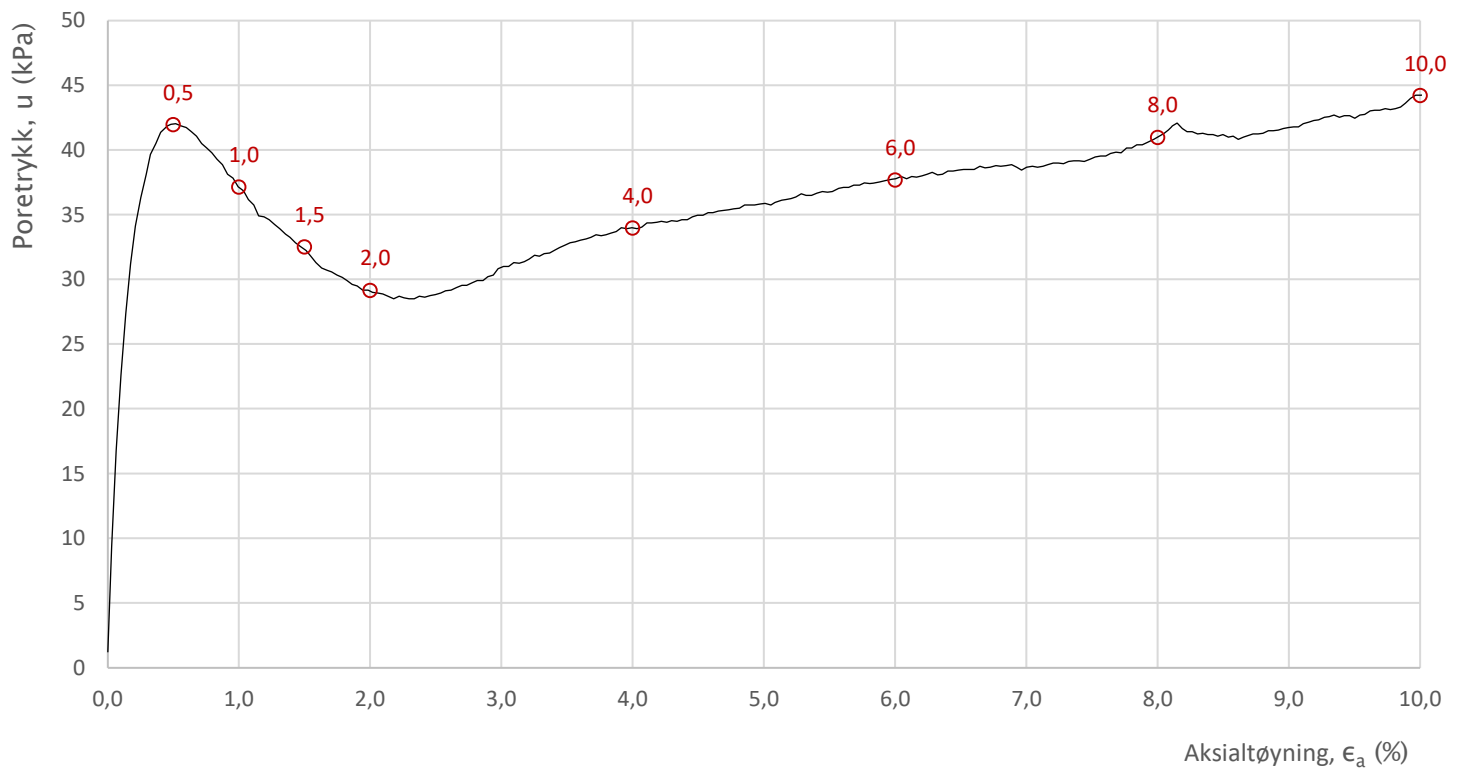
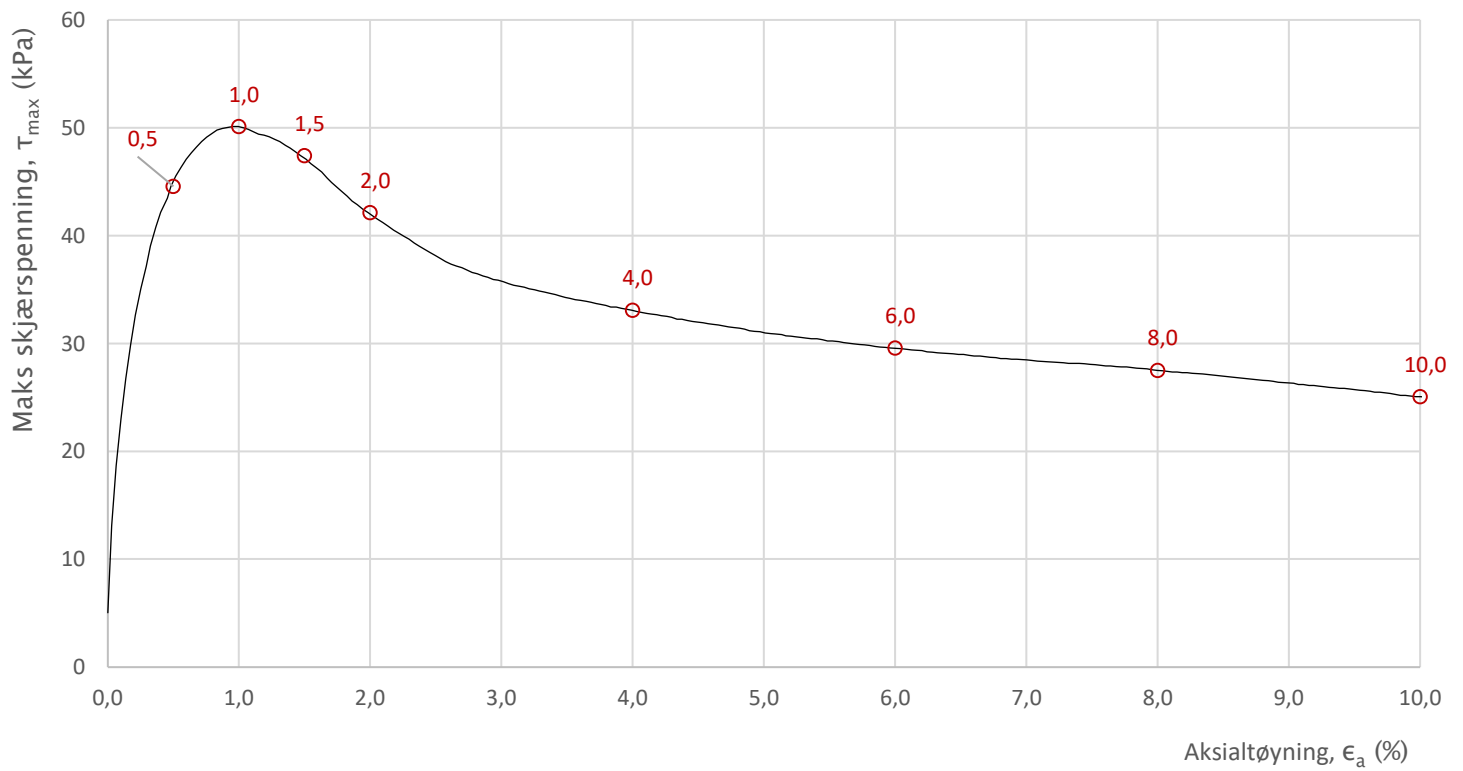
| | | | | | |
|-------------------------------------|-------------|-------------|---|--------------|---------------|
| Prosjekt | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-001_rev00 | | Borhull |
| NTNU Vurdering av byggbarhet | | | | | NTNU 1 |
| Innhold | | | Spenningssti i skjærfase, σ'_r - τ plott (NTNU) | | Dybde (m) |
| | | | | | 7,10 |
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | Forsøkstype | |
| | mash | vt | ANG | CAUc | |
| Region | Dato utført | Revisjon | 0 | Figur | |
| Midt | 25.03.2020 | Rev. dato | 27.03.2020 | 480.1 | |



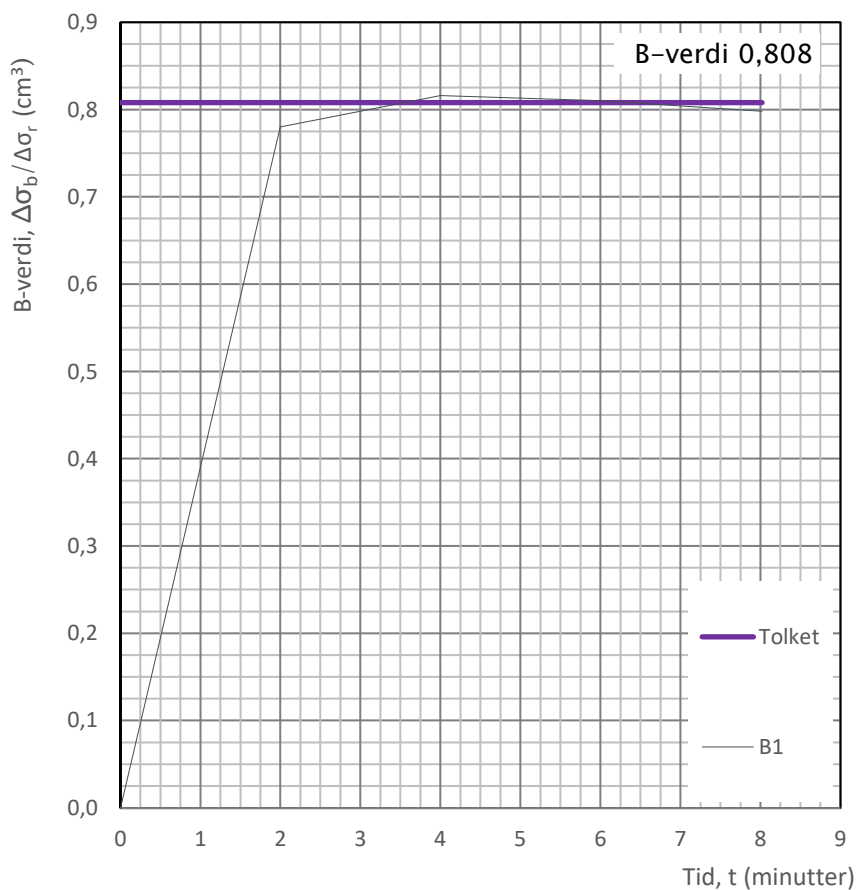
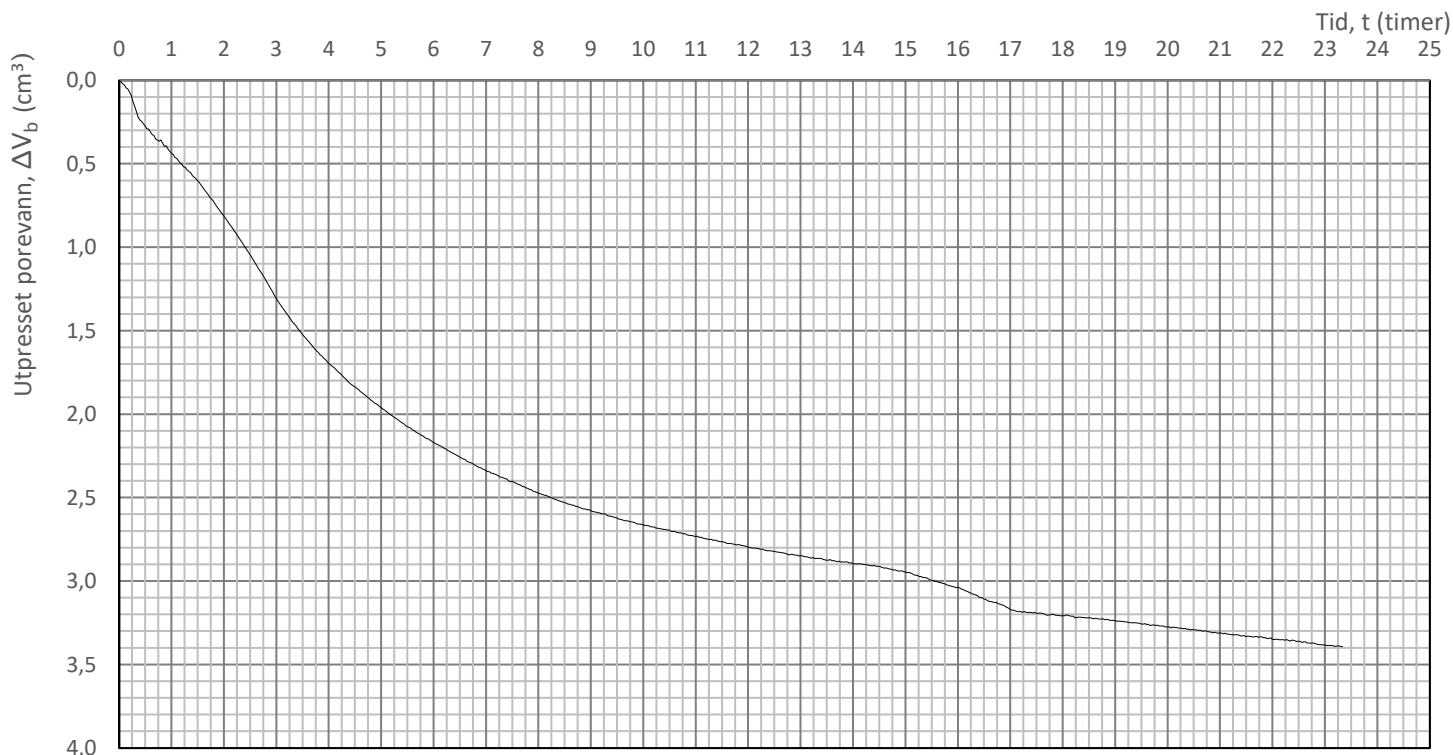
| | | | | | |
|------------------------------------|--------|-------------|---|--------------|---------------|
| Prosjekt | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-001_rev00 | | Borhull |
| NTNU Vurdering av bygbarhet | | | | | NTNU 1 |
| Innhold | | | Spenningssti i skjærfase, p' - q plott | | Dybde (m) |
| | | | | | 7,10 |
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | Forsøkstype | |
| | mash | vt | ANG | CAUc | |
| | Region | Dato utført | Revisjon | Figur | |
| | Midt | 25.03.2020 | 0 | 480.2 | |
| | | | Rev. dato | 27.03.2020 | |



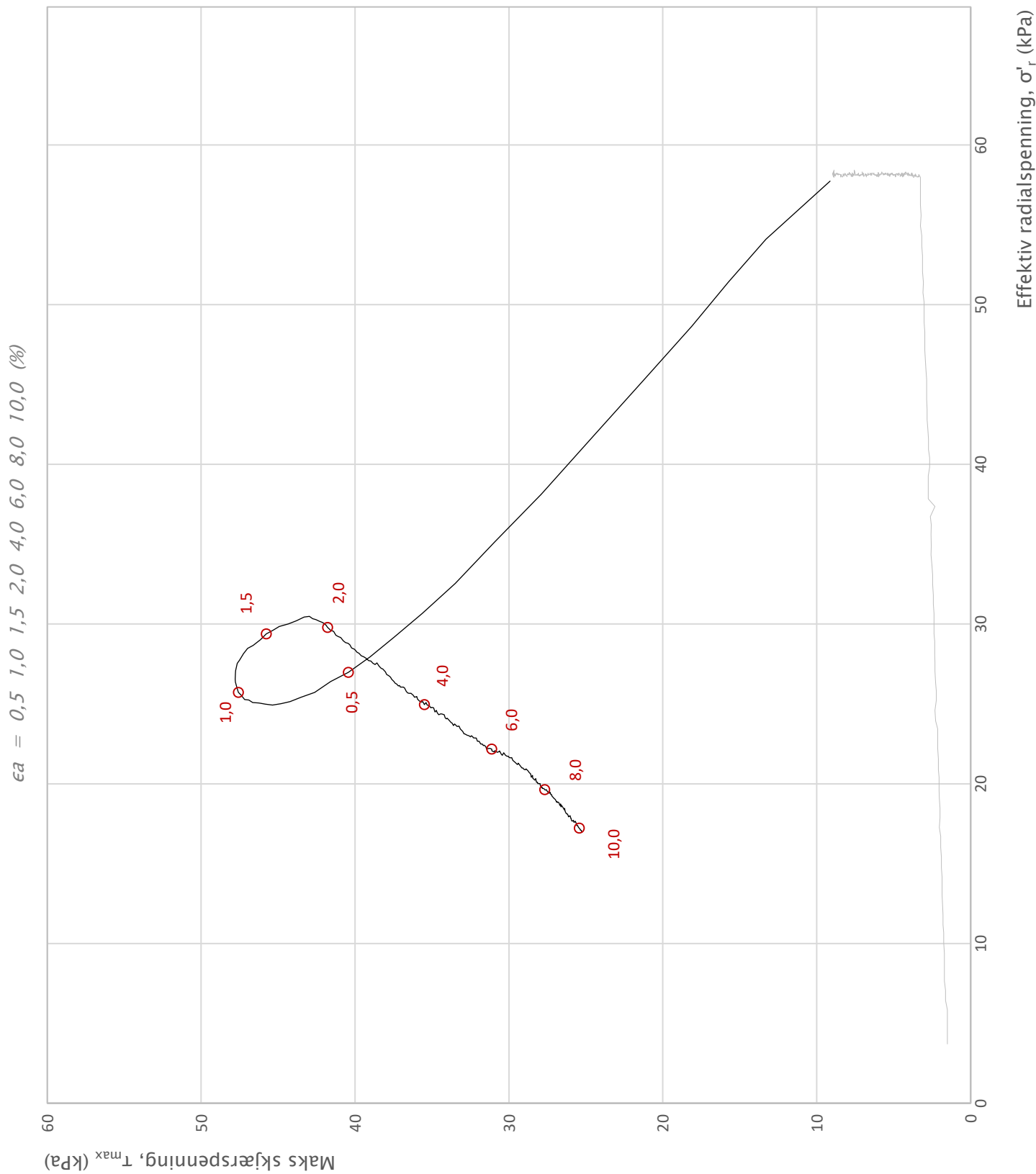
| | | | | | | |
|-------------------------------------|--------|-------------|---|--------------|---------------|--|
| Prosjekt | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-001_rev00 | | Borhull | |
| NTNU Vurdering av byggbarhet | | | | | NTNU 1 | |
| Innhold | | | Spenningssti i skjærfase, s' - τ plott (MIT) | | Dybde (m) | |
| | | | | | 7,10 | |
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | | Forsøkstype | |
| | mash | vt | ANG | | CAUc | |
| | Region | Dato utført | Revisjon | Figur | | |
| | Midt | 25.03.2020 | 0 | 480.3 | | |
| | | | Rev. dato | 27.03.2020 | | |



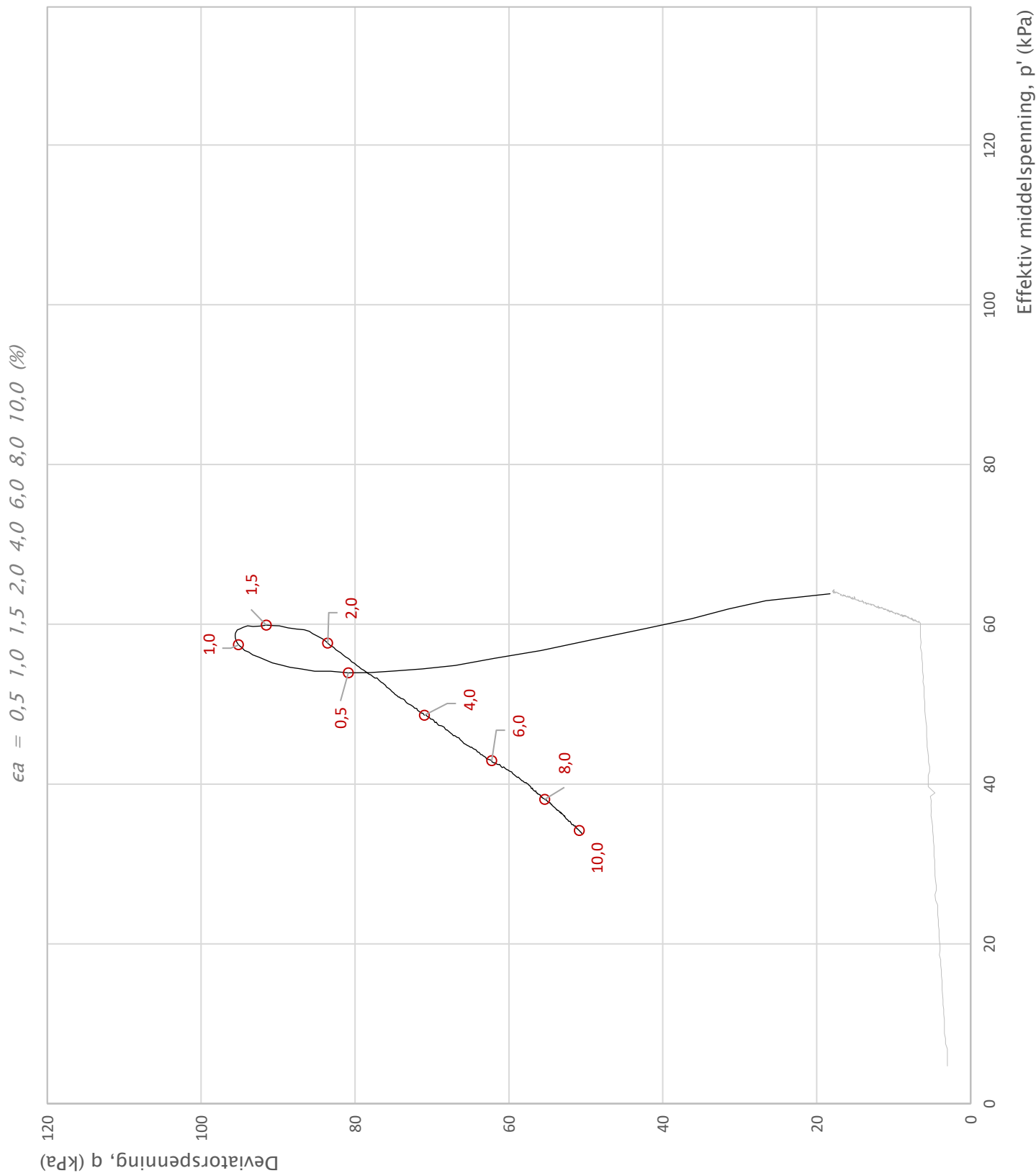
| | | | | |
|-------------------------------------|--|-------------|------------|---------------|
| Prosjekt | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-001_rev00 | | | Borhull |
| NTNU Vurdering av byggbarhet | | | | NTNU 1 |
| Innhold | Bruddutvikling i skjærfase, ϵ_a - τ og ϵ_a -u plott | | | Dybde (m) |
| | | | | 7,10 |
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | Forsøkstype |
| | mash | vt | ANG | CAUc |
| | Region | Dato utført | Revisjon | Figur |
| Midt | 25.03.2020 | 0 | 27.03.2020 | 480.4 |



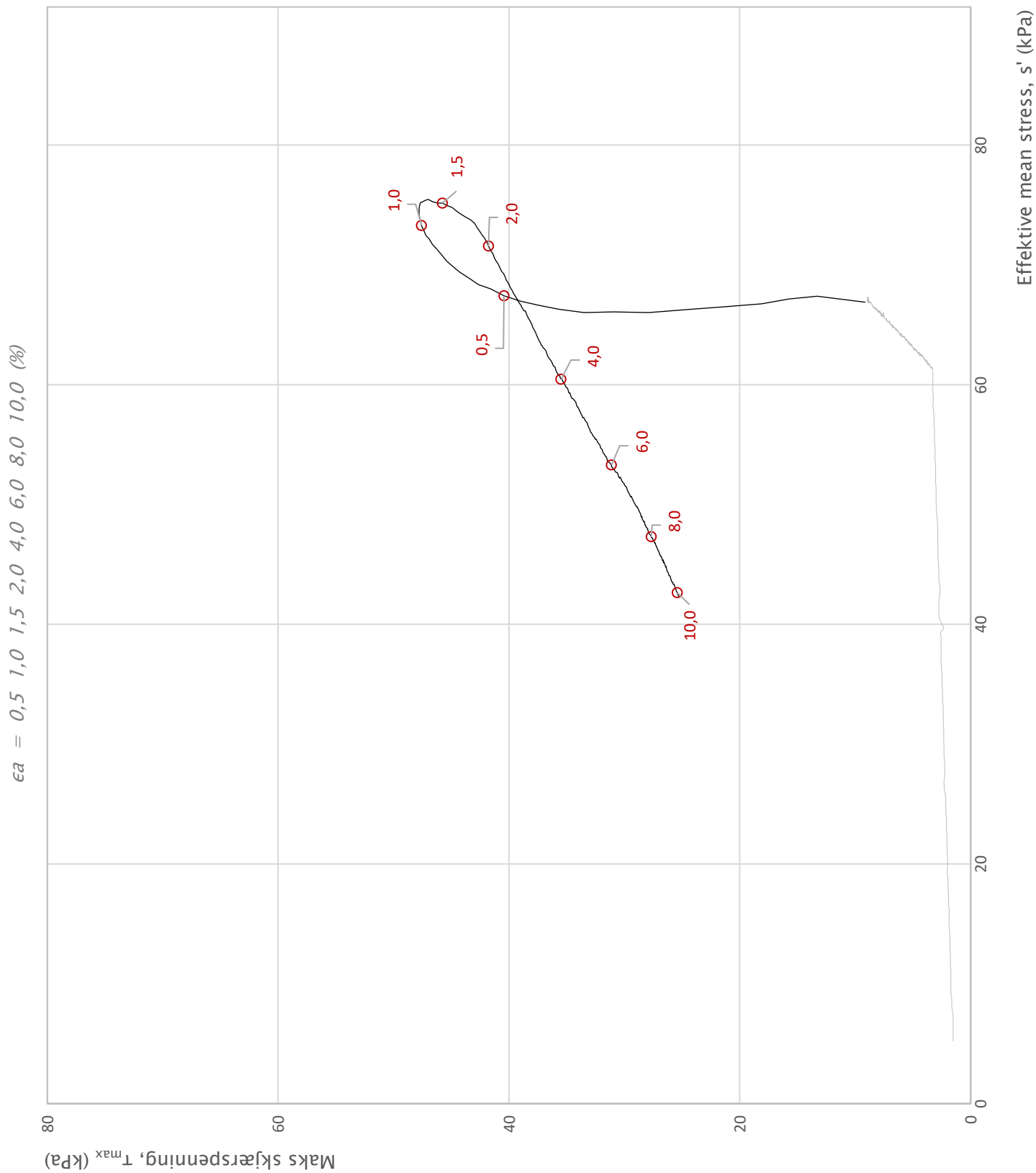
| | | | | | | |
|-------------------------------------|--------|-------------|---|-------------|---------------|--|
| Prosjekt | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-001_rev00 | | Borhull | |
| NTNU Vurdering av byggbarhet | | | | | NTNU 1 | |
| Innhold | | | | | Dybde (m) | |
| Konsolidering | | | | | 7,10 | |
| Multiconsult | Utført | kontrollert | Godkjent | Forsøkstype | | |
| | mash | vt | ANG | CAUc | | |
| | Region | Dato utført | Revisjon | Figur | | |
| | Midt | 25.03.2020 | 0 | 480.5 | | |
| | | | Rev. dato | 27.03.2020 | | |



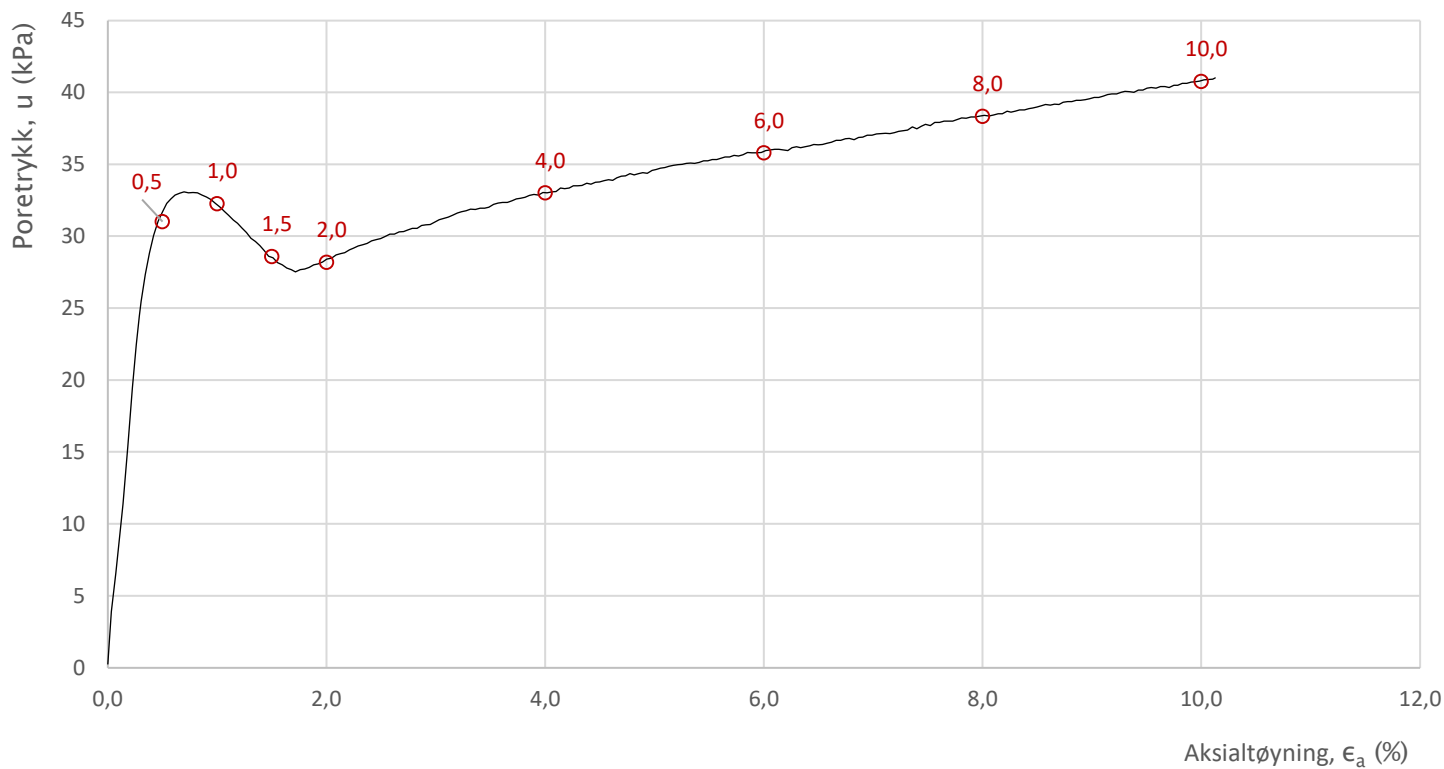
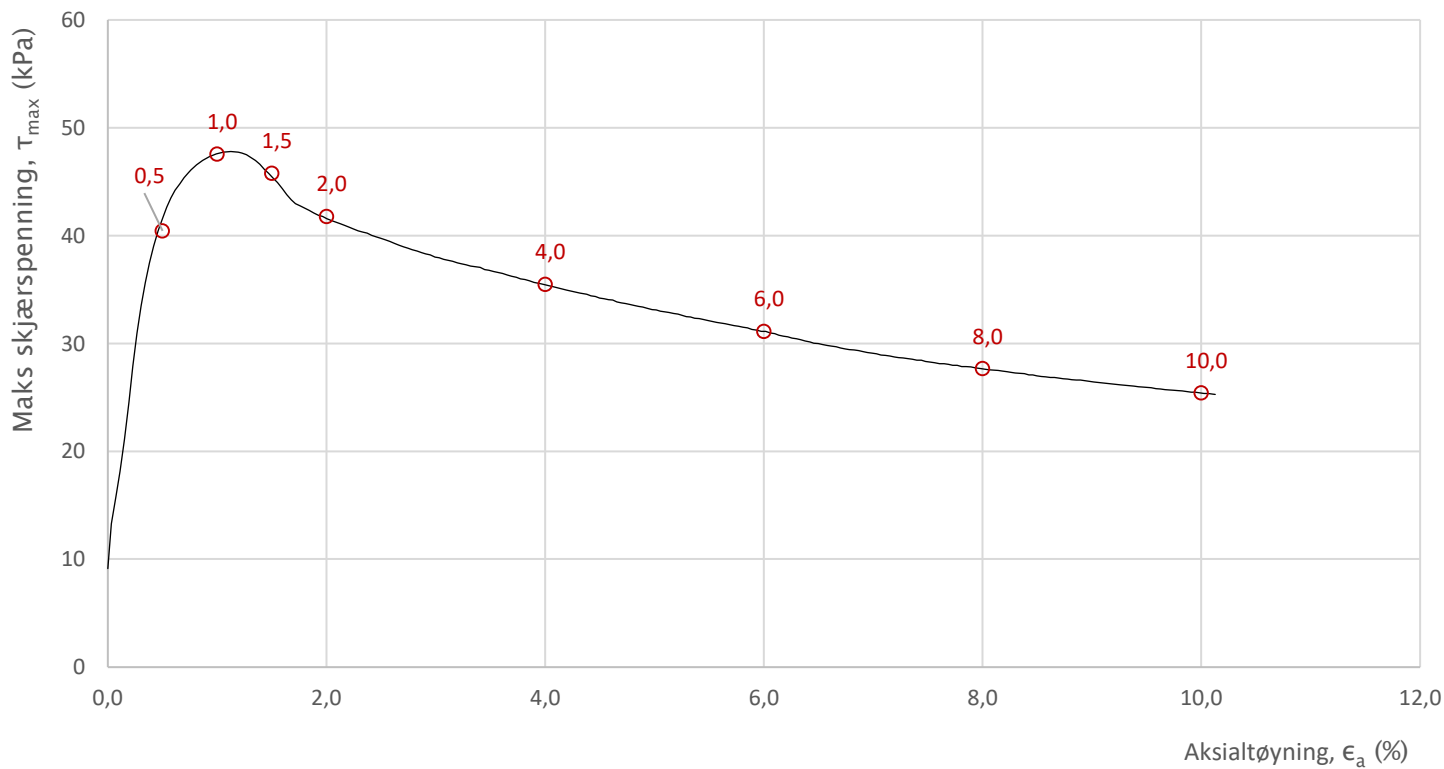
| | | | | | |
|------------------------------------|--------|-------------|---|------------|---------------|
| Prosjekt | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-001_rev00 | | Borhull |
| NTNU Vurdering av bygbarhet | | | | | NTNU 1 |
| Innhold | | | Spenningssti i skjærfase, σ'_r - τ plott (NTNU) | | Dybde (m) |
| | | | | | 7,10 |
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | | Forsøkstype |
| | vt | mash | ANG | | CAUc |
| | Region | Dato utført | Revisjon | Rev. dato | Figur |
| | Midt | 25.03.2020 | 0 | 01.04.2020 | 481.1 |



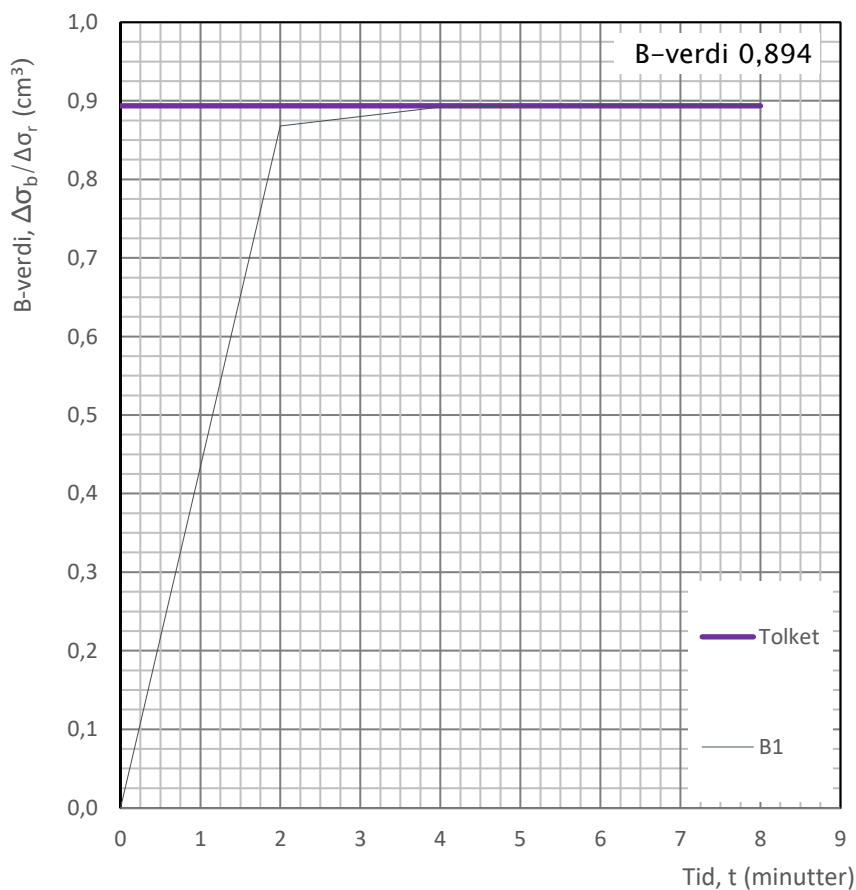
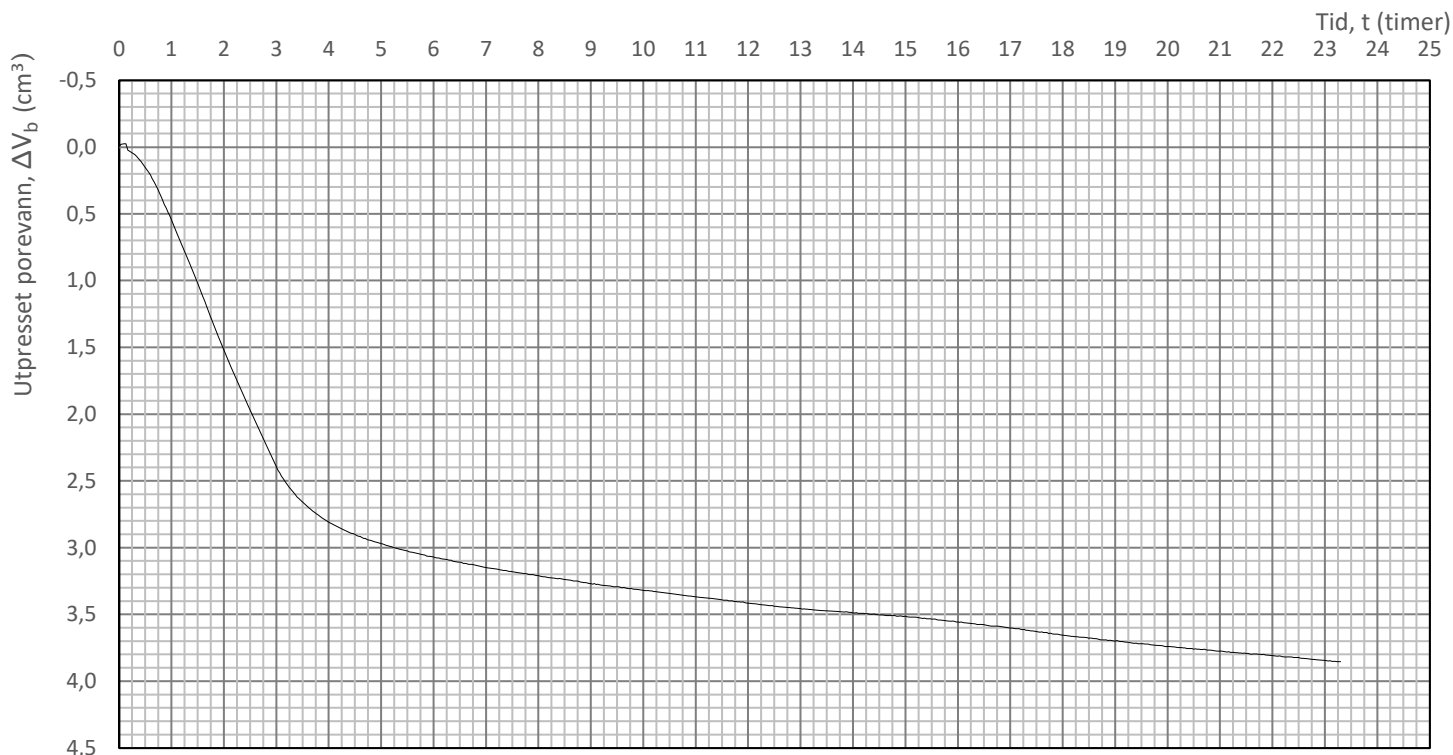
| | | | | | |
|------------------------------------|-------------|-------------|---|--------------|---------------|
| Prosjekt | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-001_rev00 | | Borhull |
| NTNU Vurdering av bygbarhet | | | | | NTNU 1 |
| Innhold | | | Spenningssti i skjærfase, p'-q plott | | Dybde (m) |
| | | | | | 7,10 |
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | Forsøkstype | |
| | vt | mash | ANG | CAUc | |
| Region | Dato utført | Revisjon | Rev. dato | Figur | |
| Midt | 25.03.2020 | 0 | 01.04.2020 | 481.2 | |



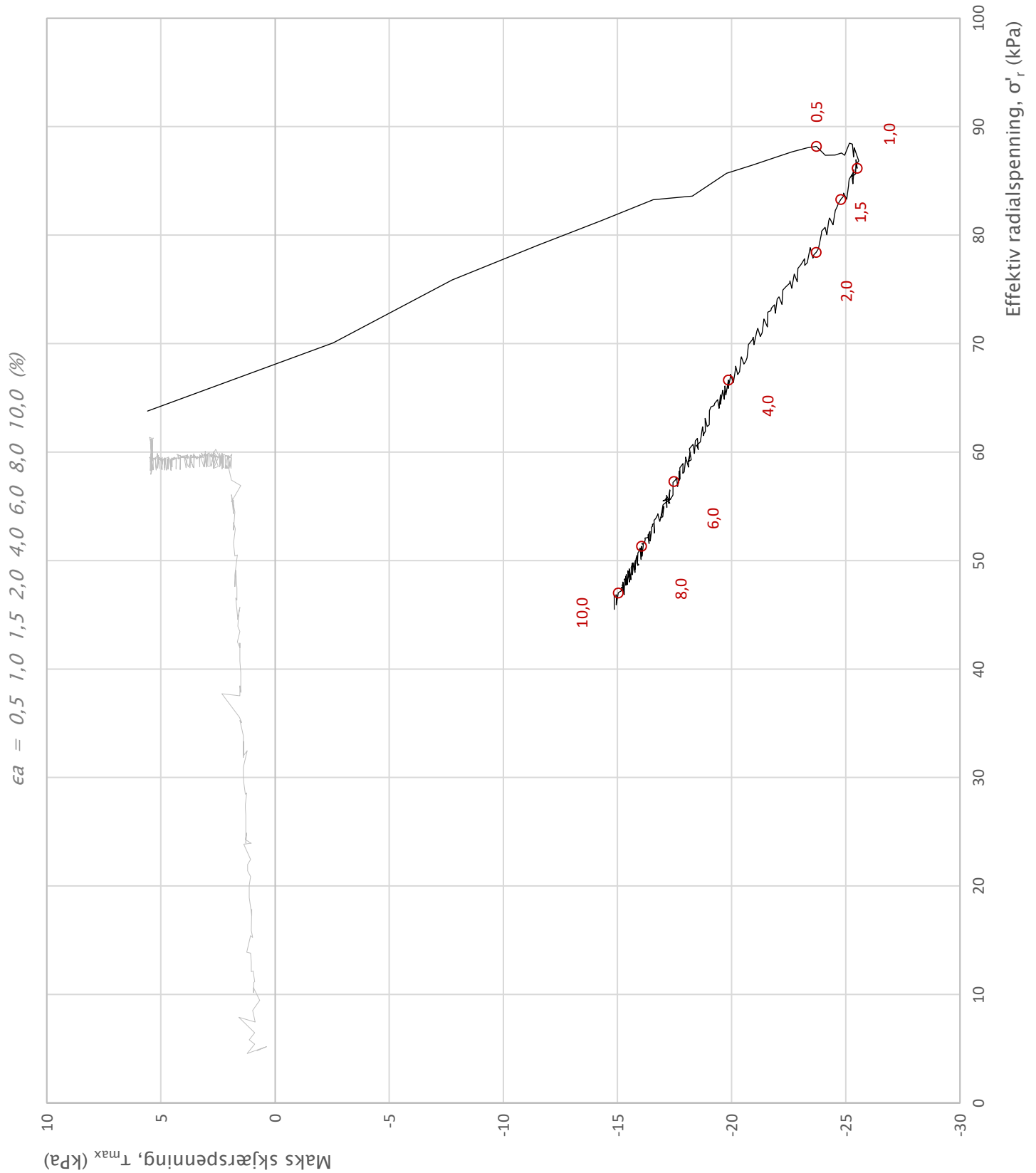
| | | | | | |
|------------------------------------|--------|-------------|---|--------------|---------------|
| Prosjekt | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-001_rev00 | | Borhull |
| NTNU Vurdering av bygbarhet | | | | | NTNU 1 |
| Innhold | | | Spenningssti i skjærfase, s' - τ plott (MIT) | | Dybde (m) |
| | | | | | 7,10 |
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | Forsøkstype | |
| | vt | mash | ANG | CAUc | |
| | Region | Dato utført | Revisjon | Figur | |
| | Midt | 25.03.2020 | 0 | 481.3 | |
| | | | Rev. dato | 01.04.2020 | |



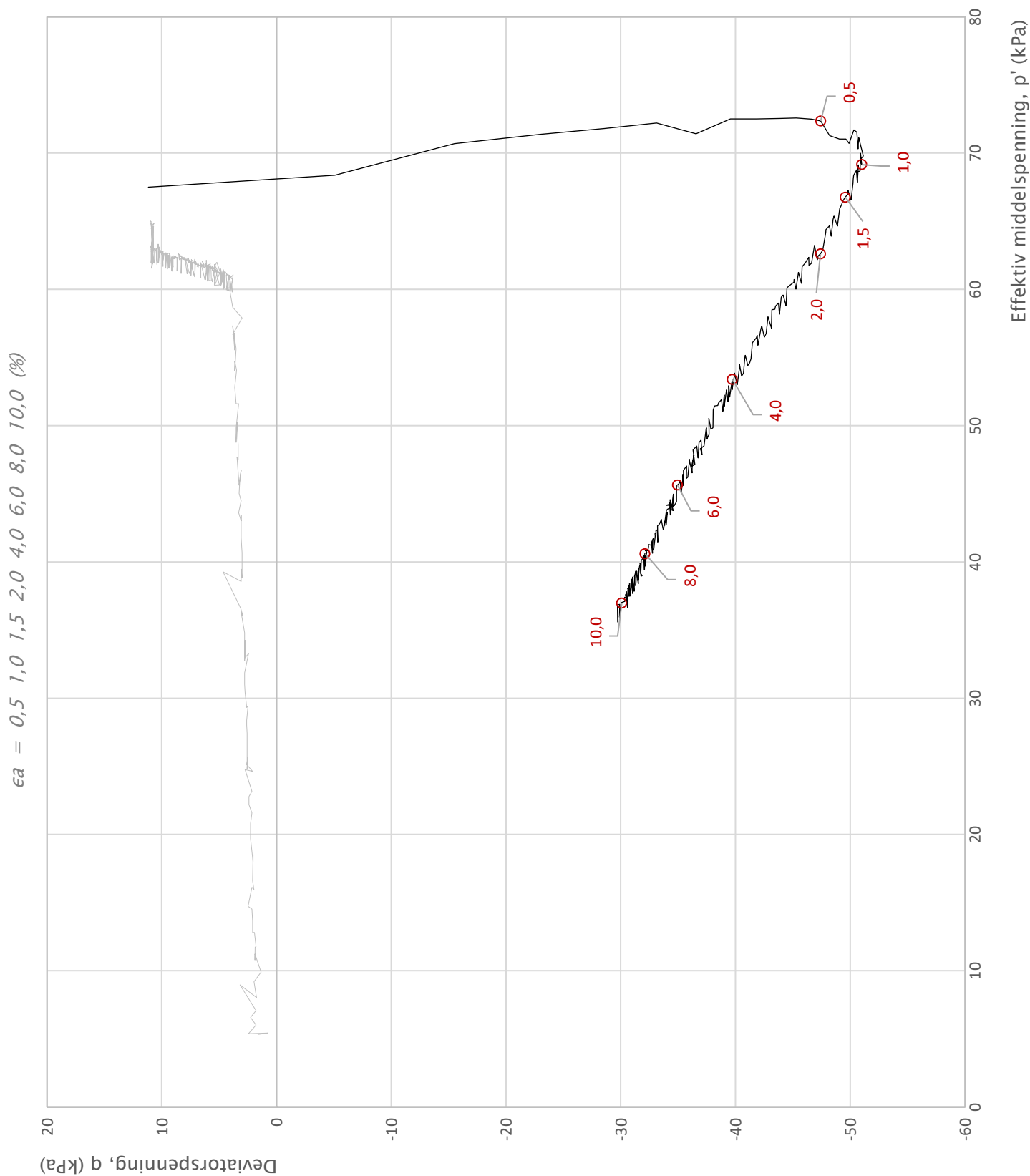
| | | | | | |
|------------------------------------|-------------|-------------|---|--------------|---------------|
| Prosjekt | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-001_rev00 | | Borhull |
| NTNU Vurdering av bygbarhet | | | | | NTNU 1 |
| Innhold | | | Bruddutvikling i skjærfase, ϵ_a - τ og ϵ_a - u plott | | Dybde (m) |
| | | | | | 7,10 |
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | Forsøkstype | |
| | vt | mash | ANG | CAUc | |
| Region | Dato utført | Revisjon | 0 | Figur | |
| Midt | 25.03.2020 | Rev. dato | 01.04.2020 | 481.4 | |



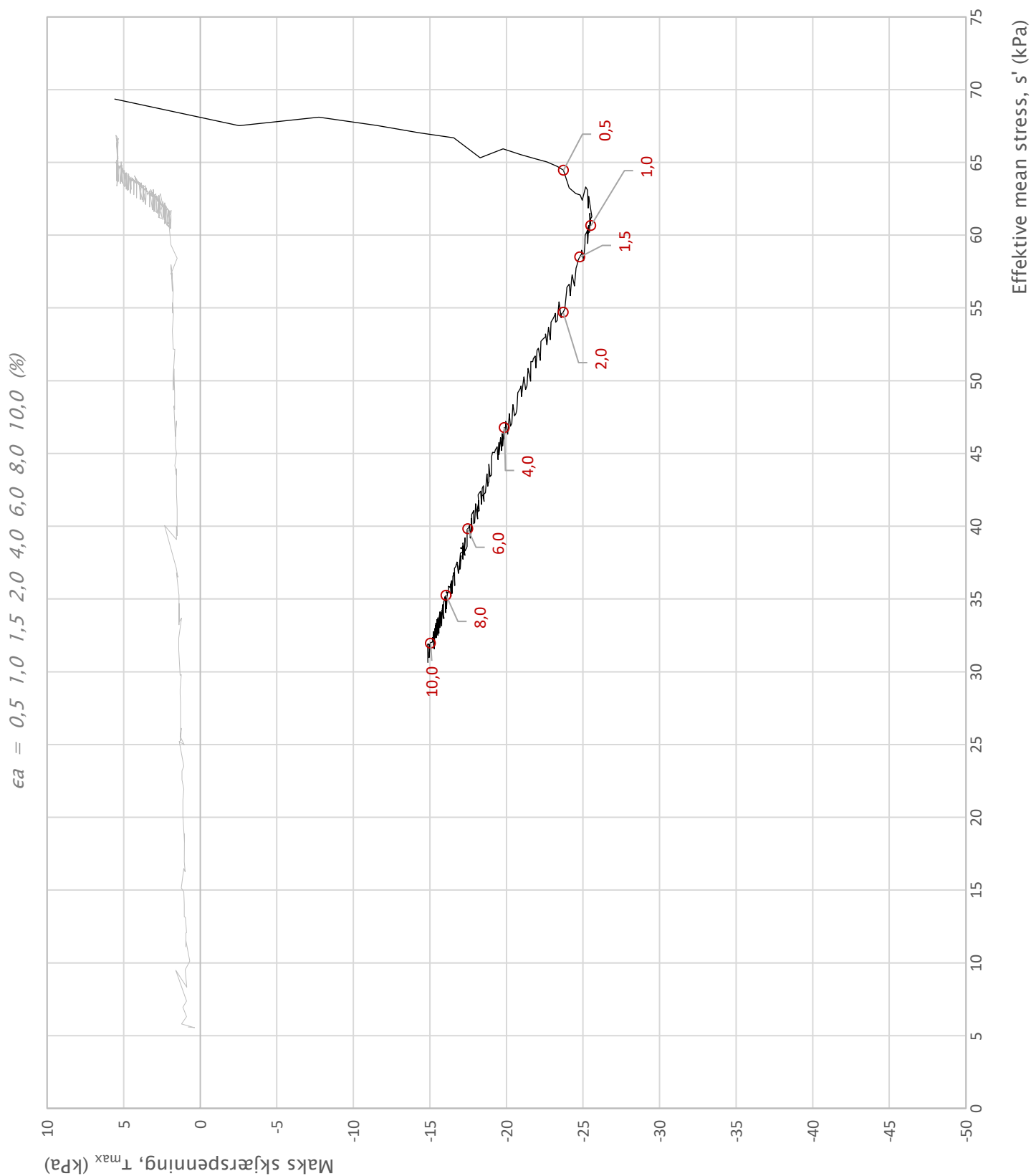
| | | | | | | |
|-------------------------------------|--------|------|---|------------|---------------|--------------|
| Prosjekt | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-001_rev00 | | Borhull | |
| NTNU Vurdering av byggbarhet | | | | | NTNU 1 | |
| Innhold | | | | | Dybde (m) | |
| Konsolidering | | | | | 7,10 | |
| Multiconsult | Utført | vt | Kontrollert | mash | Godkjent | ANG |
| | Region | Midt | Dato utført | 25.03.2020 | Revisjon | 0 |
| | | | | | Rev. dato | 01.04.2020 |
| | | | | | Forsøkstype | CAUc |
| | | | | | Figur | 481.5 |



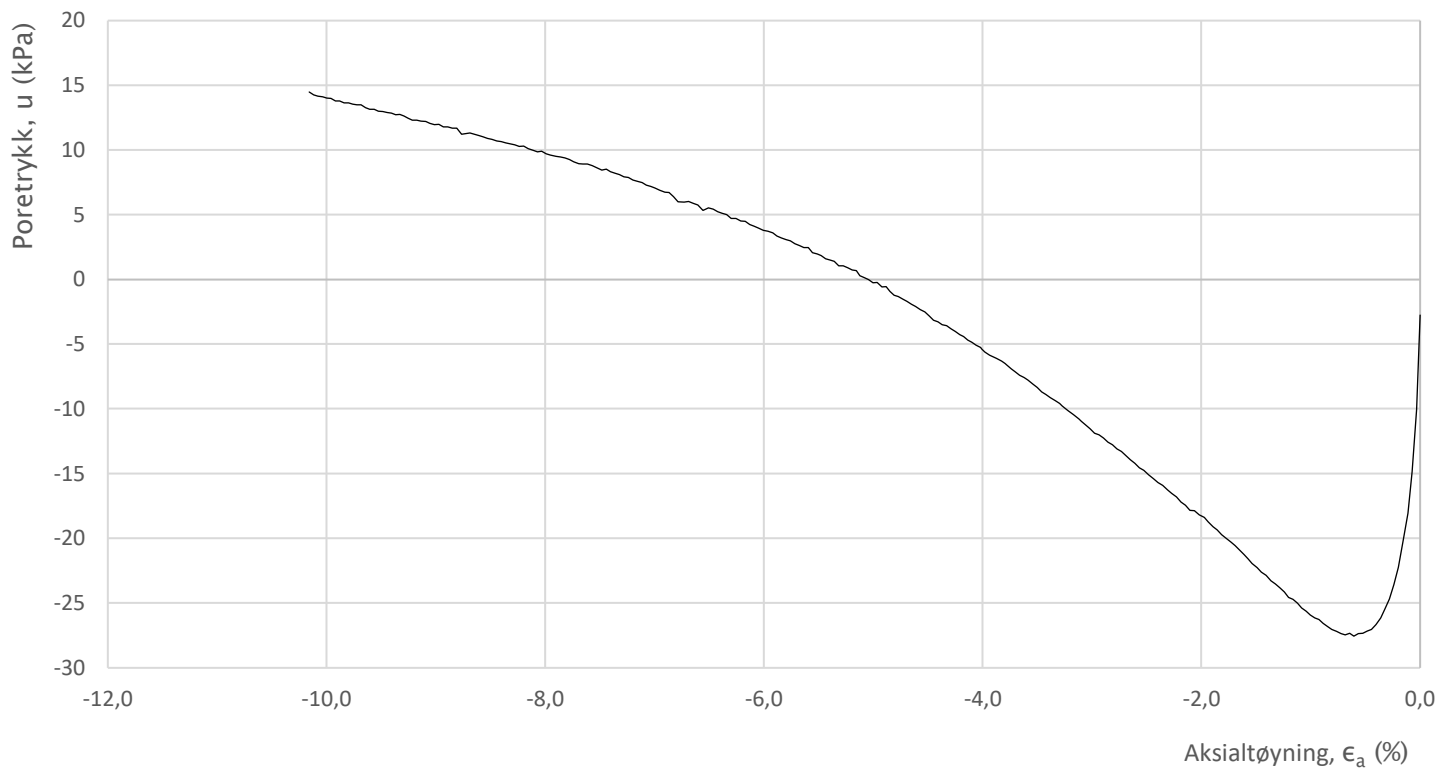
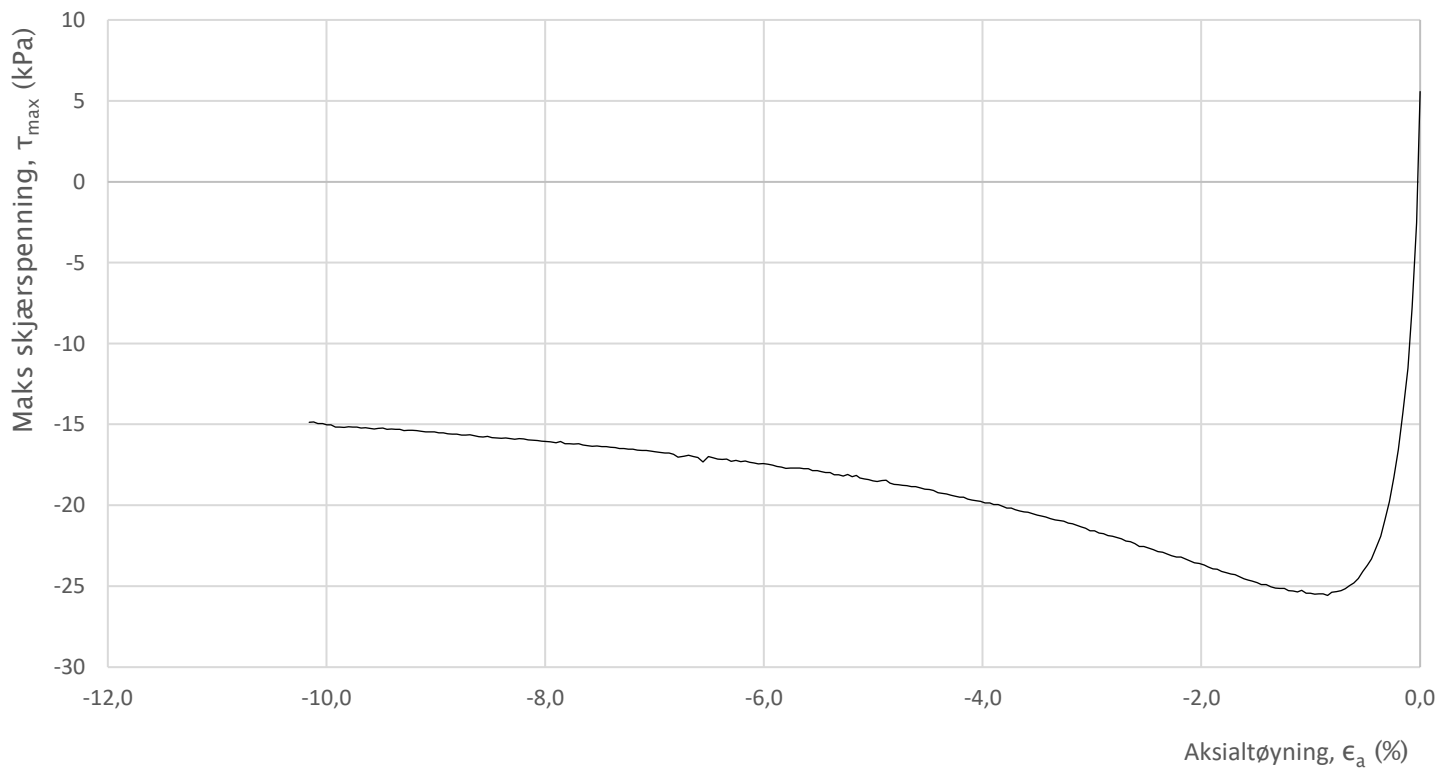
| | | | | | | |
|------------------------------------|--------|-------------|---|------------|---------------|--|
| Prosjekt | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-001_rev00 | | Borhull | |
| NTNU Vurdering av bygbarhet | | | | | NTNU 1 | |
| Innhold | | | Spenningssti i skjærfase, σ'_r - τ plott (NTNU) | | Dybde (m) | |
| | | | | | 7,25 | |
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | | Forsøkstype | |
| | vt | mash | ANG | | CAUe | |
| | Region | Dato utført | Revisjon | 0 | Figur | |
| | Midt | 25.03.2020 | Rev. dato | 01.04.2020 | 452.1 | |



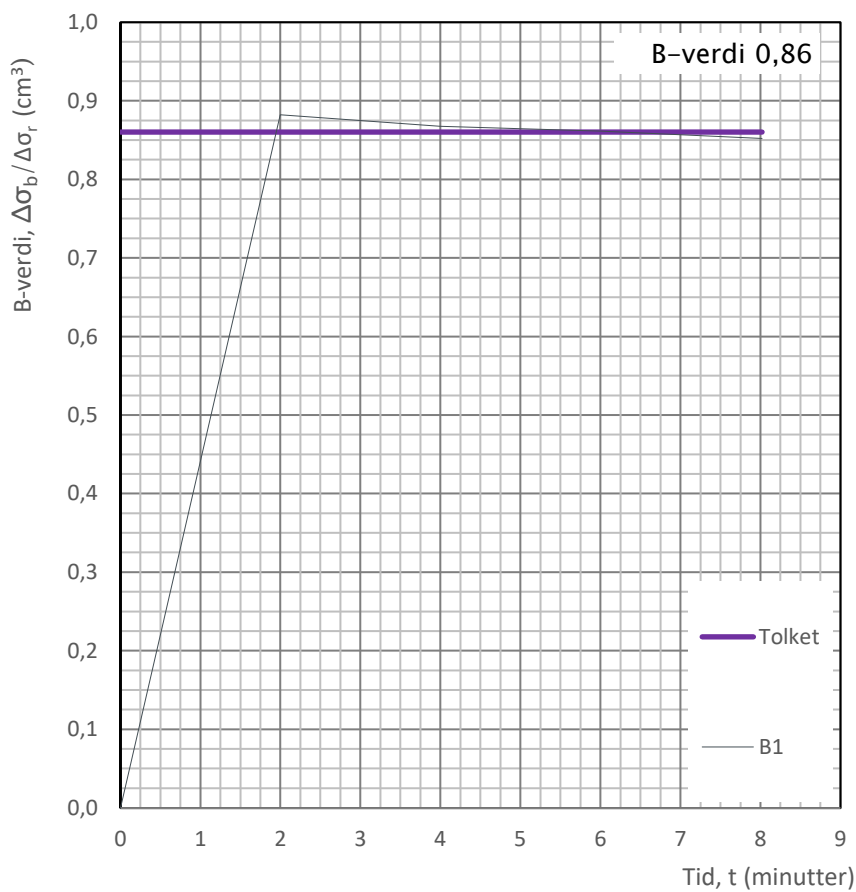
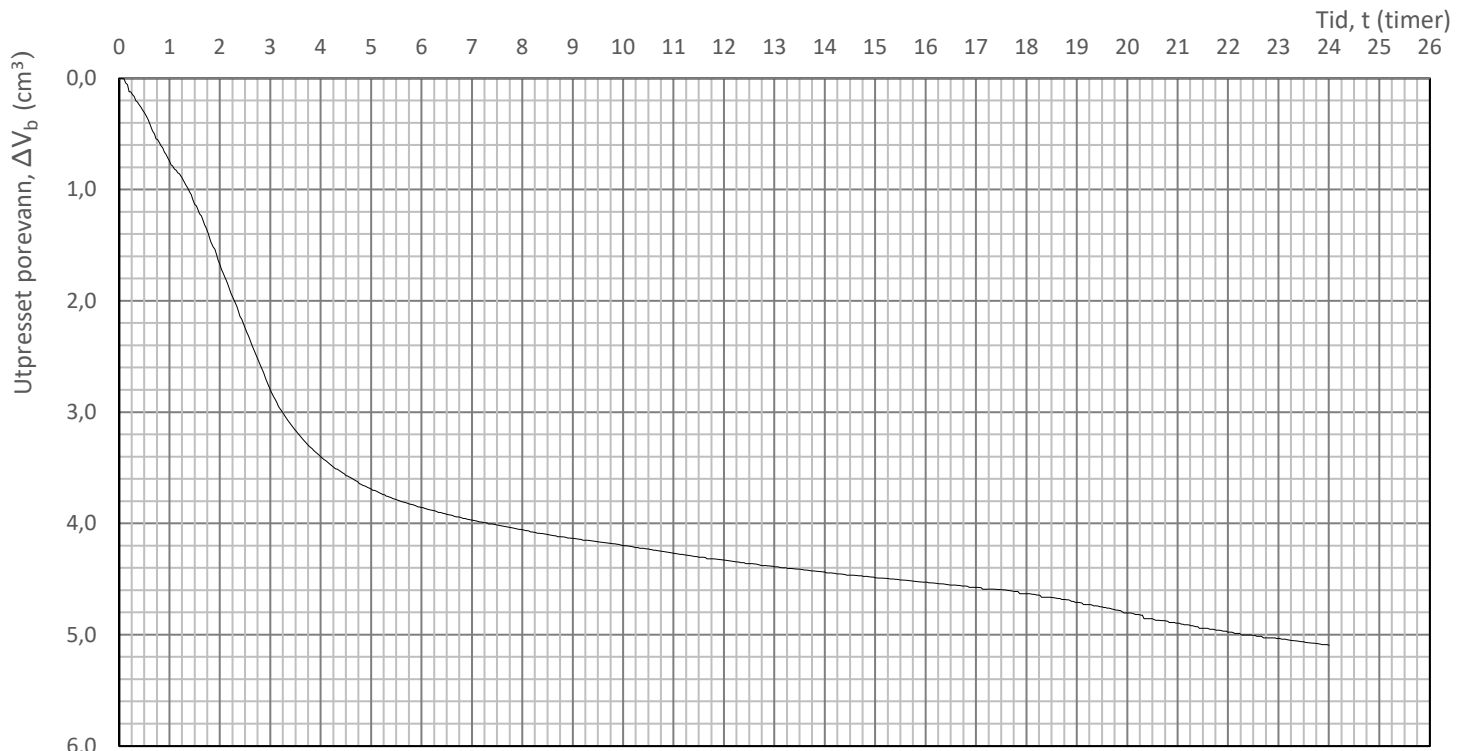
| | | | | | | | |
|----------------------------------|--------|-------------|-----------|---|--|---------------|--|
| Prosjekt | | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-001_rev00 | | Borhull | |
| NTNU Vurdering av bygghet | | | | | | NTNU 1 | |
| Innhold | | | | Spenningssti i skjærfase, p'-q plott | | Dybde (m) | |
| | | | | | | 7,25 | |
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | Forsøkstype | | | |
| | vt | mash | ANG | CAUe | | | |
| | Region | Dato utført | Revisjon | Figur | | | |
| | Midt | 25.03.2020 | 0 | 452.2 | | | |
| | | | Rev. dato | 01.04.2020 | | | |



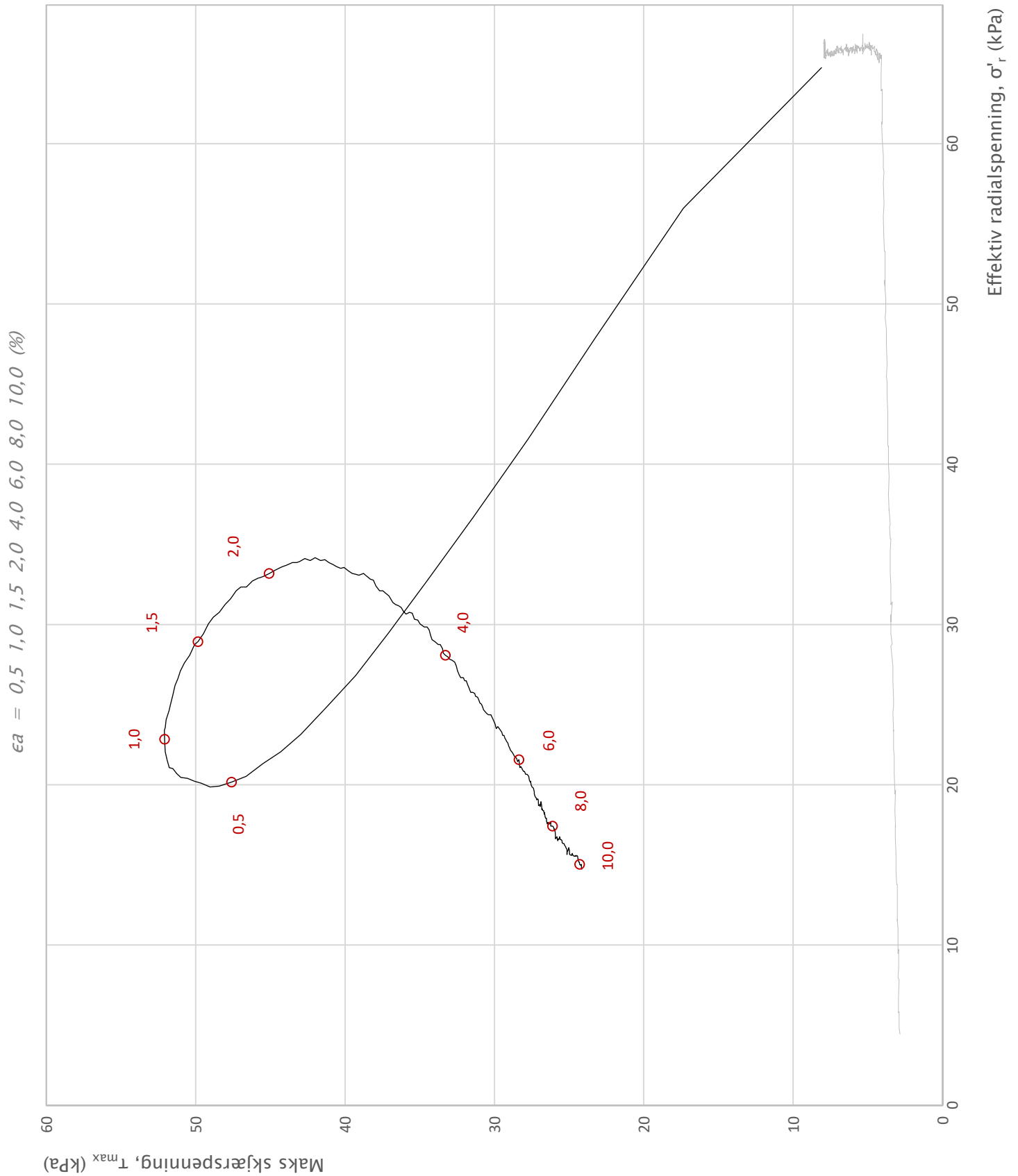
| | | | | | |
|-------------------------------------|-------------|-------------|---|--------------|---------------|
| Prosjekt | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-001_rev00 | | Borhull |
| NTNU Vurdering av byggbarhet | | | | | NTNU 1 |
| Innhold | | | Spenningssti i skjærfase, s' - τ plott (MIT) | | Dybde (m) |
| | | | | | 7,25 |
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | Forsøkstype | |
| | vt | mash | ANG | CAUe | |
| Region | Dato utført | Revisjon | 0 | Figur | |
| Midt | 25.03.2020 | Rev. dato | 01.04.2020 | 452.3 | |



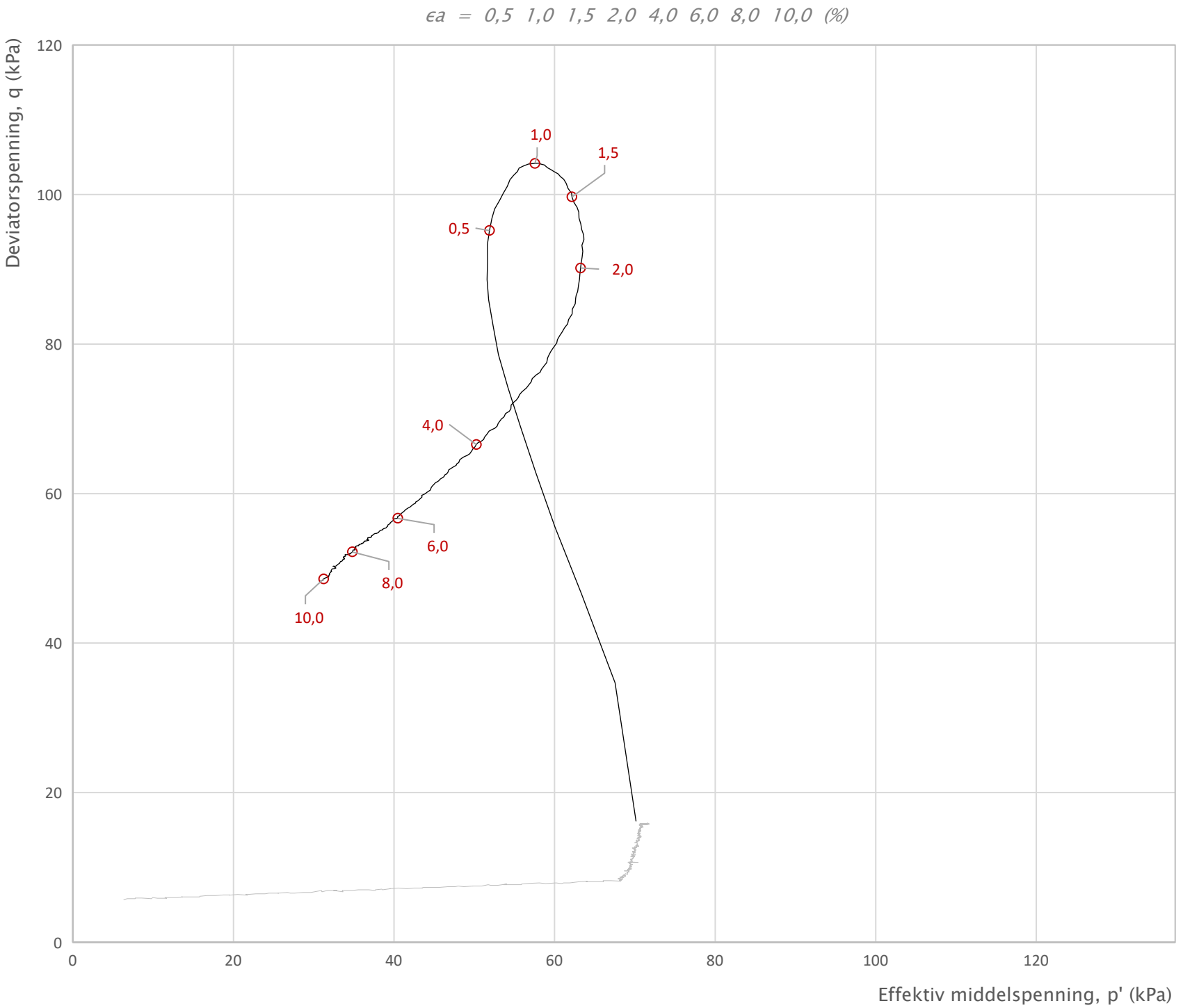
| | | | | |
|------------------------------------|--|-------------|--------------|---------------|
| Prosjekt | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-001_rev00 | | | Borhull |
| NTNU Vurdering av bygbarhet | | | | NTNU 1 |
| Innhold | Bruddutvikling i skjærfase, ϵ_a - τ og ϵ_a -u plott | | | Dybde (m) |
| | | | | 7,25 |
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | Forsøkstype |
| | vt | mash | ANG | CAUe |
| | Region | Dato utført | Revisjon | Figur |
| Midt | 25.03.2020 | 0 | 452.4 | |
| | | Rev. dato | 01.04.2020 | |



| | | | | | | |
|-------------------------------------|--------|------|---|------------|---------------|--------------|
| Prosjekt | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-001_rev00 | | Borhull | |
| NTNU Vurdering av byggbarhet | | | | | NTNU 1 | |
| Innhold | | | | | Dybde (m) | |
| Konsolidering | | | | | 7,25 | |
| Multiconsult | Utført | vt | Kontrollert | mash | Godkjent | Forsøkstype |
| | Region | Midt | Dato utført | 25.03.2020 | ANG | CAUe |
| | | | | | Revisjon | Figur |
| | | | | | 0 | 452.5 |
| | | | | | Rev. dato | |
| | | | | | 01.04.2020 | |



| | | | | | |
|------------------------------------|------------|-------------|---|-------------|-------------|
| Prosjekt | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-001_rev00 | | Borhull |
| NTNU Vurdering av bygbarhet | | | | | 1 |
| Innhold | | | Spenningssti i skjærfase, σ_r - τ plott (NTNU) | | Dybde (m) |
| | | | | | 8,55 |
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | Forsøkstype | |
| | vt | mash | ANG | CAUc | |
| | Region | Dato utført | Revisjon | Figur | |
| Midt | 30.03.2020 | 0 | 483.1 | | |
| | | | Rev. dato | 01.04.2020 | |



Prosjekt
 Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-001_rev00

Borhull

NTNU Vurdering av bygbarhet

Innhold

Dybde (m)

Spenningssti i skjærfase, p'-q plott

8,55

Multiconsult

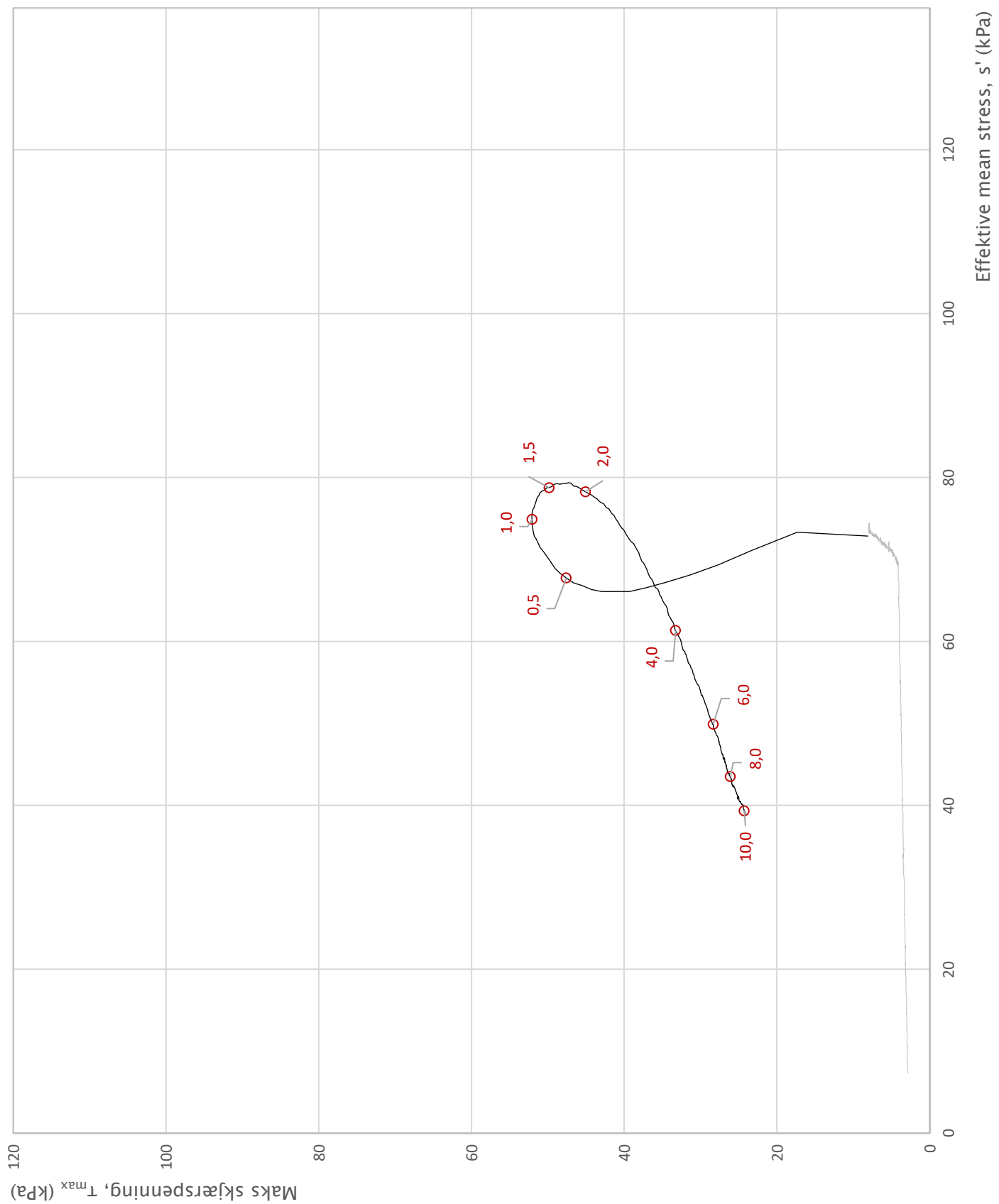
Utført
 vt
 Region
 Midt

Kontrollert
 mash
 Dato utført
 30.03.2020

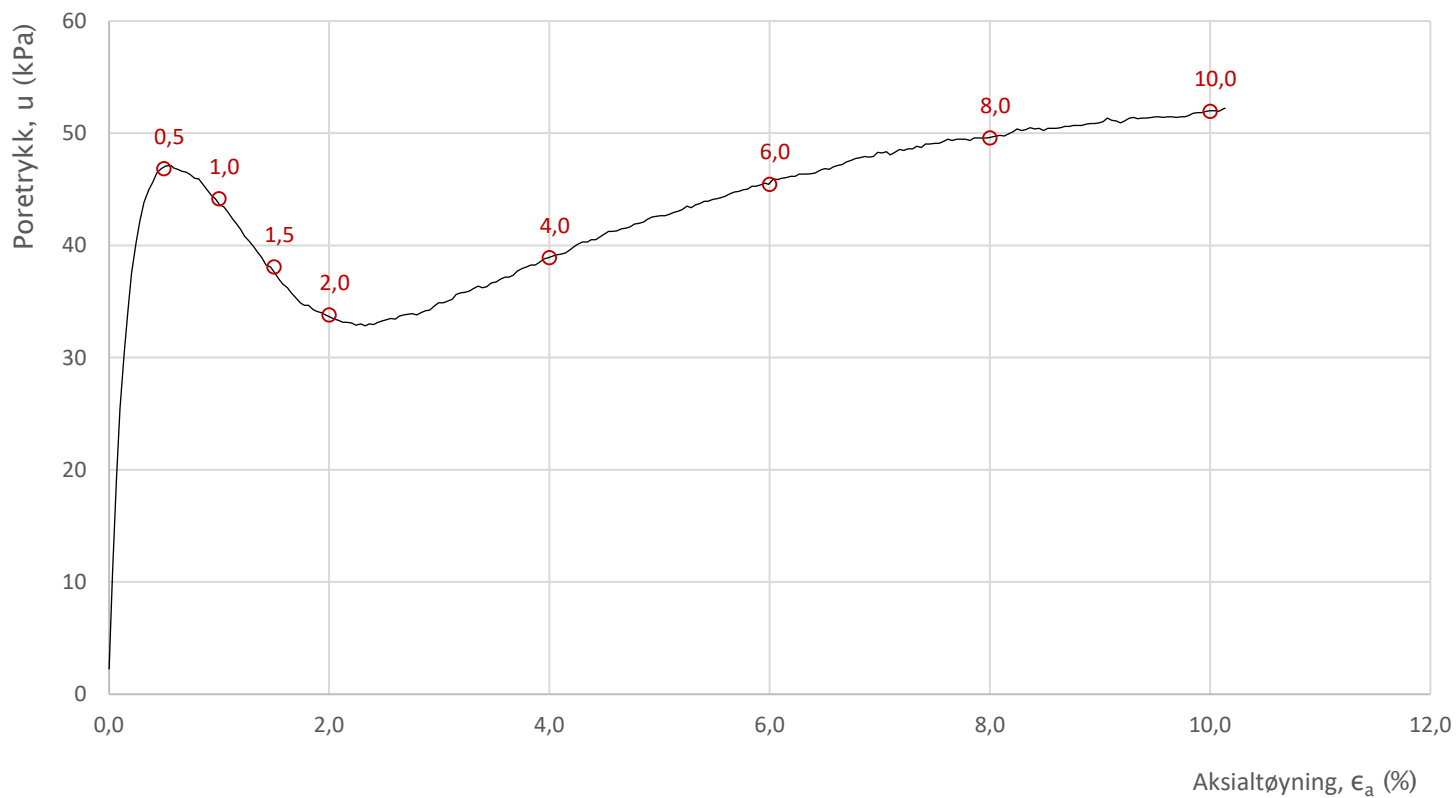
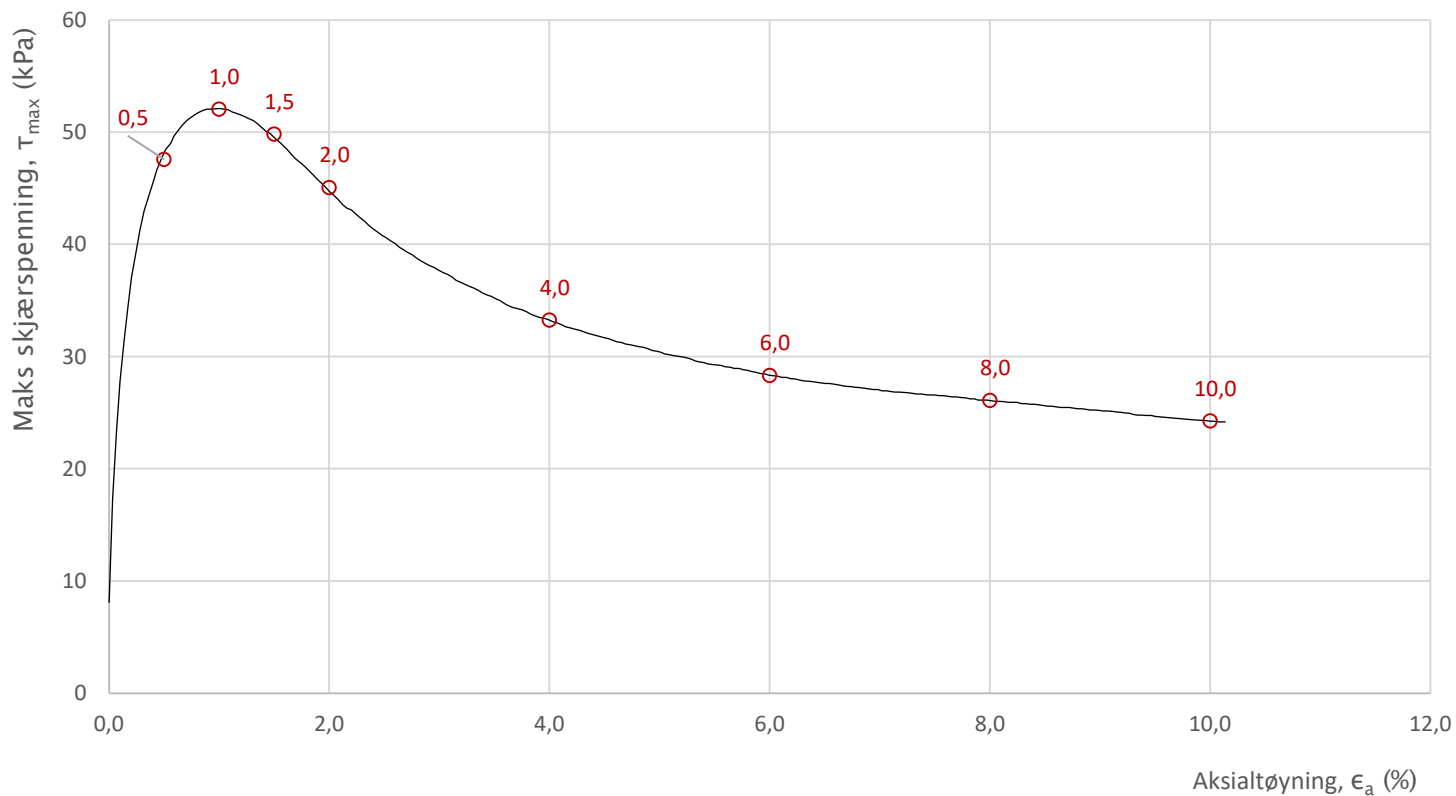
Godkjent
 ANG
 Revisjon
 0
 Rev. dato
 01.04.2020

Forsøksstype
 CAUC
 Figur
 483.2

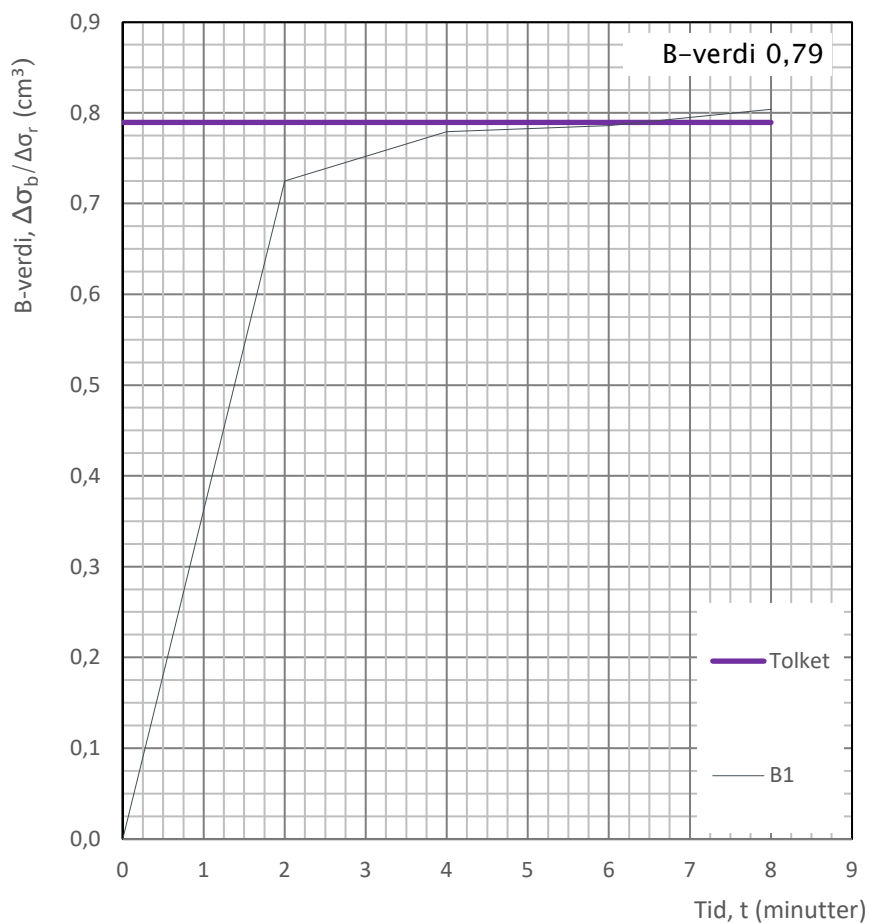
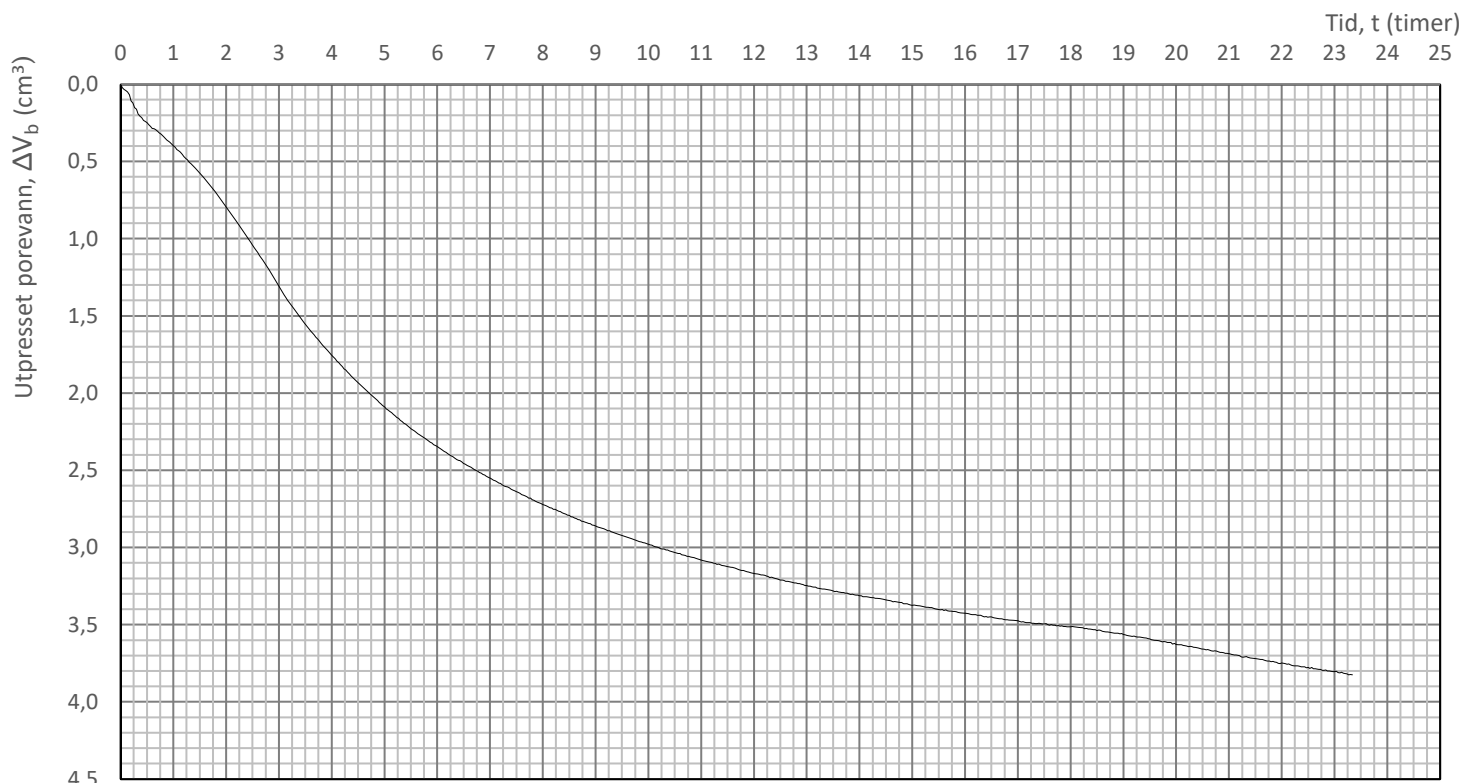
$\epsilon_a = 0,5 \ 1,0 \ 1,5 \ 2,0 \ 4,0 \ 6,0 \ 8,0 \ 10,0 \ 10,0 \ (%)$



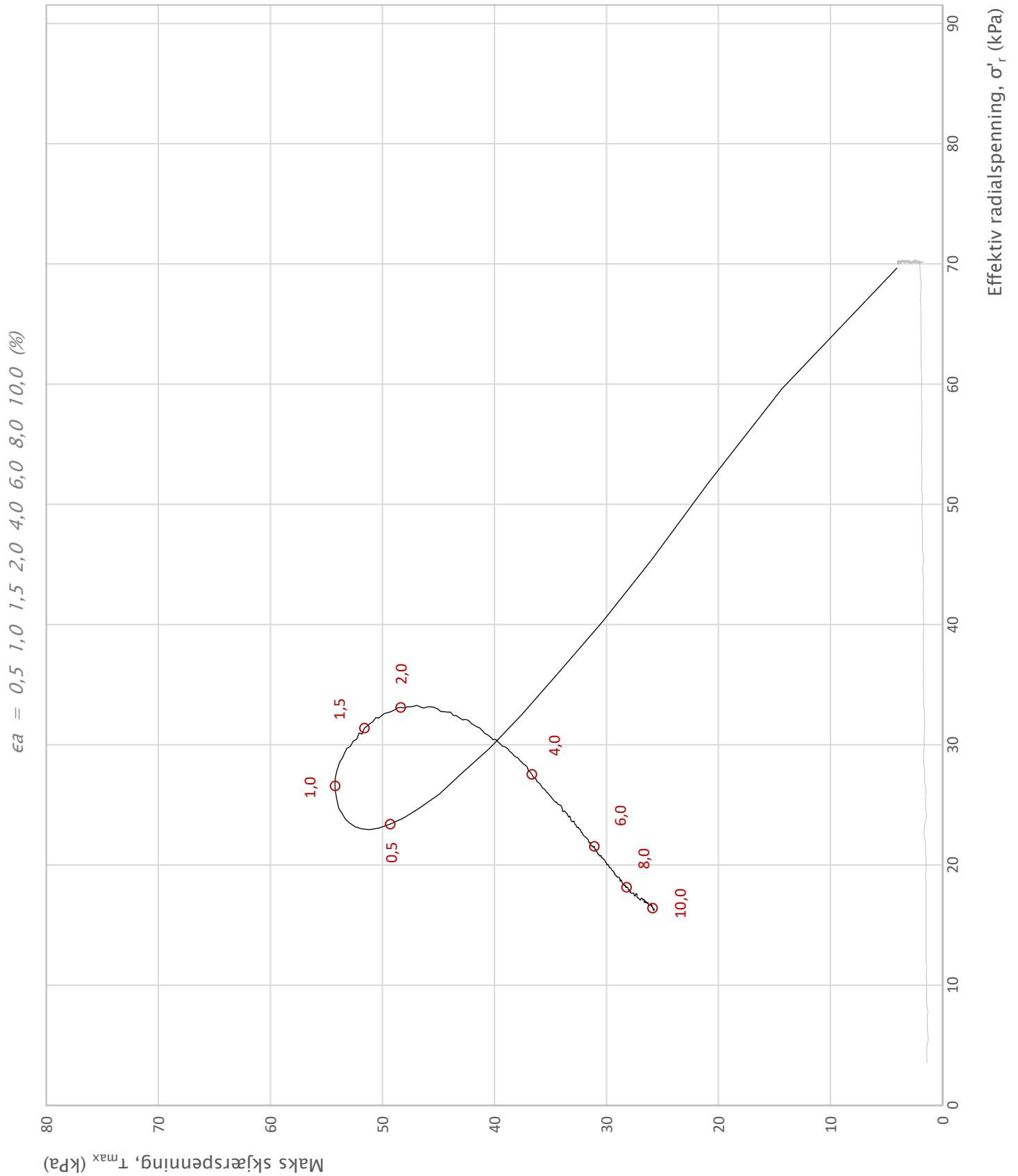
| | | | | | |
|------------------------------------|--------|-------------|---|--------------|-------------|
| Prosjekt | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-001_rev00 | | Borhull |
| NTNU Vurdering av bygbarhet | | | | | 1 |
| Innhold | | | Spenningssti i skjærfase, s'-τ plott (MIT) | | Dybde (m) |
| | | | | | 8,55 |
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | Forsøkstype | |
| | vt | mash | ANG | CAUc | |
| | Region | Dato utført | Revisjon | Figur | |
| | Midt | 30.03.2020 | 0 | 483.3 | |
| | | | Rev. dato | 01.04.2020 | |



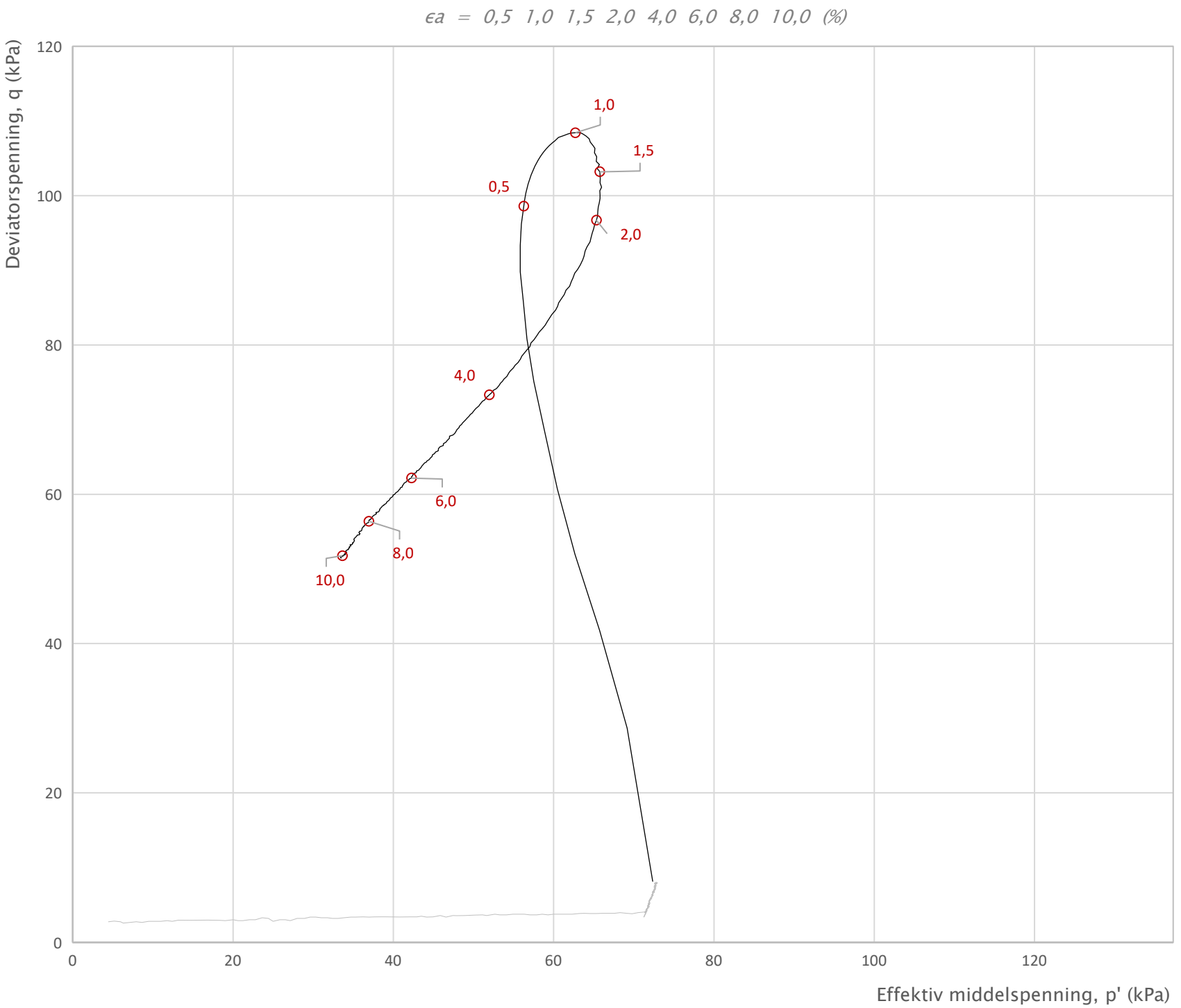
| | | | | | |
|------------------------------------|--------|-------------|---|--------------|-------------|
| Prosjekt | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-001_rev00 | | Borhull |
| NTNU Vurdering av bygbarhet | | | | | 1 |
| Innhold | | | Bruddutvikling i skjærfase, ϵ_a - τ og ϵ_a - u plott | | Dybde (m) |
| | | | | | 8,55 |
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | Forsøkstype | |
| | vt | mash | ANG | CAUc | |
| | Region | Dato utført | Revisjon | Figur | |
| | Midt | 30.03.2020 | 0 | 483.4 | |
| | | | Rev. dato | 01.04.2020 | |



| | | | | | | |
|------------------------------------|--------|------|---|------------|--------------|-----|
| Prosjekt | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-001_rev00 | | Borhull | |
| NTNU Vurdering av bygbarhet | | | | | 1 | |
| Innhold | | | | | Dybde (m) | |
| Konsolidering | | | | | 8,55 | |
| Multiconsult | Utført | vt | Kontrollert | mash | Godkjent | ANG |
| | Region | Midt | Dato utført | 30.03.2020 | Revisjon | 0 |
| | | | | | Forsøkstype | |
| | | | | | CAUc | |
| | | | | | Figur | |
| | | | | | 483.5 | |
| | | | | | Rev. dato | |
| | | | | | 01.04.2020 | |



| | | | | | |
|------------------------------------|------------|-------------|---|-------------|-------------|
| Prosjekt | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG_RAP-001_rev00 | | Borhull |
| NTNU Vurdering av bygbarhet | | | | | 1 |
| Innhold | | | Spenningssti i skjærfase, σ'_r - τ plott (NTNU) | | Dybde (m) |
| | | | | | 8,55 |
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | Forsøkstype | |
| | vt | mash | ANG | CAUc | |
| | Region | Dato utført | Revisjon | Figur | |
| Midt | 01.04.2020 | 0 | 484.1 | | |
| | | | Rev. dato | 02.04.2020 | |

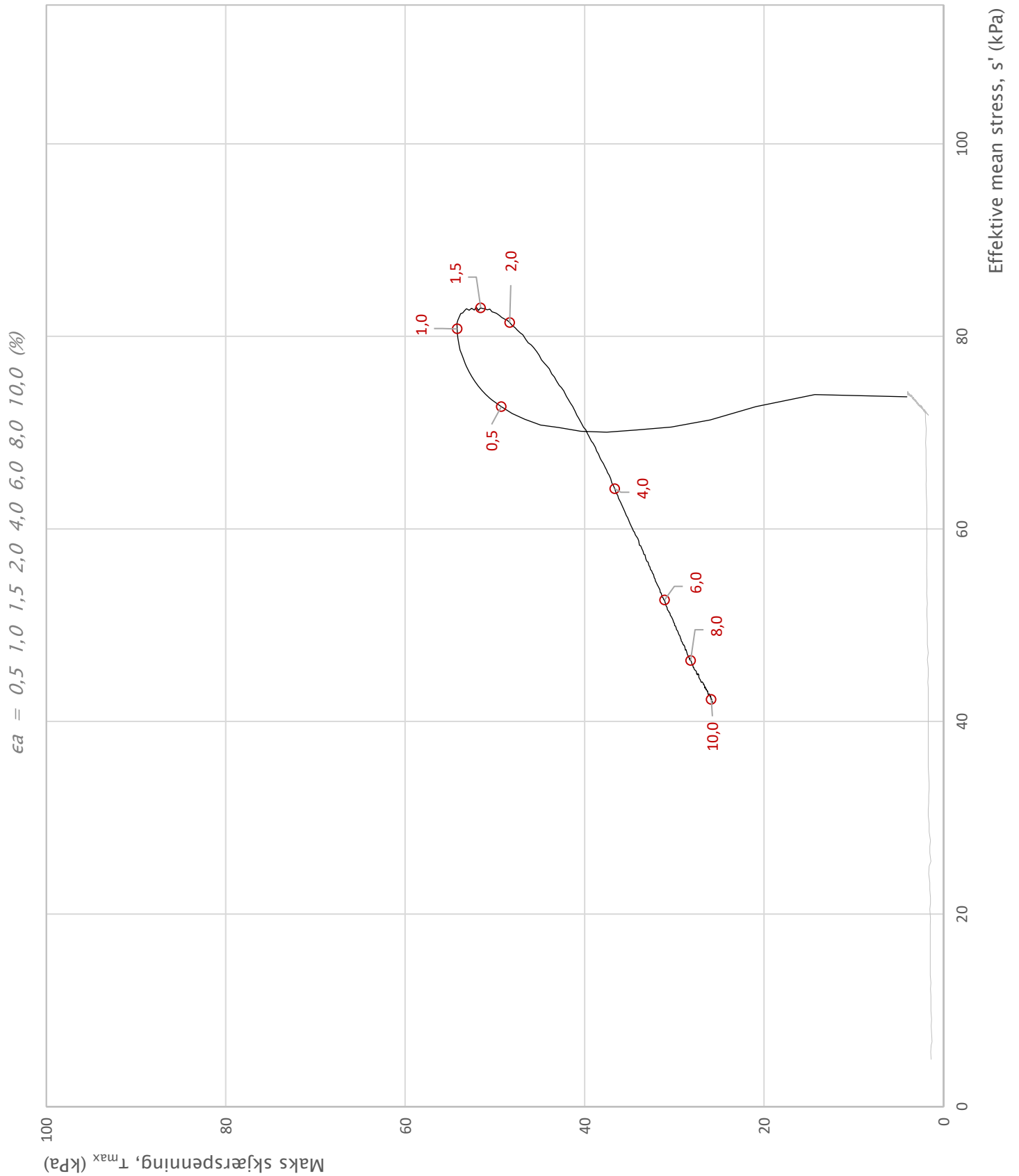


Prosjekt **NTNU Vurdering av byggbarhet**
 Prosjektnummer: 1 021 5021 -02. Rapportnummer: RIG_RAP-001_rev00

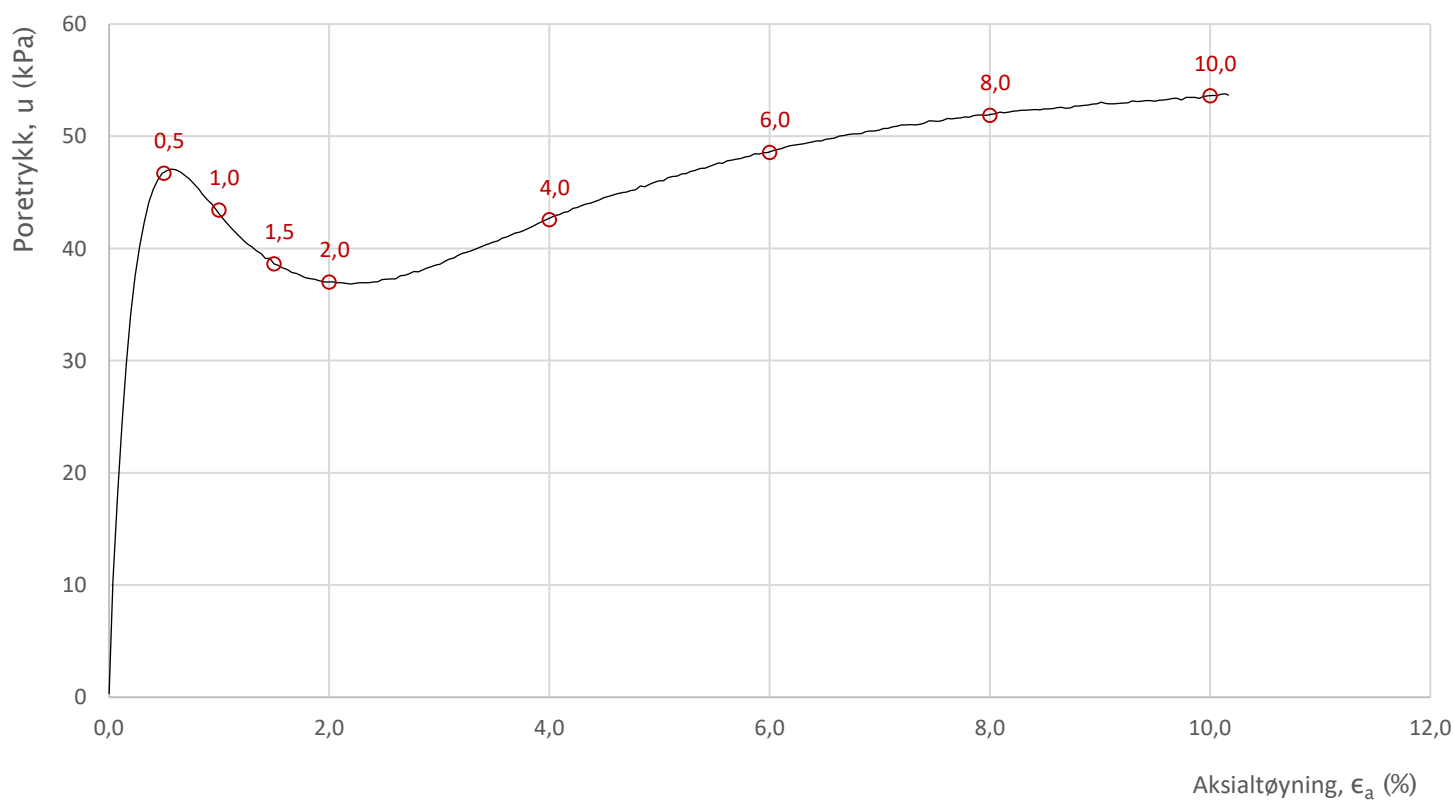
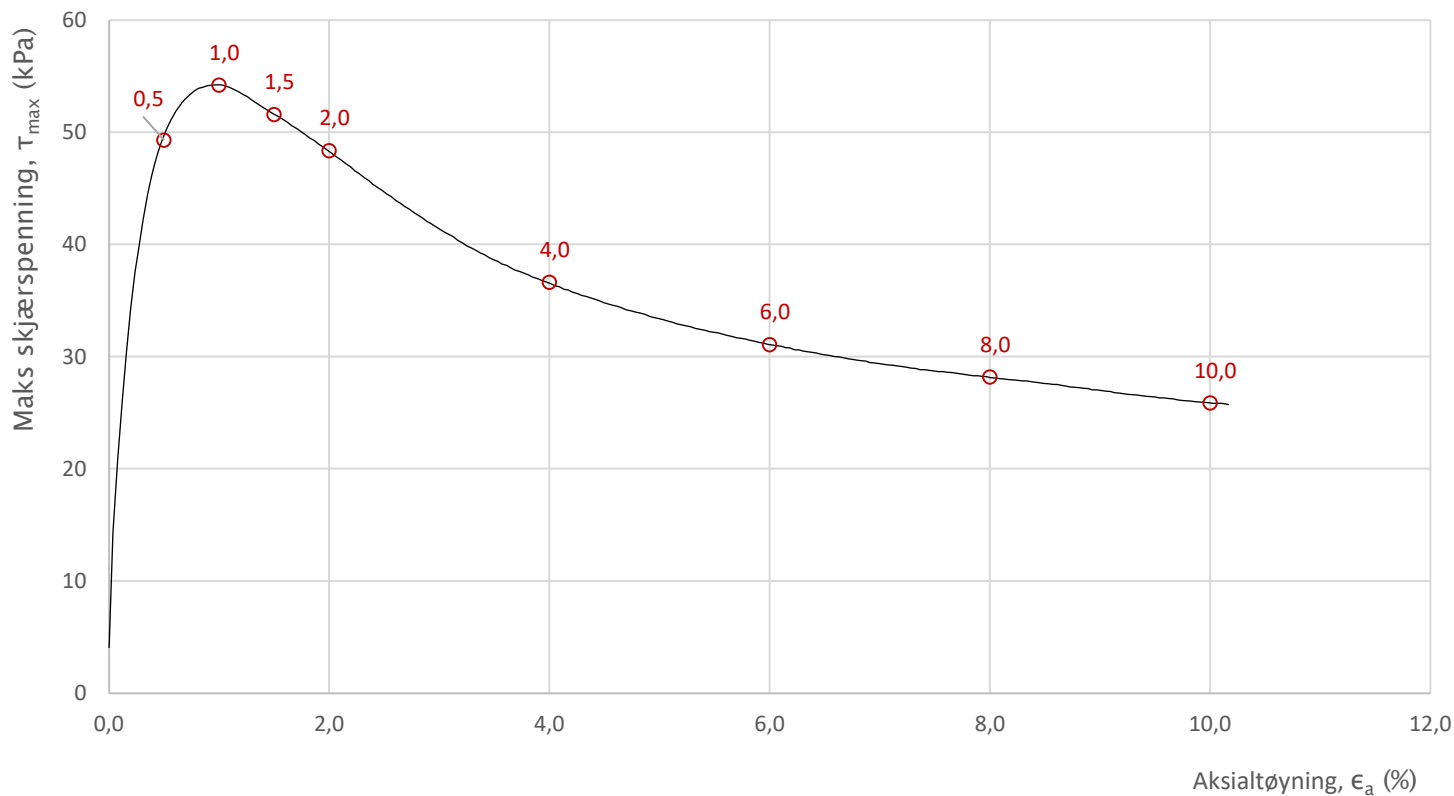
Innhold **Dybde (m)**
8,55

Spenningssti i skjærfase, p' - q plott **Borhull**
1

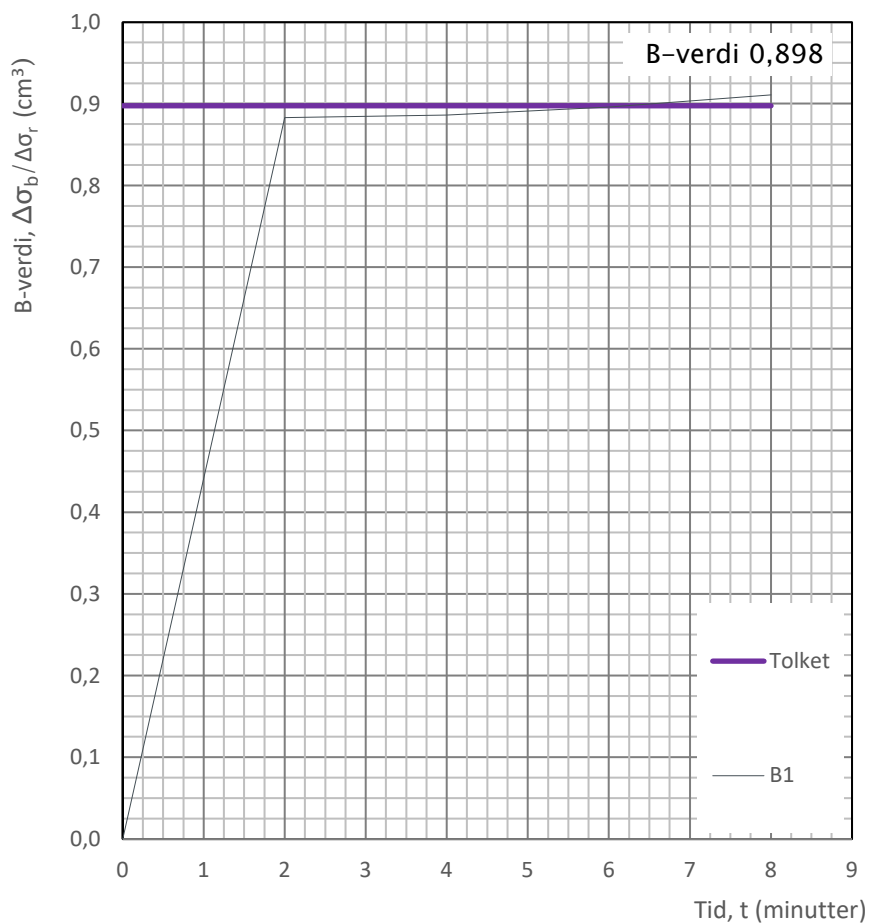
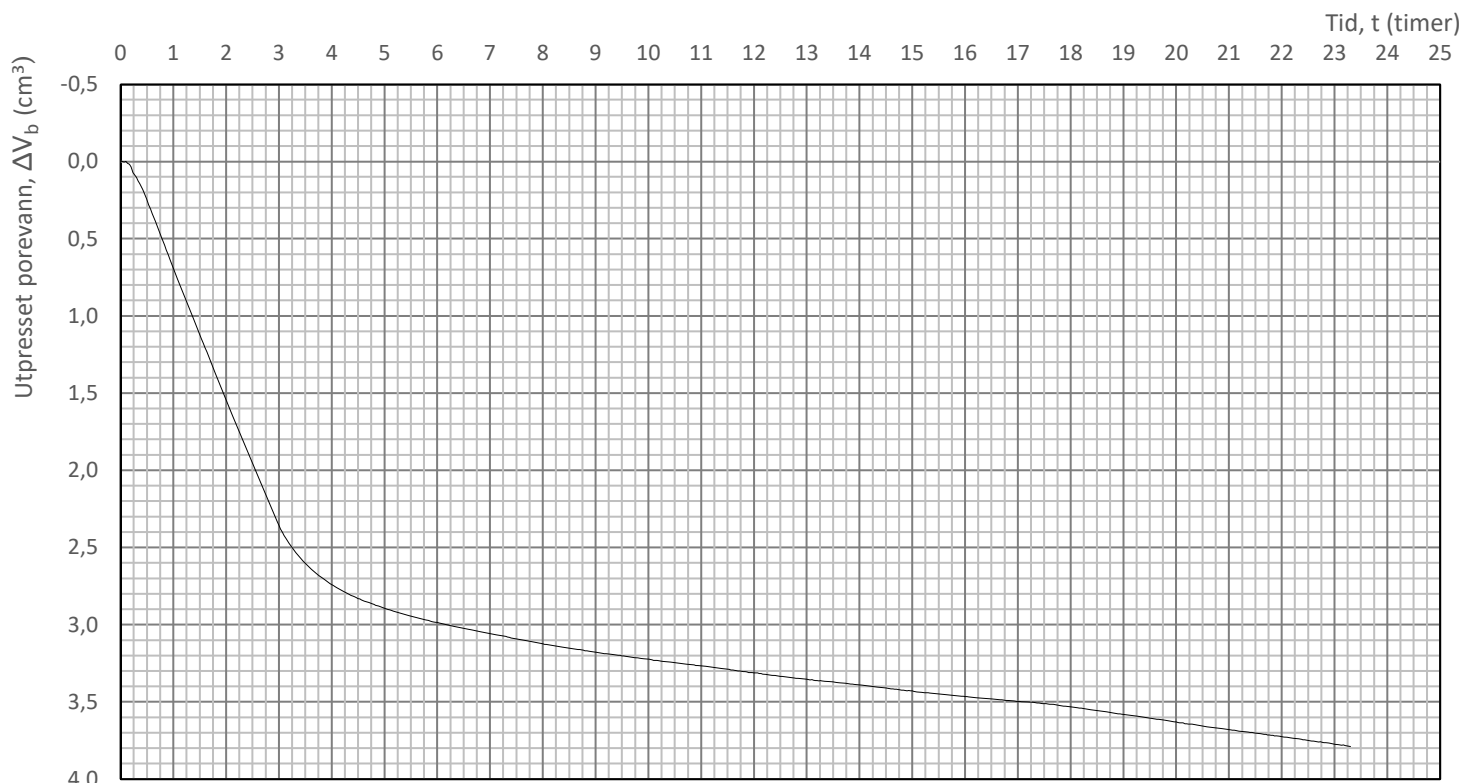
| | | | | |
|---------------------|-------------|-------------|------------|-----------------------------|
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | Forsøksstype CAUC |
| | vt | mash | ANG | |
| Region | Dato utført | Revisjon | Rev. dato | Figur |
| Midt | 01.04.2020 | 0 | 02.04.2020 | 484.2 |



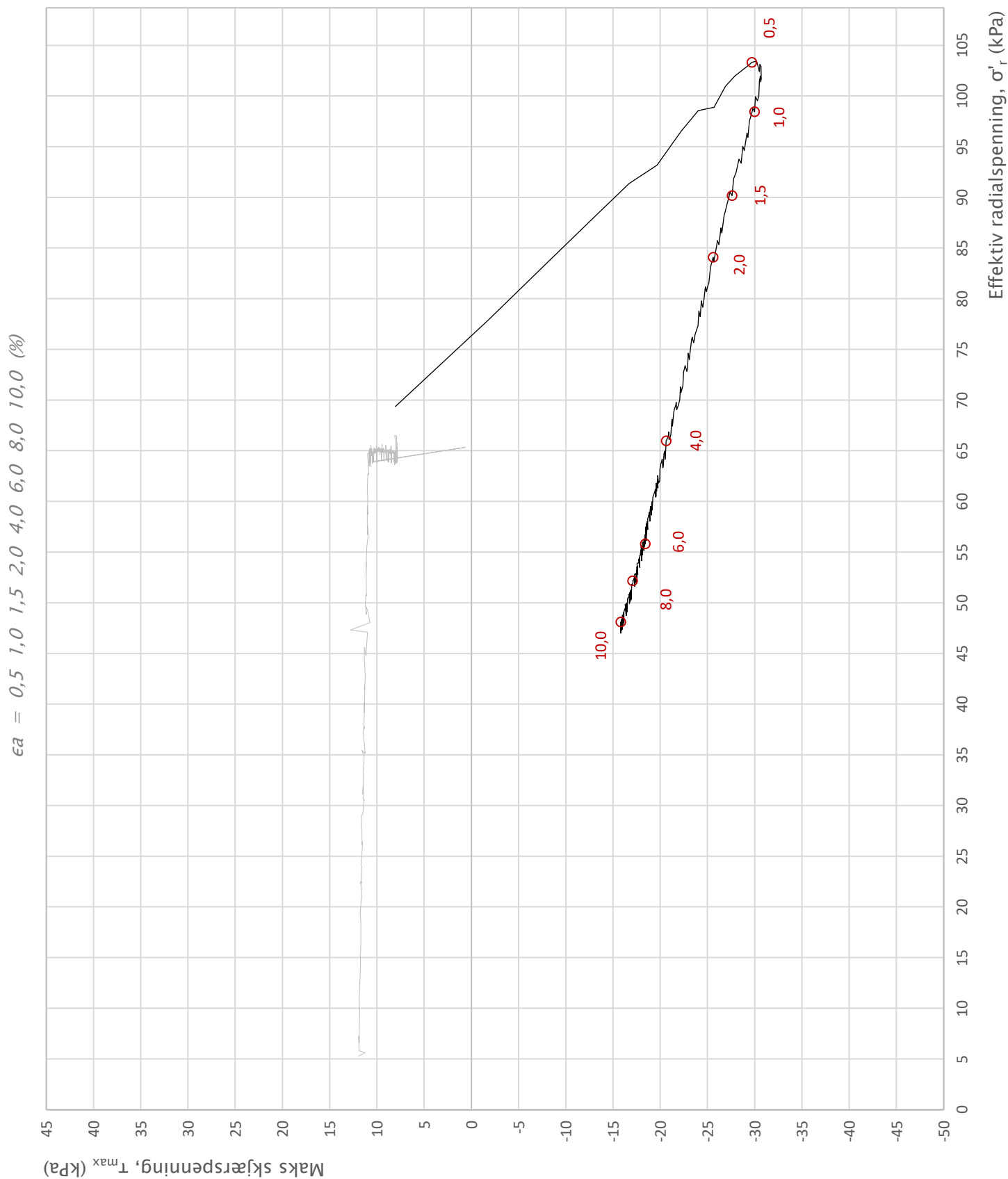
| | | | | | |
|-------------------------------------|------------|-------------|---|-------------|-------------|
| Prosjekt | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG_RAP-001_rev00 | | Borhull |
| NTNU Vurdering av byggbarhet | | | | | 1 |
| Innhold | | | Spenningssti i skjærfase, s' - τ plott (MIT) | | Dybde (m) |
| | | | | | 8,55 |
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | Forsøkstype | |
| | vt | mash | ANG | CAUc | |
| | Region | Dato utført | Revisjon | Figur | |
| Midt | 01.04.2020 | 0 | 484.3 | | |
| | | | Rev. dato | 02.04.2020 | |



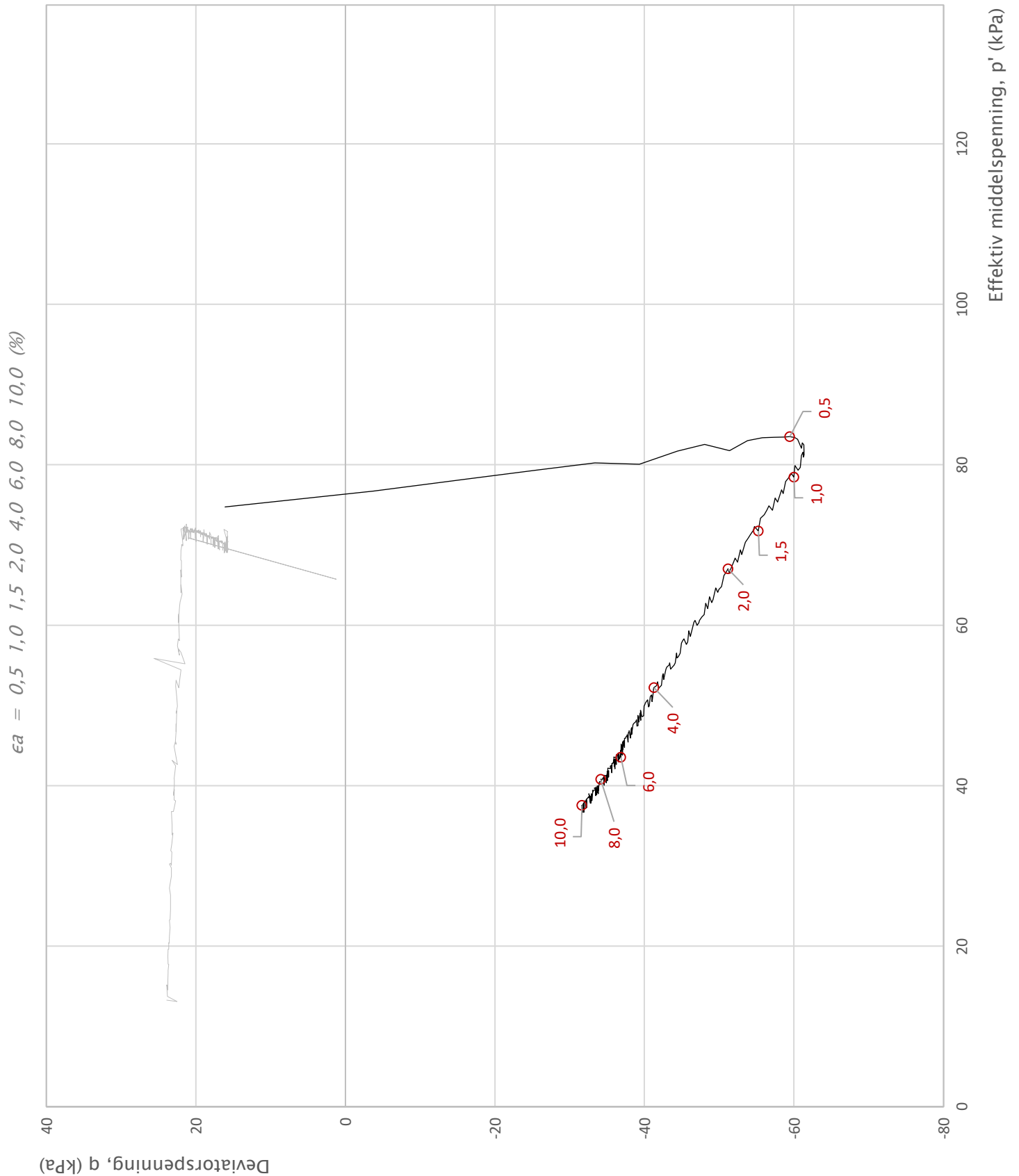
| | | | | | |
|-------------------------------------|------------|-------------|---|--------------|-------------|
| Prosjekt | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG_RAP-001_rev00 | | Borhull |
| NTNU Vurdering av byggbarhet | | | | | 1 |
| Innhold | | | Bruddutvikling i skjærfase, ϵ_a - τ og ϵ_a - u plott | | Dybde (m) |
| | | | | | 8,55 |
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | Forsøkstype | |
| | vt | mash | ANG | CAUc | |
| | Region | Dato utført | Revisjon | Figur | |
| Midt | 01.04.2020 | 0 | 02.04.2020 | 484.4 | |



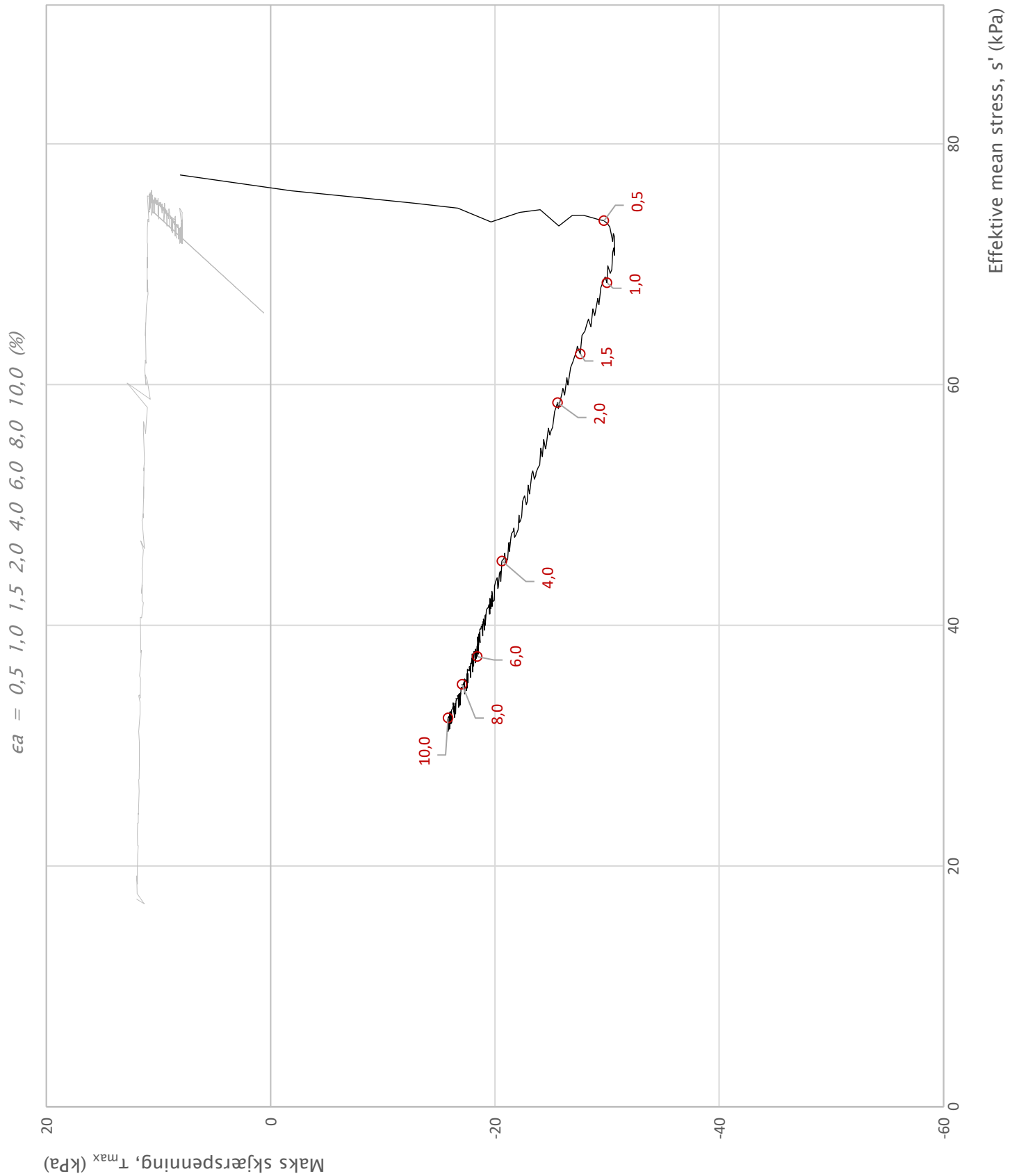
| | | | | | | | | |
|-------------------------------------|--------|------|---|------------|-----------|------------|-------------|-------|
| Prosjekt | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG_RAP-001_rev00 | | Borhull | 1 | | |
| NTNU Vurdering av byggbarhet | | | | | Dybde (m) | 8,55 | | |
| Innhold | | | | | | | | |
| Konsolidering | | | | | | | | |
| Multiconsult | Utført | vt | Kontrollert | mash | Godkjent | ANG | Forsøkstype | CAUc |
| | Region | Midt | Dato utført | 01.04.2020 | Revisjon | 0 | Figur | 484.5 |
| | | | | | Rev. dato | 02.04.2020 | | |



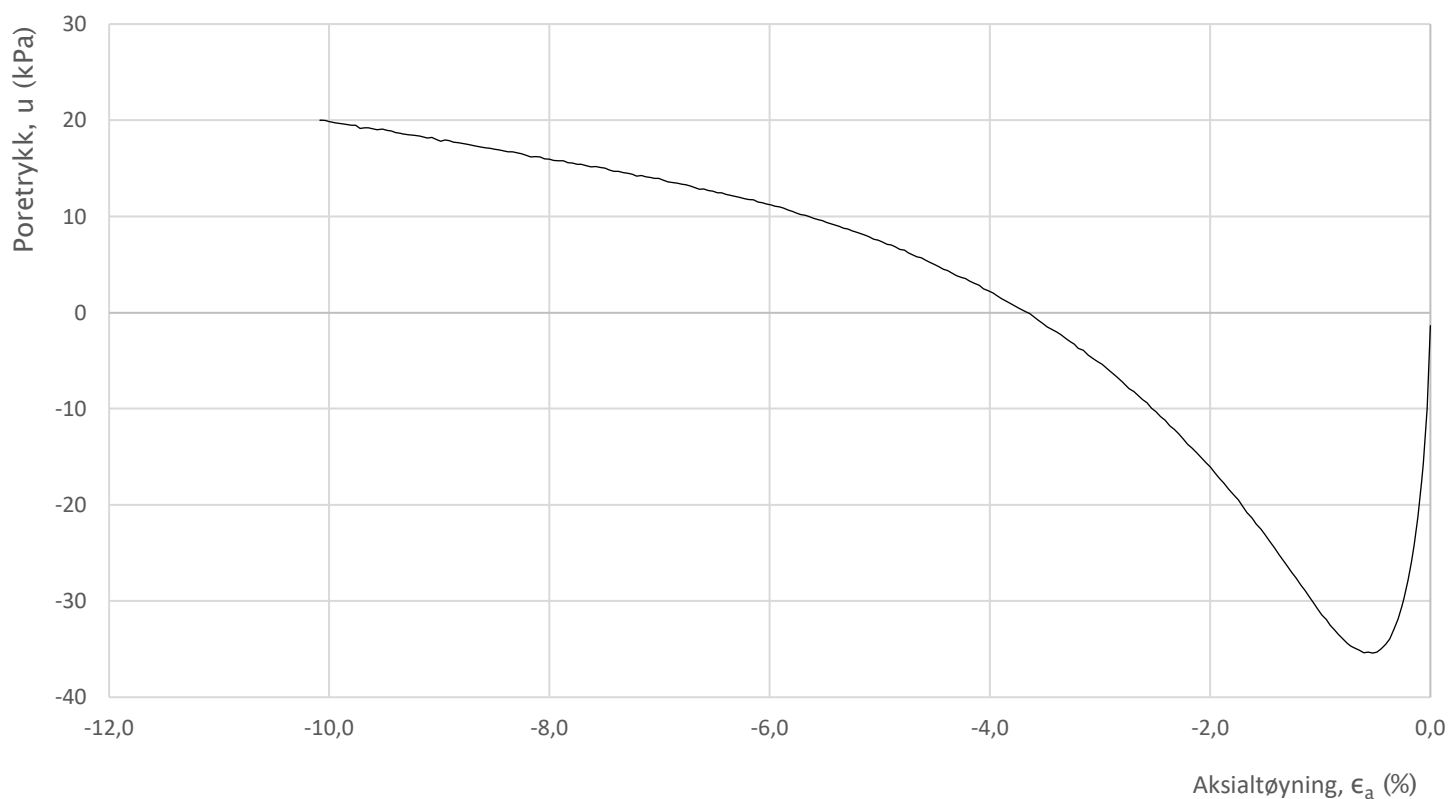
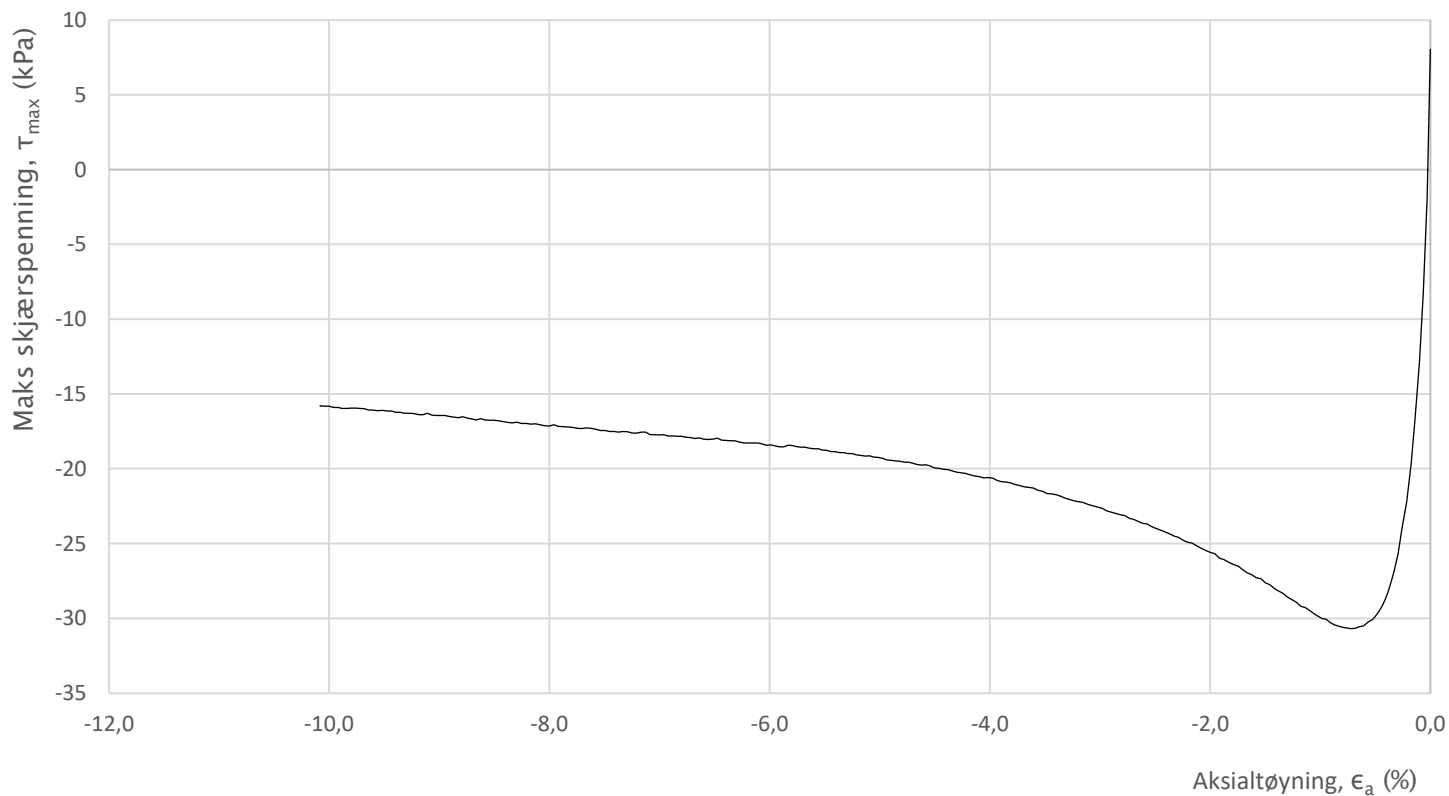
| | | | | | |
|------------------------------------|------------|-------------|---|-------------|-------------|
| Prosjekt | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-000_rev00 | | Borhull |
| NTNU Vurdering av bygbarhet | | | | | 1 |
| Innhold | | | Spenningssti i skjærfase, σ_r - τ plott (NTNU) | | Dybde (m) |
| | | | | | 8,70 |
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | Forsøkstype | |
| | vt | mash | ANG | CAUe | |
| | Region | Dato utført | Revisjon | Figur | |
| Midt | 30.03.2020 | 0 | 485.1 | | |
| | | | Rev. dato | 01.04.2020 | |



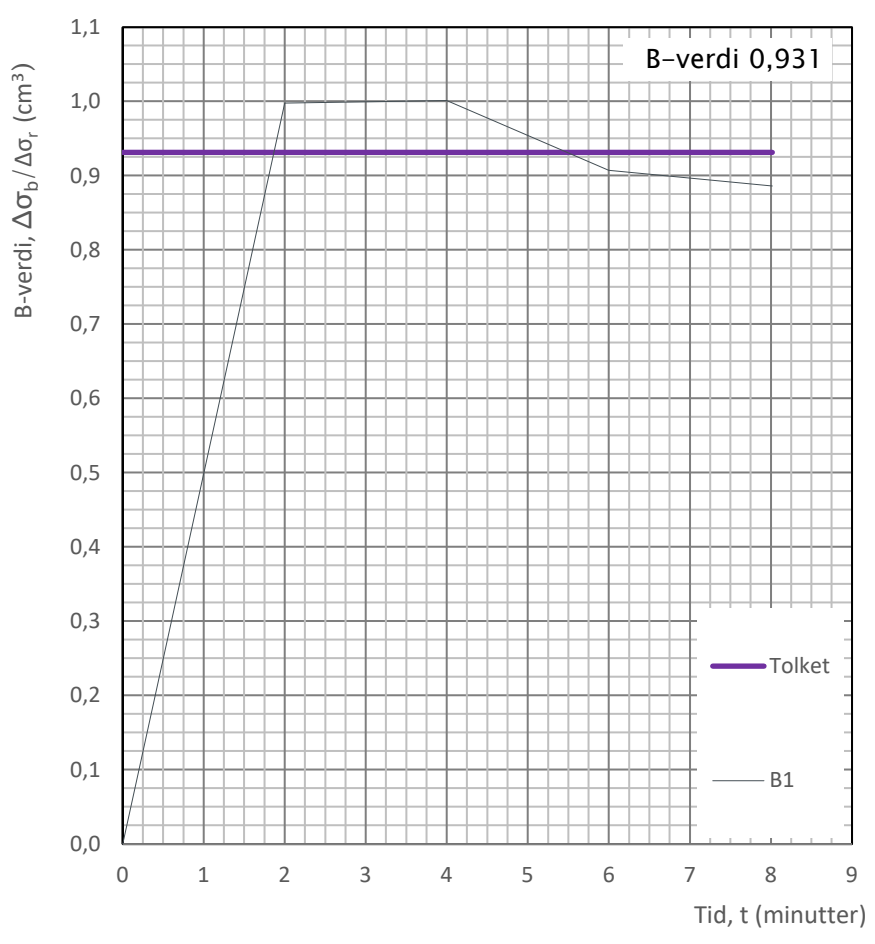
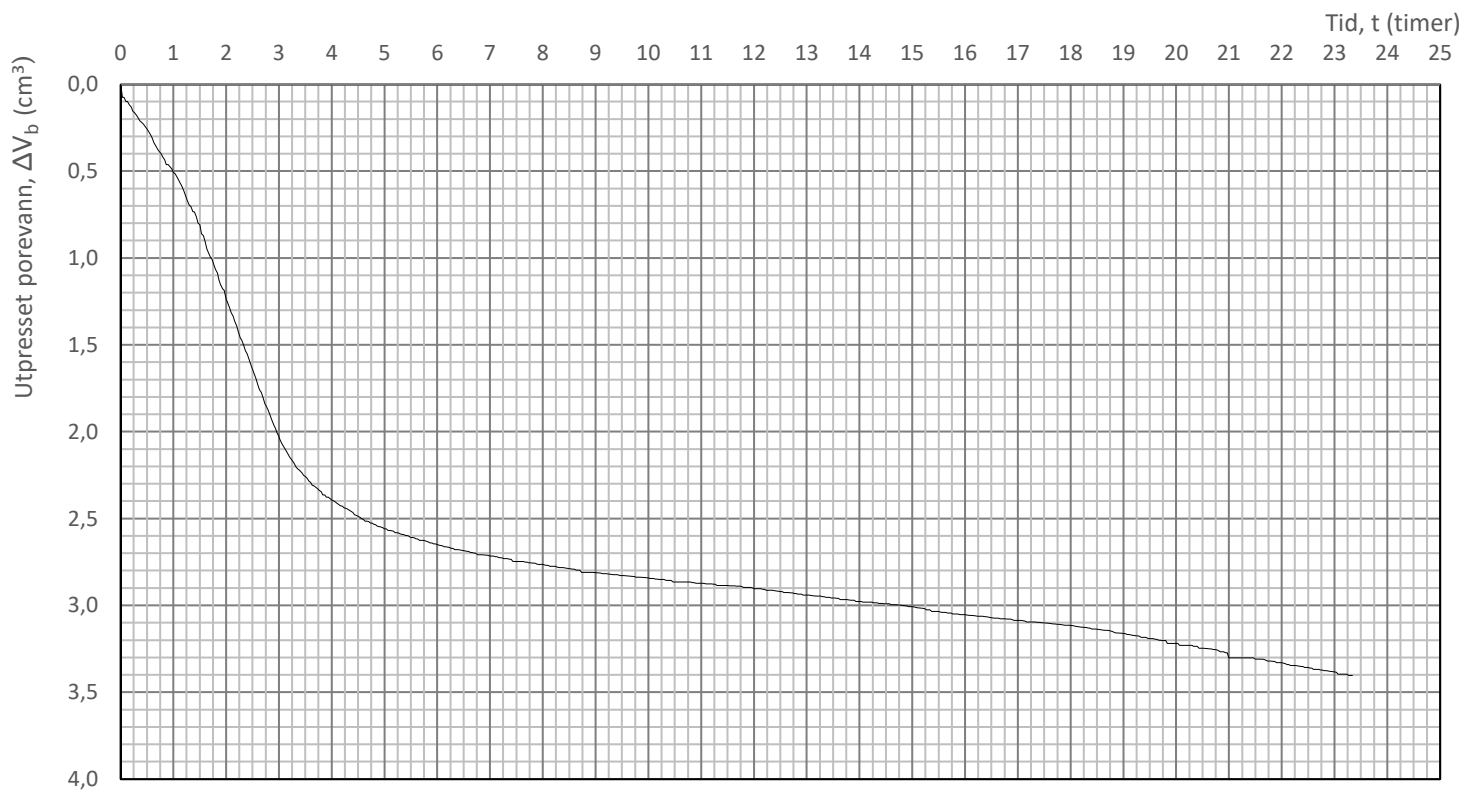
| | | | | | |
|------------------------------------|--------|-------------|---|--------------|-------------|
| Prosjekt | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-000_rev00 | | Borhull |
| NTNU Vurdering av bygbarhet | | | | | 1 |
| Innhold | | | Spenningssti i skjærfase, p'-q plott | | Dybde (m) |
| | | | | | 8,70 |
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | Forsøkstype | |
| | vt | mash | ANG | CAUe | |
| | Region | Dato utført | Revisjon | Figur | |
| | Midt | 30.03.2020 | 0 | 485.2 | |
| | | | Rev. dato | 01.04.2020 | |



| | | | | | |
|-------------------------------------|---|-------------|-----------|-------------|------|
| Prosjekt | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-000_rev00 | | | Borhull | 1 |
| NTNU Vurdering av byggbarhet | | | | | |
| Innhold | Spenningssti i skjærfase, s' - τ plott (MIT) | | | Dybde (m) | 8,70 |
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | Forsøkstype | |
| | vt | mash | ANG | CAUe | |
| | Region | Dato utført | Revisjon | Figur | |
| | Midt | 30.03.2020 | 0 | 485.3 | |
| | | | Rev. dato | 01.04.2020 | |



| | | | | | |
|-------------------------------------|---|-------------|-----------|-------------|------|
| Prosjekt | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-000_rev00 | | | Borhull | 1 |
| NTNU Vurdering av byggbarhet | | | | | |
| Innhold | Bruddutvikling i skjærfase, ϵ_a - τ og ϵ_a - u plott | | | Dybde (m) | 8,70 |
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | Forsøkstype | |
| | vt | mash | ANG | CAUe | |
| | Region | Dato utført | Revisjon | Figur | |
| Midt | 30.03.2020 | 0 | 485.4 | | |
| | | | Rev. dato | 01.04.2020 | |



| | | | | | | |
|-------------------------------------|--------|-------------|---|--------------|-------------|--|
| Prosjekt | | | Prosjektnummer: 10215021-02. Rapportnummer: RIG-RAP-000_rev00 | | Borhull | |
| NTNU Vurdering av byggbarhet | | | | | 1 | |
| Innhold | | | | | Dybde (m) | |
| Konsolidering | | | | | 8,70 | |
| Multiconsult | Utført | Kontrollert | Godkjent | Forsøkstype | | |
| | vt | mash | ANG | CAUe | | |
| | Region | Dato utført | Revisjon | Figur | | |
| | Midt | 30.03.2020 | 0 | 485.5 | | |
| | | | Rev. dato | 01.04.2020 | | |

Laboratorieundersøkelser utføres for sikker klassifisering og bestemmelse av mekaniske egenskaper. Forsøkene utføres på prøver som er tatt opp i felt. Utførelsesstandarder er inkludert til slutt i dette vedlegget.

MINERALSKE JORDARTER

Ved prøveåpning klassifiseres og indentifiseres jordarten. Mineralske jordarter klassifiseres vanligvis på grunnlag av korngraderingen. Betegnelse og kornstørrelser for de enkelte fraksjonene er:

| Fraksjon | Leire | Silt | Sand | Grus | Stein | Blokk |
|--------------------|--------|-------------|---------|------|--------|-------|
| Kornstørrelse [mm] | <0,002 | 0,002-0,063 | 0,063-2 | 2-63 | 63-630 | >630 |

En jordart kan inneholde en eller flere av fraksjonene over. Jordarten benevnes i henhold til korngraderingen med substantiv for den fraksjon som har dominerende betydning for jordartens egenskaper og adjektiv for medvirkende fraksjoner (for eksempel siltig sand). Leirinholdet har størst betydning for benevnelse av jordarten. Morene er en usortert breavsetning som kan inneholde alle fraksjoner fra leir til blokk. Den største fraksjonen angis først i beskrivelsen etter egne benevningsregler, for eksempel grusig morene.

ORGANISKE JORDARTER

Organiske jordarter klassifiseres på grunnlag av jordartens opprinnelse og omdanningsgrad. De viktigste typer er:

| Benevnelse | Beskrivelse |
|--|--|
| Torv | Myrplanter, mer eller mindre omdannet |
| <ul style="list-style-type: none"> Fibrig torv | Fibrig med lett gjenkjennelig plantestruktur. Viser noe styrke |
| <ul style="list-style-type: none"> Delvis fibrig torv, mellomtorv | Gjenkjennelig plantestruktur, ingen styrke i planterestene |
| <ul style="list-style-type: none"> Amorf torv, svarttorv | Ingen synlig plantestruktur, svampig konsistens |
| Gytje og dy | Nedbrutt struktur av organisk materiale, kan inneholde mineralske bestanddeler |
| Humus | Planterester, levende organismer sammen med ikke-organisk innhold |
| Mold og matjord | Sterkt omdannet organisk materiale med løs struktur, utgjør vanligvis det ovre jordlaget |

KORNFORDELINGSANALYSER

En kornfordelingsanalyse utføres ved våt eller tørr sikting av fraksjonene med diameter $d > 0,063$ mm. For mindre partikler bestemmes den ekvivalente korndiameteren ved slemmeanalyse og bruk av hydrometer. I slemmeanalysen slemmes materialet opp i vann og densiteten av suspensjonen måles ved bestemte tidsintervaller. Kornfordelingen kan da bestemmes fra Stokes lov om sedimentering av kuleformede partikler i vann. Det vil ofte være nødvendig med en kombinasjon av metodene.

VANNINNHOOLD

Vanninnholdet angir masse av vann i % av masse tørt (fast) stoff i massen og bestemmes fra tørking av en jordprøve ved 110°C i 24 timer.

KONSISTENSGRENSER

Konsistensgrensene (Atterbergs grenser) for en jordart angir vanninnholdsområdet der materialet er plastisk (formbart). Flytegrensen angir vanninnholdet der materialet går fra plastisk til flytende tilstand. Plastisitetsgrensen (utrullingsgrensen) angir vanninnholdet der materialet ikke lenger kan formes uten at det sprekker opp. Plastisitetsindeksen $I_p = w_f - w_p$ (%) angir det plastiske området for jordarten og benyttes til klassifisering av plastisiteten. Er det naturlige vanninnholdet høyere enn flytegrensen blir materialet flytende ved omrøring (vanlig for kvikkleire).

HUMUSINNHOOLD

Humusinnholdet kan bestemmes ved kolorimetri og bruk av natronlut (NaOH-forbindelse), glødning av jordprøve i varmeovn eller våt-oksydasjon med hydrogenperoksyd. Metoden angir innholdet av humufiserte organiske bestanddeler i en relativ skala.

DENSITET, TYNGDETETHET, PORETALL OG PORØSITET

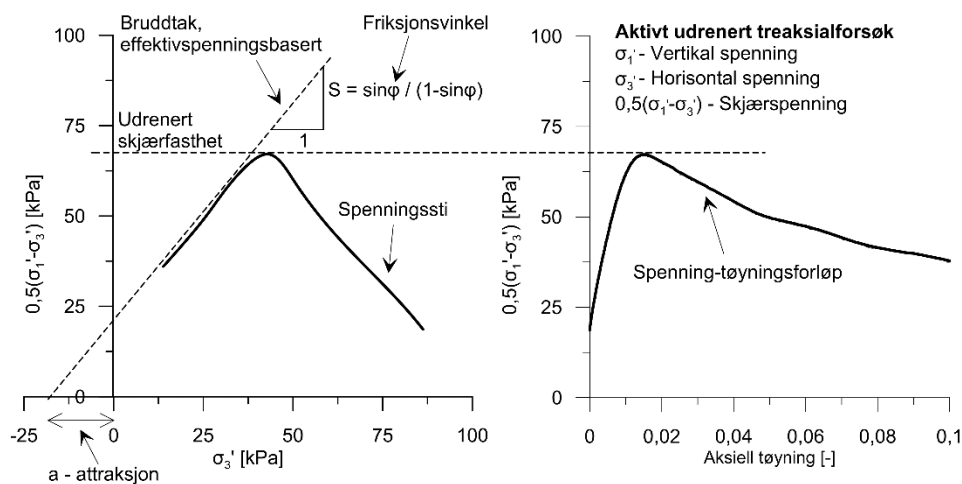
| Navn | Symbol | Enhet | Beskrivelse |
|-------------------------|------------|-------------------|--|
| Densitet | ρ | g/cm ³ | Masse av prøve per volumenhet. Bestemmes for hel sylinder og utskåret del |
| Korndensitet | ρ_s | g/cm ³ | Masse av fast stoff per volumenhet fast stoff |
| Tørr densitet | ρ_d | g/cm ³ | Masse tørt stoff per volumenhet |
| Tyngdetetthet | γ | kN/m ³ | Tyngde av prøve per volumenhet ($\gamma = \rho g = \gamma_s(1+w/100)(1-n/100)$, der g er tyngdeakselerasjonen) |
| Spesifikk tyngdetetthet | γ_s | kN/m ³ | Tyngde av fast stoff per volumenhet fast stoff ($\gamma_s = \rho_s g$) |
| Tørr tyngdetetthet | γ_d | kN/m ³ | Tyngde av tørt stoff per volumenhet ($\gamma_d = \rho_d g = \gamma_s(1-n/100)$) |
| Poretall | e | - | Volum av porer dividert med volum av fast stoff ($e = n/(1-n)$, n som desimaltall) |
| Porøsitet | n | % | Volum av porer i % av totalt volum av prøven ($n = e/(1+e)$) |

SKJÆRFASHTHET

Skjærfastheten beskriver jordens styrke og benyttes bla. til beregning av motstand mot utglidninger og grunnbrudd. Skjærfasthet benyttes i beregninger av skråningsstabilitet og bæreevne. For korttidsbelastninger i finkornige materialer (leire) oppfører jorden seg udrenert og skjærfastheten beskrives ved udrenert skjærfasthet. Over lengre tidsintervaller vil oppførselen karakteriseres som drenert. Det benyttes da effektivspenningsparametere.

Effektive skjærfasthetsparametre a (attraksjon) og $\tan \phi$ (friksjon) bestemmes ved treaksiale belastningsforsøk på uforstyrrede (leire) eller innbyggede prøver (sand). Skjærfastheten er avhengig av effektiv normalspenning (totalspenning – poretrykk) på kritisk plan. Forsøksresultatene fremstilles som spenningsstier som viser spenningsutvikling og tilhørende tøyningutvikling i prøven frem mot brudd. Fra disse, samt fra annen informasjon, bestemmes karakteristiske verdier for skjærfasthetsparametre for det aktuelle problemet.

Udrenert skjærfasthet c_u (kPa) bestemmes som den maksimale skjærspenning et materiale kan påføres før det bryter sammen i en situasjon med raske spenningsendringer uten drenering av poretrykk. I laboratoriet bestemmes denne egenskapen ved enaksiale trykkforsøk (c_{ut}), konusforsøk (uforstyrret c_{ufc} , omrørt c_{urfc}), udrenerte treaksialforsøk (kompresjon/aktiv c_{uA} , avlastning/passiv c_{uP}) og direkte skjærforsøk (c_{uD}). Udrenert skjærfasthet kan også bestemmes i felt ved for eksempel trykksondering med poretrykksmåling (CPTU) ($c_{u\text{CPTU}}$) eller vingebor (uforstyrret c_{uv} , omrørt c_{uvr}).

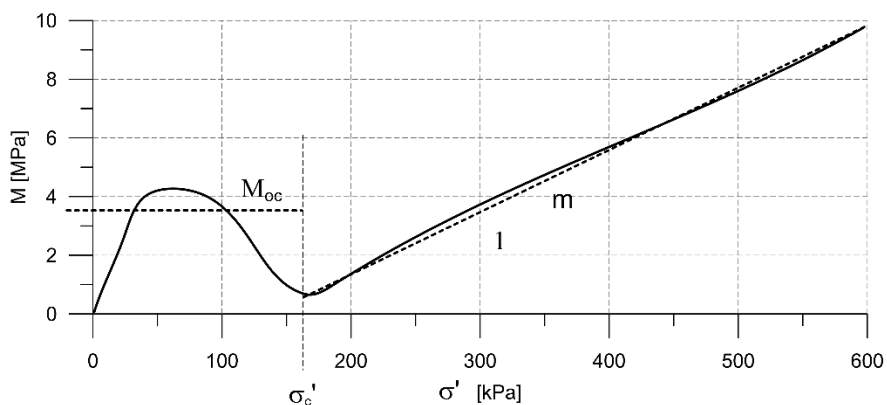


SENSITIVITET

Sensitiviteten $St = c_u/c_r$ uttrykker forholdet mellom en leires udrenerte skjærfasthet i uforstyrret og omrørt tilstand. Denne størrelsen kan bestemmes fra konusforsøk i laboratoriet eller ved vingeborforsøk i felt. Kvikkleire har for eksempel meget lav omrørt skjærfasthet ($c_r < 0,5$ kPa NS8015, $c_r < 0,33$ kPa ISO 17892-6), og viser derfor som regel meget høye sensitivitetsverdier.

DEFORMASJONS- OG KONSOLIDERINGSEGENSKAPER

Jordartens deformasjons- og konsolideringsegenskaper benyttes ved beregning av setninger og deformasjoner. Disse mekaniske egenskapene bestemmes ved hjelp av belastningsforsøk i ødometer. Jordprøven bygges inn i en stiv ring som forhindrer sideveis deformasjon. Belastningen skjer vertikalt med trinnvis eller kontinuerlig økende last/spenning (σ'). Sammenhørende verdier for spenning og deformasjon (tøyning ϵ) registreres, og materialets stivhet (deformasjonsmodul) kan beregnes som $M = \Delta\sigma' / \Delta\epsilon$. Denne presenteres som funksjon av vertikalspenningen. En sentral parameter som tolkes i sammenheng med ødometerforsøk er forkonsolideringsspenningen (σ'_c). Dette er det største lastnivået som jorda har opplevd tidligere (f.eks. tidligere overlaging eller islast). Deformasjonsmodulen viser typisk forskjellig oppførsel under og over forkonsolideringsspenningen. I leire vil stivheten for spenningsnivåer under σ'_c representeres ved en konstant stivhetsmodul M_{oc} . For spenningsnivåer over σ'_c vil stivheten øke med økende spenning. Denne økningen kan beskrives ved modultallet m .

**TELEFARLIGHET**

En jordarts telefarlighet bestemmes ut i fra kornfordelingskurven eller ved å måle den kapillære stighøyde for materialet. Telefarligheten klassifiseres i gruppene T1 (Ikke telefarlig), T2 (Litt telefarlig), T3 (Middels telefarlig) og T4 (Meget telefarlig) etter SVV Håndbok N200.

KOMPRIMERINGSEGENSKAPER

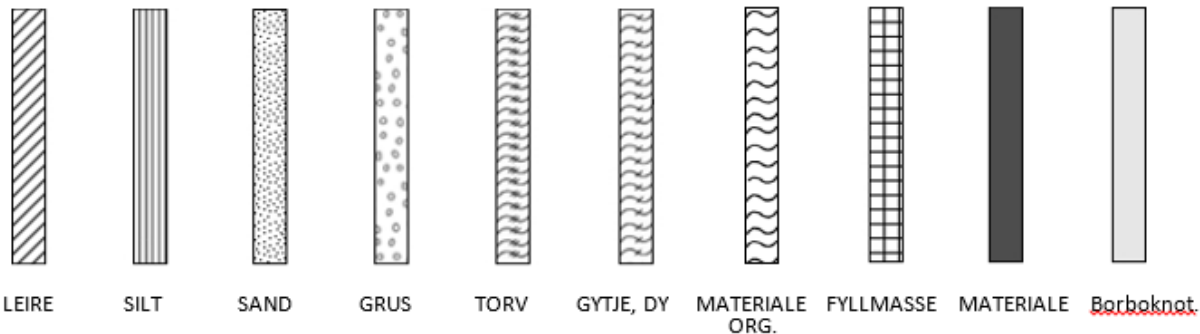
Ved komprimering av en jordart oppnås tettere lagring av mineralkornene. Komprimeringsegenskapene for en jordart bestemmes ved at prøver med forskjellig vanninnhold komprimeres med et bestemt komprimeringsarbeid (Standard eller Modifisert Proctor). Resultatene fremstilles i et diagram som viser tørr densitet ρ_d som funksjon av innbyggingsvanninnhold w_i . Den maksimale tørrdensiteten som oppnås (ρ_{dmax}) benyttes ved spesifikasjon av krav til utførelsen av komprimeringsarbeider. Det tilhørende vanninnhold benevnes optimalt vanninnhold (w_{opt}).

PERMEABILITET

Permeabiliteten defineres som den vannmengden q som under gitte betingelser vil strømme gjennom et jordvolum pr. tidsenhet. Generelt bestemmes permeabiliteten fra følgende sammenheng: $q = kiA$, der A er bruttoareal av tverrsnittet normalt på vannets strømningsretning og i = hydraulisk gradient i strømningsretningen (= potensialforskjell pr. lengdeenhet). Permeabiliteten kan bestemmes ved strømningsforsøk i laboratoriet, ved konstant eller fallende potensial, eventuelt ved pumpe- eller strømningsforsøk i felt samt ødometerforsøk.

OPPTEGNING AV PRØVESERIE - PRØVESKRAVERING

Analyserte prøver skraveres på prøveserietegningen i henhold til hovedbenevnelsen av materialet. Det er i tillegg en egen skravering for eventuelle notater hentet fra borbok til den gjeldende prøveserien. De ulike skraveringene er som følger:



NB: Med mindre en kornfordelingsanalyse er utført, er dette kun en subjektiv og veiledende klassifisering som er basert på laborantens visuelle vurdering av materialet.

LEIRE: Leirinnholdet er større enn 15 %

SILT: Siltinnholdet er større enn 45 % og leirinnholdet er mindre enn 15 %

SAND: Sandinnholdet er større enn 60 % og leirinnholdet er mindre enn 15 %

GRUS: Grusinnholdet er større enn 60 % og leirinnholdet er mindre enn 15 %

MATERIALE: Brukes når materialet har en slik sammensetning at ingen av de ovennevnte betegnelse kan benyttes. Dette fremkommer normalt fra en kornfordelingsanalyse

TORV: Mer eller mindre omvandlede planterester

GYTJE/DY: Består av vannavsatte plante- og dyrerester. De kan virke fete og elastiske

MATERIALE ORG.: Sterkt omdannet organisk materiale med løs struktur

FYLLMASSE: Avsetninger som ikke er naturlige (utlagte masser)

Borboknotat: Merknader fra borleder (hentet fra borbok), f.eks. «tom sylinder», «foringsrør», «forboring» osv.

OPPTEGNING AV PRØVESERIE - SPESIALFORSØK – Korngradering (K) / Treksialforsøk (T) / Ødometerforsøk (Ø)

Eventuelt utførte spesialforsøk på en prøveserie markeres med K, T eller Ø ved tilhørende prøve. Markeringene indikerer ikke nøyaktig dybde for spesialforsøkene, men er referanse til at det foreligger egne tegninger for forsøket inkludert resultater og ytterlig forsøksinformasjon.

OPPTEGNING AV PRØVESERIE - SYMBOLFORKLARING - Vanninnhold og konsistensgrenser

Vanninnhold og konsistensgrenser utført ved rutineundersøkelsen fremvises på prøveserietegningen ved plassering av symboler på tilhørende graf. Dersom et vanninnhold overstiger grafens maksgrense vil verdien oppgis i siffer ved grafens øvre ytterpunkt.

| | | | |
|-----------------|--|--------------------------|--|
| Vanninnhold w | | Plastisitetsgrense w_p | |
| | | Flytegrense w_f | |

OPPTEGNING AV PRØVESERIE - SYMBOLFORKLARING - Udrenert skjærfasthet

Resultatene fra utførte konus- og enaksiale trykkforsøk ved rutineundersøkelsen fremvises på prøveserietegningen ved plassering av symboler på tilhørende graf. Dersom en skjærfasthetverdi overstiger grafens maksgrense vil verdien oppgis i siffer ved grafens øvre ytterpunkt.

| | | | |
|---|--|--|-----|
| Uomrørt konus c_{urfc} | | Omrørt konus c_{urfc} | |
| Enaksialt trykkforsøk Strek angir aksial tøyning (%) ved brudd | | Omrørt konus $c_{urfc} \leq 2,0 \text{ kPa}$ | 0,9 |

METODESTANDARDS OG RETNINGSLINJER – LABORATORIEUNDERSØKELSER

Laboratorieundersøkelser beskrevet i geotekniske bilag, samt terminologi og klassifisering benyttet i rapportering, baserer seg på følgende standarder og referansedokumenter:

| Dokument | Tema |
|---------------------------------|---|
| NS8000 | Konsistensgrenser – terminologi |
| NS8001 | Støtflytegrense |
| NS8002 | Konusflytegrense |
| NS8003 | Plastisitetsgrense (utrullingsgrense) |
| NS8004 | Svinggrense |
| NS8005, NS-EN ISO 17892-4 | Kornfordelingsanalyse |
| NS8010, NS-EN ISO 14688-1 og -2 | Jord – bestanddeler og struktur. Klassifisering og indentifisering. |
| NS8011, NS-EN ISO 17892-2 | Densitet |
| NS8012, NS-EN ISO 17892-3 | Korndensitet |
| NS8013, NS-EN ISO 17892-1 | Vanninnhold |
| NS8014 | Poretall, porøsitet og metningsgrad |
| ISO 17892-6:2017 | Skjærfasthet ved konusforsøk |
| NS8016 | Skjærfasthet ved enaksialt trykkforsøk |
| NS-EN ISO 17892-5:2017 | Ødometerforsøk, trinnvis belastning |
| NS8018 | Ødometerforsøk, kontinuerlig belastning |
| NS-EN ISO/TS 17892-8 og -9 | Treaksialforsøk (UU, CD) |
| Statens vegvesen Håndbok R210 | Laboratorieundersøkelser |

