



| | | | |
|---|---------------------------------|---|-----------------|
| Oppgavens tittel: Metting og negative poretrykk ved trykksondering | Dato: 14.06.2011 | | |
| | Antall sider (inkl. bilag): 107 | | |
| | Masteroppgave | X | Prosjektoppgave |
| Navn: Stud.techn. Thomas Sandene | | | |
| Faglærer/veileder: Arnfinn Emdal | | | |
| Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: | | | |

Ekstrakt:

Trykksonderingsforsøk er en utbredt metode innen geotekniske grunnundersøkelser. Metoden består i å presse en sonde ned gjennom jorda, mens parametre som spissmotstand, poretrykk og sidefriksjon registreres. Parameterne kan brukes til ulike tolkningsformål, som lagdeling, klassifisering, styrkeparametre og mye annet.

Et av de mest utfordrende aspektene ved trykksondering er å oppnå god kvalitet på poretrykksregistreringer. Dette avhenger i stor grad av god metting av filter og væskekanaler i sonden. Under spesielle grunnforhold kan lag med tettpakket silt eller sand dilatere og skape et betydelig sug ved penetrering, og dette suget kan forstyrre eller ødelegge mettingen ved at gassbobler oppstår og/eller ekspanderer inne i sondens væskesystem.

Ved overgang til leire vil sonden fortsatt registrere et lavt poretrykk, til tross for at det i realiteten vil være et større poreovertrykk i leira grunnet udrenert oppførsel. Årsaken til dette er den lave permeabiliteten i leira, som fører til at det tar tid å komprimere gassboblene og få poretrykksresponsen opp på riktig nivå. Dette fører igjen til at viktig informasjon om det faktiske poreovertrykket går tapt.

En eldre trykksonde er modifisert for å forsøke å begrense de negative effektene av store undertrykk ved trykksonderingsforsøk. Den benytter en tilbakeslagsventil, som ved et gitt undertrykk åpnes og lar væske strømme fra en beholder og inn i sondens væskesystem innenfra i stedet for at eventuelle gassbobler utvides. Forsøk utført med ventiler med ulike åpningstrykk er utført i Lensvik i Agdenes kommune, med resultater som er både dårligere og bedre enn den kommersielle trykksonden som vanligvis brukes.

Den modifiserte sonden registrerer kun poretrykk, og ikke spissmotstand eller sidefriksjon. I tillegg viste grunnforholdene i Lensvik seg å gi variable utslag i poretrykk, og siden det kun er utført ett forsøk med godt resultat er det vanskelig å si om konseptet er brukbart. Den modifiserte sonden er også komplisert og tidkrevende å montere og mette i felt. Resultatene fra det vellykkede forsøket er likevel så gode at modifikasjonene som er gjort med trykksonden fortjener videre oppmerksomhet.

Stikkord:

| |
|-----------------------|
| 1. Trykksondering |
| 2. Undertrykk |
| 3. Metting |
| 4. Grunnundersøkelser |

(sign.)

Denne siden er blank



Masteroppgave

Våren 2011

for

Stud. techn. Thomas Sandene

Metting og negativt poretrykk ved trykksondering

Saturation and negative pore pressures during CPTU sounding

Introduksjon

Cone Penetration Testing med poretrykk (CPTU) har i Norge hatt stor fremgang som geoteknisk undersøkelsesmetode og spesielt i de senere år har tolkning av aktiv udrenert skjærstyrke i leire vært i fokus. Metoder for tolkning er utviklet basert på spissmotstand, poretrykk og friksjon og på forhold avledet av disse måledataene. For udrenert styrke er direkte tolkning fra spissmotstand (ved N_{kt}) og fra poretrykk (ved N_{du}) mest anvendt og av disse er det poretrykksrelasjonen som har vist seg å gi minst spredning. Resultatet er at poretrykksbasert tolkning av mange ansees som mest troverdig.

Troverdigheten av tolkningen avhenger av at måleutstyr fungerer optimalt og gir minst mulig spredning og feil. CPTU-sonder skal kalibreres jevnlig for å tilfredsstille bruk i prosjekt. Ved utførelse gis det mest oppmerksomhet til metning av poretrykkssystemet slik at filter og kanaler i sonden er frie for gassbobler. Utforming av CPTU-spissen er variert for å finne gode løsninger, likedan er forskjellige metningsmedium forsøkt, fra parafinoljer, silikon, frostvæske mm. Vakuumering av metningsmedium, ferdigmettede filter fra leverandør etc. er bidrag til å bedre poretrykksmålningene.

Ved sondering i leire er det relativt lett å identifisere dårlig metning fra poretrykksprofilen dersom klare endringer i spissmotstand (feks når spissen går fra lag med stor motstand inn i bløt leire) ikke gjenspeiles med kontant økning i poretrykksrespons. Spesielt er dette klart dersom det viser seg at poretrykksresponsen bedres med dybden, noe som indikerer at gass i spissen etter hvert komprimeres og gir mindre demping av poretrykksvariasjonene. Fra dette kan en se at i et profil som stort sett består av leire og masser som gir ensidig poreovertrykk så vil poretrykksregistreringene med dybden bli mer og mer pålitelige.

Sonderinger i lagdelt jord, spesielt der det finnes faste dilatante lag mellom leirlag, kan vise seg å være svært problematiske dersom poretrykket faller til lave verdier eller på negativ side. NTNU har ved enkelte sonderinger registrert negative poretrykk som indikerer vakuum i spissen, forårsaket av tynne lag i jorden. Ved videre penetrasjon inn i underliggende bløte leirer har det negative trykket blitt opprettholdt over lang tid, over flere meter av profilen, før givelsen igjen har vist respons og etter hvert normal oppførsel. En slik sondering er med hensyn på poretrykk helt verdiløs og må repeteres med forboring gjennom de lag som gir problemet.

NTNU Geoteknikk vil gjerne ha fenomenet studert, vurdert omfanget av problemet og har utviklet ideer til løsninger på dette som bør undersøkes. NTNU Geoteknikk vil stille til rådighet ressurser fra verksted, instrumentering, felt- og laboratorium for utvikling og uttesting av utstyr for å studere dette.

Innhold

Kandidaten skal:

- gi en innføring i CPTU som sonderingsmetode med visning av eksempler på problemstillingen
- gå gjennom NTNU-måledata fra Lensvika som eksempel på problemstillingen, vurdere grunnforhold og planlegge bruken av stedet for egne forsøk
- studere teoretisk hvordan væske/gassforholdene i CPTU-spissen endres med kjente grensebetingelser og med forutsatt metningsforhold – lage en hypotese for mekanismen og om mulig lage en teoretisk basert modell som kan simulere og belyse effekten av negative poretrykk under de beskrevne forhold i lagdelt jord
- utforme en CPTU-spiss som ved bruk av ventiler og væskereservoar i spissen kan avgrense minimum tillatt trykk i spissen og tilføre væske til poretrykkssystemet dersom utvendig trykk går under dette minimumstrykket. Spissen skal bygges basert på de eksisterende Fugro-spissene som finnes ved NTNU Geoteknikk.

- gjennomføre grunnundersøkelser og sonderinger i Lensvika med standard utstyr og teste ut den modifiserte spissen på samme sted
- sammenstille tidligere og egne målinger, spesielt legge vekt på å vurdere resultatene fra modifisert sonde

Levering

Studiet skal rapporteres som en teknisk rapport med innledning og problemformulering, bakgrunnsstudie av relevante mekanismer, og presentasjon av resultater fra studiet.

Klare konklusjoner og forslag til videre arbeid vil bli kreditert.

Organisering

Faglærer ved instituttet: Arnfinn Emdal

NTNU - juni 2011

Arnfinn Emdal
Amanuensis

Sammendrag

Trykksonderingsforsøk er en utbredt metode innen geotekniske grunnundersøkelser. Metoden består i å presse en sonde ned gjennom jorda, mens parametre som spissmotstand, poretrykk og sidefriksjon registreres. Parameterne kan brukes til ulike tolkningsformål, som lagdeling, klassifisering, styrkeparametre og mye annet.

Et av de mest utfordrende aspektene ved trykksondering er å oppnå god kvalitet på poretrykksregistreringer. Dette avhenger i stor grad av god metting av filter og væskekanaler i sonden. Under spesielle grunnforhold kan lag med tettpakket silt eller sand dilatere og skape et betydelig sug ved penetrering, og dette suget kan forstyrre eller ødelegge mettingen ved at gassbobler oppstår og/eller ekspanderer inne i sondens væskesystem.

Ved overgang til leire vil sonden fortsatt registrere et lavt poretrykk, til tross for at det i realiteten vil være et større poreovertrykk i leira grunnet udrenert oppførsel. Årsaken til dette er den lave permeabiliteten i leira, som fører til at det tar tid å komprimere gassboblene og få poretrykksresponsen opp på riktig nivå. Dette fører igjen til at viktig informasjon om det faktiske poreovertrykket går tapt.

En eldre trykksonde er modifisert for å forsøke å begrense de negative effektene av store undertrykk ved trykksonderingsforsøk. Den benytter en tilbakeslagsventil, som ved et gitt undertrykk åpnes og lar væske strømme fra en beholder og inn i sondens væskesystem innenfra i stedet for at eventuelle gassbobler utvides. Forsøk utført med ventiler med ulike åpningstrykk er utført i Lensvik i Agdenes kommune, med resultater som er både dårligere og bedre enn den kommersielle trykksonden som vanligvis brukes.

Den modifiserte sonden registrerer kun poretrykk, og ikke spissmotstand eller sidefriksjon. I tillegg viste grunnforholdene i Lensvik seg å gi variable utslag i poretrykk, og siden det kun er utført ett forsøk med godt resultat er det vanskelig å si om konseptet er brukbart. Den modifiserte sonden er også komplisert og tidkrevende å montere og mette i felt. Resultatene fra det vellykkede forsøket er likevel så gode at modifikasjonene som er gjort med trykksonden fortjener videre oppmerksomhet.

Forord

Denne rapporten er skrevet som besvarelse i emnet TBA4900 Geoteknikk, masteroppgave ved Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU våren 2011. Temaet for oppgaven er trykksonderingsforsøk, hvordan spesielle poretrykksforhold kan skape problemer for resultater og et forsøk på å håndtere disse problemene. Resultatene fra dette forsøket er delvis oppløftende og positive, men det er ikke tvil om at det kan utføres videre studier basert på arbeidet som er beskrevet her.

Forfatteren er generelt praktisk og teknisk interessert, og skulle i utgangspunktet forsøke å sette istand et forsøksapparat for sykliske, treaksiale trykkforsøk som manglet både programvare og dokumentasjon fra produsent. På grunn av blant annet en defekt motor viste det seg derimot tidlig at dette ikke var noe som lot seg gjøre over det ene semesteret oppgaven skulle skrives, og sykliske treaksforsøk ble derfor satt på vent. Enkelte poretrykkskurver fra trykksonderingsforsøk utført av instituttet høsten 2010 hadde plantet noen spørsmål, og en ny oppgave var dermed i boks. Oppgaven har vært utfordrende og til tider frustrerende, men stort sett svært interessant og forfatteren er i ettertid relativt fornøyd med at den nevnte motoren gikk i stykker.

Takk til: Veileder Arnfinn Emdal for inspirasjon til oppgaven, råd, tips og spørsmål underveis. Jan Jønland for sin generelle kunnskap og erfaring, samt å ta vare på deler og komponenter til gammelt forsøksutstyr som skulle vise å bli nyttig igjen. Frank Stæhli ved verkstedet for hjelp med alle komponenter som måtte lages. Gunnar Winther for hjelp med utførelse av grunnundersøkelser i løpet av noen strålende vårdager ved Trondheimsfjorden i Lensvik. Per Østensen for hjelp med alt av elektronikk, kalibrering og programmering.

Thomas Sandene
Trondheim, 14.6.2011

Innhold

| | |
|--|-----------|
| Sammendrag | 1 |
| Forord | 2 |
| Innhold | 3 |
| Figurer | 5 |
| Tabeller | 7 |
| Symboler | 8 |
| 1. Innledning | 10 |
| 1.1. Bakgrunn | 10 |
| 1.2. Problemstilling | 11 |
| 1.3. Om rapporten | 11 |
| 2. Om trykksondering med poretrykksmåling | 12 |
| 2.1. Generelt | 12 |
| 2.2. Utførelse av forsøk | 12 |
| 2.3. Lave og negative poretrykk | 14 |
| 2.4. Eksempler på bruk av resultater | 15 |
| 3. Grunnforholdene i Lensvik | 19 |
| 3.1. Supplerende forsøk | 19 |
| 3.2. Borplan | 20 |
| 3.3. Trykksonderingsforsøk | 20 |
| 3.4. Dissipasjonsforsøk | 24 |
| 3.5. Rutineforsøk | 24 |
| 3.6. Ødometerforsøk | 26 |
| 4. Betydning av metting av filter og spiss | 27 |
| 4.1. Teoretisk bakgrunn | 27 |
| 4.2. Effekt av trykkfall på gassbobler i filter og væskekammer | 29 |
| 5. Utforming av modifisert trykksonde | 34 |
| 5.1. Utgangspunkt | 34 |
| 5.2. Modifisert trykksonde | 37 |
| 6. Testforsøk med modifisert trykksonde | 47 |
| 6.1. Forsøk i laboratoriet | 47 |
| 6.2. In situ forsøk | 49 |
| 7. Nye forsøk i Lensvik | 54 |
| 7.1. Borplan | 54 |

| | |
|---|------------|
| 7.2. Forberedelser | 55 |
| 7.3. Utførelse av sonderinger | 57 |
| 7.4. Resultater | 58 |
| 8. Vurdering av resultater fra forsøk med modifisert sonde | 68 |
| 8.1. Grunnforhold | 68 |
| 8.2. Metting og poretrykksrespons | 68 |
| 8.3. Antall forsøk | 70 |
| 9. Konklusjon | 71 |
| 10. Videre arbeid | 72 |
| 10.1. Mettingsprosedyre for andre sonder | 72 |
| 10.2. Uttesting av modifisert sonde | 72 |
| 10.3. Design av modifisert sonde | 72 |
| Referanser | 73 |
| A. Kart | 75 |
| B. Trykksonderingsforsøk | 78 |
| C. Dissipasjonsforsøk | 89 |
| D. Borprofil | 91 |
| E. Kornfordelingsforsøk | 93 |
| F. Ødometerforsøk | 96 |
| G. Tegninger | 105 |

Figurer

| | |
|---|----|
| 1.1. Problematiske poretrykksregistreringer i Lensvik | 10 |
| 2.1. Prinsipp for oppbygging av trykksonde | 12 |
| 2.2. Resultater fra trykksondering i Sleipner-leire [8] | 15 |
| 2.3. Jordartklassifiseringsdiagram [20] | 16 |
| 2.4. Diagram for estimering av c_h fra t_{50} og I_r [8] | 18 |
| 2.5. Diagram for estimering av k_h fra t_{50} og Q_t [21] | 18 |
| 3.1. Bilde fra prøveområdet | 19 |
| 3.2. Borplan [2] | 20 |
| 3.3. Sammenligning av resultater fra trykksonderinger | 21 |
| 3.4. Jordartsklassifisering etter forsøk 118 [20] | 23 |
| 3.5. Jordartsklassifisering etter forsøk 118b [20] | 23 |
| 3.6. Jordartsklassifisering etter forsøk 1N [20] | 24 |
| 4.1. Poretrykksfordeling rundt trykksonde | 28 |
| 4.2. Reaksjon i glykol ved undertrykk | 30 |
| 4.3. Effekt av variasjon av V_0 | 32 |
| 4.4. Effekt av variasjon av $r_2 = r_1 + \Delta r$ | 32 |
| 4.5. Effekt av variasjon av k_h | 33 |
| 4.6. Effekt av variasjon av p_{min} | 33 |
| 5.1. Fugro-spissens komponenter | 34 |
| 5.2. Konen | 35 |
| 5.3. Væskekammer | 35 |
| 5.4. Sammensetting av Fugro-spissen | 36 |
| 5.5. Vakuumkanter til Fugro-spiss | 36 |
| 5.6. Kabelskjøt | 36 |
| 5.7. Konsept for modifisert trykksonde | 38 |
| 5.8. Konsept for modifisert trykksonde sammensatt | 38 |
| 5.9. Tegninger av mellomstykke | 39 |
| 5.10. Produsert mellomstykke | 39 |
| 5.11. Tegninger av beskyttelseshylse | 40 |
| 5.12. Produsert beskyttelseshylse | 40 |
| 5.13. Oppbygging av tilbakeslagsventil [24] | 41 |
| 5.14. Vannstrøm gjennom tilbakeslagsventil [24] | 41 |
| 5.15. Ventilats adskilt | 42 |
| 5.16. Ventilats sammensatt | 42 |
| 5.17. Poretrykksensor [4] | 43 |
| 5.18. Overgang for kalibrering av poretrykksensor | 43 |
| 5.19. Den modifiserte trykksondens komponenter | 44 |
| 5.20. Sammensetting av den modifiserte sonden | 44 |
| 5.21. Luftehull i messinghylsa | 44 |
| 5.22. Dybdemåleren | 45 |

| | |
|--|----|
| 5.23. Skjerm bilde fra loggeprogram | 46 |
| 6.1. Oppsett ved kontroll av åpningstrykk | 47 |
| 6.2. Oppsett ved kontroll av undertrykkregistrering | 48 |
| 6.3. Testområde for modifisert trykksonde | 49 |
| 6.4. Resultat fra trykksondering ved Gløshaugen | 51 |
| 6.5. Resultater fra trykksondering ved Gløshaugen med modifisert sonde | 52 |
| 7.1. Borplan for nye forsøk med modifisert sonde [2] | 54 |
| 7.2. Ventilsets adskilt for metting | 55 |
| 7.3. Beholder for oppbevaring og transport av ventilsets | 55 |
| 7.4. Beholder for oppbevaring og transport av filter | 56 |
| 7.5. Bruk av gjengetetting på mellomstykke og væskekommer | 56 |
| 7.6. Montering neddykket i glykol | 57 |
| 7.7. Sonde montert på stangsett klar til sondering | 57 |
| 7.8. Rigging av utstyr under sondering | 58 |
| 7.9. Sondering og plassering av dybdemåler | 58 |
| 7.10. Resultater fra sondering med modifisert sonde i Lensvik | 60 |
| 7.11. Sammenligning av resultater i dybde 0,0 - 2,0 m | 61 |
| 7.12. Sammenligning av resultater i dybde 2,0 - 4,0 m | 62 |
| 7.13. Sammenligning av resultater i dybde 4,0 - 6,0 m | 63 |
| 7.14. Sammenligning av resultater i dybde 6,0 - 8,0 m | 64 |
| 7.15. Jordartsklassifisering for sondering 118 og 1M3 etter [20] | 65 |
| 7.16. Jordartsklassifisering for sondering 118b og 1M3 etter [20] | 66 |
| 7.17. Jordartsklassifisering for sondering 1N og 1M3 etter [20] | 67 |

Tabeller

| | |
|--|----|
| 3.1. Oversikt supplerende feltforsøk ved hull 118 | 19 |
| 3.2. Resultater fra dissipasjonsforsøk | 24 |
| 3.3. Oppsummerte rutineparametre | 25 |
| 3.4. Oppsummering av resultater fra ødometerforsøk | 26 |
| 5.1. Åpnings- og lukkingstrykk for tilbakeslagsventiler [24] | 41 |
| 5.2. Kalibrering av poretrykkssensor | 43 |
| 6.1. Registrert undertrykk ved åpen og lukket ventil | 49 |
| 7.1. Sonderinger med modifisert sonde i Lensvik | 54 |
| 7.2. Sammenfallende registreringer i dybde 0,0 - 2,0 m | 61 |
| 7.3. Sammenfallende registreringer i dybde 2,0 - 4,0 m | 62 |
| 7.4. Sammenfallende registreringer i dybde 4,0 - 6,0 m | 63 |
| 7.5. Sammenfallende registreringer i dybde 6,0 - 8,0 m | 64 |
| 8.1. Lavest registrert poretrykk for alle forsøk uansett dybde | 69 |

Symboler

Latinske symboler

| Symbol | Enhet | Forklaring |
|----------------|---|--|
| a | | Netto arealforhold for spissmotstandskorreksjon |
| a | $\text{atm}\cdot\text{l}^2/\text{mol}^2$ | van der Waals konstant for trykkkorreksjon |
| A | m^2 | Areal |
| b | mm | Bredde av filter på trykksonde |
| b | l/mol | van der Waals konstant for volumkorreksjon |
| c_h, c_v | $\text{m}^2/\text{år}$ | Horisontal og vertikal konsolideringskoeffisient |
| B_q | | Poretrykksforhold |
| f_s | MPa | Registrert sidefriksjon |
| f_t | MPa | Korrigert sidefriksjon |
| F_R | | Normalisert friksjonsforhold |
| G | MPa | Skjærmodul |
| h | m | Potensialhøyde |
| i | | Gradient i strømningsretning |
| I_p | % | Plastisitetsindeks |
| I_r | | Stivhetsindeks |
| k | m/s | Permeabilitetskoeffisient |
| k_h, k_v | m/s | Horisontal og vertikal permeabilitetskoeffisient |
| l | m | Strømningsvei |
| m | | Modultall |
| M | MPa | Ødometermodul |
| M_{OC} | MPa | Ødometermodul i overkonsolideringsområdet |
| n | % | Porøsitet |
| n | mol | Gassmengde |
| N_{kt} | | Konfaktor ved total spissmotstand |
| N_{ke} | | Konfaktor ved effektiv spissmotstand |
| $N_{\Delta u}$ | | Konfaktor ved poreovertrykk |
| p | kPa | Trykk |
| p_{atm} | kPa | Atmosfæretrykk |
| p'_c | kPa | Prekonsolideringstrykk |
| p_{obs} | kPa | Observert trykk |
| q_c | MPa | Registrert spissmotstand |
| q_t | MPa | Korrigert spissmotstand |
| q | m^3/s | Vannføring |
| Q_t | | Normalisert spissmotstand |
| r | m | Radius |
| R | $\text{l}\cdot\text{atm}/\text{K}\cdot\text{mol}$ | Universell gasskonstant |
| s_u | kPa | Udrenert skjærstyrke |
| S_r | % | Metningsgrad |
| S_t | | Sensitivitet |

| Symbol | Enhet | Forklaring |
|----------|-------|---|
| t | s | Tid |
| t_{50} | s | Tid ved 50 % poretrykksdissipasjon |
| u | kPa | Poretrykk |
| u_0 | kPa | In situ poretrykk |
| u_1 | kPa | Registrert poretrykk i kon |
| u_2 | kPa | Registrert poretrykk bak kon |
| u_3 | kPa | Registrert poretrykk bak friksjonshylse |
| u_b | kPa | Poretrykk ved bunnfilter i ødometerforsøk |
| u_i | kPa | Poretrykk ved start av dissipasjonsforsøk |
| u_t | kPa | Poretrykk ved tiden t |
| U | | Dissipasjonsgrad |
| w | % | Vanninnhold |
| w_l | % | Flytegrense |
| w_p | % | Plastisitetsgrense |
| z | m | Dybde under terrengnivå |

Greske symboler

| Symbol | Enhet | Forklaring |
|----------------|-------------------|-----------------------------------|
| α | ° | Helning på trykksonde |
| γ | kN/m ³ | Tyngdetetthet |
| γ_w | kN/m ³ | Tyngetetthet vann |
| ρ | g/cm ³ | Massetetthet |
| ρ_s | g/cm ³ | Massetetthet fast stoff |
| σ_{v0} | kPa | In situ vertikal totalspenning |
| σ'_{v0} | kPa | In situ vertikal effektivspenning |

Forkortelser

| Forkortelse | Forklaring |
|-------------|---|
| CAUC | Consolidated Anisotropically Undrained Compression |
| CPTU | Cone Penetration Testing with pore pressure measurement (U) |
| CRS | Constant Rate of Strain |
| NTNU | Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet |
| OCR | Over-Consolidation Ratio |

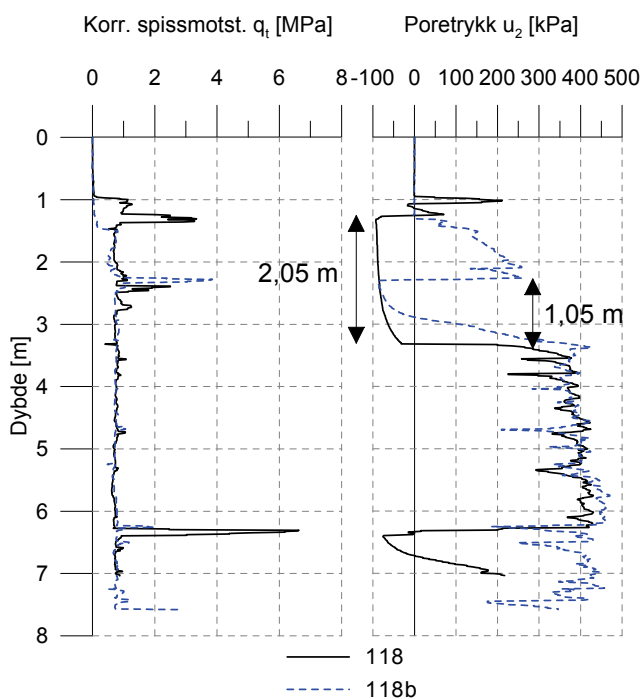
1. Innledning

1.1. Bakgrunn

Trykksondering med poretrykksmåling, eller Cone Penetration Testing (CPTU), er en grunnundersøkellesmetode som blir mye brukt i dag. Forsøket består i at en sonde presses ned gjennom jorda med konstant hastighet, mens det foregår logging av parametre som motstand på spissen av sonden, poreovertrykk, friksjon langs siden, helning på sonden og eventuelt andre parametre ettersom hva slags utstyr som brukes. Dataene fra sondering brukes til å bestemme for eksempel lagdeling og jordarter, og ved hjelp av empiriske korrelasjoner og kalibrering mot laboratorieforsøk kan en rekke øvrige parametre for ulike jordarter estimeres [8].

Veiprosjektet Fosenvegene er et initiativ fra kommuner og næringsliv på Fosen for å forbedre veistandarden i regionen [23], og en av delstrekningene for dette prosjektet er fylkesvei 710 Ingdal - Valset. NTNU ved faggruppe geoteknikk, Institutt for bygg, anlegg og transport, utførte i forbindelse med dette prosjektet høsten 2010 grunnundersøkelser for Statens vegvesen i området rundt Lensvik, som er kommunesenteret i Agdenes. Stud. techn. Morten Tveit skrev den samme høsten en prosjektoppgave som omhandlet skråningsstabilitet i området [25].

Figur 1.1 viser spissmotstand og poretrykk registrert ved hull 118 og 118b i Lensvik. Ved hull 118 ble det registrert et hardere, dilaterende lag ved omtrent 1,3 m dybde, som førte til en økning i spissmotstand og et sug i spissen svært nær vakuum. Både totalsondering i området og spissmotstanden fra samme forsøk indikerer at dette laget hadde begrenset tykkelse og gikk over til leire, og man skulle kunne forvente en umiddelbar økning i poreovertrykk. Undertrykket i spissen vedvarte derimot i overkant av 2 m, hvor et opphold i sonderingen grunnet stangskifte gjorde at poretrykksresponsen kom tilbake til forventet nivå. Et nytt lag ved 6,3 m førte til tilsvarende problemer. Ved hull 118b ble det gjort et nytt forsøk ved å bore forbi det første harde laget, men et nytt lag ved 2,3 m førte til tap av poretrykksinformasjon over 1 m sondering.



Figur 1.1.: Problematiske poretrykksregistreringer i Lensvik

1.2. Problemstilling

Å oppnå skikkelig metting av filter og kammer for å få gode resultater fra poretrykksregistrering er noe av det mest utfordrende ved utførelse av trykksonderingsforsøk. Selv om dagens prosedyrer for forberedelse av forsøk i de fleste tilfeller kan være tilstrekkelige for å oppnå gode resultater, vil det fortsatt være utfordringer ved lagdelt jord hvor dilaterende lag kan føre til undertrykk og tap av metting. Som illustrert i figur 1.1 kan dette igjen føre til tap av informasjon om de faktiske poretrykksnivåer over store dybdeintervaller, og det kan også stilles spørsmål ved kvaliteten på data fra resten av forsøket. Poretrykket er en parameter som brukes mye i tolkning av jordarter og skjærstyrkeforhold, og god kvalitet på dataene er derfor viktig. Utførelse av grunnundersøkelser er også en kostbar og tidkrevende affære, og det vil alltid være av interesse å kunne oppnå best mulig resultater på første forsøk.

Vil det være mulig å begrense den negative effekten av undertrykk ved å modifisere en trykksonde spesielt for dette formålet? Og vil det i så fall være mulig å regulere hvilket undertrykk som er akseptabelt? Dersom dette lar seg løse på en teknisk robust og praktisk gjennomførbar måte, vil det eventuelt være muligheter for å kunne oppnå bedre resultater for poretrykkrespons overalt hvor en har negative effekter av undertrykk.

1.3. Om rapporten

Denne oppgaven starter med en generell introduksjon til trykksondering i kapittel 2. Her blir det gitt en kort oversikt over hvordan forsøket utføres, hvordan forsøksdataene korrigeres og hvordan resultatene kan brukes til ulike tolkningsformål.

Grunnforholdene i Lensvik er tema for kapittel 3, hvor de to trykksonderingsforsøkene fra høsten 2010 kombinert med supplerende felt- og laboratorieundersøkelser våren 2011 blir analysert for å beskrive grunnforholdene i forsøksområdet.

Kapittel 4 inneholder en teoretisk vurdering og beregning av poretrykkresponsen i en trykksonde som først utsettes for et undertrykk, og deretter beveger seg ned i et lite permeabelt lag hvor vanntilførselen er begrenset til tross for høyt trykk.

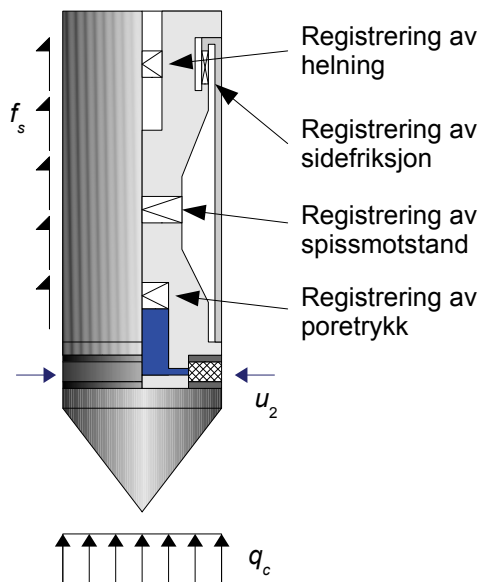
Det er i forbindelse med denne rapporten designet, konstruert og utført forsøk med en modifisert trykksonde som kun måler poretrykk, men også er i stand til å håndtere undertrykk uten at videre målinger forstyrres. Utformingen av denne sonden og dens komponenter er beskrevet i kapittel 5, og testforsøk med sonden i laboratorium og felt er beskrevet i kapittel 6. I kapittel 7 er det gitt en detaljert beskrivelse av den endelige prosedyren som ble utviklet for utførelse av forsøk, og det er gjort en analyse av forsøk med denne modifiserte sonden i Lensvik sammenlignet med resultatene fra den kommersielle sonden.

Resultatene fra forsøkene med den modifiserte trykksonden er diskutert i kapittel 8, og det gis en konklusjon i kapittel 9. I kapittel 10 gis det forslag til arbeid som kan gjøres videre basert på resultatene i denne oppgaven.

2. Om trykksondering med poretrykksmåling

2.1. Generelt

Trykksonderingsforsøk med poretrykksmåling (CPTU) fungerer ved at en sonde presses ned i løsmasser med konstant hastighet, ved hjelp av et sett med stenger og en nedpressingsrigg. Under forsøket logges vanligvis dybden z , spissmotstand q_c , poretrykk u_2 , sidefriksjon f_s og helningen α , men det er også mulig å koble til annet utstyr for måling av for eksempel elektrisk motstand eller registrering av seismiske bølger [9]. Registreringer fra sonden kan overføres via kabel, lagres på en minnebrikke i sonden eller overføres som akustiske signaler gjennom stangsettet til en mikrofon på nedpressingsriggen. Ved NTNU benyttes en sonde av type Geotech Nova, som både overfører signalene akustisk og lagrer data på en intern minnebrikke.



Figur 2.1.: Prinsipp for oppbygging av trykksonde

Figur 2.1 viser prinsippet for oppbygging av trykksonde, med registrering av poretrykk rett bak den konede spissen (betegnelse u_2). Alternative plasseringer for registreringer av poretrykk kan være i selve spissen (betegnelse u_1) og bak friksjonshylsa (betegnelse u_3). Plassering av filter og poretrykksensor i posisjon u_2 gir de mest konsistente resultatene for klassifisering og tolkningsformål [9]. De vanligste filtertypene er porøse filter eller filter med spalteåpninger.

2.2. Utførelse av forsøk

2.2.1. Forberedelser

Ved sondering med registrering av poretrykk er det viktig at filter og øvrige deler av poretrykk-systemet er tilstrekkelig mettet med væske. Filteret kan mettes ved koking under vakuum, og

væsken som brukes i resten av systemet bør også være avluftet. Avhengig av grunnforhold og filtertype kan ulike væsker benyttes. I mettet jord kan mindre viskøse væsker som for eksempel destillert vann benyttes, mens i umettet eller dilaterende jord bør filteret mettes med mer viskøse væsker som glyserin eller lignende [9]. Ved NTNU benyttes vanligvis konsentrert frostvæske (glykol) i væskekompartiment mens filteret mettes med glyserin [6].

Filter og kon monteres neddykket i mettingsvæsken for å forhindre at luftbobler stenges inne i systemet. Etter monteringen er det en fordel å dekke filteret med en gummihud for å forhindre tap av mettingsvæske. Gummihuden vil rives av når sonderingen starter.

Før sonderingen starter må nullavlesning av spissmotstand, nedtrengingsdybde, sidefriksjon, poretrykk og helning utføres. Under nullavlesningen er det viktig at sonden har samme temperatur som jorden ($5 - 7\text{ }^{\circ}\text{C}$), slik at det ikke forekommer temperaturendringer i sonden som kan påvirke måleresultater under sondering [9].

2.2.2. Nedpressing

Sonden presses ned i jorden med en konstant hastighet på $2,0 \pm 0,5\text{ cm/s}$. Nedpressingen defineres som kontinuerlig selv om det må gjøres pauser for takskifte og montering av nye stenger. Måleverdier logges vanligvis med en maksimal avstand på 2 cm mellom hvert loggepunkt, og det benyttes samme intervall for alle måleparametre [9]. En ny nullpunktsavlesning foretas etter at sonden er trukket opp.

2.2.3. Dissipasjonsforsøk

Ved dissipasjonsforsøk gjøres det et opphold i sonderingen for å registrere hvordan poretrykket reduseres over tid. Tida det tar for overskuddsporetrykket å dissipere kan brukes til å bestemme jordas permeabilitets- og konsolideringsegenskaper, og kan i grovere jordarter brukes til å bestemme in situ poretrykk [9]. Varigheten av forsøket bør være til minst 50 % dissipasjon, siden denne tida, t_{50} , er ofte benyttet i bestemmelse av konsoliderings- og permeabilitetsparametre.

Avlesningene av poretrykket bør være hyppige ved begynnelsen av forsøket, og kan deretter avta. Anbefalte avlesningsintervaller er [9]:

- 0 - 1 min: 2 avlesninger/sekund
- 1 - 10 min: 1 avlesning/sekund
- 10 - 100 min: 1 avlesning/2 sekunder
- > 100 min: 1 avlesning/5 sekunder

2.2.4. Korreksjon av måledata

Poretrykket vil ved måling i plassering u_2 virke på begge sider av konen, men arealet vil være forskjellig. Spissmotstanden q_c må derfor korrigeres for poretrykket ved arealfaktoren a (for Geotech Nova er $a = 0,82$ [1]). Korrigert spissmotstand q_t er:

2. Om trykksondering med poretrykksmåling

$$q_t = q_c + u_2(1 - a) \quad (2.1)$$

Den registrerte sidefriksjonen f_s vil være også være påvirket av poretrykket, og korrigert sidefriksjon f_t kan beregnes ved:

$$f_t = f_s - \frac{u_2 A_{sb} - u_3 A_{st}}{A_s} \quad (2.2)$$

Her er A_{sb} friksjonshylsas areal i nedre ende, A_{st} arealet i øvre ende og A_s arealet av hylsas yttervegg. Som det går frem av uttrykk 2.2 krever imidlertid denne korreksjonen registrering av poretrykket u_3 over friksjonshylsa, og siden dette ikke er så vanlig benyttes som regel ukorrigert sidefriksjon f_s i videre tolkning [9].

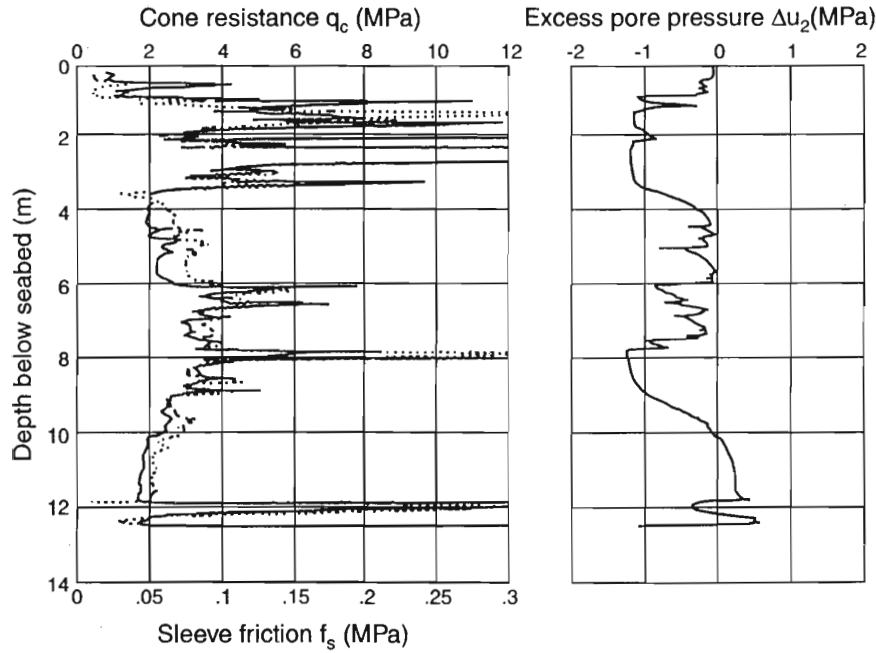
Ved dypere sonderinger kan avbøyning av stangsettet føre til en differanse mellom den dybden som blir registrert på borerigg og den faktiske dybden sonden befinner seg i. Ved registrering av helningen α og lengde av stangsettet l , kan den korrigerte dybden z beregnes ved:

$$z = \int \cos \alpha dl \quad (2.3)$$

2.3. Lave og negative poretrykk

Lunne et al. [8] beskriver et par fenomener som kan betraktes som unormal oppførsel ved registrering av poretrykk. Det ene gjelder registrering av poretrykk som faller ned mot vakuum, det vil si rundt -100 kPa relativt til atmosfæretrykket. Selv ved store vanntrykk som under offshore undersøkelser kan fenomenet oppstå, med registrerte poretrykk på over 1 MPa lavere enn hydrostatisk poretrykk slik det er vist i figur 2.2. Fallet i poretrykk kan skyldes penetrering gjennom hardere lag med grovere masser som silt og/eller sand, som dilaterer under skjærtøyninger og skaper et sug. Når poretrykket faller så lavt som ned mot vakuum kan det også føre til at poretrykkresponsen forblir svært dårlig over flere påfølgende meter av forsøket, selv om sonden ikke lenger befinner seg i masser med sug.

Et annet eksempel nevnt av Lunne et al. [8] gjelder registrering av negative poretrykk selv når filterelementet er plassert i posisjon u_1 ved sondering i leire med stort innslag av stein. Dette er uvanlig siden poretrykket i denne posisjonen vanligvis er positivt på grunn av endringer i totalspenninger, selv om poretrykket i u_2 samtidig kan registreres som negativt på grunn av endringer i skjærspenninger. Registrering av negativt poretrykk kan derfor også forklares i at sonden treffer en stein som skyves til siden, og hvis dette skjer raskt og leira er for stiv til å flyte rundt steinen vil det oppstå et hulrom som registreres som negativt poretrykk.



Figur 2.2.: Resultater fra trykksondering i Sleipner-leire [8]

2.4. Eksempler på bruk av resultater

2.4.1. Klassifisering

Parametre fra trykksonderinger kan benyttes til klassifisering av jord. Et system foreslått av Robertson [20] benytter normaliserte parametre fra trykksondering for klassifisering:

Normalisert spissmotstand Q_t , hvor σ_{v0} er in situ total vertikalspenning og $\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0$ er in situ vertikal effektivspenning [27]:

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \quad (2.4)$$

Normalisert friksjonsforhold F_R :

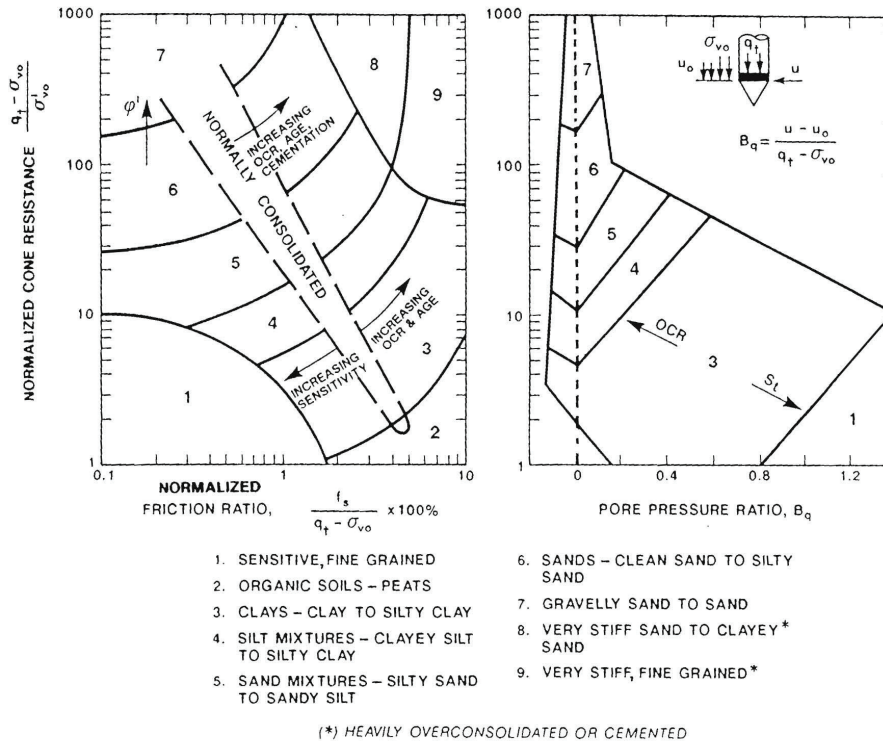
$$F_R = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \cdot 100 \% \quad (2.5)$$

Poretrykksforhold B_q , hvor u_0 er in situ poretrykk:

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} = \frac{\Delta u}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (2.6)$$

Diagrammene i figur 2.3 er basert på forholdene Q_t/F_R og Q_t/B_q , og ved å plote loggepunktene i disse diagrammene kan jordarten bestemmes. For finkornete jordarter hvor sondering foregår under udrenerte forhold vil diagrammet kunne indikere variasjoner i OCR, alder og sensitivitet. Grovere jordarter og drenerte forhold vil kunne gi informasjon om variasjoner i OCR, alder, sementering og friksjonsvinkel [20].

2. Om trykksondering med poretrykksmåling



Figur 2.3.: Jordartklassifiseringsdiagram [20]

2.4.2. Styrkeegenskaper

For finkornete jordarter finnes det både teoretiske og empiriske metoder for estimering av udrenert skjærstyrke s_u basert på CPTU-resultater. De empiriske metodene kan deles inn i tre grupper: estimering basert på total spissmotstand, estimering basert på effektiv spissmotstand og estimering basert på poreovertrykk [8].

Et estimat av s_u basert på total spissmotstand kan beregnes etter uttrykk 2.7, hvor konfaktoren N_{kt} vil kunne variere i størrelsesorden 10 - 30 avhengig av grunnforhold [8]:

$$s_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \quad (2.7)$$

Et estimat av s_u basert på effektiv spissmotstand kan beregnes etter uttrykk 2.8, hvor konfaktoren N_{ke} vil kunne variere i størrelsesorden 1 - 13 avhengig av grunnforhold:

$$s_u = \frac{q_t - u_2}{N_{ke}} \quad (2.8)$$

Denne metoden kan fungere godt for noen typer grunnforhold, men er generelt ikke anbefalt da verdien $q_t - u_2$ i bløte leirer kan bli liten og sensitiv for målefeil [8].

Et estimat av s_u basert på poreovertrykk kan beregnes etter uttrykk 2.9, hvor konfaktoren $N_{\Delta u}$ vil kunne variere i størrelsesorden 7 - 10 avhengig av grunnforhold:

$$s_u = \frac{u_2 - u_0}{N_{\Delta u}} \quad (2.9)$$

Generelt anbefaler Lunne et al. [8] å ta utgangspunkt i total spissmotstand (2.7), og benytte poreovertrykk (2.9) i tilfeller med bløt leire hvor det kan knyttes usikkerhet til presisjonen i q_t . Ideelt sett bør konfaktorene korreleres mot laboratorieforsøk fra samme område, for eksempel anisotropt konsolidert treaksialt trykkforsøk (CAUC). Det finnes også ulike empiriske relasjoner for konfaktorene, blant annet beskrevet av Karlsrud et al. [7].

2.4.3. Konsoliderings- og permeabilitetsegenskaper

Lunne et al. [8] foreslår følgende prosedyre for å estimere horisontale konsolideringsegenskaper fra dissipasjonsforsøk med poretrykksregistrering i posisjon u_2 :

- (i) Plot den første tida av forsøket i forstørret skala for bestemmelse av initielt poretrykk u_i
- (ii) Estimere in situ poretrykk u_0 basert på tilgjengelig informasjon om grunnforhold
- (iii) Plot av normalisert poreovertrykk U mot tida t i logaritmisk og/eller kvadratrotskala, hvor u_i er poretrykk ved starten av forsøket og u_t poretrykk ved tida t :

$$U = \frac{u_t - u_0}{u_i - u_0} \quad (2.10)$$

- (iv) Definere tida for 50 % dissipasjon t_{50}
- (v) Benytte t_{50} og kurvene i figur 2.4 til å estimere horisontal konsolideringskoeffisient c_h . Et gjennomsnitt av stivhetsindeksen $I_r = G/s_u$ kan benyttes dersom annen informasjon ikke er tilgjengelig
- (vi) Dersom forsøket ble avbrutt før t_{50} kan helningen på den rette delen av et u_2 mot t plot, m , brukes for å estimere c_h etter figur 2.4

Fra c_h kan horisontal permeabilitet estimeres ved følgende relasjon [8]:

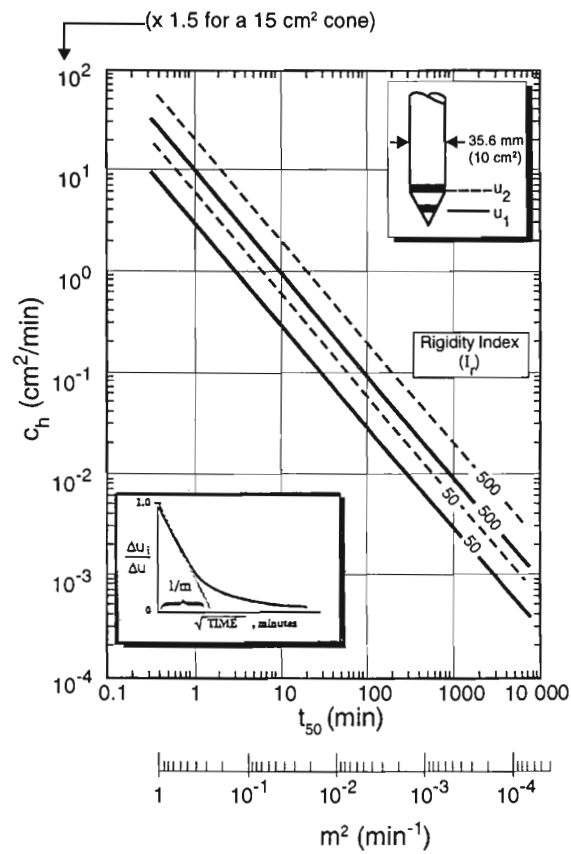
$$k_h = c_h \frac{\gamma_w}{M} \quad (2.11)$$

Hvor M er ødometermodulen og γ_w er tyngdetetthet til vann. Ved å bruke denne relasjonen samtidig kombinert med empiriske relasjoner mellom M og Q_t , samt c_h og t_{50} , har Robertson [21] foreslått diagrammet i figur 2.5 for direkte estimering av k_h .

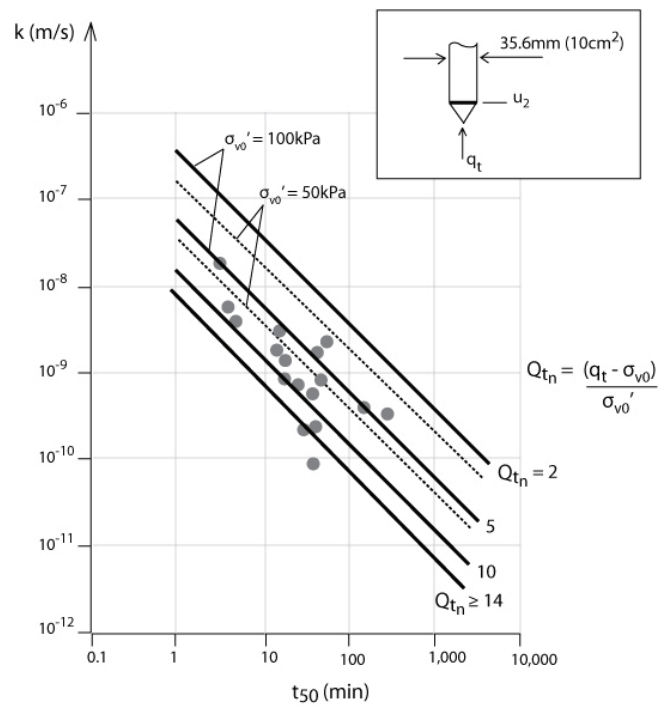
2.4.4. Annen bruk

Øvrige relasjoner for tolkning av resultater fra CPTU finnes, blant annet for OCR , stivhetsparametre og konsoliderings- og permeabilitetsparametre for finkornete jordarter. For grovere jordarter finnes også relasjoner for relativ densitet, friksjonsvinkel og stivhetsparametre [8].

2. Om trykksondering med poretrykksmåling



Figur 2.4.: Diagram for estimering av c_h fra t_{50} og I_r [8]

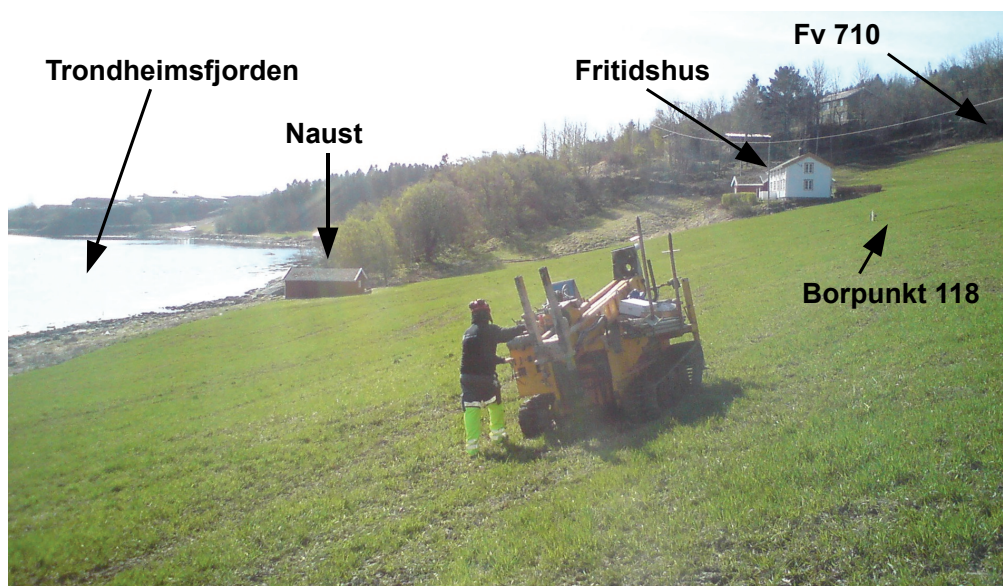


Figur 2.5.: Diagram for estimering av k_h fra t_{50} og Q_t [21]

3. Grunnforholdene i Lensvik

3.1. Supplerende forsøk

Prøveområdet ligger i Lensvik i Agdenes kommune i Sør-Trøndelag, og er vist på kart i vedlegg A. Borpunktene ligger ute på et jorde som skråner bratt fra fylkesvei 710 ned mot fjorden, slik det er vist i figur 3.1. Jordet ble mens undersøkelsene pågikk brukt til forproduksjon (gress).



Figur 3.1.: Bilde fra prøveområdet

I tillegg til de to trykksonderingene utført høsten 2010 er det i forbindelse med denne oppgaven utført supplerende undersøkelser i nærheten av hull 118 og 118b i månedsskiftet april-mai 2011. En oversikt over de supplerende undersøkelsene er gitt i tabell 3.1.

Tabell 3.1.: Oversikt supplerende feltforsøk ved hull 118

| Forsøk | Antall |
|--------------------|--------|
| Trykksondering | 1 |
| Dissipasjonsforsøk | 1 |
| Ø54 mm prøveserier | 1 |

Prøveserien besto av 5 prøver på 80 cm i dybde 1,0 - 6,8 m tatt med Ø54 mm stempelprøvetaker med stålsylindre. Prøven fra 4,0 - 4,8 m ble mistet under prøvetaking.

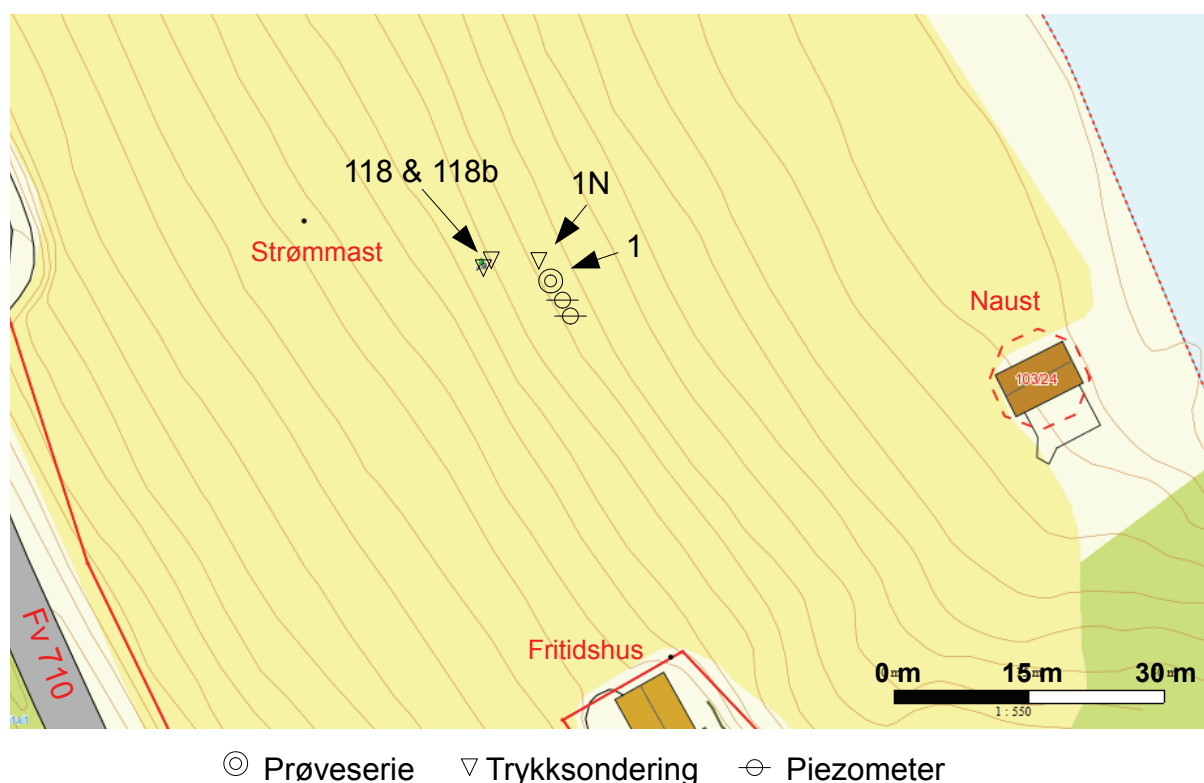
Den opprinnelige intensjonen var å utføre flere trykksonderinger for å kunne utføre flere dissipasjonsforsøk. Spesielt ville det vært av interesse å utføre et dissipasjonsforsøk fra en tilstand med et undertrykk i størrelsesorden -90 til -80 kPa i spissen og se hvordan dette utviklet seg. Under

3. Grunnforholdene i Lensvik

feltarbeidet oppsto det imidlertid problemer først med batteritypen som ble brukt i sonden, deretter med dybdemåleren og til slutt lekkasjer av både hydraulikk- og motorolje. Dette kombinert med at riggen ble opptatt med andre prosjekter gjorde at det ikke ble tid til å gjennomføre ytterligere forsøk.

3.2. Borplan

Borplan for undersøkelsesområdet i Lensvik er vist i figur 3.2. Borpunkt 118 har koordinater 32V 540699 7042704, mens øvrige borpunkt ikke er målt inn men plassert omtrent slik det befinner relativt til borpunkt 118.



Figur 3.2.: Borplan [2]

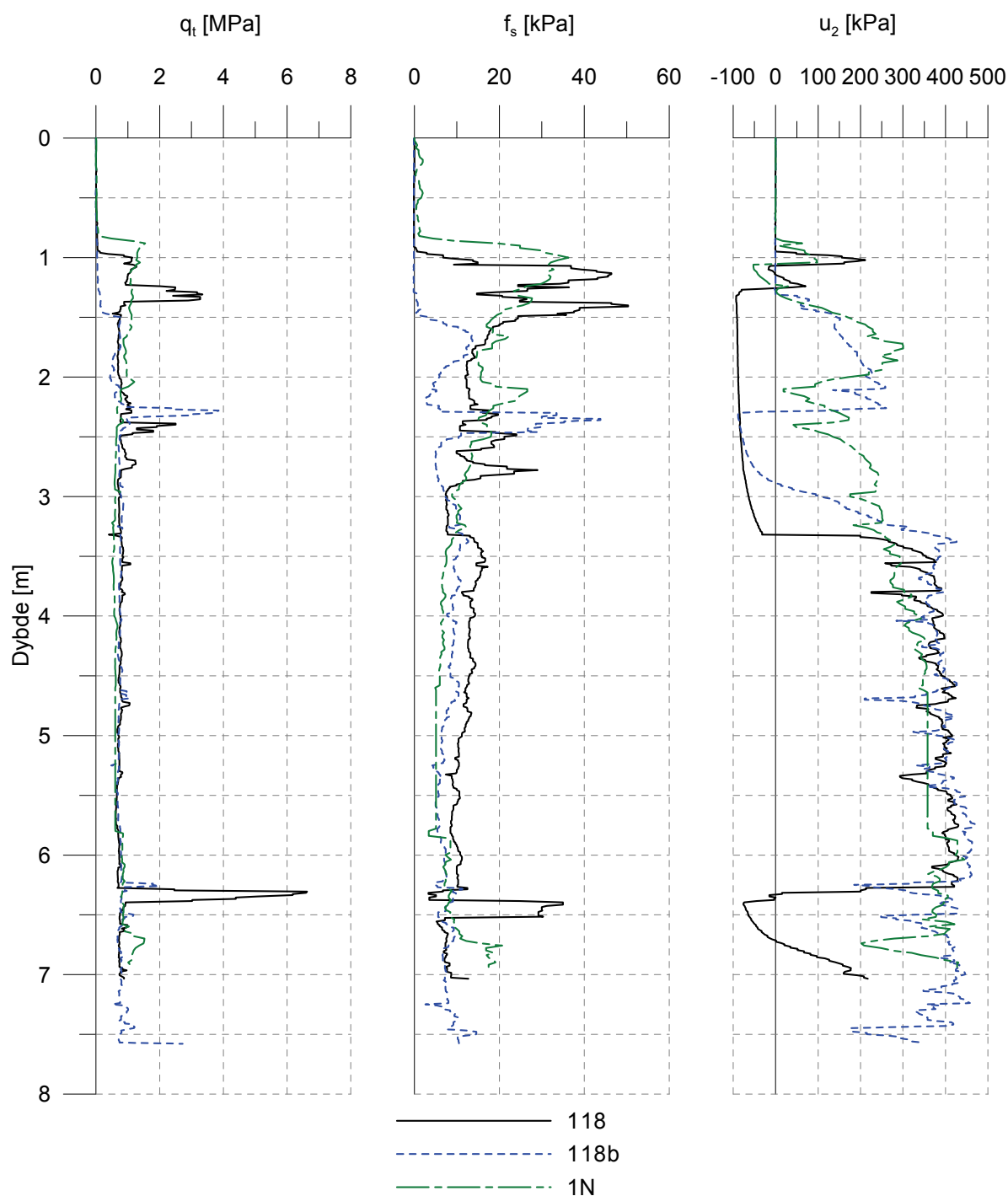
De to piezometerne vist i figur 3.2 benyttet av Statens vegvesen og er ikke brukt i forbindelse med denne rapporten. De er tatt med på figuren kun som et referansepunkt.

3.3. Trykksonderingsforsøk

3.3.1. Måleresultater

Korrigert spissmotstand q_t , sidefriksjon f_s og poretrykk u_2 fra de tre trykksonderingsforsøkene er vist i figur 3.3. Dybde er korrigert for helning på sonden. Enkeltvis plot av sonderingene inkludert helning på sonden finnes i vedlegg B.

Ved forsøk 1N ble forbindelsen med sonden brutt mellom ca. 4,6 og 5,7 m, og grafene viser derfor konstant verdi i dette området. Det er usikkert hvorfor dette skjedde, men det ble under senere



Figur 3.3.: Sammenligning av resultater fra trykksonderinger

forsøk oppdaget av batteriene som ble brukt (Biltema) ikke var like pålitelige som de hadde vært tidligere. Batteriene hadde også vært i bruk en stund, da det ble utført dissipasjonsforsøk ved 3,23 m. Det kunne vært gjort et forsøk på å hente disse dataene fra sondens interne minne, men denne muligheten ble dessverre glemt.

Det ble ved forsøk 118 og 1N forboret til omtrent 1 m, mens det ved 118b ble forboret til 1,5 m for å unngå et dilaterende lag. Dette dilaterende laget ved omtrent 1,2 m forårsaket under forsøk 118 et målt undertrykk på -93,0 kPa i spissen, og dette forstyrret målingen helt ned til rundt 3,3 m. Der kom poretrykket tilbake som følge av pause under stangskifte. Ved forsøk 118b lagde ett

3. Grunnforholdene i Lensvik

nytt lag ved omtrent 2,3 m tilsvarende problemer, hvor undertrykket ble målt til -88,2 kPa. Det er mulig dette laget også bidro til å vedlikeholde undertrykket i spissen i forsøk 118.

Forsøk 1N ble som det går frem av figur 3.2 utført 2 - 3 m lenger ned mot fjorden i forhold til 118 og 118b. Dette ble gjort i hovedsak for å være sikker på å unngå en vannledning som går gjennom området. Selv om dette forsøket viser en høy og variabel sidefriksjon ned til omtrent 3,0 m, er det ikke noe i spissmotstanden som tyder på en like markant lagdeling som ved de to foregående forsøkene.

Poretrykksfallene i 1N fører også til en treg oppførsel og tyder på dårlig metting, men utviklingen er ikke like dramatisk som i sonderingene fra høsten. I forkant av forsøk 1N hadde det ikke regnet i området på minst en uke, og det ble også observert under opptrekk at borstengene var så godt som tørre for nesten hele dybden. Tilsvarende vurdering fra høsten finnes ikke, men det er mulig at det da var bedre metting av jorda i skråningen og dermed større mulighet for at store undertrykk kunne oppstå.

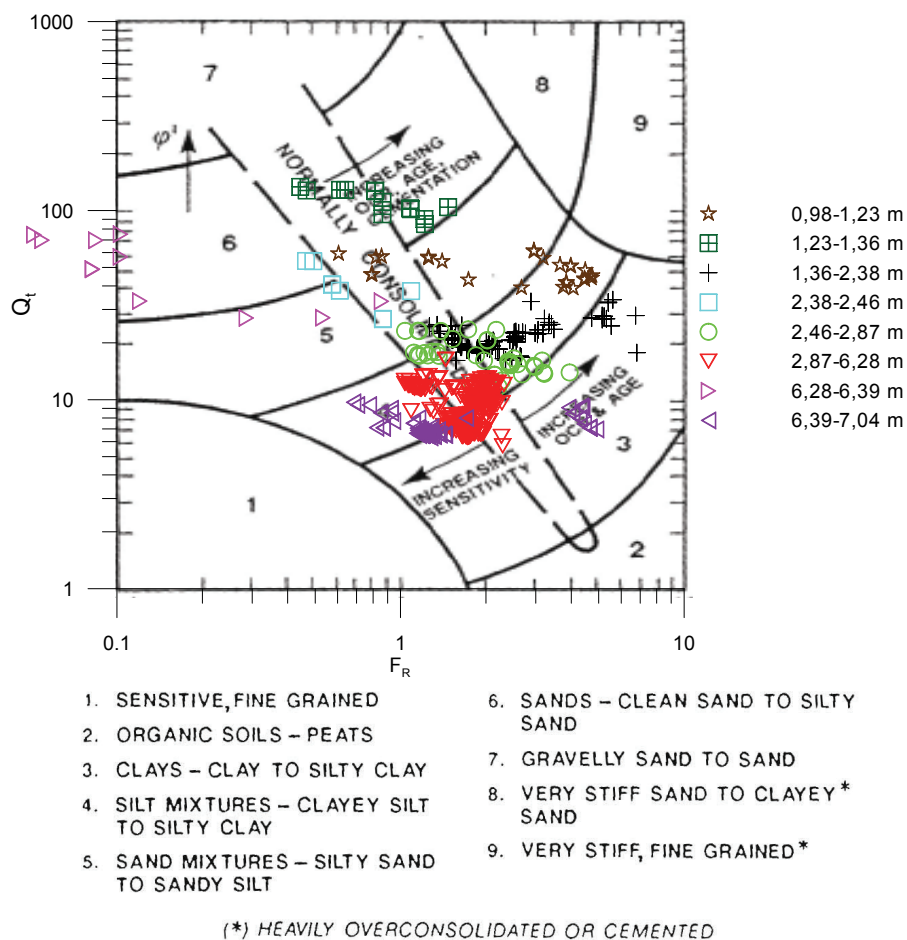
Erfaringer fra prøvetaking ved andre borhull i området høsten 2010 kan også tyde på store lokale variasjoner. Prøver som ble mistet ved et sted ble tatt opp uten problemer noen få meter unna, og dette kan tyde på forekomster av grovere og/eller sensitive masser med liten lokal utstrekning [28].

3.3.2. Jordartsklassifisering

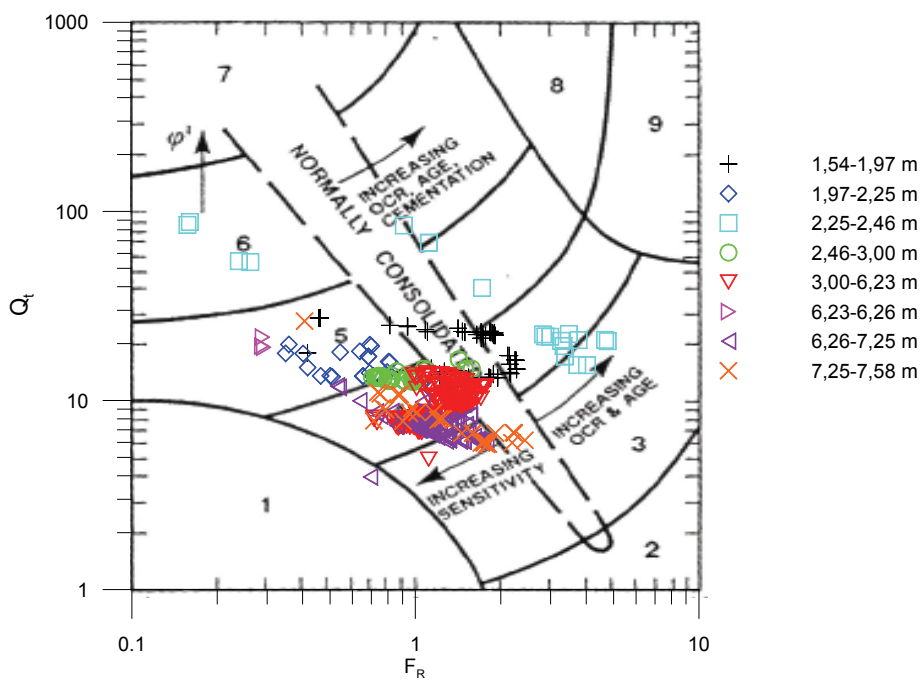
En tolkning av lagdelingen basert på diagrammene til Robertson [20] er vist i figur 3.4 for forsøk 118, figur 3.5 for 118b og figur 3.6 for 1N. Sammenfallende lag er forsøkt plottet med samme symbol og farge.

Da målingene av poreovertrykk var delvis forstyrret av undertrykkseffekter for alle sonderinger, er det kun vist tolkning basert på normalisert spissmotstand Q_t og normalisert friksjonsforhold F_R . Under beregningen av disse parametrene er det tatt utgangspunkt i en gjennomsnittlig tyngdetetthet γ på 19 kN/m³, og grunnvannstand 3 m under terreng med hydrostatisk poretrykkfordeling. Tatt i betraktning den mulige lokale variasjonen i permeable lag og helningen på skråningen, er det mulig poretrykkssituasjonen i området er mer komplisert enn dette. Men siden det ikke foreligger noen poretrykksmålinger er dette estimatet benyttet.

Generelt viser plottene at profilet stort sett består av middels til lite sensitiv normalkonsolidert leire med varierende innslag av silt. Forsøk 118 og 118b har lag ved omtrent 2,3 m og 6,3 m som skiller seg ut med grovere masser, mens forsøk 1N fremstår som mer homogen med mindre spredning i punktene.

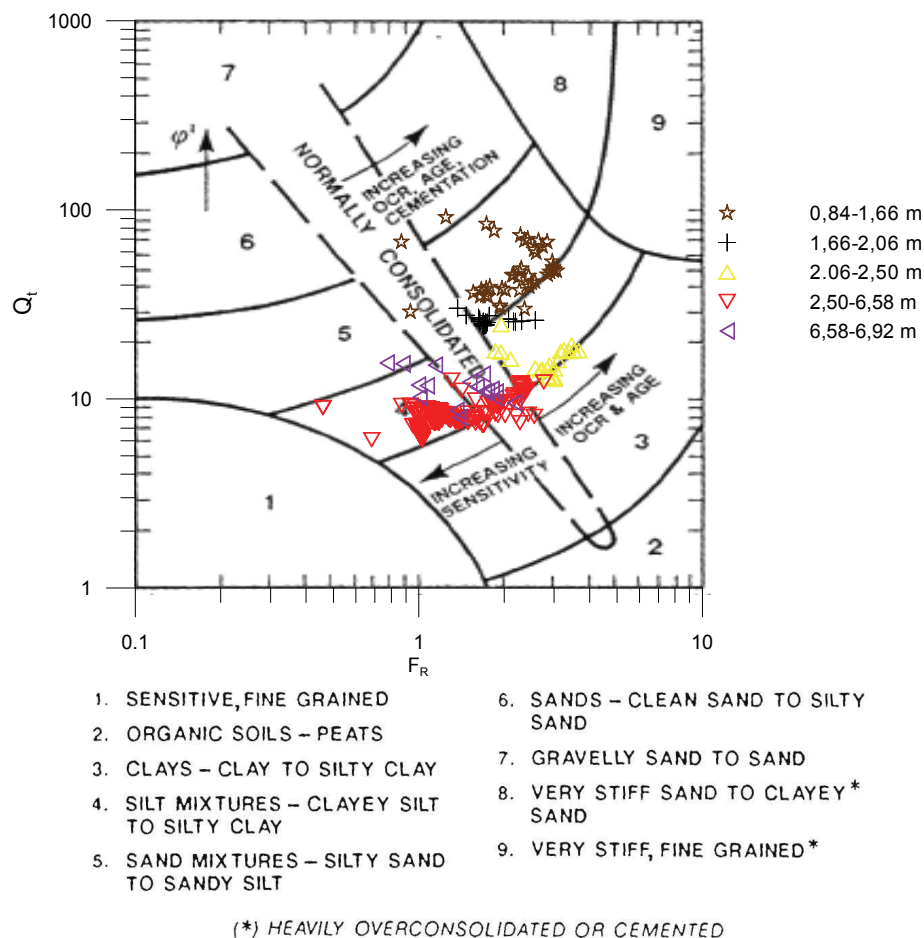


Figur 3.4.: Jordartsklassifisering etter forsøk 118 [20]



Figur 3.5.: Jordartsklassifisering etter forsøk 118b [20]

3. Grunnforholdene i Lensvik



Figur 3.6.: Jordartsklassifisering etter forsøk 1N [20]

3.4. Dissipasjonsforsøk

Resultater fra dissipasjonsforsøk er vist i tabell 3.2. Plot av dissipasjonsgrad U mot tida t finnes i vedlegg C.

Tabell 3.2.: Resultater fra dissipasjonsforsøk

| Forsøk | Dybde [m] | t_{50} [s] | c_h etter figur 2.4 [m ² /år] | k_h etter figur 2.5 [m/s] |
|--------|--------------|-----------------|---|--------------------------------|
| 1N | 3,23 | ca. 1000 | ca. 32 | ca. $2 \cdot 10^{-9}$ |

3.5. Rutineforsøk

3.5.1. Utførelse

Prøvene er skjøvet ut i laboratoriet, og det er deretter utført rutineforsøk for bestemmelse av følgende parametre:

- Densitet ρ , gjennomsnittlig og for liten ring [12]

- Vanninnhold w [14]
- Flytegrense w_l ved støtflytegrense [10]
- Plastisitetsgrense w_p [11]
- Udrenert skjærstyrke s_u , omrørt skjærstyrke s_r og sensitivitet S_t ved konusforsøk [16]
- Udrenert skjærstyrke s_u ved enaksialt trykkforsøk [17]
- Korndensitet ρ_s [13]
- Kornfordeling ved kombinert hydrometer- og sikteforsøk [18]
- Porøsitet n og metningsgrad S_r [15]

3.5.2. Resultater

Registrerte rutineparametre er oppsummert i tabell 3.3. Fullstendig borprofil finnes i vedlegg D og kornfordelingskurver i vedlegg E.

Tabell 3.3.: Oppsummerte rutineparametre

| Dybde [m] | w [%] | I_p [5] | γ kN/m ³ | s_u , konus [kPa] | S_t | s_u , enaks [kPa] | Leirinnhold [%] |
|--------------|------------|--------------|-------------------------------|------------------------|-------|------------------------|--------------------|
| 1,0 - 1,8 | 26 | 13 | 19,2 | 77 | 5 | 67 | 33 |
| 2,0 - 2,8 | 31 | 17 | 19,0 | 59 | 8 | 41 | 35 |
| 3,0 - 3,8 | 30 | 11 | 19,2 | 48 | 10 | 44 | 34 - 40 |
| 5,0 - 5,8 | 27 | 7 | 20,0 | 38 | 9 | 33 | 22 |
| 6,0 - 6,6 | 18 - 29 | | 20,1 | 47 | 16 | 44 | 33 |

Porøsitet n for alle prøvene var i størrelsesorden 42 - 45 %. Metningsgrad S_r ble beregnet til 93 % for 1,0 - 1,8 m og ellers 100 %.

Prøven fra 1,0 - 1,8 m besto av en middels plastisk, fast og lite sensitiv tørrskorpeleire [22]. Det var en del sand- og gruskorn spredd i hele prøven, som også var preget av brune flekker og sand- og siltlommer. Stein ved 1,4 m.

Prøven fra 2,0 - 2,8 m besto av middels plastisk, middels fast og lite sensitiv leire. Selv om metningsgrad var 100 % og vanninnhold på nivå med dypere lag, opplevdes den som tørrskorpeaktig og sprakk lett opp ved håndtering. Det ble observert skjellrester i tillegg til en del sand- og gruskorn, mens det var mer homogen leire fra omtrent 2,65 m.

Prøven fra 3,0 - 3,8 m besto av middels plastisk, middels fast og middels sensitiv leire. Den var mer homogen ned til omtrent 3,5 m, hvor det var en tydelig overgang til masser med større innslag av sand- og gruskorn. Et mulig sandlag ved 3,73 m førte til at 10 cm av prøven ble mistet. Stein ved 3,45 m.

Prøven fra 5,0 - 5,8 m besto av lite plastisk, middels fast og middels sensitiv sandig, siltig leire. Innholdet av sand og grus økte gradvis ved 5,25 m. Stein ved 5,45 m, og ellers gruskorn og sandlommer spredd i hele prøven. Det var en tydelig overgang til mer grovt innslag ved omtrent 5,56 m.

3. Grunnforholdene i Lensvik

Prøven fra 6,0 - 6,5 m besto av lite plastisk, middels fast og middels sensitiv leire. Det ble observert skjellrester i tillegg til sand- og gruskorn. Prøven fremsto som mer homogen over 6,20 m, og et tydelig sandlag ved 6,55 m førte til at resten av prøven ble mistet. Stein ved 6,5 m.

Oppsummert består hele prøveserien stort sett av leire med varierende innslag av sand- og gruskorn med noen spredte steiner. Ingen tydelige lag av grovere masser ble observert, bortsett fra ved 6,55 m. Generelt stemmer observasjonene overens med resultatene fra sondering 1N i figur 3.3 og jordartsklassifiseringen basert på spissmotstand og sidefriksjon i figur 3.6.

3.6. Ødometerforsøk

Det er utført kontinuerlig ødometerforsøk med konstant tøyningshastighet (CRS-forsøk) for bestemmelse av deformasjons-, konsoliderings- og permeabilitetsegenskaper [19]. En oppsummering av resultatene fra forsøkene er vist i tabell 3.4. Fullstendige plot fra forsøkene finnes i vedlegg F.

Tabell 3.4.: Oppsummering av resultater fra ødometerforsøk

| Dybde [m] | M_{OC} [MPa] | m | p'_c [kPa] | OCR | c_v [m ² /år] | k_v [m/s] |
|--------------|-------------------|-----|-----------------|-------|-------------------------------|---------------------|
| 2,57 | 5,5 | 14 | | | | |
| 3,30 | 6,5 - 7,0 | 17 | 300 | 7 | 35 | $2,1 \cdot 10^{-9}$ |
| 5,36 | 5,0 - 6,5 | 17 | 250 | 4 | 80 | $7,0 \cdot 10^{-9}$ |
| 6,36 | 6,5 - 7,0 | 18 | 300 | 4 | 25 | $1,5 \cdot 10^{-9}$ |

Prøver fra 1,0 - 1,8 m ble for lett oppsprukket og med innslag av mye grove korn ble det vanskelig å bygge inn i ødometer. Det samme gjaldt delvis for prøven fra 2,57 m, som også ble utført med for lav tøyningshastighet på 0,004 mm/min (øvrige forsøk er utført med 0,006 mm/min). Dette kombinert med at materialet kanskje ikke var fullstendig mettet, gjør at bestemmelse av parametre generelt og permeabilitetsparametre spesielt blir svært usikkert.

Prøven fra 3,30 m viser en god korrelasjon med dissipasjonsforsøk i forhold til størrelsesorden på konsolideringskoeffisient og permeabilitet.

Ved dybde 5,36 m ble det først kjørt et vellykket forsøk, men en feil ved startprosedyren førte til at loggefilen var tom. Det ble derfor utført et nytt forsøk på en prøve som var lagret i kjøleskap, og denne inneholdt en stor sandlomme i tillegg til at overflaten måtte lappes en del på grunn av gruskorn. Resultatene er derfor ikke like gode, og konsolideringskoeffisient og permeabilitet fra forsøket er nok derfor noe høyere enn det som er representativt.

Prøven fra 6,36 m viste en god respons.

4. Betydning av metting av filter og spiss

4.1. Teoretisk bakgrunn

4.1.1. Vannstrøm i jord

Vannstrøm i jord forutsetter en forskjell i potensiell energi, som innen hydraulikk ofte uttrykkes ved potensialhøyden h . Endringen i potensiell energi Δh over en avstand Δl gir den tallmessige verdien til gradienten i [5]:

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (4.1)$$

For laminær strømning bestemmer Darcys lov den gjennomsnittlige strømningshastigheten v basert på permeabilitetskoeffisienten k [5]:

$$v = ki \quad (4.2)$$

Gjennom et areal A vil det dermed under stasjonære strømningsforhold være en vannføring q :

$$q = vA = kiA \quad (4.3)$$

Laminær strømning vil være gyldig for lave gradienter og mer finkornete jordarter med poreåpninger i størrelsesorden < 1 mm. For svært finkornete jordarter som leire vil det dukke opp nye problemer, blant annet vedrørende om Darcys ligning er gyldig for små gradienter [5].

Ved vannstrøm inn mot (eller ut av) en trykksonde vil strømmingen være radiell, og gradienten i får følgende uttrykk [5]:

$$i = \frac{dh}{dr} \quad (4.4)$$

Forutsatt ingen strømning i lengderetningen av trykksonden og inkompressibelt vann, vil vannføringen q være den samme gjennom enhver sylindrisk flate i en radius r fra sonden. Når filteret til trykksonden har bredde b , fås følgende uttrykk ved å kombinere 4.3 og 4.4:

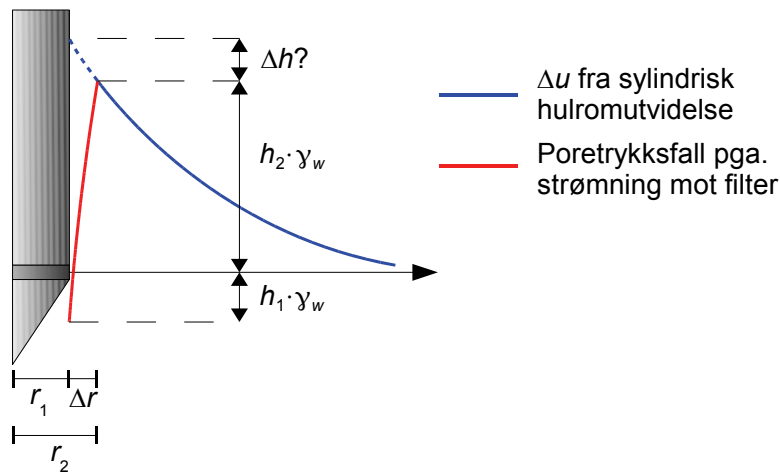
$$q = k_h \frac{dh}{dr} 2\pi r b$$
$$q \frac{dr}{r} = 2\pi b k_h dh \quad (4.5)$$

4. Betydning av metting av filter og spiss

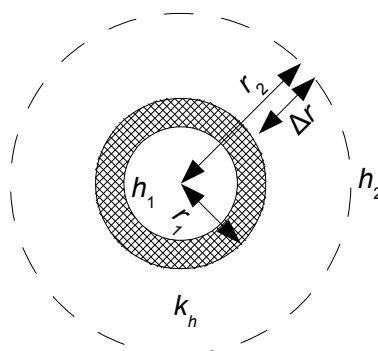
Hvor k_h er permeabiliteten i horisontal retning. Uttrykk 4.5 integreres fra filterets radius r_1 til den avstand hvor det drivende potensialet mot trykksonden er maksimalt, r_2 , og samtidig fra potensialet h_1 ved r_1 til h_2 ved r_2 , oppnås et uttrykk for vannføringen inn mot trykksonden ved stasjonær strømning [5]:

$$q = 2\pi b k_h \frac{h_2 - h_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (4.6)$$

For udrenert sylindrisk hulromsutvidelse vil poretrykksfordelingen i radiell retning rundt en trykksonde være som illustrert ved den blå linja i figur 4.1a [26]. Dersom det er et undertrykk i filter og væskekammer vil porevannet strømme mot sonden, illustrert som et trykkfall ved den røde linja. Figur 4.1b viser et horisontalsnitt gjennom filteret. Det forutsettes her at det ikke er noe trykkfall over selve filteret, siden permeabiliteten til filteret vil være adskillig større enn permeabiliteten til jorda rundt. I realiteten vil poretrykkssituasjonen være mer komplisert, med gradienter og strømning også i vertikal retning. Det vil også være usikkert hvor stort det drivende poretrykket kan antas å være, illustrert ved størrelsen Δh i figur 4.1a.



(a) Vertikalsnitt



(b) Horisontalsnitt

Figur 4.1.: Poretrykksfordeling rundt trykksonde

4.1.2. Gassteori

Basert på empiriske forsøk gir den ideelle gasslov en beskrivelse av forholdet mellom trykket p , volumet V , gassmengden n og temperaturen T i en ideell gass [29]:

$$pV = nRT \quad (4.7)$$

Hvor $R = 0,08206 \text{ l}\cdot\text{atm}/\text{K}\cdot\text{mol}$ er den universelle gasskonstanten. Uttrykk 4.7 stemmer generelt godt for gasser ved lavt trykk og høy temperatur. Ved høyere trykk og lavere temperaturer vil det være nødvendig med korreksjoner for å få modellen til å passe bedre til observasjoner. Dette er gjort ved van der Waals ligning for reelle gasser [29]:

$$p_{obs} = \frac{nRT}{V - nb} - a \left(\frac{n}{V} \right)^2 \quad (4.8)$$

Hvor a og b er konstanter som bestemmes for ulike gasser ved empiriske forsøk. V er her volumet av beholderen, og ikke nødvendigvis gassen. Årsaken til disse korreksjonene er at i en reel gass vil atomer og molekyler oppta en viss andel av volumet, i motsetning til en ideell gass som er basert på volumløse bestanddeler. I tillegg vil en større tetthet av molekyler i en gass føre til interne tiltrekningskrefter, og molekylerne vil dermed få en lavere tendens til å treffe veggen i beholderen. Dette fører til at det observerte trykket p_{obs} blir lavere [29]. Videre i denne oppgaven er likevel uttrykk 4.7 brukt, i hovedsak fordi trykkene som beregnes er relativt lave og fordi konstantene a og b ikke er bestemt.

4.2. Effekt av trykkfall på gassbobler i filter og væskekammer

4.2.1. Gassboblens opphav

To ulike tilfeller virker sannsynlige for å forklare hvor eventuelle gassbobler i en trykksondespiss kan ha sitt opphav:

1. Væskesystem er ikke skikkelig mettet under forberedelser til forsøk
2. Undertrykk under sondering fører av mettingsvæsken bruser eller koker

Tilfelle 1 er det i stor grad mulig å påvirke ved å være nøyaktig i forberedelsesprosedyrer. Tilfelle 2 vil det være noe vanskeligere å gardere seg mot, selv om det er mulig at vakuumering av mettingsvæsken på forhånd kan virke positivt. I figur 4.2 er det gjort et forsøk på å illustrere tilfelle 2, hvor glykol uten synlige gassbobler tydelig bruser og mange små bobler dannes når stampelet trekkes tilbake. Når stampelet så slippes fram igjen forsvinner ikke gassboblene like umiddelbart som de oppsto, siden det tar tid og trykk for å løse gassboblene i glykolen.

4.2.2. Simulering av trykkfall med gassboble under sondering

Det antas at det eksisterer ei gassboble (eller eventuelt flere) med volum V_0 i spissen ved atmosfæretrykk $p_{atm} = 101,325 \text{ kPa}$. Denne har enten blitt med på grunn av dårlig metting, eller har oppstått på grunn av lavt trykk underveis. På grunn av forskjellen i trykk mellom filter/væskekammer og leira rundt sonden, vil porevann strømme mot sonden og gradvis komprimere gassbobla og dermed øke det registrerte poretrykket. Dersom det antas en tilnærmet stasjonær strømmingstilstand for et kort tidsintervall Δt vil volumendringen ΔV til gassbobla være gitt av uttrykk 4.6:

4. Betydning av metting av filter og spiss



(a) Tilsynelatende luftfritt ved atmosfæretrykk



(b) Gassbobler oppstår når undertrykk påføres

Figur 4.2.: Reaksjon i glykol ved undertrykk

$$\Delta V = q\Delta t = 2\pi b k_h \frac{h_2 - h_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \Delta t$$

Dersom det antas konstant temperatur T og gassmengde n under denne prosessen, vil pV være en konstant verdi lik $p_{atm}V_0$. Når p_1 og V_1 er trykk og volum i ei gassboble inne i sonden ved starten av et tidsintervall Δt , og $V_2 = V_1 - \Delta V$ er volumet ved slutten av intervallet, fås følgende uttrykk for det nye registrerte trykket p_2 :

$$p_2 = \frac{p_{atm}V_0}{V_2} = \frac{p_{atm}V_0}{V_1 - \Delta V} = \frac{p_{atm}V_0}{V_1 - 2\pi b k_h \frac{u_2 - p_1}{\gamma_w \ln \frac{r_2}{r_1}} \Delta t} \quad (4.9)$$

Hvor u_2 er det drivende poreovertrykket i leira rundt sonden. Siden den faktiske verdien av u_2 er ukjent, er den i det følgende antatt å være den registrerte verdien av u_2 fra sondering 1M3 som beskrives senere i rapporten. I tillegg til u_2 er det også usikkerhet rundt den faktiske verdien til størrelsen på verdiene til potensialradiusen r_2 , startvolumet V_0 og kanskje også permeabiliteten k_h for en tilstand hvor sonden er i konstant bevegelse gjennom jorda. Det er derfor i det følgende kun utført en liten vurdering av betydningen av de ulike parameterne for det antatte drivende poreovertrykket.

Med utgangspunkt i en nedpressingshastighet på 2 cm/s, er tida t gjort om til dybde z . Trykket som er beregnet ved hjelp av uttrykk 4.9 er deretter plottet sammen med det reelle trykkfallstilfellet fra sondering 118b ved 2,3 m dybde (figur 3.3) og den antatte poretrykksfordelingen. Filteret til Nova-sonden har en radius $r_1 = 18$ mm og bredde $b = 5$ mm. Tidsintervallet Δt er satt til 0,01 s for alle beregninger.

Figur 4.3 viser et plot av effekten av variasjon av startvolum V_0 . Her faller trykket til $p_{min} = -85$ kPa, mens $\Delta r = 10$ mm og $k_h = 10^{-9}$ m/s. Som en referanse kan det nevnes at ei boble med volum 4 mm³ har omtrent 2 mm diameter, mens 16 mm³ vil ha omtrent 3 mm diameter. Ei

4.2. Effekt av trykkfall på gassbobler i filter og væskekammer

boble som har et volum på 16 mm^3 ved atmosfæretrykk vil utvides til et volum på omtrent 100 mm^3 ved -85 kPa .

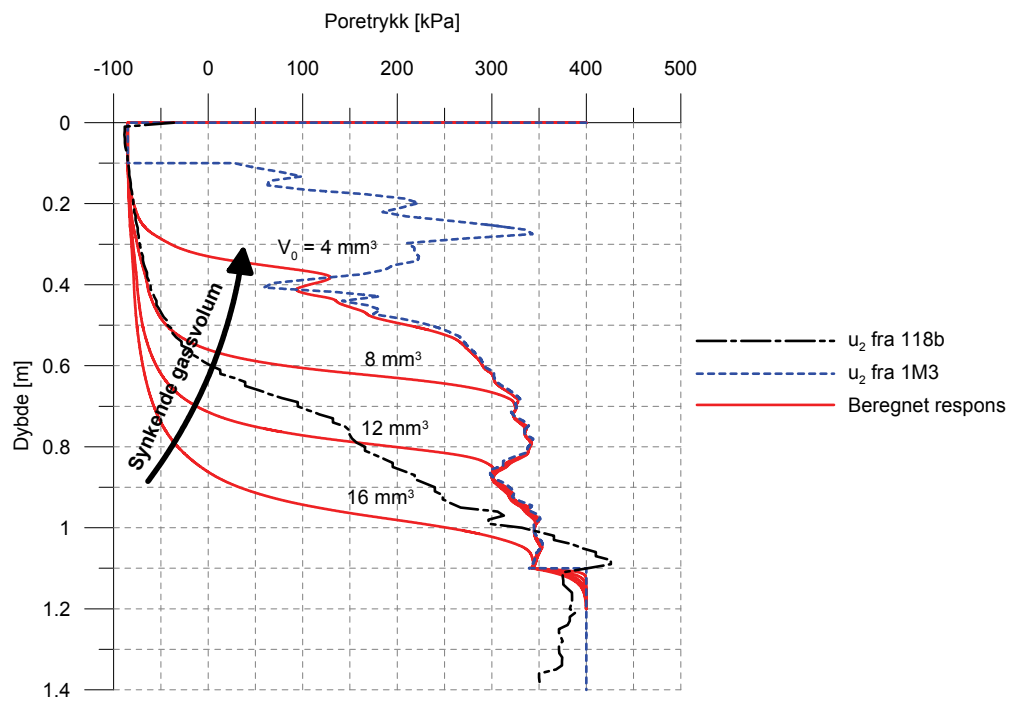
Figur 4.4 viser et plot av effekten av variasjon av potensialradius $r_2 = r_1 + \Delta r$, hvor $p_{min} = -85 \text{ kPa}$ $V_0 = 12 \text{ mm}^3$ og $k_h = 10^{-9} \text{ cm/s}$.

Figur 4.5 viser et plot av effekten av variasjon av horisontal permeabilitet k_h , hvor $p_{min} = -85 \text{ kPa}$ $V_0 = 12 \text{ mm}^3$ og $\Delta r = 10 \text{ mm}$.

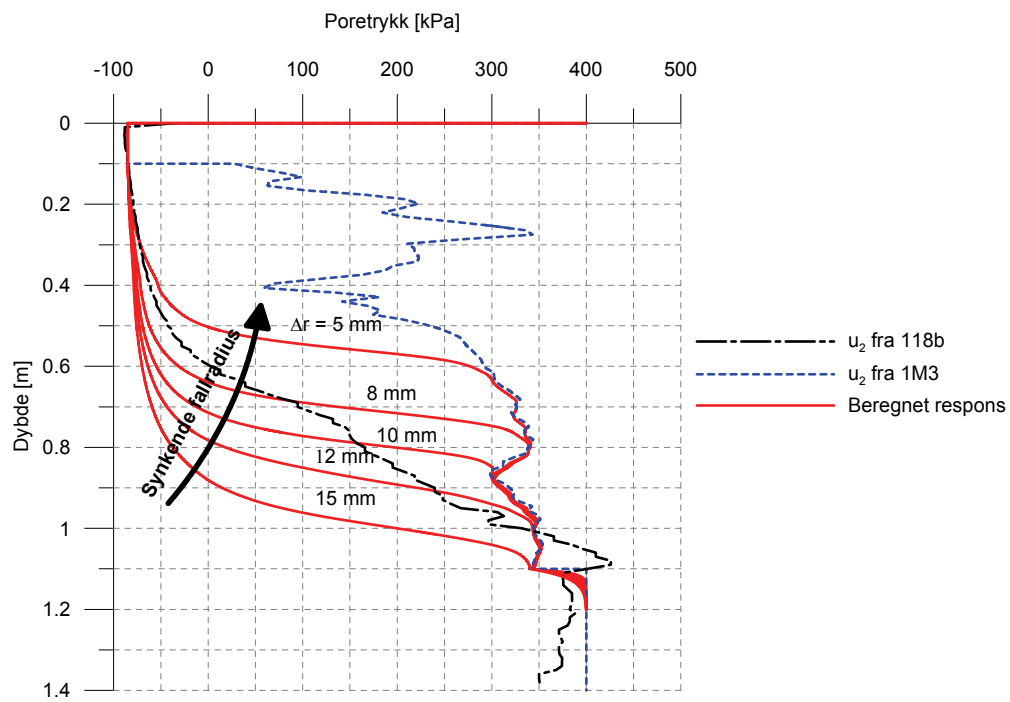
Figur 4.6 viser et plot av effekten av variasjon av trykkfall representert ved minimalt trykk p_{min} . Her er $V_0 = 12 \text{ mm}^3$, $\Delta r = 10 \text{ mm}$ og $k_h = 10^{-9} \text{ m/s}$. Det antatte drivende poreovertrykket starter ved samme undertrykk for hver beregning. Figur 4.6 viser også at effektene blir mer og mer dramatiske når trykket nærmer seg vakuum, slik det også ble observert under sondering 118 ved 1,3 m dybde (se figur 3.3).

Oppsummert viser figurene 4.3 - 4.6 at små variasjoner i flere parametre har store konsekvenser for hvor raskt det registrerte poretrykket kan innhentes ved et trykkfall. I tillegg vil poreovertrykket som driver vannet inn i sonden igjen også ha stor innvirkning. Disse beregningene er basert på forholdsvis enkle betingelser, og det vil derfor være vanskelig å beskrive nøyaktig hva som skjedde ved for eksempel sondering 118 og 188b. Det som kan tas med videre er den karakteristiske liggende S-formen på kurvene, som et tydelig kjennetegn på tilstedeværelsen til gassbobler i sondens væskesystem.

4. Betydning av metting av filter og spiss

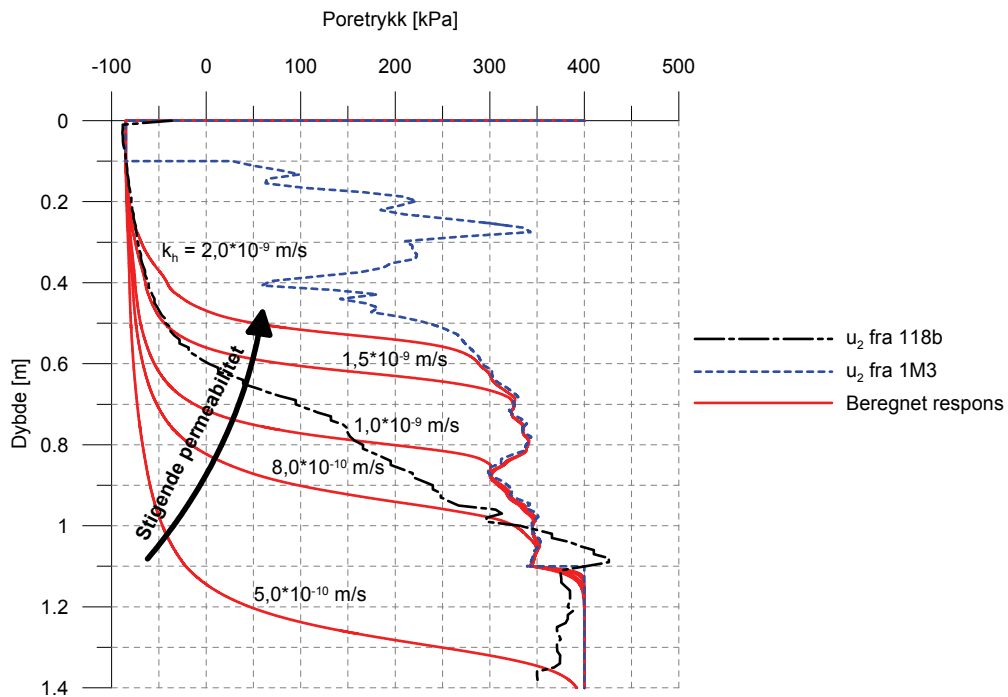


Figur 4.3.: Effekt av variasjon av V_0

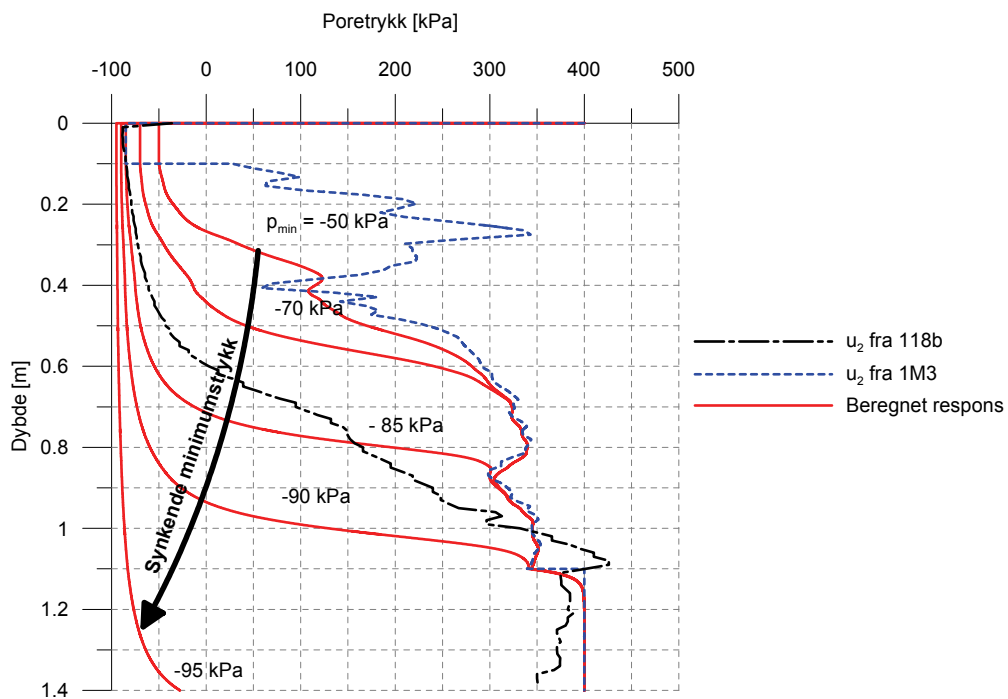


Figur 4.4.: Effekt av variasjon av $r_2 = r_1 + \Delta r$

4.2. Effekt av trykkfall på gassbobler i filter og væskekammer



Figur 4.5.: Effekt av variasjon av k_h



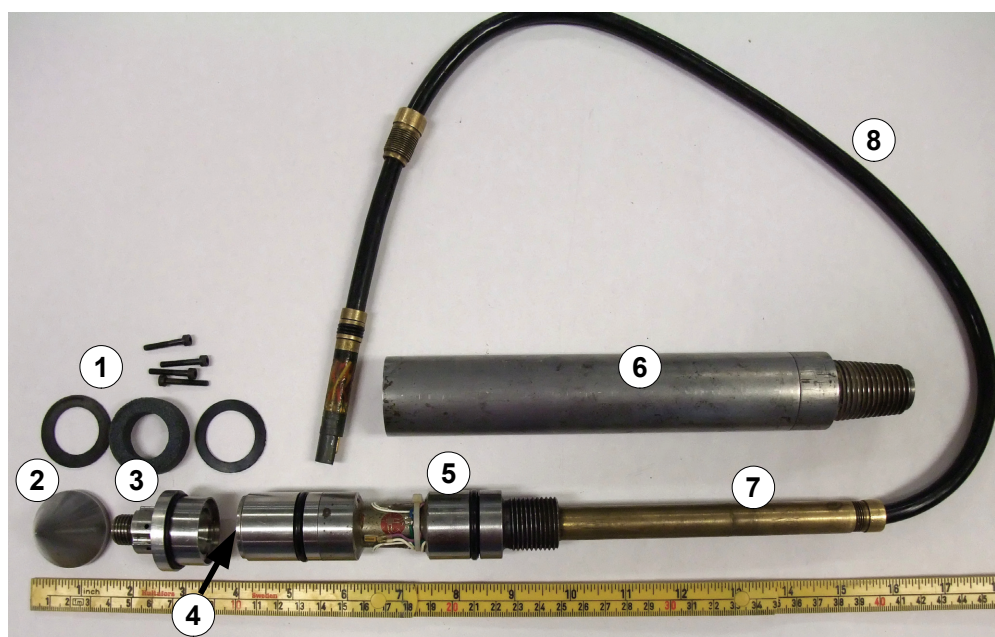
Figur 4.6.: Effekt av variasjon av p_{min}

5. Utforming av modifisert trykksonde

5.1. Utgangspunkt

Utgangspunktet for design av den modifiserte trykksonden er den gamle Fugro-spissen, som ble brukt til trykksonderingsforsøk ved NTNU før de trådløse sondene ble tilgjengelige. Fugro-spissen registrerer spissmotstand q_c og poretrykk u_2 , og overfører signaler via en kabel som tres gjennom stangsettet. Utstyret ble tidligere benyttet sammen med en borerigg med kontinuerlig nedpressing som var montert bak på en traktor, men kan også brukes ved vanlige borerigger. Denne spissen ble valgt som utgangspunkt fordi designet er velprøvd ved instituttet, og fordi det eksisterte et lager med reservedeler for de fleste av komponentene.

Komponentene som inngår i Fugro-spissen er vist i figur 5.1. Filteret som brukes er et porøst steinfilter med utvendig diameter 35,6 mm, innvendig diameter 21,5 mm og høyde 10 mm.



- | | |
|------------------------|-------------------------------|
| 1 Filter med pakninger | 5 Lastcelle |
| 2 Kon | 6 Beskyttelseshylse |
| 3 Væskeskammer | 7 Messinghylse for kabelfeste |
| 4 Poretrykksensor | 8 Kabel for signaloverføring |

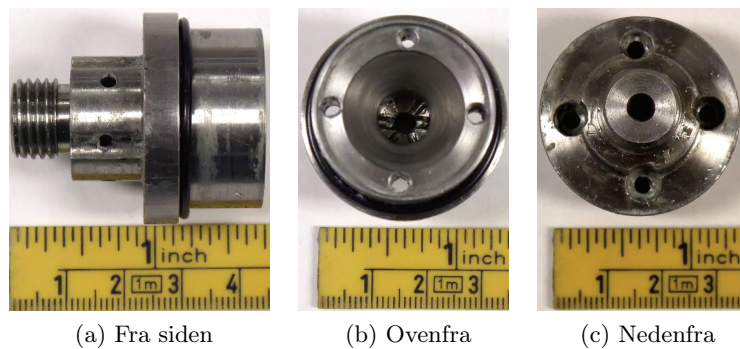
Figur 5.1.: Fugro-spissens komponenter

Konen, som er vist i figur 5.2, er gjenget innvendig for å skrus på væskekammeret. Konen har en diameter på 35,6 mm og har en spiss på 60°.



Figur 5.2.: Konen

Væskekammeret er konet innvendig, og har 6 kanaler som forbinder væsken i filteret med kammeret og poretrykksensoren. Det går også en kanal gjennom tuppen for påfylling av væske. På grunn av den innvendige koningen vil eventuelle luftbobler ha større sannsynlighet for å følge med ut når kammeret fylles.



Figur 5.3.: Væskekammer

Sammensetting av spissen er vist i figur 5.4. Væskekammeret festes til lastcella med fire skruer, og konen skrus på tuppen av væskekammeret og holder filteret på plass mellom to pakninger. Beskyttelseshylsa skrus på slik at den dekker over sondekroppen, og tetter via to o-ringer ved lastcella og mot en o-ring på væskekammeret. Sonden skrus så direkte fast i stangsettet.

Etter montering ble hele spissen plassert i et kammer fylt med vann, som deretter ble påført et undertrykk for å fjerne luftbobler fra spissen. Kammeret er vist i figur 5.5.

Signalkabelen har 10 ledere, og skjøtes med stålhylser som skrus fast med verktøy for å forhindre at koblingen sklir fra hverandre. O-ringer på kabelen presses samtidig sammen og ut mot stålhylsa slik at koblingen blir vanntett. Kabelskjøten er vist i figur 5.6.

5. Utforming av modifisert trykksonde

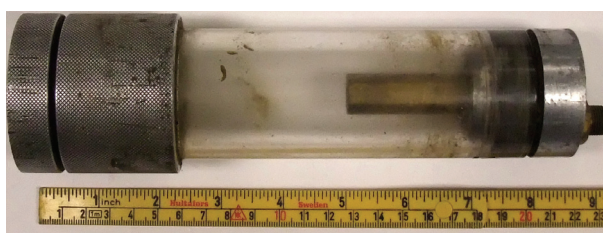


(a) Delvis sammensatt



(b) Sammensatt

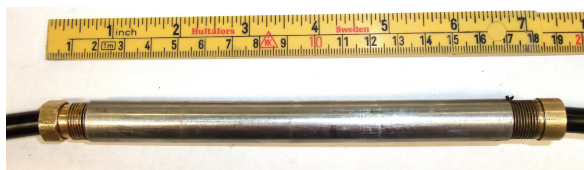
Figur 5.4.: Sammensetting av Fugro-spissen



Figur 5.5.: Vakuumbakke til Fugro-spiss



(a) Kabelskjøt adskilt



(b) Kabelskjøt sammensatt

Figur 5.6.: Kabelskjøt

5.2. Modifisert trykksonde

5.2.1. Konsept

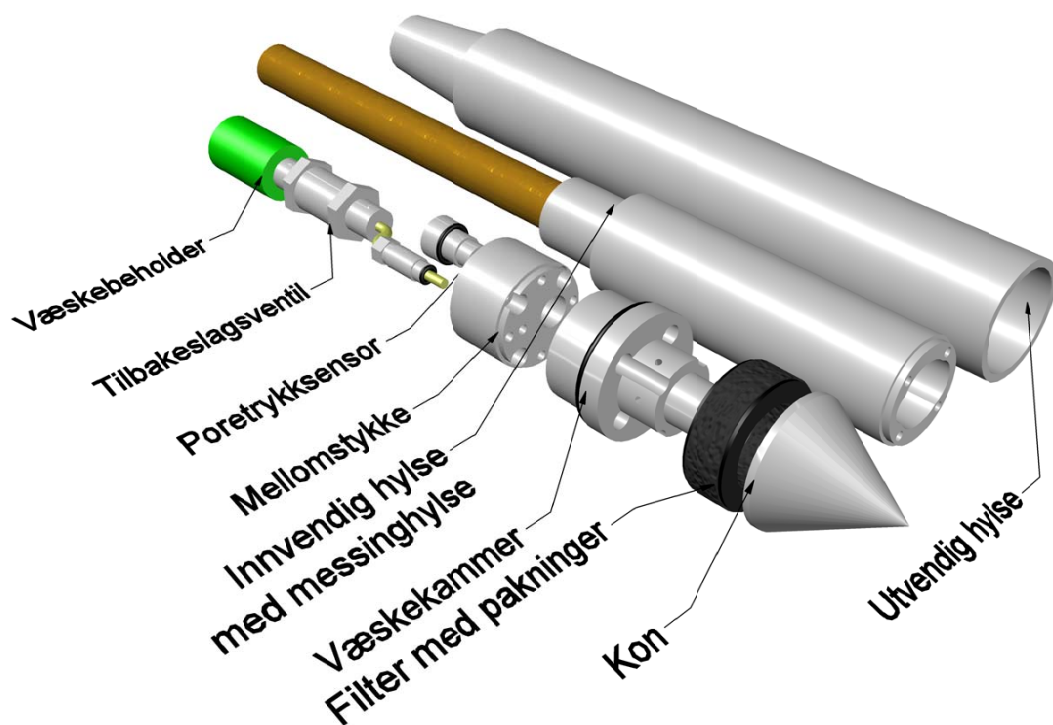
Hensikten med den modifiserte trykksonden er å forhindre at det oppstår et undertrykk som fører til utvidelse av gassbobler i væskekammeret. Dette ble tenkt utført ved å bruke en tilbakeslagsventil som åpnes ved et definert undertrykk. Ventilen har tilgang til et væskekammer med et visst volum, og når det oppstår et undertrykk i væskekammeret vil ventilen dermed åpne og slippe til ny væske i kammeret istedet for at gassbobler utvides. Så lenge væsketrykket i spissen er større enn åpningstrykket for tilbakeslagsventilen, vil den registrere poretrykk som normalt.

Det ble tatt utgangspunkt i komponentene til den gamle Fugro-spissen, for deretter å bytte ut innmaten med den nye ventilisatsen. Det ble ikke gjort noe forsøk på å registrere spissmotstand eller sidefriksjon, og heller konsentrere seg om poretrykket for å gjøre ting så enkelt som mulig. Som referanse for spissmotstand, poretrykk og sidefriksjon ville istedet data fra Nova-sonden bli brukt.

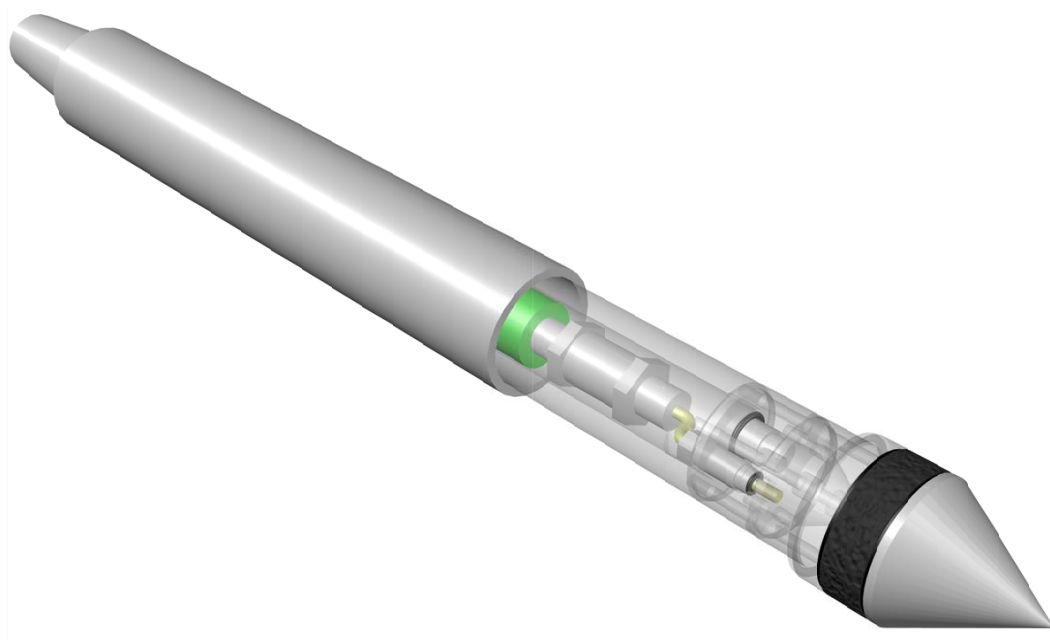
Til å begynne med var det tenkt å bytte ut delen med poretrykksensor og lastcelle i Fugro-spissen med en ny poretrykksensor og ventilisats som lå inne i en innvendig hylse. Tilgjengelig volum inne i sonden som har en utvendig diameter på omtrent 36 mm (10 cm^2 areal) er svært lite, og det var derfor ikke lett å få plass til alle komponentene. Figur 5.7 viser hvordan ventilen med et væskekammer sammen med poretrykksensoren festes til et mellomstykke, som igjen festes til væskekammeret slik lastcella med poretrykksensoren festes til væskekammeret i Fugro-spissen. Dette konseptet ble valgt fordi det kunne muliggjort registrering av spissmotstand ved en senere anledning, siden all kraften fra konen ville gått gjennom den innvendige hylsa.

Figur 5.8 viser hvordan sonden er tenkt satt sammen med den utvendige hylsa delvis tredd over.

5. Utforming av modifisert trykksonde



Figur 5.7.: Konsept for modifisert trykksonde

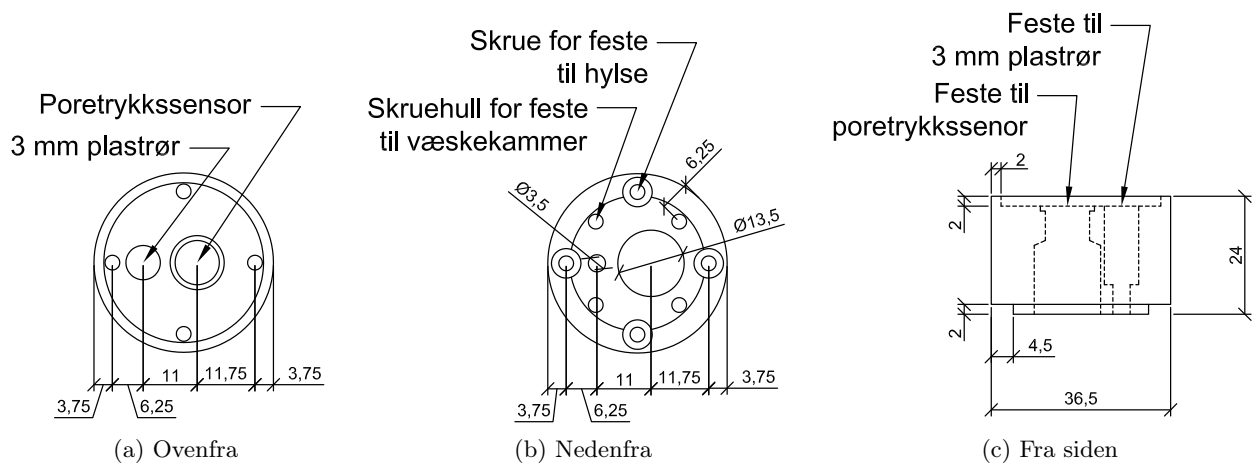


Figur 5.8.: Konsept for modifisert trykksonde sammensatt

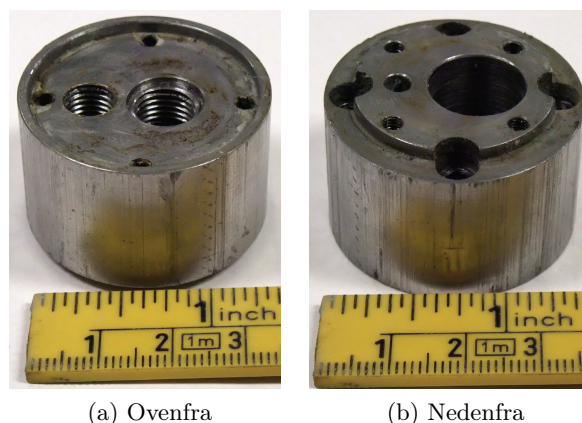
5.2.2. Egenproduserte komponenter

Da produksjonen av komponentene skulle starte ble det funnet deler av en borstang med ferdige gjenger til å feste i stangsettet. For å redusere antallet komponenter som måtte produseres ble det derfor besluttet å bruke denne som ei utvendig hylse, og gå bort fra konseptet med ei innvendig hylse. Væskekammer, filter og kon fra Fugro-spissen ville fortsatt bli benyttet som før, og et mellomstykke med samme diameter som hylsa (36,5 mm) for å feste ventilsets og poretrykksensor måtte lages. Dette økte også tilgjengelig plass inne i sonden.

Målsatte tegninger av det produserte mellomstykket er vist i figur 5.9, mens den produserte delen er vist i figur 5.10. Bildene er tatt etter bruk i felt, og mellomstykket er derfor noe slitt og korrodert. Tegningene finnes i målestokk i vedlegg G.



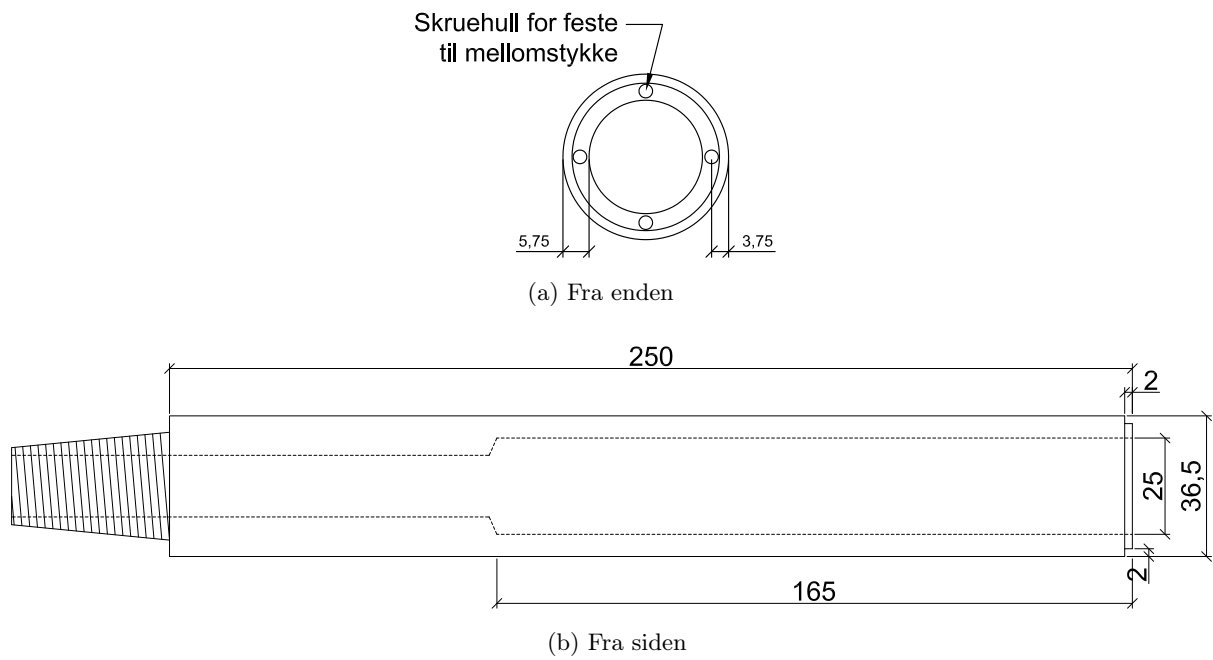
Figur 5.9.: Tegninger av mellomstykke



Figur 5.10.: Produsert mellomstykke

Den nye hylsa ble som nevnt laget av en del av en avkappet borstang, med utvendig diameter omtrent 36,5 mm og innvendig diameter omtrent 25 mm. Den øvre enden hvor hylsa festes til stangsettet er også gjenget innvendig for å feste messinghylsa som holder signalkabelen på plass. Målsatte tegninger av beskyttelseshylsa er vist i figur 5.11, og figur 5.12 viser den ferdigproduserte hylsa.

5. Utforming av modifisert trykksonde



Figur 5.11.: Tegninger av beskyttelseshylse



(a) Fra enden (med kabel for poretrykksensor)

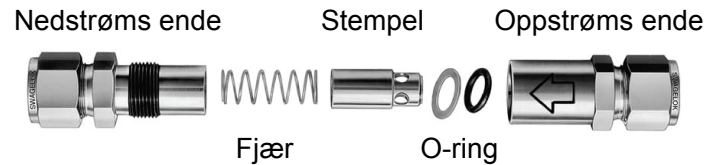


(b) Fra topp

Figur 5.12.: Produsert beskyttelseshylse

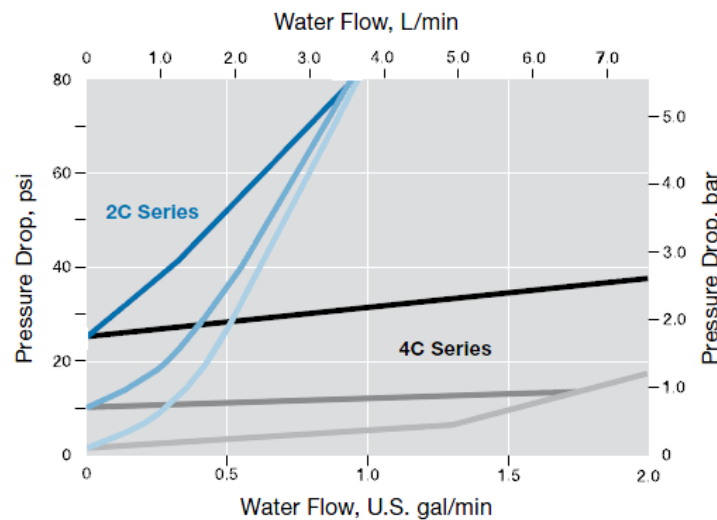
5.2.3. Ventilsets

Ventilsatsen består av en tilbakeslagsventil, væskebeholder og en overgang med et 3 mm plastrør som festes til mellomstykket. Ventilene som ble benyttet under forsøkene i denne rapporten er av merke Swagelok med åpningstrykk på 1 psi (6,9 kPa) og 10 psi (68,9 kPa), med katalogbetegnelse SS-2C2-1 og SS-2C2-10. De er utført i rustfritt stål, og fungerer ved at en fjær presser en sylinder mot en o-ring for å tette [24]. Oppbyggingen av ventilen er illustrert i figur 5.13.



Figur 5.13.: Oppbygging av tilbakeslagsventil [24]

Siden den er fjærbelastet vil ventilen gradvis åpnes for økende trykkforskjell. Væskestrømmen (for vann) gjennom ventilene ved varierende trykkforskjell er illustrert i figur 5.14, hvor de to nederste blå linjene gjelder henholdsvis 10 psi og 1 psi ventiler. 1 U.S. gal/min tilsvarer 3,7854 l/min [29].



Figur 5.14.: Vannstrøm gjennom tilbakeslagsventil [24]

Åpningstrykket for ventilene har et visst variasjonsområde, og et visst mottrykk kreves også for å lukke ventilen igjen skikkelig. Tabell 5.1 gir en oversikt over åpnings- og lukkingstrykk for ventilene. Det kan imidlertid kreves et større trykk for å åpne ventilene dersom det har gått en stund siden de sist var åpnet [24].

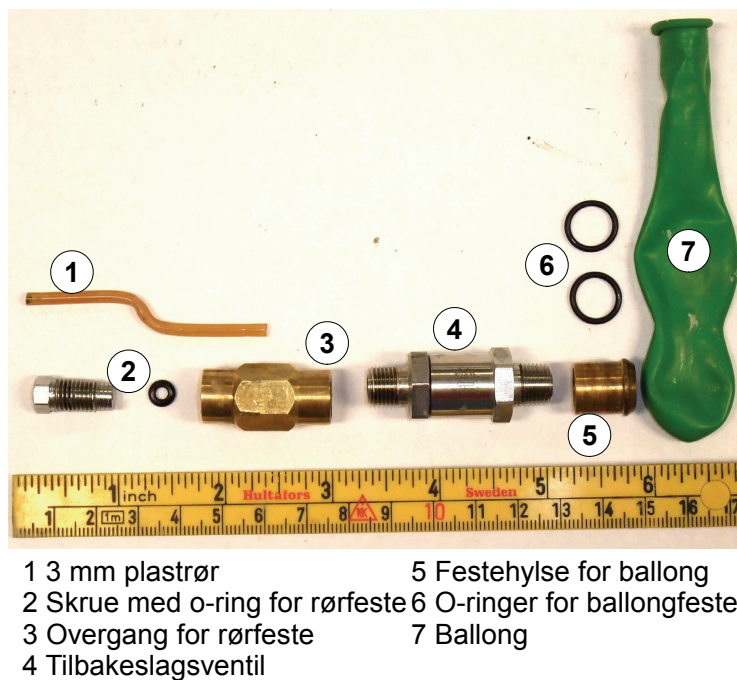
Tabell 5.1.: Åpnings- og lukkingstrykk for tilbakeslagsventiler [24]

| Nominelt åpningstrykk [kPa (psi)] | Variasjon i åpningstrykk [kPa] | Lukkingstrykk [kPa] |
|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 6,9 (1) | Opp til 28 | Opp til 42 nedstrøms trykk |
| 68,9 (10) | 49 til 110 | 21 eller mer oppstrøms trykk |

Den komplette ventilsatsen er vist i figur 5.15. Som væskebeholder ble det brukt "Figurballonger" fra Toys'R'Us, da disse hadde et tilstrekkelig volum og fikk grei plass inne i sonden. Ved å bruke

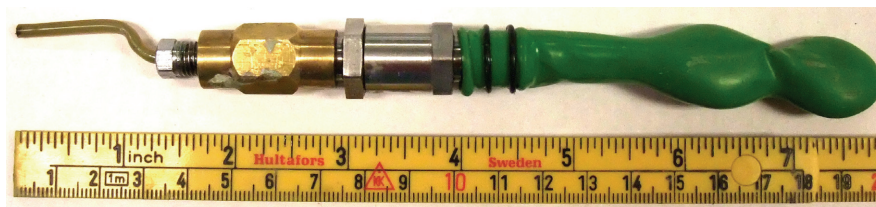
5. Utforming av modifisert trykksonde

en beholder i et fleksibelt materiale vil det heller ikke oppstå noe undertrykk inne i beholderen når væske suges ut. 2 o-ringer og en spesiallaget hylse ble brukt for å feste ballongen til ventilen.



Figur 5.15.: Ventilsetts adskilt

Sammensatt ser ventilsetten ut som på figur 5.16. Mellom ventilen og overgangen er det brukt gjengeteip for tetting. Den lille o-ringen holder plastøret på plass samtidig som den tetter mot festeskruen. Samme metode benyttes for å feste plastøret og ventilen til mellomstykket.



Figur 5.16.: Ventilsetts sammensatt

5.2.4. Poretrykksensor

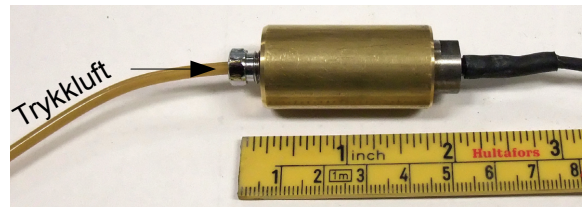
Poretrykksensoren som ble benyttet er en Honeywell Model S med et måleområde på 200 psig (13,8 barg). Den har en nøyaktighet på 1 % av fullt måleområde og uendelig oppløsning [3]. Sensoren kommer med en egen o-ring som tetter når den skrues fast til mellomstykket i sonden. Et bilde av sensoren er vist i figur 5.17.

Til å forsterke signalene fra poretrykksensoren er det brukt en Clip AE 301 forsterker fra HBM.

Sensoren ble kalibrert i et trykkområde fra 0 til 1000 kPa, ved å bruke en overgang hvor sensoren ble festet i den ene enden og en slange med trykkluft festet i den andre slik det er vist i figur 5.18.



Figur 5.17.: Poretrykksensor [4]



Figur 5.18.: Overgang for kalibrering av poretrykksensor

Resultater fra kalibreringen vist i tabell 5.2. Forholdet mellom påført trykk og avlest spenning er ikke helt lineært, men ganske nær. I kolonnen "Beregnet trykk" i tabellen er det brukt en lineær faktor på 117 kPa/V, som viste seg å gi en relativt liten feil for aktuelt måleområde.

Tabell 5.2.: Kalibrering av poretrykksensor

| Påført trykk [kPa] | Avlest spenning [V] | Differanse [V] | Faktor [kPa/V] | Beregnet trykk [kPa] | Feil [kPa] |
|-----------------------|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|---------------|
| 0 | 0 | | | | |
| 100 | 0,8428 | 0,8428 | 118,6521 | 98,6076 | -1,3924 |
| 200 | 1,6922 | 0,8494 | 118,1893 | 197,9874 | -2,0126 |
| 300 | 2,5443 | 0,8521 | 117,9106 | 297,6831 | -2,3169 |
| 400 | 3,3982 | 0,8539 | 117,7094 | 397,5894 | -2,4106 |
| 500 | 4,2550 | 0,8568 | 117,5088 | 497,8350 | -2,1650 |
| 600 | 5,1149 | 0,8599 | 117,3043 | 598,4433 | -1,5567 |
| 700 | 5,9780 | 0,8631 | 117,0960 | 699,4260 | -0,5740 |
| 800 | 6,8402 | 0,8622 | 116,9556 | 800,3034 | 0,3034 |
| 900 | 7,7064 | 0,8662 | 116,7860 | 901,6488 | 1,6488 |
| 1000 | 8,5695 | 0,8631 | 116,6929 | 1002,6315 | 2,6315 |

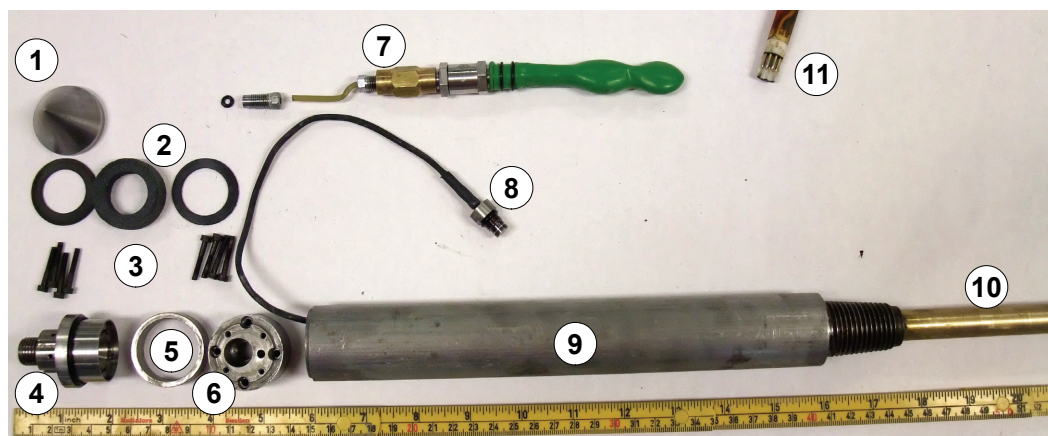
5.2.5. Komplette sonde

Et oversiktsbilde av den komplette modifiserte trykksonden er vist i figur 5.19. Stålringen (nr. 5) tres på væskekompartimentet for å øke diameteren slik at den blir lik resten av sonden.

Sammensetting av sonden er demonstrert i figur 5.20. Under sammensetting kveiles kabelen til poretrykksensoren forsiktig rundt ventilaksen.

Poretrykksensoren er avhengig av et referansetrykk på baksiden, og det ble derfor boret et lite hull i messinghylsa for å gi sensoren tilgang til atmosfæretrykk gjennom stangsettet (se figur 5.21). Dette forutsatte at det ville trenge minimalt med vann inn i stangsettet under sondering, men det ble ikke observert at dette var noe problem under noen av forsøkene.

5. Utforming av modifisert trykksonde

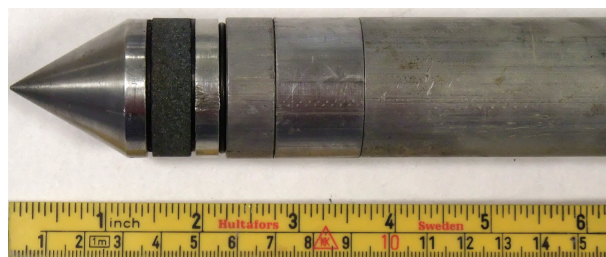


- | | |
|-----------------------------|---------------------|
| 1 Kon | 7 Ventilsets |
| 2 Steinfilter med pakninger | 8 Poretrykksensor |
| 3 Skruer | 9 Beskyttelseshylse |
| 4 Væskekommer | 10 Messinghylse |
| 5 Stålring til væskekommer | 11 Signalkabel |
| 6 Mellomstykke | |

Figur 5.19.: Den modifiserte trykksondens komponenter

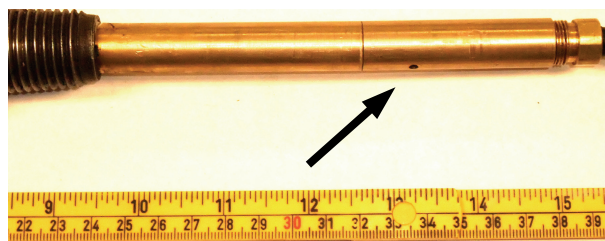


(a) Ventil og sensor festet til mellomstykke



(b) Den sammensatte spissen

Figur 5.20.: Sammensetting av den modifiserte sonden



Figur 5.21.: Luftehull i messinghylsa

5.2.6. Dybdemåler

Til å registrere dybde under trykksonderingsforsøk ble det benyttet en Leine & Linde AB Optical Incremental Decoder type 5810A, vist i figur 5.22. Denne kobles rett på stangsettet, og vil derfor være uavhengig av hvilken borerigg som eventuelt benyttes. Måleren gir 960 pulser pr omdreining, og med en diameter på 60 mm på løpehjulet gir dette dybdeintervaller på $0,19635 \text{ mm/puls}$.



Figur 5.22.: Dybdemåleren

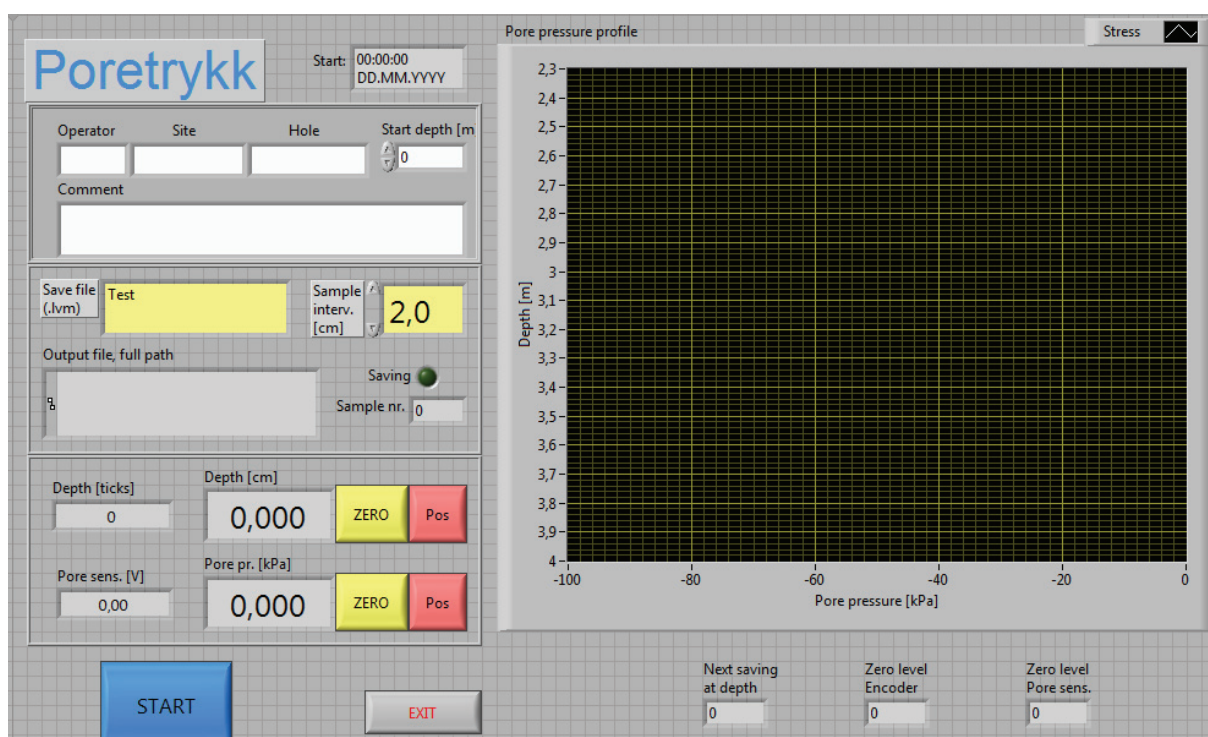
5.2.7. Logging og programvare

Signalene fra poretrykksensoren og dybdemåleren registreres med en National Instruments USB-6210 boks. Et modifisert versjon av et vingeborprogram laget i LabView av Per Østensen brukes deretter til å plote og lagre data i en tekstfil. Et skjermbilde av programmet er vist i figur 5.23.

I programmet kan ulike forsøksparametre som sted, dybde, borhull og lignende legges inn og filnavn bestemmes. Loggeintervall bestemmes pr. antall cm nedpressing, og en nullstillingsfunksjon som trekker fra/legger til et antall puls (for dybde) eller volt (for poretrykk) er tilgjengelig. Programmet logger kun for positive dybdeintervaller relativt til forrige logging. Det vil si at hvis siste logging var ved 5,53 m og fjæringen i stangsettet gjør at dybdemåleren går litt tilbake ved stangskifte, vil ikke neste loggeverdi uansett være før den registrerte dybden når 5,54 m (ved logging for hver cm).

Registrerte data plottes fortløpende i grafen til høyre i figur 5.23. Loggefilen inkluderer rådata (antall volt og pulser) i tillegg til kalibrerte data (antall kPa og cm) samt dato og klokkeslett for alle loggepunkt.

5. Utforming av modifisert trykksonde



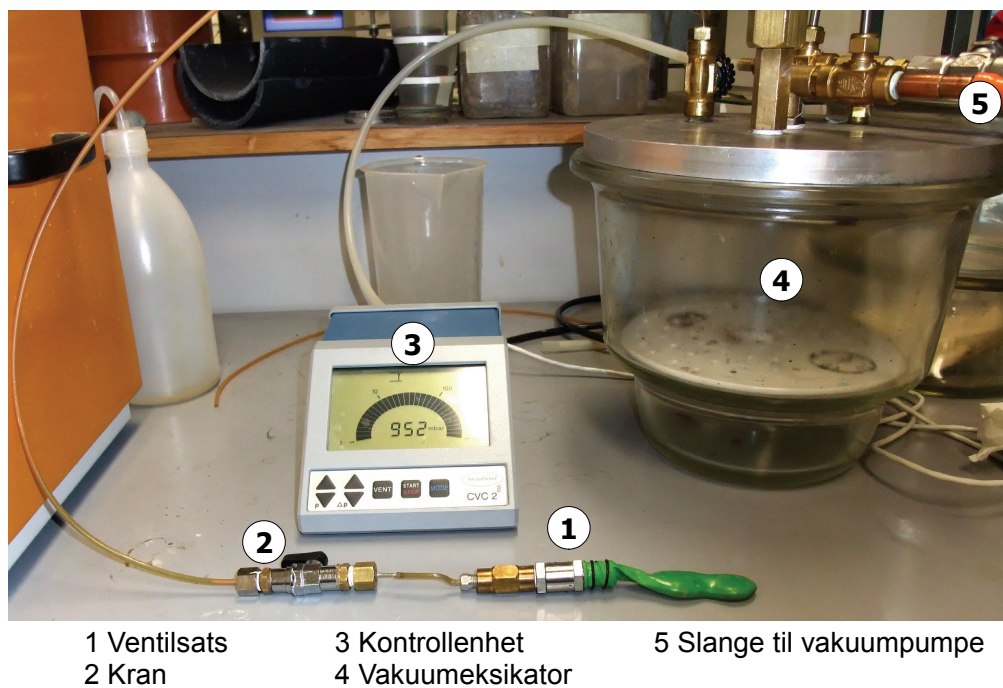
Figur 5.23.: Skjerm bilde fra loggeprogram

6. Testforsøk med modifisert trykksonde

6.1. Forsøk i laboratoriet

6.1.1. Kontroll av åpningstrykk for tilbakeslagsventiler

For å kontrollere hvilket trykk tilbakeslagsventilene faktisk åpnes ved ble den sammensatte ventilsatsen koblet til vakuumeksikator for å påføre et undertrykk tilsvarende det som kan oppstå i væskekammeret under sondering. Eksikatoren var tilkoblet kontrollenhet som styrte en ventil for å koble inn og ut vakuumpumpa slik at trykket kunne reguleres. Oppsettet er vist i figur 6.1.



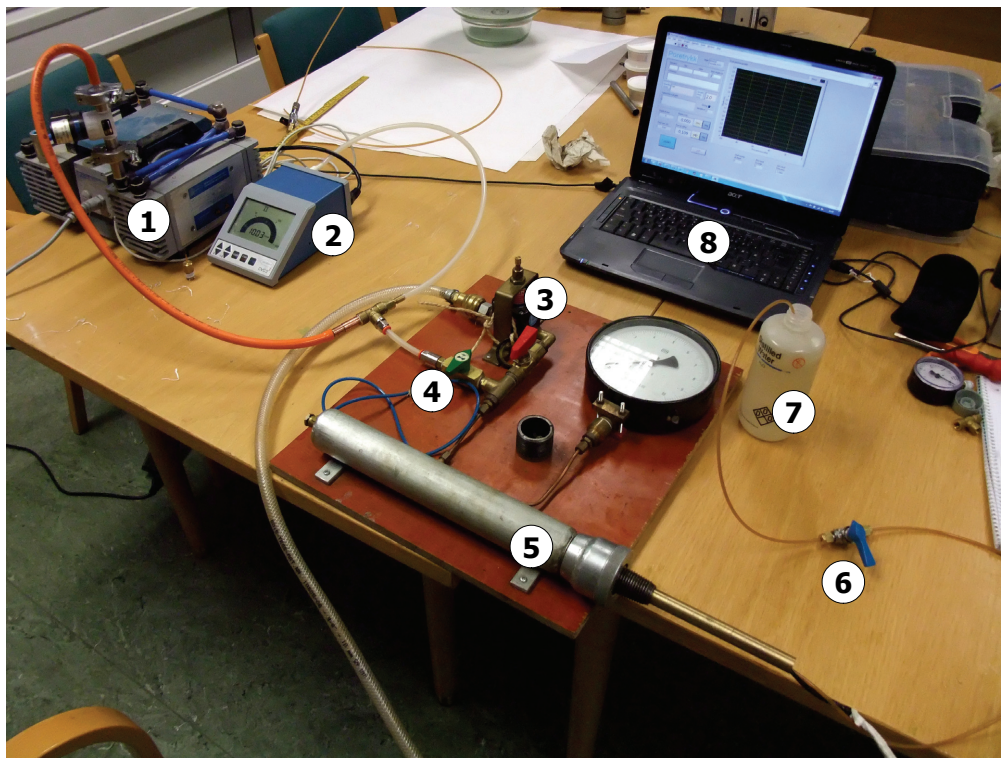
Figur 6.1.: Oppsett ved kontroll av åpningstrykk

Under testing av ventilfunksjonen ble det oppdaget at ventilen med 1 psi åpningstrykk hadde såpass svak fjær at den ikke var skikkelig tett når det ikke var påført noe trykk. Dette førte til lekkasje av væske fra væskekammer, eller lekkasje av luft inn i ventilen. For å løse dette ble det smurt ekstra fett på o-ringen som fjæra og stempelet inne i ventilen tetter mot. Ventilen ble dermed tilsynelatende tett under håndtering, men dette ekstra klisteret kan også ha hatt en effekt på åpningstrykket.

Ved kontroll av åpningstrykk ble væskebeholderen fylt med glykol, slik at det ble enkelt å observere om ventilen var åpen ved at væsken ville stige oppover slangen fra krana i figur 6.1. På grunn av svært lav væskestrøm akkurat idet ventilen åpnes og ustabilt undertrykk på grunn av lekkasjer, var det vanskelig å bestemme akkurat når ventilen var åpen. For 1 psi ventilen ble det observert et åpningstrykk i størrelsesorden -15 til -10 kPa, mens det for 10 psi ventilen lå i størrelsesorden -70 til -60 kPa. Dette er innenfor verdiene oppgitt i tabell 5.1.

6.1.2. Kontroll av undertrykkregistrering

Dersom det oppstår et undertrykk rundt trykksonden slik at tilbakeslagsventilen åpnes, vil ikke poretrykksensoren kunne registrere det faktiske trykket utenfor sonden. Den vil istedet registrere en verdi mellom undertrykket på utsiden og atmosfæretrykket ved væskebeholderen. For å forsøke å tallfeste denne verdien ble sonden montert i et kalibreringsapparat som tilhørte den gamle Fugro-spissen. Kalibreringsapparatet var i utgangspunktet ment for trykktesting, men ble i dette tilfellet tilkoblet vakuumpumpe med den samme kontrollenheten som ble brukt i seksjon 6.1.1. Oppsettet er vist i figur 6.2. Trykkluftslangen er i figuren tilkoblet, men ble ikke under disse forsøkene.



- | | | |
|----------------------------|-----------------------------|------------------|
| 1 Vakuumpumpe | 4 Tilkobling for vakuum | 7 Væskereservoar |
| 2 Kontrollenhet | 5 Kammer med sonde | 8 PC |
| 3 Tilkobling for trykkluft | 6 Kran for væske til ventil | |

Figur 6.2.: Oppsett ved kontroll av undertrykkregistrering

Sonden ble montert sammen komplett med filter og spiss på samme måte som under trykksonderingsforsøk, men det ble ikke lagt spesielt stort fokus på å oppnå god metting. Mettingen ble uansett forstyrret ved montering i kalibreringsapparatet. I utgangspunktet ble det forsøkt å utføre forsøket med ballongen som væskebeholder. Men siden denne ble tømt svært raskt og var forholdsvis strevsom å bytte ut, ble det istedet tilkoblet en slange på enden av tilbakeslagsventilen. Slangen ble ført ut av sonden og til et større væskereservoar med destillert vann. Ei kran på denne slangen gjorde det mulig å stenge væsketilførselen til ventilen, og dermed i praksis skru ventilmekanismen av og på. Slangen, krana og ventilen ble mettet med destillert vann før montering i sonden ved å bruke vakuumpumpa til å suge destillert vann gjennom. Ventilen med 1 psi åpningstrykk er brukt under hele dette forsøket, og trykksensoren nullstilt etter at sonden var montert i kalibreringsapparatet.

På grunn av lekkasjer, treghet i kontrollenhet og ventil, kraften til vakuumpumpa og lavt volum på vakuumsiden, ble det vanskelig å påføre og avlese et nøyaktig undertrykk på sonden. Effekten

av lukket kontra åpen væskestrøm gjennom ventilen er derfor oppgitt som intervaller i tabell 6.1. Her er "Påført trykk" det som ble innstilt på kontrollenheten, og "Registrert trykk" omtrent avlest intervall. Det laveste trykket som var mulig å holde relativt stabilt med både åpen og lukket ventil var -84 kPa.

Tabell 6.1.: Registrert undertrykk ved åpen og lukket ventil

| Påført trykk [kPa] | Registrert trykk, lukket ventil [kPa] | Registrert trykk, åpen ventil [kPa] |
|-----------------------|--|--|
| ca. -40 | -35 til -50 | -30 til -46 |
| ca. -60 | -58 til -64 | -45 til -52 |
| ca. -80 | -75 til -79 | -58 til -61 |
| ca. -84 | -79 til -82 | -62 til -65 |

Dette forsøket viser at det er en forskjell mellom det registrerte undertrykket når ventilen er åpen og når den er lukket. For å kunne bestemme denne forskjellen mer eksakt, vil det være nødvendig å påføre et mer stabilt og nøyaktig undertrykk.

6.2. In situ forsøk

6.2.1. Testområdet

Den modifiserte trykksonden ble testet ut in situ på Gløshaugen før utstyret ble tatt med videre til Lensvik. I forbindelse med oppføringen av et nytt bygg var store deler av parkeringsplassen mot jernbanen i søndre ende av Gløshaugen gravd opp (se kart i vedlegg A), og dette ble valgt som testområde da det sannsynligvis ville være en del leire i grunnen. Det ble utført ett referanseforsøk med Nova-sonden, i tillegg til tre forsøk med den modifiserte sonden. Alle forsøkene ble utført innenfor en radius av 1 - 2 m, omtrent i det skraverte området i figur 6.3.



Figur 6.3.: Testområde for modifisert trykksonde

6.2.2. Forberedelser

Nova-sonden ble forberedt etter vanlig prosedyre. En trakt tres over spissen, og kammeret fylles med frostvæske (glykol) samtidig som det kontrolleres at det ikke er noen synlige luftbobler til stede. Filteret, som på forhånd er mettet med glyserin i vakuum, og spissen monteres deretter neddykket i frostvæske. Når trakten til slutt trekkes av spissen trekkes samtidig en gummihud over filteret for å forhindre eventuelt tap av metning.

Forberedelsesprosedyren for den modifiserte spissen ble endret noe fra forsøk til forsøk etter hvert som en gjorde seg ulike erfaringer. For forsøkene utført på Gløshaugen (samt det første forsøket i Lensvik) var prosedyren og valget av kammervæske forskjellig fra det som ble gjort de siste forsøkene i Lensvik. Ved de første forsøkene ble ventilisatsen mettet med destillert vann ved at den ble demontert, plassert i en skål med vann og deretter påført undertrykk i vakuumeksikator. Væskebeholderen ble også fylt med destillert vann, i hovedsak fordi vann er lite problematisk å arbeide med. Filteret til trykksonden ble mettet i vakuum med parafin.

Under montering av sonden ble det brukt en flytende gjengetetting mellom mellomstykket og hylsa samt mellom væskekammeret og mellomstykket. Dette for å forhindre eller minimere eventuelle lekkasjer inn i hylsa og fra væskekammeret og ut til omgivelsene. Skruekanalene i væskekammeret ble også fylt med gjengetetting. En gummihud ble tredd over sonden, før væskekammeret ble fylt med vakuuvert parafin ved å bruke sprøyte. Når det kom væske ut av kanalene fra kammeret ble filteret med pakninger montert og gummihuden trukket opp over filteret. Kammeret ble så toppet opp igjen med parafin. Konen ble fylt innvendig med parafin, før sonden raskt ble snudd opp i konen som deretter ble skrudd fast.

Siden gummihuden reagerte med parafinen og begynte å gå i oppløsning, var det viktig å starte forsøket så raskt som mulig etter at sonden var sammensatt. Sonden ble derfor umiddelbart skrudd fast i stangsettet og ført ned i bakken for å starte forsøket. Signalkabelen ble tredd gjennom borstengene på forhånd slik at disse også lå klare til forsøk.

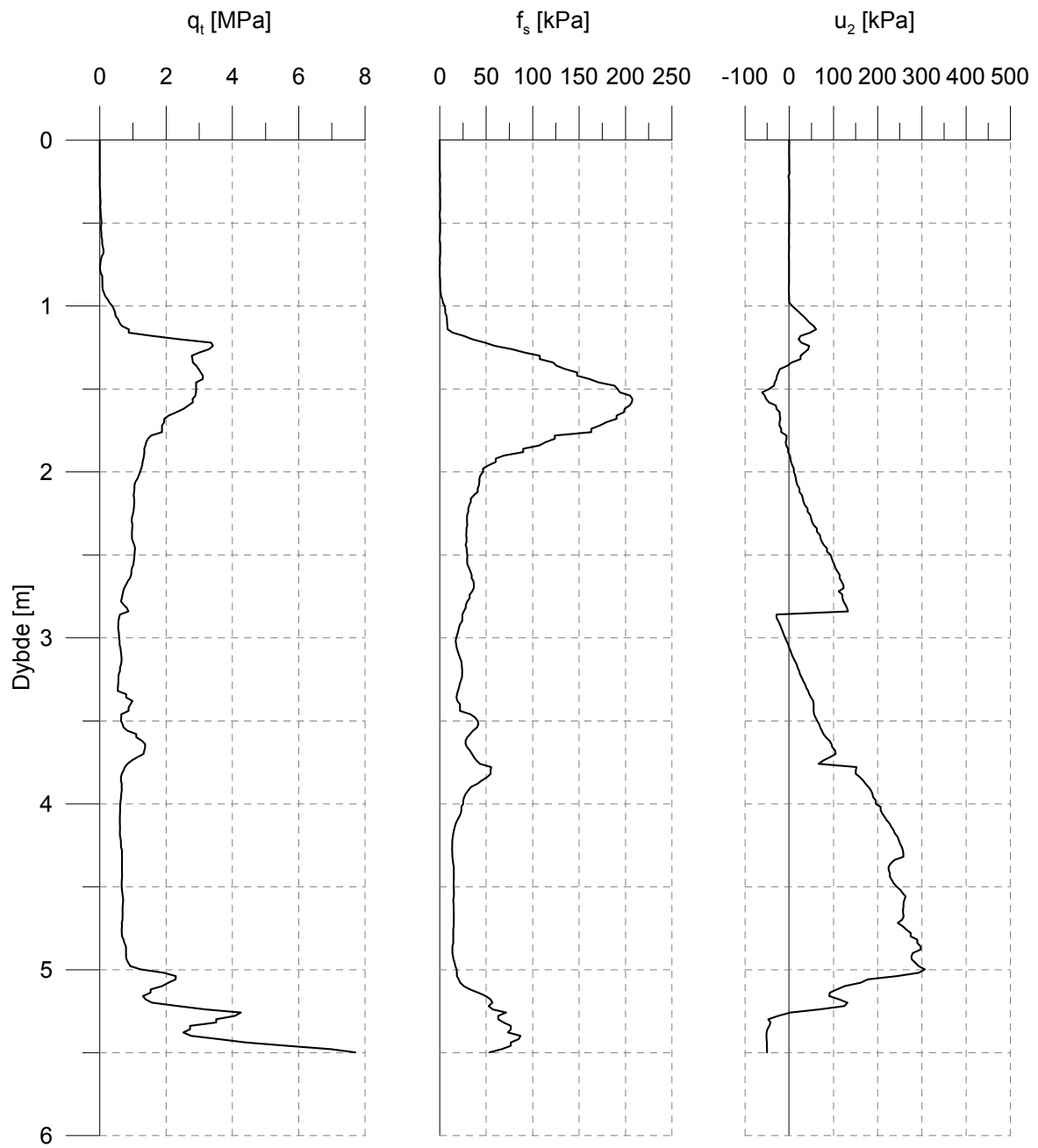
6.2.3. Sondering

Forsøkene på Gløshaugen ble utført med Geotech 607 borerigg, og med en konstant nedpressingshastighet på 2 cm/s. Forsøket med Nova-sonden ble kjørt til 5,50 m dybde, hvor stor spissmotstand førte til at sonderingen ble avsluttet. Det ble forboret omtrent 1 - 1,5 m før hvert forsøk.

6.2.4. Resultater

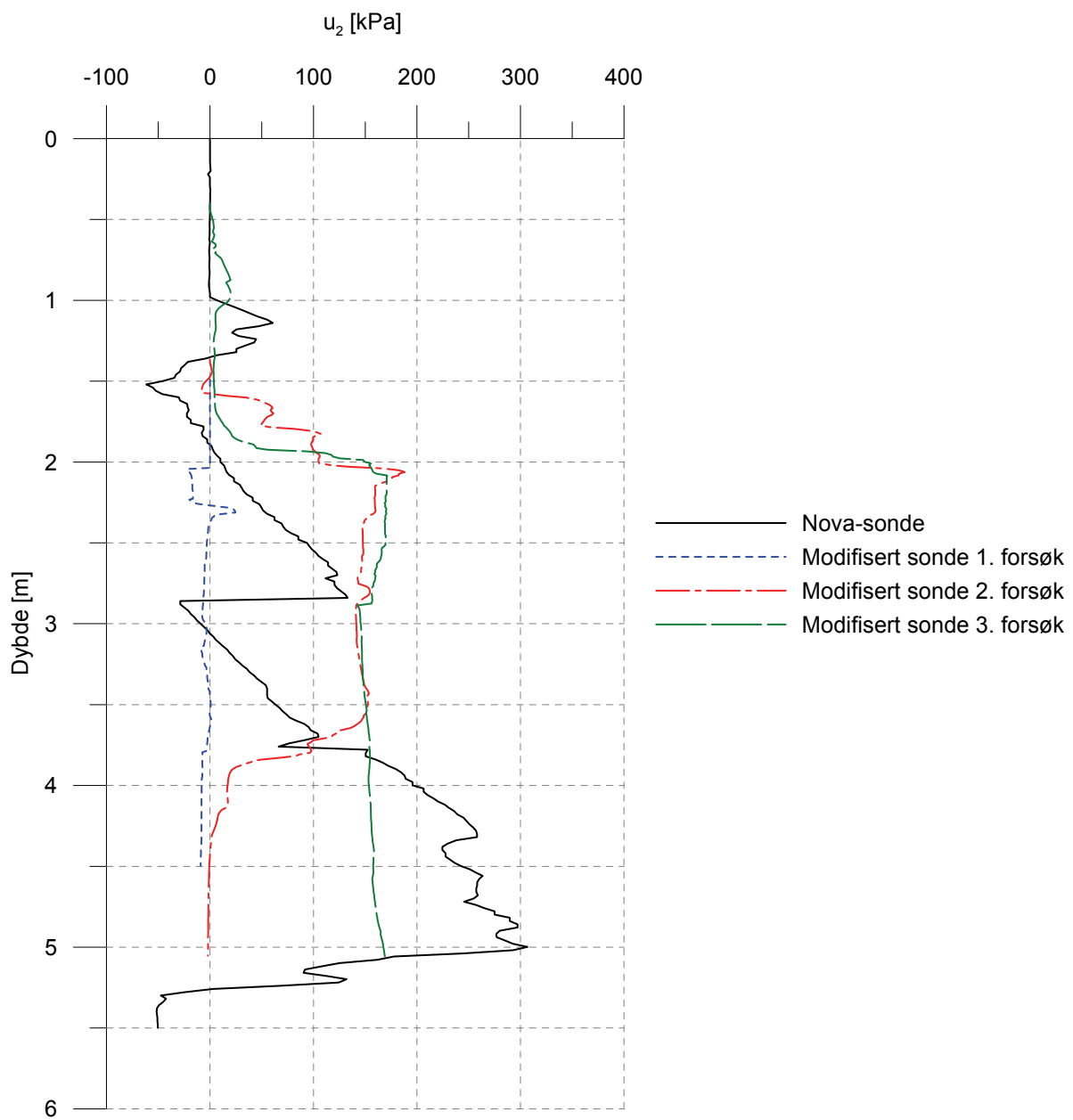
Korrigert spissmotstand q_t , sidefriksjon f_s og poretrykk u_2 fra forsøket med Nova-sonden er vist i figur 6.4.

Resultatene for de tre testforsøkene med den modifiserte sonden, sammen med poretrykket fra Nova-sonden, er vist i figur 6.5. Det første forsøket med den modifiserte spissen er med 1 psi tilbakeslagsventil montert, mens de siste to er med 10 psi tilbakeslagsventil montert.



Figur 6.4.: Resultat fra trykksondering ved Gløshaugen

6. Testforsøk med modifisert trykksonde



Figur 6.5.: Resultater fra trykksondring ved Gløshaugen med modifisert sonde

6.2.5. Vurdering av resultater

Forsøket med Nova-sonden antyder fastere og grove masser ned til nærmere 2 m, før det blir bløtere og mindre permeable masser som gir et poreovertrykk. Et undertrykk på rundt -60 kPa ved omtrent 1,5 m skapte problemer for metningen av filteret og det er derfor mulig at det reelle poreovertrykket er større videre nedover. Et nytt undertrykk ved 2,9 m forsterker problemene. Spissmotstand og sidefriksjon antyder fastere lag med omtrent 10 cm tykkelse ved 3,3 m og 3,6 m før det blir bløtere igjen. Ved 5 m antydes en overgang til fastere og grovere masser.

Siden det ikke er tatt opp noen prøver er det relativt usikkert hva slags materiale som egentlig finnes i grunnen, men det registrerte poreovertrykket burde i teorien ikke avvike stort ved bruk av den modifiserte sonden. Ved det første forsøket med den modifiserte sonden er det likevel tydelig at det var mye som ikke stemte, da det omtrent ikke ble registrert noe poretrykk i det hele tatt. Den mest sannsynlige årsaken til dette kan være at det rett og slett ikke var noen forbindelse til sonden.

Ved det andre forsøket var responsen adskillig bedre ned til det fastere laget ved 3,6 m, hvor poretrykket gradvis forsvant uten å komme tilbake. Det er mulig at forbindelsen til sonden ble brutt nok en gang.

Det tredje forsøket viste en respons under hele sonderingen, hvor poreovertrykket er i størrelsesorden 150 - 160 kPa fra 2 m til 5 m dybde. Sammenlignet med Nova-sonden viser den modifiserte sonden et lavere trykk fra 3,8 m og nedover, til tross for at Nova-sonden ser ut til å ha problemer med mettingen. Resultatene er merkelige, men på grunn av usikkerheten rundt hva som finnes i grunnen ved dette borpunktet er det ikke brukt noe energi på å analysere dette videre. Det viktigste ved disse forsøkene var å se om den modifiserte sonden kunne registrere noe som var i nærheten av en riktig verdi, og siden den gjorde det ble den meldt klar for videre forsøk i Lensvik.

7. Nye forsøk i Lensvik

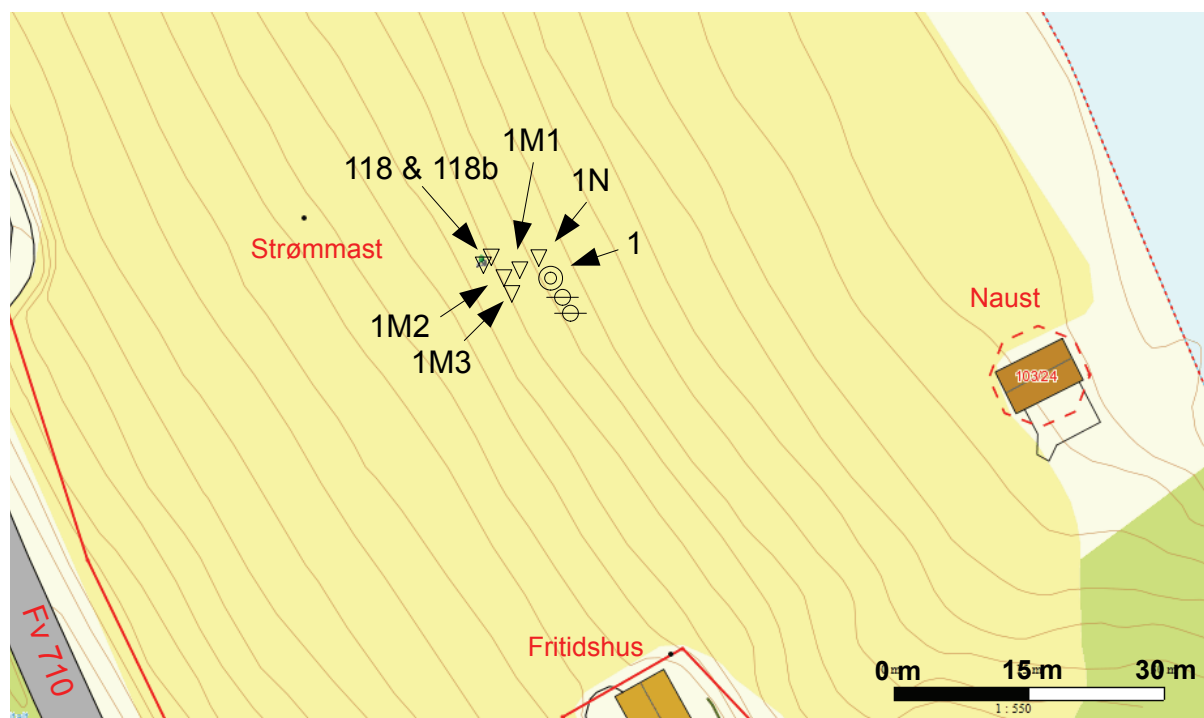
7.1. Borplan

For å sammenligne poretrykksrespons fra den modifiserte sonden med resultatene fra sondering 118 og 118b ble det utført 3 nye sonderinger i Lensvik. De nye forsøkene er oppsummert i tabell 7.1.

Tabell 7.1.: Sonderinger med modifisert sonde i Lensvik

| Forsøk | Tilbakeslagsventil | Sondert dybde |
|--------|--------------------|---------------|
| 1M1 | 10 psi | 6,72 m |
| 1M2 | 10 psi | 6,81 m |
| 1M3 | 1 psi | 6,57 m |

En borplan som viser omtrentlig plassering av de nye sonderingene er vist i figur 7.1. Siden hverken den ekstreme dilatans effekten eller noen tydelige sand- eller siltlag ble oppdaget ved sondering 1N eller prøvetaking, ble de nye hullene flyttet oppover mot fylkesveien og de gamle hullene.



⊙ Prøveserie ▽ Trykksondering ⊗ Piezometer

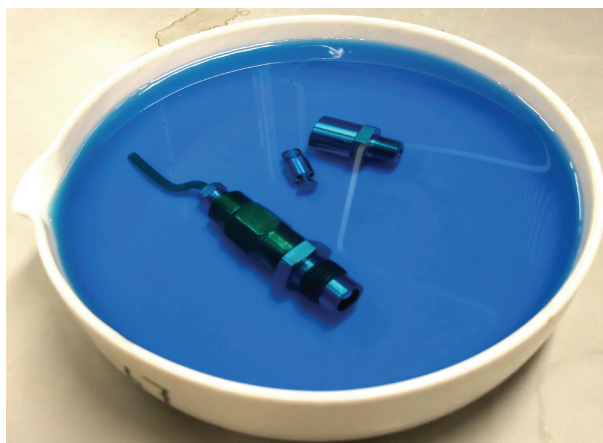
Figur 7.1.: Borplan for nye forsøk med modifisert sonde [2]

7.2. Forberedelser

Ved forsøk 1M1 ble det fulgt samme forberedelsesprosedyre som ved testforsøkene utført ved Gløshaugen. For de påfølgende forsøkene ble det derimot gjort noen endringer. Væsken i ventilen og væskebeholderen ble byttet ut fra destillert vann til glykol, og i væskekammeret ble det nå også benyttet glykol til istedet for parafin. Dette ble blant annet gjort fordi glykol gjør utstyret enklere å håndtere i forhold til parafin, og fordi glykol er det som blir brukt til vanlig i Nova-sonden. Filter var fortsatt mettet med parafin siden ferdigmettede filter var tilgjengelig.

7.2.1. Metting av ventilats

Ventilsatsen ble demontert ved at tilbakeslagsventilen ble skrudd fra hverandre og deretter lagt i en skål med glykol (se figur 7.2). Skålen ble plassert i vakuumeksikator og påført vakuum til det ikke lenger kunne ses noen luftbobler. Det ble forøvrig observert generelt færre bobler i glykolen sammenlignet med både vann og parafin.



Figur 7.2.: Ventilats adskilt for metting

Ventilen ble deretter montert sammen neddykket i glykolen før den sammensatte ventilatsen (minus ballongen) ble plassert i en transportbeholder (se figur 7.3). Denne beholderen ble også fylt med avluftet glykol for å sikre at ventilatsen var fullstendig mettet ved montering i sonden.



Figur 7.3.: Beholder for oppbevaring og transport av ventilats

7.2.2. Metting av filter

Rengjorte filter med pakninger ble plassert i en beholder med parafin og påført undertrykk i vakuumeksikator til det ikke lenger ble observert noen bobler fra filteret. Den samme beholderen

7. Nye forsøk i Lensvik

ble brukt til oppbevaring og transport av filteret (se figur 7.4).



Figur 7.4.: Beholder for oppbevaring og transport av filter

7.2.3. Montering av ventilasjons, mellomstykke og væskekammer

Ballongen ble fylt med vakuumert glykol ved hjelp av sprøyte og skrudd fast til ventilasjons som igjen ble festet til mellomstykket. For å forhindre vannlekkasje inn i sonden og potensiell kortslutning av poretrykksensoren, ble det brukt gjengetetting rundt kanten på mellomstykket før det ble skrudd fast i hylsa. For å forhindre lekkasje ut fra væskekammeret ble det også brukt gjengetetting rundt kanten av dette slik det er vist i figur 7.5.

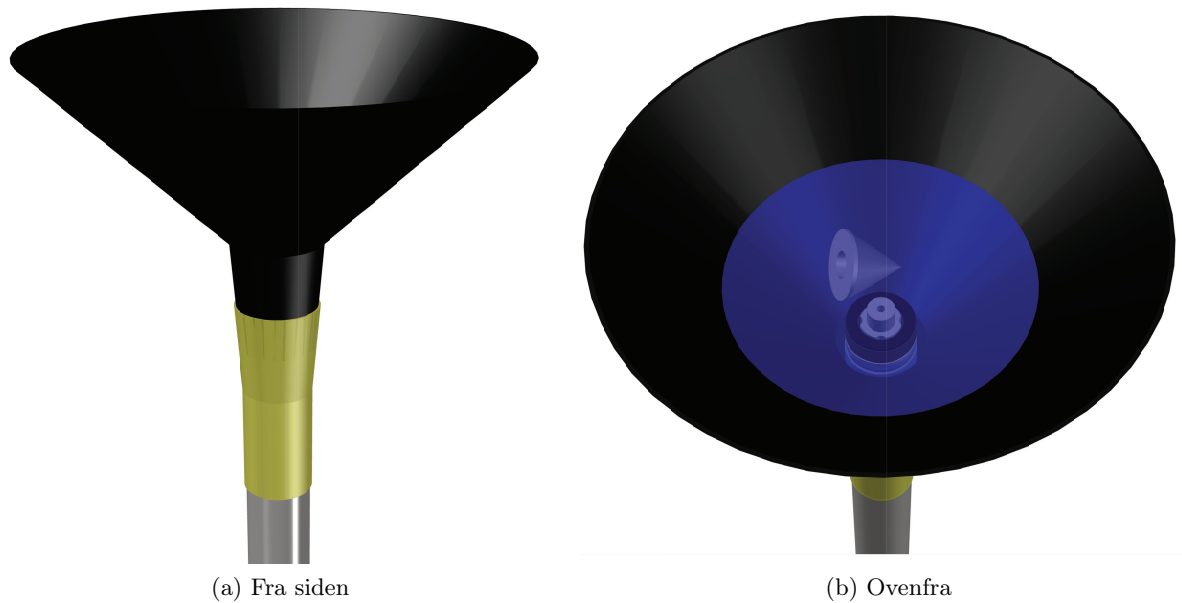


Figur 7.5.: Bruk av gjengetetting på mellomstykke og væskekammer

7.2.4. Montering av filter og kon

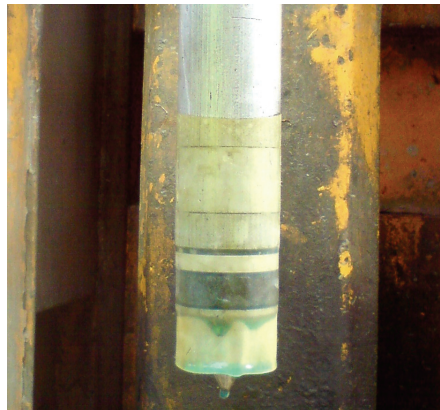
Før denne avsluttende sammensettingen av selve sonden var kabel tredd gjennom stangsettet, hull forboret og en borstang montert i borerigg, slik at forsøket kunne starte omtrent umiddelbart etter ferdigmontering.

En trakt ble tredd over sonden, og en gummihud av samme type som brukes i treaksiale trykkforsøk for 10 cm² prøver ble tredd over slik at den tettet i overgangen mellom sonden og trakta slik det er illustrert i figur 7.6a. Væskekammeret i sonden ble så fylt med vakuumert glykol ved hjelp av en sprøyte gjennom hullet i toppen, helt til det sto glykol opp til den gjengede delen hvor konen skrues på. Trakta ble deretter etterfylt med glykol fra flaske til et passende nivå, og filter med pakninger montert neddykket i glykol. Konen ble også montert neddykket, og det ble påsett at det ikke var noen luftbobler inne i konen før den ble skrudd på. Figur 7.6b viser filter og pakninger montert mens konen ligger klar ved siden av.



Figur 7.6.: Montering neddykket i glykol

Etter at konen ble skrudd skikkelig fast ble trakta trukket av og gummi huden samtidig trukket over filteret og konen. Sonden ble deretter skrudd fast i stangsettet i boreriggen slik det er vist i figur 7.7, og deretter tredd gjennom dybdemåleren og ned i hullet for å starte forsøk.



Figur 7.7.: Sonde montert på stangsett klar til sondering

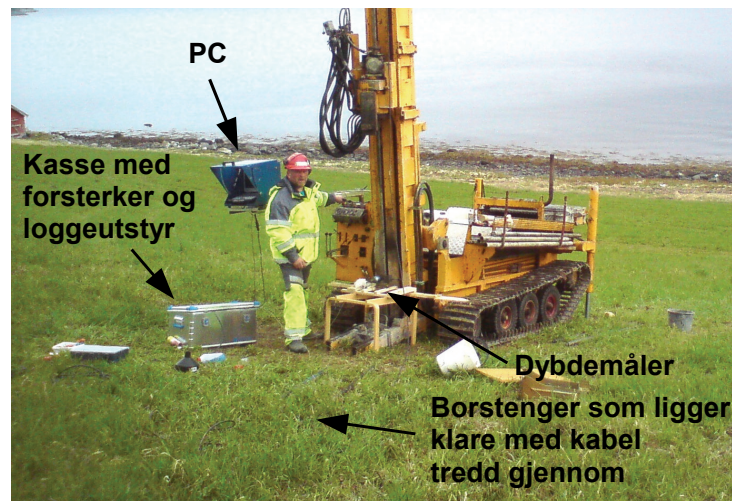
7.3. Utførelse av sonderinger

Det ble ved alle forsøkene forboret omtrent 0,8 m. Hastighet under nedpressing var 2 cm/s, og denne ble kalibrert mot programvaren til Nova-sonden. Programvaren til den modifiserte sonden ble innstilt til å logge for hver 1 cm nedpressing. Figur 7.8 viser rigging av utstyret under sondering.

Ved sondering 1M1 ble dybdemåleren montert nede ved labbene på boreriggen og holdt fast med skruetvinger. Da stangsettet beveget seg noe under sondering førte dette til at løpehjulet på dybdemåleren etter en liten stund mistet kontakt med stangsettet. Dermed ble også noen loggepunkter mistet, og grafen fra sonderingen måtte justeres for dybde i ettertid ved å sammenligne med det to øvrige sonderingene. For å utbedre dette problemet ble det ved de to påfølgende

7. Nye forsøk i Lensvik

sonderingene brukt bein fra et bord med en treramme oppå som dybdemåleren sto fritt imot, slik det er vist i figur 7.9. Opplegget kan fremstå som noe skranglete og improvisert, men fungerte utmerket i praksis selv om det begrenset slaglengden til boreriggen med nesten en halv meter.



Figur 7.8.: Rigging av utstyr under sondering



Figur 7.9.: Sondering og plassering av dybdemåler

7.4. Resultater

7.4.1. Måleresultater

Resultater av registrert poretrykk u_2 fra de tre sonderingene er vist i figur 7.10.

Ved sondering 1M1 oppsto det som tidligere nevnt noen problemer med dybdemåleren ved omtrent 1,8 m dybde, og kurven er derfor justert med lineær interpolasjon mellom 1,83 m og 2,20

m. Kurvens stigning etter 2,20 m tyder imidlertid på at man ikke gikk glipp av noe interessant, ettersom et undertrykk på -46,7 kPa ved 1,37 m førte til dårlig metting og feilmålinger helt til et stangskifte ved 3,88 m.

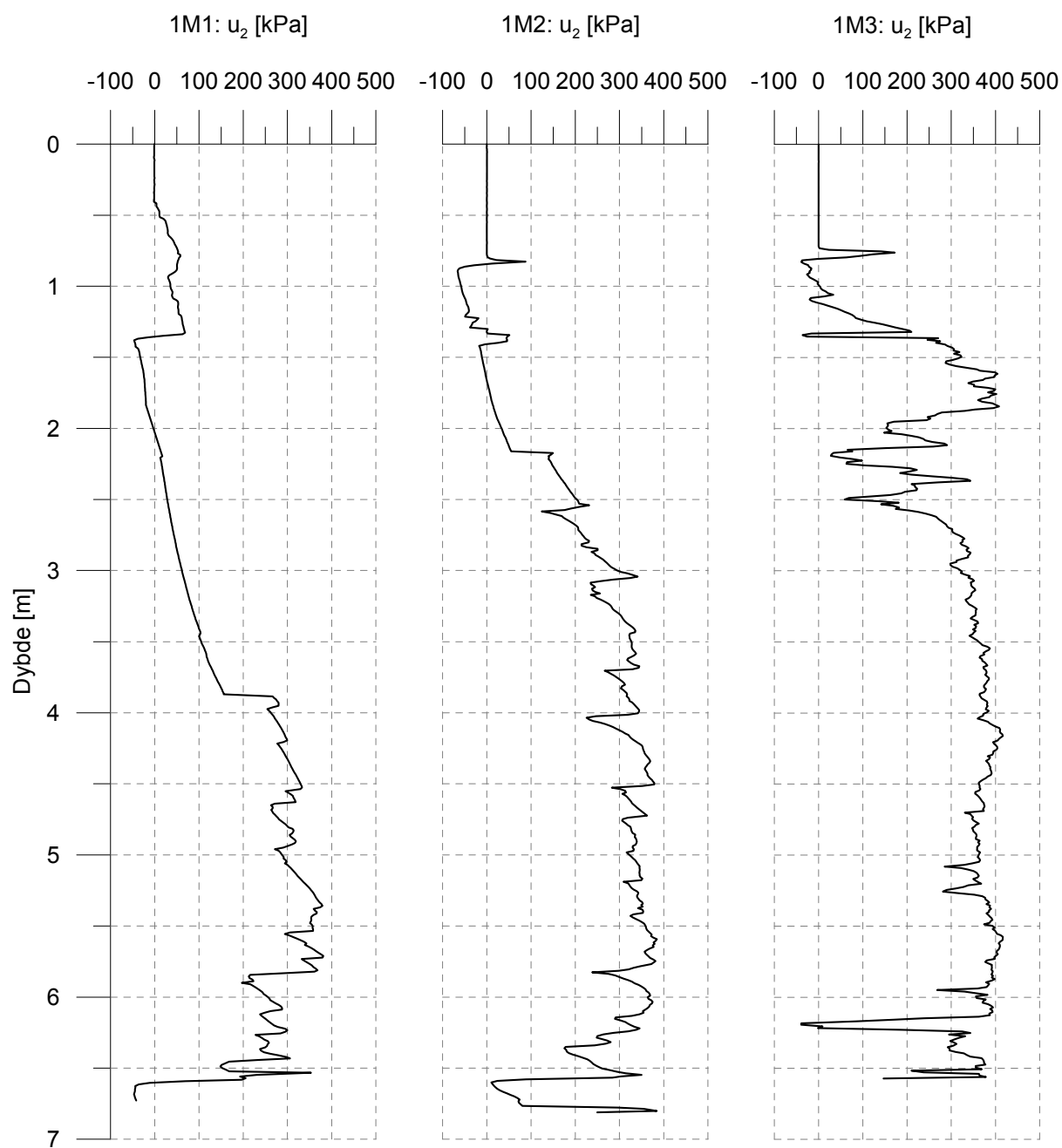
Mettingsprosedyren ble som nevnt revurdert og forbedret ved sondering 1M2. Et undertrykk på -66,0 kPa allerede ved 0,89 m førte likevel til en betydelig forstyrrelse, og selv om sonden var innom noe som kan oppfattes som mer permeabelt materiale mellom 1,30 og 1,40 m er ikke responsen tilbake på et troverdig nivå før ved omtrent 3,05 m. Dette til tross for at et skifte av grep på borerigg ved 2,16 m førte til en brå stigning i registrert poretrykk. Ved alle mindre fall i poretrykk fra 3,05 og nedover er det tydelig at det tar til tid å hente inn responsen igjen.

Det generelle inntrykket fra sondering 1M1 og 1M2 er at den modifiserte sonden kan være både vanskeligere å mette og tåler undertrykk dårligere enn Nova-sonden. En årsak til dette kan være at det totale volumet av væske i den modifiserte sonden er betydelig større enn i Nova-sonden, i tillegg til at komplisert geometri med mange kriker og kroker samt omfattende monteringsprosedyrer gjør det vanskelig å oppnå god metting.

Før sondering 1M3 ble det skiftet til 1 psi tilbakeslagsventil, som skal skal åpne ved et undertrykk på mellom 0 og -28 kPa. Som det går frem av figur 7.10 ble det registrert noen trykkfall til større undertrykk enn dette, men trykket ble aldri like lavt som ved de to foregående sonderingene. Responsen under resten av forsøket ser forøvrig ut til å være forbedret betraktelig i forhold til de to foregående forsøkene, med poretrykk som stiger raskt igjen etter trykkfall.

7.4.2. Sammenligning av måleresultater

Siden kun sondering 1M3 viste tilsynelatende gode resultater, er det kun denne som er tatt med i denne sammenligningen mot resultatene fra sondering 118, 118b og 1N. De ulike sonderingene blir her plottet mot hverandre for å vurdere eventuelt sammenfallende poretrykksregistreringer. Dette vil kunne indikere om sonderingene har vært utført under tilnærmet like forhold, og dermed om poretrykksregistreringen fra sondering 1M3 kan anses som et forbedret resultat i forhold til sondering 118 og 118b.

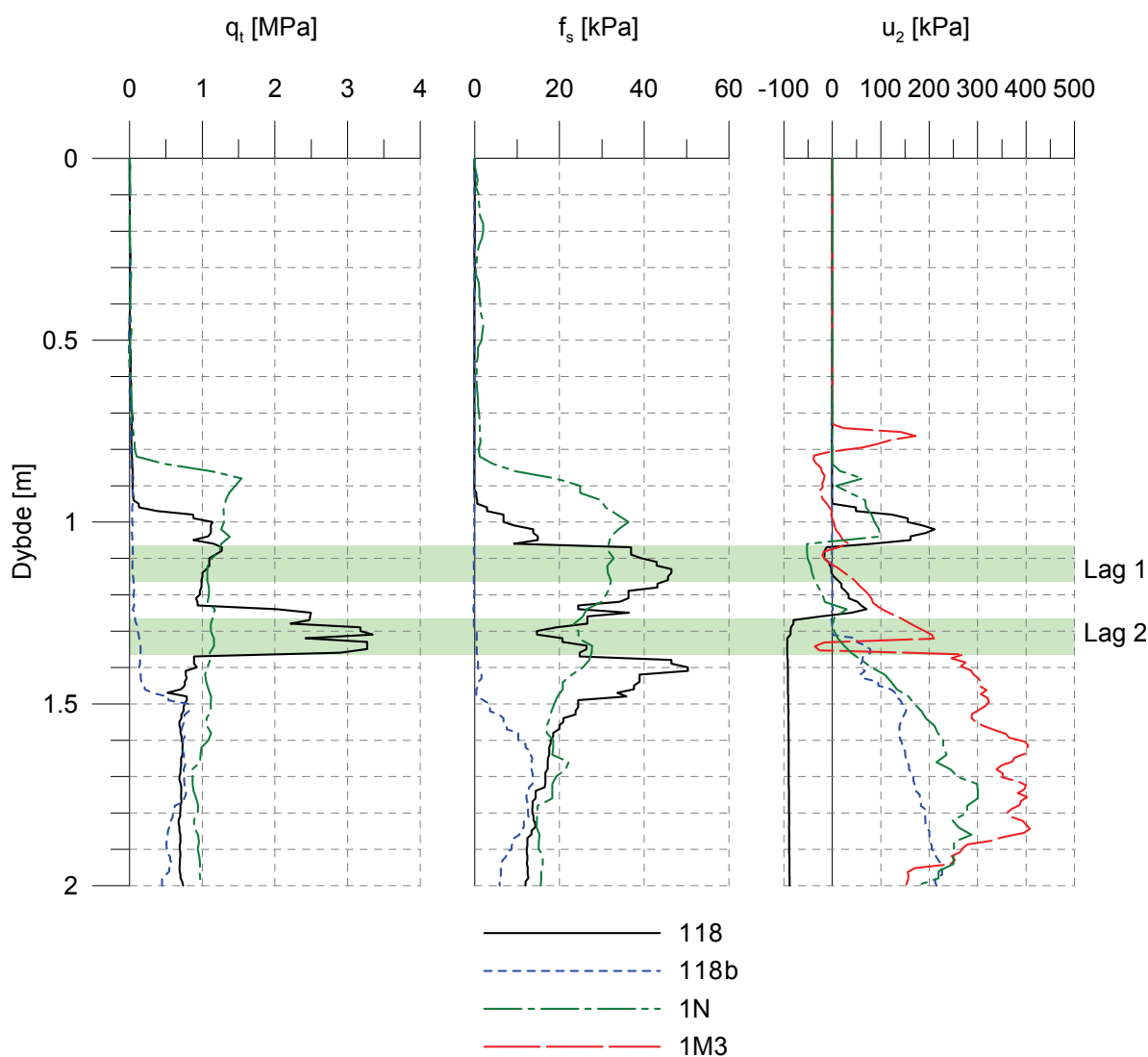


Figur 7.10.: Resultater fra sondering med modifisert sonde i Lensvik

Tabell 7.2 og figur 7.11 viser en sammenligning av resultater i dybde 0,0 - 2,0 m. De grønne sonene i figurene er ikke ment for å illustrere utstrekning av et eventuelt lag, men er en sone hvor data fra flere av sonderingene ser ut til å sammenfalle. Oppgitt dybde og poretrykk u_2 i tabellen gjelder for minste registrerte verdi av u_2 innenfor den grønne sonen.

Tabell 7.2.: Sammenfallende registreringer i dybde 0,0 - 2,0 m

| Lag nr. | Sondering | Dybde | Minimal u_2 | Kommentar |
|---------|-----------|--------|---------------|-----------|
| 1 | 118 | 1,08 m | -16,3 kPa | |
| | 1N | 1,06 m | -52,2 kPa | |
| | 1M3 | 1,09 m | -20,3 kPa | |
| 2 | 118 | 1,35 m | -93,0 kPa | |
| | 1N | 1,28 m | 0,9 kPa | |
| | 1M3 | 1,34 m | -36,3 kPa | |



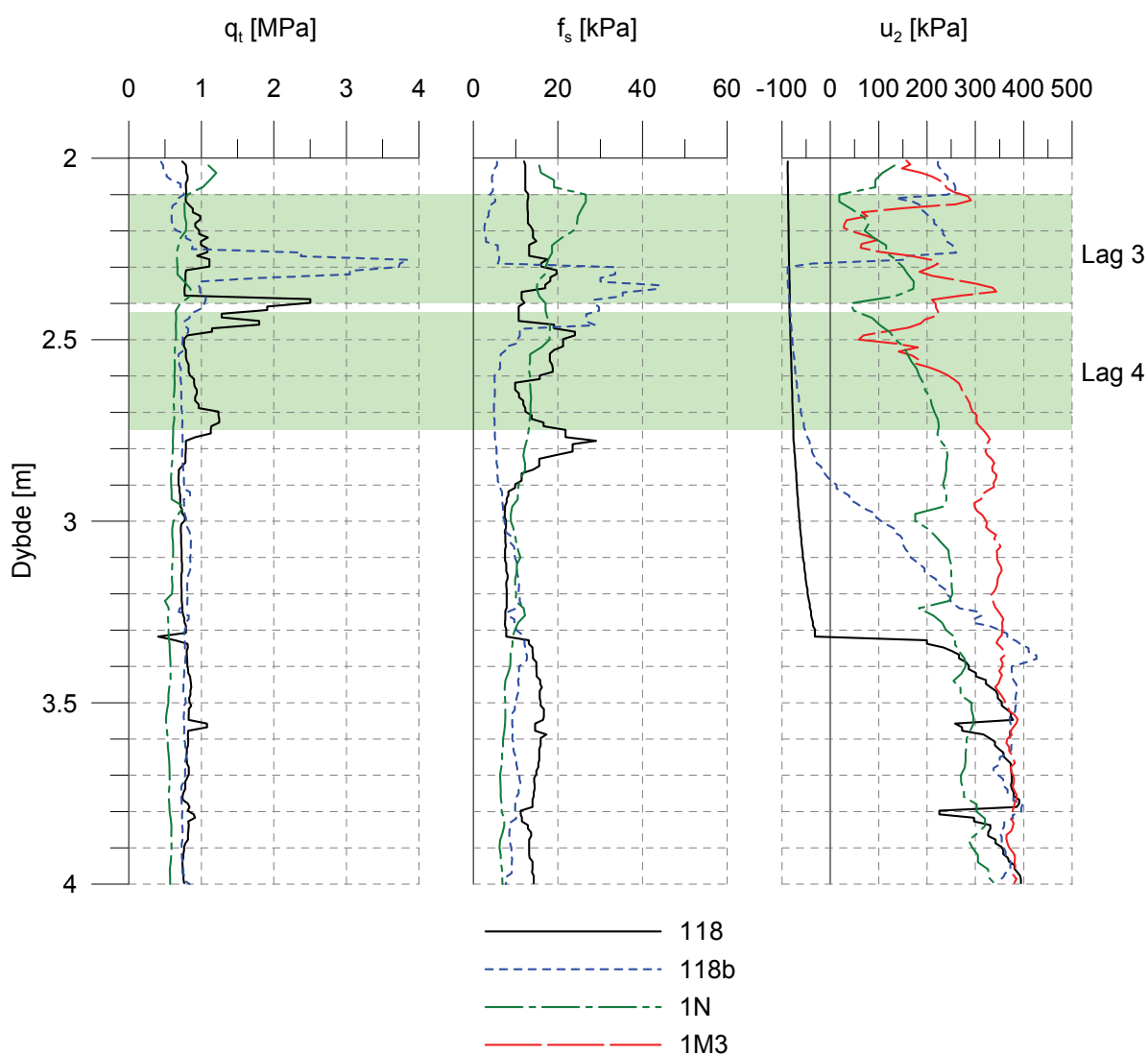
Figur 7.11.: Sammenligning av resultater i dybde 0,0 - 2,0 m

7. Nye forsøk i Lensvik

Tabell 7.3 og figur 7.12 viser en sammenligning av resultater i dybde 2,0 - 4,0 m. Her er det en viss spredning i responsen fra de ulike sonderingene, og bredden på de grønne feltene er derfor ganske stor.

Tabell 7.3.: Sammenfallende registreringer i dybde 2,0 - 4,0 m

| Lag nr. | Sondering | Dybde | Minimal u_2 | Kommentar |
|---------|-----------|--------|---------------|----------------------|
| 3 | 118 | 2,39 m | -83,6 kPa | |
| | 118b | 2,32 m | -88,6 kPa | |
| | 1-N | 2,10 m | 18,5 kPa | |
| | 1-M-3 | 2,19 m | 27,3 kPa | |
| 4 | 118 | 2,72 m | -77,1 kPa | |
| | 118b | 2,50 m | -78,3 kPa | Mangler dette laget? |
| | 1-N | 2,40 m | 41,7 kPa | |
| | 1-M-3 | 2,50 m | 58,9 kPa | |

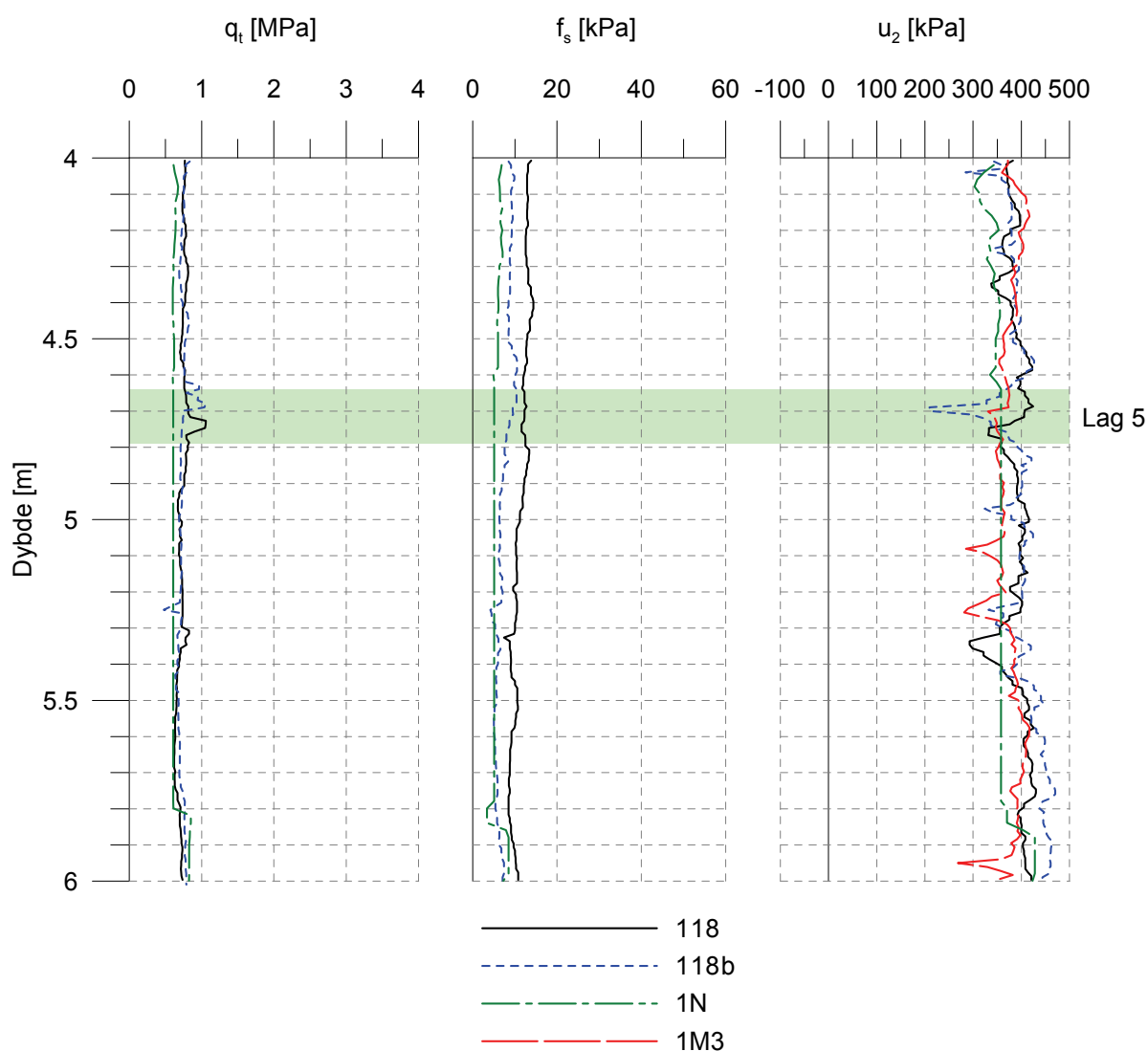


Figur 7.12.: Sammenligning av resultater i dybde 2,0 - 4,0 m

Tabell 7.4 og figur 7.13 viser en sammenligning av resultater i dybde 4,0 - 6,0 m. Fallet i u_2 for sondering 1M3 er relativt lite, men dybden stemmer påfallende godt med de to øvrige sonderingene.

Tabell 7.4.: Sammenfallende registreringer i dybde 4,0 - 6,0 m

| Lag nr. | Sondering | Dybde | Minimal u_2 | Kommentar |
|---------|-----------|--------|---------------|------------------------------------|
| 5 | 118 | 4,77 m | 331,6 kPa | |
| | 118b | 4,69 m | 209,7 kPa | |
| | 1N | | | Mistet forbindelse i dette området |
| | 1M3 | 4,70 m | 330,8 kPa | |



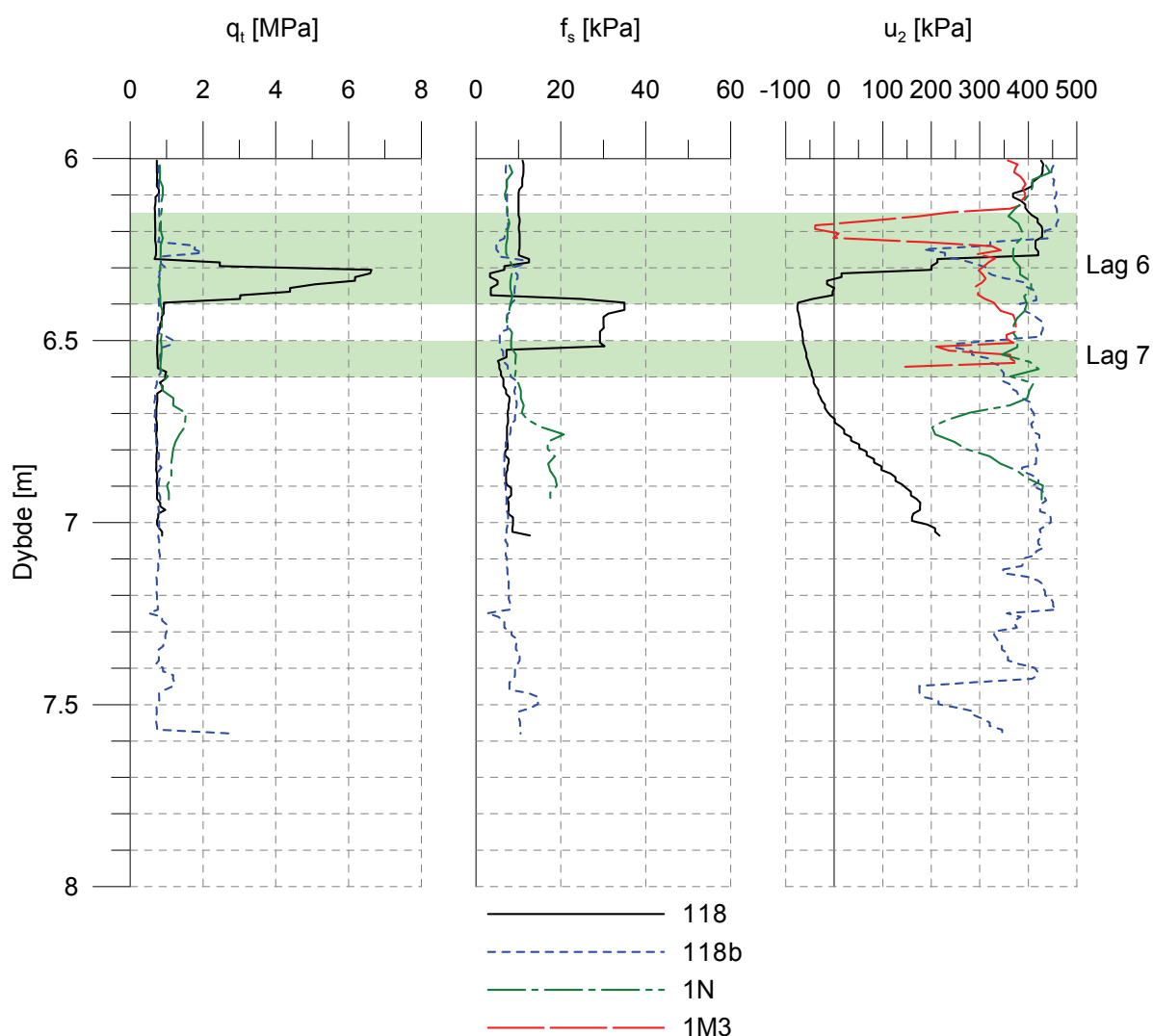
Figur 7.13.: Sammenligning av resultater i dybde 4,0 - 6,0 m

7. Nye forsøk i Lensvik

Tabell 7.5 og figur 7.14 viser en sammenligning av resultater i dybde 6,0 - 8,0 m. Sondering 1N viser et tydeligere fastere lag ved omtrent 6,7 m, men siden registrerte poretrykksfall for sondering 1N generelt har ligget noen cm over 1M3 er det antatt at dette ikke har noe med det som er beskrevet som lag 7.

Tabell 7.5.: Sammenfallende registreringer i dybde 6,0 - 8,0 m

| Lag nr. | Sondering | Dybde | Minimal u_2 | Kommentar |
|---------|-----------|--------|---------------|--|
| 6 | 118 | 6,41 m | -75,5 kPa | |
| | 118b | 6,25 m | 184,9 kPa | |
| | 1N | 6,16 m | 359,1 kPa | Lite tydelig |
| | 1M3 | 6,19 m | -39,2 kPa | |
| 7 | 118 | 6,59 m | -46,2 kPa | Liten antydning til økt q_t og f_s |
| | 118b | 6,51 m | 248,6 kPa | |
| | 1-N | 6,54 m | 345,7 kPa | Lite tydelig |
| | 1M3 | 6,52 | 210,0 kPa | Sondering avsluttet med u_2 på vei ned |

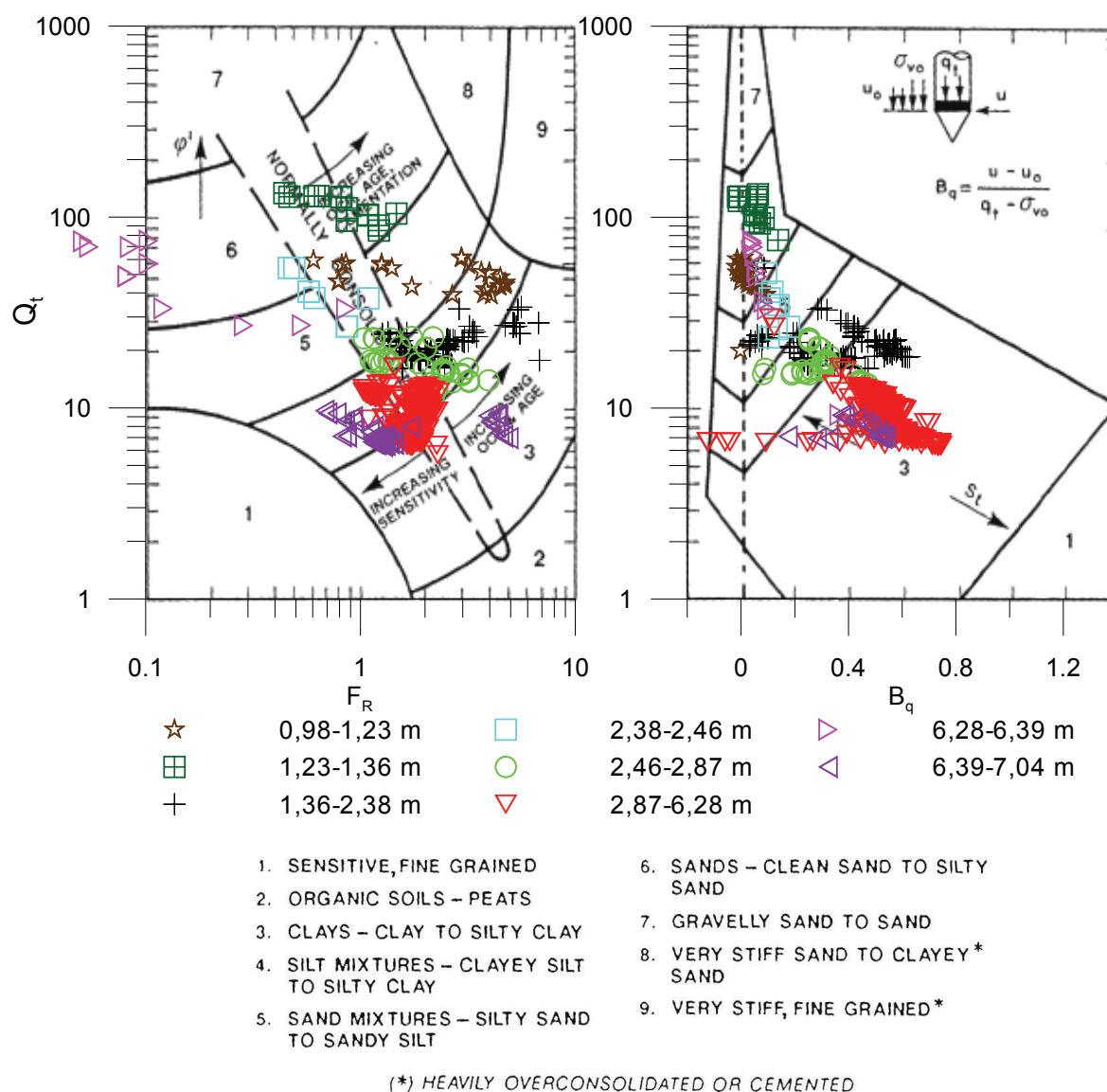


Figur 7.14.: Sammenligning av resultater i dybde 6,0 - 8,0 m

7.4.3. Sammenligning av jordartsklassifisering

Figur 7.15 viser en sammenligning av jordartsklassifiseringsdiagram for sondering 118 mot 1M3. Q_t - F_R -plottet er det samme som i figur 3.4, mens det i Q_t - B_q -plottet er brukt poretrykk u_2 fra sondering 1-M-3 og spissmotstand q_t fra sondering 118. En liten korleksjon var nødvendig siden modifiserte sonden ikke logget ved nøyaktig samme dybdeintervall som Nova-sonden. Dette ble gjort ved at det for hver dybde logging for den modifiserte sonden ble interpolert en verdi av q_t fra de to nærmeste loggepunktene fra Nova-sonden.

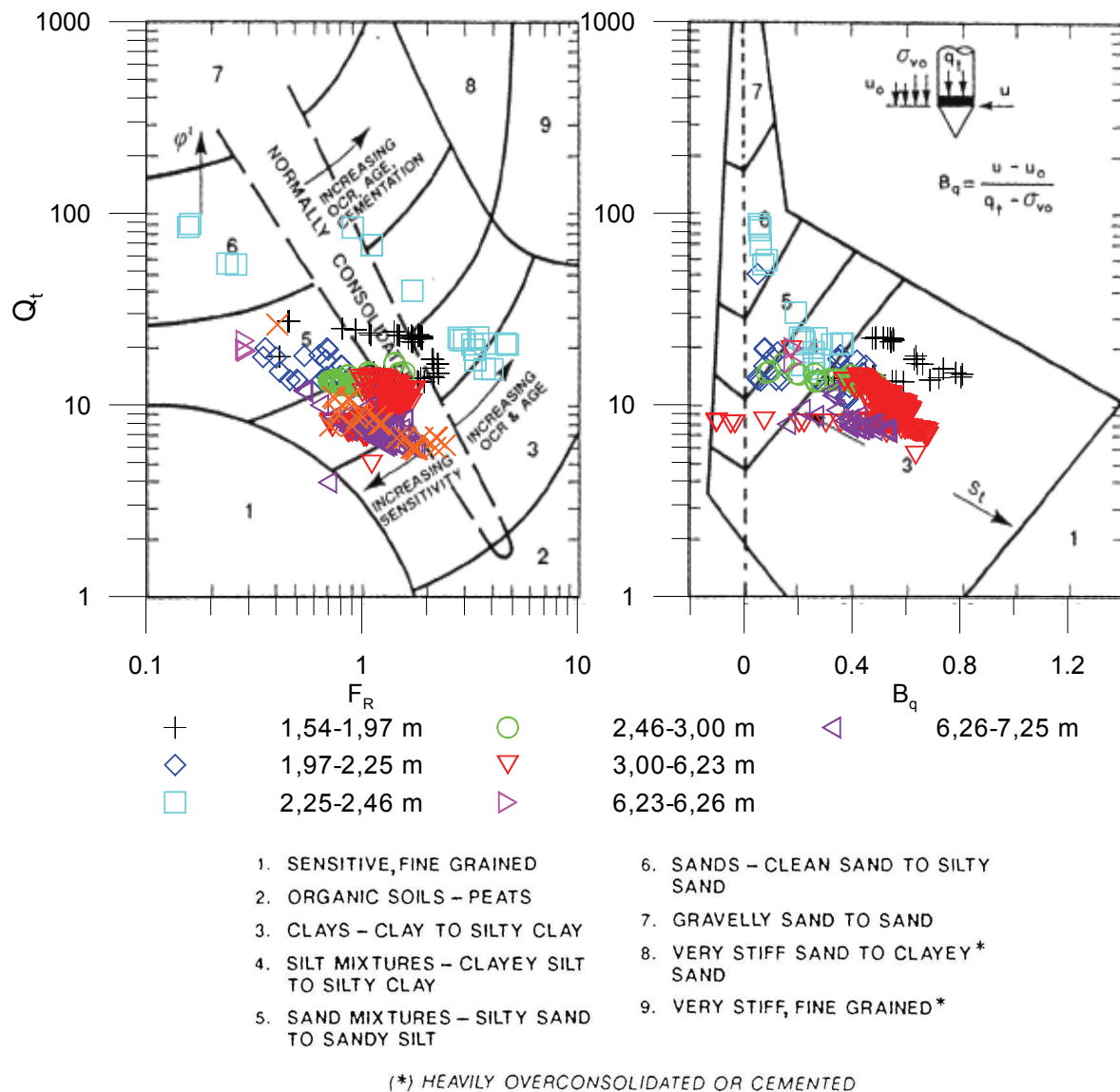
Forskjellene mellom klassifisering basert på F_R og klassifisering basert på B_q i figur 7.16 er ikke veldig stor. Laget fra 0,98 - 1,23 m havner i en grovere kategori, og lagene fra 2,87 - 6,28 m samt 6,39 - 7,04 m delvis i en finere kategori.



Figur 7.15.: Jordartsklassifisering for sondering 118 og 1M3 etter [20]

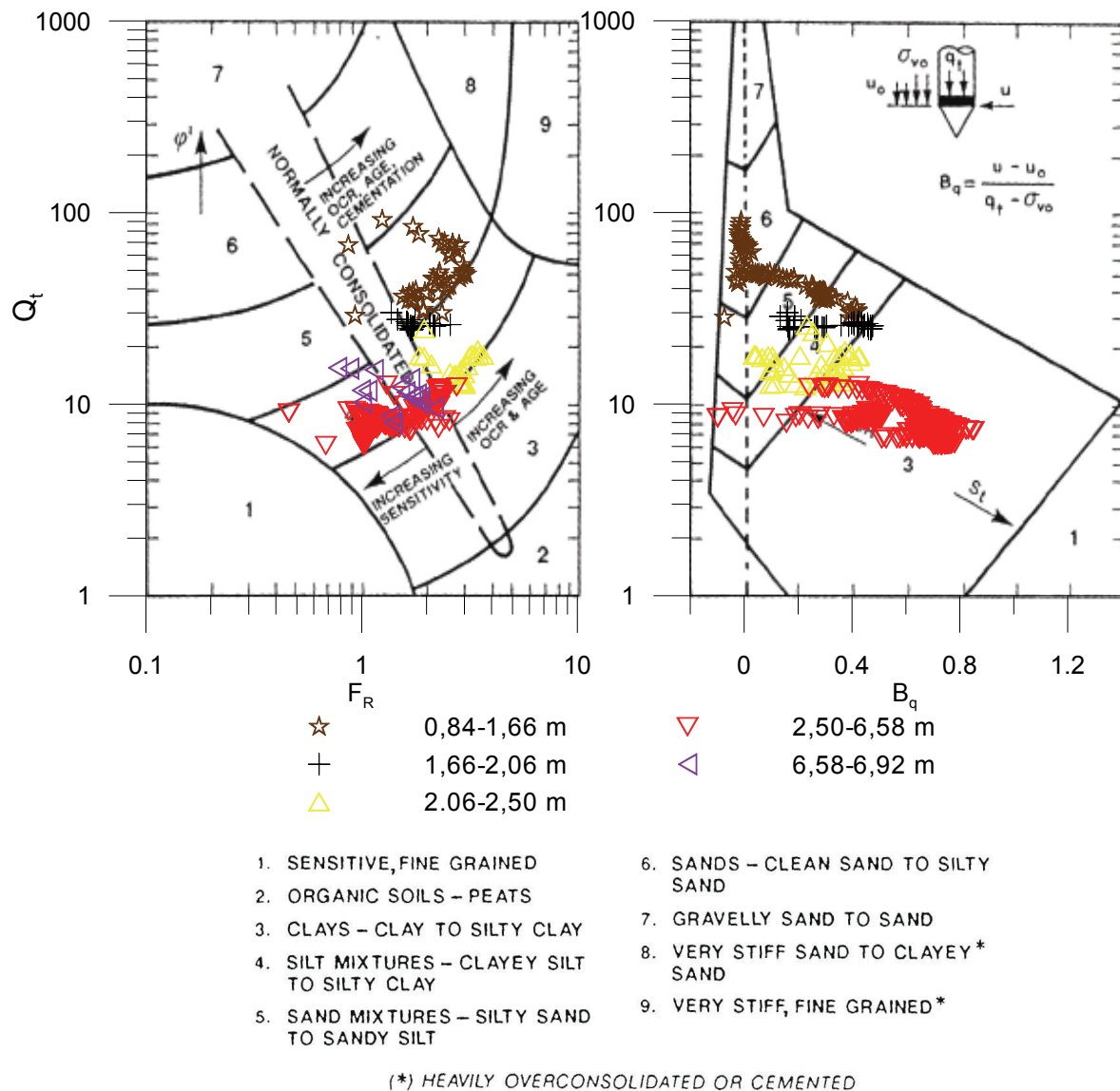
7. Nye forsøk i Lensvik

Figur 7.16 viser tilsvarende sammenligning for sondering 118b. Generelt havner lagene i en finere kategori ved klassifisering basert på B_q .



Figur 7.16.: Jordartsklassifisering for sondering 118b og 1M3 etter [20]

Figur 7.17 viser tilsvarende sammenligning for sondering 1N. Spesielt laget fra 0,84 - 1,66 m ser her ut til å få veldig stor spredning ved plot mot B_q , mens det samme til en viss grad også gjelder dypere lag.



Figur 7.17.: Jordartsklassifisering for sondering 1N og 1M3 etter [20]

8. Vurdering av resultater fra forsøk med modifisert sonde

8.1. Grunnforhold

Grunnundersøkelsene i Lensvik er utført med 6 trykksonderinger og en prøveserie innenfor et begrenset område med en radius på maksimalt 3 - 4 m. Allikevel viser sonderingene delvis svært forskjellige resultater, og der hvor forsøk 118 og 118b viser tydelig økt spissmotstand og sidefriksjon samt redusert poretrykk, vises det omtrent ingen respons ved forsøk 1N. Ved prøveserien som ble tatt opp var det noen antydninger til lagdelinger, men ingen tydelige sand- eller siltlag på 5 - 10 cm tykkelse som kanskje var forventet ut fra de tidligere trykksonderingene. Det ble derimot konstatert at det er en del "uryddige" masser i skråningen, og leira over nesten hele profilet har stort sett spredte innslag av sand, grus og enkelte større steiner.

Siden den modifiserte sonden kun registrerer poretrykk blir det vanskelig å vurdere om jordforholdene og resultater fra sonderingene er sammenlignbare. Dersom tilbakeslagsventilen i sonden har fungert som den skal, vil heller ikke sonden kunne registrere hvor stort undertrykk som faktisk oppstår rundt sonden. Så lenge forsøksforholdene er så uforutsigbare som de var i Lensvik, vil dette også bidra til usikkerhet om hvor sammenlignbare resultatene er.

I seksjon 7.4.2 ble det gjort en sammenligning av de tre forsøkene med Nova-sonden og forsøk 1M3. Selv om det av og til ble brukt litt godvilje for å finne likheter i grafene, og spredte mengder med sand, grus og stein kan føre til mer eller mindre tilfeldige registreringer, er det identifisert 7 forskjellige "lag" som gir en lignende respons i flere av sonderingene. Poretrykket fra forsøk 1M3 kombinert med spissmotstanden fra forsøkene med Nova-sonden ble brukt til sammenligning av jordartsklassifisering i seksjon 7.4.3. Det ble observert noen forskjeller, men generelt gir sammenligningen relativt like resultater. Spissmotstanden vil imidlertid i stor grad bidra til plassering i Q_t - B_q -diagrammet, og at bruk av samme spissmotstand dermed ikke overraskende gir omtrent like resultater.

Utslaget i forskjellige registrerte parametre generelt er variabelt fra forsøk til forsøk, og det virker ikke som om det lar seg gjøre å gjenskape et sett med forsøksresultater i dette området med spesielt stor nøyaktighet. Til dette er avsetningen altfor uryddig og uforutsigbar, selv innenfor små områder.

8.2. Metting og poretrykksrespons

Mettings- og monteringsprosedyren for den modifiserte sonden er meget omfattende og komplisert sammenlignet med Nova-sonden. Dette kombinert med mange kriker og kroker i ventil, slager, mellomstykke, væskekompartiment og kon i den modifiserte sonden krever nøyaktighet for å få til gode resultater. Som sondering 1M1 og 1M2 viser (se figur 7.10), gir dårlig metting av denne sonden raskt forverrede resultater i forhold til dårlig metting av Nova-sonden. Da den gamle

Fugro-spissen ble brukt ble hele spissen vakuumert etter montering, og det er nok en god løsning når væskevolumet er større og geometrien mer komplisert. Dette ville naturlig nok ikke latt seg gjøre med den modifiserte spissen, da en slik vakuumering raskt ville ha åpnet ventilen og tømt væskebeholderen.

Undertrykket som ble registrert ved tre anledninger ved forsøk 1M3 er større enn det forventede åpningstrykket til ventilen, med maksimalt registrert undertrykk på -39,2 kPa. Dette er også et gjennomsnitt av et antall målinger, så for et kort øyeblikk er det sannsynlig at trykket har vært enda lavere. Av alle de seks trykksonderingsforsøkene som er utført i Lensvik og betraktet i denne oppgaven er det sondering 1M3, med 1 psi ventil montert, som registrerer minst sug. Som det går frem av tabell 8.1 varierer det lavest registrerte poretrykket noe, men for sondering 1M3 er dette suget 15,9 kPa mindre enn gjennomsnittet og 7,9 kPa mindre enn det minste registrerte suget ved de tre andre forsøkene utført i mai 2011. Forsøkene fra høsten 2010 er i en annen størrelsesorden, noe som kan skyldes mer nedbør, høyere grunnvannstand og bedre metting av grunnen nær terrengnivå, eller eventuelt andre grunnforhold. At nettopp forsøk 1M3 har den minste verdien av sug kan være tilfeldig, men det kan også bety at ventilen har gjort jobben sin og forhindret videre utvikling av undertrykk. Hvis ventilen åpnet for undertrykket, vil sensoren registrere en lavere verdi av undertrykk enn det som faktisk oppstår utenfor sonden slik det ble vist i seksjon 6.1.2.

Tabell 8.1.: Lavest registrert poretrykk for alle forsøk uansett dybde

| Sondering | Lavest registrert poretrykk |
|-----------|-----------------------------|
| 118 | -93,0 kPa |
| 118b | -88,6 kPa |
| 1N | -52,2 kPa |
| 1M1 | -47,1 kPa |
| 1M2 | -66,0 kPa |
| 1M3 | -39,2 kPa |

Den mest tydelige observasjonen ved forsøk 1M3 er at poretrykkresponsen er betydelig bedre, og kanskje opp mot perfekt, sett i forhold til alle andre forsøk beskrevet i denne oppgaven. De tre forsøkene som er utført med Nova-sonden ble alle utsatt for et undertrykk på et tidlig stadium under sondering, og bærer alle sammen preg av treg respons ved samtlige større eller mindre fall i poretrykk etter dette. Forsøkene 1M1 og 1M2 stiller i samme kategori, og viser nok enda tydeligere effekter av undertrykk og dårlig metting. Det skulle forøvrig vært interessant å se om noen av disse forsøkene var skikkelig godt mettet og hadde god poretrykkrespons før det traff på et undertrykk, men siden dette skjedde relativt tidlig for alle forsøk blir det vanskelig å vurdere. Undertrykket under forsøk 1M2 er innenfor åpningstrykket til ventilen etter tabell 5.1, uten at dette ser ut til å ha gitt en god effekt.

Det registrerte poretrykket for forsøk 1M3 stiger i de aller fleste tilfeller omtrent like raskt som den faller. Dette tyder på at mettingen i utgangspunktet har vært god fra forsøket startet, og at undertrykk underveis ikke har hatt noen videre innvirkning på mettingen. En årsak til dette kan være at ventilen har gjort jobben sin og forhindret et større undertrykk i væsekammeret, eller så har en vært mer dyktig (eventuelt hatt mer flaks?) under metting og montering. Ved bruk av vakuumert glykol i væsekammer og stadig bedre erfaring med monterings- og mettingsprosedyrer, kan det hende at sonden under dette forsøket var mer motstandsdyktig mot effektene av undertrykk. Hvis ventilen heller aldri åpnet seg for å begrenset undertrykket under dette forsøket, ble det isåfall utført under noe "snillere" forhold enn de øvrige forsøkene.

8.3. Antall forsøk

Det burde åpenbart vært utført flere forsøk med den modifiserte sonden. Selv om grunnforholdene i forsøksområdet i Lensvik er vurdert til å være variable, hadde det vært spesielt interessant å se om den gode responsen fra forsøk 1M3 lar seg gjenskape eller om man var heldig ved dette ene forsøket. I tillegg kunne det vært aktuelt å utføre flere forsøk med 10 psi ventil for å se om det er mulig å få til en bedre respons med denne ventilen montert, eller om undertrykket da uansett kan bli så stort at det blir et tap av metting med påfølgende dårlig respons. Det hadde også vært ønskelig å utføre et forsøk til med Nova-sonden lenger opp i skråningen, siden sondering 1N viste mindre tendenser til trykkfall i tillegg til at forbindelsen til sonden ble brutt over en viss avstand.

Problemer med batterier og interface til Nova-sonden førte til at det ble brukt mye tid i Lensvik på feilsøking og problemløsning, og etter hvert som man endelig kom igang med forsøk med den modifiserte sonden ble det oppdaget oljelekkasjer på boreriggen. Det ble derfor avsluttet etter disse tre forsøkene for å fokusere på rapportskriving og å få dokumentert det som var gjort til da, samt å få kontrollert tilstanden på oljelekkasjer og interface på borerigg. Ved senere anledninger var det stor pågang på borerigg og personell, slik at det ikke var mulighet for å dra tilbake for å utføre ytterligere forsøk.

9. Konklusjon

Denne rapporten har beskrevet et forsøk på å designe, konstruere og gjøre forsøk med en modifisert versjon av en trykksonde som bedre skal kunne håndtere effekter av undertrykk uten å tape metting. Dette er gjort ved å benytte en tilbakeslagsventil med tilgang til et væskekammer, som åpnes ved et bestemt undertrykk og slipper væske inn i sonden istedet for at gassbobler utvides. Ved å benytte to ulike tilbakeslagsventiler ble det oppnådd resultater som slo ut begge veier. For en ventil som skulle åpne ved omtrent -69 kPa undertrykk ble resultatene dårligere enn med den kommersielle sonden, mens med bruk av en ventil som skulle åpne ved omtrent -7 kPa undertrykk ble poretrykksresponsen meget god og kanskje opp mot perfekt.

På grunn av tidspress og tilgjengelighet på borerigg mot slutten av semesteret er det kun utført ett forsøk med gode resultater, og datagrunnlaget for å trekke noen konklusjoner rundt effekten av modifikasjonene er derfor i tynneste laget. Grunnforholdene i forsøksområdet i Lensvik viste seg også å være mer uforutsigbare og å gi større variasjon i registreringer enn det som ble først antatt.

Forsøkene som er utført viser likevel at trykksonden med de aktuelle modifikasjonene har potensiale til å fungere svært bra. Konseptet med å benytte en tilbakeslagsventil med tilgang til et væskereservoar kan fungere for å begrense negative effekter av undertrykk under trykksondering, og valg av riktig åpningstrykk kan være essensielt. Dette forutsetter imidlertid at responsen fra forsøk 1M3 fra denne rapporten lar seg gjenskape under lignende, eller eventuelt mer ekstreme, men kontrollerbare forhold.

10. Videre arbeid

10.1. Mettingsprosedyre for andre sonder

Under det vellykkede forsøket med den modifiserte trykksonden i denne rapporten ble det benyttet glykol som på forhånd var vakuumert til å fylle væskeskammeret i sonden. Dette kan også med enkelhet prøves ut på kommersielle sonder før forsøk under forhold som gir et større undertrykk, og deretter vurdere om dette hjelper på mettingen. Sett i forhold til å bruke glykol som ligger i verktøykassa på borrhjellen og blir ristet rundt, kan dette utgjøre en forskjell selv om man ikke kan se noen luftbobler ved montering.

10.2. Uttesting av modifisert sonde

Sonden som ble konstruert i forbindelse med denne rapporten trenger videre uttesting for å verifisere resultatene. Poretrykkresponsen under det siste forsøket med 1 psi ventil var meget god til tross for soner med undertrykk, men disse resultatene er ikke verdt så mye dersom de ikke kan gjenskapes. Flere forsøk med begge ventiler burde derfor utføres under lignende forhold for å bedre kunne vurdere resultatene. Det er også mulig å prøve med flere ventiler med fast åpningstrykk, eller eventuelt justerbare ventiler som er små nok til å få plass i sonden. Ved å bruke en justerbar ventil ved flere forsøk vil det kanskje være mulig å bestemme hvilket åpningstrykk som er ideelt for ulike forhold, og dermed gi et bedre grunnlag for å bestemme (eller lage) en ventil med fast åpningstrykk. Ventiler med fast åpningstrykk er generelt mindre og enklere i konstruksjon og vil derfor være å foretrekke.

Ventilfunksjonen i den modifiserte sonden gjør at den ikke vil registrere den faktiske størrelsen til et eventuelt undertrykk, og ved de variable grunnforholdene i Lensvik vil det derfor være vanskelig å bedømme hva den faktisk har vært gjennom. For å få bedre kontroll på dette kan det være aktuelt å konstruere et testprofil med et dilaterende lag over et lite permeable leirmasser som gir tilnærmet lik respons hver gang. Dette vil eventuelt kunne gjøre forsøkene mer sammenlignbare, og det vil være enklere å dokumentere forbedringer i poretrykkrespons.

10.3. Design av modifisert sonde

Dersom konseptet med tilbakeslagsventil og væskereservoar skulle vise seg å fungere stabilt og pålitelig, vil neste steg være å forsøke å bruke systemet i en sonde som også måler spissmotstand, sidefriksjon, helning, temperatur og eventuelt andre parametre som kommersielle sonder i dag måler. Hele ventilsatsen må dermed komprimeres betraktelig, og vil nok kreve mer spesialtilpassede og konstruerte komponenter. Samtidig som det er lite i størrelse må systemet også være enkelt og relativt raskt å montere og mette også i felt, og væskereservoaret bør kunne la seg etterfylle eller bytte ut uten å måtte plukke hele sonden i biter slik det er for prototypen.

Referanser

- [1] Geotech AB (2011). *CPT - Nova Acoustic*. <http://geotech.eu/images/datasheets/new/nova%20acoustic.pdf> (30.05.11).
- [2] GisLink (2011). *GisLink Karttjeneste*. <http://www.gislink.no/gislink/> (09.06.11).
- [3] Honeywell (2009). *Model S: Subminiature, Flush Diaphragm Pressure Transducer*. https://measurementsensors.honeywell.com/ProductDocuments/Pressure/Model_S_Datasheet.pdf (09.05.11).
- [4] Honeywell (2011). *Bilde av Model S Pressure Transducer*. https://measurementsensors.honeywell.com/ProductImages/Pressure/1_Model_S_Pressure_400x400.png (09.05.11).
- [5] Janbu, N. (1970). *Grunnlag i geoteknikk*. Trondheim: Tapir Forlag.
- [6] Jønland, J. (2011). *Muntlig veiledning angående praksis rundt utførelse av CPT-sondering*.
- [7] Karlsrud, K., T. Lunne, D. A. Kort, og S. Strandvik (2005). CPTU correlations for clays. *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Vol. 2*, pp. 693–702.
- [8] Lunne, T., P. K. Robertson, og J. J. Powell (1997). *Cone penetration testing*. London: Spon Press.
- [9] Norsk Geoteknisk Forening (2010). Veiledning for utførelse av trykksondering. *Melding nr. 5 Rev. nr. 3*.
- [10] Norsk Standard (1982a). *NS 8001 Geoteknisk prøving - Laboratoriemetoder: Støtflytegrensen*. Standard Norge.
- [11] Norsk Standard (1982b). *NS 8003 Geoteknisk prøving - Laboratoriemetoder: Plastisitetsgrensen*. Standard Norge.
- [12] Norsk Standard (1982c). *NS 8011 Geoteknisk prøving - Laboratoriemetoder: Densitet*. Standard Norge.
- [13] Norsk Standard (1982d). *NS 8012 Geoteknisk prøving - Laboratoriemetoder: Korndensitet*. Standard Norge.
- [14] Norsk Standard (1982e). *NS 8013 Geoteknisk prøving - Laboratoriemetoder: Vanninnhold*. Standard Norge.
- [15] Norsk Standard (1982f). *NS 8014 Geoteknisk prøving - Laboratoriemetoder: Poretall, porøsitet og metningsgrad*. Standard Norge.

- [16] Norsk Standard (1988a). *NS 8015 Geoteknisk prøving - Laboratoriemetoder: Bestemmelse av udrenert skjærstyrke ved konusprøving*. Standard Norge.
- [17] Norsk Standard (1988b). *NS 8016 Geoteknisk prøving - Laboratoriemetoder: Bestemmelse av udrenert skjærstyrke ved enaksial trykkprøving*. Standard Norge.
- [18] Norsk Standard (1990). *NS 8005 Geoteknisk prøving - Laboratoriemetoder: Kornfordelingsanalyse av jordprøver*. Standard Norge.
- [19] Norsk Standard (1993). *NS 8018 Geoteknisk prøving - Laboratoriemetoder: Bestemmelse av endimensjonale konsolideringsegenskaper ved ødometerprøving. Metode med kontinuerlig belastning*. Standard Norge.
- [20] Robertson, P. K. (1990). Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal Vol. 27*, pp 151–158.
- [21] Robertson, P. K. (2010). Estimating in-situ soil permeability from CPT & CPTu. *2nd International Symposium on Cone Penetration Testing CPT'10 Vol. 2*, 2–51.
- [22] Statens vegvesen (2005). *Vedlegg 1 Jordartsklassifisering*. Håndbok 014 Laboratorieundersøkelser.
- [23] Statens vegvesen (2010). *Fv. 710 Ingdal - Valset*. <http://www.vegvesen.no/Vegprosjekter/fv710ingdalvalset> (26.05.11).
- [24] Swagelok (2010). *Check Valves*. <http://www.swagelok.com/downloads/WebCatalogs/EN/MS-01-176.pdf> (09.05.11).
- [25] Tveit, M. (2010). *Grunnundersøkelser og stabilitetsvurderinger i et område i Lensvika*. Prosjektoppgave i geoteknikk ved Insitutt for bygg, anlegg og transport, NTNU.
- [26] Vesic, A. S. (1972). Expansion of cavities in infinite soil mass. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers Vol. 98, SM 3*, pp. 265–290.
- [27] von Terzaghi, K. (1936). The shearing resistance of soils and the angle between the planes of shear. *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, June 22 to 26, 1936, Harvard University, Cambridge, Massachusetts Vol. 1*, pp. 54–56.
- [28] Winther, G. (2011). *Muntlig meddelelse angående erfaringer ved prøvetaking i Lensvik* (02.05.11).
- [29] Zumdahl, S. S. (2005). *Chemical principles*. Boston: Houghton Mifflin Company.

A. Kart

A1: Lensvik, Agdenes

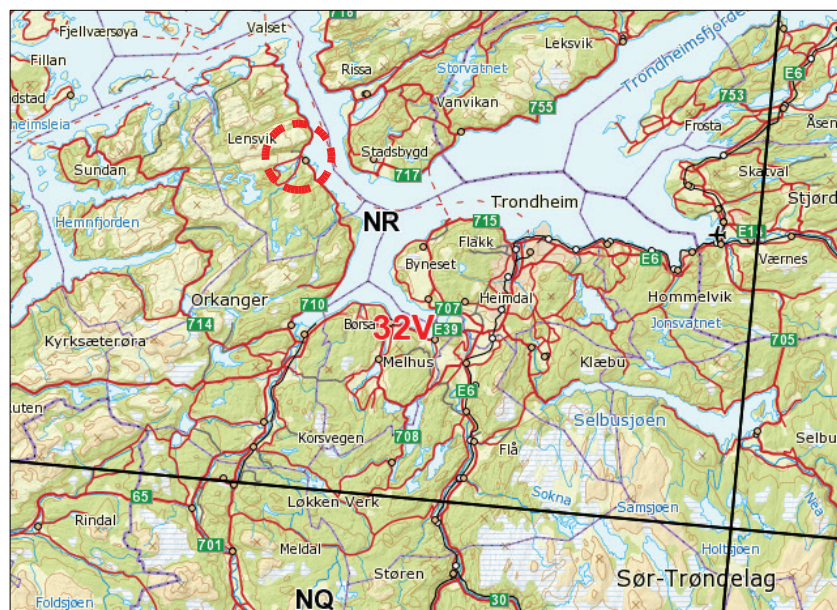
A2: Gløshaugen ved Lerkendal, Trondheim

Lensvik, Agdenes



Prøveområdet er indikert med stiplet ring

Regionalt utsnitt (Sør-Trøndelag)



Gløshaugen ved Lerkendal, Trondheim



Prøveområdet er indikert med stiplet ring

Regionalt utsnitt (Sør-Trøndelag)



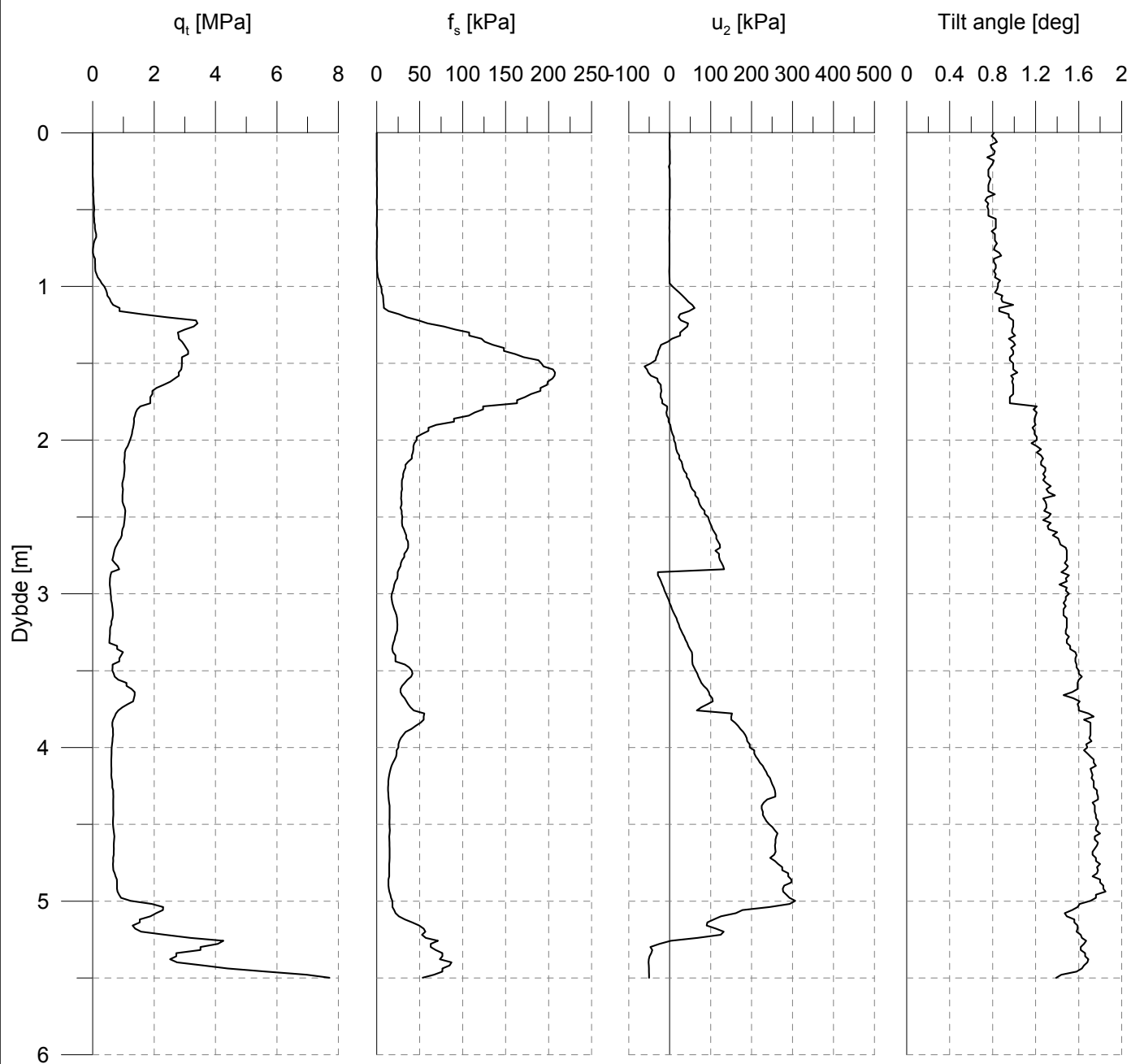
B. Trykksonderingsforsøk

| | | | | |
|-----|------------------------|-------|------------------|-----|
| B1: | Forsøk ved Gløshaugen: | B1-1: | Geotech Nova | GN |
| | | B1-2: | Modifisert sonde | GM1 |
| | | B1-3: | Modifisert sonde | GM2 |
| | | B1-4: | Modifisert sonde | GM3 |

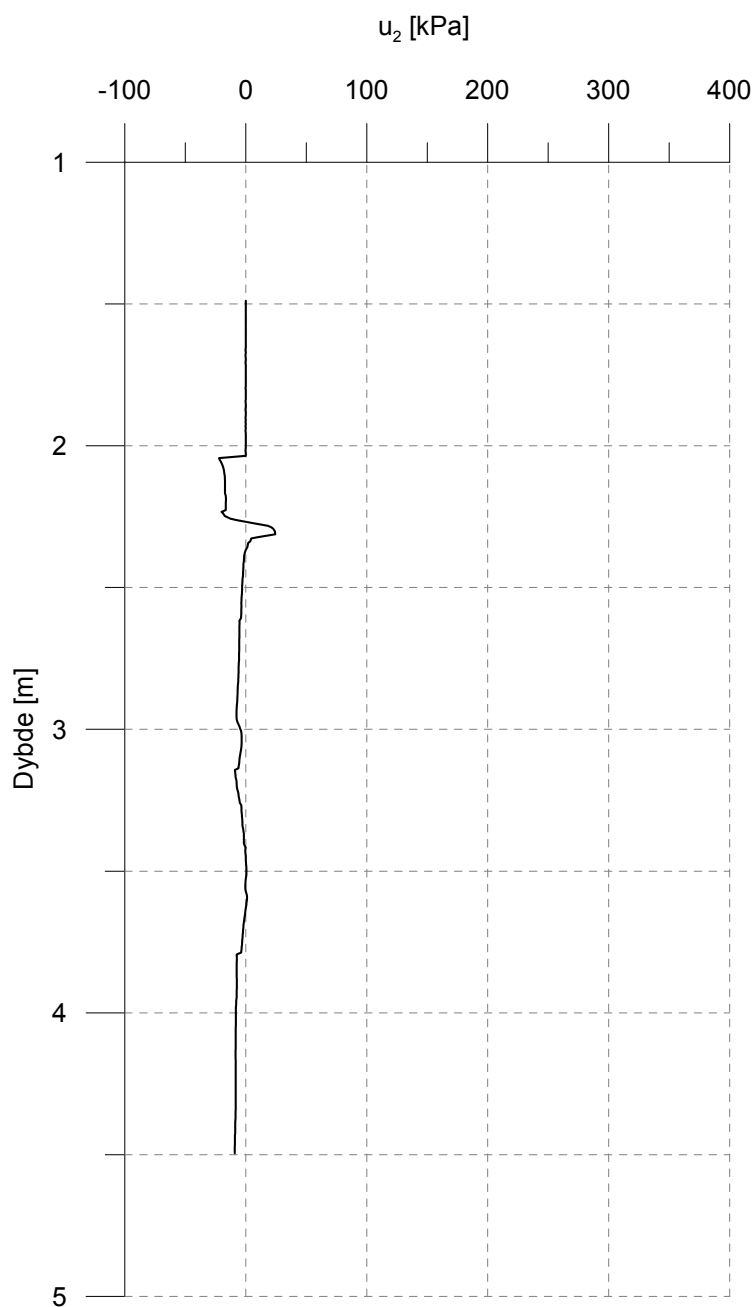
| | | | | |
|-----|-------------------|-------|------------------|------|
| B2: | Forsøk i Lensvik: | B2-1: | Geotech Nova | 118 |
| | | B2-2: | Geotech Nova | 118b |
| | | B2-3: | Geotech Nova | 1N |
| | | B2-4: | Modifisert sonde | 1M1 |
| | | B2-5: | Modifisert sonde | 1M2 |
| | | B2-6: | Modifisert sonde | 1M3 |

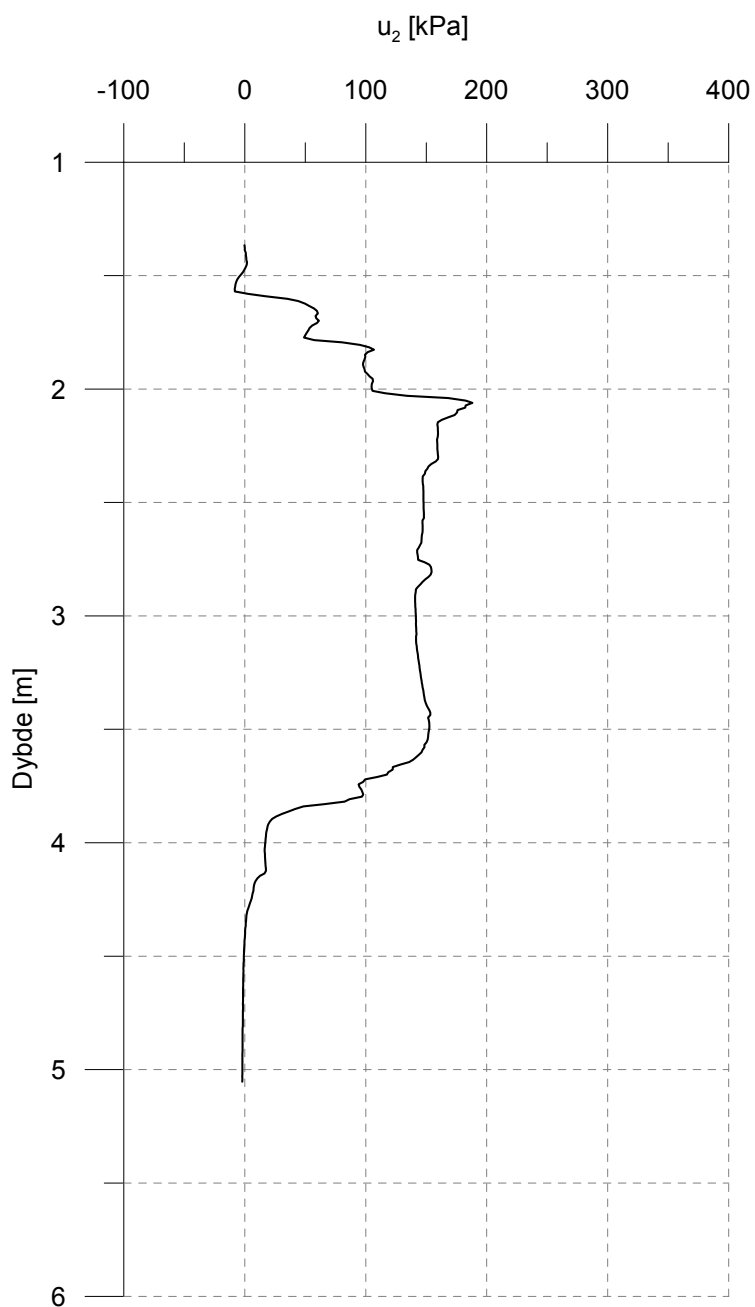
Trykksonderingsforsøk

Tegning nr.: B1-1



| | | |
|--|----------------------------|-----------------------------|
| Dato: 27.04.2011 | Hull nr.: GN | Borrigg: Geotech 607 |
| Sted: Gløshaugen/Lerkendal | Sonde: Geotech Nova | Operatør: TS/GW |
| Prosjekt: In situ referansetest | Forboring: 1,0 m | Kommentar: |

**Dato:** 26.04.2011**Hull nr.:** GM1**Borrigg:** Geotech 607**Sted:** Gløshaugen/Lerkendal**Sonde:** Modifisert sonde**Operatør:** TS/GW**Prosjekt:** In situ testforsøk**Forboring:** 1,0 m**Kommentar:** 1 psi ventil

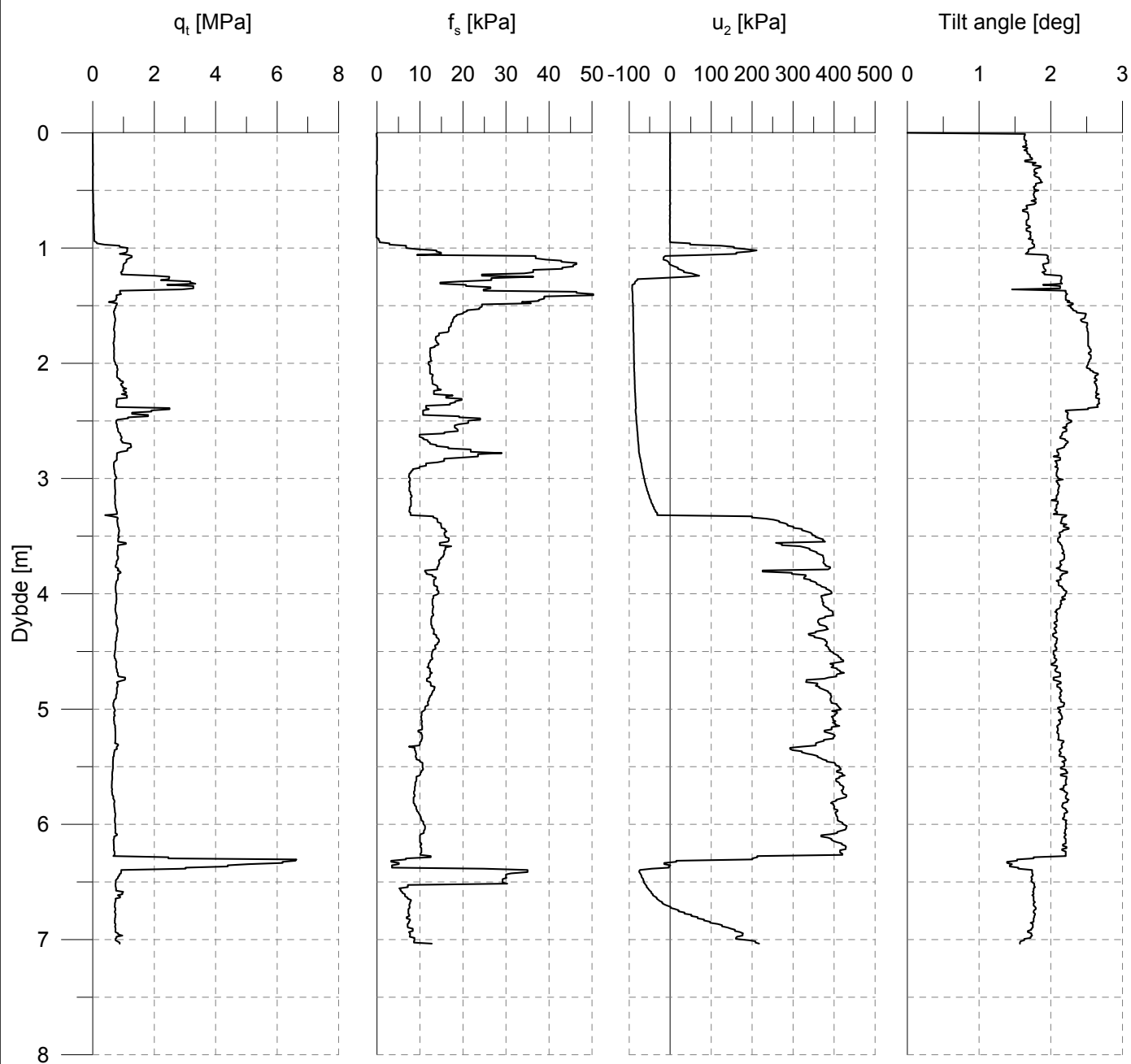


| | | |
|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Dato: 28.04.2011 | Hull nr.: GM2 | Borrigg: Geotech 607 |
| Sted: Gløshaugen/Lerkendal | Sonde: Modifisert sonde | Operatør: TS/GW |
| Prosjekt: In situ testforsøk | Forboring: 1,5 m | Kommentar: 10 psi ventil |

**Dato:** 28.04.2011**Hull nr.:** GM3**Borrigg:** Geotech 607**Sted:** Gløshaugen/Lerkendal**Sonde:** Modifisert sonde**Operatør:** TS/GW**Prosjekt:** In situ testforsøk**Forboring:** 1,5 m**Kommentar:** 10 psi ventil

Trykksonderingsforsøk

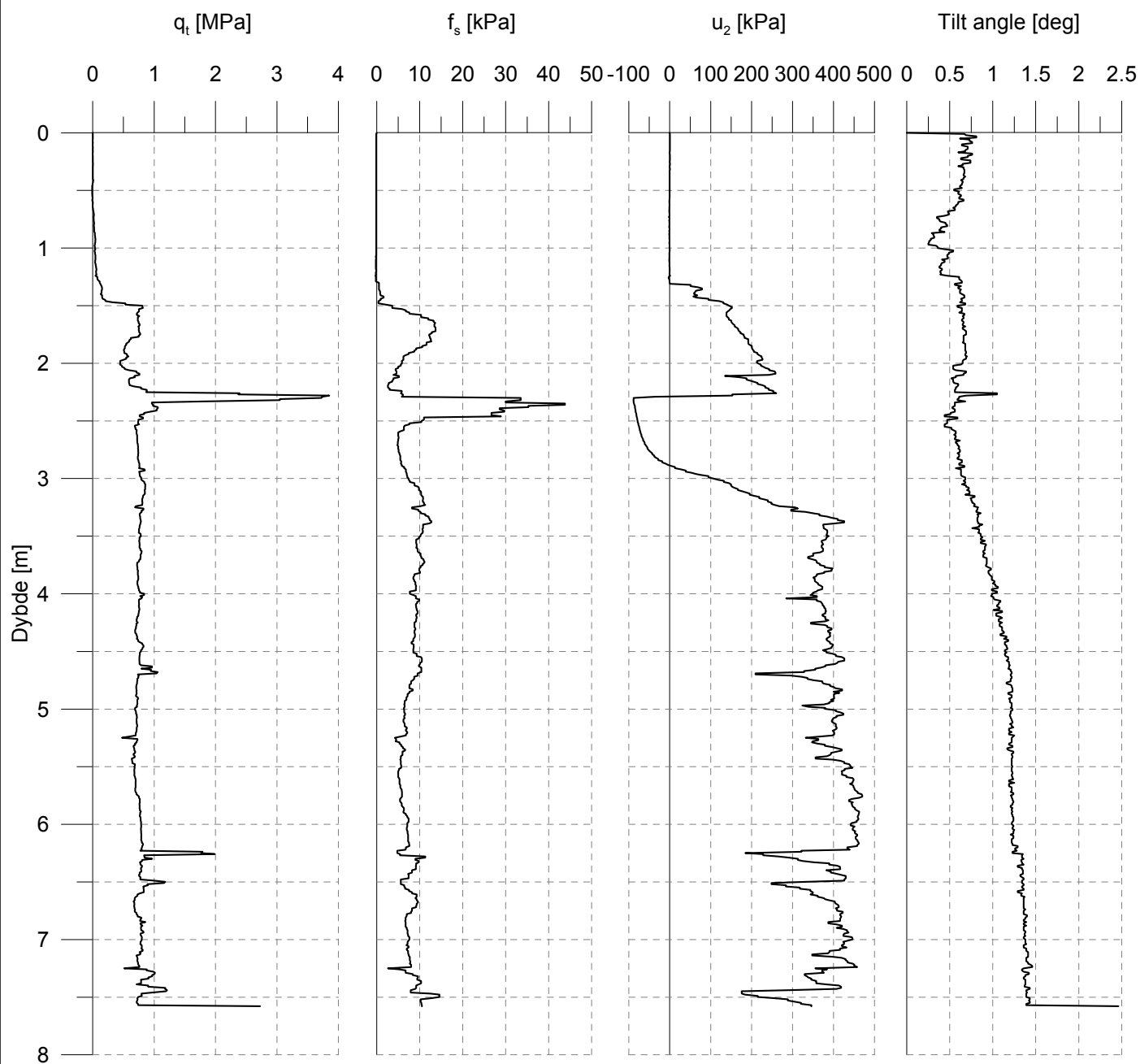
Tegning nr.: B2-1



| | | |
|-----------------------------|----------------------------|---|
| Dato: 21.09.2010 | Hull nr.: 118 | Borrigg: Geotech Prospector 1500 |
| Sted: Lensvik | Sonde: Geotech Nova | Operatør: GW |
| Prosjekt: SVV Fv 710 | Forboring: 1,0 m | Kommentar: |

Trykksonderingsforsøk

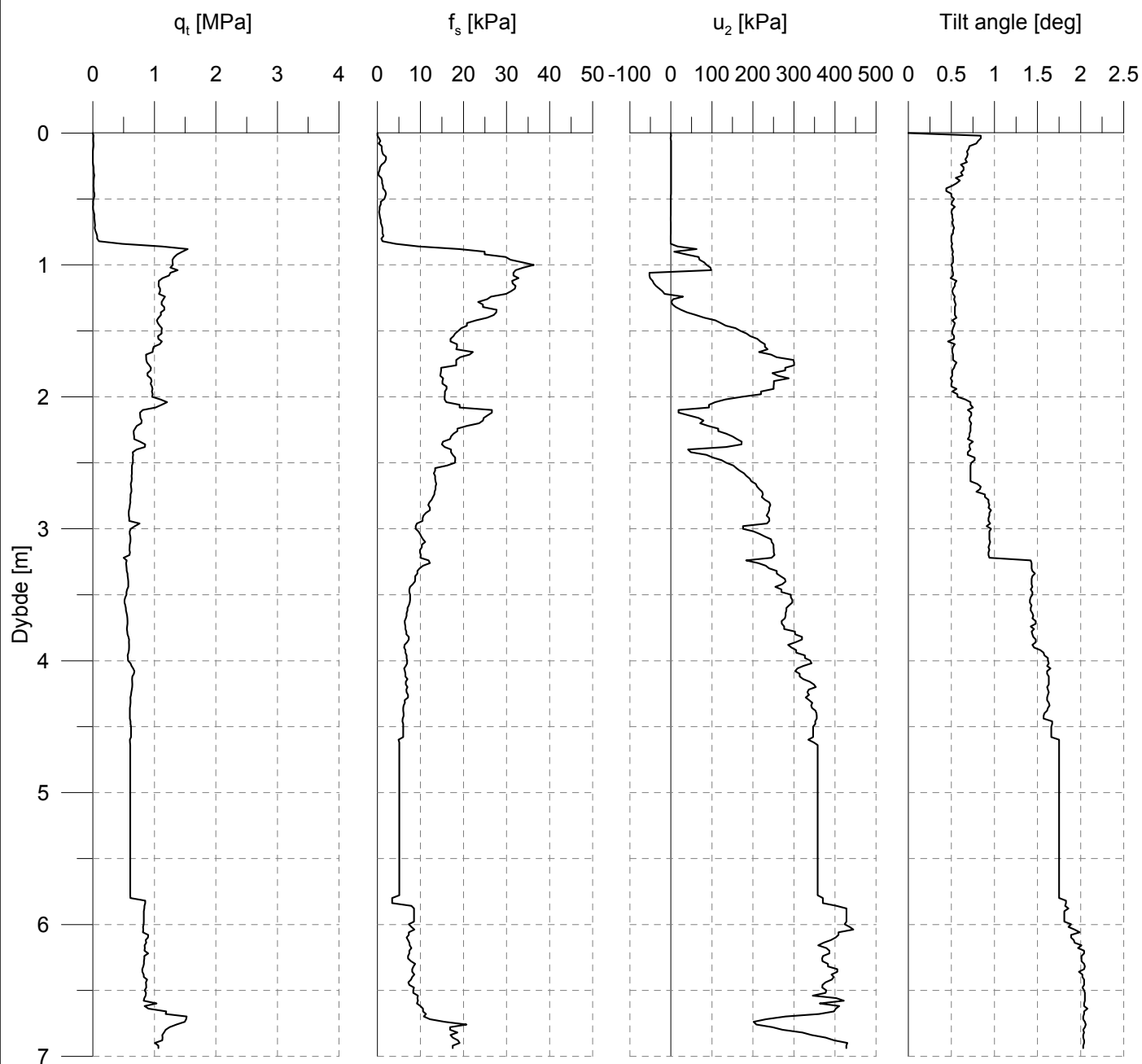
Tegning nr.: B2-2



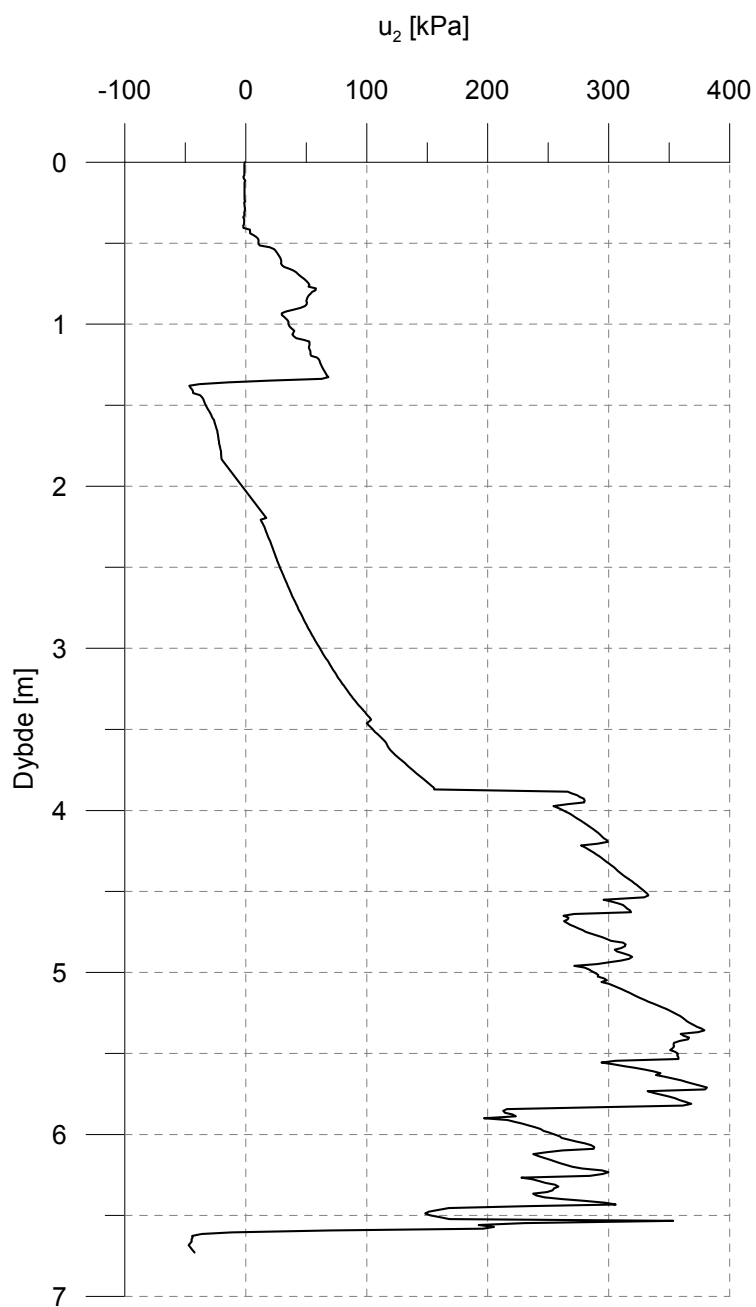
| | | |
|-----------------------------|----------------------------|---|
| Dato: 21.09.2010 | Hull nr.: 118b | Borrigg: Geotech Prospector 1500 |
| Sted: Lensvik | Sonde: Geotech Nova | Operatør: GW |
| Prosjekt: SVV Fv 710 | Forboring: 1,5 m | Kommentar: |

Trykksonderingsforsøk

Tegning nr.: B2-3

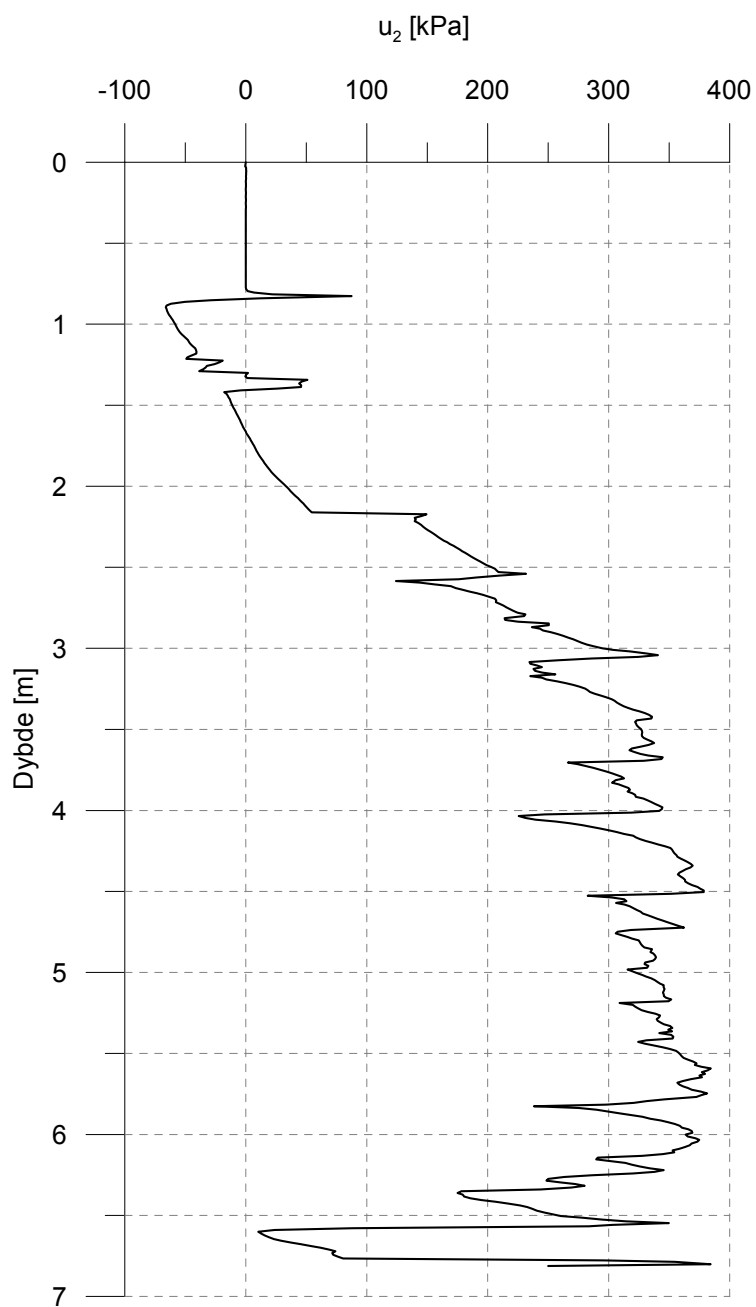


| | | |
|----------------------------------|----------------------------|--|
| Dato: 02.05.2011 | Hull nr.: 1N | Borrigg: Geotech Prospector 1500 |
| Sted: Lensvik | Sonde: Geotech Nova | Operatør: TS/GW |
| Prosjekt: Referanseforsøk | Forboring: 1 m | Kommentar: Mistet forbindelse 4,6-5,7 m |

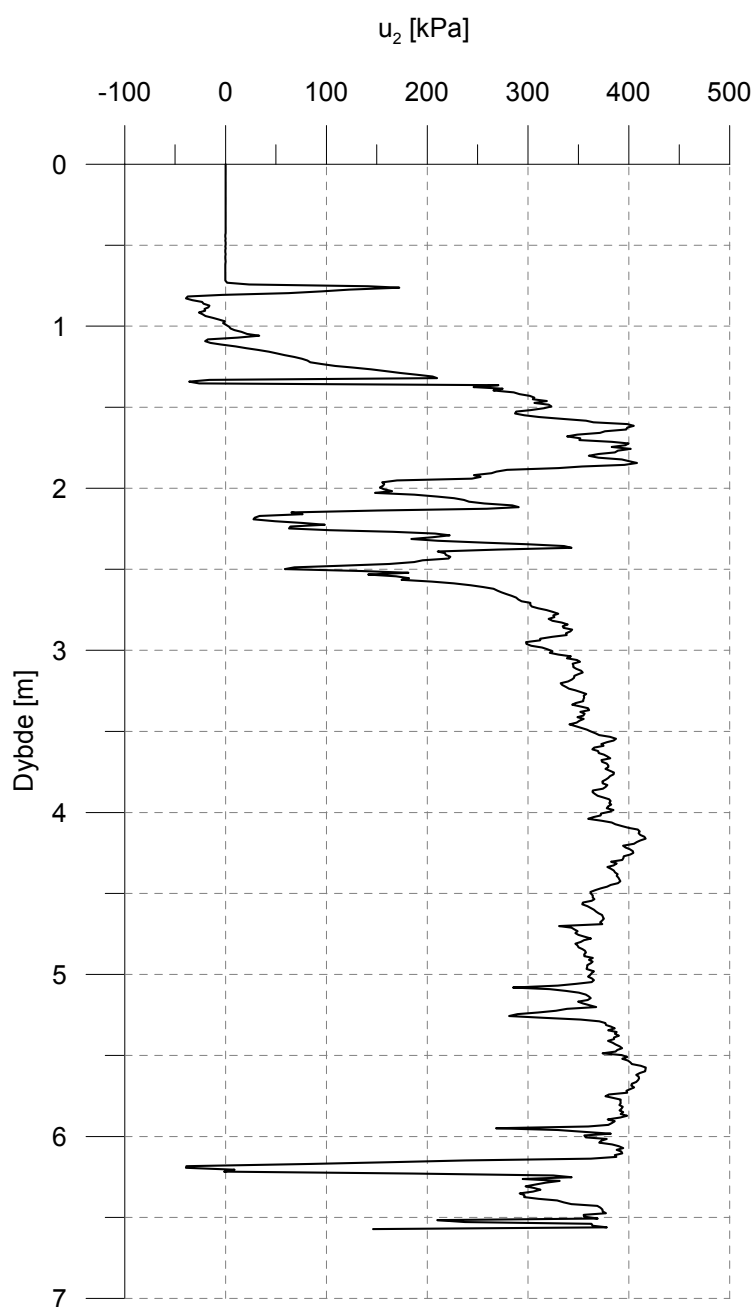
**Dato:** 03.05.2011**Hull nr.:** 1M1**Borrigg:** Geotech Prospector 1500**Sted:** Lensvik**Sonde:** Modifisert sonde**Operatør:** TS/GW**Prosjekt:** In situ forsøk**Forboring:** 0,8 m**Kommentar:** 10 psi ventil

Trykksonderingsforsøk

Tegning nr.: B2-5



| | | |
|--------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| Dato: 04.05.2011 | Hull nr.: 1M2 | Borrigg: Geotech Prospector 1500 |
| Sted: Lensvik | Sonde: Modifisert sonde | Operatør: TS/GW |
| Prosjekt: In situ forsøk | Forboring: 0,8 m | Kommentar: 10 psi ventil |



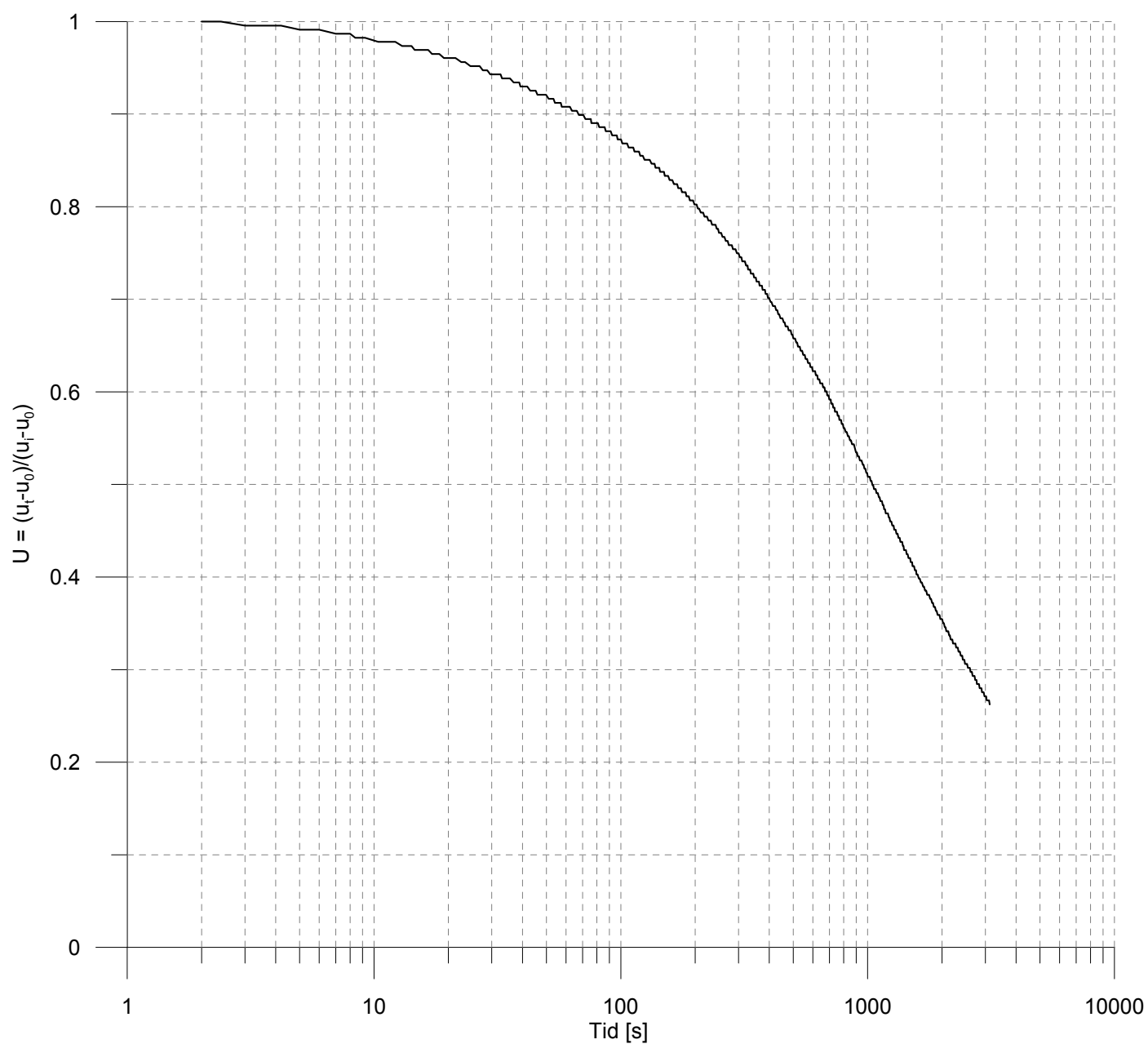
| | | |
|---------------------------------|--------------------------------|---|
| Dato: 04.05.2011 | Hull nr.: 1M3 | Borrigg: Geotech Prospector 1500 |
| Sted: Lensvik | Sonde: Modifisert sonde | Operatør: TS/GW |
| Prosjekt: In situ forsøk | Forboring: 0,8 m | Kommentar: 1 psi ventil |

C. Dissipasjonsforsøk

C1: Borhull 1N, dybde 3,23 m

Dissipasjonsforsøk

Tegning nr.: C1



Dato: 02.05.2011

Hull nr.: 1N

Borrigger: Geotech Prospector 1500

Sted: Lensvik

Sonde: Geotech Nova

Operatør: TS/GW

Prosjekt: In situ forsøk

Dybde: 3,23 m

Kommentar: Grunnvann antatt ved 3,0 m

D. Borprofil

D1: Borhull 1

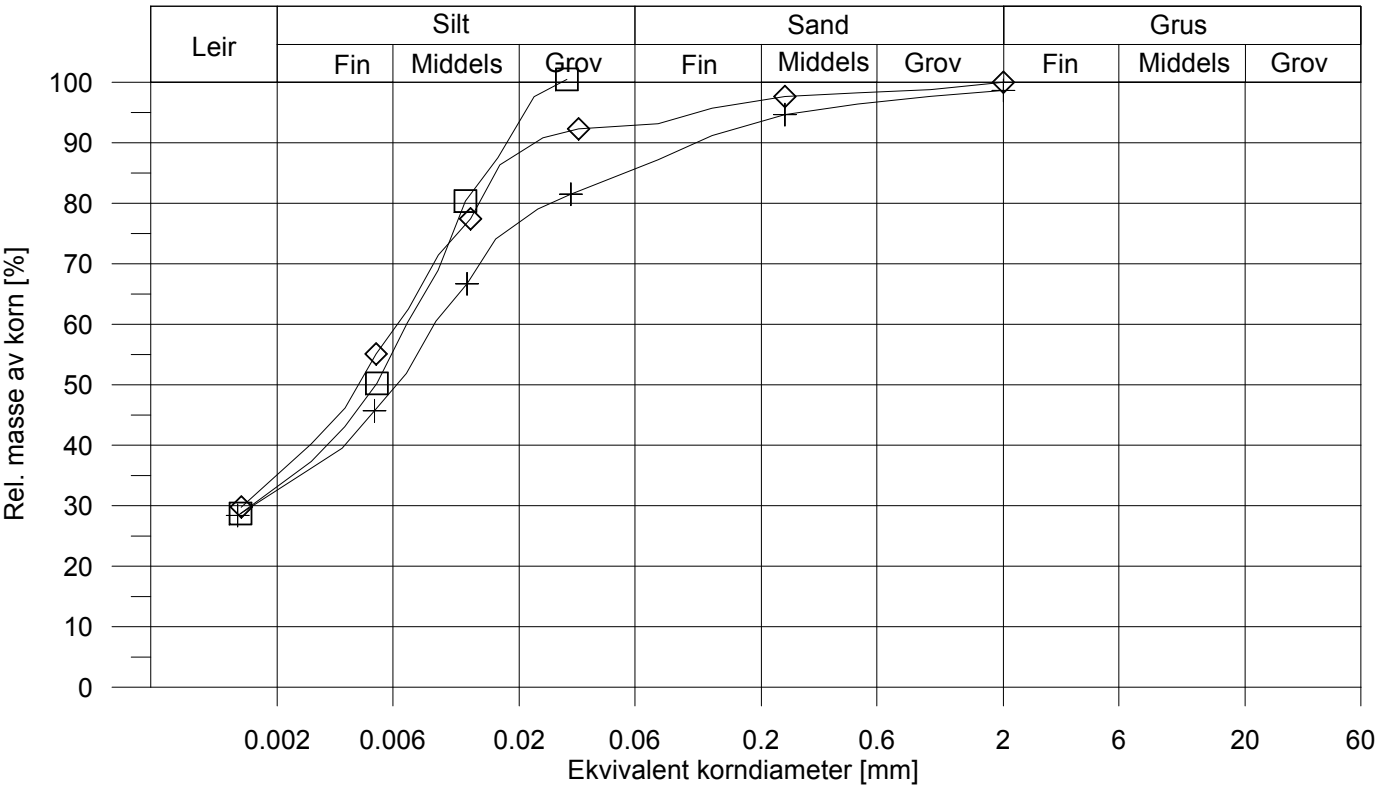
[illegible]

E. Kornfordelingsforsøk

E1: 1,53 m
2,67 m
3,30 m

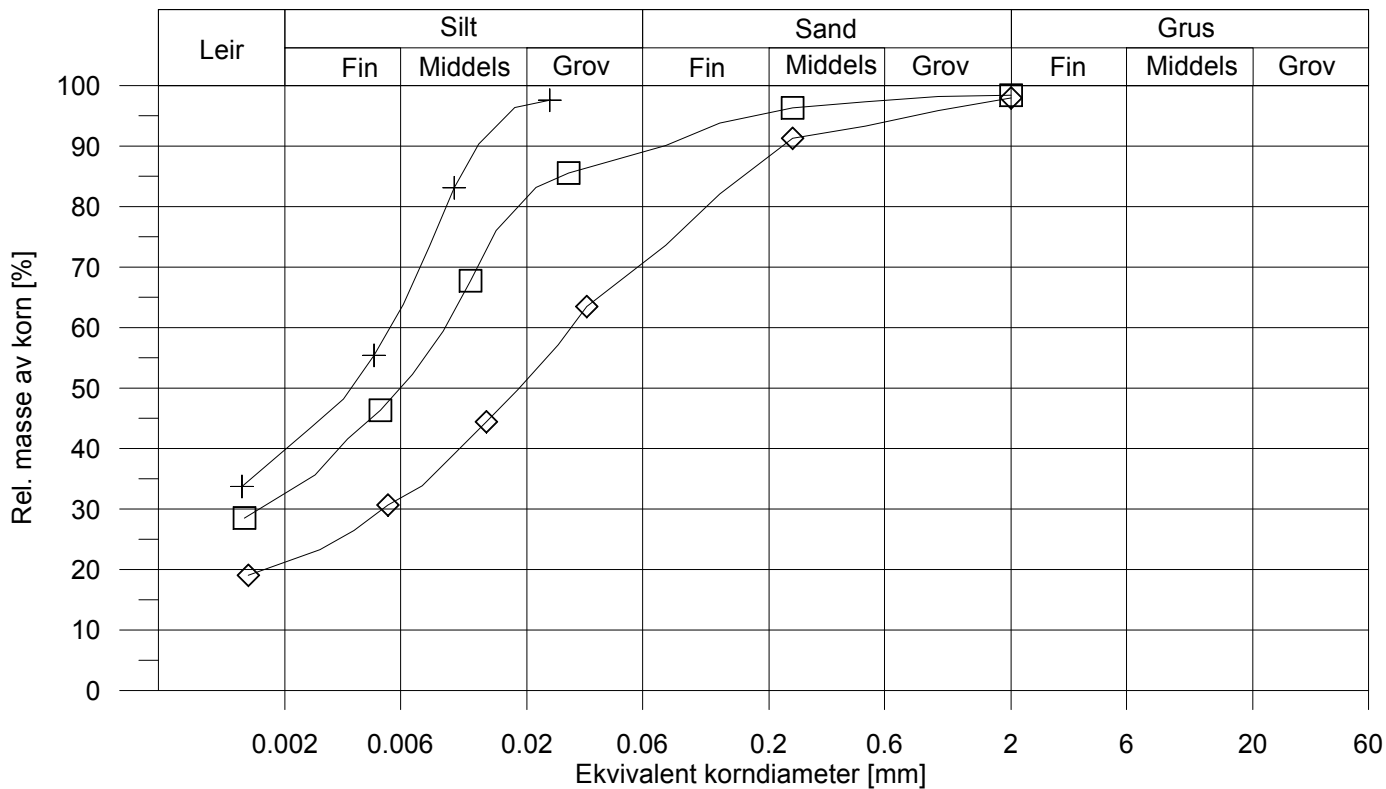
E2: 3,57 m
5,67 m
6,42 m

Kornfordelingsanalyse



| Symbol | Borhull | Dybde | Korndensitet | Forsøksdato | |
|--------|---------|--------|--------------|-------------|----------------------------------|
| + | 1 | 1,53 m | 2,75 g/cm³ | 13.05.11 | |
| ◇ | 1 | 2,67 m | 2,68 g/cm³ | 13.05.11 | Prosjekt: Jordartsklassifisering |
| □ | 1 | 3,30 m | 2,72 g/cm³ | 15.05.11 | Borested: Lensvik |
| | | | | | Tegning nr.: E1 |

Kornfordelingsanalyse

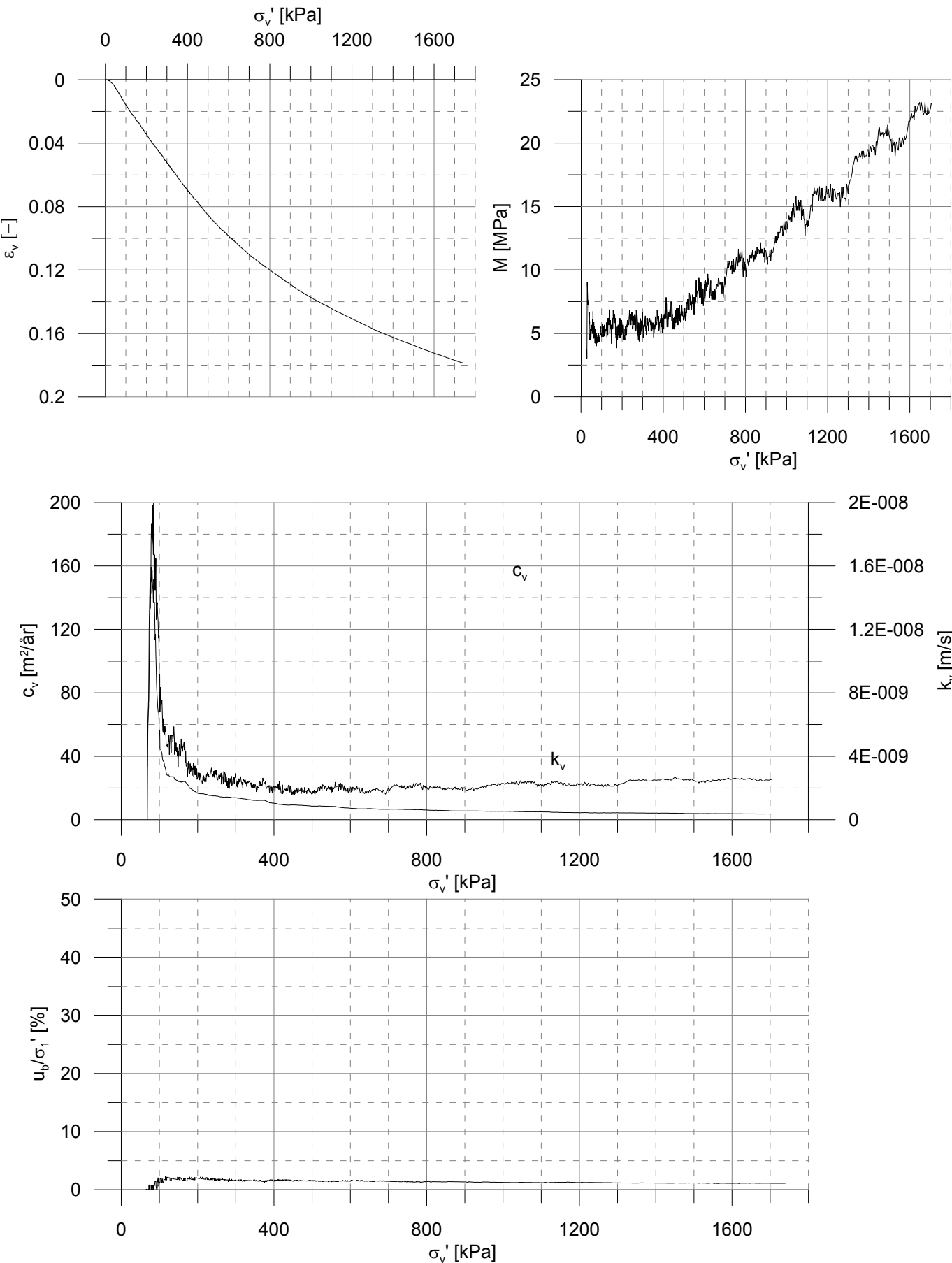


| Symbol | Borhull | Dybde | Korndensitet | Forsøksdato | |
|--------|---------|--------|--------------|-------------|----------------------------------|
| + | 1 | 3,57 m | 2,75 g/cm³ | 15.05.11 | |
| ◇ | 1 | 5,67 m | 2,77 g/cm³ | 16.05.11 | Prosjekt: Jordartsklassifisering |
| □ | 1 | 6,42 m | 2,76 g/cm³ | 16.05.11 | Borested: Lensvik |
| | | | | | Tegning nr.: E2 |

F. Ødometerforsøk

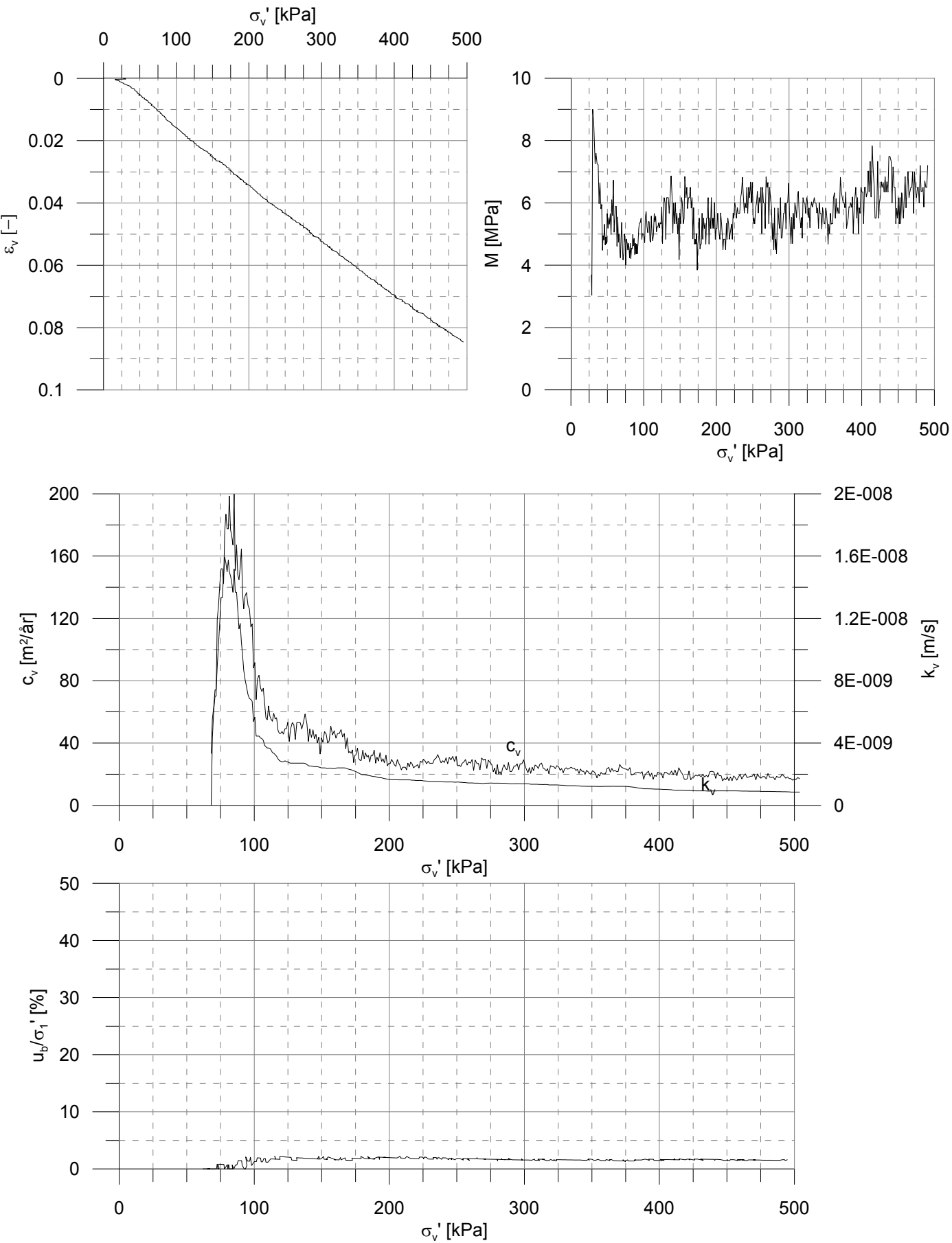
| | | | |
|-----|-------|--------|----------------|
| F1: | F1-1: | 2,57 m | 1800 kPa skala |
| | F1-2: | 2,57 m | 500 kPa skala |
| F2: | F2-1: | 3,30 m | 1800 kPa skala |
| | F2-2: | 3,30 m | 500 kPa skala |
| F3: | F3-1: | 5,36 m | 1800 kPa skala |
| | F3-2: | 5,36 m | 500 kPa skala |
| F4: | F4-1: | 6,33 m | 1800 kPa skala |
| | F5-2: | 6,33 m | 500 kPa skala |

Ødometerforsøk - CRS



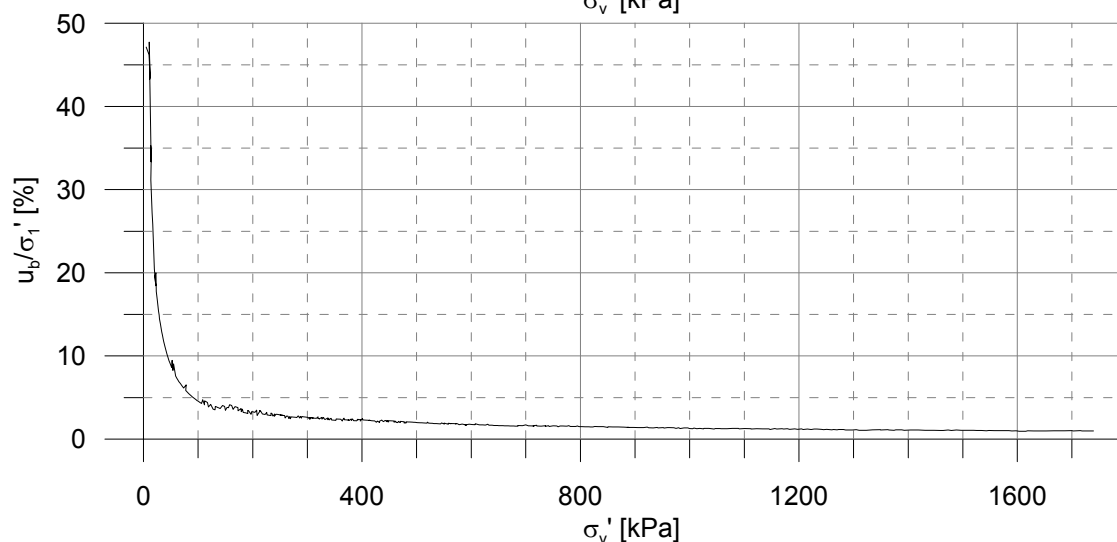
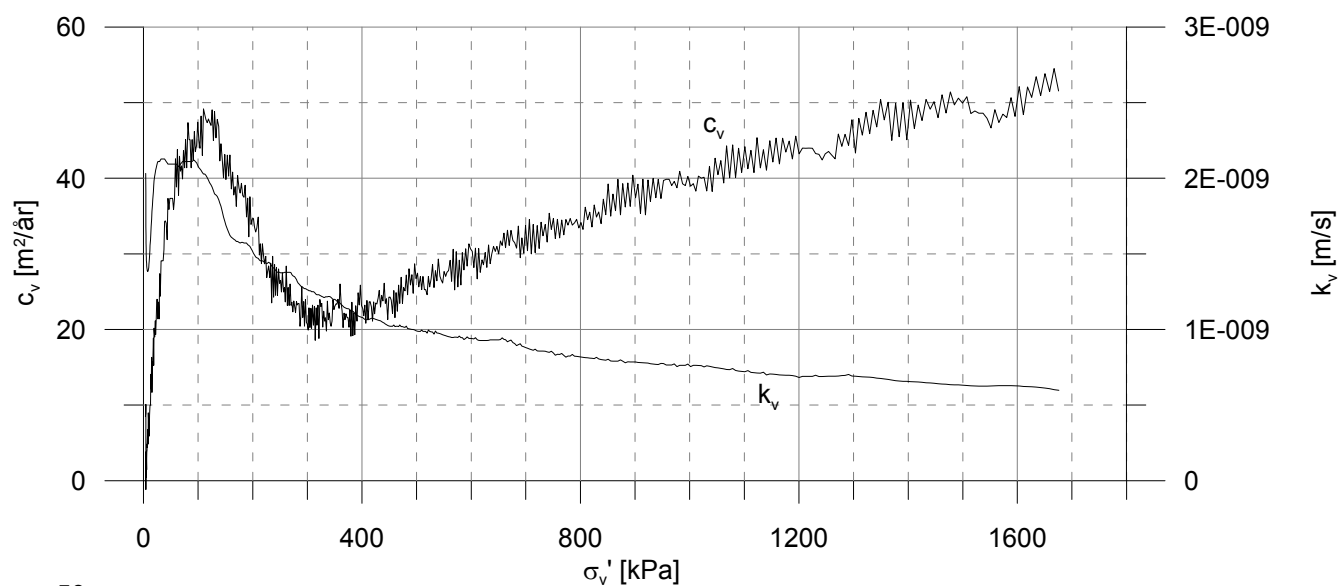
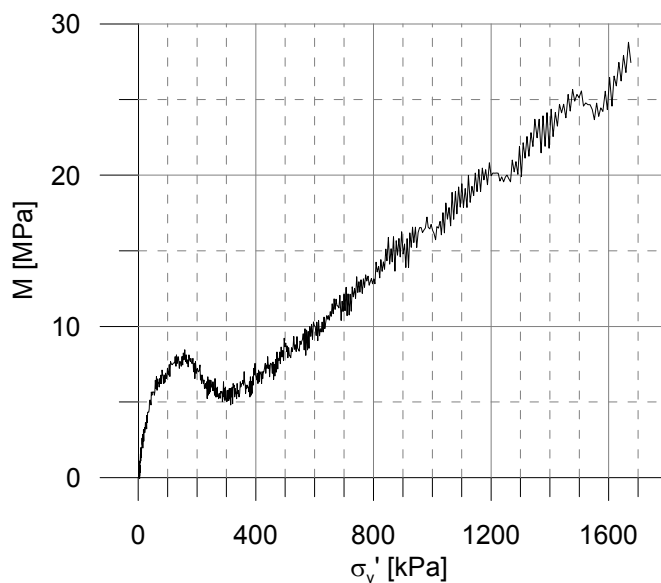
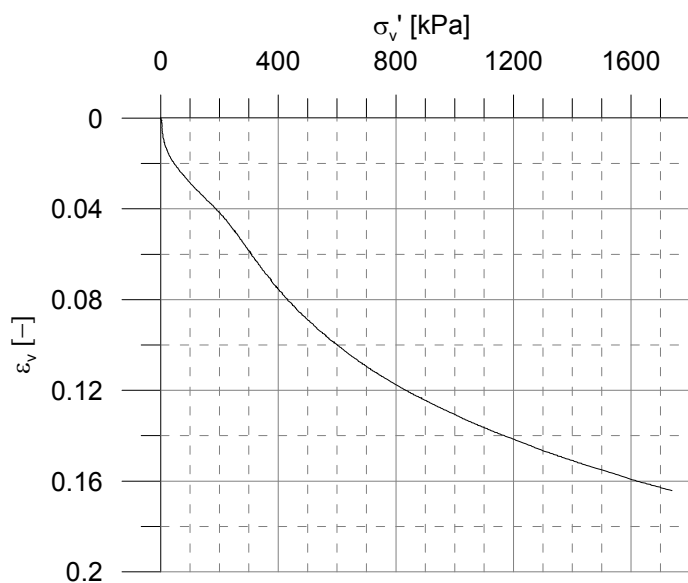
| | | | |
|--------------------------|---------------|-----------------------|-------------------|
| Prosjekt: Klassifisering | Hull nr.: 1 | Hastighet: 4 mm/min | Utført av: TS |
| Prøvested: Lensvik | Dybde: 2,57 m | Forsøksdato: 06.05.11 | Tegning nr.: F1-1 |

Ødometerforsøk - CRS



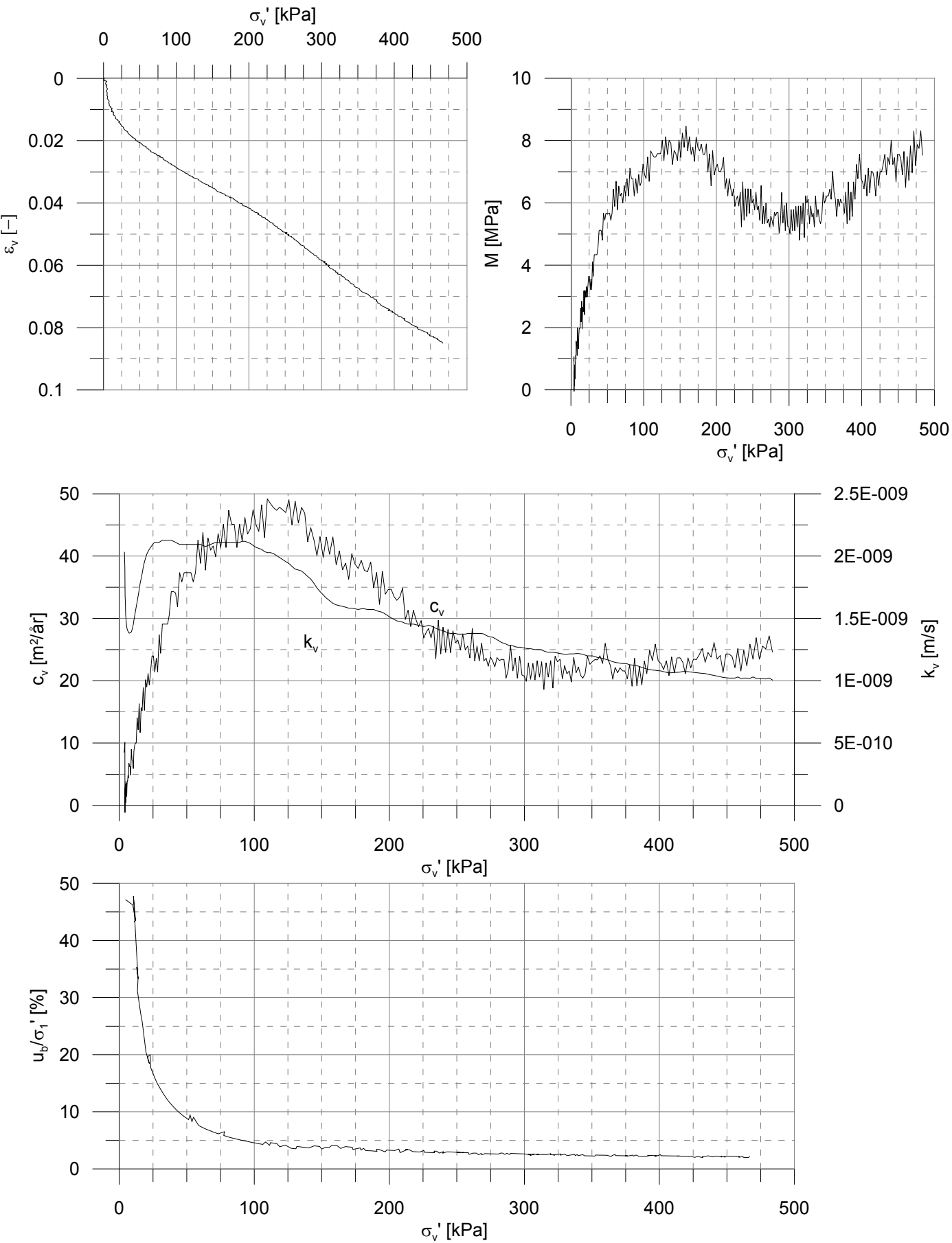
| | | | |
|--------------------------|---------------|-----------------------|-------------------|
| Prosjekt: Klassifisering | Hull nr.: 1 | Hastighet: 4 mm/min | Utført av: TS |
| Prøvested: Lensvik | Dybde: 2,57 m | Forsøksdato: 06.05.11 | Tegning nr.: F1-2 |

Ødometerforsøk - CRS



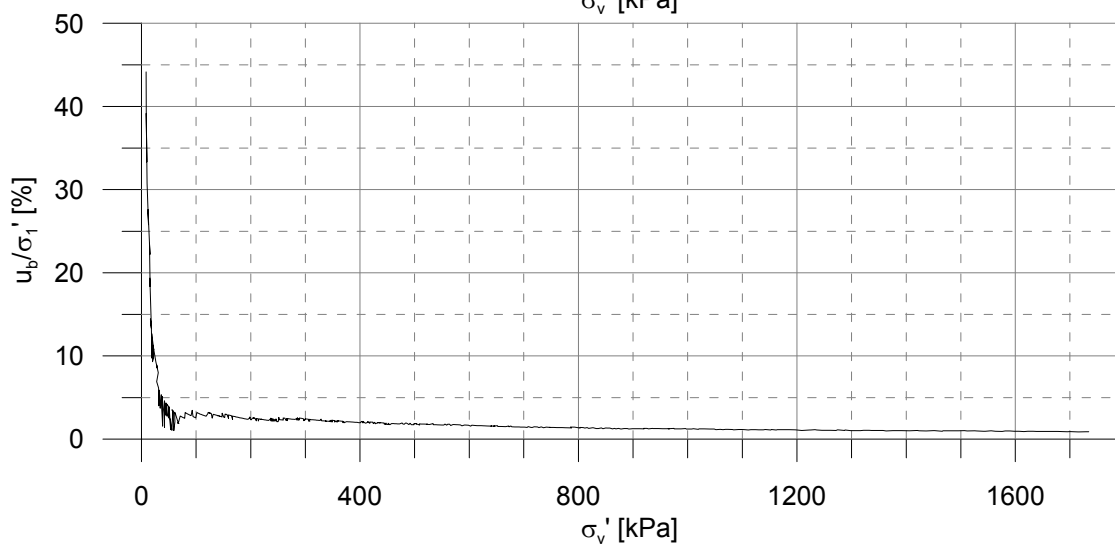
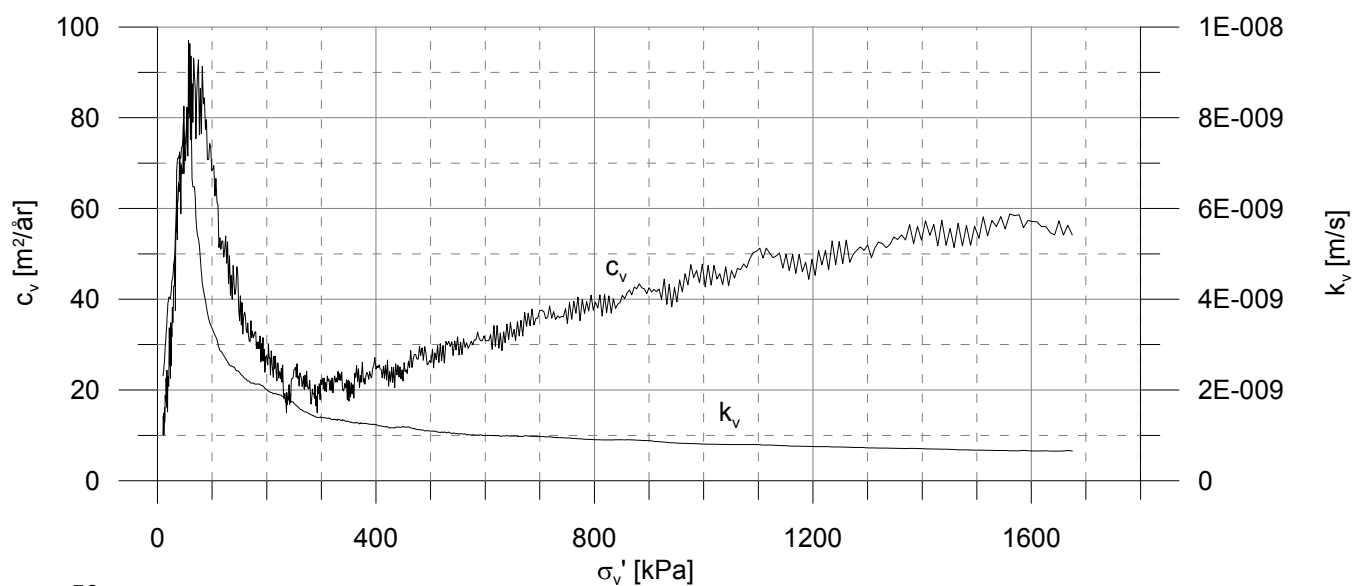
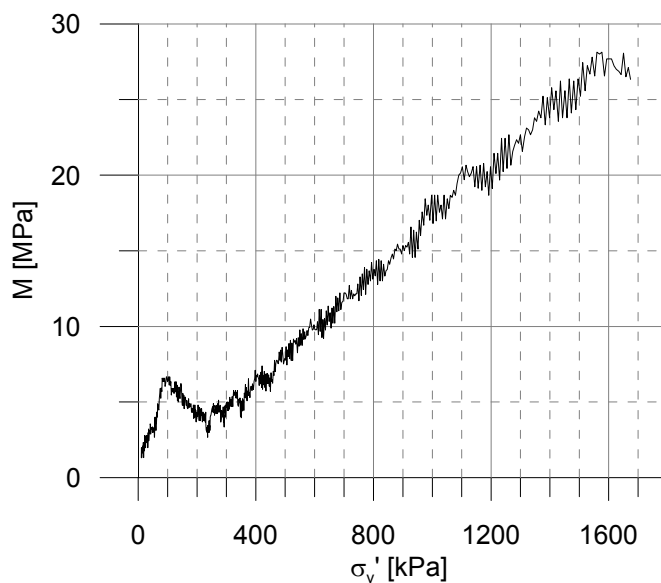
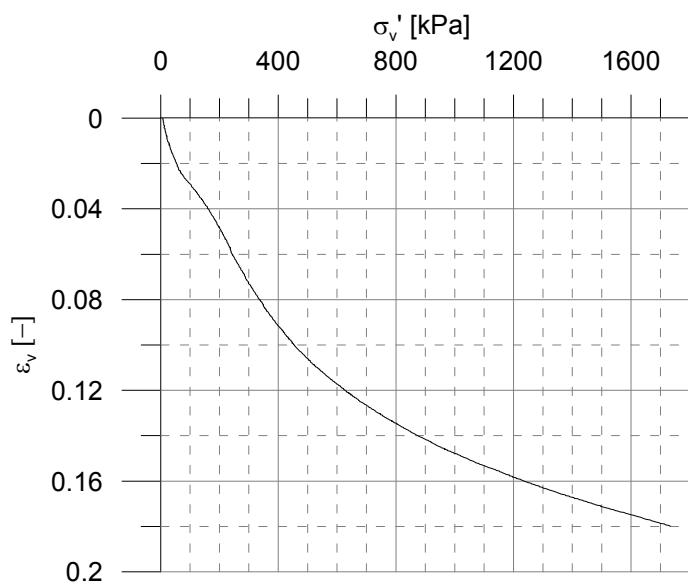
| | | | |
|---------------------------------|----------------------|------------------------------|--------------------------|
| Prosjekt: Klassifisering | Hull nr.: 1 | Hastighet: 6 mm/min | Utført av: TS |
| Prøvested: Lensvik | Dybde: 3,30 m | Forsøksdato: 14.05.11 | Tegning nr.: F2-1 |

Ødometerforsøk - CRS



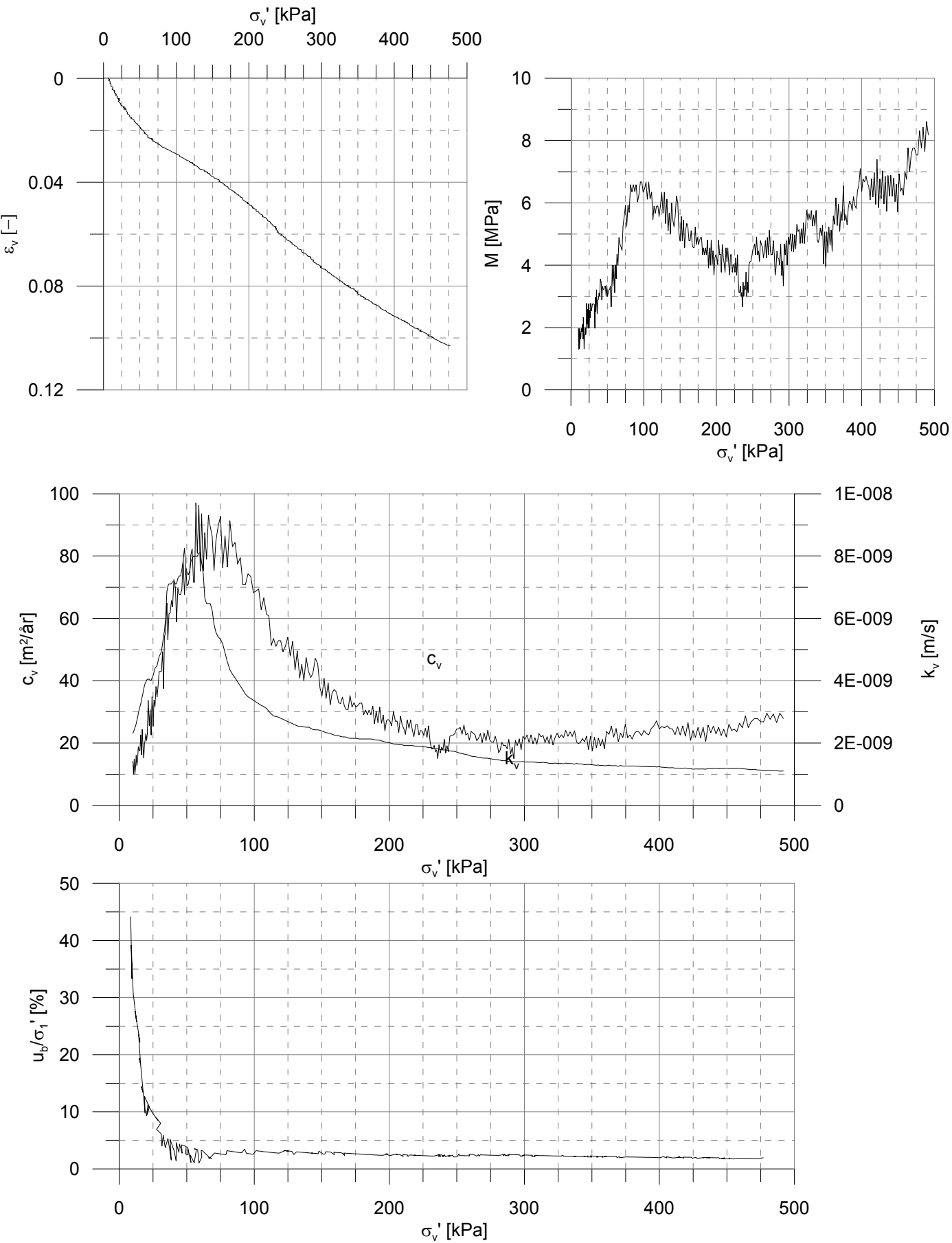
| | | | |
|--------------------------|---------------|-----------------------|-------------------|
| Prosjekt: Klassifisering | Hull nr.: 1 | Hastighet: 6 mm/min | Utført av: TS |
| Prøvested: Lensvik | Dybde: 3,30 m | Forsøksdato: 14.05.11 | Tegning nr.: F2-2 |

Ødometerforsøk - CRS



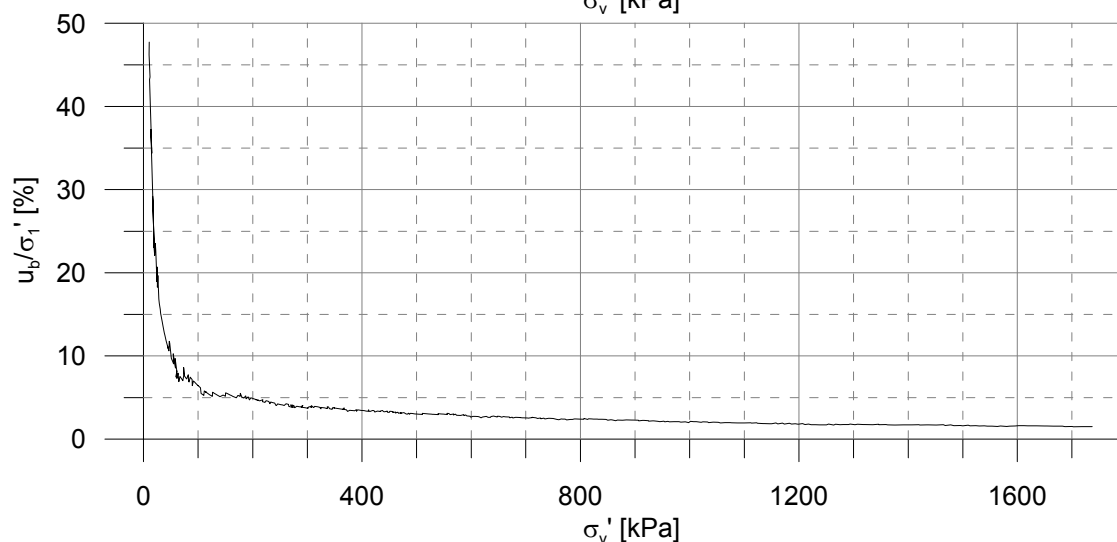
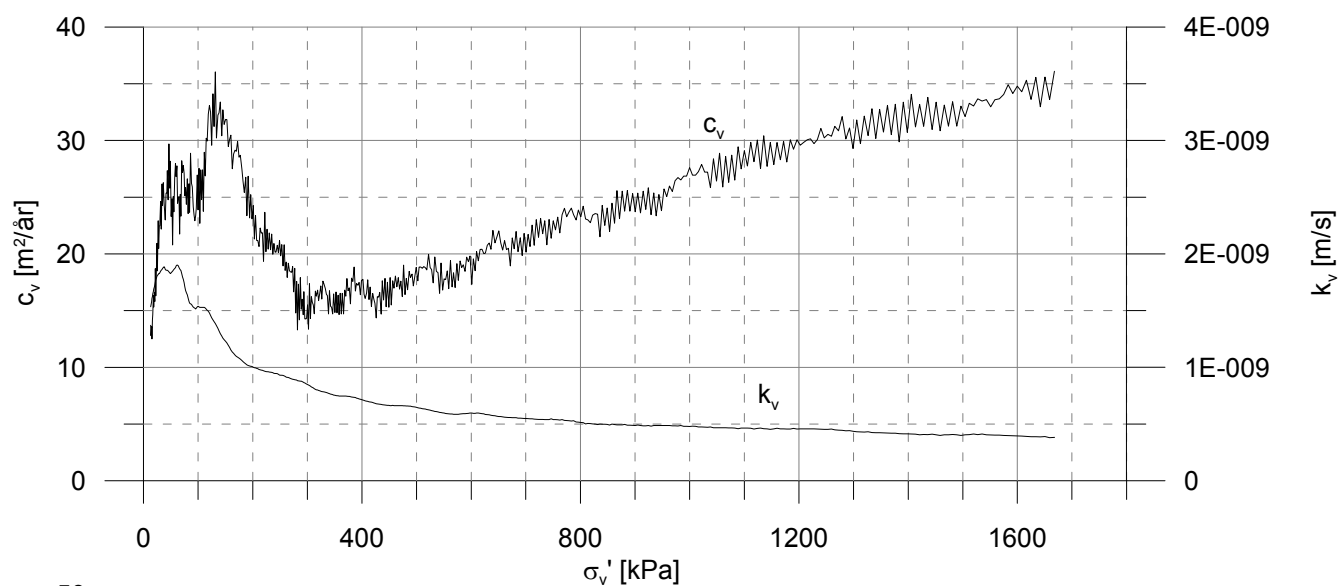
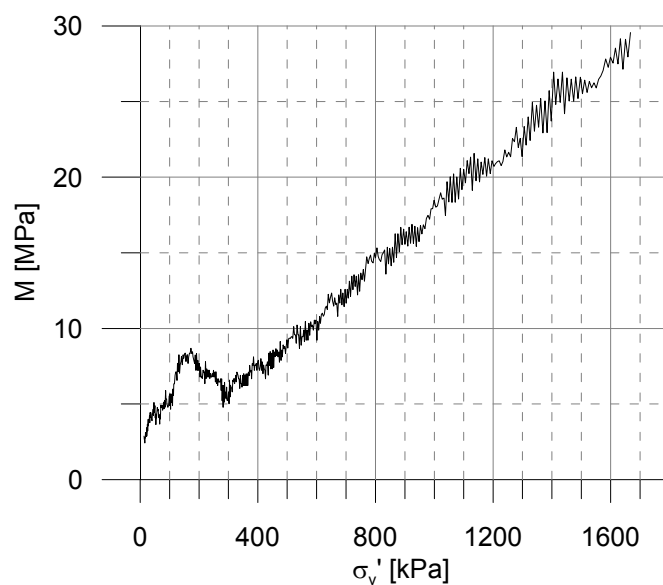
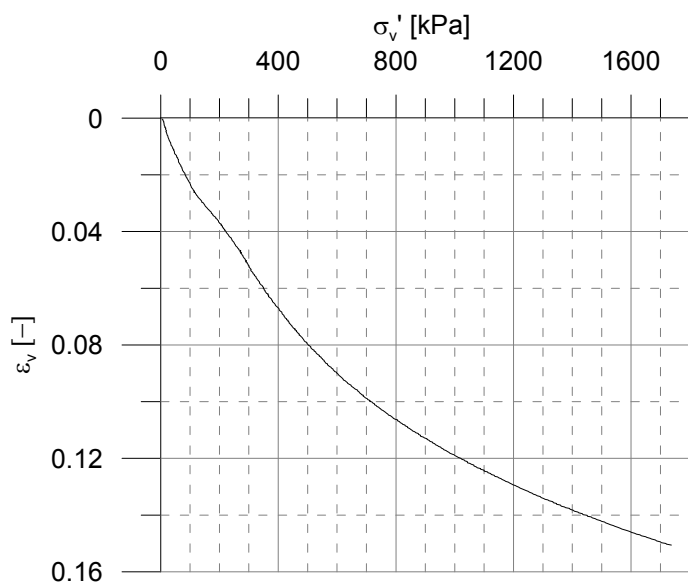
| | | | |
|---------------------------------|----------------------|------------------------------|--------------------------|
| Prosjekt: Klassifisering | Hull nr.: 1 | Hastighet: 6 mm/min | Utført av: TS |
| Prøvested: Lensvik | Dybde: 5,36 m | Forsøksdato: 19.05.11 | Tegning nr.: F3-1 |

Ødometerforsøk - CRS



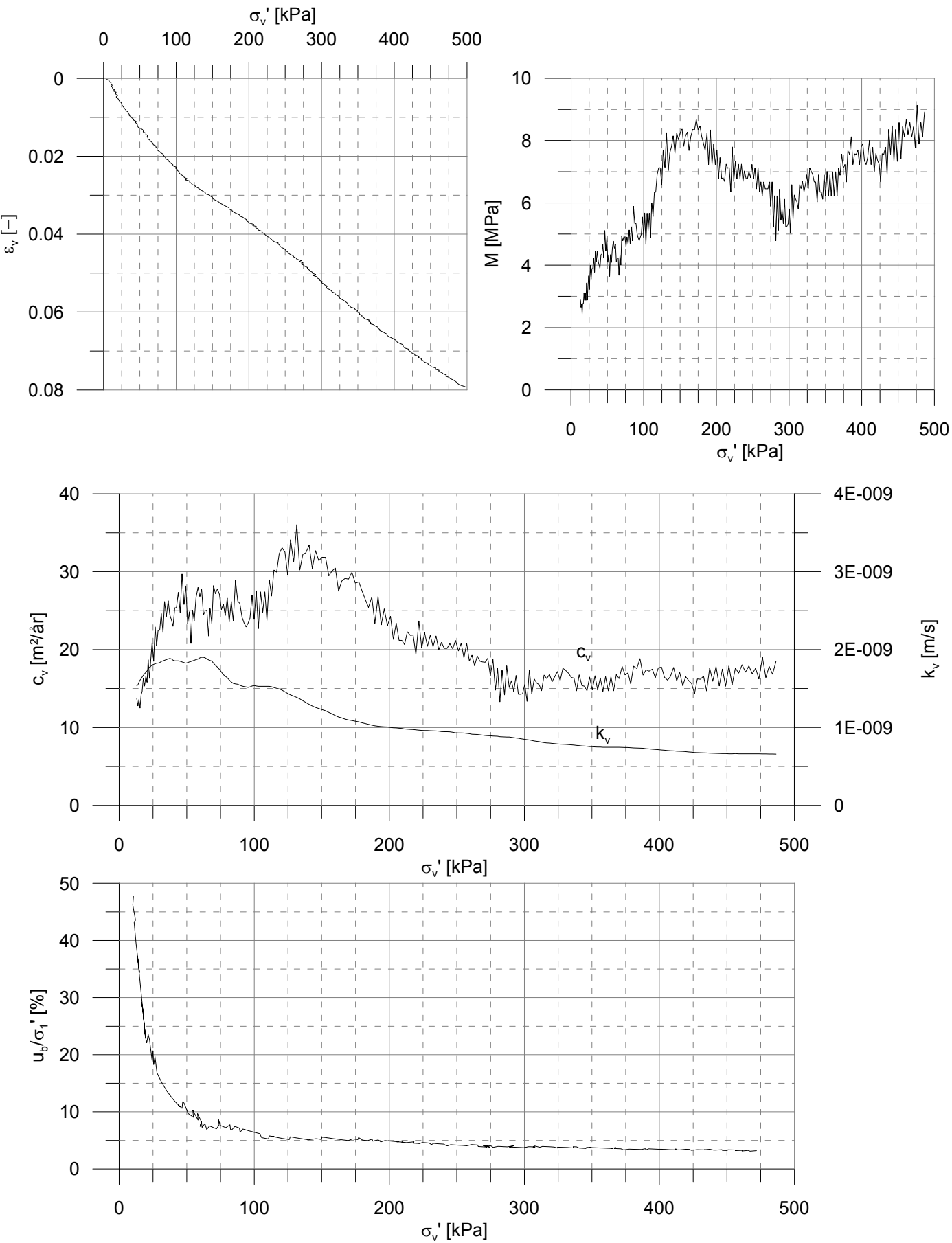
| | | | |
|--------------------------|---------------|-----------------------|-------------------|
| Prosjekt: Klassifisering | Hull nr.: 1 | Hastighet: 6 mm/min | Utført av: TS |
| Prøvested: Lensvik | Dybde: 5,36 m | Forsøksdato: 19.05.11 | Tegning nr.: F3-2 |

Ødometerforsøk - CRS



| | | | |
|---------------------------------|----------------------|------------------------------|--------------------------|
| Prosjekt: Klassifisering | Hull nr.: 1 | Hastighet: 6 mm/min | Utført av: TS |
| Prøvested: Lensvik | Dybde: 6,33 m | Forsøksdato: 16.05.11 | Tegning nr.: F4-1 |

Ødometerforsøk - CRS



| | | | |
|--------------------------|---------------|-----------------------|-------------------|
| Prosjekt: Klassifisering | Hull nr.: 1 | Hastighet: 6 mm/min | Utført av: TS |
| Prøvested: Lensvik | Dybde: 6,33 m | Forsøksdato: 16.05.11 | Tegning nr.: F4-2 |

G. Tegninger

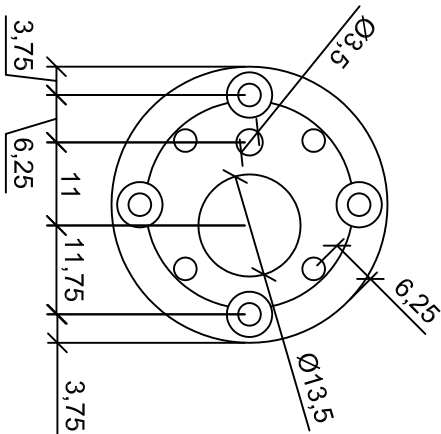
G1: Mellomstykke

G2: Beskyttelseshylse

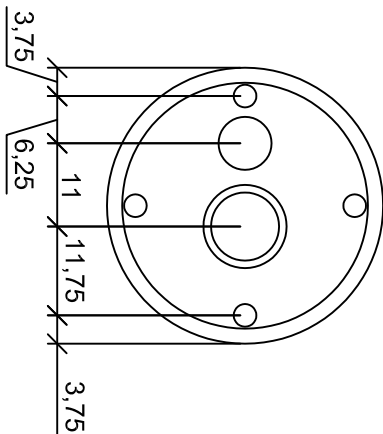
Tegning nr.: G1

Mellomstykke
Målestokk 1:1

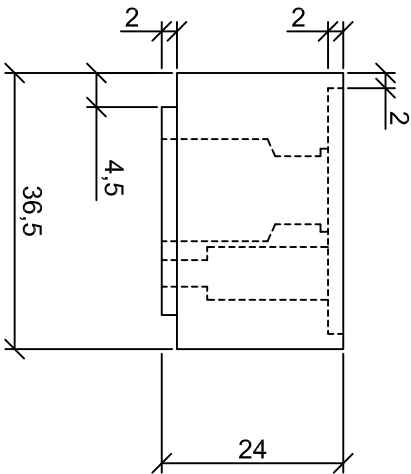
Nedenfra



Ovenfra



Fra siden



Beskyttelseshylse
Målestokk 1:1,5

Tegning nr.: G2

