



RAPPORT

Forskning og utvikling, FoU

Saltstabilisering av kvikkleire, SAK

Arbeidspakke 1: Installasjonsmetoder

Prosjekteier:

Stjørdal kommune v/ Atle Horn

Prosjektleder:

Statens vegvesen v/ Tonje Eide Helle

Arbeidspakkeleder:

Statens vegvesen v/ Tonje Eide Helle

Rapportforfattere:

Statens vegvesen v/ Tonje Eide Helle og Ole Vidar Kirkevollen
Norges Geotekniske Institutt v/ Bjørn Kristian Fiskvik Bache og Thi Minh Hue Le

Kvalitetssikrere:

Norges Vassdrags- og Energidirektorat v/ Stein-Are Strand
og Bane NOR v/ Geir Svanø

Prosjektbeskrivelse

Innovasjonsprosjektet «Saltstabilisering av kvikkleire (SAK)» har som mål å teste og utvikle en eller flere skånsomme og kostnadseffektive installasjonsprosedyrer for sikring av kvikkleireområder ved hjelp av saltbrønner. Prosjektet pågår fra høsten 2018 til utgangen av 2019, og er et samarbeid mellom Stjørdal kommune, Statens vegvesen, Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE), Bane NOR, Norges Geotekniske Institutt (NGI) og Multiconsult AS. SAK støttes av Regionale Forskningsfond Midt-Norge, og har en totalramme på 3,2 MNOK.

Saltet kaliumklorid kan brukes som et alternativ til dagens sikrings- og grunnforsterkningsmetoder i kvikkleireområder. SAK skal utvikle og teste ut ulike installasjonsprosedyrer for saltbrønner til sikring av kvikkleireområder. I tillegg vil SAK vurdere kost-/nytte og miljøgevinst av saltbrønninstallasjon som skredsikring kontra eksisterende sikringsmetoder.

Arbeidet er delt inn i tre arbeidspakker:

Arbeidspakke 1: Installasjonsmetoder

Arbeidspakke 2: Kost-/nytte og miljø

Arbeidspakke 3: Evaluering og anbefalinger

Forord

Denne rapporten omhandler Arbeidspakke 1 Installasjonsmetoder. Målsetningen med arbeidspakken er å finne skånsomme installasjonsmetoder for saltbrønner i kvikkleire. Ulike installasjonsmetoder er testet ut på National GeoTest Site Flotten i Trondheim. Denne rapporten beskriver utstyr, prosedyrer og hovedresultater fra dette arbeidet. Statens vegvesen Region sør og NGI har utført installasjonsarbeidene ved bruk av eget utstyr.

Prosjektgruppen i AP1 har bestått av:

Stjørdal kommune: Atle Horn

Statens vegvesen: Ole Vidar Kirkevollen, Eigil Haugen, Tonje Eide Helle

NVE: Stein-Are Strand

Bane NOR: Geir Svanø

NGI: Kristoffer Kåsin, Bjørn Kristian Fiskvik Bache

Multiconsult AS: Anders Gylland

Innhald

1	Innleiing		4
2	NGTS Tiller-Flotten, grunnforhold		5
3	Installasjonsarbeid		8
3.1	Monitoreringsutstyr	8	
3.2	Installasjon av saltbrønnar	10	
3.3	Ischebeck, kryssborkrone og KCl-slurry	12	
3.4	Totalsondering, kryssborkrone og KCl-slurry	16	
3.5	Totalsondering, kryssborkrone og KCl-stavar	20	
3.6	Totalsondering, KCl-kubar i miljøbrønnrør	23	
3.7	Sonicboring og KCl-slurry	25	
4	Poretrykksrespons		30
4.1	Ischebeck, kryssborkrone og KCl-slurry	30	
4.2	Totalsondering, kryssborkrone og KCl-slurry	31	
4.3	Totalsondering, kryssborkrone og KCl-stavar	35	
4.4	Totalsondering, KCl-kubar i miljøbrønnrør	37	
4.5	Sonic og KCl-slurry	38	
5	Diskusjon		41
5.1	Vurdering av installasjonsprosedyrane	41	
5.2	Poretrykksrespons	42	
5.3	Saltforbruk	42	
6	Konklusjon		44
7	Referansar		44

Teikning

Teikning nr. 001	Oversiktsteikning
Teikning nr. 010	Planteikning

Vedlegg

Vedlegg A – Teknisk notat for dissipasjonstest, 10207404-RIG-BER-001

Vedlegg B – Logg for installasjon av brønnar

Kontroll- og referanseside

1 Innleiing

Denne rapporten oppsummerar installasjonsarbeidet i samband med Arbeidspakke 1 (AP1) Installasjonsmetodar i FoU-prosjektet Saltstabilisering av kvikkleire (SAK). SAK har som mål å teste og utvikle ein skånsam og kostnadseffektiv installasjonsprosedyre for sikring av kvikkleireområder ved hjelp av saltbrønnar. Konvensjonelle sikringsmetodar av naturlege skråningar i kvikkleireterreng medfører ofte store praktiske og miljømessige utfordringar i tillegg til store kostnader. Som følgje av dette har fleire viktige offentlege utbyggingsprosjekt blitt uforholdsmessig kostbare og i enkelte tilfelle blitt skrinlagde. Tilsetjing av saltet kaliumklorid (KCl) i kvikkleire kan brukast som et alternativ til dagens sikrings- og grunnforsterkingsmetodar (Helle 2017). Metoden er veldig lovande, men det er nødvendig å utvikle prosedyrar for installasjon av saltbrønnar, samt estimere kostnader knytt til denne type sikringsarbeid.

SAK skal teste ulike installasjonsprosedyrar av saltbrønnar for sikring av kvikkleireområder. I forhold til konvensjonelle metodar vil den nye sikringsmetoden ved bruk av kaliumklorid bidra til å trygge eksisterande og ny infrastruktur utan behov for store terrenginngrep, redusere kostnader i plan- og prosjekteringsarbeid, og redusere kostnader og CO₂-utslipp knytt til sikringsprosjekta.

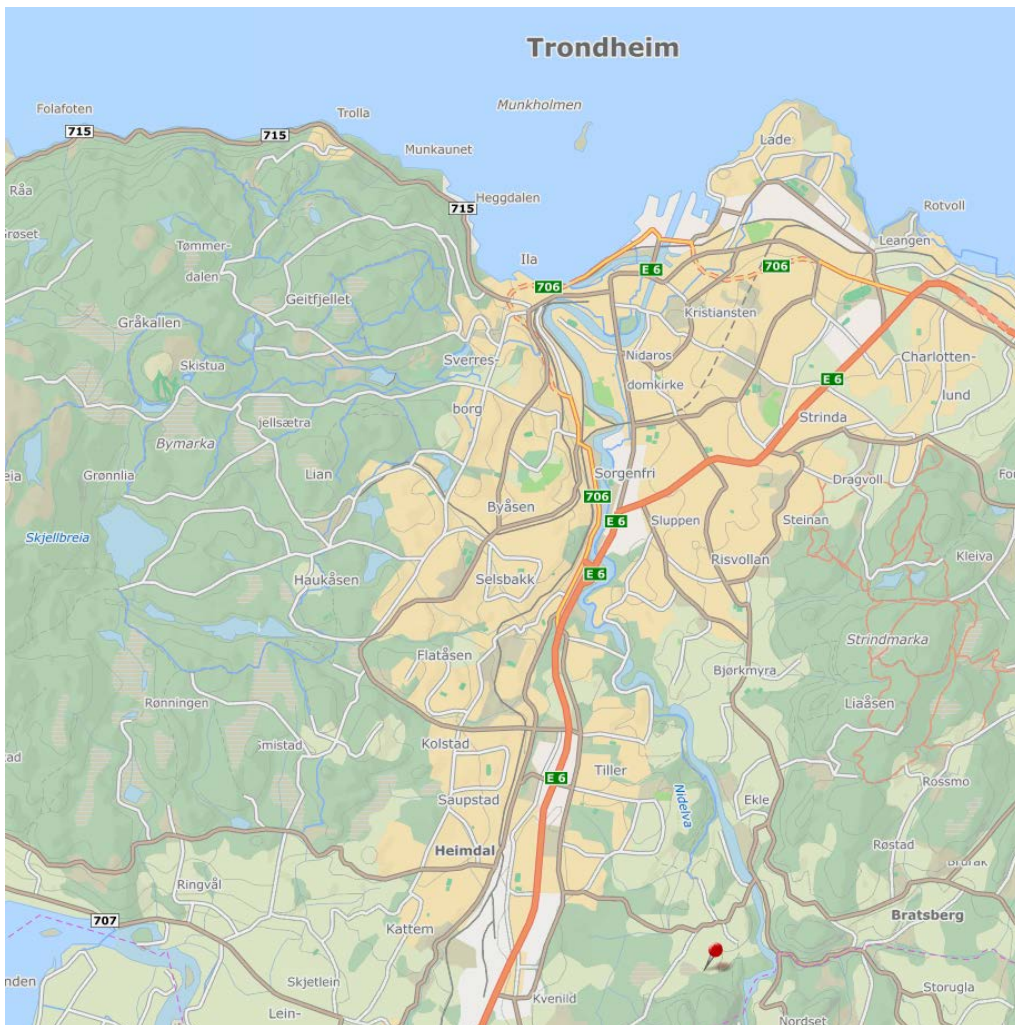
Hausten 2018 og våren 2019 blei saltbrønnar installert på forsøksfeltet Flotten (Figur 1) som blei etablert av NFR infrastruktur prosjektet Norwegian GeoTest Sites (NFR prosjekt 24650; ref. L'Heureux et al. 2016). Forsøksfeltet består av kvikkleire og blir brukt som referanseområde av industrien, offentlege byggherrar, forskingsinstitutt og akademia for å utvikle kostnadseffektive og bærekraftige løysningar innanfor sektorane bygg og anlegg, samferdsel og energi, og for å redusere farane forårsaka av klimaendringar, flaum og skred.

Stabiliteten i kvikkleireskråningar blir påverka av poretrykket. Auka poretrykk som følgje av installasjon av saltbrønnar må difor unngåast. I denne arbeidspakka er ulike installasjonsprosedyrar testa ut medan det blei utført poretrykksmålingar for å dokumentere poretrykksresponsen som følgje av installasjonane. Det blei installert til saman 21 saltbrønnar (Tabell 1). Installasjonsarbeida blei utført i samarbeid mellom Statens vegvesen Region sør, NVE, NGI og Multiconsult AS. I tillegg utførte Multiconsult AS dissipasjonstestar med CPTU i eitt borhol på NGTS Flotten. K+S Aktiengesellschaft (<http://www.k-plus-s.com/en/>) produserte samanpressa kubar med kaliumklorid (KCl) til prosjektet som Multiconsult produserte saltstavar av. Denne rapporten oppsummerar utstyr, utførte prosedyrar, erfaringar og resultat frå installasjonsarbeida.

2 NGTS Tiller-Flotten, grunnforhold

Det blei vald å installerte saltbrønnane på kvikkleirefeltet NGTS Tiller-Flotten sidan grunnforholda på feltet er godt kartlagt. NGTS Tiller-Flotten ligg på ca. 123 moh., ca. 50 m under marin grense som ligg på 175-180 moh. i Trondheimsområdet. På det kvartærgeologisk kartet er området avmerka med tjukke marine avsetjingar. Grunnundersøkingar som er utført på staden viser at grunnen består av tørrskorpeleire til ca. 2 meter under terreng (Figur 2). Deretter er det leire med låg sensitivitet over kvikkleirelaget som strekker seg frå ca. 7,5 meter til minst 20 meters djup.

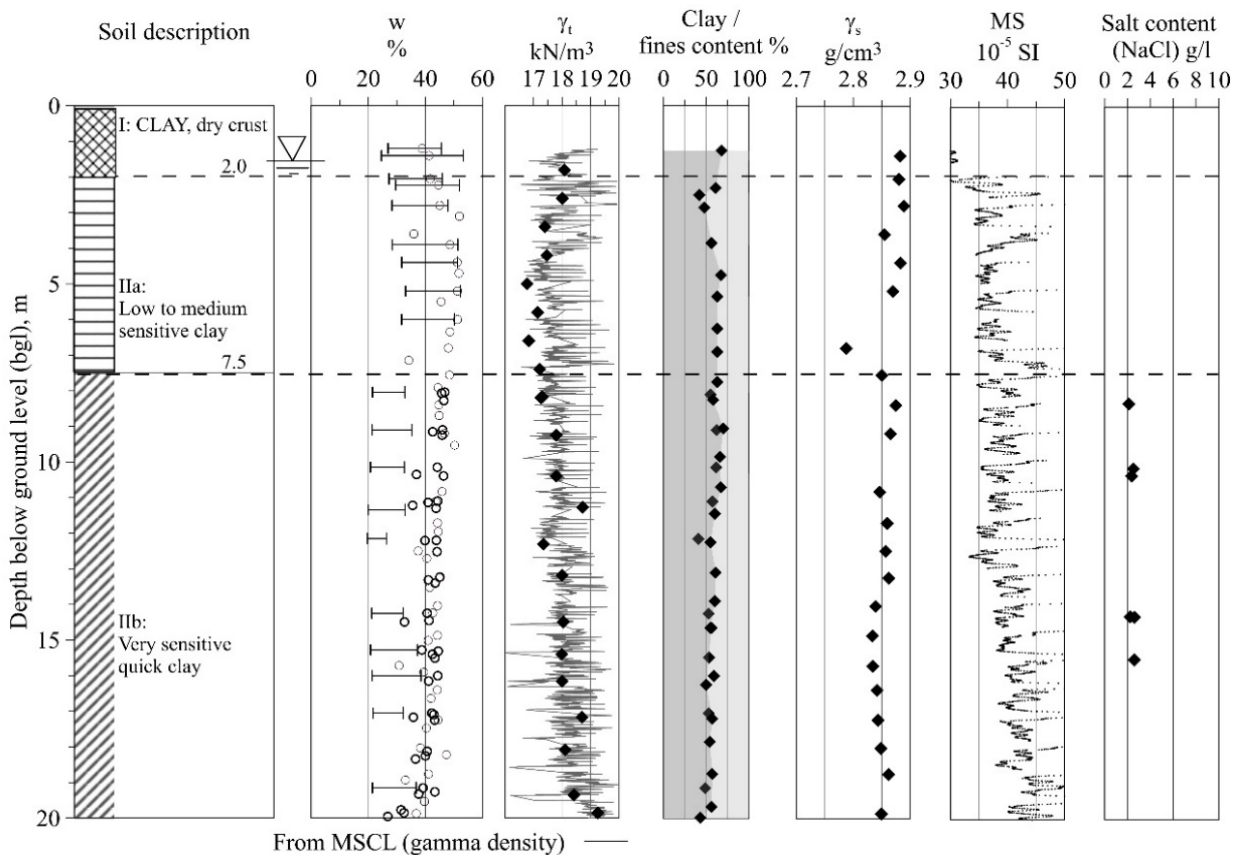
Lausmassane får 0 til 20 meter klassifiserast som leire, med leirinnhald på 40 – 70%. Per dags dato er ikkje mineralogien ferdig tolka. Resultata vil liggje føre som ein del av NGTS-resultata på eit seinare tidspunkt, men er gjengitt i figur 3. Saltinnhaldet i porevatnet i kvikkleira er på 2,1-2,6 g/L i 8 m til 16 m djup. Omrørd skjerstyrke i kvikkleira er 0,1 – 0,3 kPa kPa. Vassinnhaldet i leira er 35 – 46 % frå 8 m til 20 m djup. Plastisitetsindeksen varierer frå ca. 7% til 17% frå 8 – 20 m. Korndensiteten varierer frå 2,84 til 2,89 g/cm³. Skjerstyrken tolka frå udrenerte treaksialforsøk i leira er ca. 30 kPa ved terreng, tilnærma lineært aukande til 120 kPa ved 20 meters djup. Leira er noko overkonsolidert med ein OCR tolka frå kontinuerlege ødometerforsøk (CRS) på 2,9 ved 8 m djup og 1,6 ved 20 m djup.



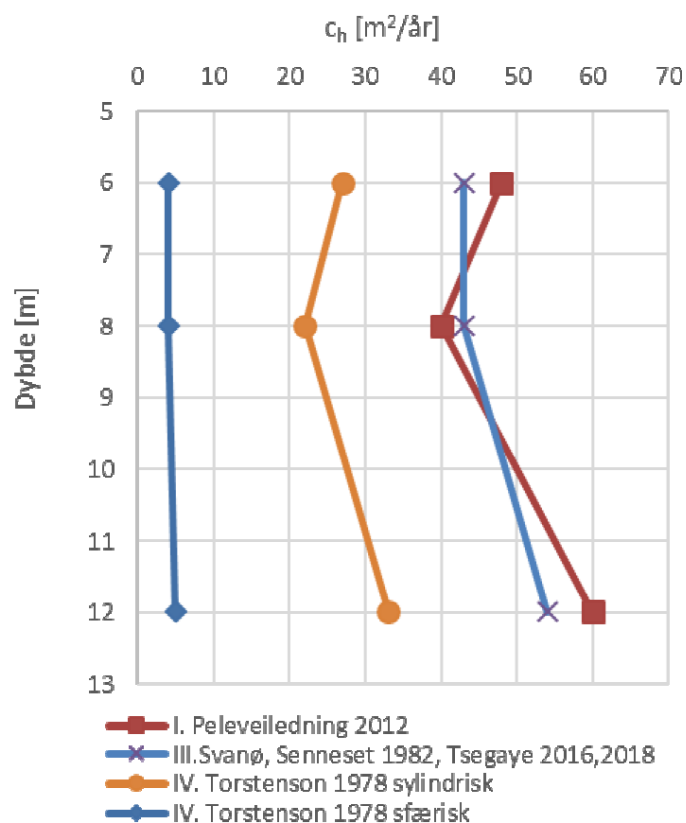
Figur 1 NGTS Tiller-Flotten er markert med raud nål nedst til høgre i oversiktskartet

Tabell 1 Oversikt over installasjonsprosedyrar, tidsrom og utførande verksemd. SW = salt well (saltbrønn).

Metode	Veke/år	Mengd	Verksemd	Saltbrønn nr.
Ischebeck-stag, kryssborkrone og KCl-slurry	48/2018	4	Statens vegvesen og NVE	SW1, SW2, SW3, SW4
Totalsondering, kryssborkrone og KCl-slurry	13 og 14/2019	5	Statens vegvesen	SW17, SW18, SW19, SW20, SW22
Naverboring KCl-slurry	14/2019	1	Statens vegvesen	SW21 (mislykka)
Totalsondering, kryssborkrone og KCl-stavar	13 og 14/2019	4	Statens vegvesen	SW11, SW12, SW13, SW14
Totalsondering, kryssborkrone og KCl-kubar i miljøbrønner	14/2019	1	Statens vegvesen	SW15
Sonic, leirkrone og KCl-slurry	14 og 15/2019	6	NGI	SW5, SW6, SW7, SW8, SW9, SW10



Figur 2 Jordartsklassifisering og geotekniske parameterar på NGTS Tiller-Flotten. Frå ref. [1]



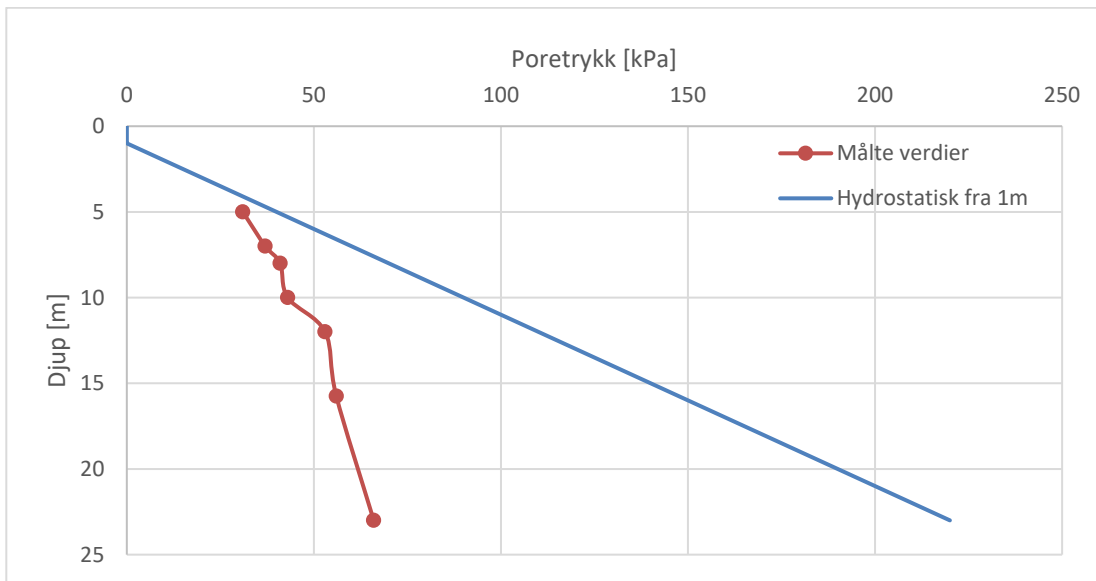
Figur 3 Tolking av resultat frå dissipasjonstestar på forsøksfeltet ref. [2].

Multiconsult AS utførte dissipasjonstestar ved hjelp av CPTU på 6 m, 8 m og 12 m djup (vedlegg A, [2]). Tolking av desse forsøka er vist i Figur 3. Horisontal konsolideringskoeffisient (c_h) varierer frå ca. 5 – 60 $m^2/år$. Vertikal konsolideringskoeffisient (c_v) tolka frå ødometerforsøk varierer frå 3 – 12 $m^2/år$ ref. [3]. Den horisontale konsolideringskoeffisienten er dermed noko høgre enn den vertikale, noko som er forventa grunna horisontale lag i grunnen.

Det er installert fleire poretrykksmålarar på NGTS Tiller-Flotten (målar nr. TIOPI# i Tabell 2). Grunnvasstanden i området ligg på ca. 1 m under terreng, og poretrykket er under hydrostatisk. For å overvake poretrykket ved installasjon er det installert fleire poretrykksmålarar ved 8 og 12 meters djup. Gjennomsnittleg poretrykk før installasjon er ca. 41 kPa og 53 kPa på høvesvis 8 og 12 m djup. Poretrykk før og etter installasjon er vist i Figur 4.

Tabell 2 Målt poretrykk i NGTS Tiller-Flotten sine poretrykksmålarar og målarane installert for SAK.

NGTS Tiller-Flotten målarar			Målarar installert for SAK	
Målar nr.	Djup (m)	Poretrykk (kPa)	Djup (m)	Poretrykk
TILPI05	5,00	31		
TILPI06	7,00	37	8	41
TILPI03	10,00	43	12	53
TILPI04	15,75	56		
TILPI07	23,00	66		



Figur 4 Målte verdier for poretrykk samanlikna med hydrostatisk poretrykk frå ein meter under terreng

3 Installasjonsarbeid

3.1 Monitoreringsutstyr

Installasjonseffektane av installasjonsarbeida blei overvaka ved hjelp av poretrykksmålingar. I november 2018 installerte NGI og Statens vegvesen Region sør 8 stk. Geotech PVT piezometer på NGTS Tiller-Flotten. Desse blei installert i fire «stasjonar» med to piezometer i kvar stasjon plassert med innbyrdes avstand på 0,5 m. I kvar stasjon blei ein poretrykksmålar installert på 8 m djup og ein på 12 m djup. For å ha kontroll på horisontalavvik blei det forbora med å presse ned ein A.P. van der Berg CPTU sonde ned til 6 m og 10 m djup. Desse sondane har inklinometer i to retningar slik at horisontalavviket i djupet kan bestemast. Piezometera blei installert i desse borhola, og pressa ned dei to siste meterane.

Tabell 3 Koordinatar for pvt-målarar ved terreng og i 6 og 10 m djup. EUREF 89 UTM 32.

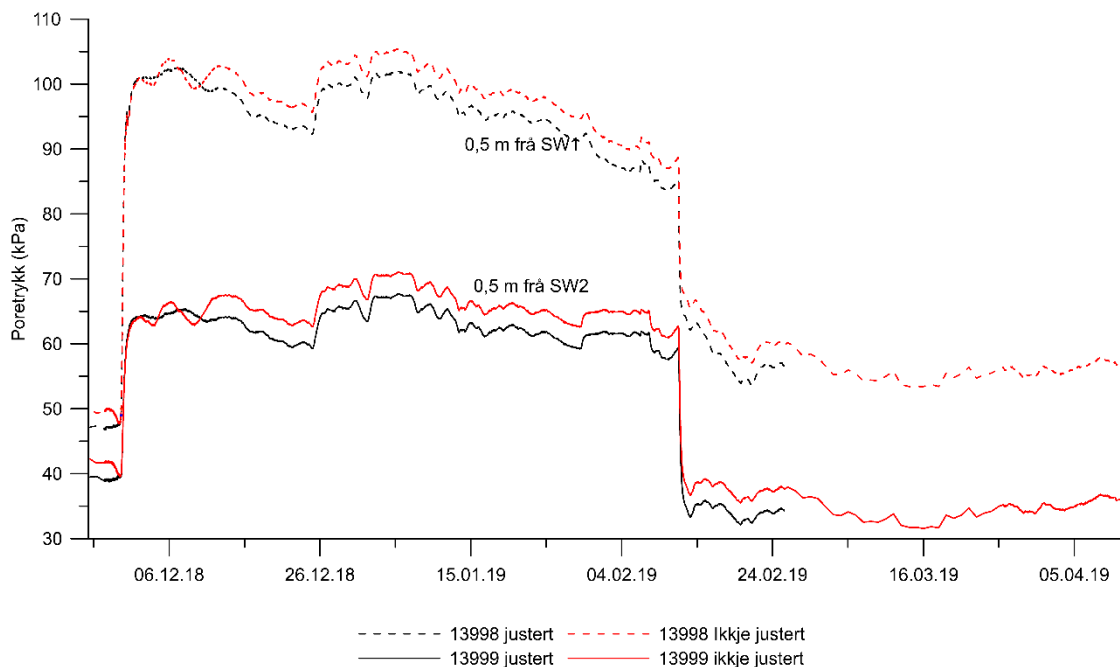
Målernr.	Djup spiss	Koordinat terreng		Djup CPTU	Koordinat spiss minus 2 m	
		Nord	Øst		Nord	Øst
13999	8	7023858.012	571115.816	6	7023858.047	571115.765
13998	12	7023857.742	571116.234	10	7023857.822	571116.266
15041	8	7023862.310	571118.412	6	7023862.354	571118.376
13996	12	7023862.033	571118.834	10	7023862.071	571118.907
15039	8	7023866.596	571120.958	6	7023866.595	571120.955
15040	12	7023866.296	571121.376	10	7023866.246	571121.392
15004	8	7023870.898	571123.512	6	7023870.957	571123.500
15038	12	7023870.587	571123.925	10	7023870.734	571124.044
15204	12	7023854.770	571106.035	10	7023854.828	571106.113
15205	8	7023855.216	571105.126	6	7023855.271	571105.095
15202	12	7023858.393	571108.799	10	7023858.293	571108.861
15203	8	7023858.978	571107.976	6	7023858.966	571107.966
15179	12	7023862.422	571111.914	10	7023862.427	571111.990
15180	8	7023862.876	571111.080	6	7023862.931	571111.036

For å betre kunne overvake poretrykksresponsen av enkeltinstallasjon av saltbrønnane, blei det i februar 2019 installert ytterlegare 6 stk. Geotech PVT piezometer. Desse blei installert av Multiconsult AS og Statens vegvesen Region sør på same måte som dei førre piezometera i tre stasjonar à to piezometer, men med innbyrdes avstand på 1,0 m.

Saltbrønnane blei plassert i avstandar på 0,5 og 1,0 m frå piezometera i forhold til koordinatane rekna ut basert på horisontalavvika målt med CPTU på 6 og 10 m djup (Tabell 3). Poretrykksmålarane blei stilt inn på å registrere kvart minutt under installasjon og døgnet etter installasjon. I dagane etter blei målarane stilt inn på å logge kvar time. Utover dette blei poretrykket logga ein gong i døgnet. Nokon av målarane manglar data i logginga. Dette er:

- ↗ 13996 manglar data frå 08.04 kl. 08:05 til 09.04 kl. 12:19
- ↗ 15041 manglar data frå 08.04 kl. 08:04 til 10.04 kl. 00:18
- ↗ 15179 manglar data frå 08.04 kl. 08:31 til 09.04 kl. 23:46
- ↗ 15180 manglar data frå 10.04 kl. 11:55 til 11.04 kl. 09:15

I denne rapporten er poretrykket blitt justert for barometrisk trykk for første installasjonsrunde utført med Ischebeck-stag i november 2018. Poretrykksdata for øvrige installasjonar er ikkje justert for barometrisk trykk. Barometrisk trykk i perioden 11.02.2019 til 12.04.2019 varierte med 5,2 kPa, frå 96,4 til 102,2 kPa. Saltbrønnane våren 2019 blei installert i veke 13-15. I veke 13 varierte barometrisk trykk med 1,7 kPa, i veke 14 med 1,5 kPa og i veke 15 med 1,9 kPa. Den relative forskjellen i poretrykksrespons er dermed lite påverka av om poretrykket er justert for barometrisk trykk eller ikkje (Figur 5).



Figur 5 Samanlikning av poretrykk justert for (svarte kurver) og ikkje justert for barometrisk trykk (raude kurver).

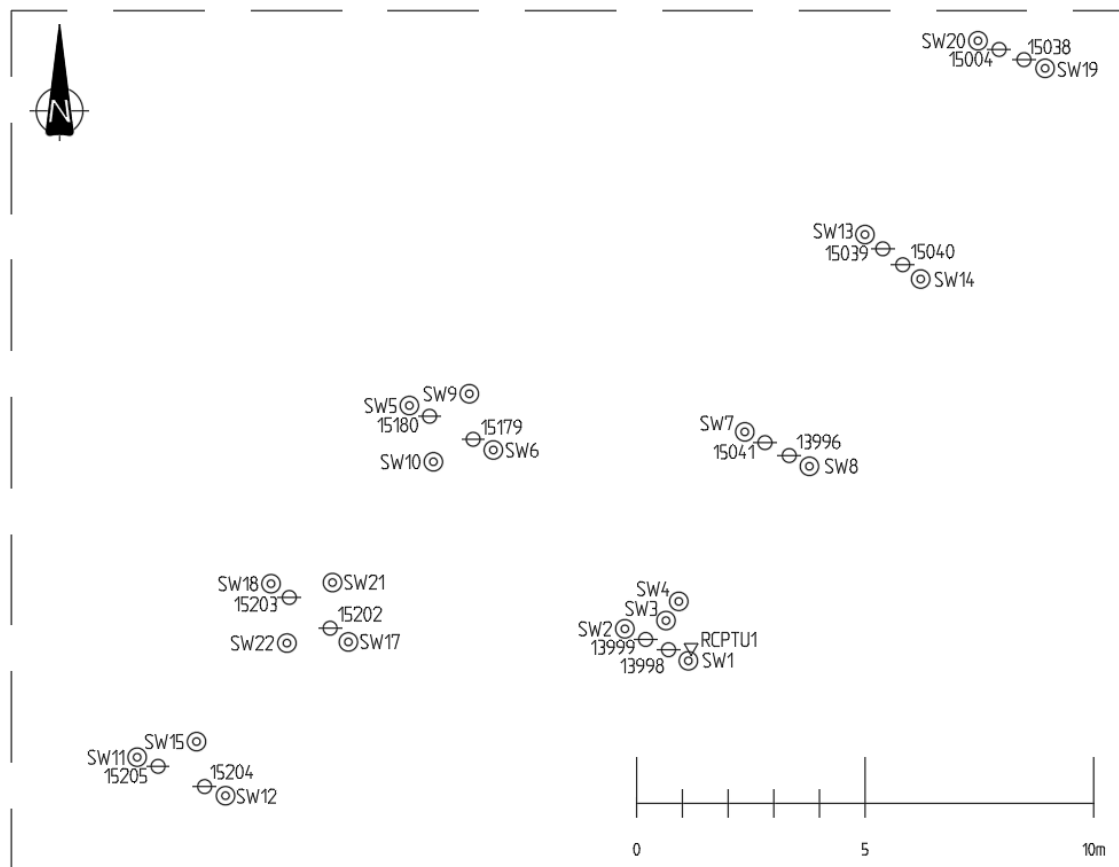
3.2 Installasjon av saltbrønner

Det blei totalt installert til saman 21 stk. saltbrønner (Tabell 4 og Figur 6). I november 2018 blei dei fire første saltbrønnane (SW1-SW4) installert i samarbeid mellom Statens vegvesen Region sør og Noregs Vassdrags- og Energidirektorat ved hjelp av Geotech boretårn påmontert gravemaskin. I mars/april 2019 blei 11 brønner installert med Statens vegvesen Region sør sin grunnboringsrigg. NGI installerte til saman 6 stk. brønner ved hjelp av Sonic borerigg. Alle brønnane blei forbora ved å bruke spyleboring med bruk av ulike borkroner, rotasjon og synkhastighet. Arbeidet med installering av brønnane blei logga. Disse resultatane er vist i vedlegg B.

Kaliumklorid (KCl) blei enten pumpa ned i brønnen saman med vatn (KCl-slurry) via borestrengen (SW1-SW4), via peleslange (SW5-SW10, SW17-SW22), eller som samanpressa tørt salt (SW11-SW15).

KCl-slurrien må vere under konstant omrøring frå produksjon til den blir pumpa ned i borholet. Dersom omrøringa stoppar opp, så fell saltet til botnen i blandekaret. Saltet er tungt og blir veldig fast når det er sedimentert. Det må difor brukast mykje kraft for å få massane i sirkulasjon igjen. Dette medfører også stor risiko for at slurrien klumpar seg saman og tettar igjen borestreng og slangar ved stopp under produksjonen før saltbrønnen er heilt ferdig. Sidan det er vanskeleg å få saltslurrien i sirkulasjon igjen, så kan slike produksjonsstopp medføre at saltbrønnen ikkje blir installert til ønska djup.

Figur 6 Plassering av poretrykksmålarar og saltbrønner. Koordinatane for poretrykksmålarane er korrigert for horisontalavvik på 6 og 10 m djup (Tabell 3).



Det er ønskeleg å få mest mogleg salt nedi brønnen og minst mogleg vatn. Dermed må KCl-slurryen vere tjukkast mogleg. For å lage KCl-slurry på staden blei det brukt ei skruepumpe (MAI-pumpe) med ein skrue i blandekaret der tørrstoffet blei helt oppi (Figur 7). Vatn tilsetjast i enden av skruen slik at salt og vatn blandast og pumpast direkte ut. KCl-slurryen blei produsert på staden ved å helle tørt KCl frå 25-kg sekkar ned i skruen i MAI-pumpa. Mengde vatn blei justert ved å justere strøymingshastigheita. Tjuknaden på slurryen blei justert ved kor mykje og kor raskt KCl blei helt nedi skruen. Kom det for mykje salt nedi skruen i forhold til kor mykje som blei spylt ut, så stoppa skruen. Det kunne då bli stopp i produksjonen, og vanskeleg/tidkrevjande å komme i gang igjen. Operatøren måtte dermed lytte til korleis pumpa gjekk og justere hellinga av salt deretter.

Tabell 4 Koordinatar og installasjonsdato for saltbrønnane installert av Statens vegvesen Region sør. EUREF 89 UTM32. Under installasjonsdato er det angitt dato for installasjon av brønn/dato for tetting med bentonitt.

Metode og brønn nr.	Koordinat terreng		Installasjonsdato
	Nord	Øst	
Ischebeck, kryssborkrone og KCl-slurry			
SW1	7023857.58	571116.70	29.11.2018/11.02.2019
SW2	7023858.28	571115.31	29.11.2018/11.02.2019
SW3	7023858.46	571116.21	29.11.2018/11.02.2019
SW4	7023858.88	571116.49	29.11.2018/07.02.2019
Sonic, leirkrone og KCl-slurry			
SW5	7023863.16	571110.59	03.04.2019
SW6	7023862.19	571112.43	03.04.2019
SW7	7023862.58	571117.93	08./09./10.04.2019
SW8	7023861.83	571119.34	09./11.04.2019
SW9	7023863.42	571111.90	09./10.04.2019
SW10	7023861.93	571111.12	09./10.04.2019
Totalsondering, kryssborkrone og KCl-stavar			
SW11	7023855.47	571104.63	27.03.2019
SW12	7023854.62	571106.57	27.03/02.04.2019
SW13	7023866.90	571120.56	03.04.2019
SW14	7023865.93	571121.78	03.04.2019
Totalsondering, KCl-kubar i miljøbrønnrør			
SW15	7023855.812	571105.936	04.04.2019
Totalsondering, kryssborkrone og KCl-slurry			
SW17	7023857.99	571109.25	26.03.2019
SW18	7023859.26	571107.56	26.03.2019
SW19	7023870.54	571124.50	03.04.2019
SW20	7023871.14	571123.03	04.04.2019
SW21 (75 mm naver)	7023859.29	571108.91	02.04.2019
SW22	7023857.96	571107.91	02.04.2019



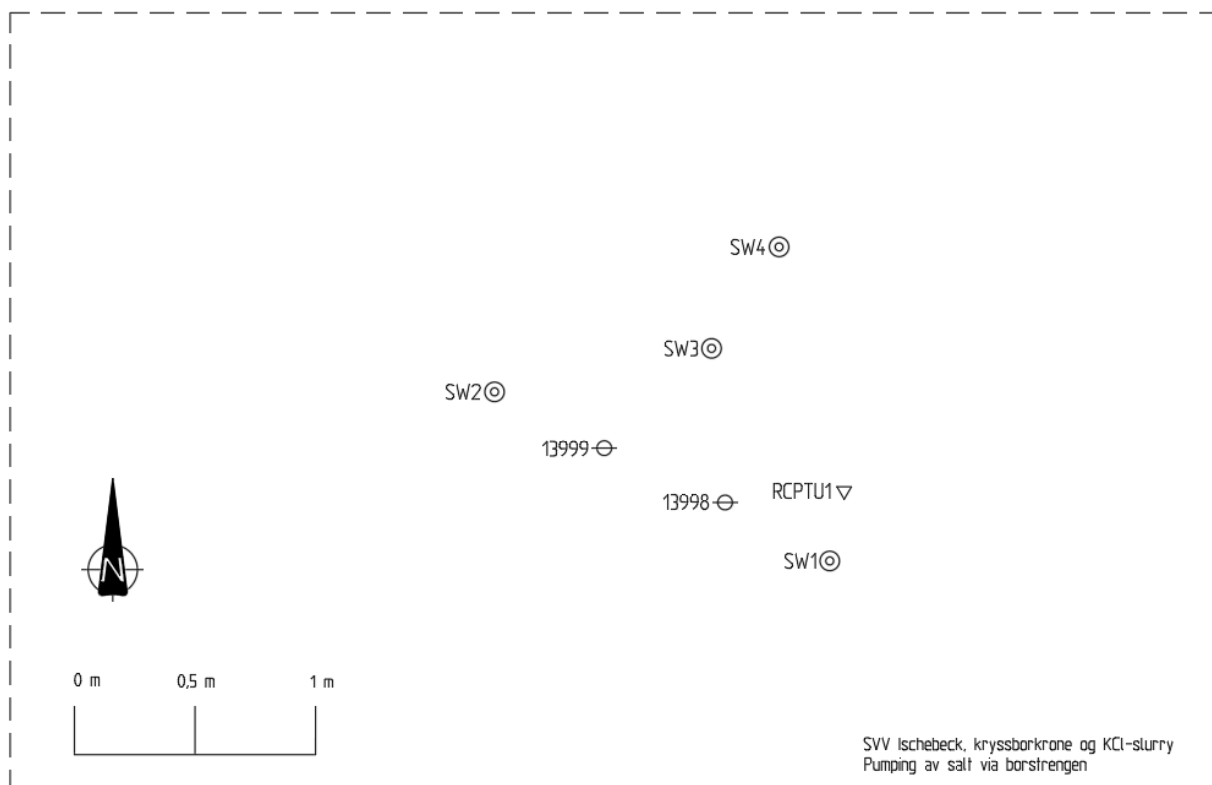
Figur 7 Tørt salt hellast ned i skruen i MAI-pumpa og blandast med vatn på veg ut av pumpa (nedst til venstre).

3.3 Ischebeck, kryssborkrone og KCl-slurry

I november 2018 installerte Statens vegvesen Region sør og Noregs Vassdrags- og Energidirektorat fire stk. saltbrønner (Figur 8) ved hjelp av Geotech boretårn påmontert gravemaskin (Figur 9). Saltbrønn SW1-SW3 blei installert 0,5 m frå poretrykksmålarene 13998 og 13999, og SW4 1 m frå poretrykksmålarene. Brønnane blei installert ved å spylebore ned til 25 m djup for så å fylle borholet med KCl-slurry gjennom borstrengen (Figur 10).

3.3.1 Utstyr

- ↗ Geotech boretårn for gravemaskin
- ↗ Gravemaskin Caterpillar 134C
- ↗ Adapter for å spyle saltslurry direkte inn i borestreng for å unngå å køyre saltslurrien i pumpa på riggen (Figur 10)
- ↗ Kryssborkrone drill drain Ø90 med 19 mm spylehol (Figur 11a)
- ↗ Ischebeck stag: Titan drill drain 40/27
- ↗ 1 m 110 mm PVC-røyr som foringsrøyr i toppen
- ↗ MAI-pumpe NT400 (Figur 7)
- ↗ Aggregat til MAI-pumpe QAS20
- ↗ Honda VX15 pumpe med sandfilter (Figur 11b)
- ↗ 25 kg sekkar med KCl
- ↗ Vatn
- ↗ Bentonittpellets



Figur 8 Plassering av SW1-SW4 rundt poretrykksmålarane 13998 og 13999. Koordinatane for poretrykksmålarane er justert for horisontalavvik på 6 og 10 m djup (Tabell 3).



Figur 9 Gravemaskin med bortårn



Figur 10 Installasjon av saltbrønn med bortårn. Borstrengen er påmontert eit adapter (raudt) for tilførsel av salt for å unngå at saltet går gjennom pumpa på riggen.



Figur 11 a) Kryssborkrone drill drain $\varnothing 90$ med 19 mm spylehol. b) Honda VX15 og sandfilter for pumping av vatn ned til 6-8 m djup.

3.3.2 Prosedyre

- ↗ Slo ned 1 m med 110 mm PVC-røyr for å lettare kunne sjå massane som kom opp til overflata
- ↗ Forbora med Ischebeck-stag påmontert kryssborkrone ned til ønska djup
- ↗ Spylte med vatn under heile boringa
- ↗ Rømme holet frå 23-25 m for å få opp mest mogleg massar
- ↗ Plasserte borkrone 0,5 m over botn av holet og spylte saltslurry ned gjennom borstrengen til salkrystallar kom ut på terrengoverflata.
- ↗ Brukte flow 1080 l/time på MAI-pumpa for brønn 1-3. Saltslurrien blei for tynn. Reduserte flow til 600 l/time i brønn 4. Blei stopp i pumpa og slurrypumpinga måtte avsluttast då det ikkje var mogleg å få til gjennomstrøyming av saltslurry lenger.

3.3.3 Erfaringar

Ved å køyre MAI-pumpa med ein flow på 1080 l/time blei mykje av saltet vaska ut på terrengoverflata. Dette blei gjort for borhol SW1, SW2 og SW3. Det var svært vanskeleg å ha kontroll på kor mykje salt som hamna i brønnen og kor mykje som blei spylt ut på overflata. Metoden med å spyle KCl-slurrien gjennom borestrengen er svært sårbar for at saltet skal plugge seg. Dersom dette skjer, må borestrengen trekkast opp og installasjonen kan ikkje fullførast. Flowen på MAI-pumpa blei likevel justert ned til 600 l/time i SW4. Pumpinga av salt blei stoppa då det kom saltkrystallar ut på terrengoverflata. Då det var usikkert om det var tilstrekkeleg med salt i brønnen, blei det forsøkt å pumpe meir salt ned gjennom borestrengen. Dette var ikkje mogleg.

Grunnvassnivået på NGTS er på ca. 1 m djup. Likevel er poretrykket underhydrostatisk på 6 og 12 m djup. Ved boring blei det ståande ei vassøyle i borholet som medførte høgare poretrykk enn opphavleg. Dermed blei det avgjort å først helle tørt salt nedi brønnane for å få ei «fast saltsøyle» opp til 8 m under terreng, deretter pumpe ut vatnet frå brønnane ned til ca. 8 m djup og tette med bentonitt. 29. januar 2019 blei det fylt på meir salt ved å helle tørt KCl nedi SW2 og SW3. NTNU Geoteknikk pumpa ut vatn og fylte i bentonittpellets i midten av februar 2019. Poreovertrykket blei raskt redusert. Fordelar og ulemper med metoden er summert opp i Tabell 5.

Tabell 5 Fordelar og ulemper med installasjonsprosedyren Ischebeckstag, kryssborkrone og KCl-slurry.

Fordelar	Ulemper
Rask metode	Har ikkje kontroll med kor mykje salt som hamnar i brønnen og kor mykje som blir spylt ut på terrengoverflata
Moglegheiter for å komme til i vanskeleg terreng ved bruk av gravemaskin.	Vanskeleg å få til tjukk KCl-slurry pga. fare for å proppe systemet
	Poretrykksauke pga. vassøyle i borholet
	Sårbar for at installasjonsarbeid ikkje kan fullførast
	Ressurskrevjande i og med at det bør vere 3 personar for å kunne jobbe effektivt

3.4 Totalsondering, kryssborkrone og KCl-slurry

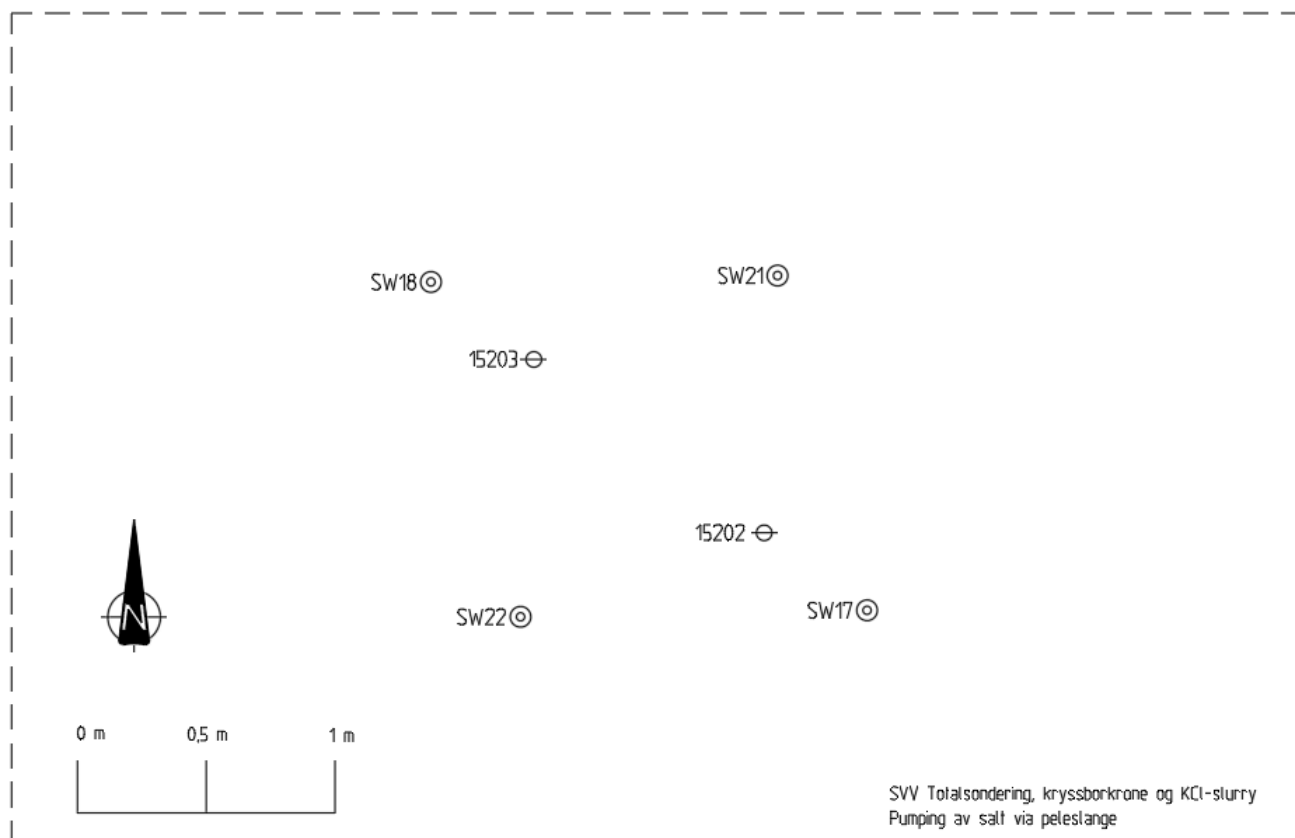
Statens vegvesen Region sør installerte nye brønner med KCl-slurry i mars/april 2019. SW17 og SW18 blei installert 0,5 m og SW22 1,0 m frå poretrykksmålar 15202 og 15203 (Figur 12). SW19 og SW20 blei installert 0,5 m frå poretrykksmålar 15004 og 15038 (Figur 13).

For å redusere risikoen for at saltet proppa systemet, og for å kunne pumpe ned ein tjukkare KCl-slurry, så blei SW17-SW20 og SW22 forbora ved å spylebore med totalsonderingsstenger og kryssborkrone for deretter å pumpe ned ein tjukk KCl-slurry gjennom ein armert peleslange med stor diameter (32 mm) (Figur 14). Etter fylling med salt, blei vatnet pumpa ut av borholet ned til 6-8 m djup, og holet tetta med bentonitt. Det blei forsøkt å tette borhola med bentonittstavar. Desse brukar lang tid på å svelle, og det var uvisst kva nivå bentonittstavane hamna på. Prosedyren blei dermed gjort om til å føre 63 mm miljøbrønnerør ned til ca. 8 m og helle bentonittpellets gjennom røret for å sikre at bentonitten tetta frå 8 m djup og til minimum 3 m djup. Bentonittstavar blei putta nedi dei øvre par meterane i nokre av borhola for å spare på pelletsen.

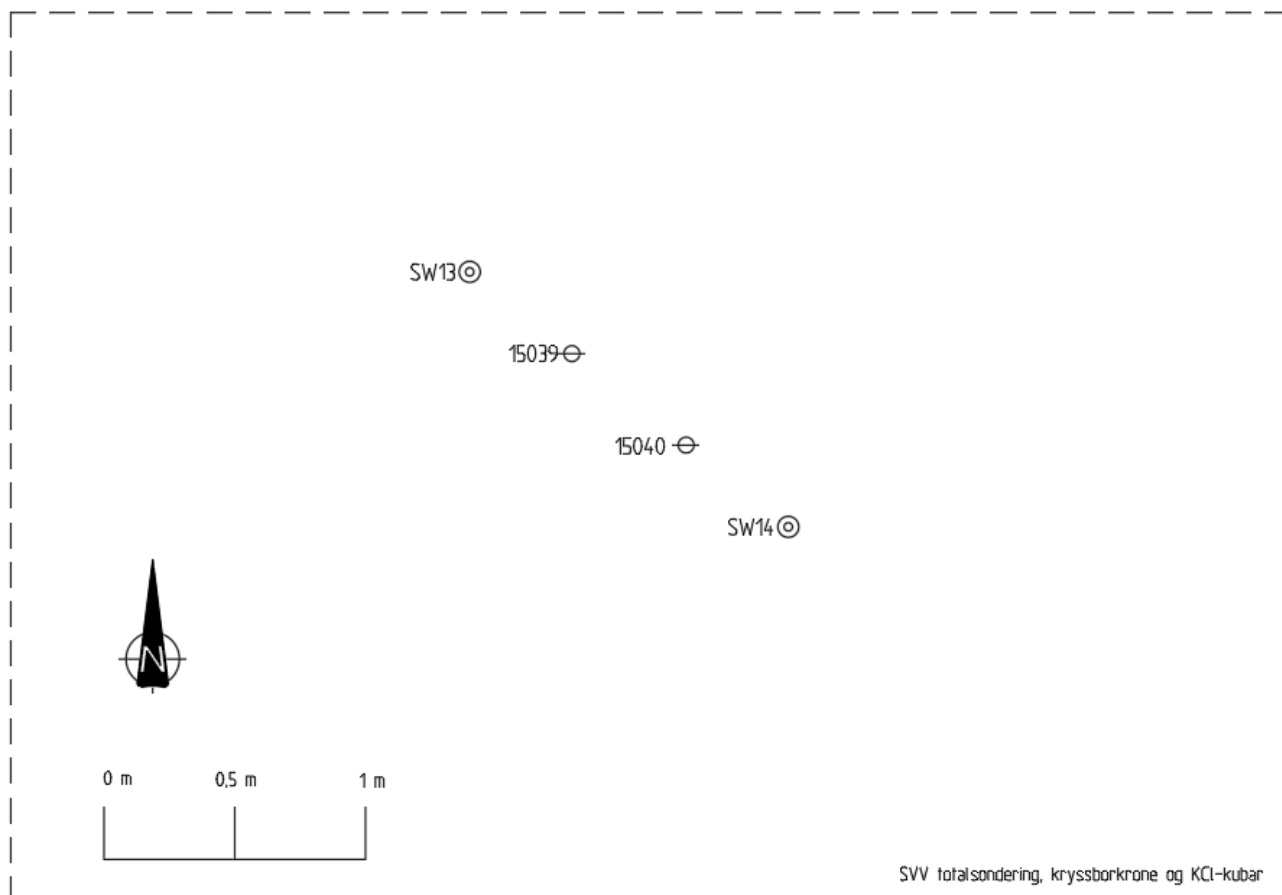
Under forboringa viste det seg etter kvart at vatnet tok andre vegar i toppmassane enn opp gjennom borholet. Dette blei spesielt tydeleg ved installasjon av SW11 og SW12 (avsnitt 3.5). Ved installasjon av SW19, SW20 og SW22 blei det difor satt ned 110 mm PVC-rør i dei øvre 3 m, i det følgjande omtalt som foringsrør.

Mesteparten av massane ned til 8-10 m djup kom opp av borholet. Ved større djup kom det stort sett tyntflytande slam opp av borholet. Det var tydeleg at alle massane ikkje kom opp av borholet. I eit forsøk på å få opp meir massar frå større djup, blei SW21 forbora ved å navre med 75 mm naver. Dette forsøket var mislykka i og med at det virka som naveret fekk større horisontalavvik enn totalsonderingsstengene, og naveret dermed kom borti poretrykksmålarane. Det virka også som om borholet kollapsa. Denne brønne blei dermed ikkje fylt med KCl-slurry.

SW17 og SW18 blei forbora med same synk og rotasjon som tradisjonelle totalsonderingar, det vil seie ein synk på 300 cm/min og rotasjon på 25 omdreiingar per minutt (rpm). Synk blei halvert til 155-160 cm/min og rotasjonen auka til 125-128 rpm i SW19. Mindre synk og større rotasjon førte til at det kom meir massar opp frå borholet. Rotasjonshastigheita på 125-128 rpm og synk på 160 cm/min blei også brukt under forboring av SW13, SW14, SW15 og SW20 (sjå avsnitt 3.5).



Figur 12 Plassering av SW17, SW18 og SW22 og poretryksmålarane 15202 og 15203. Koordinatane for poretryksmålarane er justert for horisontalavvik på 6 og 10 m djup (Tabell 3).



Figur 13 Plassering av SW19 og SW20 og poretryksmålarane 15004 og 15038. Koordinatane for poretryksmålarane er justert for horisontalavvik på 6 og 10 m djup (Tabell 3).



Figur 14 KCl-slurry blei pumpa ned i borholet via ein armert slange med diameter 32 mm.

3.4.1 Utstyr

- ↗ GeoMachine GM8 grunnboringsrigg
- ↗ Totalsonderingsstenger
- ↗ Kryssborkrone drill drain Ø90 med 19 mm spylehol
- ↗ MAI-pumpe NT400
- ↗ Aggregat til MAI-pumpe QAS20
- ↗ Armert slange (Codaspring) Ø32 mm med påmontert 1,5 m ståltupp Ø32 mm
- ↗ 25 kg sekkar med KCl
- ↗ Vatn
- ↗ 110 mm PVC-røyr som foringsrøyr i øvre 3 m (berre brukt i SW19, SW20 og SW22)
- ↗ 75 mm naver (berre brukt i SW19, SW20 og SW22)
- ↗ Honda VX15 pumpe med sandfilter (Figur 11b)
- ↗ Bentonitt pellets og stavar

3.4.2 Prosedyre

- ↗ Navre med 75 mm naver til 3 m djup (kun utført i SW19, SW20 og SW22)
- ↗ Press ned 110 mm PVC-røyr (kun utført i SW19, SW20 og SW22)
- ↗ Spylebore med totalsonderingsstenger påmontert 90 mm kryssborkrone til 25 m djup
- ↗ Trekk stenger
- ↗ Før peleslangen ned til botn av borhol. Kan vere lurt å spyle litt vatn på veg ned.
- ↗ Bland tjukkast mogleg saltslurry ved å justere mengda salt som hellast ned i skruen i MAI-pumpa. Flow 400 l/time.
- ↗ La slangen stige sakte ut av borholet etter kvart som borholet fyllast med salt
- ↗ Ved stopp i pumpa må slangen trekkast opp nokre meter for å unngå at den blir sitjande fast i salt som fellast ut i botnen av borholet.
- ↗ Bruk slangen til å peile ut kor langt det er ned til «fast salt» i borholet
- ↗ Det tek tid før saltet set seg (kan ta fleire timar)
- ↗ Etterfyll forsiktig med tørt salt frå terrengoverflata dersom det tek lang tid før saltet set seg.
- ↗ Pump ut vatn til 6-8 m djup
- ↗ Fyll i bentonittpellets

3.4.3 Erfaringar

Ved forboring utan foringsrøyr så tok vatnet andre vegar enn opp gjennom borholet. Dette medførte at massar ikkje blei fjerna frå borholet. Dette kan ha medført massefortrenging som igjen kan ha ført til poretrykksoppbygging. I SW19, SW20 og SW22 blei det brukt foringsrøyr i dei øvre 3 m. Her kom det opp bra med massar ned til ca. 8-10 m djup. Deretter kom det opp i hovudsak berre boreslam. Det bør brukast høgast mogleg rotasjon for å få opp mest mogleg massar.

Det bør brukast foringsrøyr gjennom toppmassane for å sikre at massane kjem opp og ut av borholet. Ved stopp under pumping av KCl-slurry må slange heisast opp for å unngå at saltet pakkar seg rundt slangen. Ved stopp i slurry-produksjon bør det spylast med vatn til ein har oppnådd sirkulasjon i systemet igjen. Slangen må tømmast for salt for å unngå at saltet tettar igjen slangen. Peleslangen sprakk dersom det bygde seg opp trykk i systemet som følgje av at saltet tetta slangen for eksempel. Fordelar og ulemper med prosedyren er oppsummert i Tabell 6.

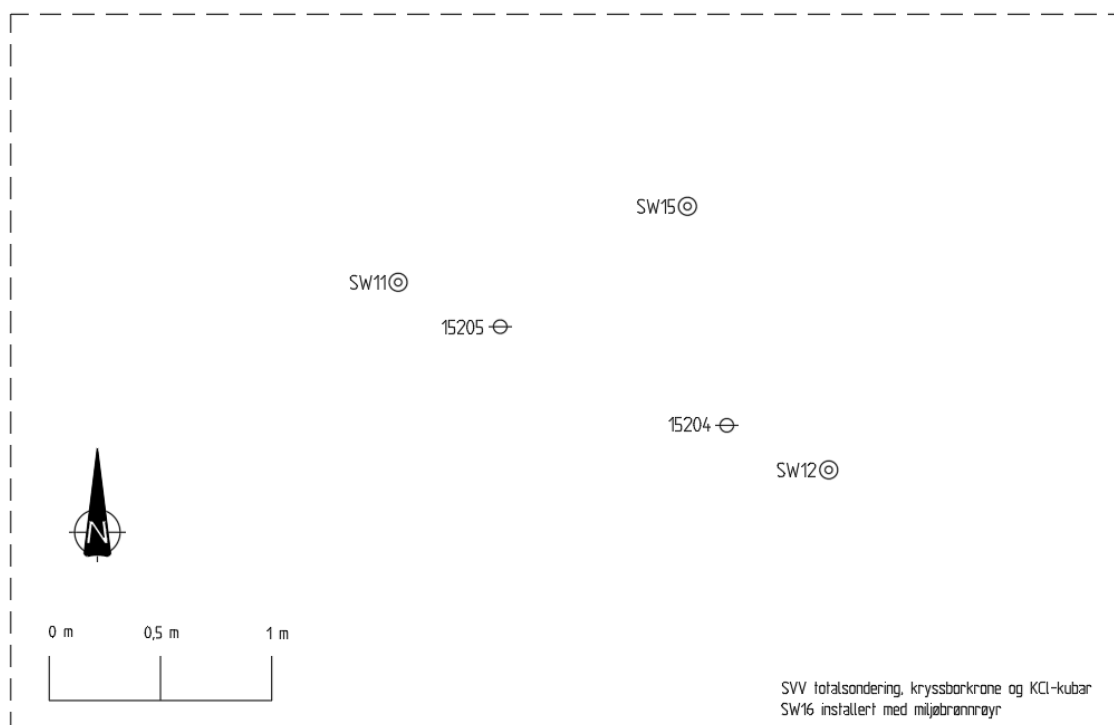
Tabell 6 Fordelar og ulemper med installasjonsprosedyren totalsondering, kryssborkrone og KCl-slurry.

Fordelar	Ulemper
Rask metode	Har ikkje kontroll med kor mykje salt som hamnar i brønnen og kor mykje som blir spylt ut på terrengoverflata
Rigg blir fristilt til å fortsetje forboring av nye brønnar medan brønn fyllast med KCl-slurry	Vanskeleg å få til tjukk KCl-slurry pga. fare for å proppe systemet og slangebrot
	Sårbar for at installasjonsarbeid ikkje kan fullførast
	Ressurskrevjande i og med at det bør vere 3-4 personar for å kunne jobbe effektivt

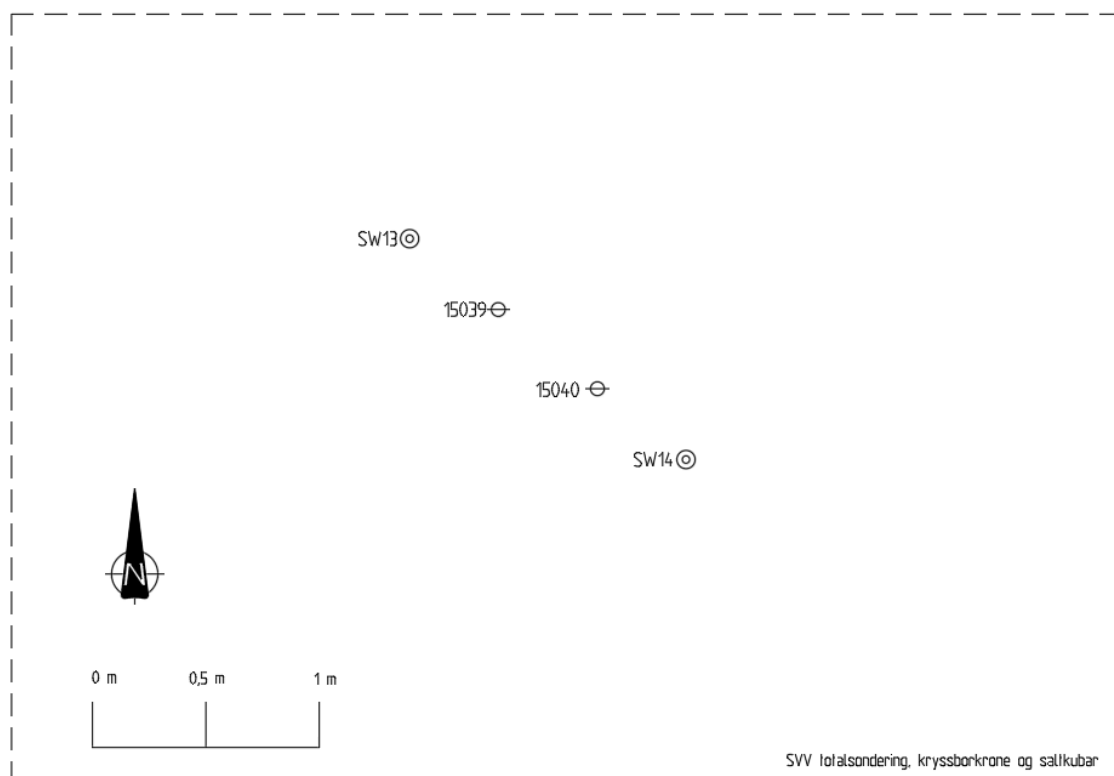
3.5 Totalsondering, kryssborkrone og KCl-stavar

I mars/april 2019 installerte Statens vegvesen Region sør saltbrønnar ved å forbore med totalsonderingsutstyr påmontert kryssborkrone. Førehandsproduserte stavar med samanpressa salt blei installert i det opne borholet. SW11 og SW12 blei installert 0,5 m frå poretrykksmålar 15204 og 15205 (Figur 15), og SW13 og SW14 blei installert 0,5 m frå poretrykksmålar 15039 og 15040 (Figur 16).

K+S Aktiengesellschaft (<http://www.k-plus-s.com/en>) produserte 5x5x5 cm samanpressa KCl-kubar som kvar vog 250 g (a). Multiconsult AS i Trondheim bora hol i desse og festa kubane på 1 m lange hydraulikkstenger for å sikre at stavane blei stive nok til bli pressa ned i bakken om nødvendig. Desse 1 m stavane blei skrudd saman på staden. På den nedste staven blei det påmontert stempel som blir brukt i 75 mm stempelprøvetakarar, og ein 60 m lang wire for å unngå at stavane sank ned i borholet (Figur 17b). Det blei i tillegg laga eit adapter som passa til totalsonderingsstengene for å dytte stavane til ønska nivå (Figur 17 a) KCl-kubar og adapter for totalsonderingsstenger. b) Stempel med wire i enden av KCl-stavane. Stavane er gjenga i endane for enkel montering på staden.a). Saltstavar blei installert i SW11-SW14. Brønnane blei forbora med totalsonderingsstenger med påmontert kryssboringskrone og spyling.



Figur 15 Plassering av SW11, SW12 og SW15 og poretrykksmålarane 15205 og 15204. Koordinatane for poretrykksmålarane er justert for horisontalavvik på 6 og 10 m djup (Tabell 3).



Figur 16 Plassering av SW13, og SW14 og poretrykksmålarane 15039 og 15040. Koordinatane for poretrykksmålarane er justert for horisontalavvik på 6 og 10 m djup (Tabell 3).



Figur 17 a) KCl-kubar og adapter for totalsonderingsstenger. b) Stempel med wire i enden av KCl-stavane. Stavane er gjenga i endane for enkel montering på staden.

3.5.1 Utstyr

- ↗ GeoMachine GM8 grunnboringsrigg
- ↗ Totalsonderingsstenger
- ↗ Kryssborkrone Ø90 mm drill drain med 19 mm spylehol
- ↗ 75 mm naver (berre nytta for SW13 og SW14)
- ↗ 110 mm PVC-røyr som foringsrøyr i øvre 3 m
- ↗ 17 stk. KCl-stavar i 1 m lengde (20 KCl-kubar per stav, vekt 5 kg per stav)
- ↗ spiss frå 75 mm stempelprøvetakar
- ↗ 60 m wire
- ↗ Honda VX15 pumpe med sandfilter
- ↗ Vatn
- ↗ Bentonitt pellets og stavar

3.5.2 Prosedyre

- ↗ Navre med 75 mm naver til 3 m djup (blei berre gjort for SW13 og 14)
- ↗ Press ned 110 mm PVC-røyr (blei berre gjort for SW13 og 14)
- ↗ Spylebore med totalsonderingsstenger påmontert 90 mm kryssborkrone til 25 m djup
- ↗ Trekk stenger
- ↗ Skru saman KCl-stavane og senk ned i borholet
- ↗ Fest adapter i topp av saltstav
- ↗ Før saltstavane ned med riggen slik at topp stav hamnar på 8 m djup
- ↗ Pump ut vatn til 6-8 m djup
- ↗ Fyll i bentonittpellets

3.5.3 Erfaringar

Det blei ikkje brukt foringsrøyr i SW11 og SW12. Under forboring av SW12, kom vatnet opp av SW11. Det blei vaska mykje sand opp på terrengoverflata. Dette kan ha medført at massane ikkje har kome opp av borholet og det kan ha blitt massefortrenging. Ved å bruke foringsrøyr i dei øvre 3 m, kom massane og vatnet opp av borholet (SW13 og SW14).

Metoden er rask. Det er enkelt å installere saltet i felt, og ein får tetta borholet umiddelbart etter at saltstavane er på plass. Adapteret bør utformast som for eksempel ei klo som både held fast stavane, og som også kan presse dei ned til ønska nivå. Fordelar og ulemper med prosedyren er oppsummert i Tabell 7.

Tabell 7 Fordelar og ulemper med installasjonsprosedyren totalsondering, kryssborkrone og KCl-stavar.

Fordelar	Ulemper
Rask metode	Tungt å halde igjen 85 kg saltstavar for å unngå at dei synk
Enkel installasjon av salt	Saltstaven kan miste kontakt med adapter dersom saltstaven sig ned raskare enn riggen fører borstengene ned. Dette kan medføre at saltstav ikkje blir ført ned til ønska nivå.
Full kontroll på kor mykje salt som blir installert	
Full kontroll på i kva nivå saltet hamnar i grunnen	
Mindre slam på overflata	Stavane finst ikkje på marknaden per i dag
Saltet blir ikkje spreidd på overflata	
Treng kun 2 personar for å få til effektiv installasjon	
Mindre utstyr på plassen	

3.6 Totalsondering, KCl-kubar i miljøbrønnerøyr

Statens vegvesen Region sør installerte SW15 1,0 m frå poretrykksmålarane 15204 og 15205 (Figur 15). Som eit alternativ til førehandsproduserte saltstavar, blei det i SW15 installert 90 mm perforerte miljøbrønnerøyr som blei fylt med KCl-kubar på staden (Figur 18).

3.6.1 Utstyr

- ↯ GeoMaskin GM8 grunnboringsrigg
- ↯ Totalsonderingsstenger
- ↯ Kryssborkrone Ø90 mm med 19 mm spylehol
- ↯ Vatn
- ↯ 3 m 110 mm PVC-røyr
- ↯ 17 m Ø90 mm perforerte PE-røyr
- ↯ Lok og spiss til PE-røyr
- ↯ 60 m wire
- ↯ 340 stk. KCl-kubar



Figur 18 Ø90 mm perforerte PE-miljøbrønnerør og KCl-kubar før installasjon.

3.6.2 Prosedyre

- ↴ Navre med 75 mm naver til 3 m djup
- ↴ Press ned 110 mm PVC-rør
- ↴ Spylebore med totalsonderingsstenger påmontert 90 mm kryssborkrone til 25 m djup
- ↴ Trekk stenger
- ↴ Fyll miljøbrønnerøyra med KCl-kubar etter kvart som røyra skrus saman og senkas ned i holet.
- ↴ Press miljøbrønnerøyra ned med riggen slik at topp røyr er på 8 m djup
- ↴ Pump ut vatn til 6-8 m djup
- ↴ Fyll i bentonittpellets

3.6.3 Erfaringar

Det gjekk raskt å montere røyr og putte oppi kubar. Miljøbrønnerøyra har små spalter. Det vil vere meir hensiktsmessig å bruke røyr med filter eller geotekstil rundt for å sikre at saltet er i kontakt med leira i heile omkrinsen slik det blei gjort for saltbrønnane installert på Dragvoll [4]. Fordelar og ulemper med metoden er summert opp i Tabell 8.

Tabell 8 Fordelar og ulemper med installasjonsprosedyren totalsondering, kryssborkrone og KCl-stavar i miljøbrønnrøyr.

Fordelar	Ulemper
Rask metode	KCl-kubane finst ikkje på marknaden per i dag
Enkel installasjon av salt	Saltet kjem ikkje i kontakt med leira i heile omkrinsen
Full kontroll på kor mykje salt som blir installert	
Full kontroll på i kva nivå saltet hamnar i grunnen	
Oppdrift medførte at saltbrønnen ikkje sank ned i borholet men måtte dyttast ned.	
Mindre slam på overflata	
Saltet blir ikkje spreidd på overflata	

3.7 Sonicboring og KCl-slurry

Det blei gjort forsøk med Sonic-rigg for å sjå verknaden av ulike borkroner. Plassering av hola er vist i Figur 19 og Figur 20.

Borhol SW5 blei bora med vanleg 100 mm ringbit med semiballistiske tenner (Figur 21), medan SW6 blei bora med Chevron Dragbit. I desse to hola blei det også satt ned eit 110 mm PVC foringsrøyr, dei øvste 3 m for å sikre at mest mogleg masse skulle komme opp av holet. SW7 og SW8 blei installert med PDC-bit, mens SW9 og SW10 blei installert med Chevron dragbit (Figur 22). Desse fire hola blei bora utan foringsrøyr dei øvste 3 m. Massane kom likevel opp av borholet.

Det var stor forskjell på mengda masse som kom opp med dei ulike borkronene. Med standard ringbit kom det mykje mindre masse opp av holet enn med dei to andre.

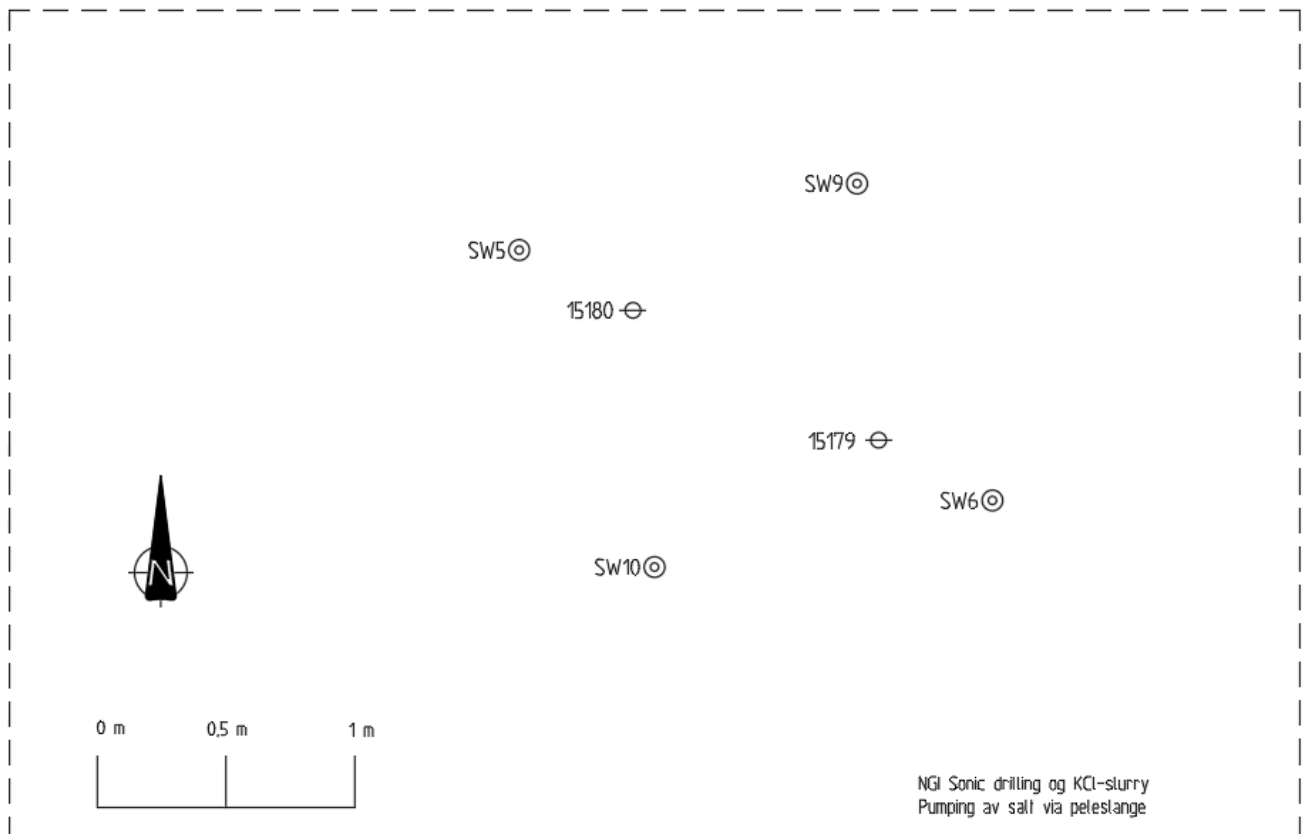
Det vart forsøkt å bore med ulik rotasjonshastighet. Borhol SW5 og SW6 blei installert med forsiktig rotasjon. Det er ikkje kjend korleis rotasjon dette svarar til, ettersom det ikkje er nokon rotasjonsmålar på sonic-riggen. I borhol SW7, SW8, SW9 og SW10 blei det bora med maksimal rotasjonshastighet, som er 170 rpm. Dette medførte at det kom noko meir massar opp av borholet, men skilnaden var ikkje veldig stor.

I SW7 blei det gjort forsøk med å installere Sonic-casing gjennom dei øvste massane for å få eit større borhol. Casingen blei installert med ringkrone tilpassa casingen. Boringa ble utført utan å setje ned plastrøyr først. Dette blei avbrote etter 1,5 meter fordi vatn og massar kom opp over alt i fleire meters omkrins rundt borholet. Holet blei difor installert utan casing. Resten av holet blei bora med PDC-bit.

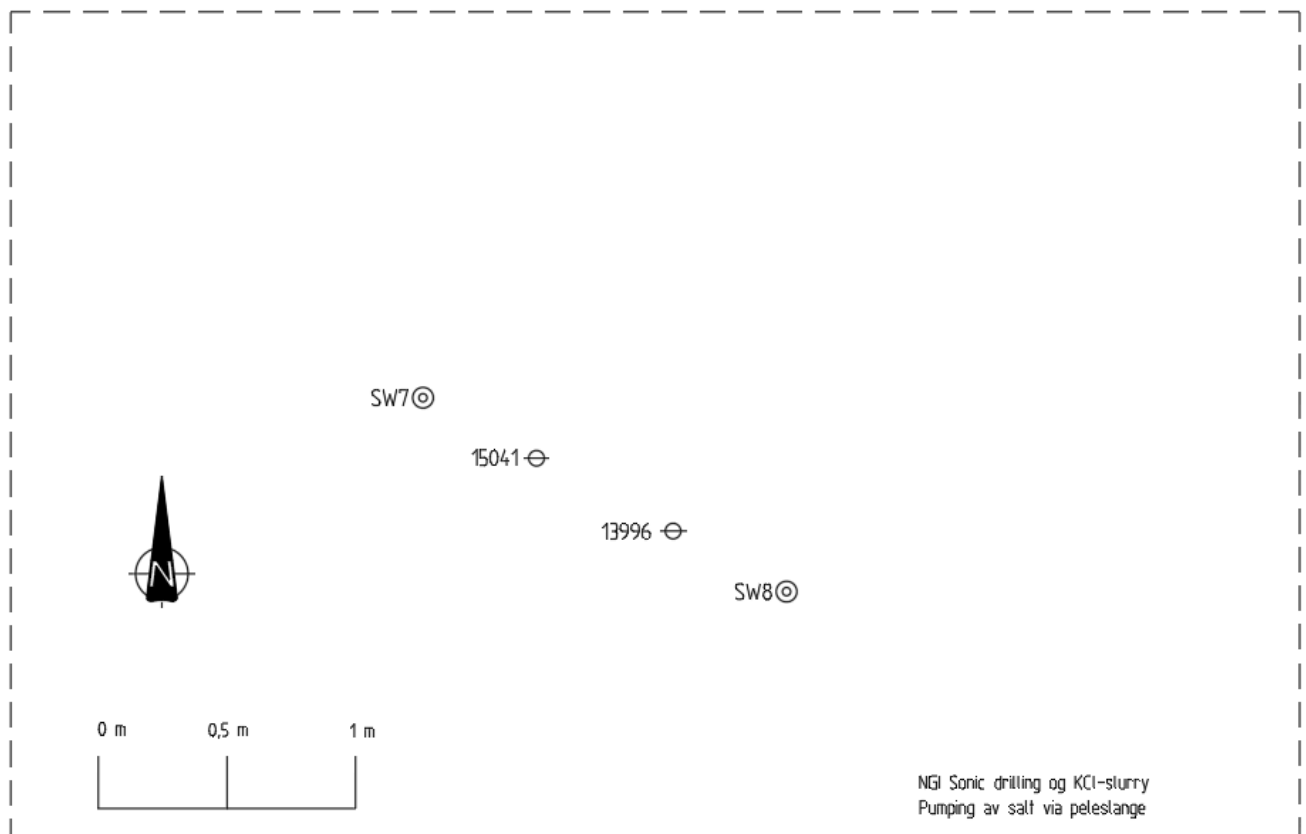
Etter etablering av borholet blei det pumpa salt ned i holet ved bruk av MAI-pumpe og peleslange. Nivå til «fast salt» i borholet blei peila ut, og tørt salt blei etterfylt frå terreng der det var nødvendig for å få fast «saltsøyle» frå 8 m djup. Etter fylling av salt skulle borholet tømmast for vatn og bli plugga med bentonittpellets. Borarane hadde dessverre problem med vasspumpe, så dei fekk ikkje plugga hola før etter nokre dagar. Tettinga ble utført 1-2 dagar etter at installasjonen av brønnane var ferdigstilt.

3.7.1 Utstyr

- ↗ Sonic drilling grunnboringsrigg
- ↗ Sonic borstenger
- ↗ 110 mm PVC brønnrør
- ↗ Standard ringbit med semiballistiske tenner, Wolfram-karbid Chevron dragbit og PDC-bit.
- ↗ MAI-pumpe NT400
- ↗ Aggregat til MAI-pumpe QAS20
- ↗ Armert peleslange (Codaspring) Ø32 mm med påmontert 1,5 m ståltupp Ø32 mm
- ↗ 25 kg sekkar med KCl
- ↗ Vatn
- ↗ Honda VX15 pumpe med sandfilter (Figur 11b)
- ↗ Bentonitt pellets



Figur 19 Plassering av SW5, SW6, SW9 og SW10 saman med poretrykksmålarene 15179 og 15180. Plasseringa av poretrykksmålarene er korrigert for horisontalavvik på 6 og 10 m djup (Tabell 3).



Figur 20 Plassering av SW7 og SW8 saman med poretrykksmålarane 13996 og 15041. Plasseringa av poretrykksmålarane er korrigert for horisontalavvik på 6 og 10 m djup (Tabell 3).



Figur 21 Bilet av ringbit med spylinga på. Frå installasjon av SW6.



Figur 22 Ulike borkroner som verte nytta ved boring med Sonic rigg. PDC-bit til venstre og Wolfram-karbid Chevron dragbit til høgre.

3.7.2 Prosedyre

- ↗ Borhol SW5 og SW6 blei installert ved å installere eit foringsrøyr av PVC dei øvste 3 meterne ved at det blei forbora eit hol som røyrret blei pressa nedi. I SW7 blei det forsøkt å installere Sonic-casing, men dette blei stoppa etter 1,5 meter fordi massar og vatn kom opp kring borholet. Resten av SW7 og dei resterande hola blei bora utan casing og foringsrøyr.
- ↗ Spylebore med Sonic-stenger påmontert ringbit til 25 m djup (SW5) eller med dragbit (SW6, SW9 og SW10) eller PDC-bit (SW7 og SW8).
- ↗ Trekk stenger.
- ↗ Før peleslangen ned til botn av borhol. Kan vere lurt å spyle litt vatn på veg ned.
- ↗ Bland tjukkast mogleg saltslurry ved å justere mengda salt som hellast ned i skruen i MAI-pumpa. Flow 400 l/time.
- ↗ La slangen stige sakte ut av borholet etter kvart som borholet fyllast med salt.
- ↗ Ved stopp i pumpa må slangen trekkast opp nokre meter for å unngå at den blir sitjande fast i salt som fellast ut i botnen av borholet.
- ↗ Bruk slangen til å peile ut kor langt det er ned til «fast salt» i borholet.
- ↗ Etterfyll forsiktig med tørt salt frå terrengoverflata dersom det tek lang tid før saltet set seg.
- ↗ Pump ut vatn til 6-8 m djup.
- ↗ Fyll i bentonittpellets.

3.7.3 Erfaringar

Boring av borholet gjekk fint med begge borkronene. Mesteparten av overskotsmassane kom opp av borholet ned til ca. 10 m djup. SW7 blei forsøkt installert ved bruk av sonic-casing. Då det kom vatn opp av hola for poretrykksmålarane i nærleiken, blei dette forsøket avslutta. Truleg kommunisera borholet med hola for poretrykksmålarane gjennom dei øvste meterane med meir permeable massar, Installasjon med sonic-riggen blei dermed også utført som spyleboring.

Det var vanskeleg å vite kor mykje av saltet som blei vaska ut av borholet under pumping, så mengde salt i holet kan ikkje fastslåast nøyaktig. Det var også ein del variasjon i kor fort saltet sedimenterte i borholet. Dette gjorde det utfordrande å vite kor fort ein kunne trekkje slangen opp av holet, noko som leda til to slangebrot. Fordelar og ulemper med metoden er oppsummert i Tabell 9.

Tabell 9 Fordelar og ulemper med installasjonsprosedyren sonicboring og KCl-slurry.

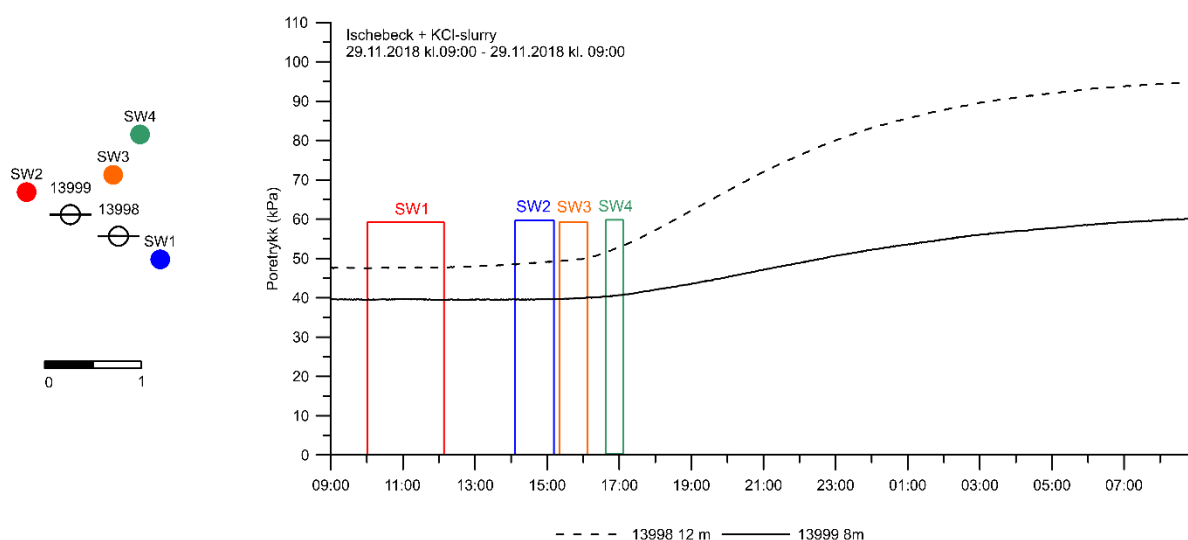
Fordelar	Ulemper
Rask metode	Vanskeleg å ha kontroll på tjukkelsen av KCl-slurryen
Ingen poretrykksauking dersom borholet pluggast med bentonitt.	Poretrykksauke pga. vassøyle i borholet om det ikkje pluggast.
Det gjekk fint og bore utan foringsrøyr	Sårbar metode for nedføring av salt. Slange kan gro fast
	Ressurskrevjande i og med at det bør vere 3 personar for å kunne jobbe effektivt

4 Poretrykksrespons

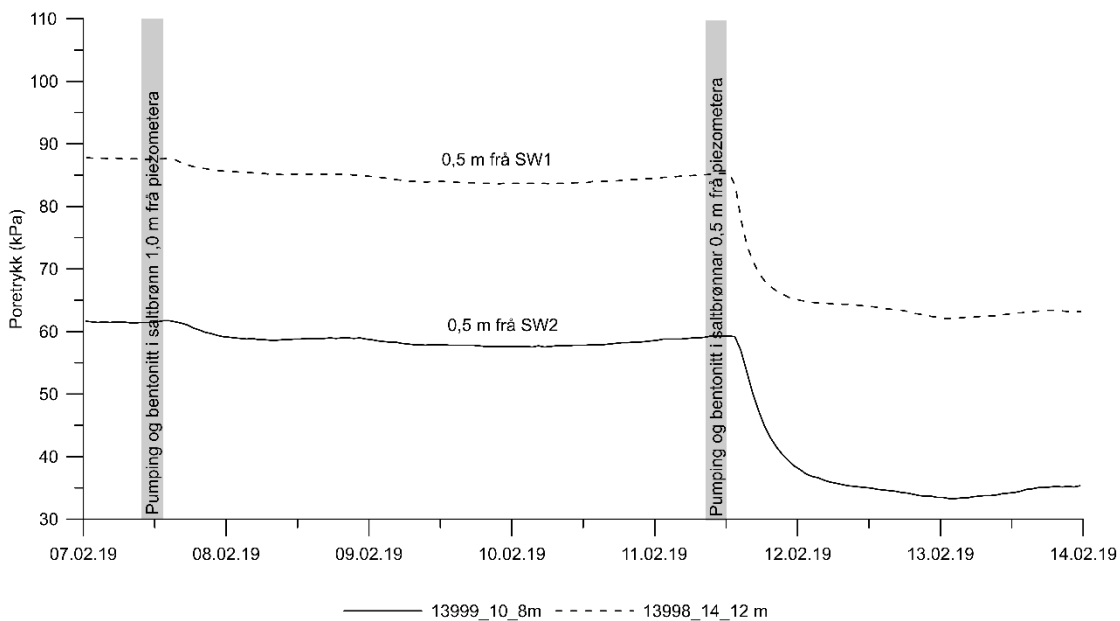
4.1 Ischebeck, kryssborkrone og KCl-slurry

SW1, SW2 og SW3 blei installert 0,5 m frå poretrykksmålarane, og SW4 blei installert 1,0 m frå poretrykksmålarane. Det var ingen umiddelbar poretrykksrespons som følgje av installasjon av SW1. Poretrykket byrja å stige litt i timane etter installasjon. Under installasjon av SW2, SW3 og SW4 steig poretrykket raskt, og fortsette å auke døgnet etter installasjon (Figur 23).

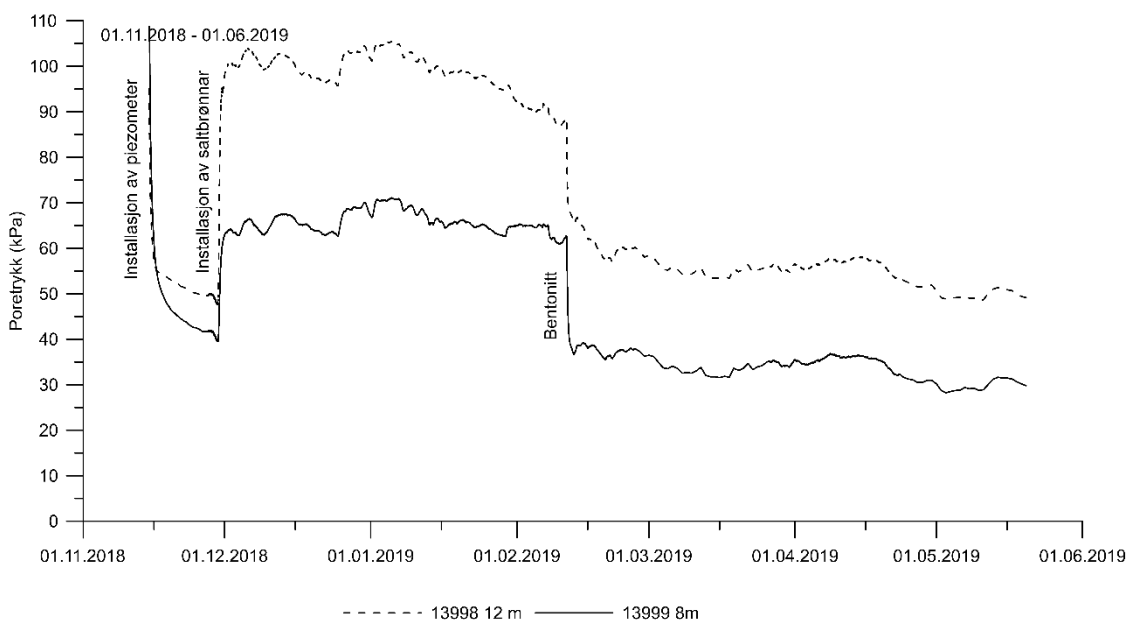
Til trass i at det er underhydrostatisk poretrykk på NGTS, er det hengande grunnvassnivå på 1 m under terreng. Dvs. at boringa førte til punktering av tette lag, og det blei ståande ei vassøyle i kvar brønn som førte til auka poretrykk på ca. 30 kPa ved 8 meter og 56 kPa ved 12 meters djup. I februar 2019, blei brønnane tømt for vatn ned til 8 m og fylt med bentonitt. Effekten av denne tettinga var umiddelbar (Figur 24). Poretrykket har ikkje stige igjen etter tettinga (Figur 25).



Figur 23 Poretrykksrespons ved installasjon av saltbrønn nr. (SW) 1-4. SW1-3 er installert 0,5 m frå poretrykksmålarane, og SW4 er installert 1,0 m frå målarane. Poretrykket er justert for barometrisk trykk.



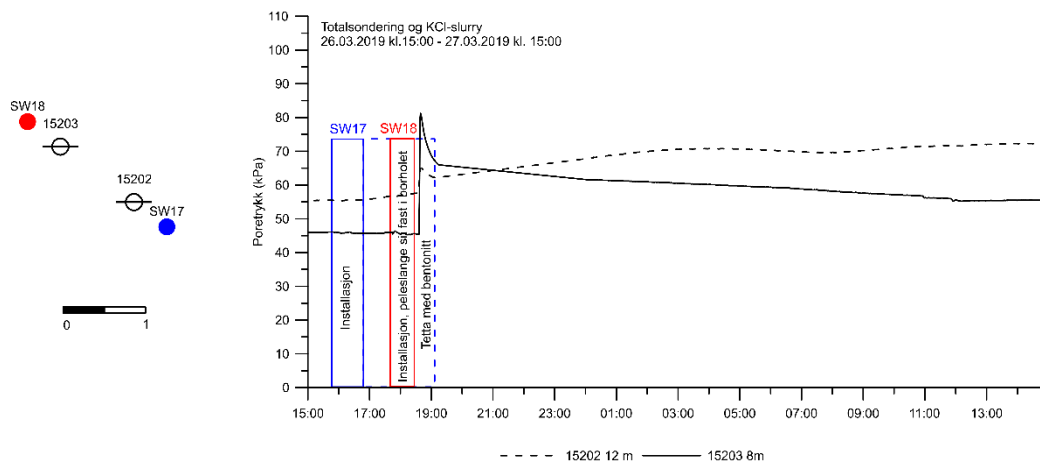
Figur 24 Effekt av bentonitt i målar nr. 13999 og 13998.



Figur 25 Poretrykk i målar nr. 13998 og 13999 frå installasjon av piezometer fram til 20.05.2019.

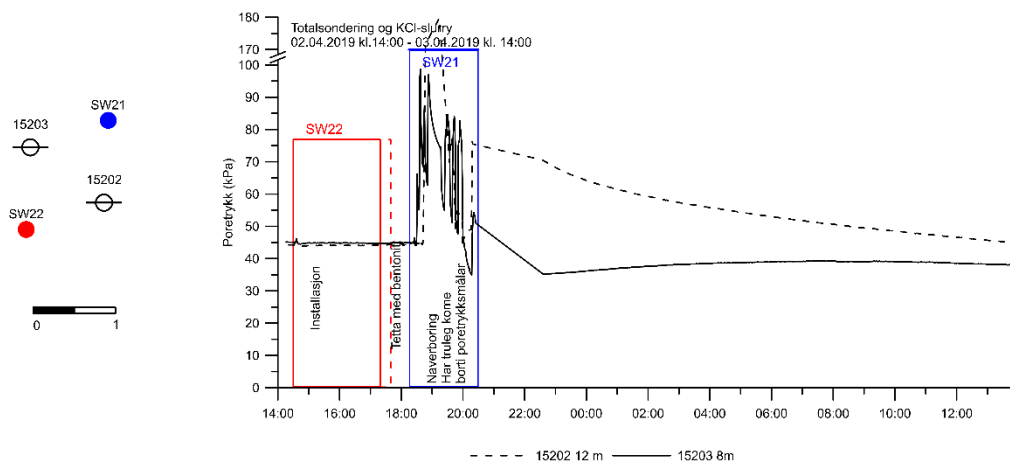
4.2 Totalsondering, kryssborkrone og KCl-slurry

SW17, SW18, SW21 og SW22 blei installert rundt poretrykksmålarane 15202 og 15203. SW17 og SW18 blei installert 0,5 m frå piezometra. Forboringa blei utført utan foringsrør i dei øvre 3 m. Dette kan ha medført at massane ikkje har kome opp av holet, og ført til massefortrening. Peleslangen blei sitjande fast i SW18. Poretrykkshoppet skuldast at det blei pumpa ned vatn for å prøve å losne slangen, noko som ikkje fungerte (Figur 26). Poretrykket auka med 17 kPa ved 8 meter og 34 kPa ved 12 meters djup. Aukinga med 34 kPa var veldig kortvarig, den generelle aukinga er på 16 kPa.



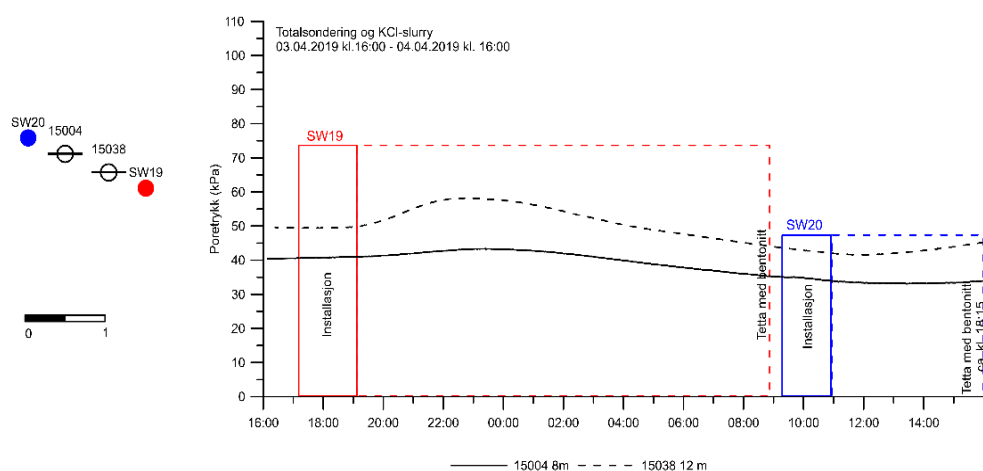
Figur 26 Poretrykksrespons frå installasjon av SW17 og SW18. Poretrykket er ikkje justert for barometrisk trykk.

SW21 og SW22 blei installert 1,0 m frå poretrykksmålarene 15202 og 15203. Det blei satt ned foringsrør i dei øvre 3 m før boring av SW22. Sjølve installasjonen av SW22 ser ikkje ut til å ha ført til auke i poretrykket. I eit forsøk på å få opp meir massar blei SW21 forbora med 75 mm naver. Poretrykkshoppet er truleg som følgje av at naveret har kome svært nær eller borti piezometra slik at det kommunikasjon mellom borholet og piezometra (Figur 27). Om ein ser bort frå forstyringane frå naveret har poretrykket gått ned med 10 kPa ved 8 meter og auka med 24 kPa ved 12 meters djup.

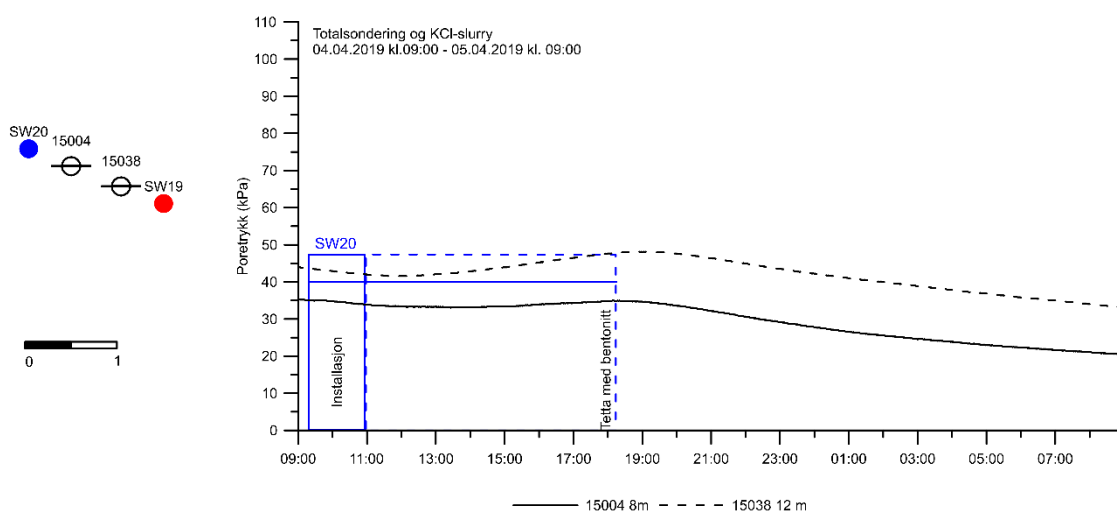


Figur 27 Poretrykksrespons frå installasjon av SW21 og SW22. SW21 blei forbora med naver som truleg har kome borti poretrykksmålarene. Merk at y-aksen viser poretrykk til 180 kPa.

SW19 og SW20 blei installert 0,5 m frå poretrykksmålare 15004 og 15038. Forboringa blei utført med foringsrør i dei øvre 3 m. Det tok lang tid før saltet sedimenterte i brønnen. Difor tok det fleire timar før brønnane kunne tettast med bentonitt (Figur 28 og Figur 29). Poretrykksresponsen er låg, 3 kPa ved 8 meter og 8 kPa ved 12 meters djup.

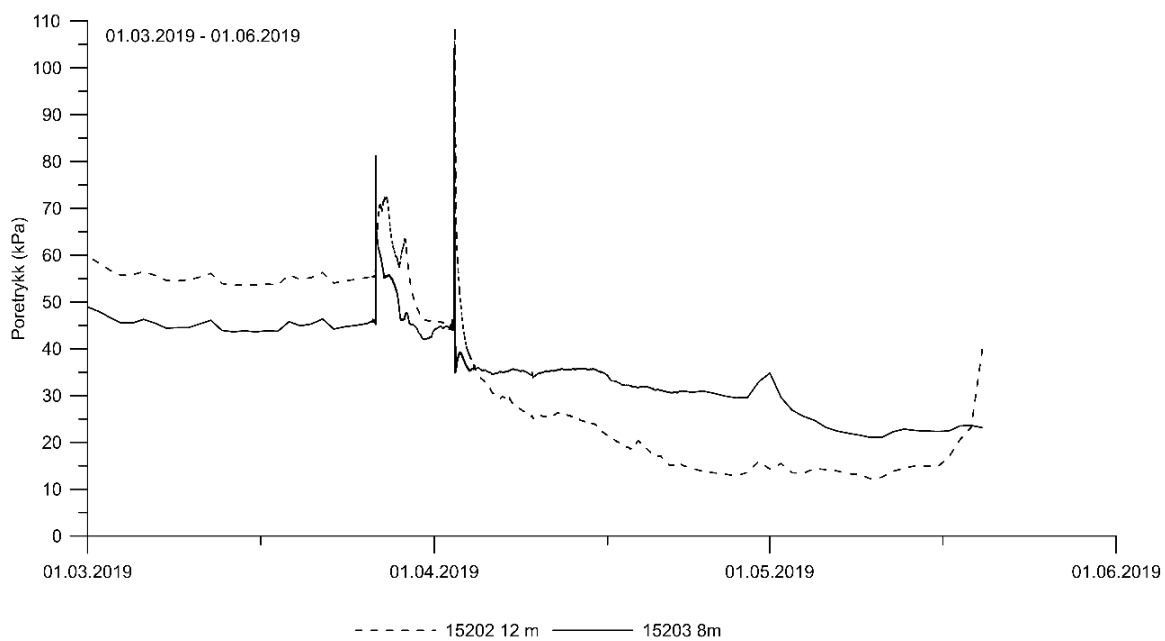


Figur 28 Poretrykksrespons frå installasjon av SW19 og SW20. Responsen frå SW20 er vist i Figur 29.

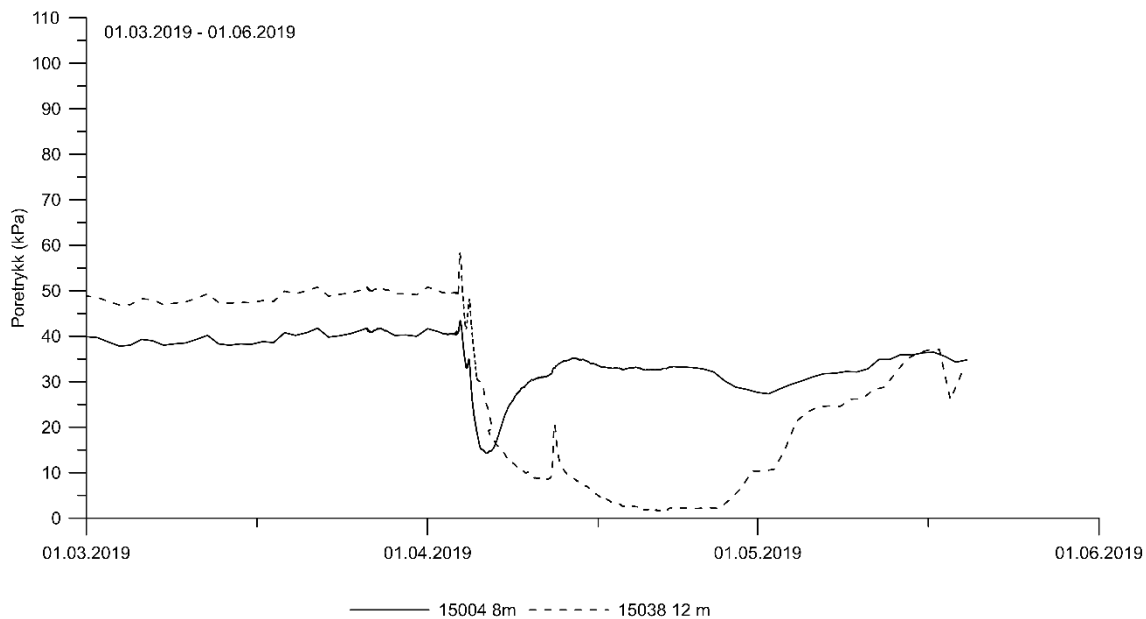


Figur 29 Poretrykksrespons frå installasjon av SW20.

Brønnane blei tetta med bentonitt like etter installasjon. Poretrykket i piezometra 15202 (12 m djup), 15004 (8 m djup) og 15038 (12 m djup) ser likevel ut til å stige mot opphavelig nivå igjen (Figur 30 og Figur 31). Poretrykksauken i 15202 kan skuldast at SW18 ikkje blei tetta med bentonitt sidan peleslangen blei ståande fast.



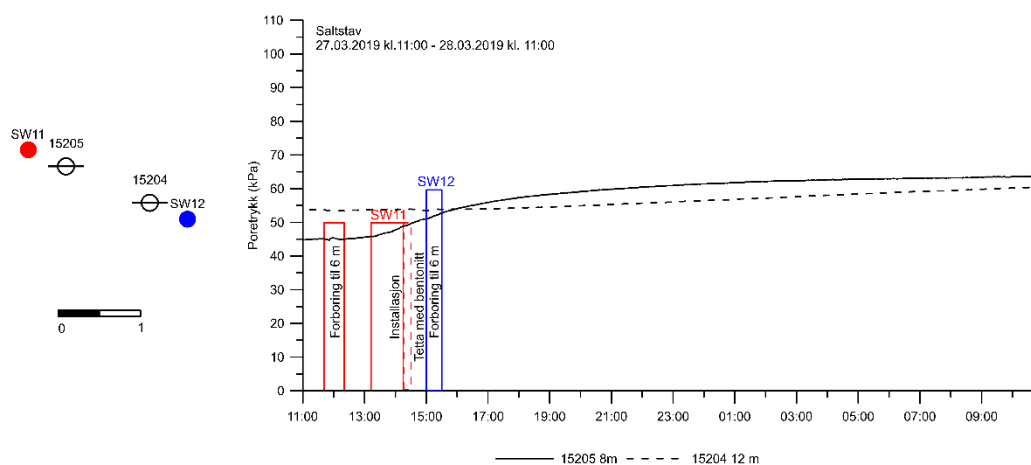
Figur 30 Poretrykk i målar nr. 15202 og 15203 frå 01.03.2019 fram til 20.05.2019.



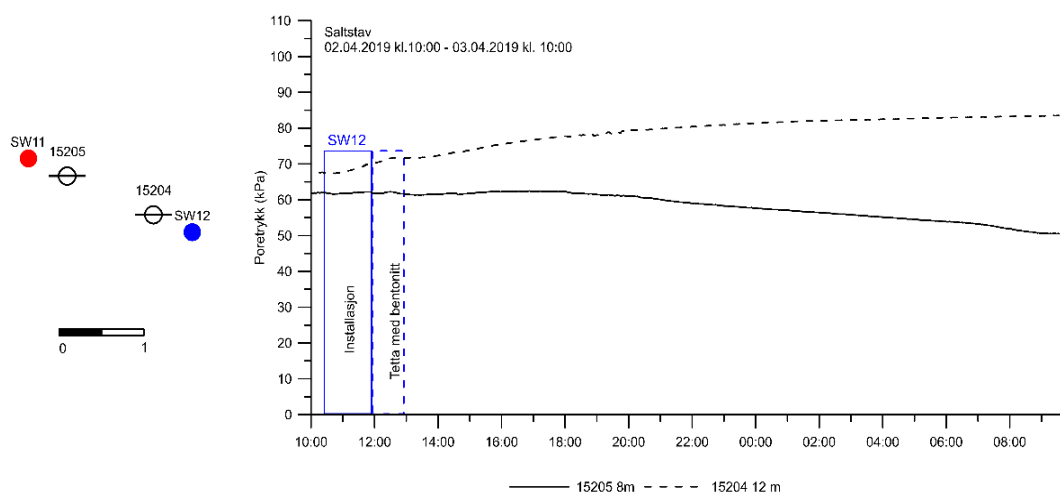
Figur 31 Poretrykk i målar nr. 15004 og 15038 frå 01.03.2019 fram til 20.05.2019.

4.3 Totalsondering, kryssborkrone og KCl-stavar

SW11 og SW12 blei installert 0,5 m frå piezometer 15204 og 15205. Det blei ikkje brukt foringsrør i dei øvre 3 m. Dette kan ha medført at massane ikkje kom opp av borholet, og medført massefortrenging som kan ha ført til auke i poretrykket (Figur 32). Dessverre fekk riggen motorstopp under installasjon av SW12. Denne blei dermed bora ferdig veka etter (Figur 33). Under installasjon av SW12 fløynde det vatn opp frå SW11. Det var tydeleg at vatnet fann vegen gjennom toppmassane. Det blei vaska opp ein del sand rundt SW11 i samband med installasjon av SW12. Dette medførte at massane frå SW12 ikkje kom opp av borholet under forboringa, som igjen kan ha ført til massefortrenging og følgjeleg poretrykksoppbygging. Aukinga i poretrykk det første døgnet er på 18 kPa for 8 meter og 5 kPa for 12 meters djup ved installasjon av SW11 og forboring av SW12. Ved installasjon av SW12 auka poretrykket med 1 kPa ved 8 meter og 15 kPa ved 12 meters djup. Ved 8 meters djup sank poretrykket med 10 kPa i løpet av det første døgnet, og har gått meir ned i vekene etter installasjon.

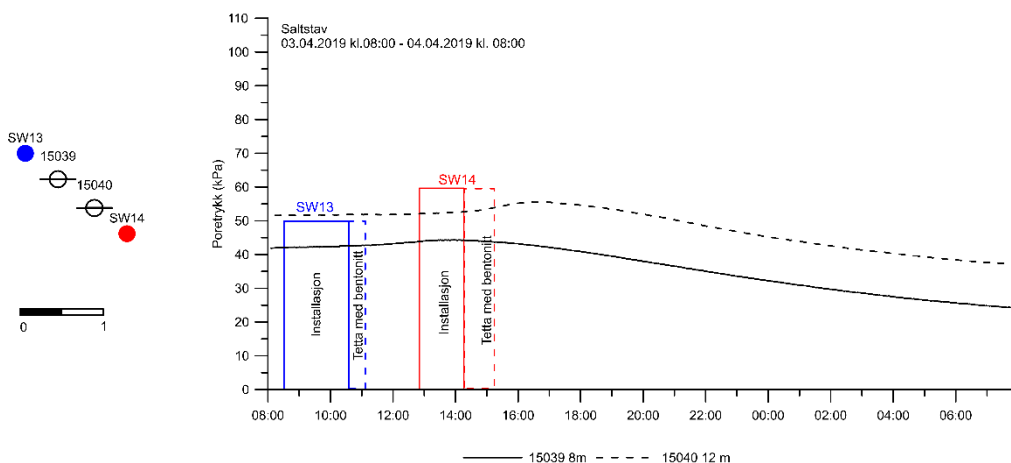


Figur 32 Poretrykksrespons frå installasjon av SW11 og forboring for SW12.



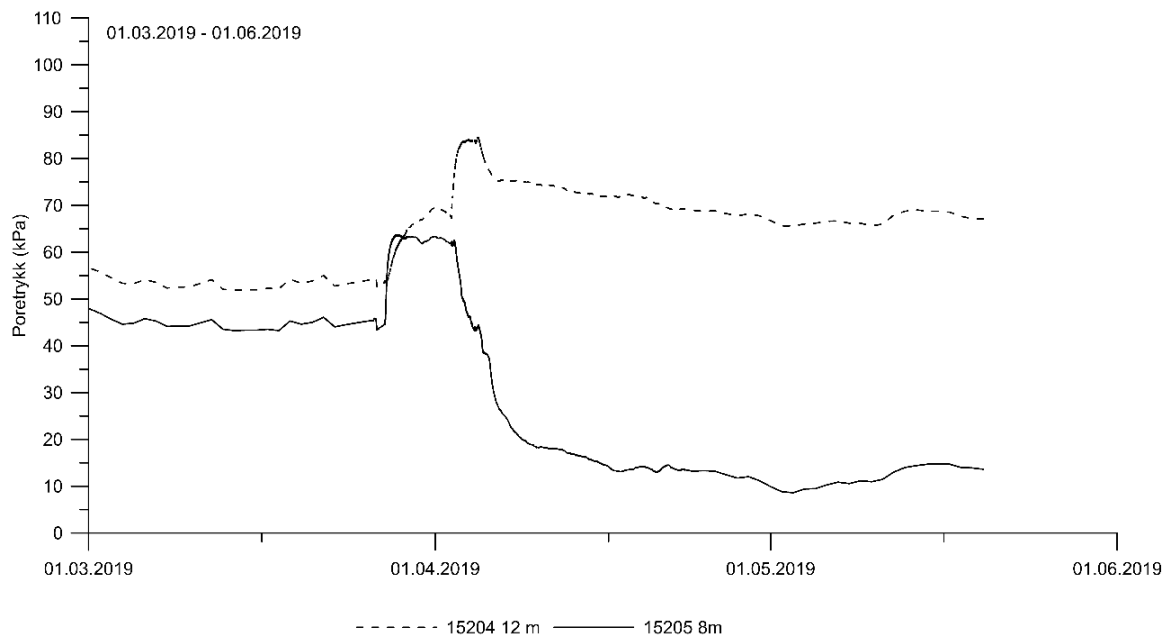
Figur 33 Poretrykksrespons frå installasjon av SW12.

SW13 og SW14 blei installert 0,5 m frå poretrykksmålar 15039 og 15040 (Figur 34). Det blei brukt foringsrør i dei øvre 3 m under installasjon, og poretrykksaukinga det første døgnet svært låg, 1 kPa ved 8 meter og 12 meters djup. Poretrykket minkar etter installasjon.

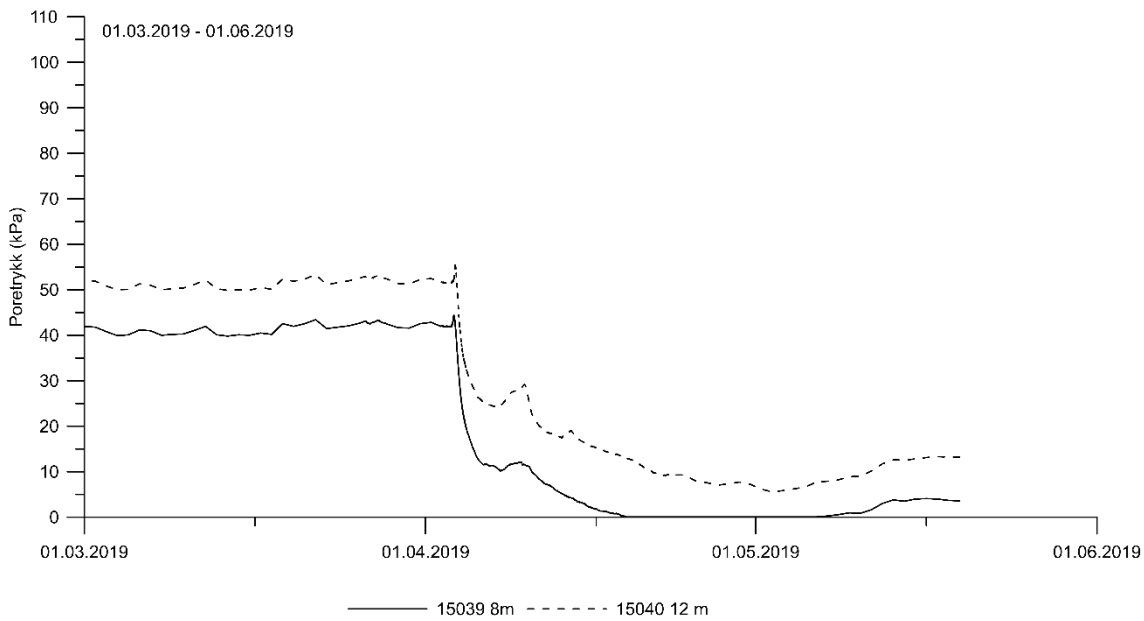


Figur 34 Poretrykksrespons fra installasjon av SW13 og SW14.

Poretrykket steig i målar nr. 15204 og 15205, truleg som følge av installasjon utan foringsrøyr. Poretrykket i målar nr. 15205 sank etter installasjon av SW12 (Figur 35), og i målar nr. 15204 etter installasjon av SW15 (sjå avsnitt 4.4). Det er uklart kvifor poretrykket ikkje søkk like mykje i 15204 som i 15205. I målar nr. 15039 og 15040 sank poretrykket etter installasjon av saltstavane i SW13 og SW14 (Figur 36). Poretrykket har ikkje begynt å stige opp mot opphavleg poretrykk i tida etter installasjon.



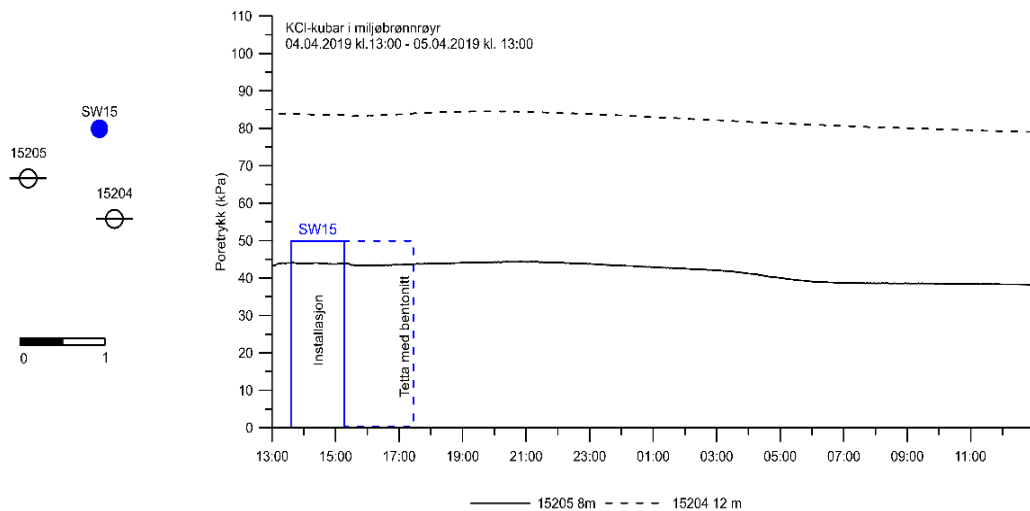
Figur 35 Poretrykk i målar nr. 15204 og 15205 fra 01.03.2019 fram til 20.05.2019.



Figur 36 Poretrykk i målar nr. 15039 og 15040 frå 01.03.2019 fram til 20.05.2019.

4.4 Totalsondering, KCl-kubar i miljøbrønnrøyr

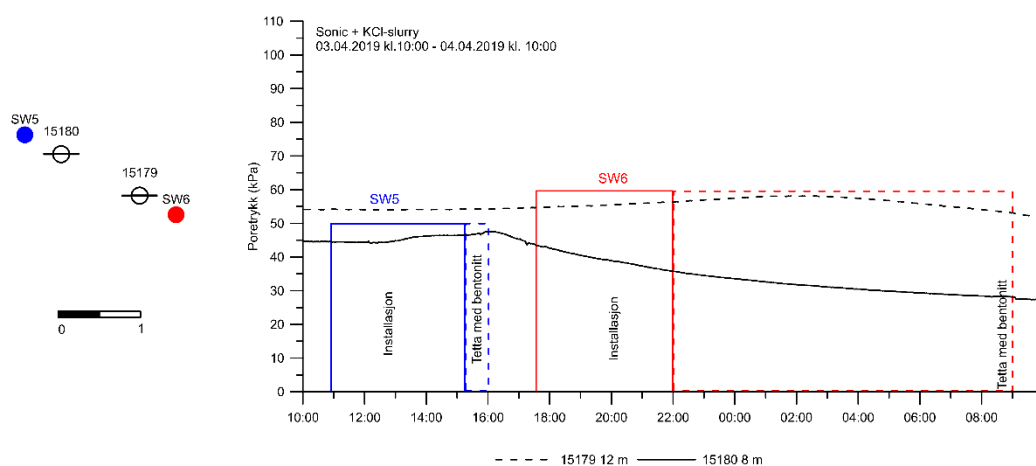
SW15 blei installert 1,0 m frå piezometer nr. 15204 og 15205. Installasjonen gir ingen poretrykksrespons av betydning, ca. 1 kPa. (Figur 37).



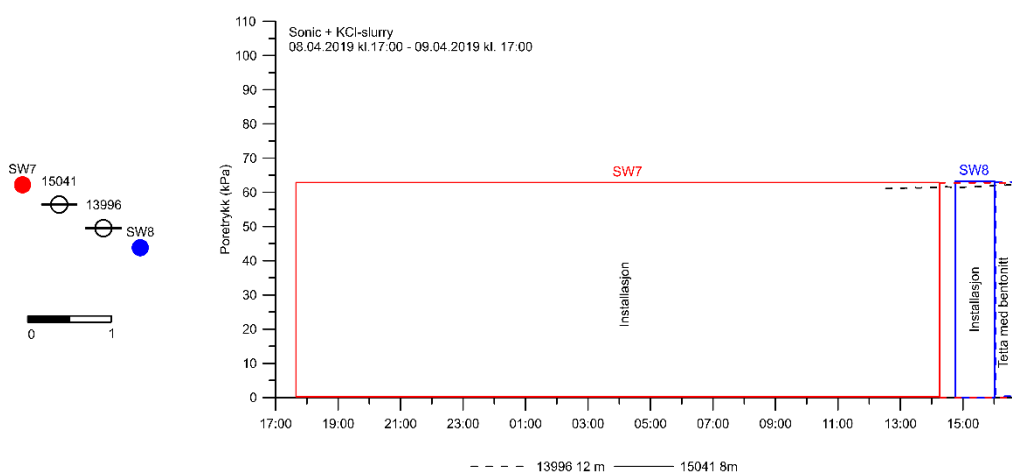
Figur 37 Poretrykksrespons frå installasjon av SW15.

4.5 Sonic og KCl-slurry

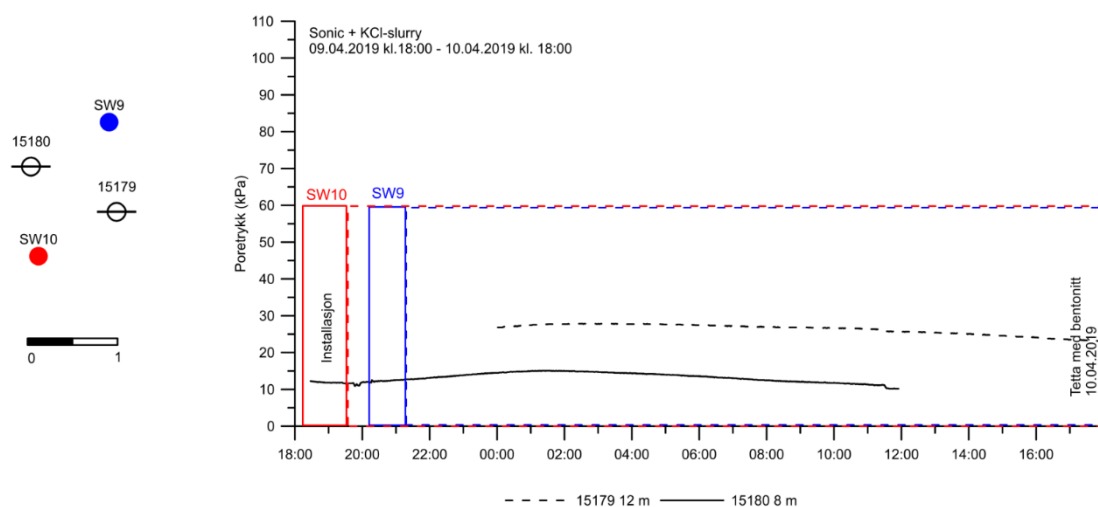
Poretrykksmålingane frå boring med Sonicriggen viser liten endring i poretrykket, både for installasjon med og utan foringsrør. Poretrykket har ein tendens til å auke noko rett etter installasjon, men ikkje meir enn nokre få kPa. Poretrykket sank etter pumping av vatn frå borhola og tetting med bentonitt. Resultata frå poretrykksmålarane er vist i figurane under (Figur 38 - Figur 44). Dessverre er noko data frå poretrykksmålarane ved SW9 og SW10 mista, slik at ein ikkje har full oversikt over responsen. Aukinga det første døgnet etter installasjon av SW5 og SW6 er 3 kPa ved 8 meter og 4 kPa ved 12 meters djup. Frå Figur 41 ser ein at poretrykksaukinga er kortvarig for SW5, SW6, SW9 og SW10, og at det er ein markant nedgang dei første vekene etter installasjon. Figur 42 viser at installasjon av SW7 og SW8 gav ei auke i poretrykk på ca. 15 kPa både ved 8 og 12 meters djup før poretrykket synk igjen. Denne aukinga kan skuldast at det tok nokre dagar før holet blei plugga med bentonitt.



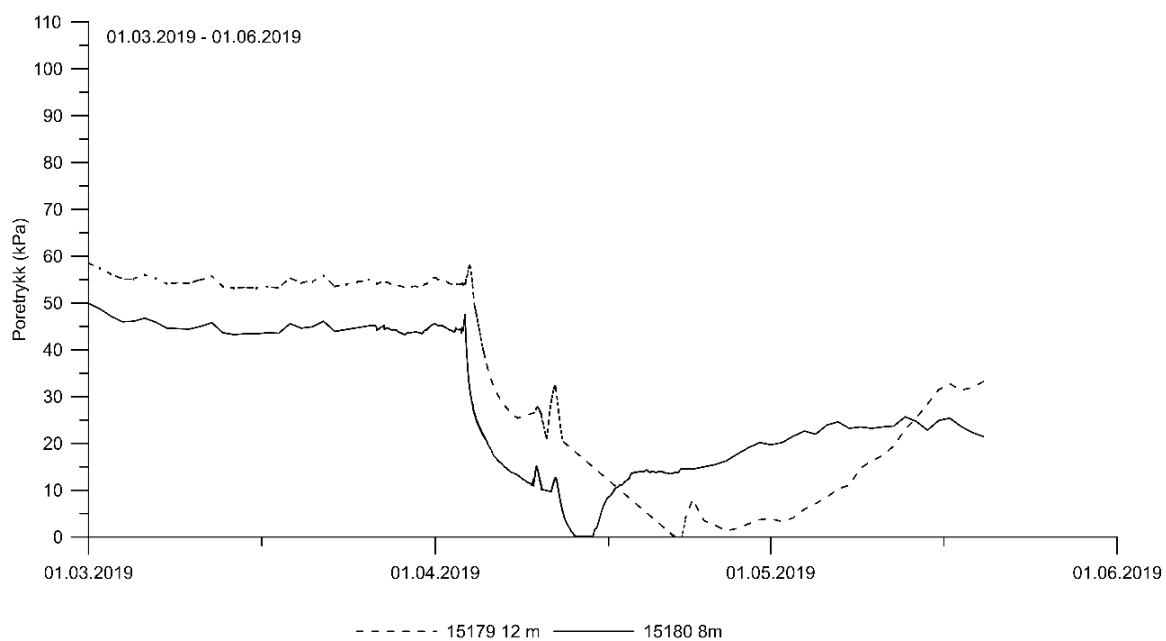
Figur 38 Poretrykksrespons frå installasjon av SW5 og SW6.



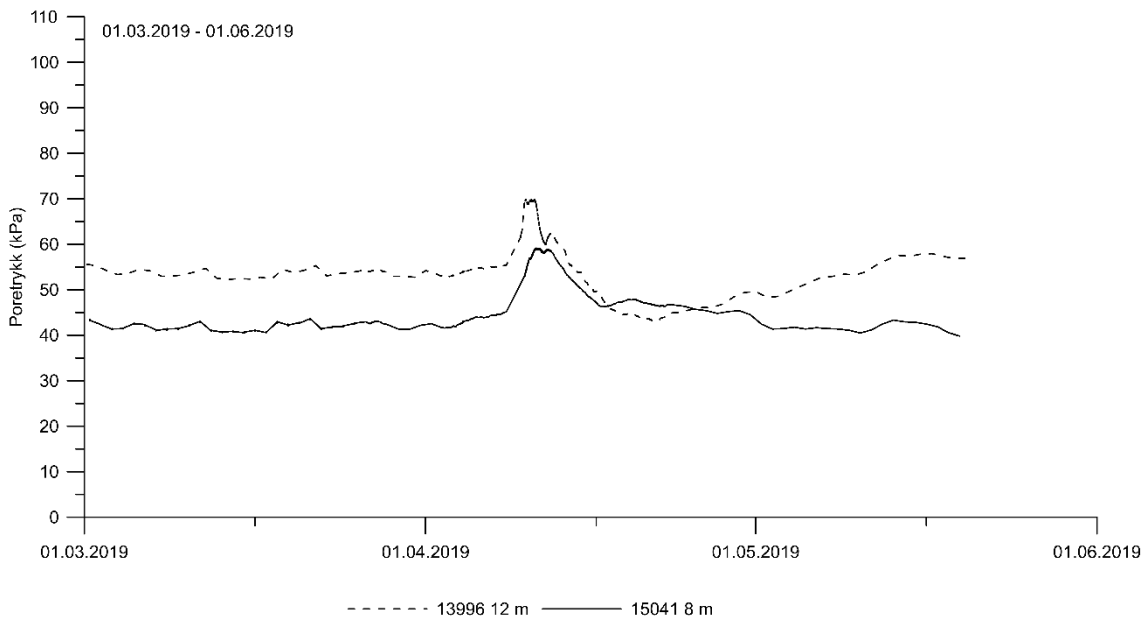
Figur 39 Poretrykksrespons frå installasjon av SW7 og SW8.



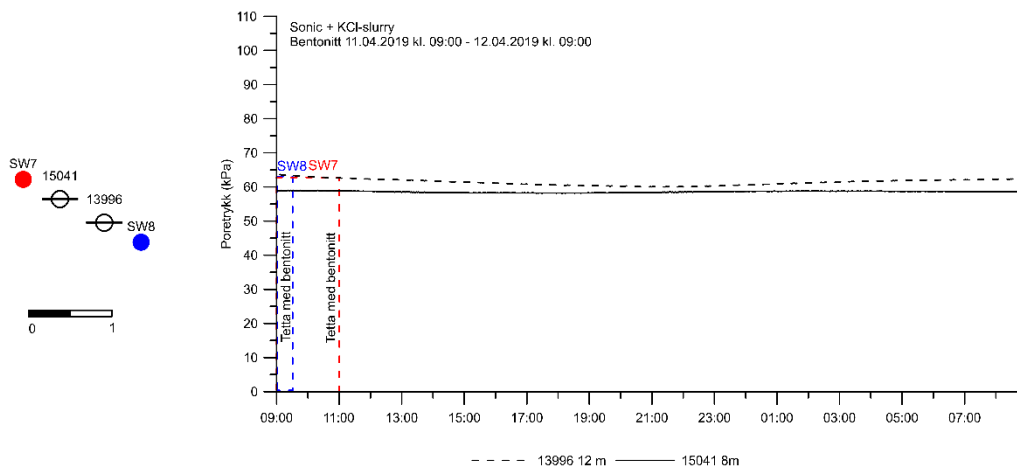
Figur 40 installasjon av SW9 og SW10. Nokre av dataene frå installasjonstida er mista.



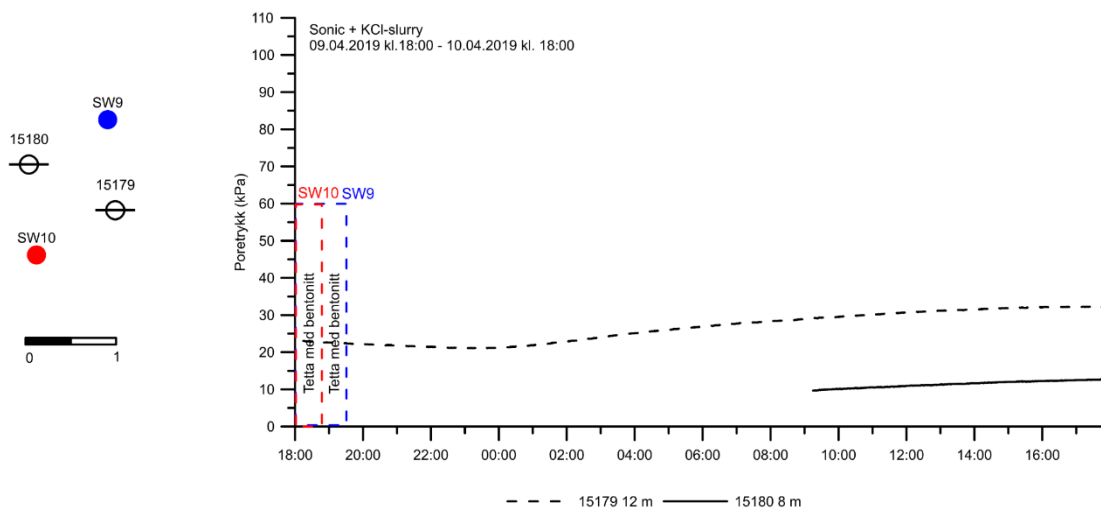
Figur 41 Poretrykk i målar nr. 15179 og 15180 frå 01.03.2019 til 20.05.2019. Målar 15179 manglar data frå 08.04 kl. 08:31 til 09.04 kl. 23:46. Målar 15180 manglar data frå 10.04 kl. 11:55 til 11.04 kl. 09:15.



Figur 42 Poretrykk i målar nr. 13996 og 15041 frå 01.03.2019 til 20.05.2019. Målar 13996 manglar data frå 08.04 kl. 08:05 til 09.04 kl. 12:19. Målar 15041 manglar data frå 08.04 kl. 08:04 til 10.04 kl. 00:18.



Figur 43 Bentonitt SW7 og SW8. Inga markant endring det første døgnet.



Figur 44 Bentonitt SW9 og SW10. Nokre av data frå poretrykksmålarane er mista, så det manglar data for å sjå effekten av installasjon av bentonitt i borhola.

5 Diskusjon

5.1 Vurdering av installasjonsprosedyrane

5.1.1 Forboring

Saltbrønner er installert med ulike prosedyrar ved å nytte tradisjonelle geotekniske boreteknikkar. Brønnane blei forbora med spyleboring. Toppmassane på NGTS består av sand. Vatnet frå spyleboringa fann dermed andre vegar enn opp gjennom borholet. Det tilrådest difor å bruke foringsrør gjennom slike toppmassar for å unngå massefortrening. Ved å redusere synken og auke rotasjonen, kom det opp meir massar frå borholet enn ved å nytte standardinnstillingane for totalsonderingar.

Det blei gjort forsøk på å installere saltbrønner ved å bruke sonic-casing. Sidan vatnet fann andre vegar enn opp gjennom borholet, så denne casingen er vurdert til å ikkje eigne seg for installasjon av saltbrønner, særleg ikkje der toppmassane er permeable. Boring av hol utan foringsrør med PDC-bit eller dragbit gjekk fint, og massane kom opp av holet.

Alle saltbrønnane blei forbora ved hjelp av spyleboring. Dette medfører at mykje slam kjem ut på overflata. Dersom metoden skal nyttast i fullskala, så må det etablerast eit system for slamhandtering i området og deponering av desse massane.

Det blei observert høgare poretrykk etter dei første boringane med Ischebeck-stag. Dette er grunna punktering av tette lag mellom det hengande grunnvatnet på 1 m djup og djupare lag. Dette medførte at det blei ståande ei vassøyle i dei opne saltbrønnane som forårsaka høgare poretrykk enn opphaveleg (Tabell 10). For å unngå dette blei dei i den neste installasjonsrunden pumpe ut vatn frå brønnane ned til 6-8 m djup før brønnane blei tetta med bentonitt. Dette sikrar at vasstanden under bentonitten ikkje kommuniserer med den over. Det blei ikkje observert tilsvarende poretrykksauke i den siste runden med installasjon som for den første installasjonsrunden.

Tabell 10 Utrekna poretrykk som følgje av punktering mellom hengande grunnvatn og djupareliggjande lag.

Djup	Opphavelag poretrykk	Hydrostatisk poretrykk GVS -1 m
8 m	41 kPa	70 kPa
12 m	53 kPa	110 kPa

5.1.2 Fylling med kaliumklorid

Kaliumklorid blei fylt i dei forbora brønnane enten som KCl-slurry gjennom borstrengen (Ischebeck), via peleslange eller som samanpressa salt.

Det er ønskeleg med mest mogleg salt og minst mogleg vatn i slurryen. Blandingsforholdet blei justert på staden og ved hjelp av justering av strøymningshastigheiten gjennom MAI-pumpa. Dette medfører varierende blandingsforhold for å hindre at systemet tetta seg. Under produksjon er det vanskeleg å finne ut kor mykje salt som hamnar i brønnen, og kor mykje som blir spylt ut på terrengoverflata.

Prosedyrer med tilførsle av salt gjennom borstrengen (Ischebeck) og gjennom peleslange viste seg å vere sårbar for at saltet tetta systemet dersom sirkulasjonen stoppa opp. Det var også utfordringar med bruk av peleslange, ettersom denne risikerte å bli sittande fast når saltet i borholet sedimenterte. Slangen kunne også sprekkje dersom den blei tetta og det bygde seg opp trykk i systemet.

Ved å installere samanpressa salt er det full kontroll over kor mykje salt som blir installert i brønnen og til kva nivå. Installasjonen gjekk raskt og problemfritt, utan søl av salt på terrengoverflata. Denne prosedyren er å tilrå i staden for å bruke KCl-slurry då den er meir effektiv på staden, og overflateforureining unngåast. Det må utviklast ei metode for trygg senking av strengen med KCl ned i borholet, slik at dette ikkje gjerast for hand. Bruk av vinsj kan vere ein moglegheit.

5.1.3 Tidsbruk for installasjon

Installasjonen av saltbrønnane har vist seg å vere nokså tidkrevjande. I snitt har det vorte brukt ca. 1 time for installasjon per brønn. Med ein senteravstand på 1,5 m mellom brønnane vil det ta omtrent ei arbeidsveke (40 timar) å installere brønner i eit område på 100 m². For at metoden skal bli kostnadseffektiv må installasjonsarbeidet bli meir effektivt.

5.2 Poretrykksrespons

Forboring med spyleboring og foringsrøyr i topp førte til liten eller ingen poretrykksauke. Installasjonsprosedyrane som er nytta i dette prosjektet er dermed skånsame, og kan såleis brukast til å sikre kvikkleireområder. Saltet som blir installert i brønnane tiltrekk seg vatn frå kringliggjande leire for å bli løyst opp. Dette ser ut til å medføre at poretrykket synk. Ved installasjon av saltbrønner i eit kvikkleireområde er det positivt for sikkerheita i anleggsperioden at poretrykket synk. Poretrykksmålarane bør lesast av hausten 2019 for å sjå om poretrykket stig opp til opphavelag nivå.

5.3 Saltforbruk

Det blei brukt større mengder KCl enn estimert på førehand. Ved å rekne ein densitet på tørt KCl pulver på 1,2 kg/L og ei lengde på «saltsøyla» på 17 m, så skulle dette utgjere ca. 130 kg KCl per brønn. I snitt blei det brukt om lag 200 kg KCl per brønn. Under nedpumping av KCl-slurry blei vatnet som allereie var i brønnen etter forboringa spylt ut. Det blei brukt ca. 200 L vatn for fylling av KCl-slurry, og ei strøymingshastigheit på ca. 400 L/time. Volumet i heile brønnen ned til 25 m djup er på 159 L. Dvs. at ca. 40 L vatn med meir eller mindre oppløyst salt blei spylt ut på overflata. Med ein løysingsevna

på ca. 260 g KCl/L, så vil det seie at ca. 10-15 kg KCl blei spylt ut på terrengoverflata. I tillegg blei dei øvre 6-8 m med oppløyst salt pumpa ut før fylling av bentonitt. Dette utgjør også ca. 10-15 kg KCl. Dvs. at minst 20-30 kg KCl frå kvar brønn er blitt spylt ut på terrengoverflata. Hastigheita på nedpumping av KCl-slurryen var relativt høg. Dermed kan noko av saltkrystalla også ha blitt med straumen ut av brønnen, dvs. at det kan ha blitt spylt ut meir enn 260 g KCl/L. Det var ikkje tydelege spor av saltkrystallar på terrengoverflata med unntak av nokre få brønnar. Likevel er det brukt langt meir salt enn dei teoretiske berekningane. Det er uvisst kor dette saltet har hamna. Ein av årsakene kan vere at diameteren av holet som borast blir større enn sjølve borkrona grunna spyling og erosjon under boringa. Det er ikkje observert om saltet på overflata påverkar vegetasjonen.

Ved å installere saltstavar veit ein nøyaktig kor store mengder salt som blir installert i brønnen og på kva nivå. Det blir ingen overflateforureining med salt ved å installere saltstavar. K+S kunne berre produsere saltkubar med dimensjon 5x5x5 cm. Det er likevel ønskeleg å lage saltstavar med større volum. Ved å produsere stavar med diameter 8 cm, vil det kunne installerast 170 kg KCl i brønnen.

På Ulvensplitten blei det brukt totalt ca. 640 tonn KCl (ca. 240 kg/brønn) (Eggestad og Sem, 1976) over eit område på ca. 6000 m². Brønnane hadde ein diameter på 15 cm og var 15-16 m djupe. Dvs. 15-16 kg KCl per m brønn. Eggestad og Sem (1976) estimerte at det blei brukt ca. 8,5 kg KCl/m³ leire. På Dragvoll blei brønnane etterfylt med salt jamleg for å oppretthalde fullt metta løysning i brønnane gjennom heile prosjektperioden. Brønnane på Dragvoll var konstruert av PE miljøbrønnrøyr med ytre diameter 63 mm. Desse var perforerte frå 4 til 8 m djup. Totalt blei det brukt ca. 80 kg KCl i kvar brønn. Dvs. 20 kg per m brønn. Det er likevel svært lite KCl som skal til for å auke omrøyrd skjærstyrke (c_{ur}) til over 1 kPa. På Dragvoll blei c_{ur} auka til over 1 kPa ved å tilsetje så lite som 0,5 g KCl/L porevatn. For å vere på den konservative sida kan ein anslå at det bør tilsetjast 1 g KCl/L porevatn for å stabilisere leira. Ved å anta vassinnhald i leira på 35% og tyngdetettheit 19 kg/m³, så trengs det 470 g KCl for å stabilisere 1 m³ med leire ($c_{ur} > 1$ kPa).

Kor langt og kor fort diffusjonen av KCl vil gå i leirvolumet avheng av effektiv diffusjonskoeffisient, konsentrasjonsgradienten mellom brønn og omkringliggende leire og kationebyttekapasiteten. Den effektive diffusjonskoeffisienten og kationebyttekapasiteten er gitt av kjemikalia og leira, men konsentrasjonsgradienten kan oppretthaldast høg ved å tilsetje mest mogleg salt i brønnen slik at brønnen fungerer som eit KCl reservoar der saltløysninga blir verande metta lengst mogleg. Det er difor ønskeleg å tilføre så mykje salt som mogleg i brønnen under installasjon slik at løysninga forblir høg i brønnen i lengst mogleg tid etter installasjon.

Dersom det er meir permeable lag i jordprofilet kan saltet følgje strøyminga i grunnvatnet slik at det eksponerte arealet blir større. Om strøyminga er stor er det også moglegheit for at mykje av saltet vaskas ut før det rekk å trenge inn i leira.

6 Konklusjon

Basert på forsøka som er utført ser det ut til at saltbrønnane lar seg installere utan å ha nokon særlig negativ innverknad på leirvolumet rundt brønnane. Rett etter installasjon er det riktig nok ei lita aukiing i poretrykket, men denne er lokal og kortvarig før poretrykket minkar. I forsøka utført på NGTS Tiller-Flotten minka poretrykket til langt under opprinneleg poretrykk i tida etter installasjon. Det er uvisst kor langvarig denne effekten er.

Forboring bør utførast med størst mogleg rotasjon for å få opp mest mogleg massar. Ved boring med totalsonderingsutstyret så var det hensiktsmessig å halvere synken i forhold til konvensjonell totalsondering, og i tillegg auke rotasjonshastigheita til ca. 125 rpm. Det må sikrast at massane kjem opp av borholet ved å installere foringsrøyr gjennom dei øvre jordlaga dersom nødvendig.

Av dei fire installasjonsmetodane som blei prøvd ut, så er metoden med saltstavar å føretrekke på grunn av:

- ↗ Kontroll med mengde og til kva nivå saltet blir installert
- ↗ Unngår at salt spylast ut på terrengoverflata
- ↗ Enkelt og raskt å installere i felt

Installasjonsarbeida er relativt tidkrevjande om ein samanliknar med installasjon av kalk-/sementpelar og vertikaldren som berre tek nokre få minutt. Fordelen er likevel at saltbrønnane kan installerast i kupert terreng utan å generere poreovertrykk med lett utstyr som alle firma med geotekniske boreriggjar kan utføre.

7 Referansar

- [1] Norges geotekniske institutt, «20160154-19-R Factual report - Tiller-Flotten research site,» NGI, Trondheim, 2018.
- [2] Multiconsult AS, «Tolkning av horisontal konsolideringskoeffisient fra CPTU dissipasjonstest,» Multiconsult , Trondheim, 2019.
- [3] Norges geotekniske institutt, «Tiller-Flotten research site - Site characterisation and engineering properties of Tiller-Flotten quick clay.,» NGI, Trondheim, 2019.
- [4] T. E. Helle, «Quick-clay landslide mitigation using potassium chloride.,» NTNU Faktultet for ingeniørvitenskap og teknologi, Trondheim, 2017.

Vedlegg A

TEKNISK NOTAT FOR DISSIPASJONSTEST

NOTAT

OPPDRAAG	Saltstabilisering av kvikkleire - Fakturerbar	DOKUMENTKODE	10207404-01-RIG-BerHeft-001
EMNE	Tolkning av horisontal konsolideringskoeffisient fra CPTU dissipasjonstest	TILGJENGELIGHET	Åpen
OPPDRAAGSGIVER	Stjørdal kommune, Fakturamottak	OPPDRAAGSLEDER	Anders Samstad Gylland
KONTAKTPERSON	Tonje Eide	SAKSBEHANDLER	Anteneh Biru Tsegaye
KOPI		ANSVARLIG ENHET	Multiconsult Norge AS

SAMMENDRAG

Multiconsult Norge AS er involvert i prosjektet «Saltstabilisering av kvikkleire». Multiconsult Norge AS bidrar bla. med vår kompetanse knyttet til geoteknikk og med ressurstilførsel i form av egne timer samt geotekniske felt- og laboratorietjenester.




Foreliggende notat omhandler tolkning av horisontal konsolideringskoeffisient fra CPTU dissipasjonstester som ble forsøket i pilotprosjektet. Horisontal konsolideringskoeffisienten ble tolket av noe fire forskjellige tilnærminger og presentert mot dybde.

1 Innledning

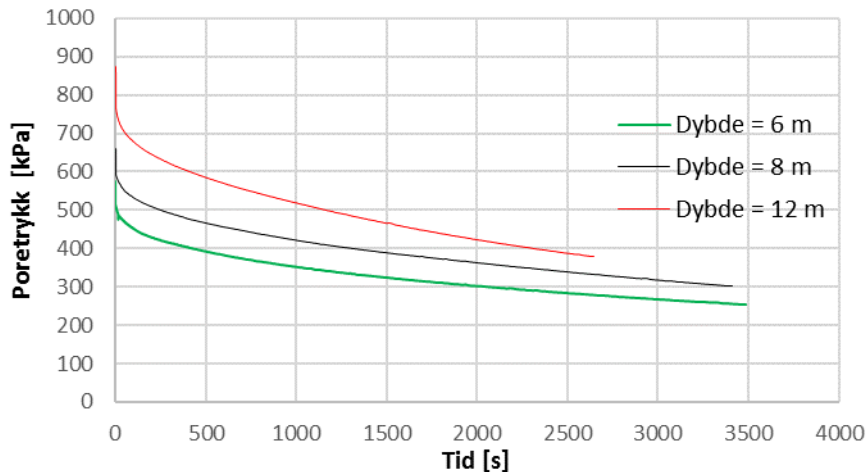
Multiconsult Norge AS er involvert å støtte prosjektet «Saltstabilisering av kvikkleire». Multiconsult Norge AS bidrar i prosjektet bla. med vår kompetanse knyttet til geoteknikk og med ressurstilførsel i form av egne timer samt geotekniske felt- og laboratorietjenester. Foreliggende notat omhandler tolkning av horisontal konsolideringskoeffisient fra CPTU dissipasjonstester som ble gjort i pilotprosjektet.

2 Dissipasjonskurver fra CPTU dissipasjonstester

Dissipasjonskurver for tre forskjellige dybder målt i CPTU er vist i Figur 2-1. Kurven skal brukes for å tolke horisontal konsolideringskoeffisienten.

					
00	06.03.2019	Ut arbeidet beregningshefte	Anteneh Biru Tsegaye	Anders Samstad Gylland	Anders Samstad Gylland
REV.	DATO	BESKRIVELSE	UTARBEIDET AV	KONTROLLERT AV	GODKJENT AV

Tolkning av horisontal konsolideringskoeffisient fra CPTU dissipasjonstest



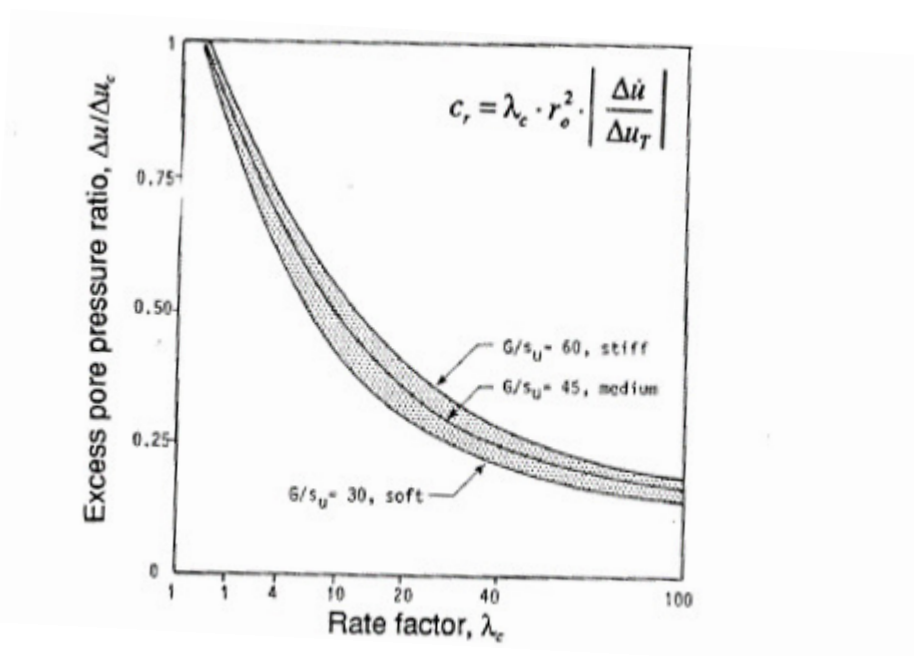
Figur 2-1: Målt poretrykksdissipasjon kurver

3 Beskrivelse av tilnærminger

Fire tilnærminger for tolkning av resultatene ble brukt. Tilnærmingene er beskrevet neste.

3.1 Svanø (1982) [1]

Svanø (1982) foreslått en tilnærming som beskriver radialkonsolideringskoeffisienten som funksjon av hastighet av poretrykksdissipasjon. Tilnærmingen er supplert med diagrammer for estimering noen parametere, Figur 3-1. Videre har vi forenklet metoden ved bruk av gjennomsnitt hastighet av poretrykksdissipasjonen.



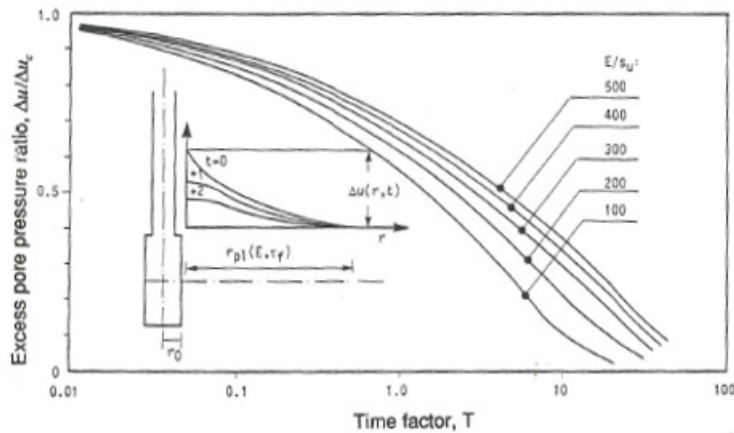
Figur 3-1: Løsninger av den hastighetsfaktor, λ , mot poreovertrykksforhold.

3.2 Torstensson (1975) [2]

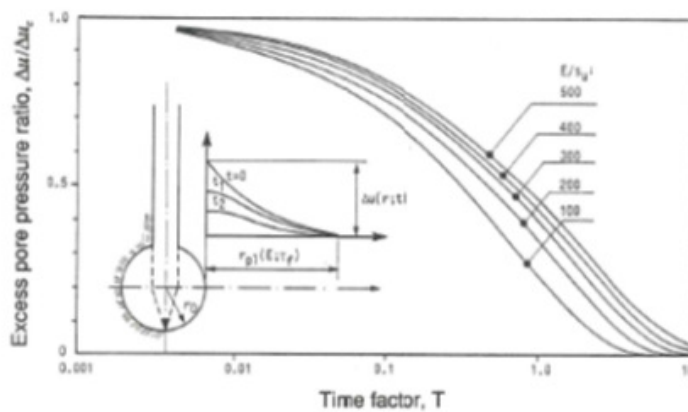
Torstensson (1975) utviklet dissipasjonsdiagrammer basert på hulromekspansjonsteori, Figur 3-2 og Figur 3-3. Begge sylindrisk og sfærisk koordinatsystem ble tatt i hensyn til. Diagrammene gir

Tolkning av horisontal konsolideringskoeffisient fra CPTU dissipasjonstest

tidsfaktor for en gitt (bestemt) poreovertrykksforhold avhengig av stivhetsindeks. Radialkonsolideringskoeffisienten er beregnet for 50% konsolideringsgrad.



Figur 3-2: Sylinderløsninger- tidsfaktor, T mot poreovertrykksforhold for diverse stivhetsindeks.



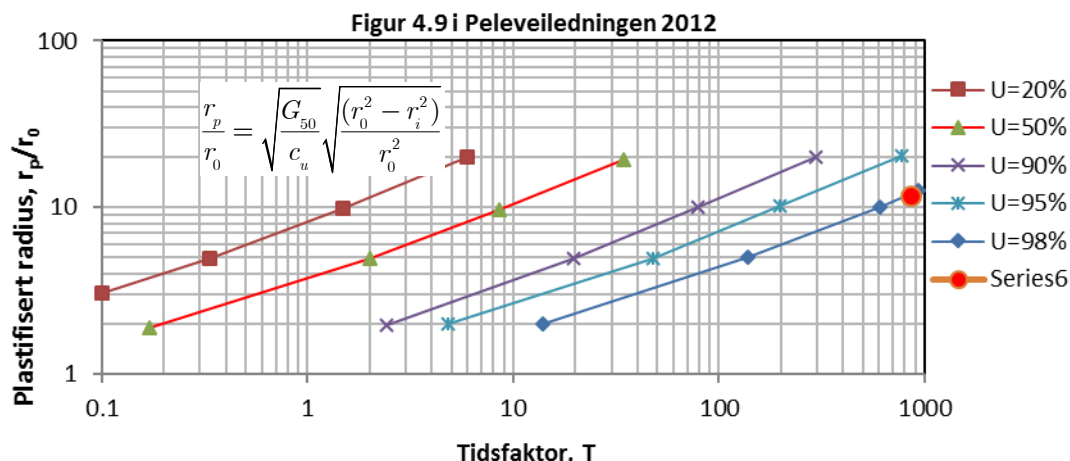
Figur 3-3: Sfæriskløsninger- tidsfaktor, T mot poreovertrykksforhold for diverse stivhetsindeks.

3.3 Tilnærming adoptert fra Peleveiledning (2012) [3]

Her bruker vi en empiriske metode som er forslått i Peleveiledningen 2012. Metoden ble utviklet for å beregne poretrykksgenerering og dissipasjon rundt rammet peler og inneholder diagrammer for å beskrive stivhetsindeksen og tidsfaktoren, Figur 3-4. Det er antatt at tidevolusjon av poretrykkdissipasjon rundt rammet peler er noe lignende til poretrykkdissipasjon rundt CPTU. De forskjellige kurver er tilnærmet ved bruk av interpolering funksjoner.

Radialkonsolideringskoeffisienten er beregnet for 50% konsolideringsgrad.

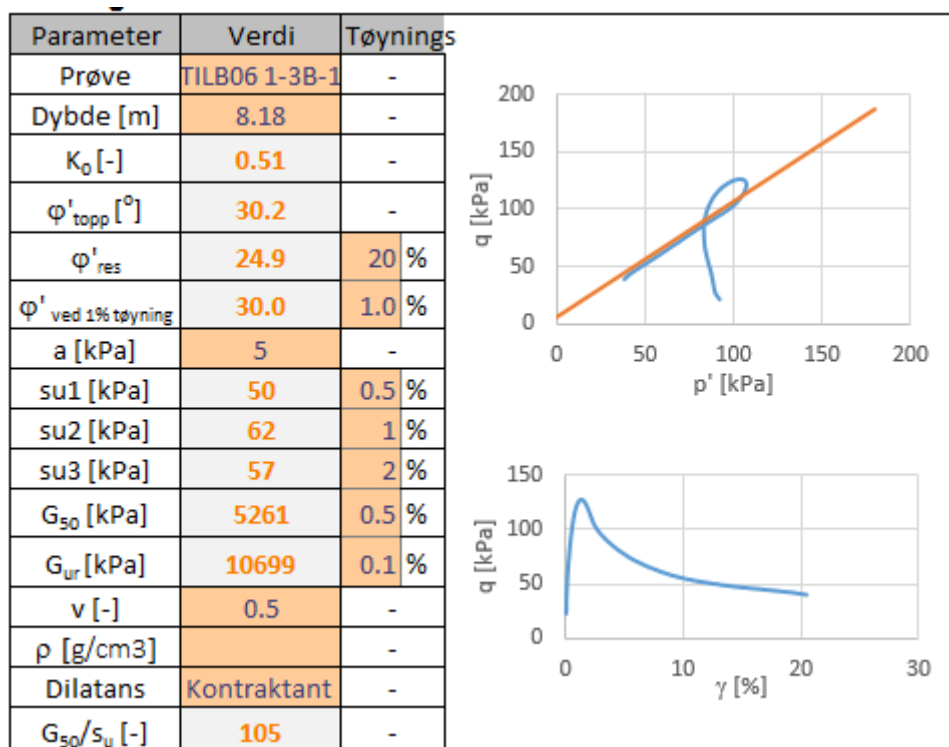
Tolkning av horisontal konsolideringskoeffisient fra CPTU dissipasjonstest



Figur 3-4: Tidsfaktor mot plastifisert radius

4 Vurdering av modellparametere

En parameter som er nødvendig i de forskjellige tilnærminger er den såkalte stivhetsindeks (rigidity index) som er definert som stivhet delt på udrenert skjærfasthet. Stivheten er definert litt arbitrært. Her definere vi det som sekantskjærmodul gjennom 50% av skjærfastheten delt på udrenert skjærfasthet av leira. Stivhetsindeksen er estimert fra treaksialforsøk. Ett treaksialforsøk ble tolket. Tolkingsresultater er presentert i Figur 4-1

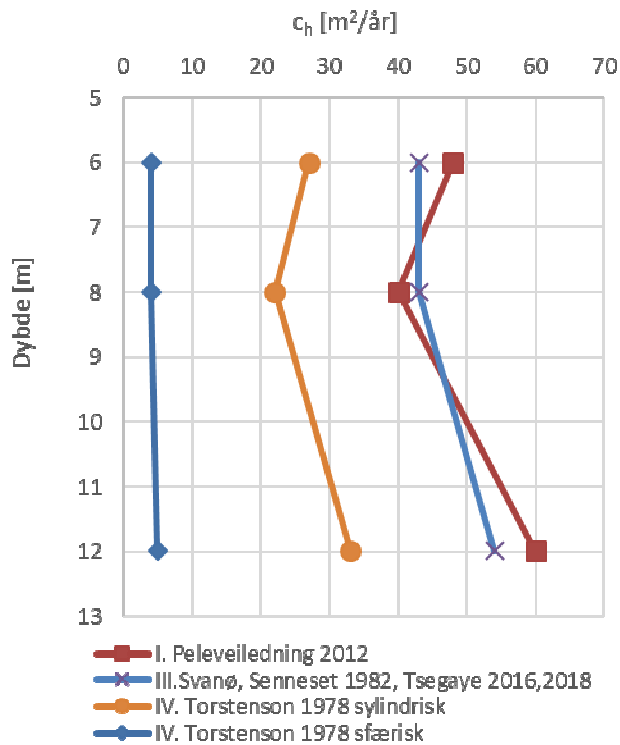


Figur 4-1: Tolkingsresultater for treaksialforsøk

5 Resultater

Tolkingsresultater av radialkonsolideringskoeffisienten er vist i Figur 5-1. Laveste verdier ble funnet for sfærisk konsolidering ved bruk av Torstensson's diagram og høyeste verdier ble funnet fra metodikk adoptert fra Peleveiledningen 2012.

Tolkning av horisontal konsolideringskoeffisient fra CPTU dissipasjonstest



Figur 5-1: radial (horisontal) konsolideringskoeffisient med dybde tolket fra dissipasjonstestene ved bruk av forskjellige tilnærminger.

6 Slutt kommentarer

Tilnærmingene er bygd på grunnlag av forskjellige antagelser og derfor gir forskjellige svar.

Tilnærmingene tar stivhetsindeksen som parameter. I de fleste tilnærminger er stivheten ikke godt definert. I dette dokument bruker vi sekant skjærmodul for alle.

7 Referanser

- [1] G. Svanø, «Tolkning av konsolideringskoeffisienten c_h fra dissipasjonsforsøk,» NTH, Geotechnical Division, report no. O.81.19, 1980.
- [2] B. Torstensson, «pore pressure sounding instrument,» i *ASCE, Special Conference, Raleigh, Proceedings, vol.1, pp.48-54*, 1975.
- [3] Den Norske Pelekomite, «Peleveiledningen,» 2012.

Vedlegg B

LOGGING AV INSTALLERING AV
BRØNNAR

Innhold

B1	Ischebeck og KCl-slurry	II
B2	Totalsondering og KCl-slurry	III
B3	Totalsondering og KCl-kubar	IV
B4	Sonicboring og KCl-slurry	V

B1 Ischebeck og KCl-slurry

Tabell 1 Logging av installering av brønnar

Oppgave/Brønn	SW1	SW2	SW3	SW4
Dato	29.11.2018	29.11.2018	29.11.2018	29.11.2018
Tid boring (minutt)	60	24	20	17
Bora dybde (m)	25	17,5	17,5	17,5
Faktisk dybde bunn borhull (m)	25	17,5	17,5	17,5
Salt mengde (kg) inkl. det som blei fylt i 29.01.2019	187,5	110	93	75
Salt i brønn (kg)		97,5		
Trekke stenger (minutt)	13	13	13	13
Dato pumpe og tette borhull (NTNU)	11.02.2019	11.02.2019	11.02.2019	07.02.2019
Tid pumping av vatn (minutt)	10	10	10	10
Bentonitpellelets (kg) fylt i av NTNU 11.02.2019	50	50	50	50
Maskintimer gravemaskin+bortårn (minutt)	89	42	41	37
Aggregattimer for MAI-pumpe (minutt)	16	5	8	7
Energiforbruk gravemaskin (liter drivstoff)	17,9	8,5	8,3	7,5
Energiforbruk aggregat (liter drivstoff)	0,9	0,3	0,5	0,4
Energiforbruk pumpe Honda VX15 (liter drivstoff)	0,22	0,22	0,22	0,22
Total tid (riggtid+aggregat+pumping)	115	57	59	54
<i>Tal i grå kursiv er antatt verdi basert på erfaring fra brønner av samme type</i>				

B2 Totalsondering og KCl-slurry

Tabell 2 Logging av installering av brønner

Oppgave/Brønn	SW17	SW18	SW19	SW20	SW21 Naver -Mislykka	SW22
Dato	26.03.2019	26.03.2019	03.04.2019	04.04.2019	02.04.2019	02.04.2019
Tid boring (minutt)	18	17	59	41		60
Bora dybde (m)	25	25		25		25
Tid trekking av borstreng (minutt)	7	7.5	7.5	8		8
Faktisk dybde bunn borhull (m)	23	23	23	23		23
Salt mengde (kg)	200	167.5	225	248		225
Salt i brønn (kg)			200	?		
Tid pumping av vatn (minutt)	uten pumping	slagen satt fast	5	5		5
Bentonitpellets (kg)	0	0	50	57.5		62.5
Bentonitplugg (antal)	10	Slangen står igjen i holet	0	15		
Maskintimer rigg (minutt)	25	24.5	66.5	49		68
Tid fylling av bentonitt og rigging av utstyr (minutt)	45	45	45	45		45
Tid pumping av vatn (minutt)	10	10	10	10		10
Aggregattimer for MAI-pumpe (minutt)	15	21	16	23		18
Energiforbruk rigg (liter drivstoff)	1.4	1.4	3.7	2.7		3.8
Energiforbruk aggregat (liter drivstoff)	0.9	1.2	0.9	1.3		1.1
Energiforbruk vannpumpe forboring og opp-pumping (liter drivstoff)	0.39	0.37	1.39	1.00		1.41
Energiforbruk vannpumpe pumping fra gård (liter drivstoff)	0.22	0.22	0.22	0.22		0.22
Total tid (riggtid+aggregat+pumping)	95	100.5	137.5	127		141

Tal i grå kursiv er antatt verdi basert på erfaring fra brønner av samme type

B3 Totalsondering og KCl-kubar

Tabell 3 Logging av installering av brønner

Oppgave/Brønn	SW11	SW12	SW13	SW14	SW15 Miljøbrønnrør	SW6
Dato	27.03.2019	27.03.2019 & 02.04.2019	03.04.2019	03.04.2019	04.04.2019	Ikke installert
Tid boring (minutt)	33	48	63	62	52	
Bora dybde (m)	25	25	25	25	25	
Tid trekkig av borstreng (minutt)	7	10	6	7	7.5	
Faktisk dybde bunn borhull (m)	25	25	23	25	25	
Tid montering saltstav (minutt)	8	10	7	7	10	
Dytte ned saltstav med rigg (minutt)	6	10	8	7	7	
Trekke stenger (minutt)	3	3	3	3	3	
Tid pumping av vatn (minutt)	ingen data	3	5	2	2	
Salt mengde (kg)	85	85	171	171	85	
Bentonittpellets (kg)	0	15	37.5	62.5	42.5	
Bentonittplugg (antal)	10	10	0	15	0	
Dytta ned bentonittplugg med rigg (minutt)	4	0	0	0	0	
Tid for fylling av bentonitt (minutt)			30	30	30	
Tid pumping av vatn (minutt)	10	10	10	10	10	
Maskintimer rigg (minutt)	53	71	80	79	69.5	
Energiforbruk rigg (liter drivstoff)	2.9	3.9	4.4	4.4	3.9	
Energiforbruk vannpumpe for boring og opp-pumping (liter drivstoff)	0.7	1.1	1.5	1.4	1.2	
Energiforbruk vannpumpe pumping fra gård (liter drivstoff)	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	
Total tid (rigg tid+pumping)	71	94	102	98	91.5	
			Trakk frå 30 min for bæring salt rigge pumpe etc	Trakk frå 30 min pga vatn+slange som sprakk for NGI etc.		

Tal i grå kursiv er antatt verdi basert på erfaring fra brønner av samme type

* fekk ikkje dytta stavane lenger sidan staven mista kontakt med adapter

B4 Sonicboring og KCl-slurry

Tabell 4 Logging av installering av brønner

Oppgave/Brønn	SW5	SW6	SW7	SW8	SW9	SW10
Dato	03.04.2019	03.04.2019	08/09/10.04.2019	09/11.04.2019	09/10.04.2019	09/10.04.2019
Tid boring (minutt)	61	20	80	30	15	30
Bora dybde (m)	26	25	25	25	25	25
Tid fylling salt (minutt)	102	115	120	30	35	30
Tid pumping av vatn (minutt)	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>10</i>
Salt mengde (kg)	200	300	275	225	250	250
Salt i brønn (kg)	175	260	275	225	250	250
Bentonittplugg (kg)	100	100	100	100	100	40
Tid tømning brønn (minutt)	13	25	30	30	5	15
Tid plugging bentonitt (minutt), håndholdt	27	27	27	27	27	27
Maskintimer rigg (minutt)	61	47	107	57	42	57
Aggregattimer (minutt)	102	115	120	30	35	30
Energiforbruk rigg (liter drivstoff)	3	3	6	3	2	3
Energiforbruk vannpumpe (liter drivstoff)	0,5	0,8	0,9	0,9	0,3	0,5
Energiforbruk aggregat (liter drivstoff)	6	7	7	2	2	2
Total tid (rigg tid+aggregattimer+ pumping +håndholdt)	213	223	293	153	119	138
<i>Tal i grå kursiv er antatt verdi basert på erfaring fra brønner av samme type</i>						