

OPPGAVETEKST

Tittel: Vanninfiltrasjon i fjellbrønner i forbindelse med drivingen av Follobanetunnelen.

Student: Henrikke Marie Hogseth Børsum

Hovedveileder: Randi Kalskin Ramstad, NTNU

Medveileder: Fredrikke Syversen, Bane NOR

Oppgavetekst

- Litteraturstudium som belyser relevant internasjonal og nasjonal teori.
- Beskrivelse av de ulike målemetodene som benyttes i oppgaven (poretrykk, setninger, infiltrasjonsmengder, innlekkasje i tunnelen).
- Områdebeskrivelse med illustrative kart over de ulike studieområdene (inkl. Nordstrand og Snipetjern), samt eksisterende og nye data.
- Resultater som viser:
 - Influensområder for infiltrasjonsbrønnene og responstid i løsmassene (avhengighet av grunnforhold)
 - Sammenheng mellom poretrykk, vanninfiltrasjon og hendelser i tunnelene
 - Detaljer fra setningsovervåking fra området ved Nordstrand
- Diskutere eventuelle tydelige sammenhenger, kvaliteten på resultatene og hvorfor noen infiltrasjonsbrønner ser ut til å fungere bedre enn andre. Hvordan kan metoden med infiltrasjon som forebyggende og avbøtende tiltak for å opprettholde naturlig grunnvannsnivå forbedres?
- Konklusjon og forslag til videre arbeid.

SAMMENDRAG

En tunnel åpner et bergrom i grunnen, som påvirker den naturlige fordelingen av vann i bergmassen. Som følge av innlekkasje til tunnelen kan poretrykket i fjellet rundt tunnelen reduseres. Dette kan drenere løsmassene over, og føre til setninger. Som konsekvens av dette kan hus og infrastruktur få setningsskader, og innsjøer og myrer kan dreneres.

Follobanen er en 22 km lang jernbanetunnel som skal forkorte reisetiden mellom Oslo S og Ski med 11 minutter. Den største delen av prosjektet består av to parallelle tunnellop som drives med fire tunnelboremaskiner (TBM). Disse etablerer vanntette betongelementer bak stoff. Unntaket er tverrforbindelsene som drives konvensjonelt. Disse sprenges ut hver 500. meter, og blir ikke vanntette. Det er blant annet benyttet data fra poretrykkovervåking, infiltrerte vannmengder, TBM-enes fremgang og setningsdata i studien. På Nordstrand er det etablert flere infiltrasjonsbrønner. Området består av stedvis tykke løsmassedekker hvor det er fundamentert hus og infrastruktur. For å undersøke hvilken effekt infiltrasjonsbrønnene har er området ved Snipetjern sammenliknet med Nordstrand. Her er det ikke installert infiltrasjonsbrønner, men grunnforholdene likner grunnforholdene på Nordstrand.

Resultatene viser at poretrykket i fjell og løsmasser reduseres i begge de to områdene når TBM-ene passerer. Likevel ser det ut til at poretrykket ved Snipetjern bruker lenger tid på å re-etableres på et normalt nivå etter at TBM-ene er forbi. Dette kan skyldes grunnforhold og åpning av tverrforbindelser, men det antas også at vanninfiltrasjonen har en effekt. Det ser ut til at poretrykket i begge de studerte områdene er på vei opp til sine normale nivå etter at TBM-ene har passert. Dette kan bety at TBM-enes vanntette sikring fungerer. Studien viser indikasjoner på at de drenerte tverrforbindelsene reduserer poretrykk. Resultatene viser også at vanninfiltrasjon øker poretrykk i både fjell og løsmasser på Nordstrand, men klarte ikke å trekke klare konklusjoner om infiltrasjonsbrønnenes influensområder. Resultatene svarer ikke på hvilke infiltrasjonsrater som er å foretrekke ved vanninfiltrasjon. En grunn til dette kan være at infiltrasjonstrykket er begrenset av drikkevannsnettet, og at de benyttede ratene på Follobanen ikke varierer nok til å gi store utslag i poretrykk. Det er kartlagt setninger med nivellering og med InSAR ved det studerte området på Nordstrand. Follobanen har mest sannsynlig forårsaket noen av setningene, men størstedelen oppsto før byggingen på Follobanen ble påbegynt.

ABSTRACT

A tunnel affects the distribution of ground water, as it creates new cavities underneath the Earth's surface. Leakages from the ground water into the tunnel will reduce pore water pressure in the rock mass, possibly leading to drainage of the above-lying soils. This could eventually cause ground subsidence. In a worst-case scenario, this might damage infrastructures and buildings.

The Follo Line is a tunnel project of 22 km, aiming to take 11 minutes off the current travel time between Oslo and Ski. The largest part of the project consists of two parallel tunnels drilled by four tunnel boring machines (TBM). While drilling, the TBMs form a water proof ceiling of the tunnel profile, preventing water leakage. However, the cross passages between the parallel tunnels are drilled using conventionally drill and blast methods. The crossing between the tunnels appear every 500 meter, and is not sealed. This study's main variables include pore pressure in related rock mass and soils, the amount of infiltrated water, the progress of the TBMs and information on subsidence in the inflected areas. At Nordstrand, there are established infiltration wells to prevent a reduction in pore pressure. The area consists of thick soils in various places, where buildings and infrastructure are fundamented. To examine the effect of the infiltration wells, the relevant area was compared to another with similar ground conditions, but without infiltration wells (Snipetjern).

The results show that pore pressure in rock and soils are reduced at the passing of the TBMs. The water sealing of the tunnel seems to play a role in re-establishment of pore pressure, because the pore pressure seems to re-establish in both studied areas. The pore pressure in the area with no infiltration wells needs more time to re-establish after the passing of the TBMs, when compared to infiltration well inflected area. The reason might be ground conditions and opening of cross passages, but it is assumed that water infiltration also have an impact. The study also indicates that the cross passages reduce the pore pressure. Water infiltration at Nordstrand seems to have increased pore pressure in both soils and rock. The study does not show preferred infiltration rates for the water infiltration. A reason might be that the rates used at Follobanen not vary enough. Some subsidence occurred in the infiltration well inflected areas, prior to the tunnel excavating. The TBMs are also likely to cause some degree of subsidence, despite water infiltration.

INNHOLDSFORTEGNELSE

OPPGAVETEKST.....	i
SAMMENDRAG.....	iii
ABSTRACT.....	v
INNHOLDSFORTEGNELSE.....	vii
FIGURLISTE.....	xi
TABELLISTE.....	xv
FORKORTELSER.....	xvii
FORORD.....	xix
1 INNLEDNING.....	1
2 TEORI.....	3
2.1 Geologi og løsmassegeologi i Oslo-området.....	3
2.2 Grunnvann og poretrykk.....	4
2.2.1 Poretrykk.....	4
2.2.2 Vann i berg.....	6
2.2.3 Vann i løsmasser.....	9
2.3 Måling av poretrykk og grunnvannstand.....	10
2.3.1 Piezometer.....	10
2.3.2 Peilerør.....	10
2.3.3 Trykkcelle.....	11
2.4 Vanninfiltrasjon i tunnelanlegg.....	11
2.5 Brønner og borehull i fjell.....	16
2.6 Testing av bergmasse og strømningsforhold.....	17
2.6.1 Lugeontesting.....	18
2.6.2 Testpumping.....	19
2.7 Setninger.....	20
2.7.1 Generelt om setninger.....	20
2.7.2 Måling av setninger.....	22
2.8 Vannlekkasjer i tunnel.....	23
2.9 Tidligere prosjekter.....	24
2.9.1 Romeriksporten.....	24
2.9.2 Oslo Sentrum.....	28

2.9.3	Lysaker-Sandvika	29
2.9.4	Internasjonale prosjekter	31
3	OMRÅDEBESKRIVELSE	33
3.1	Om Follobanen.....	33
3.2	Utførte undersøkelser på Follobanen.....	35
3.3	Geologi og løsmassegeologi langs Follobanetraséen	37
3.4	Oversikt over Follobanetraséen	39
3.5	Follobanens områdeinndeling etter sensitivitet	42
3.5.1	Område 1 – km. 2,3 til 4,0	43
3.5.2	Område 2 – km. 4,0 til 5,0	44
3.5.3	Område 3 – km. 5,0 til 7,8	44
3.5.4	Område 4 – km. 7,8 til 8,5	47
3.5.5	Område 5 – km. 8,5 til 9,0	48
3.5.6	Område 6 – km. 9,0 til 11,2	49
3.5.7	Område 7 – km. 11,2 til 12,0	49
3.5.8	Område 8 – km. 12,0 til 15,7	50
3.5.9	Område 9 – km. 15,7 til 18,9	52
3.5.10	Område 10 – km. 18,9 til 20,6	53
3.5.11	Område 11 – km. 20,6 til 21,3	54
3.6	Det studerte Nordstrandsområdet	54
3.7	Det studerte området ved Snipetjern.....	56
4	METODER	59
4.1	Follobanens overvåkingsmetoder	59
4.1.1	Infiltrasjonsbrønner på Follobanen.....	59
4.1.2	Overvåking av poretrykk	60
4.1.3	Lekkasje i tunnelen	62
4.1.4	Setninger	62
4.2	Metoder benyttet i masteroppgaven.....	62
4.2.1	Data benyttet til resultatene i masteroppgaven	63
4.2.2	Beskrivelse av generelle utregninger og prosedyrer	63
4.2.3	Poretrykkutvikling på Nordstrand.....	64
4.2.4	Poretrykkutvikling ved Snipetjern	65
4.2.5	Poretrykkreduksjon i forhold til avstand til TBM.....	65
4.2.6	Influensområder for infiltrasjonsbrønnene	66

4.2.7	Setningsovervåking på Nordstrand	67
4.2.8	Responstid i løsmasser	69
5	RESULTATER	71
5.1	Poretrykkutvikling på Nordstrand	71
5.2	Poretrykkutvikling ved Snipetjern	74
5.3	Poretrykkreduksjon som funksjon av avstand til TBM	76
5.4	Influensområder for infiltrasjonsbrønnene	78
5.5	Setninger i Nordstrandsområdet	81
5.6	Responstid i løsmasser	86
6	DISKUSJON	87
6.1	Poretrykkovervåking på Nordstrand	87
6.2	Poretrykkovervåking Snipetjern	88
6.3	Sammenlikning av poretrykk mellom Nordstrand og Snipetjern	89
6.4	Influensområder for infiltrasjonsbrønnene på Nordstrand	90
6.5	Setninger i det studerte området på Nordstrand	92
6.6	Responstid i løsmasser	93
6.7	Generell diskusjon	93
7	KONKLUSJON	95
8	VIDERE ARBEID	97
9	REFERANSER	99
	VEDLEGG	1

FIGURLISTE

- Figur 1. Sprekkedannelse i forbindelse med folding av bergartslag (Brattli, 2009)..... 8
- Figur 2. Oversikt over hydraulisk konduktivitet (K) i løsmasser (Brattli, 2009, basert på Carlsson og Gustafsson, 1984). Leire har lavest hydraulisk konduktivitet. 9
- Figur 3. Prinsippskisse av vanninfiltrasjon i berg. Vann tilføres borehullet fra vannledningen. Deretter går vannet inn i svakhetssonen (her: sleppe), og videre opp til løsmassene. Pakkeren skal sørge for at vannet går ned i grunnen, og ikke opp igjen gjennom borehullet (BaneNOR, u. å.-b)..... 12
- Figur 4. Pakker, som skal sørge for at vannet går inn i sprekkene i bergmassen og ikke opp igjen til overflaten. Pakkeren blåses opp under høyt trykk. Bilder tatt i felt, fra Follobanen..... 13
- Figur 5. Vanninfiltrasjon i en svakhetsone. Vannet fordeler seg på undersiden av løsmassene. Denne figuren viser forvitret berg under løsmassene, som vannet fordeler seg i. I Osloområdet er det ofte et permeabelt morenelag som fungerer på samme måte. Slik presses det vann under leira, som kan sørge for at poretrykket i leira opprettholdes (AGJV, 2016). 15
- Figur 6. Prinsippskisse for kjerneboring. Kraften mates på, og kjernen som bores ut går inn i kjernerøret (Engineering, u. å.)..... 16
- Figur 7. Prinsippskisse for hammerboring. Ved hjelp av en pulserende matekraft samt rotasjon knuses berget (Veslegard og Simonsen, 2014). 17
- Figur 8. Prinsippskisse for lugeontesting. Vannet tilføres mellom de to pakkerne og går ut i sprekkene (Nilsen og Broch, 2012). 18
- Figur 9 a og b. Utstyr benyttet til lugeontesting. a) Vannslanger og brønn. Pumpe til venstre som sørger for at pakkeren ekspanderes og dermed holdes på rett dyp i brønnen. På de to blå beholderne ses ventiler og målere på slangen som overvåker infiltrert vannmengde og trykk på vannet. b) Infiltrasjonsbrønn med pakker. Bilder tatt i felt, fra Follobanen. 19
- Figur 10. Marin leire danner en korthusstruktur. Mellom leirmineralene er det vann. Når vannet dreneres ut kan strukturen komprimeres (Vorren et al., 2007). 21
- Figur 11. Prinsipp InSAR. Satellitten beregner posisjonen til et målepunkt. Ved å sammenlikne avstanden før og etter tunneldriving kan setninger detekteres (Tre-Altamira, u. å.). 23
- Figur 12. Viser tunnelstufen foran boremaskinen. På illustrasjonen injiseres det

injeksjonsmasse for å tette bergmassen i forkant av drivingen gjennom sonen (Vegvesen, 2011).	24
Figur 13. Nordre Puttjern sommeren 1997. Tjernet ble i stor grad drenert, som følge av drivingen av Romeriksporten (Bentzrød, 2014).	26
Figur 14. Setningsskader på fasaden på et bygg i Gardeveien (Magnussen og Kveldsvik, 2003).	29
Figur 15. Tidslinje for byggingen av Follobanen (BaneNOR, u. å.-a).	33
Figur 16. Oversikt over Follobanetraséen. Tallene langs tunnelen viser meter-inndelingen traséen er delt opp i.	34
Figur 17. Geologisk snitt over Follobanetraséen, kartlagt på forhånd av drivingen. De blå linjene viser svakhetssoner, mens den røde er tunnelen. Snittet viser også løsmasseykkelser over traséen (Jernbaneverket, 2014c, med modifikasjoner).	36
Figur 18. Fremdrift for hver TBM. Åsland ligger omtrent på km. 12. Lavere meter mot Oslo, høyere mot Ski.	39
Figur 19. Berggrunnskart over Follobanetraséen, med tunneltrasé, poretrykkmålere og infiltrasjonsbrønner. Berggrunnskart fra NGU (Berggrunn N50: http://geo.ngu.no/mapserver/BerggrunnN50WMS).	40
Figur 20. Løsmassekart over Follobanetraséen, med infiltrasjonsbrønner, tunneltrasé samt poretrykkmålere. Løsmassekart fra NGU (Løsmasser: http://geo.ngu.no/mapserver/LosmasserWMS).	41
Figur 21. Løsmassekart over sensitivetsområde 1. Ingen infiltrasjonsbrønner befinner seg i området.	43
Figur 22. Løsmassekart over område 2, med tunneltrasé og poretrykkmålere. Ingen infiltrasjonsbrønner er etablert i området.	44
Figur 23. Oversiktskart med løsmassefordeling over område 3.	46
Figur 24. Løsmassekart som viser område 4, inkludert tunneltrasé og poretrykkmålere.	47
Figur 25. Løsmassekart over område 5, med infiltrasjonsbrønner, poretrykkmålere samt tunneltrasé.	48
Figur 26. Løsmassekart over område 6, med tunneltrasé og poretrykkmålere.	49
Figur 27. Løsmassekart med poretrykkmålere og tunneltrasé, område 7. Tunnelene østover går mot anleggsområdet på Åsland.	50
Figur 28. Løsmassekart over område 8, med Snipetjern lokalisert omtrent midt på.	51
Figur 29. Løsmassekart over område 9, med tunneltrasé og poretrykkmålere.	52
Figur 30. Løsmassekart for område 10, inkludert tunneltrasé, poretrykkmålere og	

infiltrasjonsbrønner.....	53
Figur 31. Løsmassekart over område 11, med tunneltrasé og poretrykkmålere.....	54
Figur 32. Det studerte området på Nordstrand. Inkluderer tunneltrasé med tverrforbindelser, infiltrasjonsbrønner og poretrykkmålere. a) Berggrunnskart. b) Løsmassekart.	55
Figur 33. Kart over det studerte området på Nordstrand, med løsmassetykkelser og svakhetssoner. Kart fra Bane NOR, noe modifisert.....	56
Figur 34. Oversikt over det studerte området ved Snipetjern, med poretrykkmålere og tunneltrasé. a) Berggrunnskart. b) Løsmassekart.....	57
Figur 35. Infiltrasjonsbrønn på Follobanen. a) Brønnhus. b) Infiltrasjonsbrønn, ventiler, klokker som viser trykk og infiltrasjonsmengder, kobling til det offentlige drikkevannsnettet.....	60
Figur 36. a) Piezometer av typen Geokon (Geokon, u.å.). b) Seba trykkcelle (SebaHydrometrie, u. å.). Begge benyttes til poretrykkovervåking på Follobanen.....	61
Figur 37. Oversikt over punkter rundt poretrykkmålerne 4857 og 4013 som er nivellert (røde punkter) eller målt inn med InSAR (gule punkter). Punktene målt inn med nivellering er markert med N.xxx, punktene målt med InSAR er markert med I.x.....	68
Figur 38. Nordstrand. Poretrykk i løsmasser og fjell, infiltrasjonsmengder, nedbør og avstand mellom TBM og Nordstrand. Poretrykk og nedbør fremstilt fra rådata fra Bane NOR. Det er ulik skala på y-aksene som viser poretrykket i berg og løsmasser.	72
Figur 39. Snipetjern. Poretrykkovervåking, nedbør samt avstand mellom TBM-er og Snipetjern. Poretrykkdata og nedbørsdata er rådata fra Follobanen. Det er ulik skala på y-aksene til poretrykket i løsmasser og berg.....	75
Figur 40. Poretrykk som funksjon av avstand til TBM, for utvalgte poretrykkmålere. De rette linjene viser gjennomsnittlig poretrykk i perioden før TBM påvirket poretrykket. a) Poretrykkmålere i fjell. b) Poretrykkmålere i løsmasser. Det er ulik skala på y-aksene i de to diagrammene.....	77
Figur 41. Influensområder for infiltrasjonsbrønnene ved Nordstrand kirkegård, i fjell. Fargekodene viser antall meter økning i poretrykk for perioden fra 1. august 2017 til 20. august 2017.....	79
Figur 42. Influensområder for infiltrasjonsbrønnene ved Nordstrand kirkegård, i løsmasser. Fargekodene viser antall meter økning i poretrykk for perioden 1. august 2017 til 20. august 2017.....	80
Figur 43. Poretrykkøkning i tidsrommet fra infiltrasjonsbrønnene 2A, 2B, 2C og 3C ble satt i drift, og frem til TBM-ene Ellisiv og Eufemia var 300 meter fra Nordstrandsområdet.	

Punktene viser målte poretrykkøkninger i poretrykkmålere som funksjon av avstand til TBM. Orange markeringer viser poretrykk i løsmasser, blå viser poretrykk i fjell.....	81
Figur 44. Setningsutvikling rundt poretrykkmålerne 4857 og 4013, målt med nivellering (øverst) og InSAR (midten). Poretrykkutviklingen i målerne 4857 og 4013 er gitt i det nederste diagrammet. Den svarte linja viser når TBM-ene passerte.	82
Figur 45. Setningsutvikling rundt poretrykkmålerne 4857 og 4013, målt med nivellering (øverst) og InSAR (midten). Poretrykkutviklingen i målerne 4857 og 4013 er gitt i det nederste diagrammet. Den svarte linja viser når TBM-ene passerte.	83
Figur 46. Setningsmålinger målt med InSAR. Setninger fra april 2014 til mai 2018 er vist. Negative verdier er setninger, positive er heving av terreng. Tunneltraséen er vist som røde linjer på kartet. Setningsdataene er prosessert av NGI.	85
Figur 47. Poretrykkutvikling i poretrykkmåler 4857-1 og 4857-2. De to målerne er plassert i samme borehull, i løsmasser. 4857-1 er plassert i leire, mens 4857-2 står i det permeable morenelaget i overgangen mellom løsmasser og fjell. Begge målerne er elektriske piezometere av typen Geokon.....	86

TABELLISTE

Tabell 1. Oversikt over krav til de ulike sensitivitetskategoriene som benyttes på Follobanen (Oversatt til norsk fra Goljoh og Graeli, 2014b).....	42
Tabell 2. Områdeinndelingen av tunneltraséen, ut i fra sensitivitetsnivå (Oversatt til norsk fra Cuda og Moizo, 2017).	43
Tabell 3. Oversikt over poretrykkmålere benyttet i studien, på Nordstrand.....	64
Tabell 4. Poretrykkmålere benyttet i studien for Snipetjern.	65
Tabell 5. Oversikt over poretrykkmålere benyttet for å se på sammenheng mellom poretrykk og avstand til TBM.	66

FORKORTELSER

AGJV	Acciona-Ghella Joint Venture
CP	Tverrforbindelse (cross passage)
IW	Infiltrasjonsbrønn
InSAR	Radarinterferometri (Interferometrisk syntetisk apertur-radar)
NGI	Norges Geotekniske Institutt
NGU	Norges Geologiske Undersøkelse
TBM	Tunnelboremaskin

FORORD

Studien er en masteroppgave på 30 studiepoeng ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Masteroppgaven er utført i samarbeid med Bane NOR. Arbeidet har foregått over ett semester ved Institutt for geovitenskap og petroleum ved NTNU. Bakgrunnen for oppgaven var et ønske fra Bane NOR om å bygge opp erfaringer på hvordan vanninfiltrasjon i fjellbrønner fungerer på Follobane-prosjektet. Oppgaveteksten er formulert av Randi Kalskin Ramstad og undertegnede, med utgangspunkt i ønsker fra Fredrikke Syversen hos Bane NOR. Gisle Kvaal Grepstad og Jørn Grøndal har kommet med innspill.

Jeg vil takke min hovedveileder ved NTNU, Randi Kalskin Ramstad, for tilbakemeldinger og råd på veien. Takk til medveileder Fredrikke Syversen og Bane NOR for å stille med oppgave og for å gi meg innsikt i Follobane-prosjektet. Jørn Grøndal ved Bane NOR fortjener en stor takk for alltid å ha vært tilgjengelig for spørsmål. I tillegg vil jeg takke Gisle Kvaal Grepstad og Bjørnar Gammelsæter for hjelp når jeg har trengt det. Tilslutt fortjener Kåre Skretting en takk for at han har tatt meg med ut i felt.

Trondheim, 11. juni 2018

Henrikke Marie Hogseth Børsum

1 INNLEDNING

Follobanen er en del av InterCity-prosjektet som skal bygge og oppgradere jernbanenettet på Østlandet og inn til Oslo. Follobanen skal halvere reisetiden mellom Ski og Oslo S. Utbyggingen ble påbegynt i 2015, og er ventet ferdigstilt i 2021. Byggherren for prosjektet er Bane NOR, mens Acciona-Ghella Joint Venture (AGJV) er entreprenør. Den største delen av prosjektet består av en 18,5 km lang tunnel, som drives med tunnelboremaskiner (TBM).

Follobanen har et omfattende overvåkingsprogram av poretrykk i løsmasser og berg langs traséen. For å opprettholde poretrykket under driving er det etablert infiltrasjonsbrønner i utvalgte områder. Masteroppgaven er et samarbeid med Bane NOR, som ønsker å videreutvikle bruken av vanninfiltrasjon i tunnelprosjekter. I Norge har vanninfiltrasjon tidligere vært benyttet som et avbøtende tiltak i forbindelse med driving av tunnel. Dette er Follobanen til motsetning, der praksis er at infiltrasjonsbrønnene settes i drift i forkant av at TBM-ene når området. Målet er at poretrykket i løsmasser ikke skal reduseres grunnet tunnelbyggingen. Slik kan setninger unngås. Hensikten med oppgaven er å undersøke hvilken effekt vanninfiltrasjonen på Follobanen har.

Masteroppgaven er avgrenset til å omfatte vanninfiltrasjon i fjellbrønner boret fra terrengnivå i forbindelse med tunneldriving. Det er ikke sett på andre bruksområder for vanninfiltrasjon. Hovedfokuset ligger på Follobanen, og data benyttet til resultater og diskusjon er hentet derfra. I samarbeid med Bane NOR ble det besluttet å kun fokusere på områdene Snipetjern og Nordstrand. De øvrige områdene av Follobanetraséen er presentert, men ikke inkludert i resultatene.

Kapittel 2 presenterer generell teori. Første delkapittel tar for seg geologi i Oslo-området, før grunnvann, poretrykk og vann i berg og løsmasser beskrives. Deretter følger kapitler om måling av poretrykk og grunnvannstand, vanninfiltrasjon, hvordan brønner bores og testes, samt setninger. Kapittelet avsluttes med innblikk i tidligere prosjekter hvor vanninfiltrasjon er benyttet i forbindelse med tunneldriving. Kapittel 3 presenterer Follobanen. Etter en forklaring av geologiske forhold samt utførte undersøkelser på Follobanen presenteres hele traséen. I kapittel 4 er metoder benyttet i studien og metoder som benyttes på Follobanen for overvåking av grunnvann, setninger og innlekkasje til tunnelen beskrevet. Kapittel 5 tar for

seg resultater fra Nordstrand og Snipetjern, mens kapittel 6 inneholder en diskusjon rundt resultatene. Studien avsluttes med konklusjoner og forslag til videre arbeid.

En del av den generelle teorien i kapittel 2 er hentet fra prosjektoppgaven *Vanninfiltrasjon i fjellbrønner i forbindelse med driving av tunnel – Follobaneprosjektet*, skrevet av undertegnede høsten 2017. Den resterende teorien er hentet fra litteratursøk i bøker, tidsskrifter, håndbøker og artikler. I tillegg er det i stor grad benyttet eksisterende rapporter og skriv fra Follobane-prosjektet. De viktigste dataene som er benyttet til å få resultater er data fra poretrykkmålere, infiltrasjonsmengder, setningsovervåking, samt oversikt over progresjonen for tunneldrivingen. Disse er lagt ved i digitale vedlegg. Det er brukt svært mye tid på innhenting og bearbeidelse av data. Dette inkluderer brønnlogger, lugeontestinger, samt alt av informasjon som har vært nødvendig for å lage figurene som er vist. Alle kart i oppgaven er laget av forfatter i ArcGIS ArcMap (versjon 10.3) dersom annet ikke er beskrevet. Som bakgrunn for disse ligger løsmasse- og berggrunnskart fra Norges geologiske Undersøkelse (NGU) og kartdata fra Kartverket, samt koordinater og setningsdata fra Bane NOR og Norges Geotekniske Institutt (NGI). Forfatter har i tillegg vært med på befaring av infiltrasjonsbrønner samt tunneler på Follobanen.

I Follobanens overvåkingsprogram for poretrykk omregnes poretrykkmålinger til ”grunnvannsnivå i meter under terreng”. Dette kan være forvirrende, fordi poretrykket kan avvike fra den hydrostatiske trykkfordelingen. I noen borehull er det lokalisert flere poretrykkmålere i ulike nivåer. Disse kan dermed vise forskjellige grunnvannsnivå under terreng, selv om de er lokalisert på samme sted. For å unngå slike forvirringer vil begrepet poretrykk benyttes i masteroppgaven. Unntaket fra dette er figurer som viser data direkte fra overvåkingsprogrammet. Sammenhengen mellom grunnvannsnivå og poretrykk er gitt i kapittel 2.2.

2 TEORI

Kapittelet presenterer generell teori om geologi i Oslo-området, grunnvann, poretrykk, samt måling av dette, vanninfiltrasjon, testing av bergmasse og strømningsforhold, setninger, måling av setninger, og vannlekkasjer i tunneler. Til slutt presenteres tidligere prosjekter hvor vanninfiltrasjon har vært benyttet i forbindelse med tunneldriving.

2.1 Geologi og løsmassegeologi i Oslo-området

Berggrunnen øst og sør-øst for Oslo består for det meste av bergarter fra prekambrisk tid. Metasedimentære bergarter samt granittisk og granodiorittisk gneis ble til da den gotiske fjellkjeden oppsto, for over 1500 millioner år siden. Gneisene hadde sin opprinnelse som granitt og dioritt, som størknet da fjellkjeden ble dannet. Senere har disse blitt omdannet til gneiser (Nordgulen og Andersen, 2013). For omtrent 400 millioner år siden, i slutten av silur og mot begynnelsen av devon, kolliderte den eurasiske kontinentalplata med den nordamerikanske. Dette dannet den Kaledonske fjellkjede, en fjellkjede som bredte seg fra Skottland, og fortsatte videre gjennom Norge og til Svalbard. Mange av bergartene som hadde blitt dannet tidligere ble foldet og/eller metamorfosert i denne perioden. Fjellkjeden er nå erodert bort, men likevel har foldingen og strukturen bergmassen fikk i denne perioden påvirket geologien i senere tid. Perm var en urolig tid for Oslo-området. Vulkansk aktivitet og strekking av jordskorpen førte til at Oslofeltet sank ned og en graben ble dannet. Etter millioner av år med erosjon er landskapet slitt ned, og i dag preger de kambrosilurske bergartene Oslofeltet. På grunn av nedsenkningen har disse bergartene blitt skjermet fra erosjon. Den vulkanske aktiviteten i permtiden har også ført til at det finnes ulike magmatiske bergarter i området, som granitt, syenitt, rombeporfyr og larvikitt (Trømborg, 2006). Nedsenkningen av Oslo-grabenen førte til normalforkastninger i området, som stort sett har utberedelsesretning fra nord til sør. Den dag i dag finnes det flere sprekker og svakhetssoner i denne retningen. Normalforkastninger vitner om lave spenninger, som favoriserer økt vanngjennomstrømning. Spenningene i jordskorpa i dag tilsvarer ikke nødvendigvis spenningene fra tidligere tider, men den tektoniske historien kan bidra til å tolke svakhetssonenes egenskaper (Jernbaneverket, 2014a).

I slutten av siste istid sto havet høyere over landoverflaten enn i dag. Her ble det avsatt store mengder leirpartikler. Etter at isen smeltet har landet steget, og partier som før var under

havnivå ligger nå over. Dermed har store deler av den marine leira som ble avsatt under og mot slutten av istidene kommet opp på land (Trømborg, 2006). Det høyeste punktet havet har stått i forhold til land kalles marin grense. Denne ligger på ca. 220 meter over havet i Oslo (NGU, 2017). Oslo-området har generelt en varierende fjelltopografi hvor de dype rennene kan bestå av betydelige mengder med marin leire (Løset, 2004). I store deler av området eksisterer det et grovkornig løsmasselag, hovedsakelig morene og glasifluvialt materiale, som befinner seg mellom berget og den marine leira. Tykkelsen på dette laget varierer i hovedsak mellom 0 og 5 meter (Magnussen og Kveldsvik, 2003).

2.2 Grunnvann og poretrykk

I de følgende delkapitlene blir teori om poretrykk samt vann i berg og løsmasser beskrevet.

2.2.1 Poretrykk

Bernoullis likning beskriver sammenhengen mellom trykk, hastighet, høyde og energi for en væske. Likningen gjelder for en strømlinjet bevegelse uten friksjon, for inkompressible væsker. Den er uttrykt som (Cengel og Cimbala, 2010)

$$\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz = \textit{konstant} , \quad [1]$$

og gjelder for bevegelse langs strømlinjen. Konstanten beskriver væskens totale energi (Cengel og Cimbala, 2010).

Variablene i likningen er:

P = væskens trykk i punktet,

ρ = væskens tetthet, for vann: 1000 kg/m^3 ,

v = væskens hastighet,

g = tyngdeakselerasjonen,

z = høyden over et bestemt referansenivå.

Grunnvannets hastighet er svært liten i forhold til de to andre leddene i formelen, og kan derfor neglisjeres. Ved å gjøre dette, samt dele på tyngdeakselerasjonen, vil formelen gi vannets totale trykkhøyde (Fetter, 2001):

$$h = \frac{P}{\rho g} + z \quad [2]$$

Dette er vannets totale mekaniske energi per vektenhet. Ved å sette

$$\frac{P}{\rho g} = h_p \quad [3]$$

blir formel 2

$$h = h_p + z, \quad [4]$$

der h er den totale hydrauliske trykkehøyden i punktet, z høyden over et bestemt referansenivå (eksempelvis havnivå), mens h_p beskriver vannsøylen som ligger ovenfor punktet (Fetter, 2001).

Ved å omstrukturere formel 3 til et uttrykk for trykket,

$$P = \rho g h_p, \quad [5]$$

kan det ses at trykket i et punkt i væsken vil være lik vekten av vannsøylen over punktet. Det vil si at vanntrykket øker med økende dyp. For grunnvann vil både ρ og g være konstant, og dermed vil et bestemt trykk tilsvare en bestemt trykkehøyde (Fetter, 2001). Derfor kan poretrykk oppgis i både meter og pascal eller bar.

I Store Norske Leksikon er en akvifer definert som ”en geologisk formasjon i grunnen, bergart eller sediment, med stort innhold av grunnvann” (Hofstad, 2014). En åpen akvifer er i kontakt med atmosfæren. Trykket en gass eller væske har i grunnen kalles poretrykk (Ejdelling, 1978). Punktet der poretrykket P er lik null, det vil si der trykket er lik atmosfæretrykket, er definert som grunnvannsnivået eller grunnvannstanden (Lohman *et al.*, 1972). Poretrykket betegnes dermed som et overtrykk i forhold til atmosfæretrykket. Fra dette punktet øker poretrykket nedover mot dypet, slik som likning 5 viser. En slik hydrostatisk trykkfordeling oppstår i åpne akviferer (Carlsson og Gustafsson, 1984), for eksempel i permeable løsmasser der vannet har mulighet til å renne uten store problemer (Bonsaksen *et al.*, 2017). Grunnvannet befinner seg i mettet sone, der alle porer og sprekker er gjenfylt med

vann (Meinzer, 1923, i Lohman *et al.*, 1972). Ovenfor grunnvannsnivået, i den umettede sonen, er ikke nødvendigvis porer og sprekker vannfylte. Her kan poretrykket bli negativt på grunn av kapillært sug (Lohman *et al.*, 1972). Det kapillære suget oppstår på grunn av trykkforskjeller mellom vannet i den mettede sonen og atmosfæren. I et forsøk på å utjevne trykkforskjellen suges vann fra den mettede sonen og opp mot overflaten. Slik kan det dannes et trykk som er lavere enn atmosfæretrykket i umettet sone (bl. a. Brattli, 2009).

I grunnen finnes det også lukkede akviferer. Disse står ikke i kontakt med atmosfæren, fordi det vannførende laget er begrenset av impermeable lag oven- og nedenfor. Her kan poretrykket være høyere enn atmosfæretrykket, og trykkfordelingen vil derfor ikke følge formel 5. Dermed kan poretrykket i lukkede akviferer representere et grunnvannsnivå som står over akviferens øvre grense (Carlsson og Gustafsson, 1984). I tillegg kan det finnes hengende grunnvann, som dannes hvis det finnes tette linser lokalisert i mer permeable løsmasser rundt. I så tilfelle kan vann legge seg oppå den tette linsen som hengende grunnvann. (bl. a. Brattli, 2009). Opp- eller nedadgående grunnvannsstrømmer i akviferen kan også påvirke poretrykket. I slike tilfeller trenger ikke poretrykket å gjenspeile grunnvannets øvre grense.

Grunnvannsnivået avhenger av flere faktorer. For eksempel vil nedbør, temperatur og fordampning påvirke tilsiget til grunnvannet. I tørre og varme perioder vil derfor grunnvannet befinne seg lenger mot dypet enn i perioder med store mengder regn. Grunnvannsnivået følger hovedsakelig topografien i dagen, og ligger i Norge stort sett noen meter under landoverflaten. I innsjøer, elver og ved havnivået kommer det frem i dagen (bl. a. Brattli, 2009). Omtrent 0,61% av alt vann som finnes på jorda i dag, er grunnvann (Fetter, 2001).

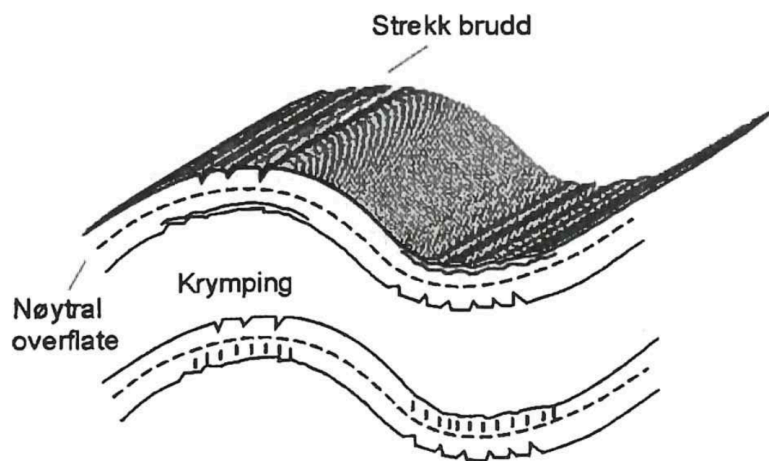
2.2.2 Vann i berg

Generelt er bergartene i Norge lite permeable. Det betyr at grunnvann i fjell hovedsakelig finnes i diskontinuiteter, og strømming i berg foregår derfor stort sett slike steder (bl. a. Karlsrud, Kveldsvik og Snilsberg, 2003). En diskontinuitet er en naturlig oppsprekking i bergarten, og kan være eksempelvis sprekker, brudd eller forkastninger (NGU, 2015c). Omfanget av diskontinuiteter er bestemt av blant annet den geologiske historien og bergartenes egenskaper (bl. a. Karlsrud, Kveldsvik og Snilsberg, 2003). Dette omtales som bergets sekundære porøsitet (Olsson, 2012). I tillegg kan det finnes kjemisk bundet, absorbert,

adsorbent eller overflatebundet vann i enkelte mineraler. Likevel er det det frie vannet som oppholder seg i sprekker og diskontinuiteter i bergmassen som er av betydning for lekkasjeprosblematikk i berganlegg (Nilsen og Broch, 2012).

Permeabilitet i berg har tidligere blitt definert som ”en bergarts eller bergmasses evne til å la seg gjennomstrømme av vann eller av andre væsker og gass under påvirkning av en trykkgradient” (bl. a. Nilsen og Broch, 2012, s. 81). Det finnes to permeabilitetsbegreper, absolutt permeabilitet (m^2) og permeabilitetskoeffisienten (m/s). Den først nevnte er en materialparameter, og et mål på blant annet porøsitet, porestørrelse og sprekkeparametere. Permeabilitetskoeffisienten er et annet navn på hydraulisk konduktivitet, og er den som stort sett benyttes når strømming av vann i en bergmasse beskrives (bl. a. Nilsen og Broch, 2012). Den hydrauliske konduktiviteten avhenger av bergmassens absolutte permeabilitet og strømmingsegenskapene til væsken (Lohman *et al.*, 1972). Permeabilitet tilsvarer dermed hydraulisk konduktivitet hvis det ikke tas hensyn til væskens strømmingsegenskaper (Carlsson og Gustafsson, 1984). Med andre ord sier hydraulisk konduktivitet noe om hvor mye vann som kan strømme i bergmassen (Goljoh og Graeli, 2014a).

I dypforvitrede soner kan det finnes leirpartikler. Disse kan dannes ved omdanning av oppkjust berg eller utfelling av mineraler. Slike leirpartikler vil kunne redusere den hydrauliske konduktiviteten i berget, fordi de har potensiale til å tette igjen sprekker. Likevel vil det her lettere kunne oppstå tektoniske bevegelser, fordi leiren kan fungere som et glideplan. Dette kan igjen føre til høyere permeabilitet i berget (bl. a. Kværner og Snilsberg, 2013). Den hydrauliske konduktiviteten vil generelt sett bli høyere desto større sprekkeåpningene er, og desto bedre kontakt det er mellom de ulike sprekke og svakhetssonene. Generelt sett har bergartsgrenser, forkastninger og folder større grad av oppsprekking enn annet berg (bl. a. Goljoh og Graeli, 2014a). Som vist i figur 1 vil det ved folding av bergarter oppstå strekkspenninger på yttersiden av folden. Her er det vanlig at bergmassen sprekker opp i langsgående sprekker (Brattli, 2009).



Figur 1. Sprekkedannelse i forbindelse med folding av bergartslag (Brattli, 2009).

Generelt sett er sprekker mer åpne mot overflaten enn nede i dypet, og derfor avtar ofte den hydrauliske konduktiviteten med dyp. Fordi sprekker kan være helt eller delvis gjenfylt av mineraler og sleppematerialer, begrenser ofte vannstrømmingen seg til noen punkter og kanaler i sprekken. Derfor trenger ikke alle sprekker og åpninger å inneholde vann. Dermed kan også lekkasjene i tunneler begrense seg til noen punkter. Det kan være helt ned til noen få tusendeler av en sprekk som kan være vannførende og faktisk bidra til lekkasjer (bl. a. Nilsen og Broch, 2012).

Vannets strømning i berg avhenger av flere faktorer, blant annet sprekkenes orientering, tykkelse og karakter. Hydraulisk konduktivitet i en bergmasse med flere parallelle sprekker er gitt av (bl. a. Brattli, 2009):

$$K_b = \frac{ge^3}{12vs} \quad [6]$$

der

g = tyngdeakselerasjonen,

e = tykkelsen på sprekken (sprekkeåpningen),

v = væskens, i dette tilfellet vannets, kinetiske viskositet og

s = avstanden mellom sprekken.

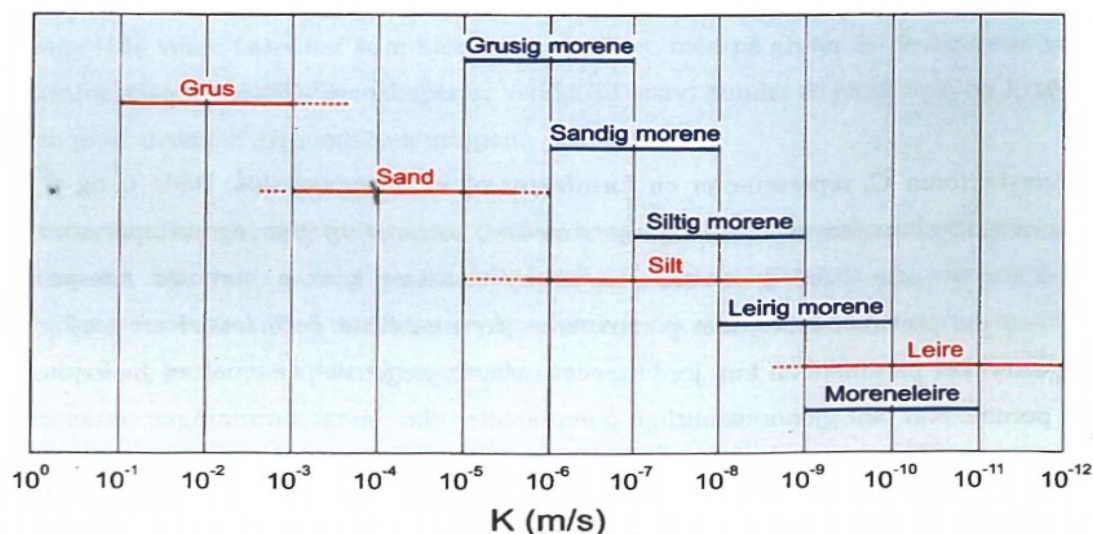
Fra formel 6 kan det ses at sprekkeåpningen har stor betydning for den hydrauliske konduktiviteten i berg. Formelen gir bergmassens hydrauliske konduktivitet i m/s. Det antas

parallele, plane sprekker med konstant tykkelse. Dette er en forenkling av virkeligheten, og formelen har derfor et noe begrenset bruksområde. Formelen kan likevel gi en god indikasjon på bergmassens vannføringsevne (Brattli, 2009).

Hvis en bergmasses hydrauliske konduktivitet skal bestemmes mer nøyaktig kreves det testing i felt. Da er det vanlig å enten pumpe opp vann eller bruke lugeontesting. Dette fokuseres det nærmere på i kapittel 2.6. Det er likevel viktig å bemerke at det kan være vanskelig å få riktige resultater fra slike metoder, ettersom de avhenger av hvilke sprekker i bergmassen som treffes under testingen (Brattli, 2009).

2.2.3 Vann i løsmasser

Vannstrømningen i løsmasser skiller seg fra vann i berg. Millington og Quirk (1959) viste at sorterte masser har høyere permeabilitet enn usorterte. Dette gjelder for kornstørrelser ned til sandstørrelse. I tillegg beskrev de at masser med høy permeabilitet vil ha et høyere vanninnhold enn masser med lavere permeabilitet. Marin leire har høy porøsitet, men vann er stort sett bundet til mineralene som står tett. Dette fører til at marin leire har lav permeabilitet, til tross for sin høye porøsitet. I sorterte løsmasser fra sandstørrelse og oppover vil vann lett kunne bevege seg fra pore til pore. Slike masser er permeable, og har høy hydraulisk konduktivitet (bl. a. Brattli, 2009). Usorterte løsmasser har lavere hydraulisk konduktivitet. Grunnen til dette er at mindre korn kan fylles mellom større korn hvis løsmassene har ulik kornstørrelse. Morene er et godt eksempel på dette (Carlsson og Gustafsson, 1984). Figur 2 viser hydraulisk konduktivitet for ulike løsmasser.



Figur 2. Oversikt over hydraulisk konduktivitet (K) i løsmasser (Brattli, 2009, basert på Carlsson og Gustafsson, 1984). Leire har lavest hydraulisk konduktivitet.

2.3 Måling av poretrykk og grunnvannstand

Kapittelet presenterer ulike metoder for å måle poretrykk og grunnvannstand. I nærheten av en tunnel er det viktig å være oppmerksom på at poretrykket kan reduseres på grunn av lekkasje inn i tunnelen. Dermed kan dyptliggende målere vise et lavere poretrykk enn det vannsøylen over punktet tilsier. Dette vil også kunne gjenspeiles i borehull der det er plassert flere poretrykkmålere i vertikalprofilen. I slike tilfeller vil den dypest liggende poretrykkmåleren kunne vise en lavere grunnvannstand enn det som faktisk er tilfellet, og dermed også en lavere grunnvannstand enn en poretrykkmåler lokalisert over (Løset, 2004). En poretrykkmåler klarer ikke å måle poretrykk som er lavere enn nivået der den er plassert.

2.3.1 Piezometer

Et piezometer er et instrument som brukes til å måle poretrykk i grunnen (Carlsson og Gustafsson, 1984). Det finnes flere typer med noe ulik målemetode. Felles for alle er at de plasseres i et borehull i grunnen. Et rørformet filter har en påmontert slange, som strekker seg opp til overflaten (bl. a. Bonsaksen *et al.*, 2017). Nederst på filteret er det en åpning hvor vann trenger inn og videre opp i slangen. Vannstanden i slangen tilsvarer trykket i punktet der filterets åpning er lokalisert (bl. a. Gammelsæter, 2018). Casagrandes piezometer baserer seg på at vannstanden i slangen peiles. En annen type piezometere er elektriske piezometere, som har påmontert en trykkmåler nederst. Ledninger går opp til overflaten, som kan kobles direkte til en datamaskin. Disse er mye benyttet, da de har rask responstid og enkelt kan installeres i borehull (bl. a. Bonsaksen *et al.*, 2017). Figur 36 a) viser et eksempel på et piezometer.

2.3.2 Peilerør

Et peilerør består av et rør med en filterspiss i enden. Dette settes ned i løsmasser eller et åpent basseng. Metoden forutsetter at det kun er åpent vann eller at løsmassene er permeable. Hvis peilerøret skal stå i finkornige masser bør det også være et sandfilter på røret (bl. a. Bonsaksen *et al.*, 2017). Hvis røret settes ned i en åpen akvifer, vil høyden på vannsøylen i røret gjenspeile grunnvannstanden. Om akviferen er lukket vil vannet stige inne i røret tilsvarende trykket i punktet (Emdal, 1999). Når vannet har innstilt seg i røret, kan vannstanden peiles. Dette kan gjøres med for eksempel en klokke montert nederst på et målebånd, eller en diver. I det første tilfellet slippes klokken ned i peilerøret, til det kan høres at klokken treffer vannoverflaten. Deretter leses grunnvannstanden av, i distanse under terrengnivå. Det finnes også elektriske målere som gir fra seg lyd- eller lyssignal når de er i

kontakt med vann. En diver fungerer på en annen måte. De kan installeres fast i peilerør. En trykkmåler er plassert i enden av en slange. Denne føres ned i peilerøret, til litt under grunnvannsnivået. Der måler den vanntrykket. Diveren må installeres dypt nok slik at den til enhver tid befinner seg under vannoverflaten. Det finnes også diverer som måler temperatur og hydrogeologiske parametere (Frengstad, 2018).

2.3.3 Trykkcelle

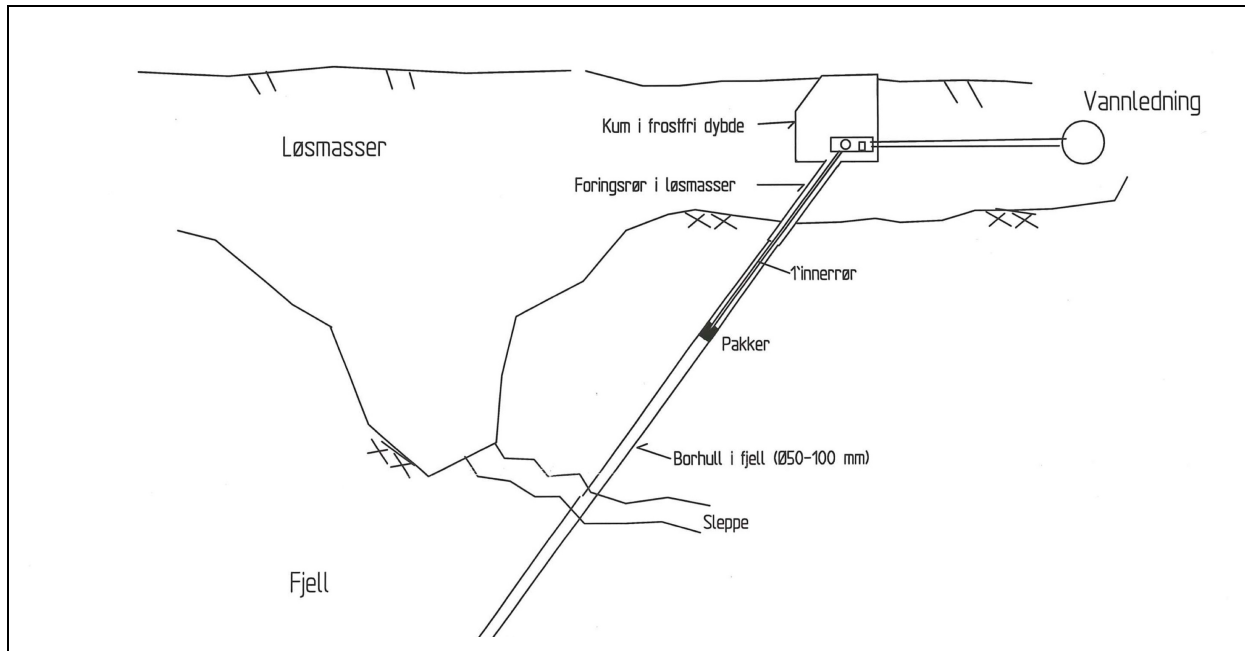
En trykkcelle er en sensor som måler trykket i et punkt. Trykkcellen kan plasseres direkte i et borehull, eller eksempelvis i et piezometer. I en åpen akvifer vil trykket som trykkcellen måler tilsvare vannstanden over målepunktet (Gammelsæter, 2018). Figur 36 b) viser et eksempel på en trykkcelle.

2.4 Vanninfiltrasjon i tunnelanlegg

Vannlekkasjer i tunneler kan føre til redusert poretrykk i bergmassen rundt tunnelen og lavere poretrykk i løsmassene over fjellet. Som ytterligere beskrevet i kapittel 2.7, kan redusert poretrykk i løsmasser føre til setninger. Dette kan skade bygg og infrastruktur på overflaten. I tillegg vil lavere grunnvannsnivå kunne føre til drenering av tjern og skadet vegetasjon på overflaten. Derfor har vanninfiltrasjon vært benyttet for å opprettholde poretrykk i forbindelse med byggingen av de fleste tunneler i Oslo-området etter 1976. I tillegg til bruk av vanninfiltrasjon ved driving av tunneler, er vanninfiltrasjon også benyttet til andre formål. Det kan for eksempel brukes for å opprettholde trykket rundt bergrom som skal lagre olje og gass og til å sikre grunnvann til drikkevannsbruk (Magnussen og Kveldsvik, 2003). Rundt lagerrom i berg som inneholder olje eller gass kan det etableres en vanningardin som skal opprettholde trykket i bergmassen. Når vanntrykket er høyere enn det maksimale trykket i oljen vil ikke oljen lekke ut fra lageret (DSB, 2016). I tillegg er det brukt vanninfiltrasjon i løsmasser for å holde poretrykket stabilt i forbindelse med bygging av byggegrøper (Grepstad, 2017). I dette studiet er det fokusert på vanninfiltrasjon for å opprettholde poretrykket i forbindelse med tunneldriving. De øvrige bruksområdene er ikke inkludert i studiet.

Vanninfiltrasjon kan utføres i både løsmasser og fast fjell. I Norge er det imidlertid best erfaringer med infiltrasjonsbrønner i fjell i forbindelse med tunneldriving. Derfor er beskrivelsene og eksemplene i denne studien fra slike prosjekter. Infiltrasjonen kan foregå

både fra brønner i dagen, og fra brønner i tunnelen. I det siste tilfellet bores brønnene opp til bergoverflaten fra tunnelen (Magnussen og Kveldsvik, 2003). Boringen av infiltrasjonsbrønner utdypes i kapittel 2.5. En prinsippskisse av vanninfiltrasjon fra dagen er gitt i figur 3.



Figur 3. Prinsippskisse av vanninfiltrasjon i berg. Vann tilføres borehullet fra vannledningen. Deretter går vannet inn i svakhetssonen (her: sleppe), og videre opp til løsmassene. Pakkeren skal sørge for at vannet går ned i grunnen, og ikke opp igjen gjennom borehullet (BaneNOR, u. å.-b).

For at vanninfiltrasjonen skal være mest mulig effektiv bør brønnene treffe de mest vannførende sonene i berget. Målet er at vannet skal gå inn i sprekke, slik at det tilføres minst like mye vann i grunnen som det som lekker inn i tunnelen. Når poretrykket på denne måten blir opprettholdt i berget, reduseres muligheten for at poretrykket i løsmassene over avtar. Dermed reduseres også faren for setninger, se kapittel 2.7. Beliggenheten til sprekker og svakhetssoner i grunnen kan være vanskelig å kartlegge tilstrekkelig på forhånd. Ved hjelp av totalsondering for å finne dybden til fjell, i kombinasjon med kartlegging i dagen og geofysiske målemetoder er det mulig å anslå forløpet i grunnen. Totalsondering foregår ved at en borerigg mater, dreier og eventuelt slår en borstang ned i grunnen. Nedpressingskraften skal være slik at boreriggen kan ha en gitt, konstant nedpressingshastighet. Nedpressingskraften som benyttes for å få til dette registreres. Undersøkelsen avsluttes når fast fjell er nådd (Vegdirektoratet, 2014). Ved hjelp av borekjerner eller optisk televiewer i borehull kan sprekkeparametere anslås (Grøndal, 2017). Den optiske televieweren filmer veggene inne i borehullet. Ved å studere filmen kan sprekkenes orientering og tykkelse bestemmes. Det kan registreres sprekker med tykkelse ned til 0,5 mm bredde (NGU, 2015b).

Infiltrasjonsbrønnenes posisjon er bestemt ut fra geologi, tilgjengelighet og tillatelser fra grunneiere, i tillegg til avstand til tunnel og setningssensitive områder. Brønnene må som nevnt treffe svakhetssonene og sprekkene, og derfor er både utgangspunkt og retning på boret viktig. Noe av det viktigste er at brønnen er lokalisert i et område med god hydraulisk konduktivitet, slik at det faktisk er mulig å tilføre vann til sprekkene (Magnussen og Kveldsvik, 2003). Brønnen må bores rett gjennom svakhetssonene, og deretter forlenges med 5-10 meter (Moizo, 2017). En ideell helning på brønnen er et fall på 45 grader eller slakere. En slik skråboring fører til at sannsynligheten for å treffe de mest vannførende sonene maksimeres (Grøndal, 2017). Vanlig diameter på brønnene er mellom 115 og 139,7 mm (Ramstad, 2017), men ulike diametere kan fungere for vanninfiltrasjon.

I brønnen skal det settes en pakker. Denne skal sørge for å holde et bestemt vanntrykk nede i brønnen, ved å tette borehullet. Dermed går vannet inn i sprekkene omkring og ikke opp til dagen gjennom borehullet (figur 3) (Magnussen og Kveldsvik, 2003). Plasseringen av pakkeren er viktig. Den må plasseres over sprekkene det ønskes å infiltrere vann i. Noen infiltrasjonsbrønner er utstyrt med filtre, som skal hindre at partikler i infiltrasjonsvannet går ut i grunnvannet (Grøndal, 2017). Filtrene plasseres i kumløkket, der vannventiler og kraner også er lokalisert (Fosseide, 2018). Dette er stort sett brukt i områder der infiltrasjonen utføres med dårlig vannkvalitet (Grøndal, 2017), slik at brønnenes levetid økes (Fosseide, 2018). Tetting av brønnfiltre har ikke vært et problem i fjellbrønner i Oslo-området foreløpig så lenge brønnene er i bruk. Derimot kan brønnene tettes på grunn av gjengroing hvis vanninfiltrasjonen settes på pause for en periode. Hvis det oppstår problemer med utfellinger eller bakterievekst kan brønnen spyles, syrevaskes eller vaskes med varmt vann (Magnussen og Kveldsvik, 2003).



Figur 4. Pakker, som skal sørge for at vannet går inn i sprekkene i bergmassen og ikke opp igjen til overflaten. Pakkeren blåses opp under høyt trykk. Bilder tatt i felt, fra Follobanen.

For at vanninfiltrasjonen skal heve poretrykket må det infiltreres mer vann enn det som lekker inn i tunnelen. Derfor er en vesentlig faktor at tunnelen tettes godt nok, slik at dette blir mulig (Magnussen og Kveldsvik, 2003). Trykket på vannet som infiltreres må være høyt nok til at vannet går inn i berget. Samtidig må ikke trykket være så høyt at det omkringliggende berget sprekker opp (Moizo, 2017). Ved bruk av det kommunale vann- og avløpsnett er det begrenset med hvilken mengde og hvor høyt trykk vannet kan tilføres brønnen, og i slike tilfeller er ikke infiltrasjon tilstrekkelig hvis det lekker mer vann inn i tunnelen enn det som er mulig å tilføre (Syversen, 2017). Overtrykket på vannet som infiltreres er ofte i størrelsesorden 1 til 5 bar. Overtrykk er trykket når atmosfæretrykket er trukket fra. Vannmengdene kan variere rundt 5 til 100 liter per minutt. Ved variasjon i poretrykket må infiltrasjonsstrykket justeres for å opprettholde en stabil infiltrasjonsmengde. Det er nødvendig fordi det krever mer kraft å tilføre vann når mottrykket er høyere (Magnussen og Kveldsvik, 2003).

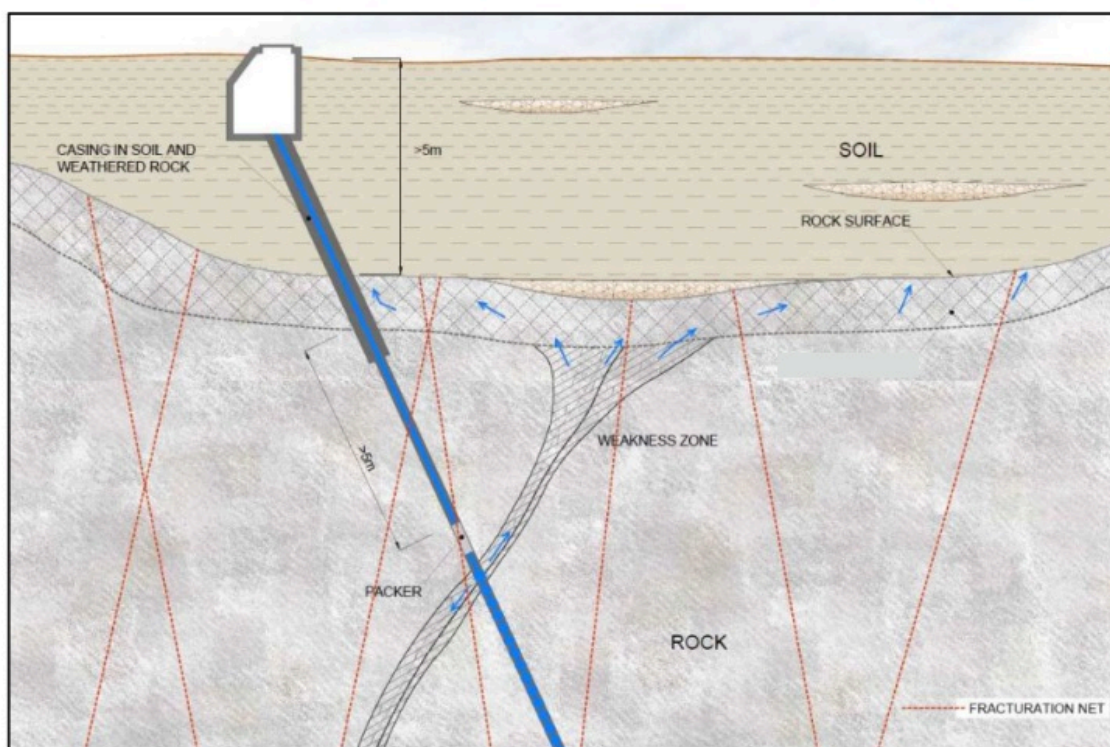
Det er vanlig å bruke vann fra drikkevannsforsyningen til vanninfiltrasjon. Grunnene til dette er at drikkevannsnett har en jevn og stabil tilførsel, i tillegg til at vannkvaliteten stort sett er god nok til at kjemiske reaksjoner, partikler og liknende ikke lager problemer i brønnen eller forurenses grunnvannet (Magnussen og Kveldsvik, 2003). Det er også mulig å bruke tunnelvann, noe som har vært gjort i flere tilfeller ved infiltrasjon direkte fra tunnelen. Da er det viktig at vannkvaliteten er god nok (Grøndal, 2017). Hvis tunnelen drives med tunnelboremaskin (TBM) blir ofte tunnelvannet basisk, på grunn av produktet som benyttes som fyllmasse mellom betongelementene og fjellet (Syversen, 2017). Driving med TBM beskrives nærmere i kapittel 3.1. Ved driving med TBM vil derfor bruk av tunnelvann ikke nødvendigvis være en god løsning (Grøndal, 2017). Vannkvaliteten på infiltrasjonsvannet må overvåkes uavhengig av hvilken vannkilde som brukes (Magnussen og Kveldsvik, 2003).

I Oslo Kommune er vann- og avløpsetaten leverandør av drikkevann. Drikkevannet har strenge krav til kvalitet, og går gjennom flere tiltak før det kan benyttes som drikkevann. Alt vann som skal brukes til drikkevann må gjennom minimum to hygieniske barrierer. En hygienisk barriere er en hindring som skal sørge for at skadelige stoffer, parasitter, bakterier og virus reduseres til et nivå som ikke er skadelig for helsen. Tiltakene kan innebære å desinfisere vannet eller fjerne partikler og organisk materiale (bl. a. Skjærstad, 2013).

Det har tidligere vært testet infiltrasjon av vann direkte i det permeable laget av grovkornige

løsmasser som ofte finnes mellom leire og berg i Oslo-området, men dette har vært mislykket. Grunnen til dette er at infiltrasjonen har ført til erosjon i løsmassene, og at metoden dermed krever at vannet infiltreres i små mengder og ved lave trykk. Dette har ikke gitt en tilfredsstillende effekt i Oslo-området. I Sverige har infiltrasjon i løsmasser fungert noe bedre. Brønnene er billigere å installere, men kan ha høye driftskostnader. Årsaken til dette er at de må følges opp tett for å overvåke eventuell utvasking av løsmassene. I Sverige har det vist seg at løsmassebrønnene som har fungert de første driftsårene kan være i drift i mange år (Magnussen og Kveldevik, 2003).

Selv om erfaringene ikke har vært like gode i Norge, er det permeable løsmasselaget mellom fast fjell og leire viktig for at vanninfiltrasjonen skal ha ønsket effekt. Som tidligere beskrevet må infiltrasjonsbrønnen penetrere svakhetssonene og sprekke i bergmassen som sørger for lekkasjer til tunnelen. Når vannet infiltreres vil vannet dermed fordele seg i diskontinuiteten, også oppover til løsmassene. Morenelaget i overgangen mellom fast fjell og leire vil sørge for at vannet fordeler seg på hele undersiden av den tette leira (figur 5). Slik vil poretrykket opprettholdes i løsmassene (Grøndal, 2017).



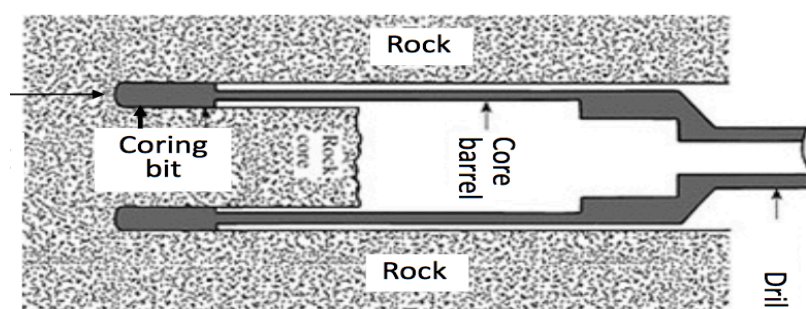
Figur 5. Vanninfiltrasjon i en svakhetsone. Vannet fordele seg på undersiden av løsmassene. Denne figuren viser forvitret berg under løsmassene, som vannet fordeler seg i. I Oslo-området er det ofte et permeabelt morenelag som fungerer på samme måte. Slik presses det vann under leira, som kan sørge for at poretrykket i leira opprettholdes (AGJV, 2016).

Brendbekken (2012) beskriver at det er viktig å merke seg at vanninfiltrasjon er en midlertidig metode for å unngå poretrykkreduksjoner. Likevel finnes det anlegg i Norge i dag som kan betraktes som permanente, da noen brønner i Oslo-området har vært i bruk i opp til 20 år. Noen infiltrasjonsbrønner for avløpstunnelene i Oslo og Romeriksporten er eksempler på dette, se kapittel 2.9. Disse stedene har det ikke vært planlagt permanent infiltrasjon før det er sett at det er nødvendig. Brønnene overvåkes jevnlig, og fra tid til annet kreves det utskifting av filtre (Magnussen og Kveldsvik, 2003).

2.5 Brønner og borehull i fjell

For å lage en brønn kreves det at det bores et borehull ned i grunnen. Brønner som skal benyttes til vanninfiltrasjon kan bores på flere måter. De mest vanlige metodene er kjerneboring og hammerboring.

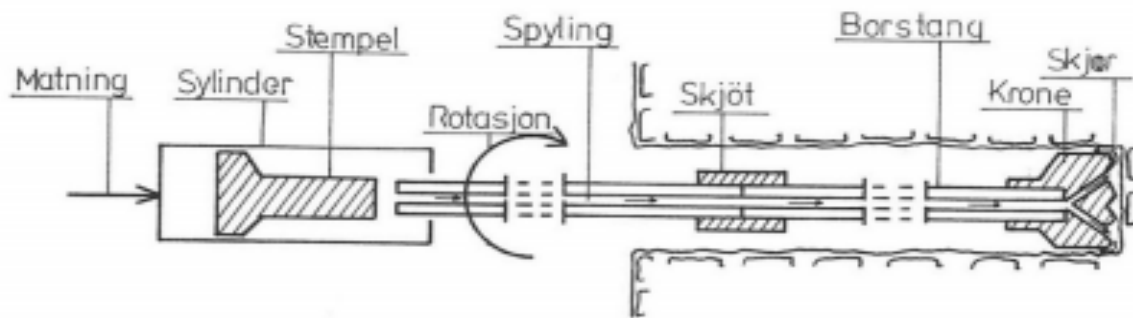
Kjerneboring foregår ved at en diamantborkrone av ønsket dimensjon borer ut en kjerne av bergmassen (Statens Vegvesen, 1997). Borkronen er plassert ytterst på et kjerneør. Når borkronen borer gjennom berget skyves kjernen med bergart inn i kjerneøret (figur 6). Når dette er fullt tas hele boret og røret opp, og kjernen kan tas ut. Slik vil prøven komme opp til overflaten med de øverste bergartene først, og de dypeste til slutt. Kjernen viser blant annet bergartsfordeling og oppsprekkingsgrad nedover mot dypet. Slik kan bergmassen kartlegges. Kjerneboring gir jevne borehullsvegger og tillater god kartlegging av bergmassen, men metoden er kostbar (Veslegard og Simonsen, 2014).



Figur 6. Prinsippkisse for kjerneboring. Kraften mates på, og kjernen som bores ut går inn i kjerneøret (Engineering, u. å.)

Hammerboring, også kalt slagsondering i berg, er en annen metode som kan benyttes til brønnboring. Metoden er rimeligere enn kjerneboring. Boringen utføres ved at en hammer slår, roterer og dermed knuser berget, se figur 7 (Veslegard og Simonsen, 2014). Hammerboring kan medføre at borstøv tetter sprekker i bergmassen under boringen. For bruk

til brønner og infiltrasjon, er det derfor viktig at det benyttes vann under boringen, slik at støv vaskes vekk. Hullet bør også spyles kraftig etter at boringen er avsluttet (Statens Vegvesen, 1997). Det er ikke mulig å få ut kjerner med denne metoden, men borehullet kan kartlegges likevel. Når hullet er ferdig boret og spylt, kan det brukes en optisk televierer for å kartlegge blant annet sprekkeforløpet nedover i grunnen (Grøndal, 2017). Prinsippet for optisk televierer er forklart i kapittel 2.4.



Figur 7. Prinsippskisse for hammerboring. Ved hjelp av en pulserende matekraft samt rotasjon knuses berget (Veslegard og Simonsen, 2014).

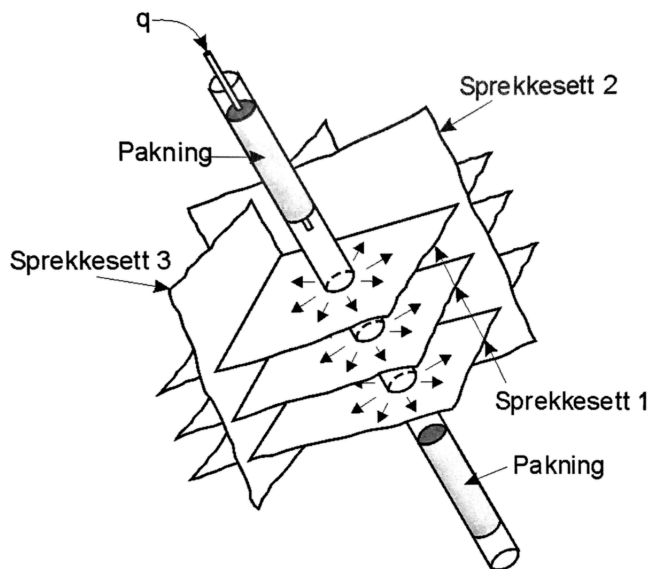
Ved boring gjennom løsmasser er det nødvendig å ha et føringsrør i løsmassene over berget. Dette bør videreføres 2-5 meter nedover i fjellet (Magnussen og Kveldsvik, 2003). Grunnen til dette er at en utett overgang mellom løsmasser og fjell vil kunne føre til at det infiltrerte vannet går rett ut i løsmassene og skaper erosjon (Grepstad, 2017). Det bør i tillegg benyttes bentonitt for å sikre at overgangen blir helt tett (Ramstad, 2018). Videre bores brønnen ned til ønsket dyp (Magnussen og Kveldsvik, 2003).

2.6 Testing av bergmasse og strømningsforhold

En brønn planlagt til vanninfiltrasjon må testes før bruk. Dette er viktig for å undersøke om den tilfredsstillende de ønskede kravene for infiltrert vannmengde, trykk og respons på endring i poretrykk. Hvis dette ikke er tilfelle kan det benyttes hydraulisk frakturering, som åpner eksisterende og eventuelt nye sprekker ved brønnen (Magnussen og Kveldsvik, 2003). Hydraulisk frakturering foregår ved at vann pumpes ned i brønnen. Vanntrykket økes helt til det omkringliggende berget sprekker opp. De sekundære sprekkenes som dannes vil da kunne føre til at den hydrauliske konduktiviteten i berget øker (Hagland, 2009). Kapitlet tar for seg to metoder for å måle strømningsforhold i bergmassen.

2.6.1 Lugeontesting

For å kartlegge bergmassens hydrauliske konduktivitet brukes ofte lugeontesting. Testen utføres ved at det bores et hull nedover i grunnen, og en pakker blir plassert på hver side av sprekkesonene. Pakkerne skal sørge for at vannet som pumpes inn i bergmassen ikke beveger seg videre nedover i borehullet eller opp mot overflaten, men går inn i sprekken mellom pakkerne (figur 8) (bl. a. Tuttle, 2012).



Figur 8. Prinsippkisse for lugeontesting. Vannet tilføres mellom de to pakkerne og går ut i sprekken (Nilsen og Broch, 2012).

Testingen foregår ved at vann pumpes inn i borehullet med et bestemt trykk, eksempelvis 10 bar overtrykk. Målinger hver 3. eller 5. meter er vanlig, men dette kan variere. Det antas at lekkasjen fordeler seg jevnt over lengden som måles (Hognestad *et al.*, 2010). Det er også mulig å gjennomføre lugeontesten på andre måter, og derfor bør den benyttede metoden oppgis. Som eksempler kan pakkerne plasseres i ulike nivåer, målingen kan gjøres før eller etter hullet er ferdigboret, eller det kan benyttes en eller to pakkere (Nilsen og Broch, 2012). En prinsippkisse for lugeontesting er gitt i figur 8, og utstyret benyttet er gitt i figur 9.

a)



b)



Figur 9 a og b. Utstyr benyttet til lugeontesting. a) Vannslanger og brønn. Pumpe til venstre som sørger for at pakkeren ekspanderes og dermed holdes på rett dyp i brønnen. På de to blå beholderne ses ventiler og målere på slangen som overvåker infiltrert vannmengde og trykk på vannet. b) Infiltrasjonsbrønn med pakker. Bilder tatt i felt, fra Follobanen.

2.6.2 Testpumping

Mens lugeontesten måler hvor mye vann som pumpes inn i bergmassen, vil testpumping anslå bergets gjennomstrømningsevne ved å pumpe vann ut fra bergmassen. Med testpumping er målet ofte å lokalisere de mest vannførende sprekke i fjellet, samt å bestemme kapasitet for vannuttak. En pumpe pumper vann ut fra borehullet. Det registreres hvordan vannstanden i borehullet endres etterhvert som pumpingen utføres, hvordan vannmengdene som pumpes ut varierer, og hvordan vannstanden stiger igjen etter at pumpingen avsluttes. Etterhvert som vannstanden stiger i borehullet etter avsluttet pumping, kan det detekteres hvor de vannførende sonene i berget befinner seg (bl. a. Storrø, Elvebakk og Rønning, 2002). Grunnen til dette er at vannstanden vil stoppe å stige der sprekke befinner seg, frem til sprekke er fylt med vann (Ramstad, 2018). Metoden forutsetter at pumpen har tilstrekkelig kapasitet til å pumpe ut mer vann enn det som berget klarer å tilføre på samme tid, slik at vannstanden synker i borehullet. Hvis ikke vil det ikke være mulig å kartlegge beliggenheten til de mest vannførende sonene i fjellet. Testen kalles også synke- og stigetest (Storrø,

Elvebakk og Rønning, 2002). Maksimum kapasitet for borehullet finnes ved å pumpe ut vann til vannstrømmen har stabilisert seg. Deretter måles kapasiteten i liter per minutt (Nilsen og Broch, 2012).

2.7 Setninger

Som tidligere nevnt kan setninger oppstå når poretrykket i løsmasser avtar. Kapitlet beskriver generell teori om setninger samt to metoder for måling av setninger.

2.7.1 Generelt om setninger

Setninger er en form for komprimering av løsmasser. Det kan eksempelvis oppstå ved belastninger på overflaten, nedbrytning av organisk materiale eller redusert poretrykk. Dette delkapitlet vil fokusere på setninger som kan oppstå i forbindelse med reduserte poretrykk.

De totale spenningene (σ) som opptrer i løsmasser er avhengig av effektivspenningen (σ') og poretrykket (p) etter følgende likning (bl. a. Emdal, 2014):

$$\sigma = \sigma' + p \quad [7]$$

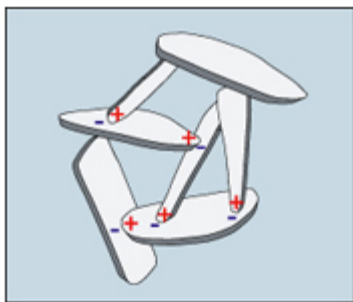
Effektivspenningene beskriver alle spenninger i løsmassene som ikke er forårsaket av poretrykket. Effektivspenningen sier dermed noe om hvilke spenninger de enkelte kornene i løsmassene opptar (bl. a. Emdal, 2014). Ved å snu om på likningen, fås

$$\sigma' = \sigma - p \quad [8]$$

Som beskrevet i kapittel 2.2.1 er poretrykket i et punkt avhengig av vekten til vannsøylen over punktet. Når vann dreneres ut av løsmassene vil derfor poretrykket avta i punktet. Som gitt av likning 8 vil dermed effektivspenningene øke. Dette fører til at de enkelte kornene i løsmassene må oppta mer spenninger enn tidligere, og de komprimeres. Denne prosessen kalles konsolidering, og fører til setninger i løsmassene. Hvis løsmasser har vært konsolidert ved et lavt poretrykk tidligere, vil ikke setninger oppstå ved dette poretrykket igjen (NGU, 2016).

Marine leirer er spesielt utsatt for setninger. Grunnen til dette er at leirpartikler som avsettes i

saltvann danner en korthusstruktur (figur 10). Korthusstrukturen er beholdt i de fleste av de marine leirene, selv om store mengder nå befinner seg over havnivå. Mellom leirmineralene er det plass til vann. Når vannet dreneres ut vil korthusstrukturen kunne komprimeres. Slik kan setninger oppstå. Det er ikke mulig å få leira tilbake sin opprinnelige struktur når dette først har skjedd (Grøndal, 2017). Hendelsesforløpet er ikke det samme som ved dannelse av kvikkleire. Korthusstrukturen i marine leirer blir til ved at salter holder mineralkornene sammen. Når kvikkleire dannes vaskes saltene ut, på grunn av grunnvannstrømning. Dermed kan korthusstrukturen kollapse totalt (bl. a. Brattli, 2014). Når setninger oppstår i marin leire skjer det ikke en total kollaps. På grunn av at korthusstrukturen består av hulrom og kan komprimeres er områder med marine leirer spesielt utsatt for setninger. I tillegg vil løsmasser med høye innhold av humus og organisk materiale kunne skape problemer. Grunnen til dette er at oksygen kan komme til i hulrommene der det tidligere var vann. Oksygen fører til at organisk materiale brytes ned. Dermed vil det etterlates ytterligere hulrom i løsmassene, som kan komprimeres (NGU, 2016).



Figur 10. Marin leire danner en korthusstruktur. Mellom leirmineralene er det vann. Når vannet dreneres ut kan strukturen komprimeres (Vorren et al., 2007).

I tillegg til løsmassetype og poretrykk, avhenger setningspotensialet av avsetningenes egenskaper og mektighet. Betydelige setninger oppstår som regel ikke i løsmasser med tykkelse under 5 meter (Ånensen, 2012). Det kan heller ikke bli setninger direkte oppå fast fjell, men i slike områder kan poretrykkreduksjon føre til skadet vegetasjon og drenerte tjern. De største setningsskadene på bygninger oppstår gjerne der deler av grunnmuren er fundamentert på løsmasser og deler på fast fjell, eller der bygg er fundamentert på svært varierende løsmassetykkelse. I slike tilfeller vil setningspotensialet i grunnen variere, og kan føre til skjevsetninger (Løset, 2004).

Reduksjon i poretrykk trenger ikke å være ensbetydende med setninger. Hvis grunnvannsnivået ligger på høyde med overgangen mellom løsmasser og fast fjell, vil ikke en

reduksjon føre til stor fare for setninger, selv om poretrykket reduseres der. Det samme gjelder hvis poretrykket har vært redusert betydelig tidligere, for da kan løsmassene allerede være konsolidert. Innlekkasje i tunnelen vil senke poretrykket, men det er altså ikke ensbetydende med setningsproblematikk (bl. a. Ånensen, 2012).

2.7.2 Måling av setninger

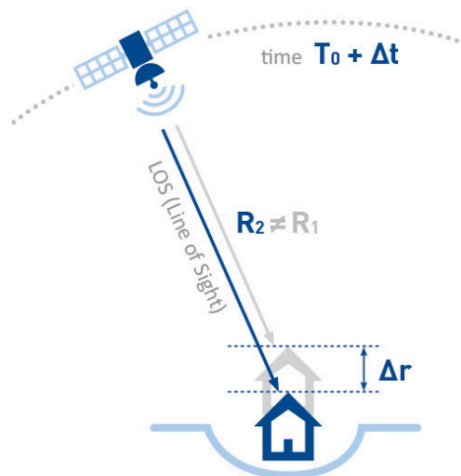
Setninger på hus og infrastruktur kan måles ved hjelp av ulike metoder. Nivellering er en mye benyttet metode. En nyere måte å måle setninger på er å benytte radarsatellitter til å registrere høydeendringer i jordoverflaten. De to metodene presenteres her.

Nivellering

Nivellering foregår ved at bolter plasseres på objekter som ønskes setningsovervåket, eksempelvis bygninger, gjerder og liknende. Selve målingene foregår med nivellerinstrumenter. Disse sikter og måler inn de faste punktene. Nivellerinstrumentet må stå på fast grunn, for eksempel en fjellknaus i nærheten av objektet som skal overvåkes (bl. a. Dick, 2018). Ved hjelp av før- og ettermålinger kan forflytninger i forhold til fastpunktet oppdages. Dermed kan setningene beregnes ut i fra differansen mellom boltene plassering før og etter tunneldrivingen (Grøndal, 2017).

InSAR

Radarinterferometri, InSAR, kan brukes til å detektere endringer i jordoverflaten (figur 11). Radarsatellitter i atmosfæren sender kontinuerlig ut mikrobølger. Mikrobølgene som går i retning jordoverflaten vil kunne reflekteres tilbake til atmosfæren, og dermed fanges opp av radarsatellittene. Radarsatellittene registrerer mikrobølgenes fase og amplitude. Amplituden til den reflekterte bølgen varierer ut fra hvilket materiale som treffes, samt helningen og fuktigheten til gjenstanden. Fasen til bølgen avhenger av avstanden mellom refleksjonspunktet og satellitten (Vöge, 2018). Ved å sammenlikne signalene fra to ulike målingstidspunkt kan endringer i topografisk høyde bestemmes. Denne metoden brukes også blant annet for å oppdage ustabile fjellpartier (NGU, 2015a). Store områder krever mange punkter hvor radarsatellittene kan reflekteres. Bygninger, lyktestolper, gjerder og liknende er gode reflektorer for radiobølger. Setninger i områder med slike objekter er derfor relativt enkle å få målinger fra. Vegetasjon reflekterer derimot radiobølger dårlig, og store områder dekket av skog og liknende er derfor vanskelig å bruke til datatolkning (Vöge, 2018).



Figur 11. Prinsipp InSAR. Satellitten beregner posisjonen til et målepunkt. Ved å sammenlikne avstanden før og etter tunneldriving kan setninger detekteres (Tre-Altamira, u. å.).

2.8 Vannlekkasjer i tunnel

Holmøy (2012) viser at magmatiske bergarter gir mer innlekkasje i tunneler enn metamorfe og sedimentære bergarter. Det er de sterke bergartene med gjennomsettende sprekker som gir de største lekkasjene, i tillegg til karstsoner i karbonatholdige bergarter. Bergarter med mye glimmer gir som regel mindre lekkasje i tunneler. I tillegg ble det funnet at store vannlekkasjer ofte opptrer under innsjøer og i forbindelse med bergartsgrenser. Det siste er ofte tilfelle fordi det som regel er mer oppsprekking i bergartene i nærheten av grensene (Holmøy, 2012)

Sonderboringer på stoffen i tunnelen er viktig for å oppdage vannførende soner i fjellet under drivingen (figur 12). Sonderboringer foregår ved at det bores hull innover i bergmassen, foran stoff. Dette kan eksempelvis gjøres ved kjerneboring eller hammerboring (Vegdirektoratet, 2016). I sonderborehullene kan det måles hvor mye vann som lekker inn, for eksempel ved å måle vannmengde over et bestemt tidsrom (Syversen, 2017). Fordi innlekkasjene ofte er konsentrert i enkelte svakhetssoner eller sprekkesett er det viktig å bore tilstrekkelig antall sonderborehull, samt sørge for at plasseringen tilpasses de geologiske forholdene. Hvis det kommer inn nok vann ved sonderboringene må det forinjiseres med injeksjonsmasse foran stoff (figur 12). Forinjeksjon foregår ved at det injiseres injeksjonsmasse under høyt trykk. Dermed trenger injeksjonsmassen inn i sprekker og åpninger, slik at berget tettes (Statens Vegvesen, 2016). Det er viktig at injiseringen utføres med tilstrekkelig antall injeksjonshull

og med riktig injeksjonsmasse, slik at minimalt med innlekkasje risikeres. Det minimerer faren for store poretrykkfall i grunnen (Grøndal, 2017).



Figur 12. Viser tunnelstøffen foran boremaskinen. På illustrasjonen injiseres det injeksjonsmasse for å tette bergmassen i forkant av drivingen gjennom sonen (Vegvesen, 2011).

I Norge er det gitte krav til maksimal innlekkasje i tunneler. I anlegg uten spesielle krav og i undersjøiske tunneler er kravet til innlekkasje maksimalt 30 l/min/100 m. I sårbare områder, med fare for store setningsskader på overflaten, kan kravet være 2 l/min/100 m. Det kan utarbeides egne krav for ulike seksjoner av tunnelen dersom det er ønskelig (Grøv, 2012). Ved større innlekkasjer i en tunnel enn det som er mulig å tette med forinjeksjon, kan det være aktuelt å infiltrere vann for å opprettholde poretrykket (Karlsruud, 2012).

2.9 Tidligere prosjekter

Metoden med å infiltrere vann i grunnen har blitt benyttet i flere tunnelprosjekter i Norge tidligere. I det følgende blir det presentert erfaringer fra Romeriksporten, Lørentunnelen, Oslo Sentrum og jernbanetunnelen mellom Lysaker og Sandvika. For å studere bruk av vanninfiltrasjon i utlandet har det også vært søkt etter utenlandske prosjekter, men det er ikke funnet tilgjengelige rapporter. Forfatter har vært i kontakt med det svenske Trafikverket som har gitt noen svar.

2.9.1 Romeriksporten

Romeriksporten er en jernbanetunnel mellom Oslo og Lillestrøm, som ble bygget i forbindelse med Gardermoen flyplass. Tunnelen strekker seg over 13,7 km, og er med det Norges lengste jernbanetunnel (Kværner og Snilsberg, 2008). Byggeperioden varte fra 1994 til 1998 (Multiconsult, u. å.). Berggrunnen består hovedsakelig av variasjoner av prekambrisk gneis. Flere svakhetssoner krysser traséen, i tillegg til at bergarten er svært oppsprukket flere

steder. I noen deler av traséen består grunnen av dype renner med løsmasser som marin leire (Løset, 2004).

Både under og etter driving var det store vannlekkasjer i tunnelen. En reduksjon i poretrykk ble oppdaget i februar 1997. I september samme år hadde poretrykket sunket med 6 meter. Det er svakhetssoner i berget mellom tunnelen og løsmassene på overflaten. Disse har fått skylden for problemene som oppsto i området (Kværner og Snilsberg, 2008). Svakhetssonene ble vurdert til å ha Q-verdier på 0,1 til 4 (Holmøy, 2012). En Q-verdi forteller noe om hvilken stabilitet som kan forventes i en tunnel eller bergrom, basert på oppsprekingsgrad, vann og spenningsforhold (NGI, 2015). Q-verdier på 0,1 til 4 vitner om svært lav stabilitet. Tunnelen ble etterinjisert med betong, og i 1999 ble det startet med vanninfiltrasjon i fjellbrønner. Dette for å se om poretrykket kunne stige igjen. Brønnene ble plassert i og i nærheten av antatte svakhetssoner i fjellet, slik at de skulle dekke de vannførende sonene i størst mulig grad (Kværner og Snilsberg, 2013). Brønnene hadde lengder på opptil 96 meter, og dette er noe av det lengste som er benyttet til vanninfiltrasjon i Norge (Magnussen og Kveldsvik, 2003).

Påvirkning på natur

I Østmarka ble det ble brukt to ulike metoder for å måle grunnvannsnivået over Romeriksporten. Den ene var å måle høydeforskjellen mellom vegetasjonen og myrene på overflaten, mens den andre sammenliknet grunnvannsnivået med høyden på utløpet til innsjøen Puttjern. Målingene viste at senkningen av grunnvannstanden var størst i nærhet til tunnelen, men kunne måles opp til 600 meter unna (Kværner og Snilsberg, 2008). I brønnene ble vannivået peilet, og dermed ble avstanden fra overflaten og ned til vannivået målt. I begynnelsen ble målingene utført en gang i uka, mens det senere ble redusert til en til to ganger i måneden (Kværner og Snilsberg, 2013).

Tjernet Nordre Puttjern ble i stor grad drenert som følge av tunneldrivingen (figur 13). Fra en maksimal dybde på 9 meter før tunneldrivingen startet, sank innsjøen til å være 3 meter på sitt dypeste. Lutvann fikk også senket vannstand, og store områder med grunt vann ble tørrlagt i løpet av perioden (Bendiksen *et al.*, 2005). Naturen rundt tjernene ble også påvirket av grunnvannsendringene. I 2006 var det tydelige setningsskader. Det ble observert skjeve trær grunnet ujevne setninger, torvskred, oppsprekking og åpninger i myr og torv rundt Nordre Puttjern. De største problemene oppsto i områder med tykke lag av torv og løsmasser. I tillegg endret vannstrømningen ut fra Nordre Puttjern bane etter at vannivået sank. Før drivingen av

Romeriksporten rant vannet nordover fra Puttjern, mens det etter endret retning mot sør (Kværner og Snilsberg, 2008).



Figur 13. Nordre Puttjern sommeren 1997. Tjernet ble i stor grad drenert, som følge av drivingen av Romeriksporten (Bentzrød, 2014).

Fordi området ikke var befart før drivingen av tunnelen startet, var det vanskelig å bestemme eksakt setning av området. Likevel sier kilder at jordoverflaten sank med flere meter på grunn av det endrede poretrykket. I 1997 gikk det et torvskred ned i Nordre Puttjern, som etterlot seg bruddkanter med høyde opp til 3 meter. Disse ble mindre synlige ettersom tiden gikk. Skredene gikk fordi grunnen ble ustabil da poretrykket sank. Slike hendelser oppsto videre utover mot 1999 (Kværner og Snilsberg, 2008).

Til tross for at tjernene rundt Romeriksporten i stor grad ble drenert, er det grunn til å tro at poretrykket hadde sunket mer dersom innsjøene ikke hadde vært der. Årsaken til dette er at tjern kan fungere som et magasin som kontinuerlig mater grunnen med vann. Det er imidlertid viktig å bemerke at tilførselsevnen til slike tjern er begrenset, da de tilslutt vil kunne tømmes helt. I områder uten tilførsel av vann kan det antas at poretrykket reduseres mer (Kværner og Snilsberg, 2008).

I tillegg til de fysiske tegnene ble det registrert endring i kvaliteten på grunnvannet både før og etter infiltrasjonen startet. Grunnvann har som regel en relativt nøytral pH, men da poretrykket rundt Romeriksporten sank ble det detektert pH-verdier lavere enn 4. I dette området ble det forklart med at surt vann fra de omkringliggende myrene fylte på grunnvannet raskt, noe som førte til de lave verdiene (Kværner og Snilsberg, 2013). I myrer er tilgangen på

oksygen lav, og nedbrytning foregår anaerobt. Prosessen fører til at miljøet blir reduserende, med pH-verdier godt under 7 (Larsen, 2017). I tillegg får berget, som til vanlig er vannfylt, luft i sprekkene, noe som kan føre til oksidering av mineralene og utlekking av sulfid (Kværner og Snilsberg, 2013). Sulfid kan omdannes til svovelsyre og dermed skape et surt miljø (Endre og Sørmo, 2015).

Da tunnelen ble injisert var det tydelig at poretrykket steg noe. Infiltrasjonen av grunnvann viste også en god effekt, og hindret poretrykket i å synke i de tørreste periodene (Kværner og Snilsberg, 2013). Etter injiseringen og infiltrasjonen startet hevet grunnen rundt Puttjern seg en del, men ikke tilbake til sitt opprinnelige nivå i hele området. Sprekkene som oppsto i torv var fortsatt åpne i 2006. Dette viser at reduserte poretrykk kan ha irreversible konsekvenser (Kværner og Snilsberg, 2008).

Påvirkning på bygg og infrastruktur

I tillegg til drenering av innsjøer, påvirket også Romeriksporten områder med bebyggelse og infrastruktur. Under drivingen ble det etablert brønner for vanninfiltrasjon på Godlia, Hellerud, Ellingsrud og Strømmen. Bane NOR har ansvaret for å følge opp disse, da mange fortsatt er i bruk. På Godlia ble det startet overvåking av poretrykket på forhånd av drivingen. Dette førte til at det ble oppdaget behov for infiltrasjonsbrønner relativt raskt da drivingen av tunnelen startet. Det ble infiltrert vann både fra tunnelen og fra dagen. I dette området har vanninfiltrasjon gitt relativt gode resultater. På Hellerud er imidlertid saken en annen. På forhånd av drivingen ble det kun anlagt én poretrykkmåler, hvor poretrykket plutselig sank med 11 meter etter at tunnelbyggingen hadde startet. Vanninfiltrasjon ble etablert 16 måneder senere, da det hadde blitt oppdaget 32 cm setninger i området. Etter etablering av 16 infiltrasjonsbrønner er nå poretrykket innenfor toleransegrensene. Liknende resultater gjelder ved Ellingsrud. Etter store poretrykkreduksjoner med påfølgende etablering av infiltrasjonsbrønner, steg poretrykket igjen. I 2002 var det likevel flere av poretrykkmålerne som viste poretrykk under opprinnelige nivå. Likevel er det ikke ventet ytterligere setninger for området, da alle målerne viser verdier over toleransegrensene. På Ellingsrud ble det også etablert en infiltrasjonsbrønn i løsmasser, men denne hadde liten effekt. Også på Strømmen ble det under tunneldrivingen registrert poretrykkreduksjoner. Infiltrasjonsbrønner ble etablert, og to brønner var fortsatt i drift i 2002. Det ble forsøkt å slå av infiltrasjonsbrønnene i 1996, men dette førte til store poretrykkfall. Det har tatt tid å bygge opp igjen poretrykkene, men i 2002 viste alle poretrykkmålerne i Strømmen-området at poretrykket er på et forsvarlig

nivå med tanke på ytterligere setningsproblematikk (Magnussen og Kveldsvik, 2003). I etterkant av prosjektet er det anslått at det ble gjort skader for 80 til 100 millioner kroner på bygninger langs traséen (Holmøy, 2012).

2.9.2 Oslo Sentrum

Det har gjennom tidene blitt drevet flere tunneler i og i nærheten av Oslo sentrum. Allerede da jernbanetunnelen mellom Majorstua og Nationaltheatret ble bygget på 1920-tallet, ble det registrert betydelige setningsskader på hus og bebyggelse. Også i senere tid er det avdekket setningsskader etter tunnelbygging i Oslo. I tillegg til strenge krav til tetting av tunneler og bergrom er derfor vanninfiltrasjon benyttet på de fleste prosjekter i Oslo-området (Løset, 2004).

Kloakksystemet for Bærum, Asker, Røyken og store deler av Oslo blir behandlet i VEAS, Vestfjorden Avløpsselskap. Avløpssystemet er komplekst sammensatt av tunneler som ble bygget i tiden fra 1971 til 1985. Under Majorstua i Oslo har det vært problemer med reduserte poretrykk grunnet avløpstunnelene (Brennbekken, 2012). Berggrunnen, som her stort sett består av leir- og kalkrike bergarter, har noen steder opp til 27 meter tykke overdekninger av leire (Magnussen og Kveldsvik, 2003). Injeksjon i tunnelen viste seg å ikke være tilstrekkelig for å holde poretrykket stabilt, og derfor ble det startet med infiltrasjon av vann fra tunnelen i 1978 og fra dagen i 1991. Infiltrasjon fra dagen ble påbegynt fordi det ble registrert skader på bygninger på Majorstua (Brennbekken, 2012). Ved Majorstua ble det boret tre infiltrasjonsbrønner fra dagen i 1991. Disse 70 meter lange brønnene ble boret med et fall på 35°-40°. Da brønnene ble satt i drift kunne det måles økte poretrykk opp til 200 meter unna. I Gardeveien, rett ved Majorstua T-banestasjon, ble en av de tre infiltrasjonsbrønnene plassert. I begynnelsen av år 2002 ble det rapportert om vannproblemer i kjelleren i et av byggene i veien, men ingen store avvik i poretrykk ble funnet. Et peilerør ble montert for videre oppfølging, men beboerne fulgte ikke dette opp. Høsten samme år ble det oppdaget at 60 m³ løsmasser hadde erodert vekk under bygget, og det var mye vann i området. Det ble satt i verk tiltak med det samme, og krateret ble gjenfylt med pukk og betong, i tillegg til at det ble startet injisering i grunnen omkring. Setningene på bygget ble målt til å være opp til 30 mm på våren i 2003 (figur 14). Sannsynligvis har erosjonen funnet sted fordi vann ble infiltrert for nær løsmassene. Det ble ikke undersøkt grunnforhold på sidene av brønntraséen da infiltrasjonsbrønnen ble etablert. Etter grundigere undersøkelser i ettertid viste det seg at

fjelltopografien avviket fra antakelsene på forhånd, og derfor ble ikke dette forutsett. Magnussen og Kveldsvik (2003) har beregnet at erosjonen startet allerede i 1995, og dermed pågikk i nærmere 7,5 år.



Figur 14. Setningsskader på fasaden på et bygg i Gardeveien (Magnussen og Kveldsvik, 2003).

Lørentunnelen er en 910 meter lang vegtunnel som går fra Ulven til Sinsen i Oslo. Bunnen av tunnelen ligger i en dyprenne med 6-8 meter fjelloverdekning, og 30 meter løsmasser over. Dette er stort sett marin, sensitiv leire. Her er det fundamentert flere hus, og dermed var det stor fare for setningsskader da tunnelen ble bygget (Boge, 2012). Selv om lekkasjekravene i tunnelen ikke ble overtrådt, ble det registrert reduksjoner i poretrykket på opp til 7 meter i den leirfylte dyprenna. Derfor ble det igangsatt infiltrasjon av vann både fra dagen og tunnelen. Dette ga en økning i poretrykket på ca. 3 meter. Ved byggeslutt var poretrykket på omtrent samme nivå som før byggestart. På det meste ble det registrert setninger på opp til 40 mm på noen hus, og det ble blant annet rapportert om sprekker i vegger og kjellere, samt sprukne vinduer og baderomsfliser (Boge, 2012).

Granfosstunnelen ved Lysaker krysser under en dyprenne med 15 meter tykke løsmasser. Her ble det forutsett at problemer med innlekkasje og setninger kunne oppstå, og derfor ble det etablert tre infiltrasjonsbrønner før tunnelen ble startet drevet på slutten av 1980-tallet. Brønnene, som var i bruk i 1,5 år, sørget for at poretrykket ble holdt på et rimelig stabilt nivå. Likevel ble det rapportert om setninger i nærheten. Under drivingen ble det anlagt tre brønner til, som ble boret direkte fra tunnelen. Den ene av disse er fortsatt i drift, med en infiltrasjonsrate på 15 l/min og trykk på 5 bar. Denne blir jevnlig vedlikeholdt med rens av filtre, og har blitt reparert ved en anledning. Poretrykket i området var nesten tilbake på sitt opprinnelige nivå i 2003 (Magnussen og Kveldsvik, 2003).

2.9.3 Lysaker-Sandvika

Det ble bygget dobbeltspor for jernbane i tunnel mellom Lysaker og Sandvika med drivestart i

begynnelsen av april 2008. I den forbindelse ble det infiltrert vann i totalt 9 brønner (Østerås, 2012). Østerås (2012) har sammenliknet infiltrasjonsrater mot endringer i poretrykk i området. Det er sett på infiltrasjonsbrønner og poretrykkmålere som har en nær beliggenhet til hverandre. Resultatene er varierende, og blir kort presentert i de følgende avsnittene.

I et område med relativt store setninger var det fortsatt setningsaktivitet i 2012. Der var infiltrasjonsbrønnen enda aktiv i slutten av 2011. Et påbegynt poretrykkfall i området ble stoppet etter at den nærmeste infiltrasjonsbrønnen ble satt i drift. Ved to senere anledninger ble vanninfiltrasjonen skrudd av, noe som førte til at poretrykket sank. Ut fra dette ble det konkludert med at det er god kommunikasjon mellom infiltrasjonsbrønnen og poretrykkmåleren, og at infiltrasjonsbrønnen dermed har hatt effekt. To andre poretrykkmålere i nærheten er det derimot ikke sett noen effekt på. Disse to ligger nærmere en annen tunnel i området, som også kan ha bidratt til reduserte poretrykk. Andre steder er det ikke mulig å trekke noen slutninger på sammenhengen mellom infiltrert vann og poretrykk. I nærheten av de andre infiltrasjonsbrønnene finnes de samme trendene. Noen poretrykkmålere viser god respons på infiltrasjonen, mens andre ikke viser noen vesentlig effekt (Østerås, 2012).

Det er påvist setningsskader på flere bygg i nærheten av jernbanetunnelen mellom Lysaker og Sandvika. Noen av disse ble registrert omtrent da byggingen av tunnelen startet, og derfor antas det at jernbanetunnelen er årsaken. Imidlertid ble det også målt setninger før drivingen av tunnelen var i gang. Granfosstunnelen ligger i samme område, og har fått skylda for dette. I disse områdene ble det registrert totale setninger på opptil 138 mm, som er de største i forbindelse med byggingen av jernbanetunnelen mellom Lysaker og Sandvika. Andre steder er setningene i størrelsesorden 10-40 mm. I noen deler av området er det gjort få setningsmålinger før tunnelen ble drevet, og totale setninger er derfor vanskelig å anslå. I andre områder er det vanskelig å trekke antakelser om årsaken til setningene, fordi setningene startet før endringer i poretrykk ble observert. Setningsmålingene har også noen steder startet for sent til at klare paralleller mellom tunneldriving, reduksjon av poretrykk og setninger kan trekkes. I 2010 ble det etablert en ny infiltrasjonsbrønn i området, fordi det ble varslet om setningsskader. Setningene stemte godt overens med tidspunktet for et målt poretrykkfall. Infiltrasjonsbrønnen hindret mest sannsynlig et poretrykkfall på vinteren året etter, og ingen ytterligere setninger ble registrert (Østerås, 2012).

Mange av poretrykkreduksjonene og setningene i prosjektet mellom Lysaker og Sandvika kan altså kobles til tunneldrivingen, da tidspunktene stemmer godt overens. Likevel finnes det flere eksempler i prosjektet på at andre faktorer også har bidratt til setninger i området (Østerås, 2012).

2.9.4 Internasjonale prosjekter

I Stockholm er det flere tunnelprosjekter som benytter vanninfiltrasjon for å opprettholde poretrykk i grunnen. Trafikverket i Stockholm overvåker to vegtunneler, Södra Länken og Norra Länken, hvor det benyttes infiltrasjonsanlegg. Vanninfiltrasjonen begynte under byggefasen av tunnelprosjektene, og var størst utbredt under bygging og rett etter ferdigstilling. Senere har infiltrasjonen fortsatt i noen områder og blitt avsluttet i andre områder. Noen steder har infiltrasjonsbrønnene blitt stengt etter 10 år, mens det andre steder har vært nødvendig å fortsette med vanninfiltrasjon for å opprettholde poretrykket i området. I Stockholm har det ikke oppstått noen store konsekvenser med setningsskader eller påvirkning på natur på grunn av senkede poretrykk. Trafikverket må rapportere inn hvor mye vann som har lekket inn i tunnelen, samt hvor mye vann som er infiltrert i infiltrasjonsbrønnene (Pules, 2018).

Langs Södra Länken finnes det 200 brønner som benyttes til vanninfiltrasjon (Vägverket, u.å.). I forkant av byggingen av tunnelen Norra Länken, ble viktigheten av å unngå å senke poretrykk presisert. Tunnelen ble delt inn seksjonsvis med ulike krav til maksimal innlekkasje (Spross, 2009).

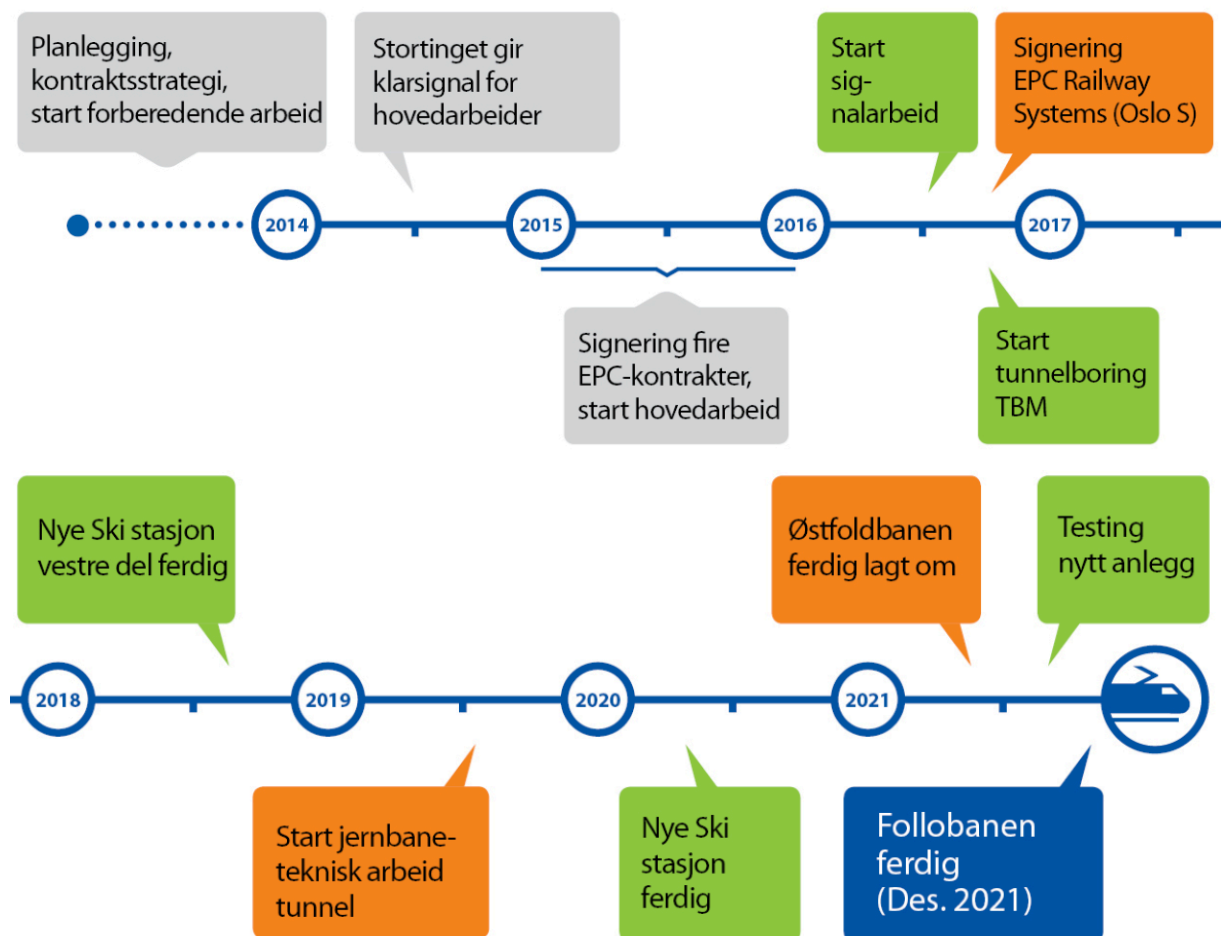
Under sentrum av Göteborg er togtunnelen Västlänken under planlegging. Tunnelen skal bli i overkant av 6 km lang, og bestå av tre undergrunnstasjoner. På grunn av stedvis store løsmassedekker, samt infrastruktur og bygninger på overflaten, er det viktig å opprettholde poretrykket i løsmasser. Det er lagt vekt på viktigheten av tette tunneler, i tillegg til at det er planlagt vanninfiltrasjon ved behov. Om nødvendig anses permanent vanninfiltrasjon å være et alternativ, selv om dette helst bør unngås (Sundqvist, 2006).

3 OMRÅDEBESKRIVELSE

Kapittel 3 beskriver Follobaneprojektet, hvor Bane NOR er byggherre. Entreprenøren er Acciona-Ghella Joint Venture (AGJV).

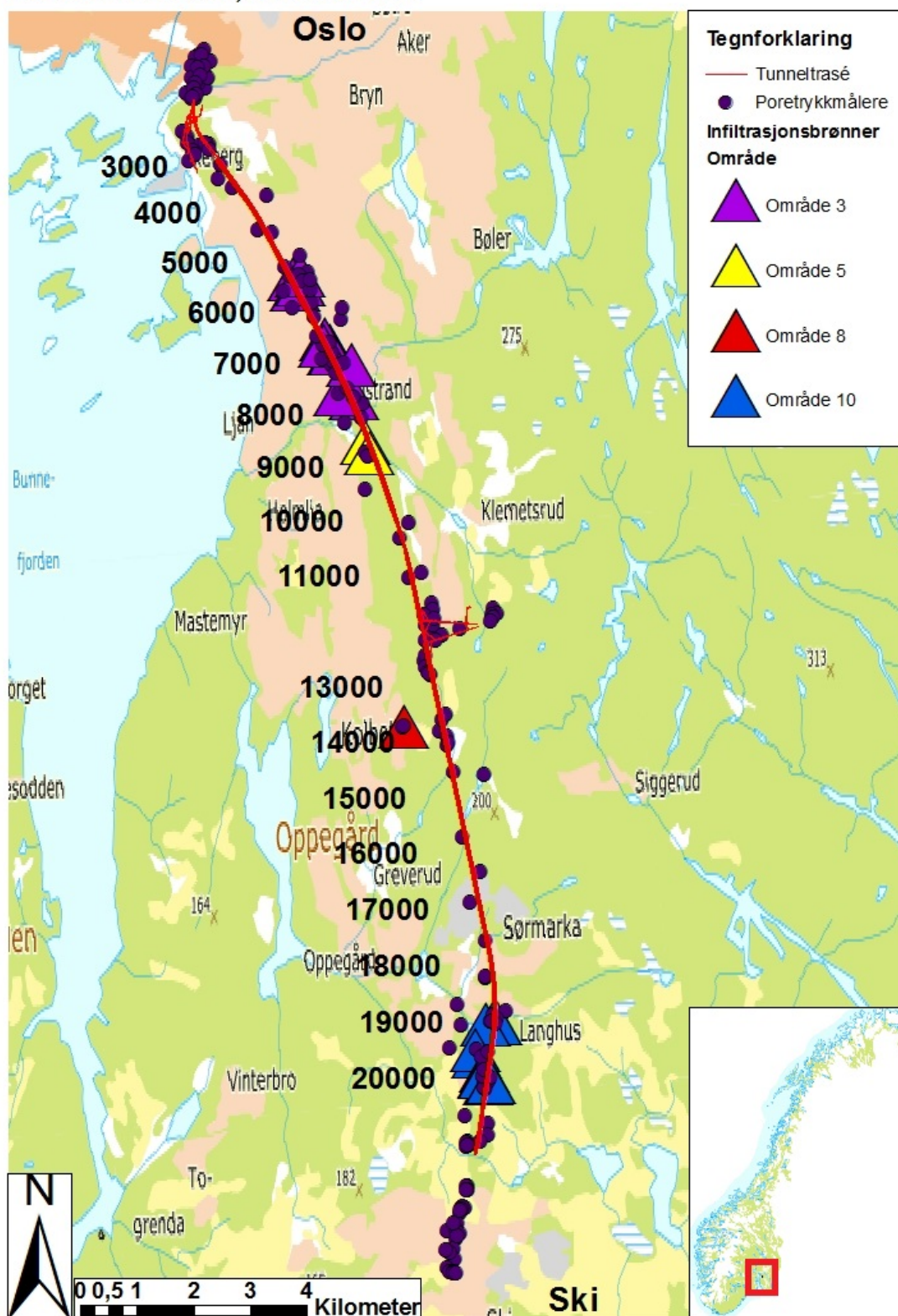
3.1 Om Follobanen

Follobaneprojektet består av et dobbeltspor på 22 km mellom Oslo S og Ski, sørøst for Oslo (figur 16). Prosjektet er en del av InterCity-prosjektet som skal bygge og oppgradere jernbanenettet fra Halden, Skien, Lillehammer og Hønefoss og inn til Oslo sentrum. Follobanen hadde byggestart i 2015, og er planlagt ferdig i 2021 (figur 15). Banen bygges for høyhastighet, og skal redusere reisetiden fra Oslo S til Ski fra 22 til 11 minutter. Follobanetunnelen er den største delen av dette prosjektet, og består av 20 km tunnel. Når den er ferdigbygget blir den Nordens lengste tunnel for jernbane (AGJV, u. å.).



Figur 15. Tidslinje for byggingen av Follobanen (BaneNOR, u. å.-a).

Follobanetraséen, oversiktskart



Figur 16. Oversikt over Follobanetraséen. Tallene langs tunnelen viser meter-inndelingen traséen er delt opp i.

Tunnelene drives i fast fjell, hvorav 18,5 km drives med tunnelboremaskiner (TBM). Fra prosjektområdet på Åsland, mellom Oslo og Ski, går det to tunnelboremaskiner i hver retning. Dermed er fire TBM-er i drift på samme tid. Den ferdige tunnelen vil ha to løp, slik at togene skal kunne gå i en retning per løp. TBM-ene borer tunnelene med åpning på 9,96 meter. Etter at betongelementer er satt inn som sikring og tunnelen er ferdig, vil diameteren være 8,75 meter (AGJV, u. å.). En tunnelboremaskin borer i fullprofil, det vil si at hele tverrsnittet av tunnelen bores ut samtidig. Boringen foregår ved at borhodet roterer mot tunnelstøffen, samtidig som det mates på kraft mot berget. Metoden er gunstig med tanke på vannlekkasjer, fordi den gir små skader på konturen i tunnelens vegger. Slik minimeres sannsynligheten for stor vanntilgang via sprekker (Bruland, 2013). Tunnelboremaskinene som benyttes på Follobaneprosjektet er dobbeltskjold. Disse plasserer betongelementer rundt hele profilet i tunnelen, rett bak støff, kontinuerlig etter boring. Dette fungerer som sikring for både stabilitet, vann og frost (Grøndal, 2017). Tunnelene blir tilnærmet 100% tette mot vannlekkasjer, og kalles derfor udrenerte. Dobbeltskjoldmaskiner er gunstige for boring i berg hvor det er få svakhetssoner i begrenset omfang (bl. a. Syversen, 2017).

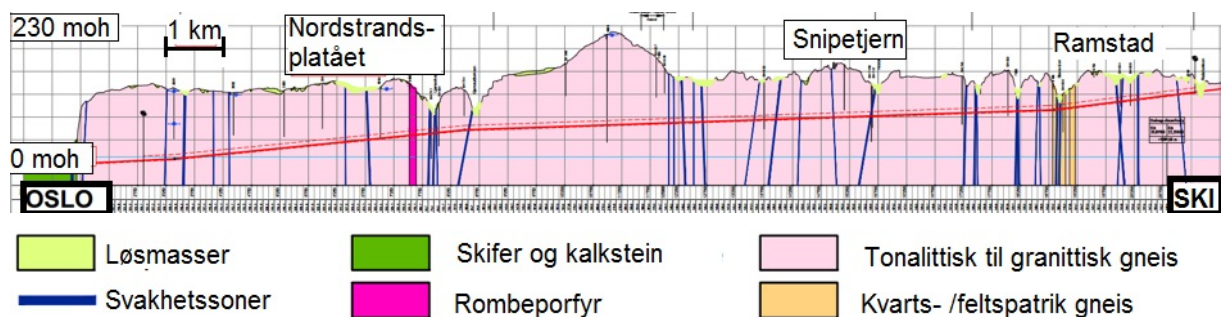
Det drives som nevnt to parallelle tunnellop i retning mot Oslo, og to i retning mot Ski, fra Åsland. For hver 500. meter sprenges det ut en tverrforbindelse mellom de to løpene. Disse skal fungere som rømningsveier i tillegg til at de skal brukes ved vedlikehold av tunnelene. Tverrforbindelsene sprenges ved hjelp av konvensjonell boring og sprenging (Elden, 2017). Her er imidlertid tetningsmulighetene annerledes enn ved driving med dobbeltskjold TBM. Tverrtunnelene tettes med tradisjonell bruk av forinjeksjon, og er derfor en drenert løsning i motsetning til de TBM-drevne hovedløpene (Syversen, 2017). Tverrforbindelsene er foreløpig sikret med sprøytebetong og bolter, som ikke gir en vanntett sikring (Davik *et al.*, 2002). Lekkasje i tunnelen på TBM-delen av Follobaneprosjektet oppstår altså der tunnelboremaskinene ikke har sikret med betongelementer, det vil si på støff og i tverrforbindelsene mellom de to løpene.

3.2 Utførte undersøkelser på Follobanen

I forkant av tunneldrivingen ble det utført mange undersøkelser langs Follobanetraséen. De ulike undersøkelsene blir presentert i dette kapittelet.

Den ingeniørgeologiske kartleggingen har bestått av tolkning av flybilder, kartlegging av

bergarter, kjerneprov, Q-verdi og sprekkesett i dagen samt i eksisterende tunnelanlegg. Utstrekning og mektighet av svakhetssoner, sprekker og bergarter er estimert basert på dette. Sprekkekarakter har vært kartlagt der dette har vært mulig å fastslå. Kjernerboringer ble tatt langs hele traséen før drivestart. Prøvene viste høyere grad av oppsprekking i dypet enn mot overflaten, men noen av disse sprekkekan ha blitt dannet på grunn av boringen (Jernbaneverket, 2014a). Det ble også utført laboratorietester på bergprøver. Ut fra kjernerboringene ble bergmassekvalitet, bergartsgrenser, oppsprekking, sleppemateriale og forvitring registrert (AGJV, 2016). Basert på resultatene ble det laget et geologisk snitt, som er gjengitt i figur 17 og digitalt vedlegg.



Figur 17. Geologisk snitt over Follobanetraséen, kartlagt på forhånd av drivingen. De blå linjene viser svakhetssoner, mens den røde er tunnelen. Snittet viser også løsmassetykkelse over traséen (Jernbaneverket, 2014c, med modifikasjoner).

Geotekniske undersøkelser ble utført i 2013 og 2014. Totalsonderinger har vært brukt til å finne fasthet av løsmassene samt dybde til fjell (Jernbaneverket, 2014a). I tillegg har det blitt tatt løsmasseprøver hvor det har blitt utført tester for å bestemme vanninnhold, humusinnhold og tetthet. Triaksiale tester er benyttet for å bestemme skjærstyrke av løsmasseprøvene, i tillegg til at det ble utført kornkurveanalyser for å bestemme kornstørrelser i utvalgte områder (FPS, 2014).

I 2010 utførte NGU resistivitetsmålinger langs deler av traséen. Målingene utføres ved at elektriske kabler legges ut langs bakken, og elektroder kobles til. Strøm tilføres to elektroder, og brer seg ut i grunnen. Det oppstår et spenningsfelt, og den elektriske spenningen mellom to elektroder måles. Ulike materialer i grunnen vil ha ulik motstand, og derfor kan grunnforholdene kartlegges. Ved ønske om å kartlegge dypere i grunnen kan avstanden mellom elektrodene økes (Solberg *et al.*, 2011). Metoden ble benyttet for å oppdage svakhetssoner under løsmasseavsetninger og i områder med mye bebyggelse (Vegdirektoratet, 2014). Resistivitetsmålinger kan ofte gi informasjon om fall og bredde hos svakhetssonene

(Jernbaneverket, 2014a). Metoden er en geofysisk målemetode. En annen geofysisk målemetode som ble benyttet langs Follobanetraséen er seismisk refraksjon. Metoden går ut på å sende lydbølger ned i bakken, som brer seg langs grenseflater i grunnen. Det måles hvor lang tid lydbølgene bruker på å tilbakelegge avstanden langs grenseflaten og opp igjen til overflaten. Bølgene bruker ulik hastighet på å bevege seg i ulike medier. Derfor kan kvaliteten og tykkelsen på laget som bølgen beveger seg i beregnes. Metoden brukes til å kartlegge fjellkvalitet, samt løsmassetykkelser og –typer (Olesen og Rønning, 2018).

Det ble også gjennomført hydrologisk kartlegging i forkant av tunneldrivingen. Basert på data fra Meteorologisk institutt ble gjennomsnittlig nedbørsmengde funnet til å være 705-830 mm/år. Gjennomsnittstemperaturen for området er 5,7 °C, og ligger over 0 °C 9 måneder i året. Fordampningen er omtrent 400 mm/år. Området rundt Follobanen drenerer til Bunnefjorden (Jernbaneverket, 2014a, basert på data fra Meteorologisk institutt). Traséen krysser tre nedbørsfelt. Nordstrandsplataet har ingen større elver og bekker, men vannet fra feltet går rett ut i Oslofjorden. Sør for Nordstrandsplataet ligger nedbørsfeltet Ljanselva, hvor Nøklevann og Lutvann, begge drikkevannskilder for Oslo, befinner seg. Ljanselva og Gjertrudbekken samler vannet og drenerer det til Oslofjorden. Det siste nedbørsfeltet, Gjersøelva, ligger sør for de to først nevnte. Området inneholder mange små innsjøer, blant andre Snipetjern som beskrives nærmere i kapittel 4, 5 og 6 (Jernbaneverket, 2014a).

I tillegg til de nevnte undersøkelsene er det benyttet lugeonmålinger i infiltrasjonsbrønner, hammerborehull og noen av kjerneborehullene. Beskrivelse av lugeontesting er gjort i kapittel 2.6.1. SINTEF har utført bergspenningsmålinger i Ekeberghallene og Ekeberg tunnelen. Det er ikke gjort grundige permeabilitetstester av løsmassene (Jernbaneverket, 2014a).

3.3 Geologi og løsmassegeologi langs Follobanetraséen

Berggrunnen langs tunneltraséen består hovedsakelig av prekambrisk gneis. I tillegg er det funnet amfibolittiske ganger samt noen intrusiver fra perm. De amfibolittiske gangene er antatt å ha tykkelser fra desimetre til noen metere. Det er i tillegg funnet skifer i den nordlige delen av Follobanetraséen, men dette ligger utenfor TBM-delens område og påvirker derfor ikke i denne studien. En 20-30 meter tykk gang av rombeporfyr går sørover fra Ekeberg. Denne er ventet å treffe tunnelen omtrent på km. 7,8 (figur 16). Den prekambriske gneisen er foldet, og har en sterk foliasjon med strøk fra N-S til NV-SØ. Flere svakhetssoner følger

foliasjonen (Jernbaneverket, 2014d). Berggrunnskart basert på forundersøkelser langs traséen er gitt i digitalt vedlegg og vedlegg 1.

Den prekambriske gneisen kan deles opp i tre typer (Jernbaneverket, 2014d):

- Tonalittisk til granittisk gneis
- Kvarts-feltspat-gneis
- Biotittisk gneis

Disse har liknende mekaniske egenskaper, men noe ulik mineralsammensetning og mineralbindinger.

Det ble kartlagt to hovedsprekkesett i forkant av drivingen (Jernbaneverket, 2014d):

1. Strøk Ø-V, tilnærmet vertikale sprekker. Sprekkeavstand på 0,2-2 m.
2. Strøk NV-SØ til N-S, fall 35°-90° V. Sprekkeavstand på 0,5 til 1,1 m. Disse sprekkenes følger hovedsakelig foliasjonen til bergarten.

I tillegg ble det funnet svakhetssoner i to hovedretninger, i retning N-S og Ø-V. De fleste antas å ha bredde under 10 meter. Undersøkelser har vist at de stort sett består av grovknust berg, eller fint oppsprukket berg med leirige mineraler (Jernbaneverket, 2014d).

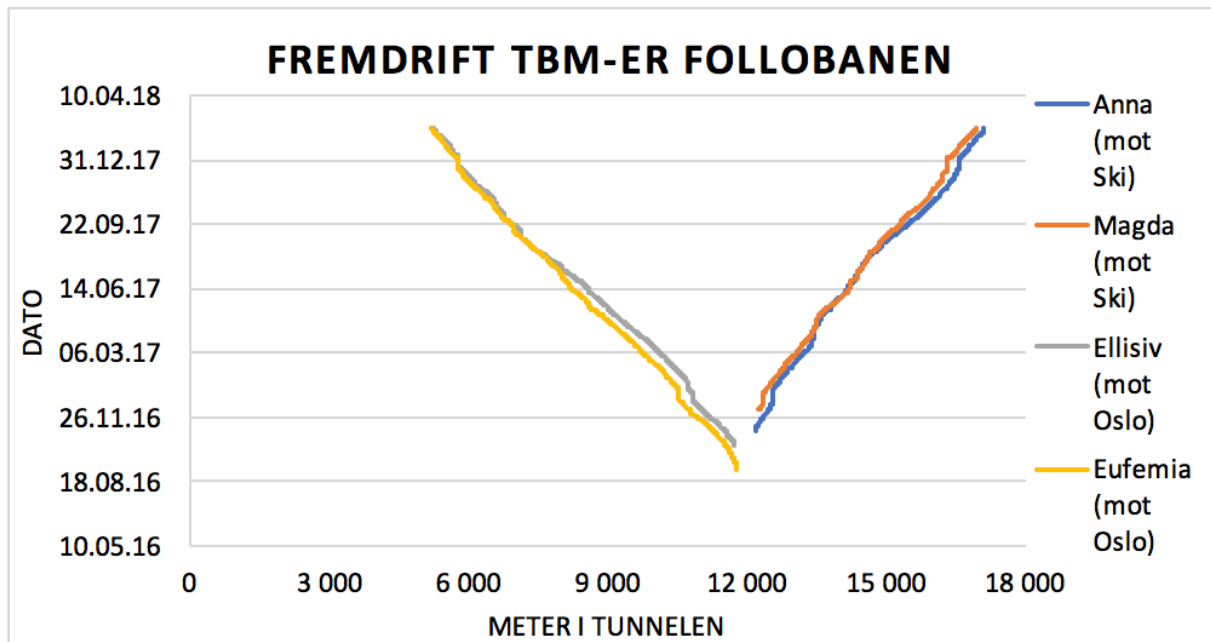
Løsmassene langs traséen består hovedsakelig av leirig materiale, med noe grus og sand. Den hydrauliske konduktiviteten i løsmassene avhenger av mengden grus og sand i forhold til leire. Som tidligere beskrevet er leirig materiale lite permeabelt, i motsetning til grovere fraksjoner. Om det finnes et lag med morene mellom leira og fjellet vil permeabiliteten øke (AGJV, 2016). Et kart over løsmassetykkelse kartlagt langs traséen er gitt i digitalt vedlegg og vedlegg 2. Som tidligere nevnt er setningspotensialet begrenset i løsmasser med opp til 5 meter tykkelse. Det kan være tykkere løsmasseavsetninger langs traséen som ikke har blitt oppdaget.

Geologien kartlegges kontinuerlig under drivingen av tunnelen. Bane NOR kartlegger tunnelstufen hver morgen. Til vanlig skjer kartleggingen omtrent hver 15. til 25. meter, avhengig av tunnelboremaskinens inndrift hver dag. I tillegg benyttes det optisk televierer for å kartlegge sprekker. Denne blir ført inn i sondeborehullene som bores foran stuff. Borehullene overlapper hverandre, og derfor blir sprekkeforløpet for hele traséen kartlagt (Finnøy, 2017). I sensitive områder er det krav om minst to overlappende sondeborehull

(Cuda og Moizo, 2017). I tillegg kartlegges tverrforbindelsene med Q-metoden. Dette gjøres for å bestemme sikring i tverrforbindelsene (Finnøy, 2017).

3.4 Oversikt over Follobanetraséen

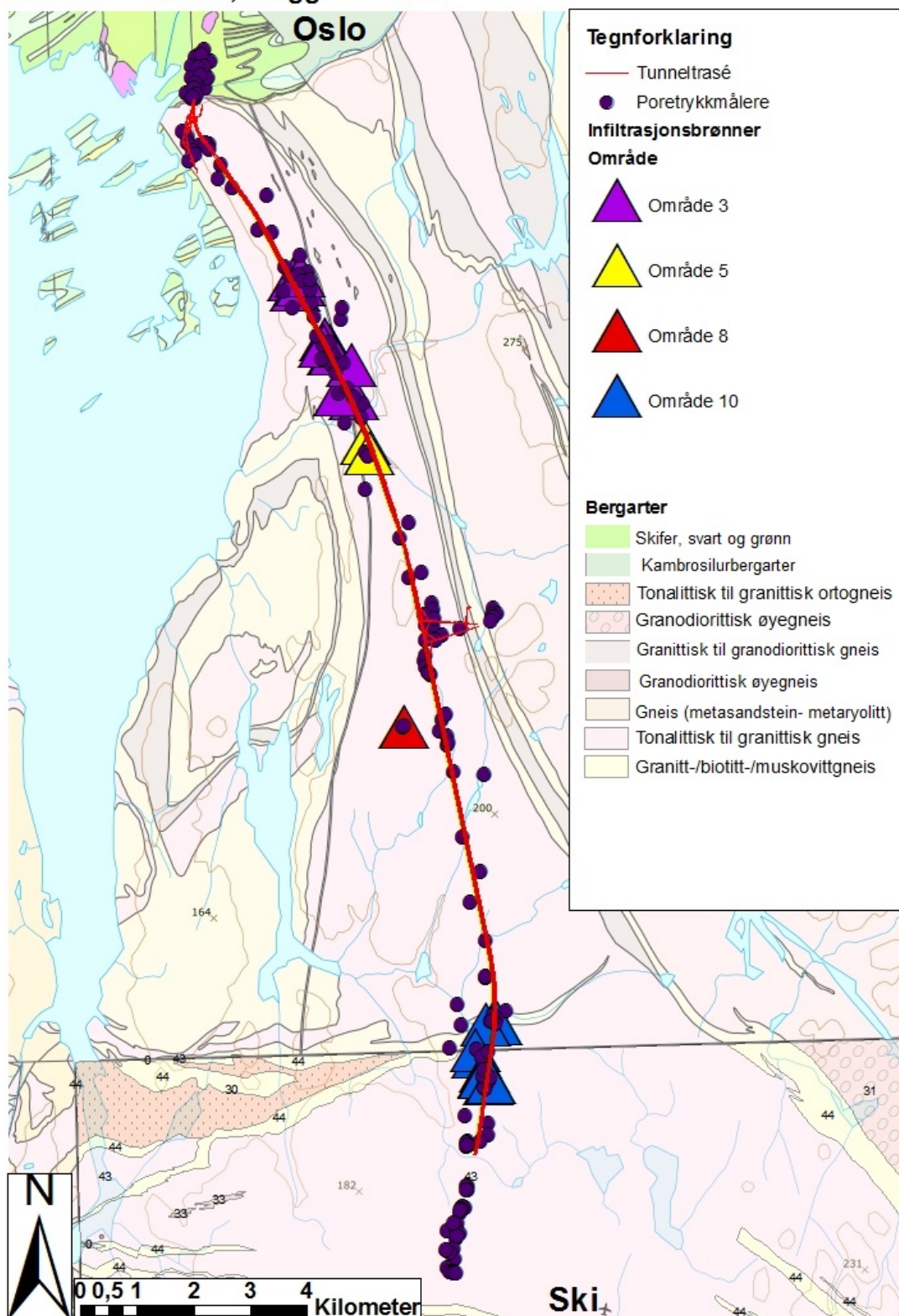
Figur 18 viser tunnelboremaskinenes fremdrift. TBM-ene Eufemia og Ellisiv borer mot Oslo S fra Åsland, mens Anna og Magda borer mot Ski. Tabell 2 og figur 16 viser hvilke meter i tunnelen som er i hvilke områder.



Figur 18. Fremdrift for hver TBM. Åsland ligger omtrent på km. 12. Lavere meter mot Oslo, høyere mot Ski.

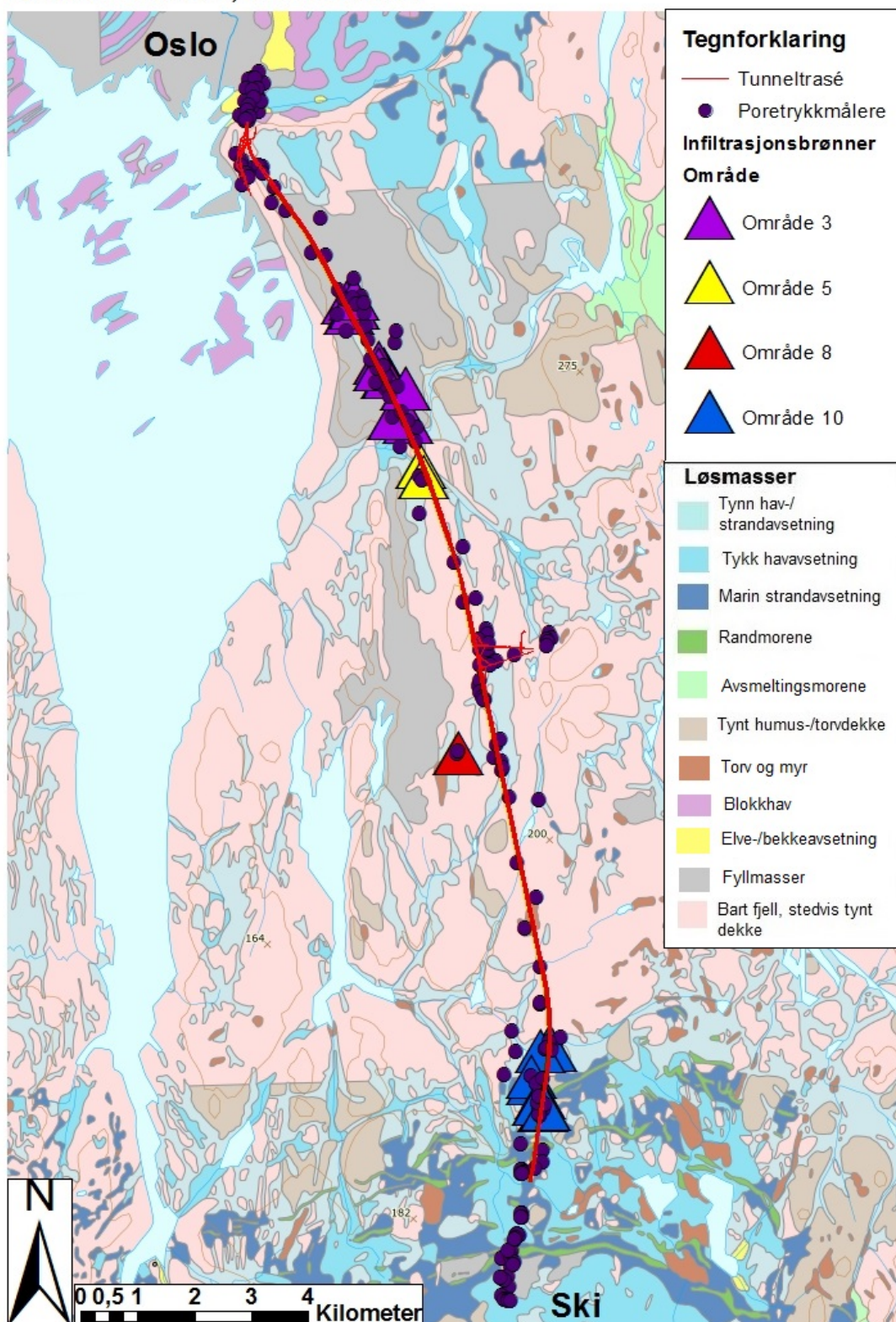
Figur 19 viser et berggrunnskart over Follobanetraséen, og inkluderer poretrykkmålere og infiltrasjonsbrønner. Figur 20 viser løsmassekart over området. Bakgrunnskartene er hentet fra NGUs kartdatabase, og koordinatene er mottatt fra Bane NOR.

Follobanetraséen, berggrunnskart



Figur 19. Berggrunnskart over Follobanetraséen, med tunneltrasé, poretrykkmålere og infiltrasjonsbrønner. Berggrunnskart fra NGU (Berggrunn N50: <http://geo.ngu.no/mapserver/BerggrunnN50WMS>).

Follobanetraséen, løsmassekart



Figur 20. Løsmassekart over Follobanetraséen, med infiltrasjonsbrønner, tunneltrasé samt poretrykkmålere. Løsmassekart fra NGU (Løsmasser: <http://geo.ngu.no/maps/GeoServer/LosmasserWMS>).

3.5 Follobanens områdeinndeling etter sensitivitet

Basert på løsmassetykkelse, forbindelser mellom løsmasser, svakhetssoner og bygninger, samt innsjøer og elver på overflaten, er tunneltraséen delt inn etter fire sensitivitetsnivåer (tabell 1). Områdene hvor setninger kan føre til stor skade på bygninger eller områder hvor det risikeres drenering av tjern har blitt karakterisert som svært sensitive. Dette gjelder steder hvor det er kartlagt store svakhetssoner og bygg er fundamentert på tykke avsetninger av løsmasser eller delvis på løsmasser og delvis på fjell. Dette er det høyeste nivået for sensitivitet langs traséen og forekommer i 1,7 km av tunnelen, ved Ramstad. Nordstrandsplataet og Snipetjern er merket som sensitivt (AGJV, 2016).

Tabell 1. Oversikt over krav til de ulike sensitivitetskategoriene som benyttes på Follobanen (Oversatt til norsk fra Goljoh og Graeli, 2014b).

OMRÅDE- KLASSIFISERING	Bygninger og infrastruktur over tunnelen	Naturområder over tunnelen
Lite sensitivt	Bygninger og infrastruktur er hovedsakelig fundamentert på fjell Få og tynne og løsmasseavsetninger Svært lavt grunnvannsnivå	Ingen torv og myr eller vannavhengig vegetasjon God vanntilførsel Svært lavt grunnvannsnivå
Moderat sensitivt	Bygninger og infrastruktur er hovedsakelig fundamentert på løsmasser med under 5 meter tykkelse	Ingen torv og myr Noe vannavhengig vegetasjon
Sensitivt	Varierende dybde til fjell Bygninger er fundamentert på løsmasser med tykkelse over 5 meter	Torv og myr Små innsjøer Vannavhengig vegetasjon Viktig rekreasjonsområde
Svært sensitivt	Store variasjoner i dybde til fjell over små avstander Bygninger fundamentert delvis på fjell og delvis på løsmasser Bygninger fundamentert på løsmasser med tykkelse over 10 meter Store svakhetssoner	<i>Ikke relevant</i>

Løsmassetykkelse over 5 meter, strukturelle svakheter i berget samt kommunikasjon mellom disse, bygninger og naturområder har påvirket sensitivitetsnivået til hvert område (AGJV, 2016). Tabell 2 viser områdeinndelingen. I de følgende underkapitlene beskrives de 11 sensitivitetsområdene tunneltraséen er delt inn i. De to områdene som studeres nærmere i masteroppgaven, Nordstrand og Snipetjern, presenteres grundigere i kapittel 3.6 og 3.7. Kartene er laget av forfatter i ArcGIS ArcMap (versjon 10.3), med bakgrunnskart fra NGU. På kartene er det markert datoer i rødt langs tunneltraséen. Disse viser TBM-enes progresjon.

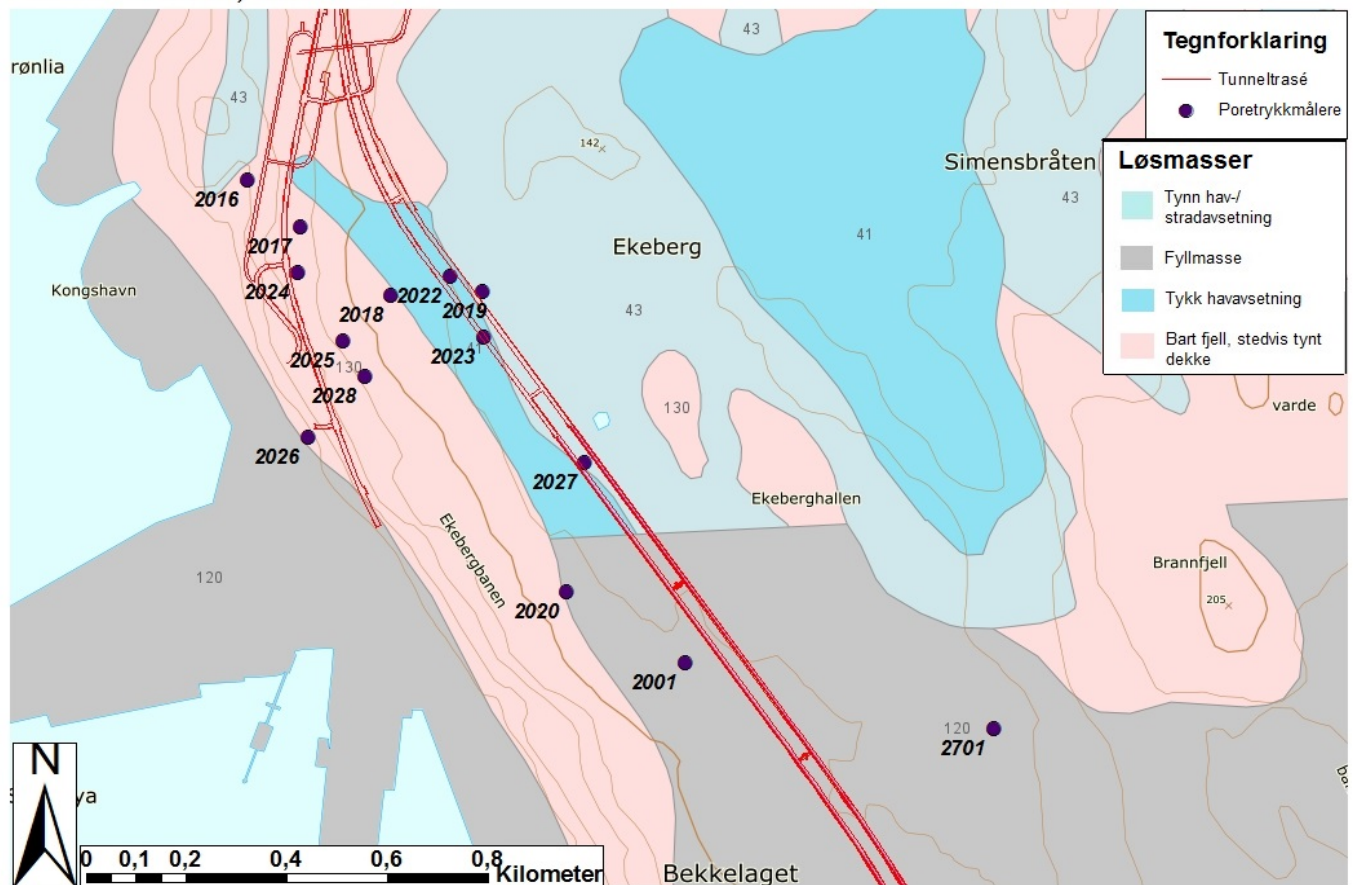
Tabell 2. Områdeinndelingen av tunneltraséen, ut i fra sensitivitetsnivå (Oversatt til norsk fra Cuda og Moizo, 2017).

Område	km av tunnelen	Sted	Områdeklassifisering
1	2,3-4,0	Ekeberg (til Holtet)	Lite sensitivt
2	4,0 - 5,0	Holtet - Lambertseter	Moderat sensitivt
3	5,0 - 7,8	Nordstrandsplataet	Sensitivt
4	7,8 - 8,5	Ljanselva - Gjersrudbekken	Lite sensitivt
5	8,5 - 9,0	Bjørnerud	Moderat sensitivt
6	9,0 - 11,2	Grønliåsen nord	Lite sensitivt
7	11,2 - 12,0	Grønliåsen	Moderat sensitivt
8	12,0 - 15,7	Snipetjern - Assurdalen	Sensitivt
9	15,7 - 18,9	Assurdalen - Sloraveien	Moderat sensitivt
10	18,9 - 20,6	Sloraveien - Ramstad	Svært sensitivt
11	20,6 - 21,3	Ramstad - Langhus	Moderat sensitivt

3.5.1 Område 1 – km. 2,3 til 4,0

Område 1 er betraktet som lite sensitivt, og ingen infiltrasjonsbrønner er etablert (Cuda og Moizo, 2017). Figur 21 viser løsmassekart over område 1.

Follobanetraséen, område 1

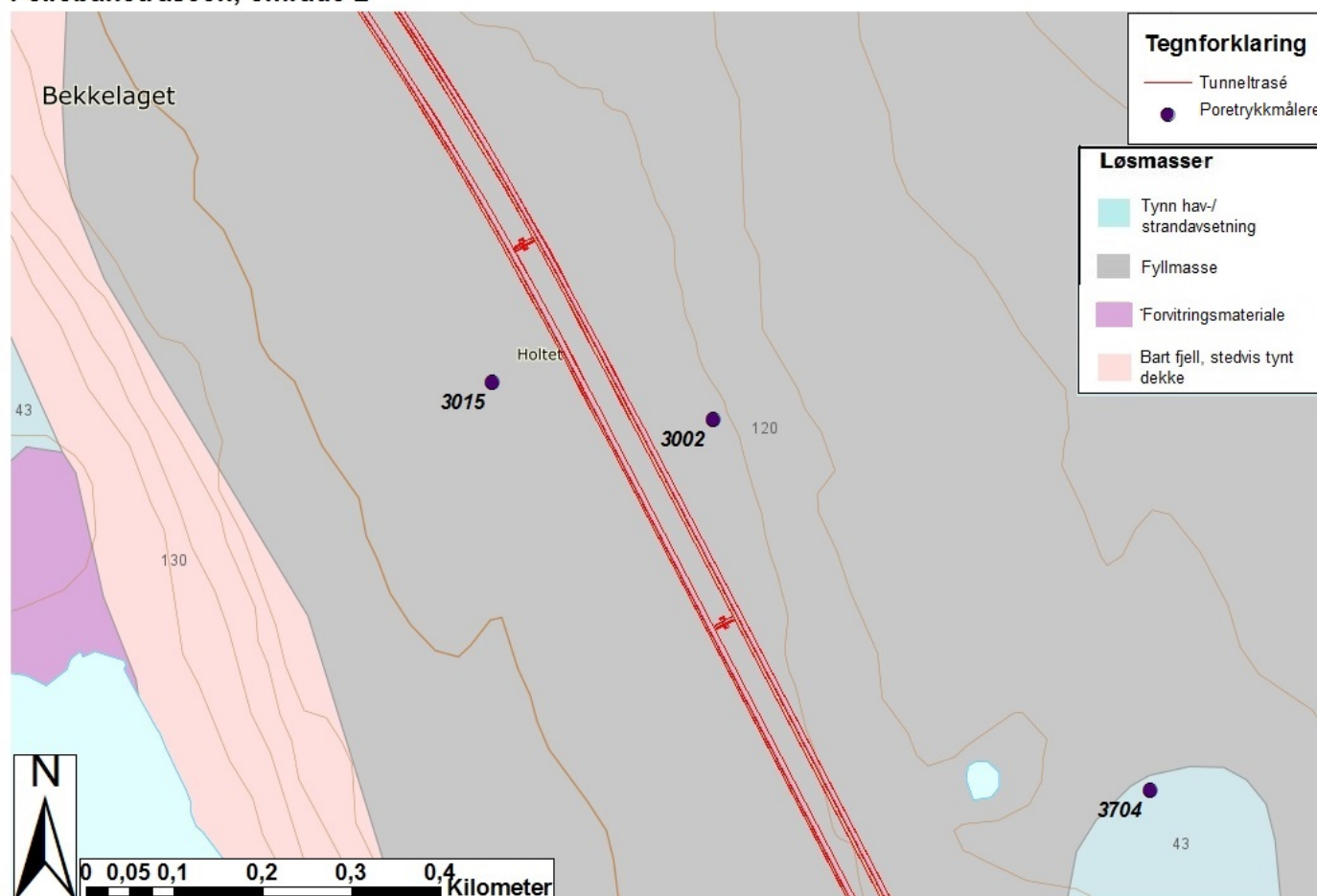


Figur 21. Løsmassekart over sensitivetsområde 1. Ingen infiltrasjonsbrønner befinner seg i området.

3.5.2 Område 2 – km. 4,0 til 5,0

Moderat sensitivt område. Ingen infiltrasjonsbrønner er etablert. Tre poretrykkmålere ligger i området, nr. 3015, 3002 og 3704 (Cuda og Moizo, 2017). Figur 22 viser kart og løsmassekart over område 2.

Follobanetraséen, område 2



Figur 22. Løsmassekart over område 2, med tunneltrasé og poretrykkmålere. Ingen infiltrasjonsbrønner er etablert i området.

3.5.3 Område 3 – km. 5,0 til 7,8

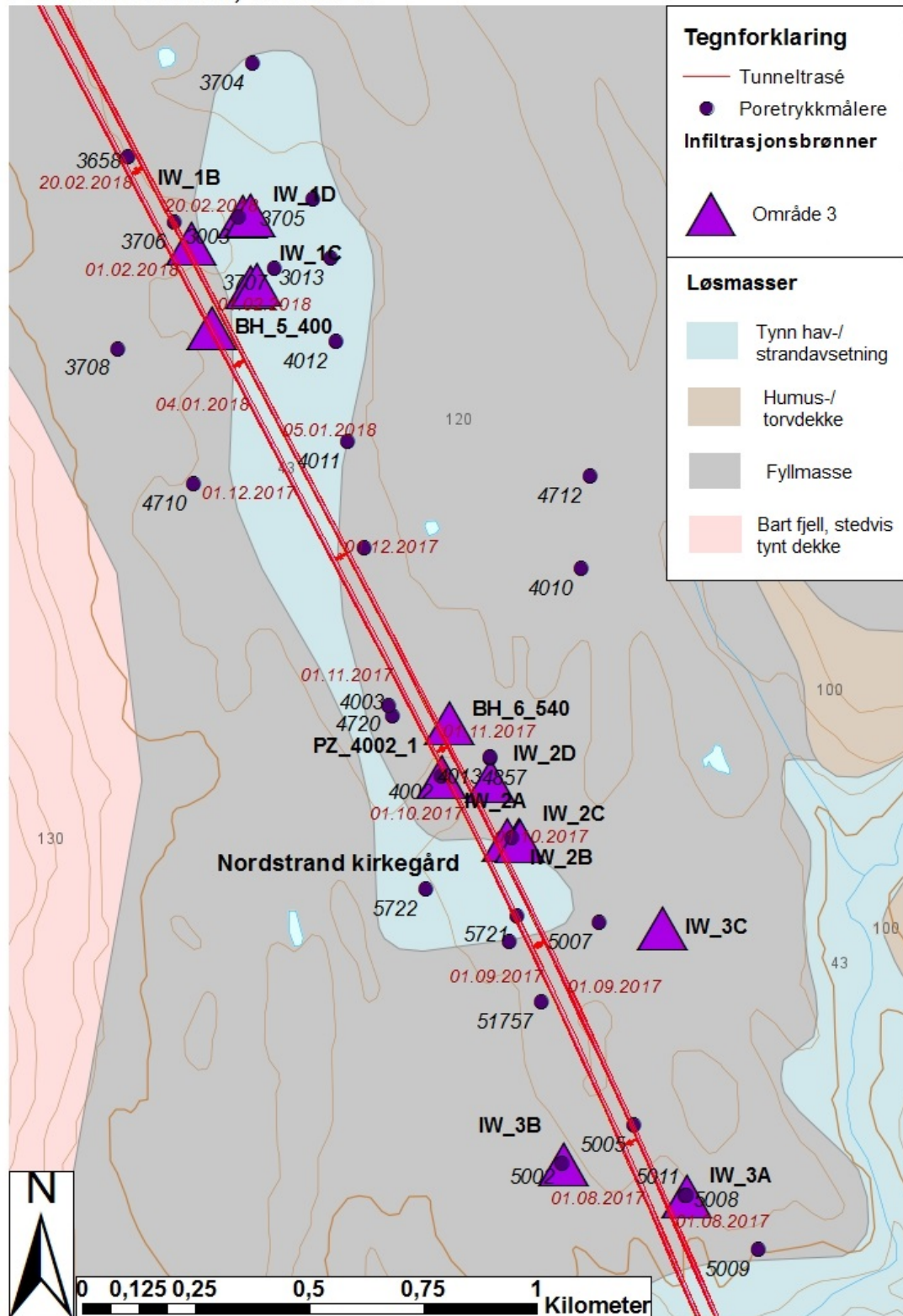
I område 3 ligger Nordstrandsplatået, som betegnes som sensitivt. Flere infiltrasjonsbrønner er etablert i området: 1A, 1B, 1C, 1D, BH 5+400, 2A, 2B, 2C, 2D, 2E (BH 6+540), 3A, 3B, 3C, og PZ 4002-1. I område 3 er det satt krav til at eventuelle setninger ikke skal overstige 10 mm. I områder uten bygninger aksepteres det setninger opp til 30 mm (Ånensen, 2012).

Ved Kastellet skole, der infiltrasjonsbrønnene 1A, 1B, 1C, 1D og BH 5+400 befinner seg, er det mange bygninger. Forundersøkelsene viste at store deler består av tynt løsmassedekke med bergblotninger, mens det finnes løsmasser med tykkelse opp til 5 meter enkelte steder. Dette viste seg og stort sett være leire og hard leire med noe stein. Det er svakhetssoner i området som går tilnærmet parallelt med tunneltraséen. Av disse grunner ble det besluttet å etablere to infiltrasjonsbrønner på stedet (AGJV, 2016). Senere har det blitt etablert flere, fordi det ble sett at det var nødvendig. Noen borehull, som i utgangspunktet ble brukt for forundersøkelser, har blitt benyttet til vanninfiltrasjon i kortere perioder (Grøndal, 2018).

Infiltrasjonsbrønnene 2A, 2B, 2C, 2D, 2E (6+540) og 3C ligger ved Nordstrand kirkegård, hvor det også er mange hus og bygninger. Det ble funnet leiravsetninger med opp til 12 meter tykkelse. På grunn av to svakhetssoner i retning N-S og én i Ø-V som ble antatt å treffe tunnelen, ble det besluttet å etablere infiltrasjonsbrønner i området (AGJV, 2016). Dette området presenteres grundigere i kapittel 3.6.

Infiltrasjonsbrønnene 3A og 3B er plassert nær Ljanselva. De fleste husene i området er fundamentert på fjell, men på grunn av god kontakt mellom svakhetssoner, elva og løsmassene i området ble det besluttet å anlegge infiltrasjonsbrønner. Infiltrasjonsbrønnene er plassert i nærheten av soner som har løsmassetykkelse over fem meter (AGJV, 2016). Figur 23 viser oversiktskart over område 3.

Follobanetraséen, område 3

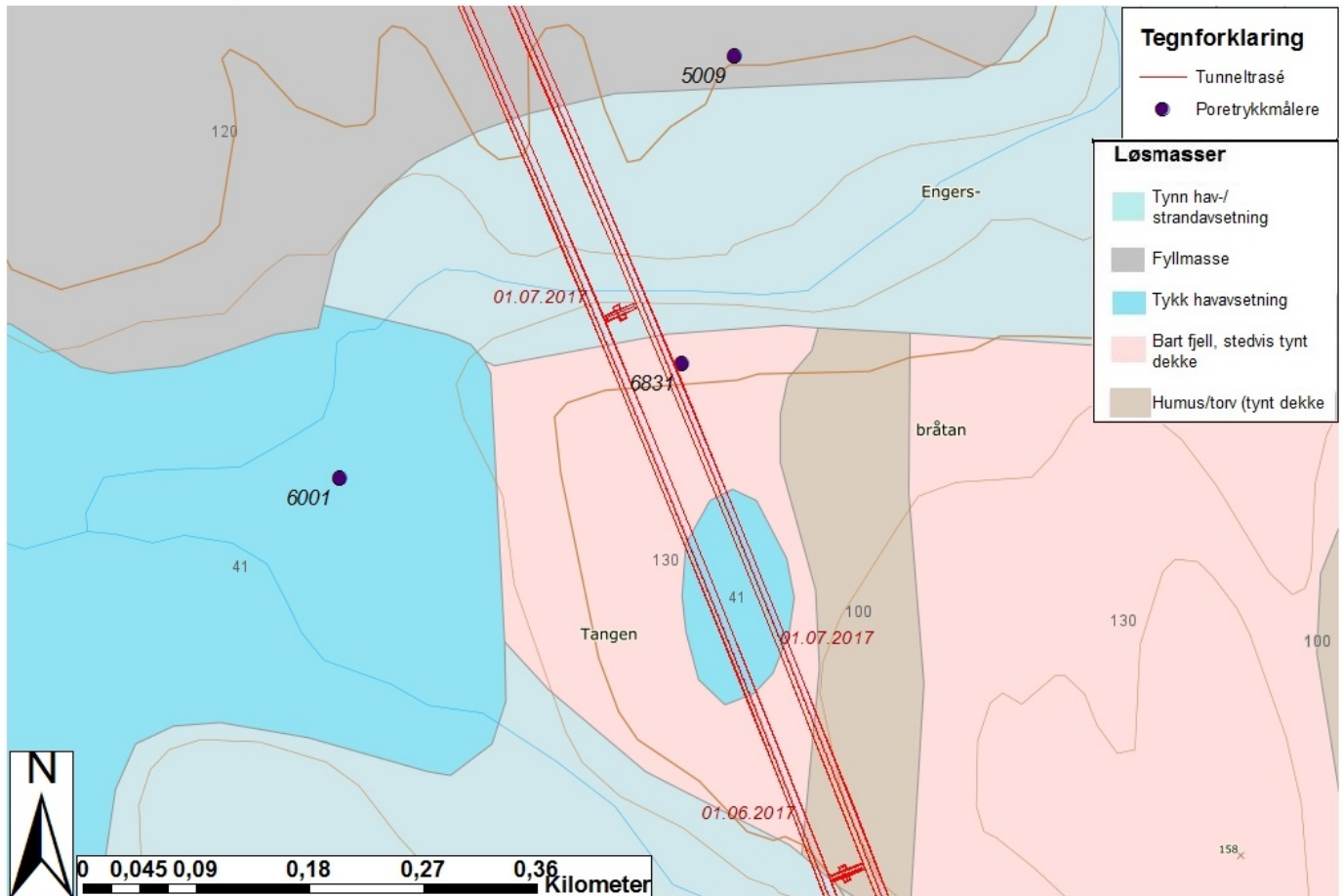


Figur 23. Oversiktskart med løsmassefordeling over område 3.

3.5.4 Område 4 – km. 7,8 til 8,5

I område 4 befinner det seg få bygninger, og under forundersøkelsene ble det ikke funnet løsmasser med tykkelse over fem meter. Imidlertid er det to svakhetssoner med strøk N-S som antas å treffe tunnelene omtrent ved km. 7,85. På grunn av faren for å drenere Ljanselva gjennom svakhetssonene er det viktig å få tunnelene tette. Området betegnes som lite sensitivt (AGJV, 2016). Figur 24 viser oversiktskart over område 4.

Follobanetraséen, område 4

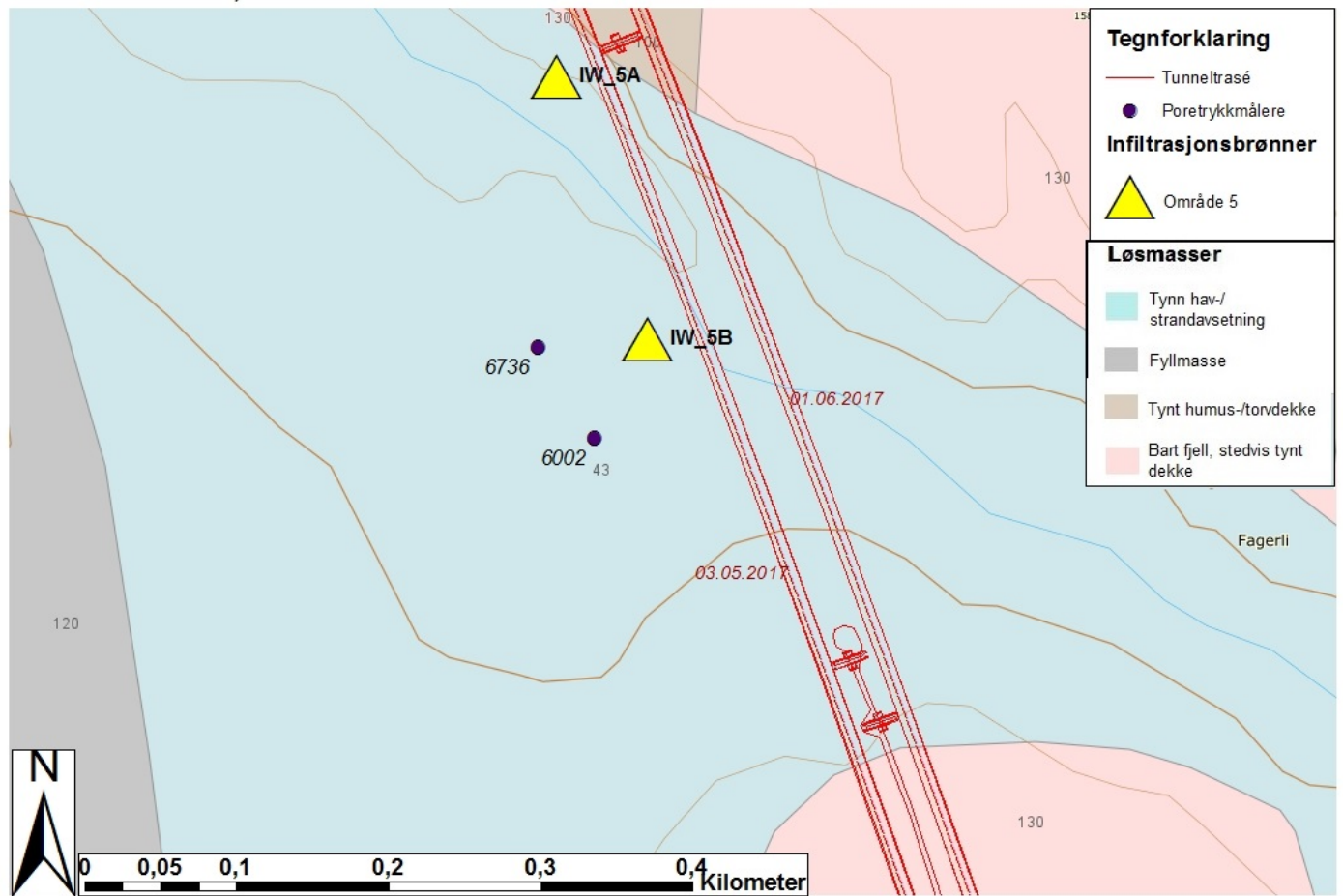


Figur 24. Løsmassekart som viser område 4, inkludert tunneltrasé og poretrykkmålere.

3.5.5 Område 5 – km. 8,5 til 9,0

I område 5 befinner det seg industribygg som kan være fundamentert på løsmasser. Et område som strekker seg over 40 000 m² består av løsmassedekker på 5-10 m. Løsmassene er leirig materiale, med noe grus og morene. En svakhetszone med strøk NV-SØ antas å treffe tunnelene omtrent på km. 8,6. Det ble besluttet å etablere infiltrasjonsbrønner for å hindre setninger samt drenering av elva i nærheten. Området betegnes som moderat sensitivt (AGJV, 2016). Figur 25 viser oversiktskart over område 5.

Follobanetraséen, område 5

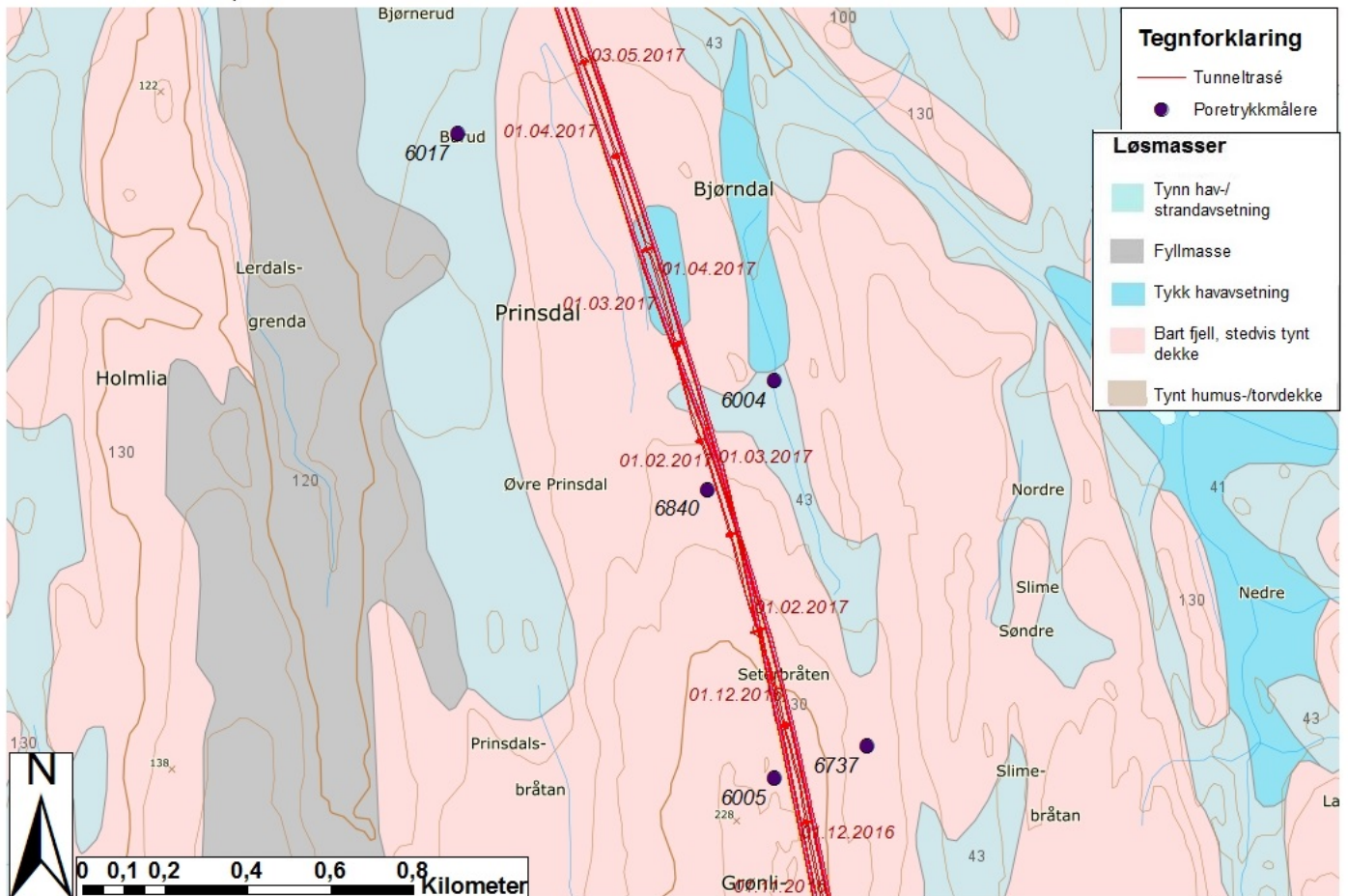


Figur 25. Løsmassekart over område 5, med infiltrasjonsbrønner, poretrykkmålere samt tunneltrasé.

3.5.6 Område 6 – km. 9,0 til 11,2

Område 6 er betraktet som lite sensitivt. Derfor finnes det ingen infiltrasjonsbrønner i området (Cuda og Moizo, 2017). Figur 26 viser oversiktskart over område 6.

Follobanetraséen, område 6

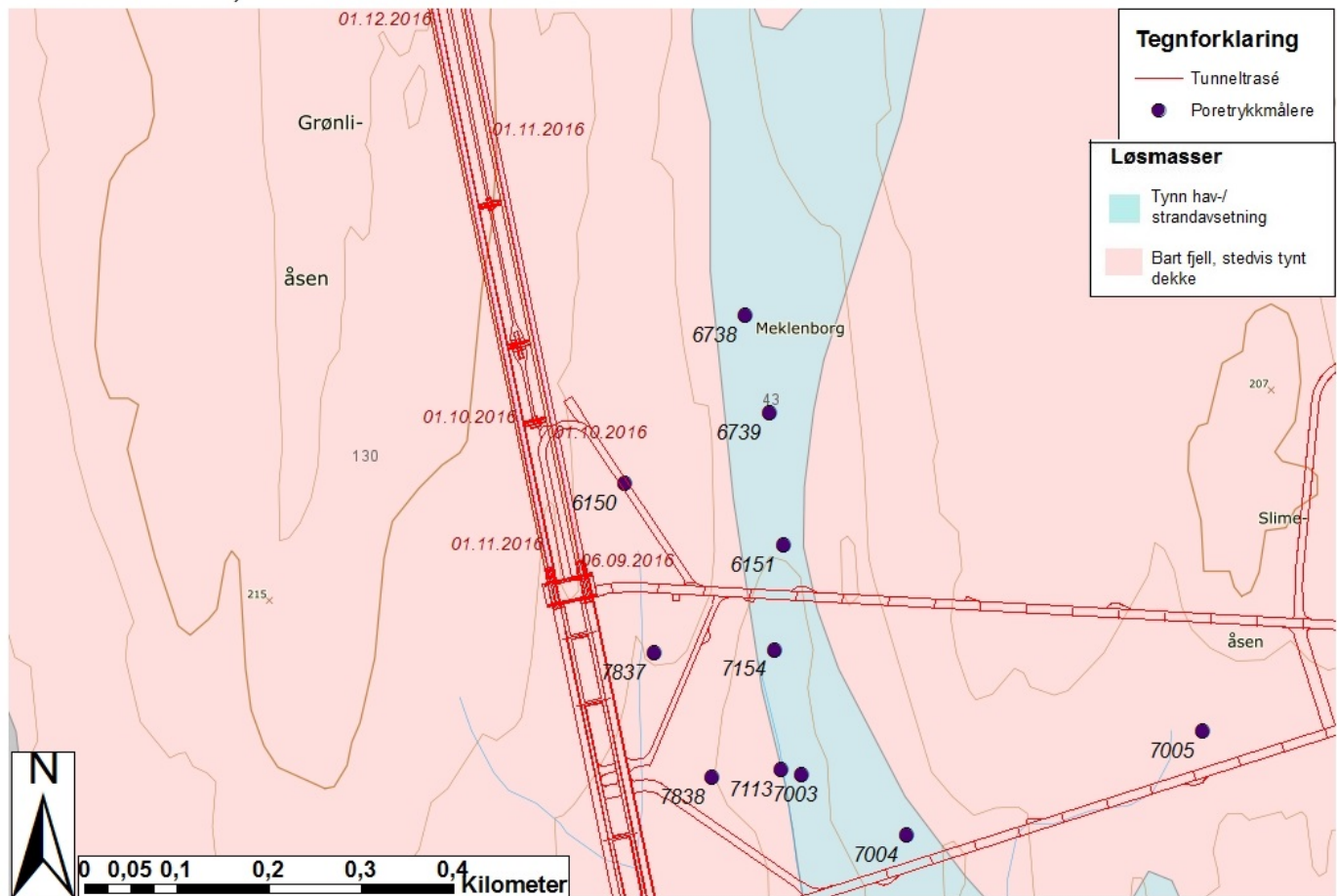


Figur 26. Løsmassekart over område 6, med tunneltrasé og poretrykkmålere.

3.5.7 Område 7 – km. 11,2 til 12,0

Område 7 betraktes som moderat sensitivt, og ingen infiltrasjonsbrønner er plassert her (Cuda og Moizo, 2017). Figur 27 viser oversiktskart over område 7.

Follobanetraséen, område 7



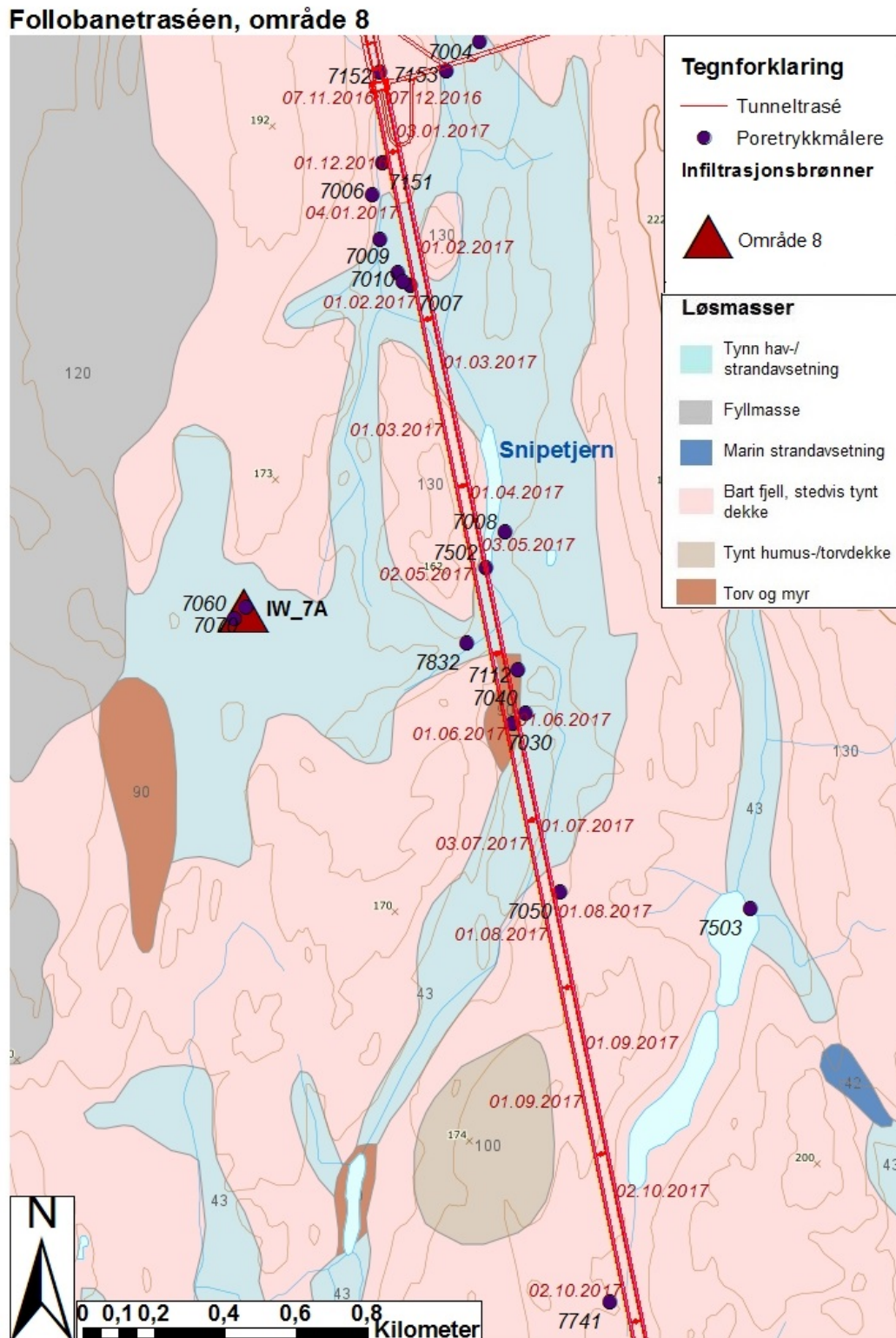
Figur 27. Løsmassekart med poretrykkmålere og tunneltrasé, område 7. Tunnelene østover går mot anleggsområdet på Åsland.

3.5.8 Område 8 – km. 12,0 til 15,7

I sonen ligger tjernet Snipetjern, som betraktes som miljøsensitivt. Det er ingen bygninger i området, men løsmassene, bestående av leire, har tykkelser opp til 18 meter. Det ble funnet svakhetssoner NNS-SSV og N-S ved hjelp av geofysiske kartleggingsmetoder, som antas å treffe tunnelen på km. 12,7-12,8. Faren i dette området er drenering av Snipetjern og myrene omkring gjennom svakhetssonene. På grunn av beliggenheten langt fra det offentlige drikkevannsnett er det ikke etablert infiltrasjonsbrønner ved Snipetjern. Poretrykket overvåkes likevel nøye, og det er svært viktig at tunnelene blir tette (AGJV, 2016). Området ved Snipetjern presenteres grundigere i kapittel 3.7.

Assurdalen følger en svakhetsone med strøk N-S/NNØ-SSV, som tunnelene går gjennom.

Svakhetssonen er i kontakt med innsjøen Assuren, og det er dermed fare for å drenere innsjøen gjennom svakhetssonen. Ingen infiltrasjonsbrønner er etablert, men viktigheten av tette tunneler er betydelig (AGJV, 2016). Figur 28 viser oversiktskart over området.



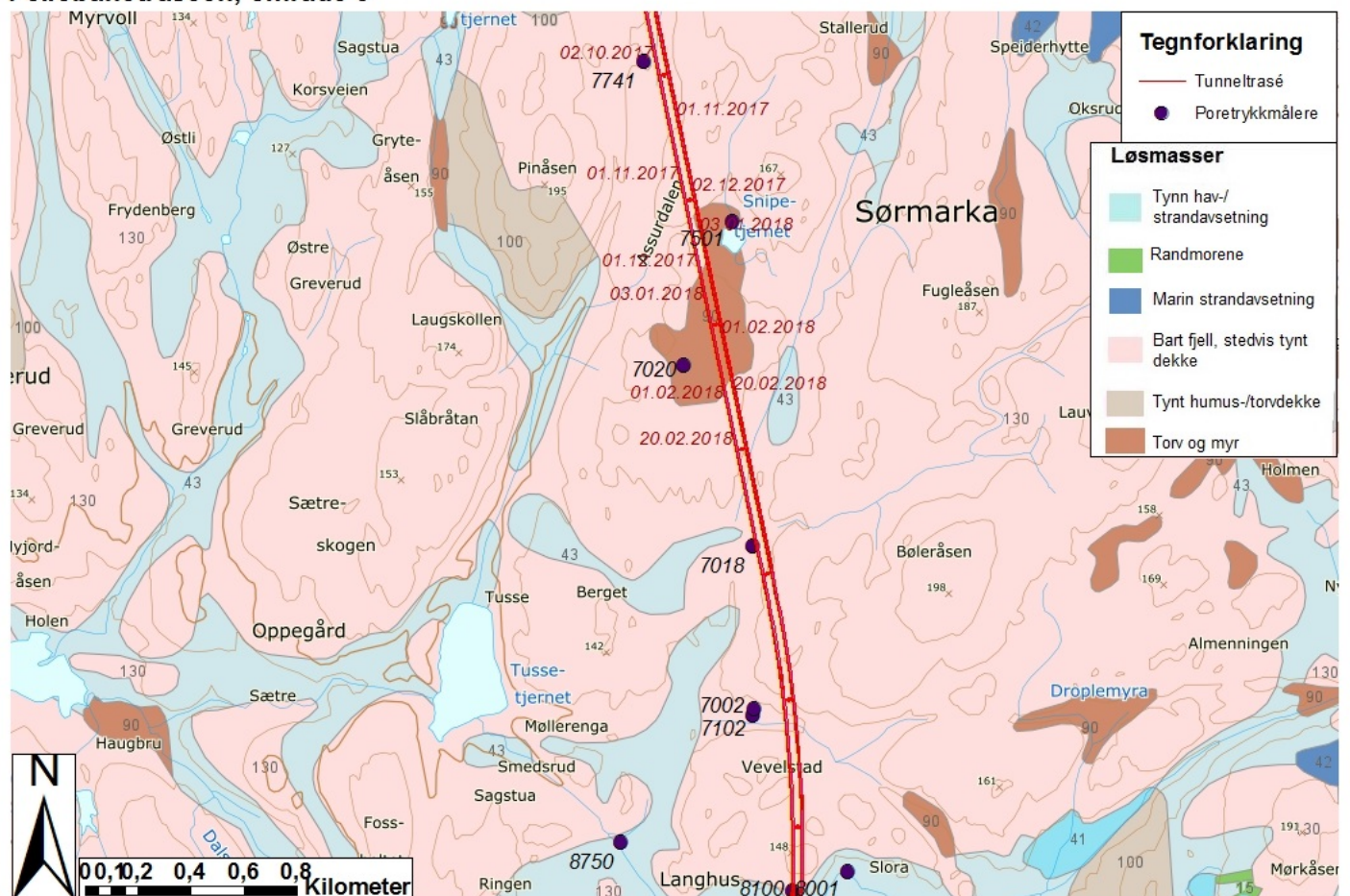
Figur 28. Løsmassekart over område 8, med Snipetjern lokalisert omtrent midt på.

Infiltrasjonsbrønn 7A ble etablert etter at det ble rapportert om en tørr privat brønn ved Sofiemyr. Det antas at det befinner seg en svakhetsone med forbindelse fra Sofiemyr til tunneltraséen (Grøndal, 2018). Infiltrasjonsbrønnen befinner seg omtrent 600 meter fra tunnelen.

3.5.9 Område 9 – km. 15,7 til 18,9

Moderat sensitivt område. Et område på 100 m x 150 m består av løsmasser med over 5 meter tykkelse, og løsmassene er i kontakt med svakhetssoner. Fordi ingen bygg er fundamentert på løsmasser antas det at skadene ved en eventuell senkning av poretrykk vil være små. Det er derfor ikke etablert infiltrasjonsbrønner i område 9 (AGJV, 2016). Oversiktskart over området er gitt i figur 29.

Follobanetraséen, område 9

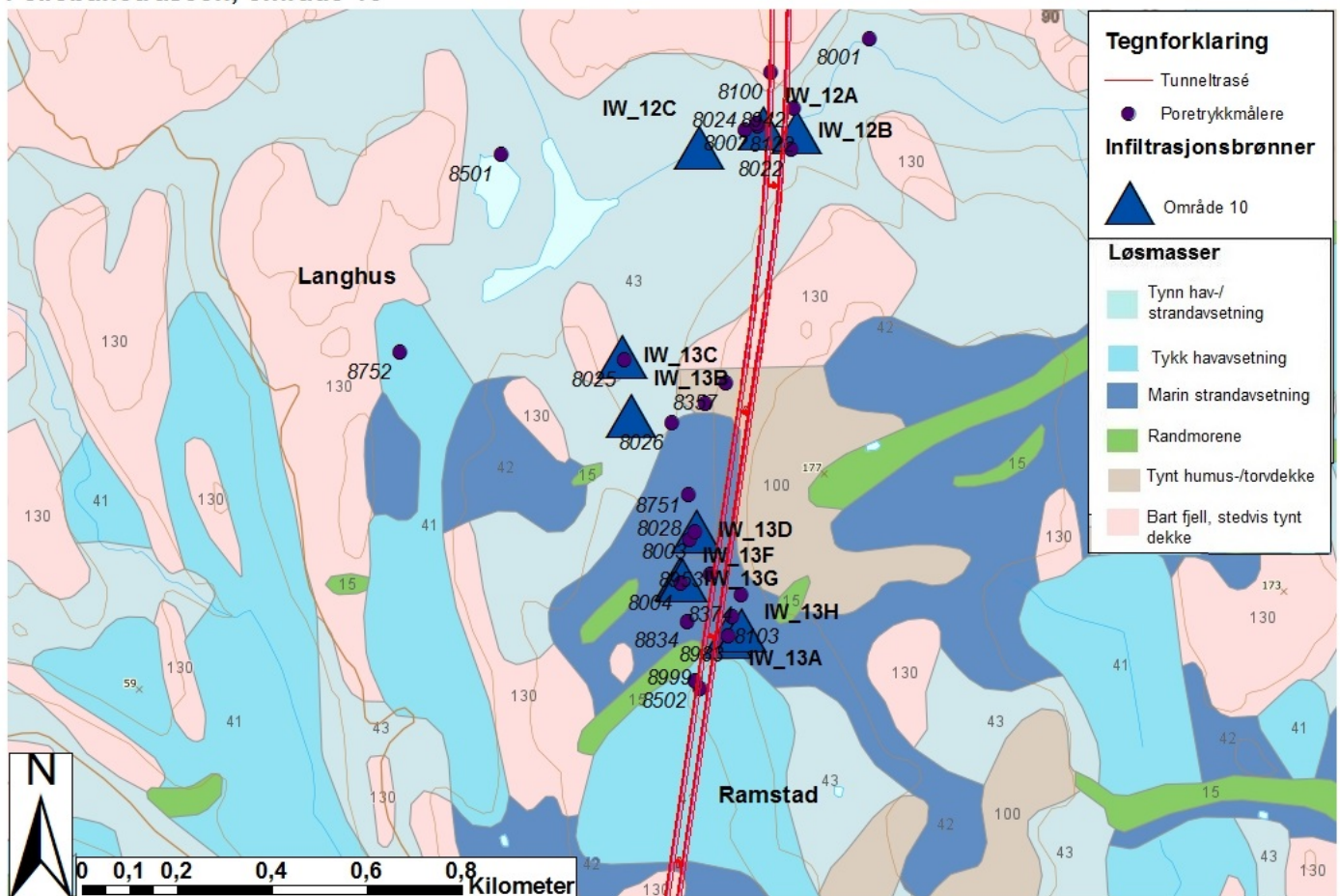


Figur 29. Løsmassekart over område 9, med tunneltrasé og poretrykkmålere.

3.5.10 Område 10 – km. 18,9 til 20,6

Sloraveien – Ramstad er definert som det mest sensitive området langs hele Follobanetraséen. En liten dal strekker seg langs en svakhetssone NNV-SSØ, og her finnes det løsmasseavsetninger med opp til 15 meter tykkelse. Undersøkelser har vist at det hovedsakelig er leirmateriale øverst, og leirig sand lenger ned mot fjell. Noen steder finnes det et opp til 10 meter tykt sand-/gruslag mellom leira og fjellet. Det er mange hus i sonen, hvor flere er fundamentert på løsmasser. Det er antatt at svakhetssonen treffer tunnelen på km. 19,95. Infiltrasjonsbrønnene 12A, 12B, 12C, 13A, 13B, 13C, 13D, 13E, 13F, 13G og 13H er plassert i dette svært sensitive området (AGJV, 2016). Oversiktskart over området er gitt i figur 30.

Follobanetraséen, område 10

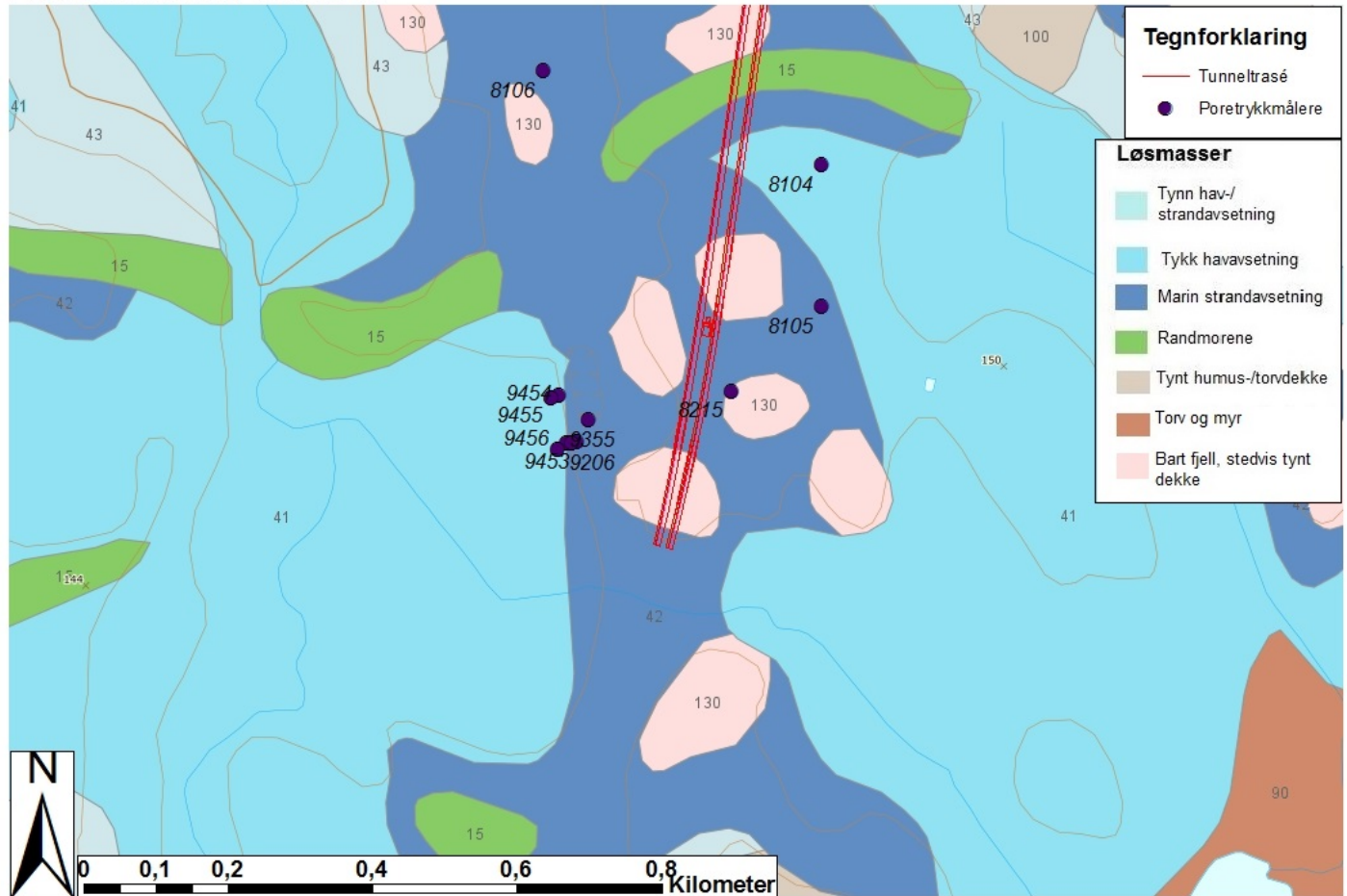


Figur 30. Løsmassekart for område 10, inkludert tunneltrasé, poretrykkmålere og infiltrasjonsbrønner.

3.5.11 Område 11 – km. 20,6 til 21,3

Nærmest stasjonsområdet på Ski er sensitivetsgraden definert som moderat. Infiltrasjonsbrønner er ikke sett på som nødvendig (Cuda og Moizo, 2017). Figur 31 viser oversiktskart over område 11.

Follobanetraséen, område 11

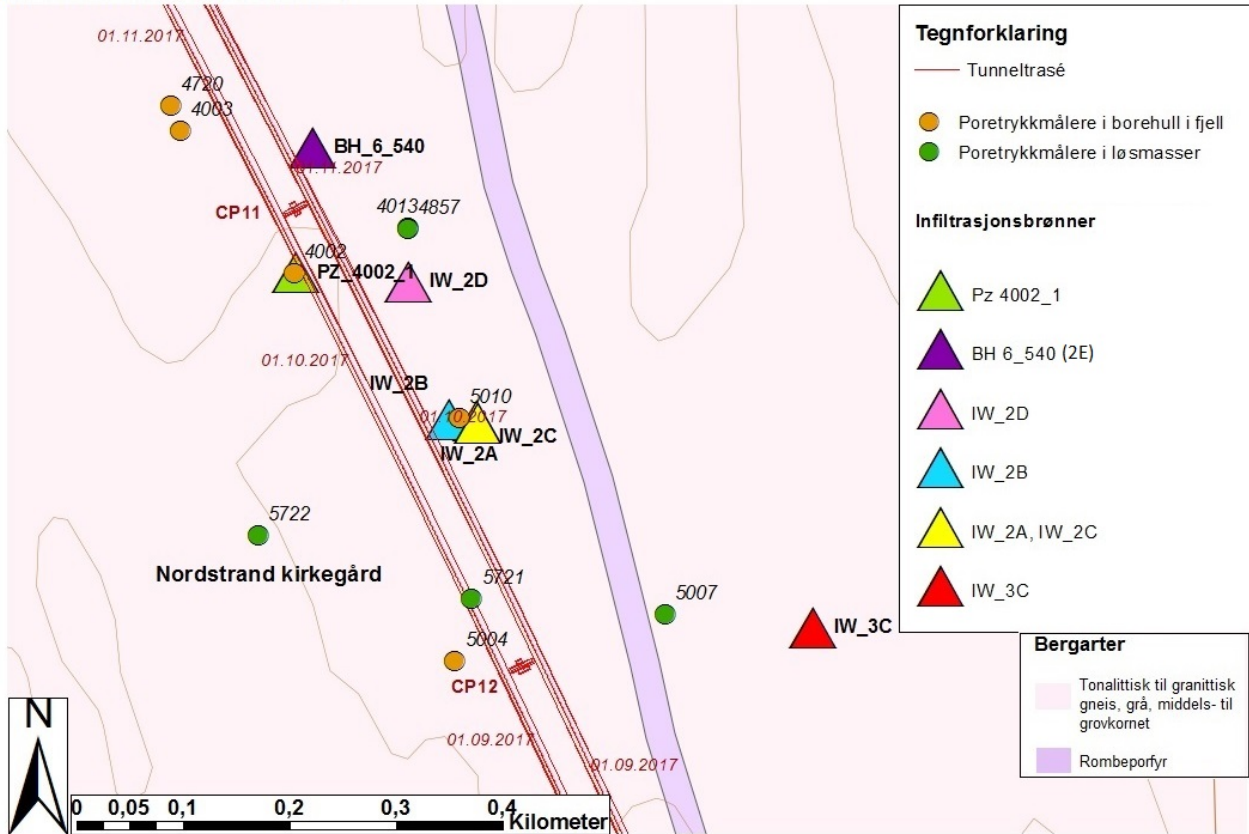


Figur 31. Løsmassekart over område 11, med tunneltrasé og poretrykkmålere.

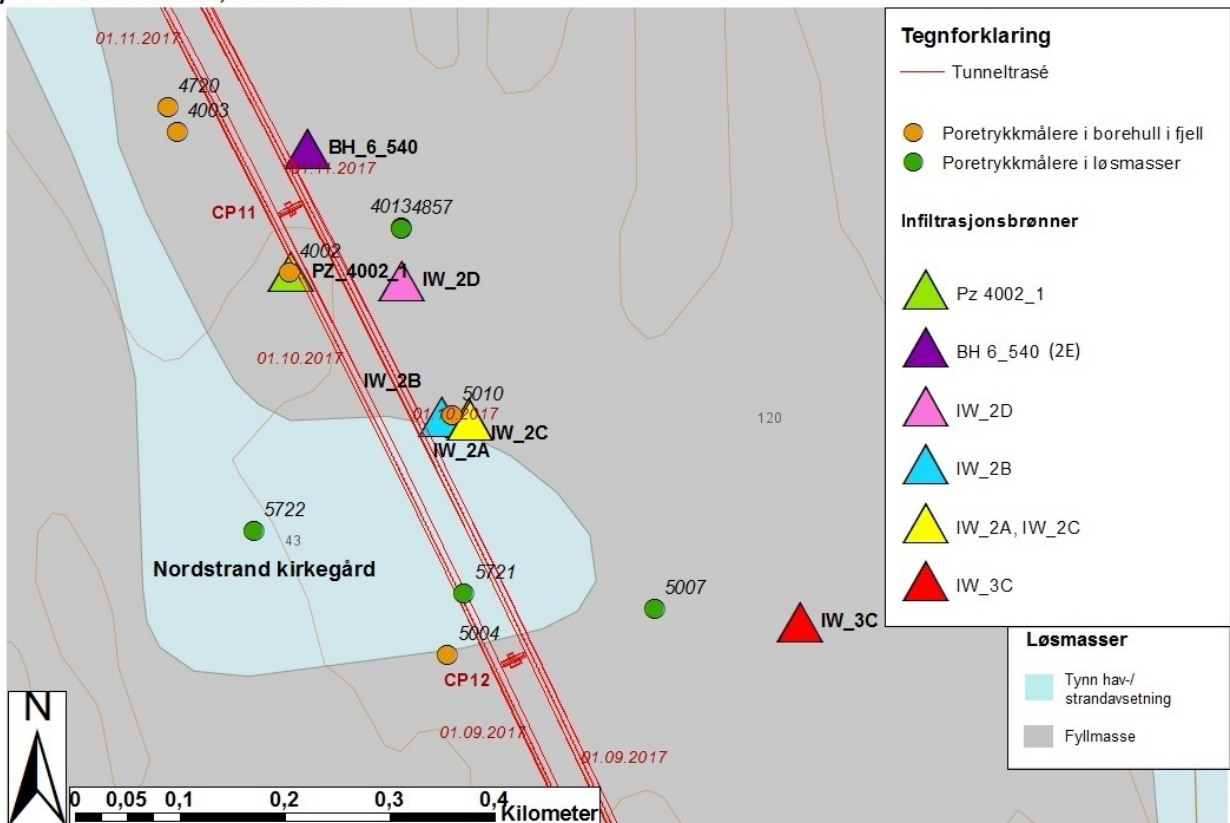
3.6 Det studerte Nordstrandsområdet

Nordstrandsplataet, km. 5,0 til 7,8, strekker seg fra Ekebergåsen til Ljanselva. Terrengnivået ligger på 120 til 140 moh. (Ånensen, 2012). En del av dette området er benyttet spesielt i studien. Figur 32 viser oversiktskart over dette området, som befinner seg ved Nordstrand kirkegård. CP-ene markert på kartene er tverrforbindelser mellom de to tunnellopene. Henvisninger til Nordstrand senere i masteroppgaven gjelder dette området.

a) Follobanetraséen, område 3

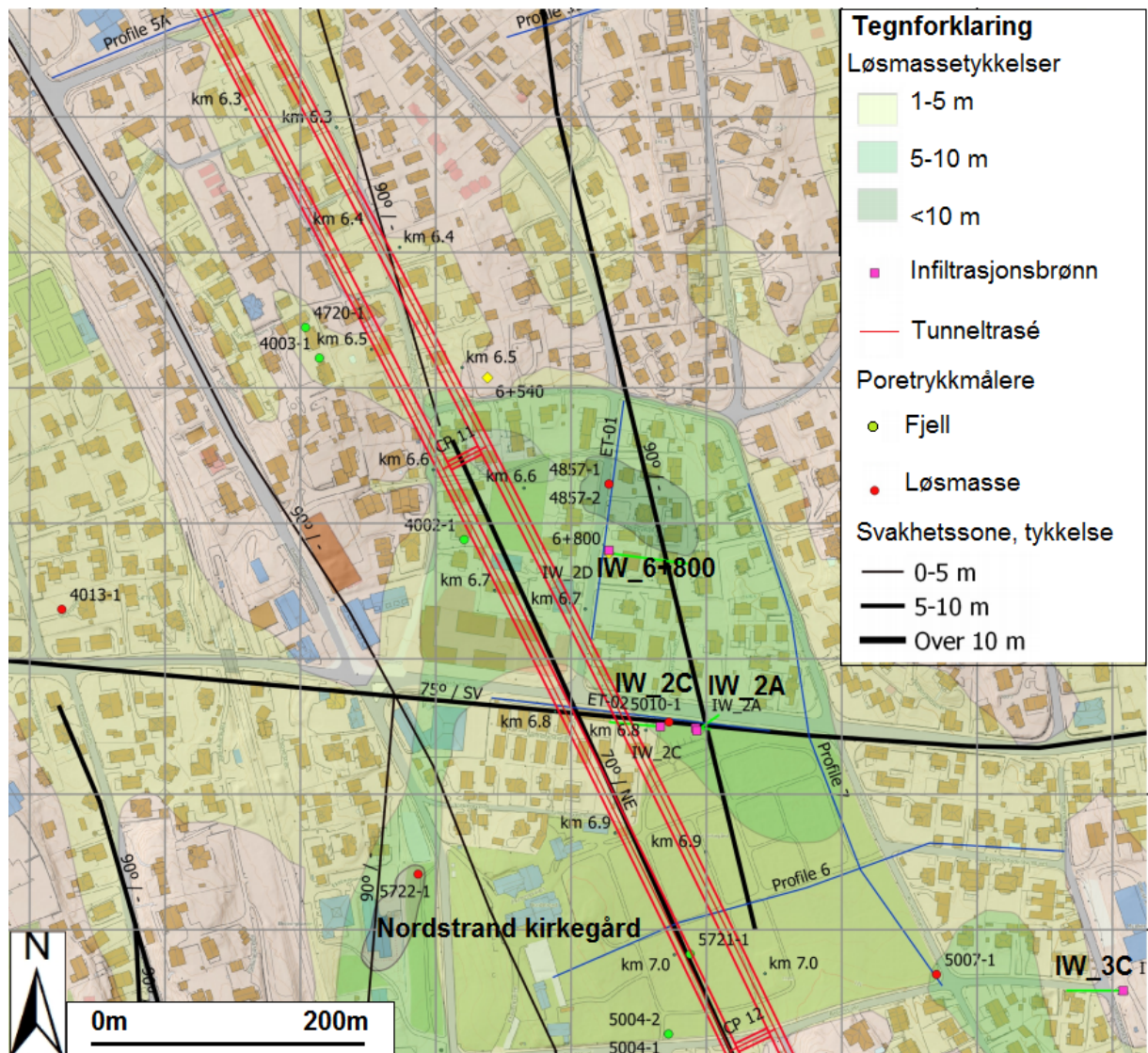


b) Follobanetraséen, område 3



Figur 32. Det studerte området på Nordstrand. Inkluderer tunneltrasé med tverrforbindelser, infiltrasjonsbrønner og poretrykkmålere. a) Berggrunnskart. b) Løsmassekart.

Figur 33 viser løsmassetykkelser i det samme området.

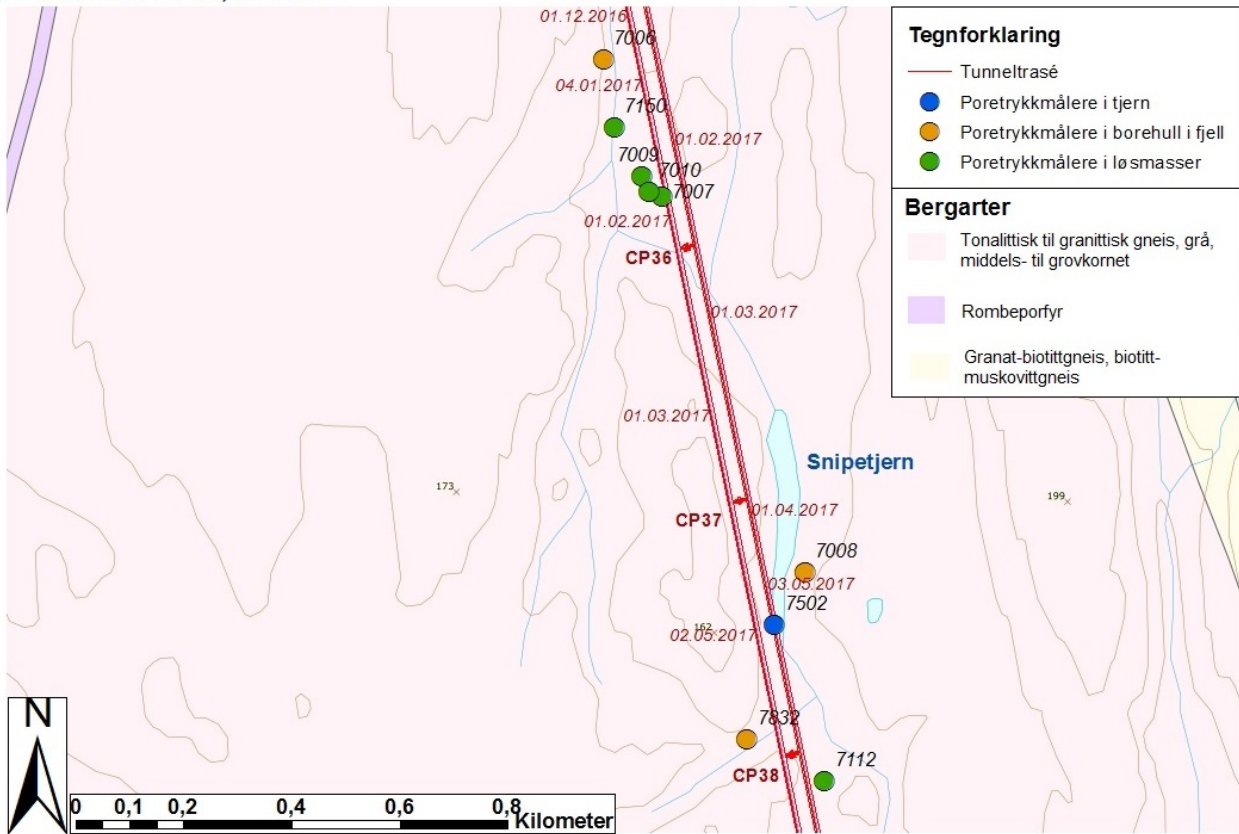


Figur 33. Kart over det studerte området på Nordstrand, med løsmassetykkelser og svakhetssoner. Kart fra Bane NOR, noe modifisert.

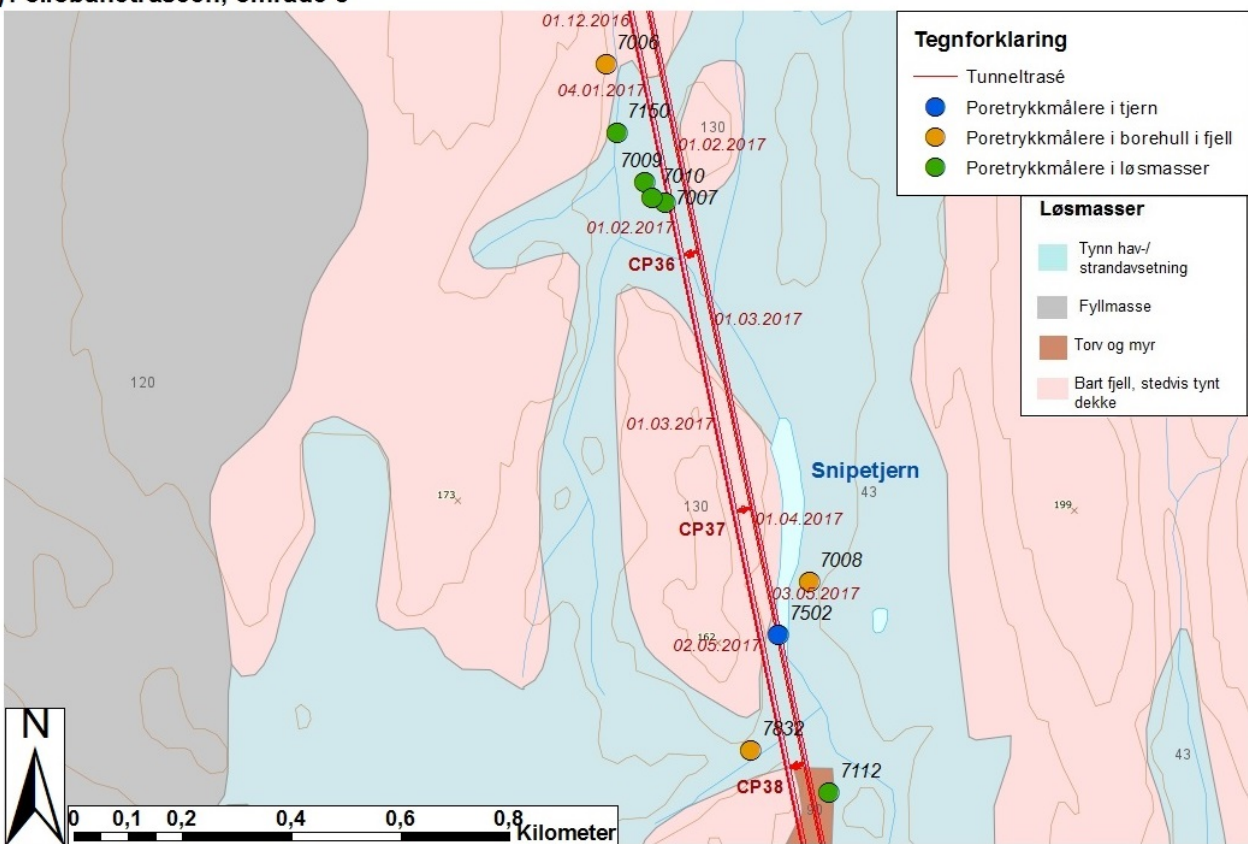
3.7 Det studerte området ved Snipetjern

Figur 34 viser det studerte området ved Snipetjern. Det er etablert poretrykkmålere i borehull i fjell, løsmasser og tjern i området. Som tidligere nevnt er området markert som sensitivt på grunn av faren for å drenere Snipetjern og vegetasjonen omkring.

a) Follobanetraséen, område 8



b) Follobanetraséen, område 8



Figur 34. Oversikt over det studerte området ved Snipetjern, med poretrykkmålere og tunneltrasé. a) Berggrunnskart. b) Løsmassekart.

4 METODER

Kapittelet er delt i to deler. Delkapittel 4.1 presenterer Bane NORs metoder for å overvåke poretrykk, vanninfiltrasjon, setninger og lekkasjer. Delkapittel 4.2 beskriver metodene som er benyttet til å finne resultatene i masteroppgaven.

4.1 Follobanens overvåkingsmetoder

Her beskrives Follobanens overvåkingsmetoder for setninger, infiltrasjonsrater- og trykk, poretrykk og innlekkasje til tunnelen.

4.1.1 Infiltrasjonsbrønner på Follobanen

På Follobanen benyttes vanninfiltrasjon som et forebyggende tiltak for å opprettholde poretrykk. Målet er at infiltrasjonsbrønnene kun skal være i drift i tunnelens byggeperiode. Poretrykket i løsmasser langs traséen skal ikke senkes hverken under eller i etterkant av tunneldrivingen (AGJV, 2017).

På Follobaneprosjektet brukes det kun infiltrasjonsbrønner boret fra dagen (Acciona og Ghella, u. å.). Vanninfiltrasjon fra tunnel er vanskelig å gjennomføre ved driving av TBM-tunneler, da betongelementene som sikrer tunnelen blir montert kontinuerlig rett bak stuff. Ved infiltrasjon fra tunnelen må det derfor bores gjennom elementene, noe som ikke er byggeteknisk gunstig (Grøndal, 2017). I tillegg blir mottrykket ved infiltrasjonen for stort til at det er praktisk gjennomførbart på Follobanen, da pumpetrykket må overstige poretrykket over tunnelen. Som vannkilde til infiltrasjonen fra overflaten benyttes det offentlige drikkevannsnett (Syversen, 2017). Dette har et maksimalt trykk på 6 bar, og infiltrasjonsstrykket er derfor begrenset til dette (AGJV, 2017).

Infiltrasjonssystemene på Follobaneprosjektet består av (figur 35) (Moizo, 2017):

- Injeksjonsrør med diameter på 20-30 mm
- Manometer og ventiler for å kontrollere vanntrykket
- Flowmeter for måling av infiltrasjonsraten og vannmengder
- Støykontroll
- Kobling til det offentlige drikkevannsnett

a)



b)



Figur 35. Infiltrasjonsbrønn på Follobanen. a) Brønnhus. b) Infiltrasjonsbrønn, ventiler, klokker som viser trykk og infiltrasjonsmengder, kobling til det offentlige drikkevannsnettet.

På infiltrasjonsbrønnene er det installert en måler som registrerer hvor mye vann som tilføres i hver brønn. Målerne overvåker hvor mye vann som er infiltrert totalt i den respektive brønnen (Grøndal, 2017). Infiltrasjonsraten kan bestemmes ved å notere manuelt hvor mye vann som har blitt infiltrert siden forrige avlesning, for så å dividere på tiden siden forrige avlesning.

Det er ikke filtre i infiltrasjonsbrønnene, fordi det benyttes drikkevann til infiltrasjonen. Det antas at vannet er tilstrekkelig renset slik at partikkel- og humusfjerning er unødvendig (Grøndal, 2017). Vanninfiltrasjonen i en brønn starter før tunnelboremaskinen når området. Vanninfiltrasjonen starter senest når TBM er 600 meter fra brønnen, og trykket i poretrykkmålerne omkring tunnelen faller med 1 m (Moizo, 2017).

4.1.2 Overvåking av poretrykk

I poretrykkovervåkingen inngår registrering av sensitive områder, sonderboringer på tunnelstuppen, poretrykkmålinger, nedbørsdata, setningsmålinger, fremgangen til TBM-ene samt vanninfiltrasjon i området.

For å måle poretrykk bruker Bane NOR elektriske piezometere, trykkceller og peilerør. Måten slike målere fungerer på er beskrevet i kapittel 2.3. Piezometerne plasseres i egne installasjoner, satt ned med en geoteknisk borerigg. De kan føres ned til det permeable laget som ofte finnes mellom marin leire og fast fjell i Oslo-området, men kan også plasseres i andre nivåer. Plasseringen kan være både i den marine leira ovenfor eller i fast fjell (Grøndal, 2017). I noen tjern er trykkmålere lagt direkte i vannet. Peilerør er stort sett benyttet i naturlige omgivelser langs traséen. Trykkceller er hovedsakelig montert i borehull i fjell (NIBIO, 2018).

På Follobane-prosjektet benyttes også eksisterende energibrønner langs traséen til poretrykkmåling. Dette kan være private brønner Bane NOR har fått låne av grunneiere, opprinnelig ment for grunnvarme. Energiførselen påvirkes ikke av poretrykkmåleren, og poretrykkmåleren påvirkes ikke av energibrønnen. Slike energibrønner kan også benyttes som infiltrasjonsbrønner på kort sikt (Grøndal, 2017).

Poretrykkmålingene avleses digitalt og lagres i en digital database. Verdiene gjøres tilgjengelige gjennom en nettside, og oppdateres kontinuerlig ettersom avlesningene foregår. Et kart viser infiltrasjonsbrønnenes og poretrykkmålerens lokasjon, og ved hjelp av kurver og diagram vises poretrykkets utvikling over tid (Grøndal, 2017). Poretrykkdataene kan lastes ned til Microsoft Excel. Ved å sammenlikne poretrykket med posisjonen til TBM-ene kan det bestemmes når infiltrasjonsbrønnene bør slås på eller av, eller trykket bør endres. Piezometerne som benyttes på Follobanen er av typene Geonor og Geokon (Johansen, 2017). Trykkcellene langs Follobanen er av typen Seba trykkcelle (NIBIO, 2018). Eksempler på et piezometer av typen Geokon, samt Seba trykkcelle er gitt i figur 36.

a)



b)



Figur 36. a) Piezometer av typen Geokon (Geokon, u.å.). b) Seba trykkcelle (SebaHydrometrie, u. å.). Begge benyttes til poretrykkovervåking på Follobanen.

4.1.3 Lekkasje i tunnelen

Som tidligere beskrevet etablerer TBM permanent vannsikring under driving. Dette er betongelementer med vanntette pakninger. Forinjeksjon hindrer midlertidig lekkasje på stuff og i tverrforbindelsene. Under driving injiseres det injeksjonsmasse systematisk i områdene som er karakterisert som svært sensitive. I de øvrige områdene injiseres injeksjonsmasse basert på innlekkasje i sonderborehullene (Acciona og Ghella, u. å.). Det utføres sonderboringer på stuff uavhengig av sensitivitetsgraden i området. Disse overlapper kontinuerlig, slik at hele traséen kartlegges med sonderboringer (Goljoh og Graeli, 2014b). I sensitive områder er det som tidligere nevnt krav om minimum to overlappende sonderborehull (Cuda og Moizo, 2017).

Det måles total vanninnlekkasje i tunnelene hver mandag morgen. Dette gjøres ved at vann samles opp innad i hver tunnel og pumpes ut. På pumpene er det montert mengdemålere, slik at det kan bestemmes hvor mye vann som har blitt tilført tunnelen (Syversen, 2017). I tillegg måles det innlekkasje i sonderborehullene som bores foran stuff. Dette gjøres som regel med bømte, ved å måle mengde tilført vann i løpet av et bestemt tidsintervall. Ved store vannmengder og høyt trykk kan dette være vanskelig, og i disse tilfellene må det antas en verdi (Syversen, 2017).

4.1.4 Setninger

I sensitive områder overvåkes setninger nøye. Flere hus og bygninger ble nivellert i forkant av tunnelbyggingen. Disse følges opp jevnlig for å overvåke setningsutvikling. Punktene som blir nivellert ble valgt ut fra beliggenhet i forhold til tverrforbindelser og dyprenner, løsmassetykkelser og fundamenteringsforhold. Det er nivellerte bygninger langs hele traséen, både i sensitive og ikke-sensitive områder. I ikke-sensitive områder er det ikke nivellert systematisk (Grøndal, 2018). I tillegg er det tatt i bruk satellittbilder, InSAR, for å oppdage bevegelser i jordoverflaten langs traséen. InSAR-målinger er utført langs hele traséen, 200 meter på hver av traséens sider. De to overvåkingsmetodene for setninger er beskrevet i kapittel 2.7.2. InSAR-dataene er behandlet hos NGI, og har nylig blitt tilgjengelige.

4.2 Metoder benyttet i masteroppgaven

Kapittel 4.2 beskriver metodene som er benyttet i masteroppgaven. Det presenteres først hvilke data som er benyttet i studien, deretter følger metoder for fremstillinger av resultater.

4.2.1 Data benyttet til resultatene i masteroppgaven

Følgende data er benyttet i studien:

- Grunnvannsdata fra poretrykkmålere, i relevante områder for hele måleperioden. Målt i grunnvannsnivå i meter under terreng, pr. dag pr. måler.
- Nedbørsdata, registrert nedbør pr. dag. Fra Follobanen, opprinnelig fra Meteorologisk institutt.
- Informasjon om infiltrasjonsmengder og -trykk for infiltrasjonsbrønnene som er studert. Informasjon om infiltrasjonsbrønn PZ 4002-1 foreligger ikke, og er derfor ikke inkludert i studien.
- Tunnelboremaskinenes fremgang. Fremgang målt i meter av tunnelen, for hver dag.
- Koordinater for infiltrasjonsbrønner, TBM og poretrykkmålere:
 - o TBM: Koordinater tilhørende hver meter av tunnelen.
 - o Infiltrasjonsbrønner og poretrykkmålere: Koordinater tilhørende hvert punkt.
- Dato for åpning av tverrforbindelser, samt plasseringen av disse.
- Setningsdata fra setningsovervåkingen med nivellement. Målinger utført av Bane NOR på utvalgte tidspunkt. Setninger (mm) målt på måletidspunktene.
- InSAR-data fra setningsovervåking. Dataene er prosessert av NGI. Setninger (mm) målt på måletidspunktene.

Dataene er gitt i digitale vedlegg.

4.2.2 Beskrivelse av generelle utregninger og prosedyrer

Alle kart i oppgaven er laget av forfatter i ArcGIS ArcMap (versjon 10.3). Koordinater og data er mottatt fra Bane NOR. Det er benyttet kartgrunnlag fra NGU for å fremstille løsmasse- og berggrunnskart (Løsmasser: <http://geo.ngu.no/mapservers/LosmasserWMS> og Berggrunn N50: <http://geo.ngu.no/mapservers/BerggrunnN50WMS>), samt bakgrunnskart fra Kartverket (Kartdata2: <http://wms.geonorge.no/skwms1/wms.kartdata2?>). Avstandsberegninger i studien er basert på koordinatene til infiltrasjonsbrønnene, tunnelene og poretrykkmålerne.

Microsoft Excel (versjon 15.31) er benyttet til regneoperasjoner, samt til tegning av kurver og diagrammer. Til noe av databehandlingen er MATLAB (versjon R2018a) benyttet.

Fokuset i studien er på områdene Nordstrand og Snipetjern. Nordstrand har, som tidligere

beskrevet, flere infiltrasjonsbrønner (figur 32), i tillegg til at poretrykk og setningsutvikling er overvåket. For å se på infiltrasjonsbrønnenes effekt er Nordstrand-området sammenliknet med området rundt Snipetjern (figur 34). Her er det ikke etablert infiltrasjonsbrønner.

4.2.3 Poretrykkutvikling på Nordstrand

Poretrykkutviklingen over tid på Nordstrand er sammenliknet med infiltrasjonsmengder, nedbør og avstand til tunnelboremaskinene.

Rådata fra grunnvannsovervåkingen er benyttet til å lage diagrammer som viser poretrykkutvikling over tid. Det ble laget et diagram for poretrykkmålere i borehull i fjell, og et diagram for poretrykkmålere i løsmasser. Poretrykkmålerne som har blitt benyttet i studien ligger innenfor det studerte området på Nordstrand, og er lokalisert opp til omtrent 200 meter fra infiltrasjonsbrønnene (figur 32). Disse er (tabell 3):

Tabell 3. Oversikt over poretrykkmålere benyttet i studien, på Nordstrand.

Poretrykkmåler	Plassering	Type poretrykkmåler
5004-1	Fjell	Seba trykkcelle
5004-2	Fjell	Seba trykkcelle
5007	Løsmasse	El. piezometer – Geokon
5010	Fjell	
5721	Løsmasse	Seba trykkcelle
5722	Løsmasse	Seba trykkcelle
4002	Fjell	Seba trykkcelle
4003	Fjell	Seba trykkcelle
4013	Løsmasse	
4720	Fjell	
4857-1	Løsmasse	El. piezometer – Geokon
4857-2	Løsmasse	El. piezometer – Geokon

På samme tidsakse ble infiltrasjonsrater for infiltrasjonsbrønnene 2A, 2B, 2C, 2D, 2E (BH 6+540) og 3C, samt nedbør fremstilt. Dette er rådata fra Bane NOR.

Det siste diagrammet viser TBM-enes avstand til området over tid. Poretrykkmåler 5010 ble benyttet som utgangspunkt, da denne ligger omtrent midt i det studerte området på Nordstrand (figur 32). Avstanden ble beregnet fra dagen den første TBM-en ble satt i drift, 6. september

2016, og frem til 20. februar 2018.

4.2.4 Poretrykkutvikling ved Snipetjern

Poretrykkutviklingen ved Snipetjern (figur 34) er fremstilt tilsvarende Nordstrand. Her er det ikke etablert infiltrasjonsbrønner, som forklart i kapittel 3.5. Målet var å sammenlikne poretrykkutviklingen for de to områdene når TBM passerer, og dermed kartlegge hvilken effekt vanninfiltrasjonen har. Snipetjern er valgt fordi forundersøkelsene her viste liknende grunnforhold som ved det studerte området på Nordstrand.

Midtpunktet på innsjøen Snipetjern er benyttet som utgangspunkt for avstandsberegningene til TBM (koordinater: 602960, 6631026). For å fremstille poretrykkutvikling er følgende poretrykkmålere benyttet ved Snipetjern (tabell 4):

Tabell 4. Poretrykkmålere benyttet i studien for Snipetjern.

Poretrykkmåler	Plassering	Type poretrykkmåler
7006-1	Fjell	Seba trykkcelle
7006-2	Fjell	Seba trykkcelle
7007	Løsmasse	Seba trykkcelle
7008-1	Fjell	Seba trykkcelle
7008-2	Fjell	
7009	Løsmasse	Piezometer
7010	Løsmasse	Piezometer
7112	Løsmasse	Seba trykkcelle
7150	Løsmasse	Peilerør
7502	Tjern	
7832	Fjell	Seba trykkcelle

Ved Snipetjern inkluderer fremstillingen poretrykkmålere som befinner seg opp til 900 meter fra tjernet. Dette ble gjort fordi det var ønskelig å få med et tilstrekkelig antall poretrykkmålere i både fjellbrønner og løsmassebrønner.

4.2.5 Poretrykkreduksjon i forhold til avstand til TBM

Poretrykkets utvikling ettersom TBM nærmer seg og forlater Nordstrand og Snipetjern har blitt studert. Målet var å kartlegge poretrykkendringer som funksjon av avstand til TBM, i et

område med infiltrasjonsbrønner (Nordstrand) og i et område uten (Snipetjern). Utviklingen er presentert i punktdiagrammer. Det ble valgt ut poretrykkmålere i fjell og løsmasser, for områdene Nordstrand og Snipetjern. Poretrykkmålerne som viste relativt stor reaksjon da TBM-ene passerte ble valgt ut. Disse er (tabell 5):

Tabell 5. Oversikt over poretrykkmålere benyttet for å se på sammenheng mellom poretrykk og avstand til TBM.

	Poretrykkmålere i borehull i fjell		Poretrykkmålere i løsmasser	
Nordstrand	4002-1	5004-2	4857-1	4857-2
Snipetjern	7008-2	7832-1	7112-1	7150-1

Avstanden mellom poretrykkmålerne og TBM-ene ble regnet ut dag for dag. For å kunne ha én kurve for hver poretrykkmåler ble det kun sett på avstanden til én av TBM-ene som borer i hver retning. TBM-ene som borer parallelle løp mot sør, Anna og Magda, befinner seg omtrent 150 m fra hverandre, der Anna har kommet lengst sør. På vei nordover borer Ellisiv omtrent 50 meter foran Eufemia. For poretrykkmålerne ved Snipetjern er avstanden til Anna beregnet. For poretrykkmålerne ved Nordstrand er avstanden til Ellisiv benyttet.

I diagrammene ble det også lagt inn en lineær kurve. Denne representerer det gjennomsnittlige grunnvannsnivået (meter under terreng) som de ulike poretrykkmålerne har målt, fra måleren ble satt i drift til 31. desember 2015. Dette var før tunnelen ble startet bygget, og det antas derfor at verdiene ikke er påvirket av TBM eller vanninfiltrasjon. Poretrykkkurvene kan derfor sammenliknes med opprinnelig gjennomsnittlig poretrykk.

4.2.6 Influensområder for infiltrasjonsbrønnene

Det er gjort to ulike fremstillinger for å se på influensområder for infiltrasjonsbrønnene på Nordstrand. I begge tilfeller ble det tatt utgangspunkt i data fra tidspunktet vanninfiltrasjonen i brønnene 2A, 2B og 2C ble slått på, og frem til TBM-ene Ellisiv og Eufemia var 300 meter fra ytterkanten av området, det vil si 300 meter unna poretrykkmålerne 5007 og 5004 (figur 32). Dette var fra 2. august 2017 til 20. august 2017. Det ble studert hvor stor økning i poretrykk vanninfiltrasjonen førte til. Infiltrasjonsbrønn 3C var også i drift i perioden. Det antas at TBM ikke begynner å påvirke poretrykket før den er 300 meter unna området. Denne avstanden ble valgt ut fra samtaler med Bane NOR, samt fra tilgjengelig litteratur. Som tidligere beskrevet ble det i forbindelse med vanninfiltrasjonsanlegg i Oslo sentrum sett

poretrykkøkninger opp til 200 meter fra infiltrasjonsbrønnene (kapittel 2.9.2). Fordi avstanden kan variere sterkt ut fra geologi og grunnforhold, ble 300 meter benyttet i studien. I områder med langsgående oppsprekking kan likevel tunneldriving påvirke poretrykket i større avstand (Grøndal, 2018). Infiltrasjonsbrønn 2D og 2E (6+540) var ikke i drift i perioden, og er derfor sett bort fra i dette tilfellet.

Poretrykket den dagen vanninfiltrasjonen i brønnene 2A, 2B og 2C ble slått på ble satt som utgangspunkt for poretrykkberegningene i perioden. Dette er 2. august 2017. Deretter ble maksimumsverdien for poretrykket i perioden fra 2. august 2017 til 20. august 2017 funnet. Det antas at differansen mellom maksimumsverdien og startverdien for hver poretrykkmåler viser hvor stor økning i poretrykk som er forårsaket av infiltrasjonsbrønnene.

Infiltrasjonsbrønnene 1A, 1B, 1C, 1D og BH 5+400 var ikke i drift i perioden, og kan derfor ikke ha påvirket poretrykket. Det er ikke sett på poretrykkmalere lenger sør enn kirkegården på Nordstrand. Dette er fordi det er mulig at infiltrasjonsbrønnene lenger sør var i drift i perioden og dermed kan ha påvirket poretrykket lenger sør. Informasjon om drift og infiltrasjonsrater i disse brønnene foreligger ikke.

Resultatene er fremstilt på to ulike måter. Figur 41 og figur 42 viser kart over Nordstrand med de studerte poretrykkmålerne. Det er skilt mellom poretrykkmalere i fjell og løsmasser. Ønsket er å studere endringen i poretrykk i området rundt infiltrasjonsbrønnene, når brønnene settes i drift. Den andre fremstillingen (figur 43) viser poretrykket som funksjon av avstand til infiltrasjonsbrønnene.

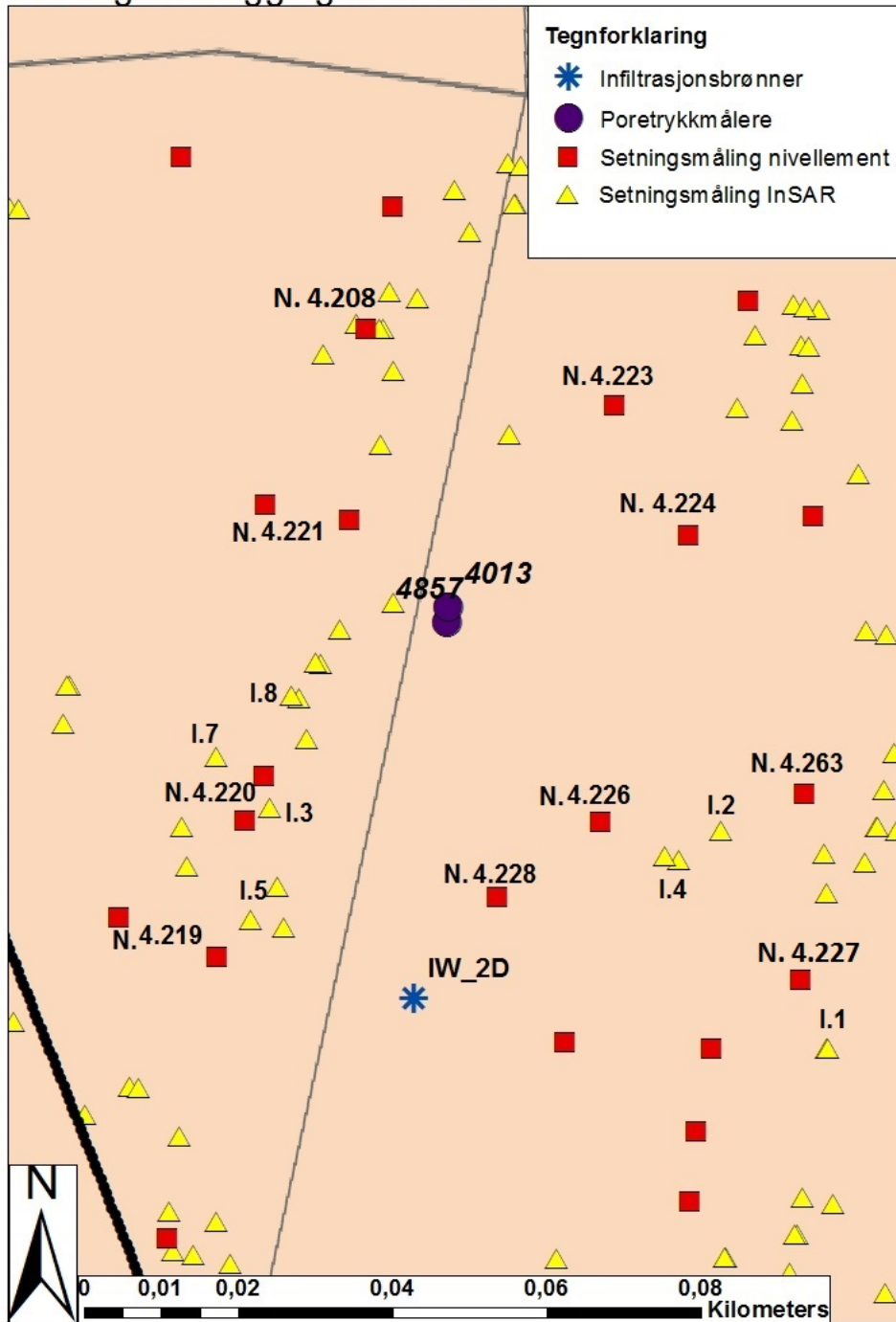
4.2.7 Setningsovervåking på Nordstrand

For Nordstrand ble det sammenfattet setningsdata fra nivellementmålinger på hus og bygninger, samt fra data fra setningsmåling med InSAR. Figurer med setnings- og poretrykkutvikling i løsmasser over tid ble laget for å kunne sammenlikne setningsdata med eventuelle poretrykkfall. Det ble valgt ut poretrykkmalere som viser markant reaksjon når TBM når området, og hvor det er kartlagt setninger:

- 4857-1 og 4857-2: Plassert hhv. leire og morene.
- 4013: Plassert i borehull i fjell.

Det ble valgt ut målepunkter lokalisert i nærheten av poretrykkmålerne (figur 37).

Setningskartlegging Nordstrand



Figur 37. Oversikt over punkter rundt poretrykkmålerne 4857 og 4013 som er nivellert (røde punkter) eller målt inn med InSAR (gule punkter). Punktene målt inn med nivellering er markert med N.xxx, punktene målt med InSAR er markert med I.x.

For det samme området ble setningsdata målt med InSAR fremstilt på kart. Kartet viser totale setninger målt i perioden fra april 2014 til mai 2018. Dataene er prosessert og mottatt fra NGI.

4.2.8 Responstid i løsmasser

For Nordstrandsområdet er poretrykkmålerne 4857-1 og 4857-2 valgt ut. For å undersøke de ulike løsmassenes reaksjon og responstid på vanninfiltrasjon, ble poretrykkutviklingen for de to målerne sammenliknet med vanninfiltrasjonen i området. Poretrykkmåler 4857-1 er plassert i leire, mens 4857-2 er plassert i morene.

5 RESULTATER

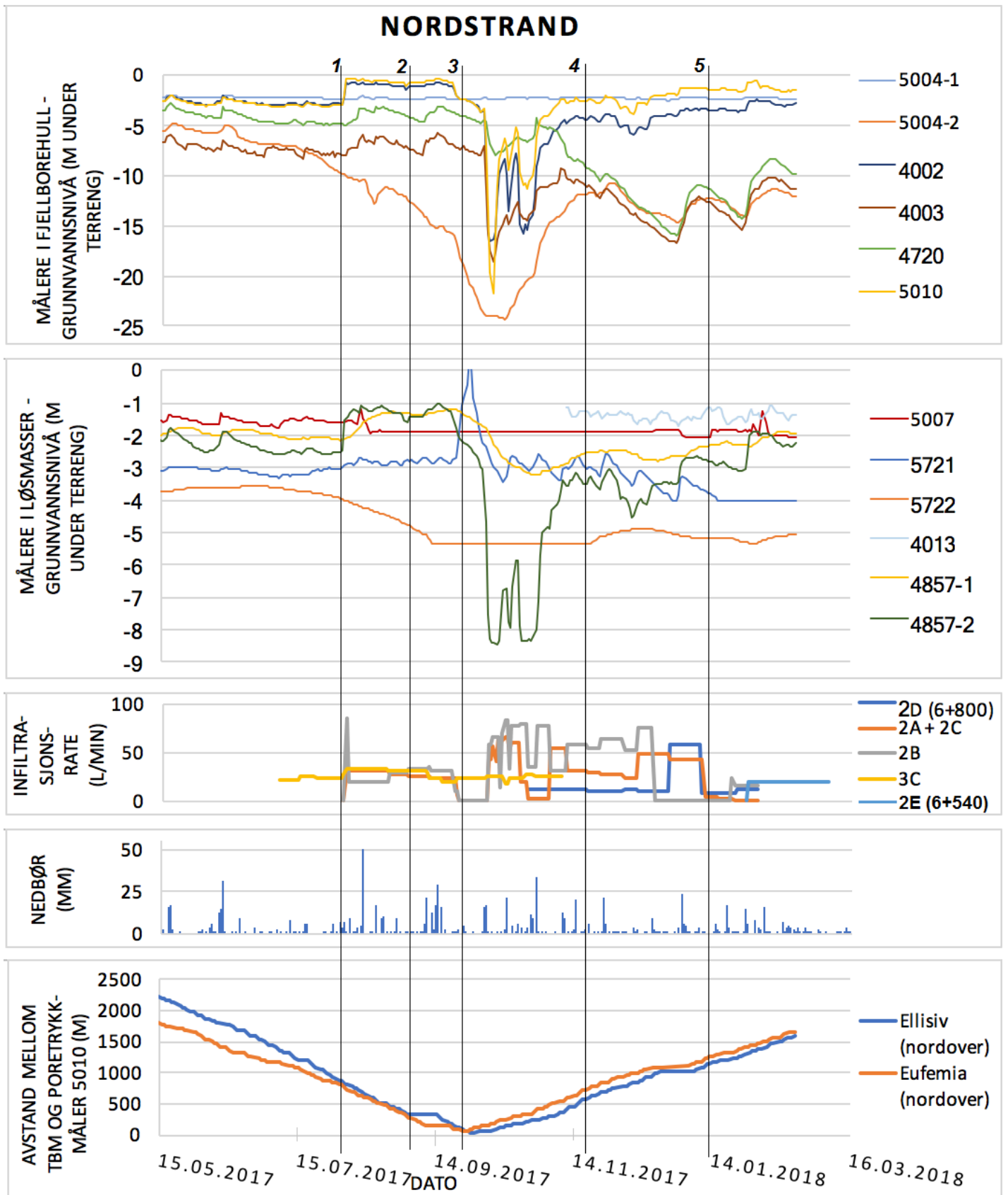
Kapittel 5 presenterer resultater fra metodene presentert i kapittel 4.2.

5.1 Poretrykkutvikling på Nordstrand

Figur 38 viser poretrykkutviklingen over tid for det studerte Nordstrandsområdet (kapittel 3.6) samt infiltrasjonsmengder i infiltrasjonsbrønnene og nedbørsmengder i samme tidsrom. Infiltrasjonsbrønnenes og poretrykkmålerens plassering er vist i figur 32. Som tidligere nevnt er områdets midtpunkt definert som stedet der poretrykkmåler 5010 er plassert. Det nederste diagrammet viser hvor langt unna dette punktet TBM-ene var til enhver tid.

Hendelser i perioden, som også er markert i diagrammene:

1. 2. august 2017: Infiltrasjonsbrønnene 2A, 2B og 2C ble satt i drift.
2. 1. september 2017: TBM-ene ankom det studerte Nordstrandsområdet.
3. 27. og 30. september 2017: TBM-ene var omtrent midt i Nordstrandsområdet, det vil si ved poretrykkmåler 5010.
4. 16. november 2017: CP 12 ble åpnet (figur 32).
5. Midten av januar 2018: Det ble boret injeksjonshull fra tunnelen i forbindelse med åpningen av CP 10 og CP 11. Her ble det påtruffet mye vann, og lekkasjene i tunnelen pågikk en periode.



Figur 38. Nordstrand. Poretrykk i løsmasser og fjell, infiltrasjonsmengder, nedbør og avstand mellom TBM og Nordstrand. Poretrykk og nedbør fremstilt fra rådata fra Bane NOR. Det er ulik skala på y-aksene som viser poretrykket i berg og løsmasser.

Figur 38 viser at poretrykket i de fleste poretrykkmålerne steg noe da vanninfiltrasjonen i brønnene 2A, 2B og 2C ble slått på 2. august 2017 (hendelse 1). I løsmasser viser poretrykkmålerne 4857-1 og 4857-2 økte poretrykk, og det samme er tilfellet med poretrykkmålerne 5010, 4003, 4720 samt 4002 i borehull i fjell. Målerne 5004-2 og 5722 ser ikke ut til å ha blitt påvirket av vanninfiltrasjonen.

Flere av poretrykkkurvene har en markant senkning omtrent 3. oktober 2018. Dette stemmer overens med at TBM-ene var i området (hendelse 3). De fleste poretrykkkurvene nådde et bunnpunkt mellom 6. og 12. oktober, det vil si omtrent én til to uker etter at TBM-ene hadde passert. Etter dette tidspunktet steg de fleste poretrykkene igjen.

Hendelse 4 viser til at tverrforbindelse CP 12 ble åpnet. Noen dager etter dette avtok poretrykket i fjell, spesielt i målerne 5010, 4002 og 5004-2. Dette kan også ses i løsmasser, der poretrykkmåler 5721 og 4857-2 viser nedadgående kurver. Poretrykket ser imidlertid ut til å ha steget igjen, før kurvene til målerne 5004-2, 4720 og 4003 igjen synker i begynnelsen av januar 2018. Reduksjonen skjedde samtidig som infiltrasjonsmengdene i brønnene 2A, 2C og 2D ble redusert. Poretrykket i de tre målerne fortsatte å synke da injeksjonshullene til CP 10 og 11 ble boret (hendelse 5). Deretter steg poretrykket noe, før det igjen har begynt å avta mot slutten av måleperioden. Poretrykkutviklingen i måler 4857-2 ser ut til å følge poretrykkutviklingen i målerne 5004-2, 4720 og 4003.

Nedbørshendelsene 17. mai 2017 og 10. juni 2017 sammenfaller med poretrykkøkningen som poretrykkmålerne som er plassert i berg viser. Også poretrykkmålerne 5007-1, 4857-2, og til dels 4857-1 og 5721-1 viser økte poretrykk i løsmasser omtrent samtidig som de nevnte nedbørshendelsene oppsto.

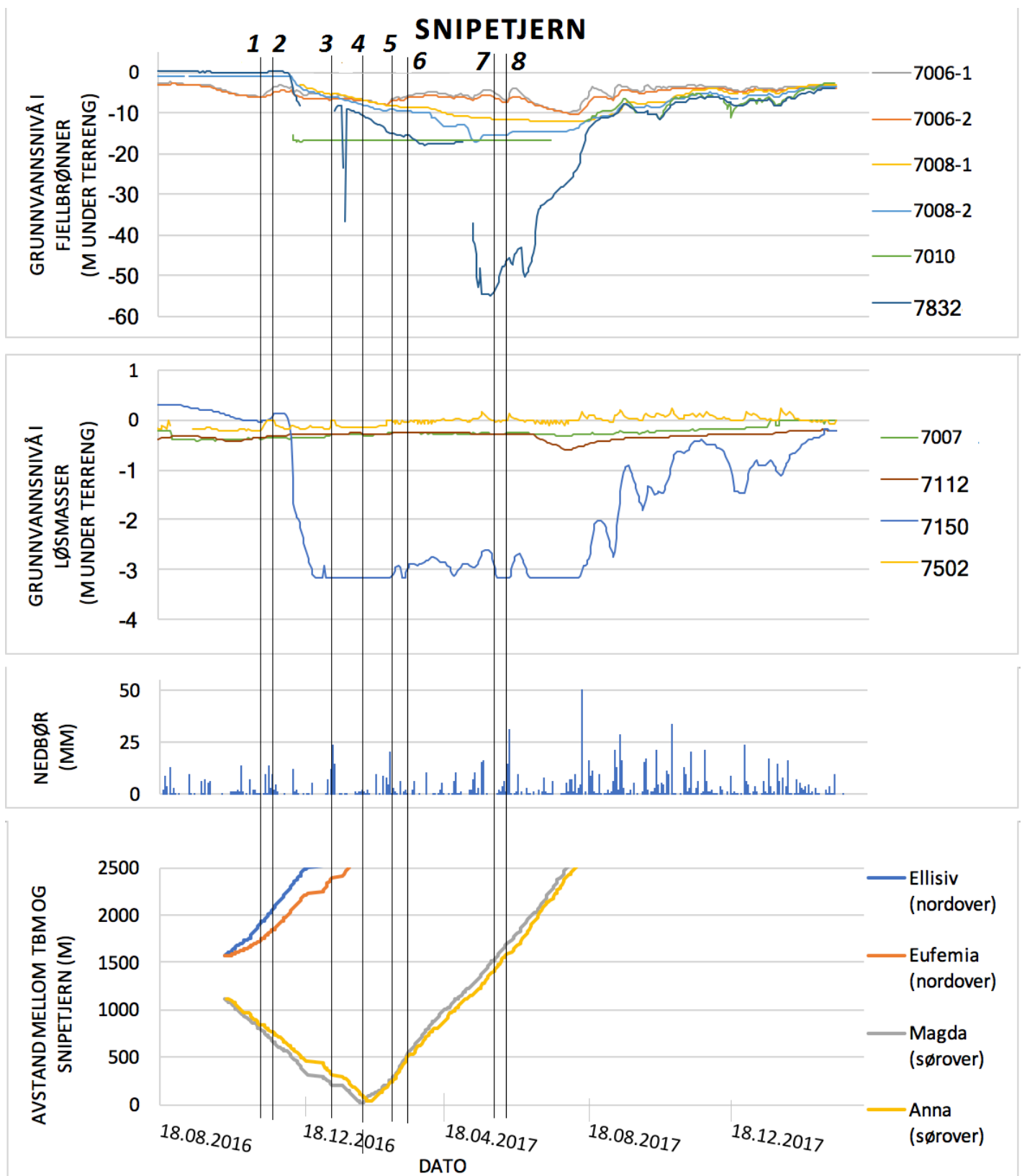
5.2 Poretrykkutvikling ved Snipetjern

Figur 39 viser poretrykkutviklingen ved Snipetjern, i tillegg til nedbør og avstanden mellom TBM-ene og tjernet over tid. Som tidligere beskrevet er det ikke etablert infiltrasjonsbrønner ved Snipetjern.

Hendelser i perioden, hvorav de fleste er vist på figur 39:

1. 6. og 11. november 2016: TBM-ene ankom det studerte området ved Snipetjern.
2. 8. desember 2016: TBM Anna traff på store lekkasjer i tunnelene, med varighet ut i januar 2017.
3. Januar 2017: TBM Magda traff på den samme vannførende sonen. Lekkasjer i 3-5 uker.
4. 11. og 15. februar 2017: TBM-ene befant seg rett under Snipetjern.
5. 1. mars 2017: CP 36 ble åpnet (figur 34).
6. 18. mars 2017: TBM møtte en vannførende sone.
7. 27. mai 2017: CP 37 ble åpnet.
8. 9. juni 2017: CP 38 ble åpnet.

Poretrykkmåler 7150, som er et peilerør i løsmasser, er lokalisert 3,3 meter under terrengnivå. Poretrykkmåleren klarer derfor ikke å måle poretrykk lavere enn dette.



Figur 39. Snipetjern. Poretrykkovervåking, nedbør samt avstand mellom TBM-er og Snipetjern. Poretrykkdata og nedbørsdata er rådata fra Follobanen. Det er ulik skala på y-aksene til poretrykket i løsmasser og berg.

Den 8. desember 2016 traff TBM Anna en vannførende sone (hendelse 2). I løpet av noen dager falt poretrykket i poretrykkmåler 7150 med 3 meter. I begynnelsen av januar traff TBM Magda den samme sonen (hendelse 3). De andre poretrykkmålerne i løsmasser ser ikke ut til å ha reagert på vannlekkasjen. I berg avtok poretrykkene i de fleste målerne da vannlekkasjen (hendelse 2) inntraff. Poretrykket fortsatte å synke da TBM Magda traff på den samme vannførende sonen (hendelse 3).

Videre ble tverrforbindelse 36 åpnet (hendelse 5), før TBM-ene igjen traff på mye vann 18. mars 2017 (hendelse 6). I fjell begynte poretrykket å øke først i måler 7832, 27. mai 2017. Da hadde den nådd sitt laveste målte poretrykk på -54 meter. De øvrige poretrykkmålerne i fjell, samt peilerør 7150, viser reduserte poretrykk frem til slutten av august 2018. Dette var 6 måneder etter at TBM hadde passert Snipetjern. Poretrykkmåler 7112 i løsmasser fikk et poretrykkfall 1. juli 2017.

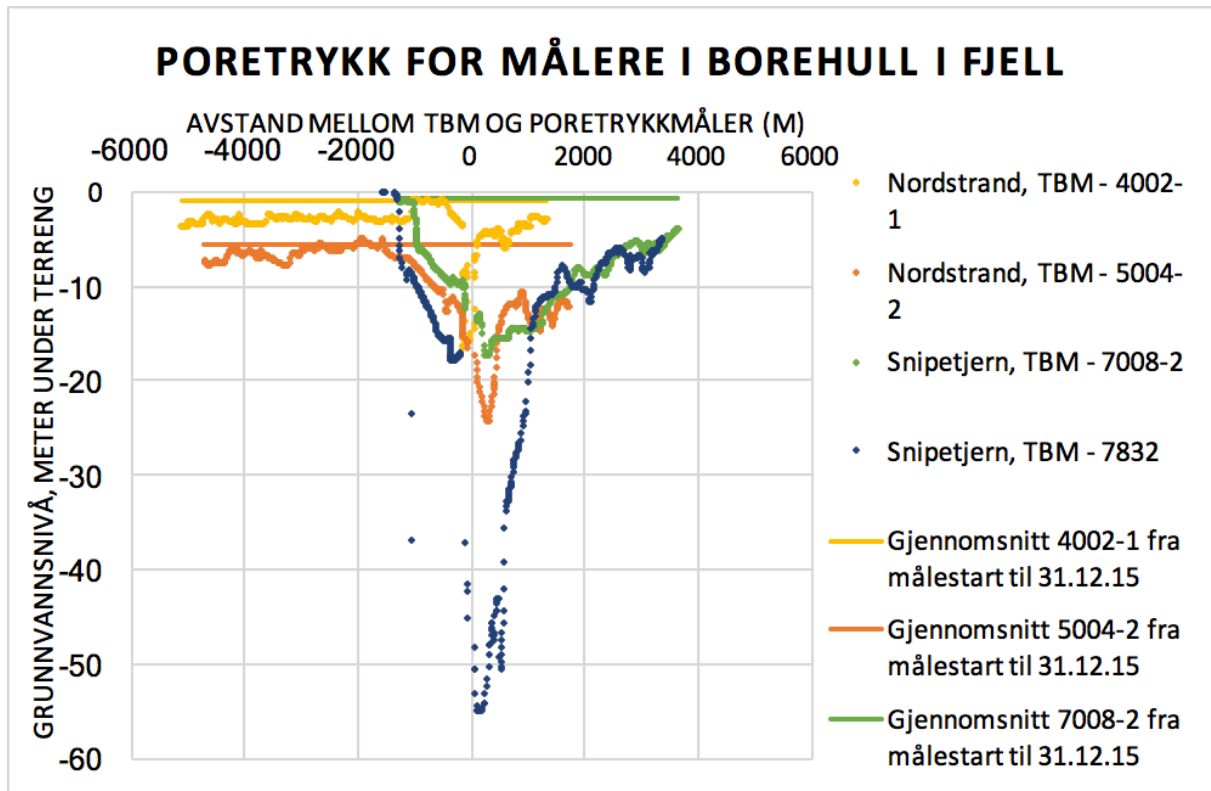
Åpningene av tverrforbindelsene CP 37 og CP 38 (hhv. hendelse 7 og 8) førte ikke til noen store endringer i poretrykk. Poretrykkmålerne 7006-1 og 7006-2, samt 7150, målte noe økte poretrykkverdier samtidig som tverrforbindelse CP 38 ble åpnet (hendelse 8). Samtidig ble det registrert kraftig nedbør.

Av poretrykkmålerne som er lokalisert i løsmasser er det kun måler 7150 som viser store poretrykkvariasjoner i perioden. Nedbørshendelser ser i liten grad ut til å samsvare med poretrykkøkning i berg og løsmasser, med unntak av nedbørshendelsen som sammenfaller med hendelse 8 (figur 39).

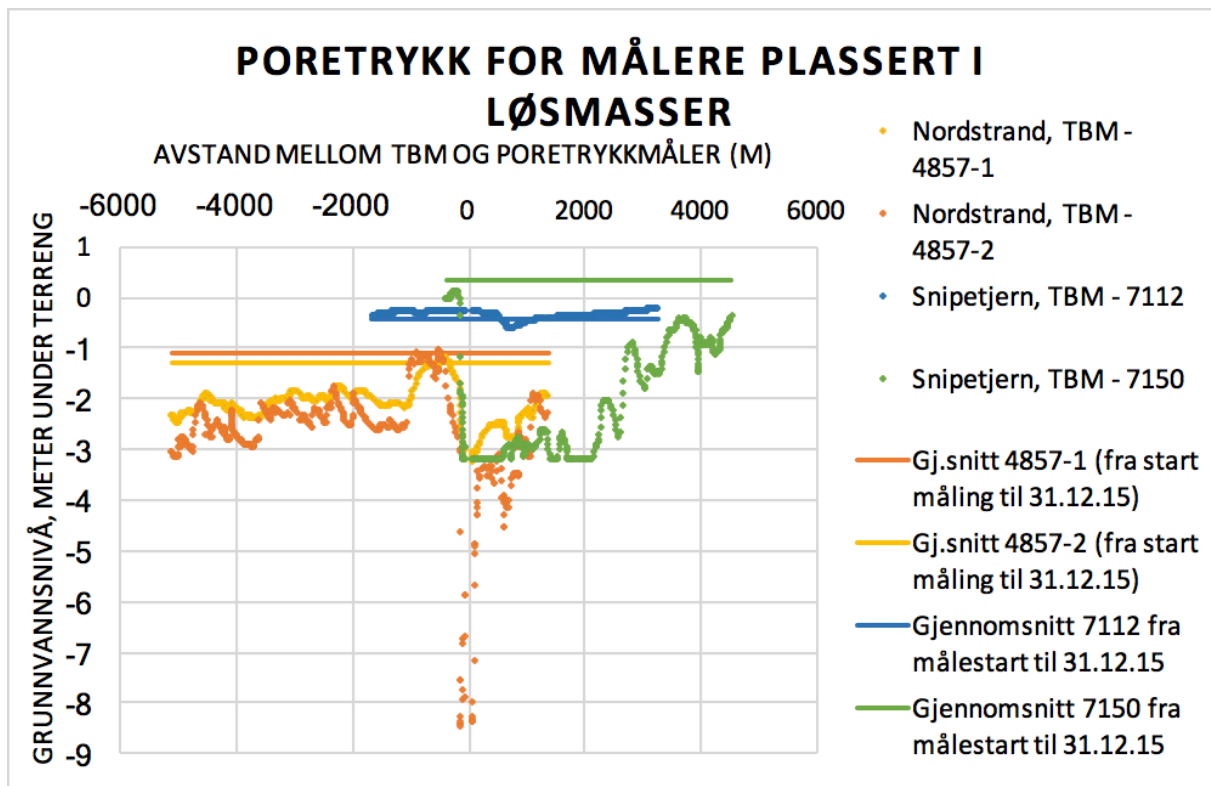
5.3 Poretrykkreduksjon som funksjon av avstand til TBM

Figur 40 viser poretrykk i fjell (a)) og løsmasser (b)) som funksjon av avstand til TBM. De rette linjene viser gjennomsnittlig poretrykk målt av den respektive poretrykkmåleren i perioden, før TBM-ene påvirket poretrykket. Fremstillingen viser utvalgte poretrykkmålere ved Snipetjern og på Nordstrand. Negative avstander viser til at TBM-en er på vei mot området, mens positive avstander betyr at TBM-en har passert og beveger seg lenger og lenger fra.

a)



b)



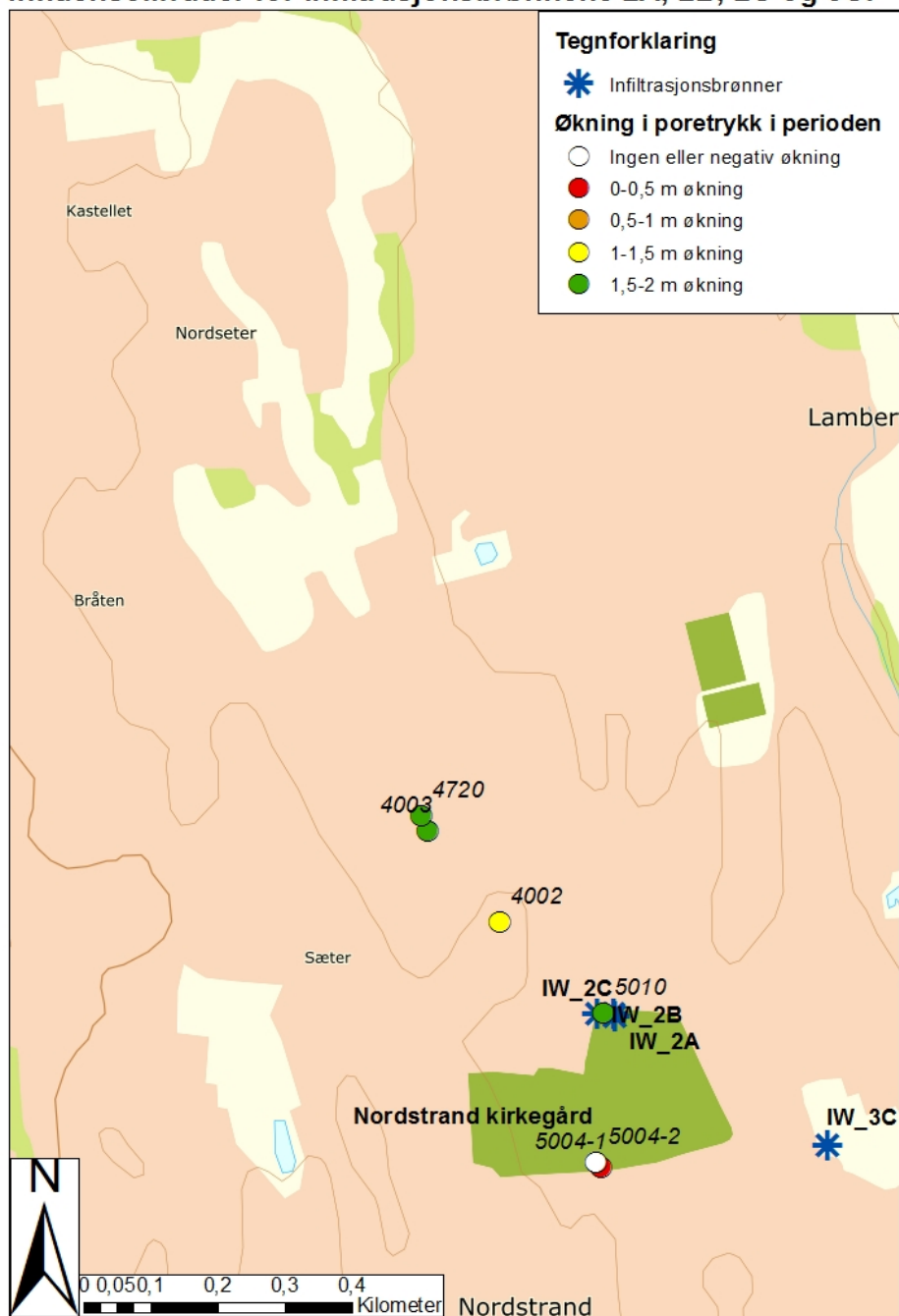
Figur 40. Poretrykk som funksjon av avstand til TBM, for utvalgte poretrykkmålere. De rette linjene viser gjennomsnittlig poretrykk i perioden før TBM påvirket poretrykket. a) Poretrykkmålere i fjell. b) Poretrykkmålere i løsmasser. Det er ulik skala på y-aksene i de to diagrammene.

Figur 40 viser at poretrykket i både løsmasser og fjell avtok da TBM-ene nådde Nordstrandsområdet. Figur 40 a) viser at den største reduksjonen i poretrykk i de utvalgte poretrykkmålerne oppsto i fjell ved Snipetjern. Her var poretrykkreduksjonen på 54 meter. På Nordstrand oppsto en grunnvannssenkning fra 6 meter til 24 meter under terreng, i poretrykkmåler 5004-2. I løsmasser ble den største senkningen målt på Nordstrand, med laveste målte poretrykk på 8,5 meter under terrengnivå. Poretrykkmåler 7150 ved Snipetjern er lokalisert 3,3 meter under terrengnivå, og klarer dermed ikke å måle poretrykk lavere enn dette nivået. Figuren viser også at poretrykket brukte lenger tid på stabiliseres på et høyt nivå etter at TBM-ene hadde passert ved Snipetjern enn ved Nordstrand.

5.4 Influensområder for infiltrasjonsbrønnene

Figur 41 og figur 42 viser influensområdene for infiltrasjonsbrønnene 2A, 2B, 2C og 3C på Nordstrand. Som tidligere nevnt var ikke infiltrasjonsbrønn 2D og 2E (6+540) i drift i perioden. Figurene viser økning i poretrykk i meter da infiltrasjonsbrønnene ble satt i drift.

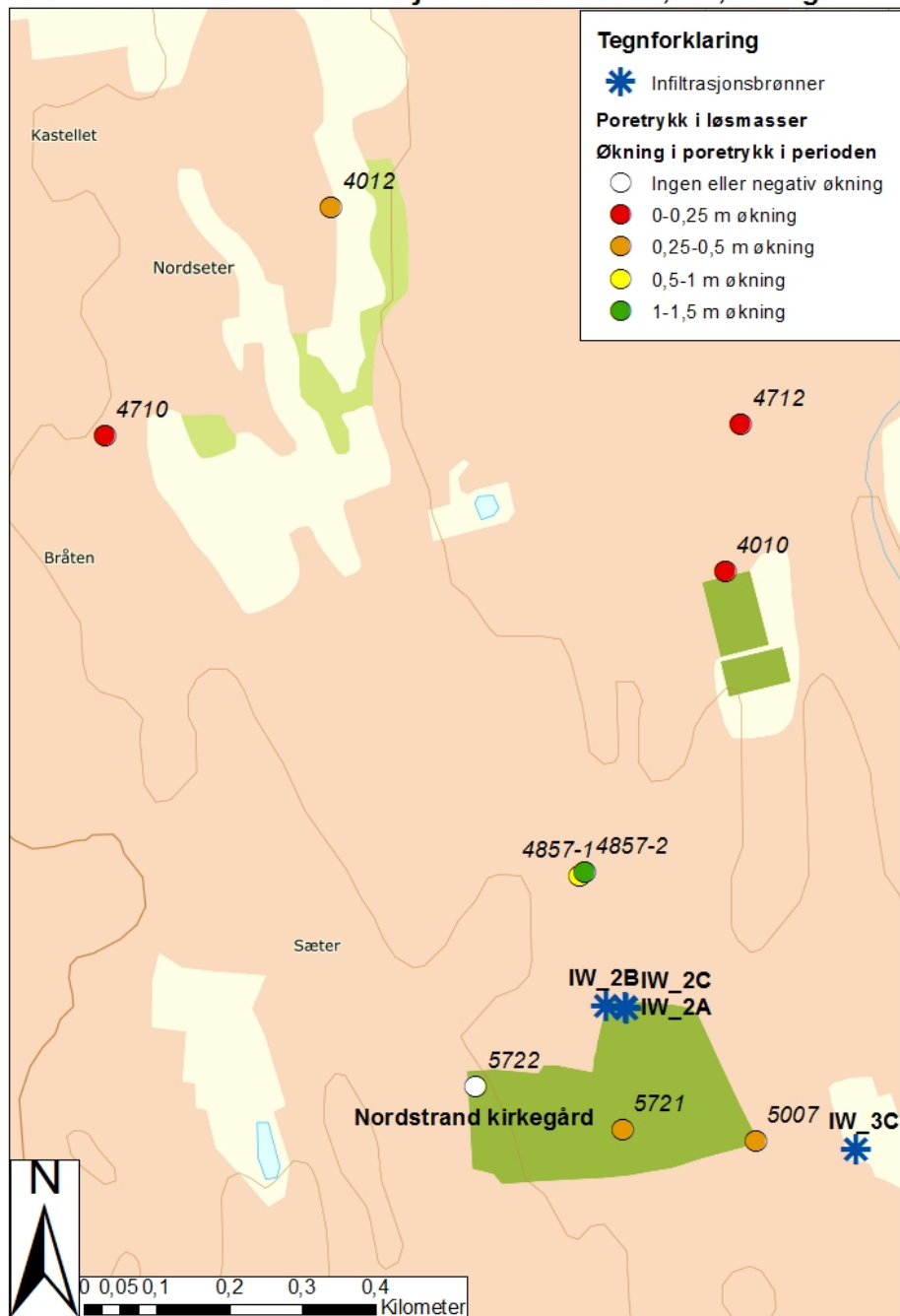
Influensområder for infiltrasjonsbrønnene 2A, 2B, 2C og 3C.



Figur 41. Influensområder for infiltrasjonsbrønnene ved Nordstrand kirkegård, i fjell. Fargekodene viser antall meter økning i poretrykk for perioden fra 1. august 2017 til 20. august 2017.

Figur 41 viser at det oppsto poretrykkøkninger i fjell på opp til 2 meter både rett ved infiltrasjonsbrønnene 2A, 2B og 2C, og 400 meter fra. Poretrykkmålerne sørover, 5004-1 og 5004-2, som befinner seg 250 meter fra infiltrasjonsbrønnene 2A, 2B og 2C, samt 330 meter fra infiltrasjonsbrønn 3C, hadde derimot de laveste poretrykkøkningene i området.

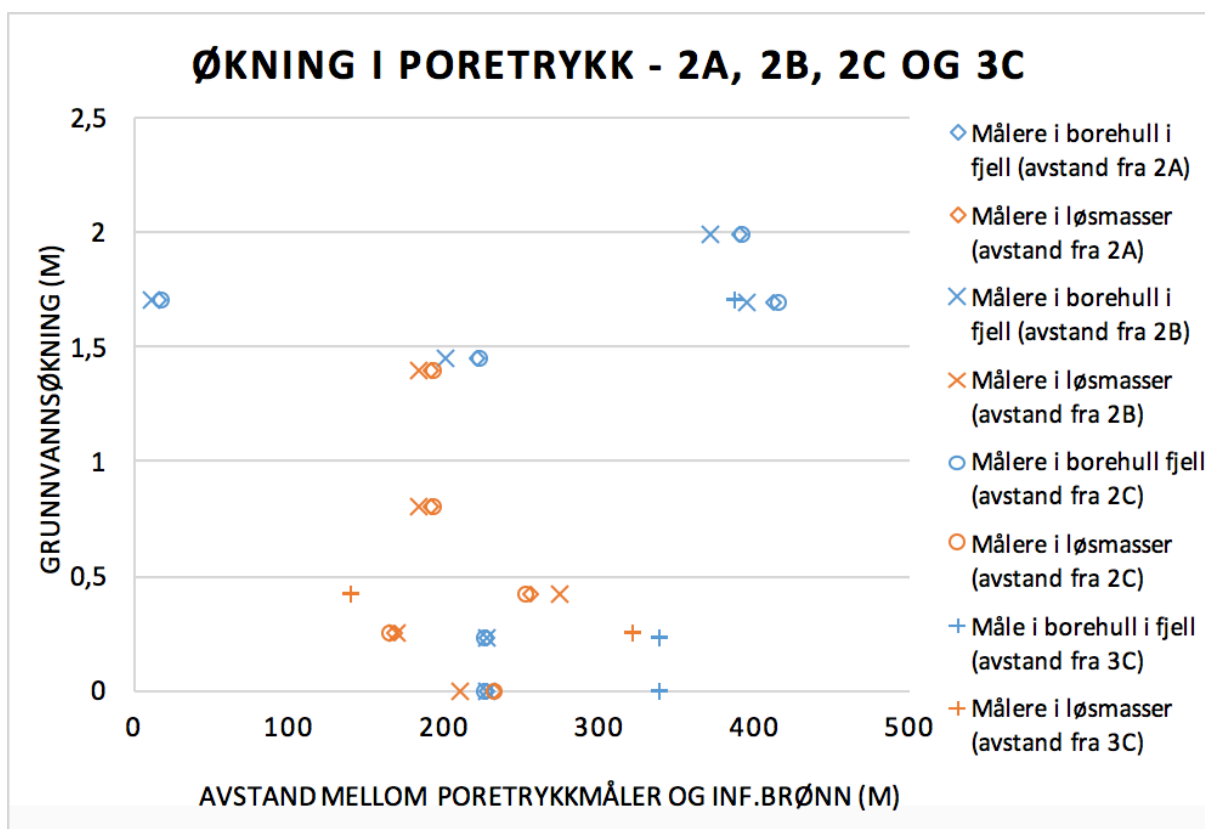
Influensområder for infiltrasjonsbrønnene 2A, 2B, 2C og 3C.



Figur 42. Influensområder for infiltrasjonsbrønnene ved Nordstrand kirkegård, i løsmasser. Fargekodene viser antall meter økning i poretrykk for perioden 1. august 2017 til 20. august 2017.

Figur 42 viser at poretrykket i løsmasser steg mest i nærheten av infiltrasjonsbrønnene. Likevel viser poretrykkmåler 5722 ingen endring, og 5721 samt 5007 hadde liten økning i poretrykk til tross for en beliggenhet nær infiltrasjonsbrønnene. Den største økningen ble målt i poretrykkmåler 4857-2, som er plassert i morene. I poretrykkmålerne lenger nord var økningen i poretrykk liten.

Figur 43 viser influensområdet til infiltrasjonsbrønnene 2A, 2B og 2C fremstilt i diagram, som funksjon av avstand til poretrykkmåleren.

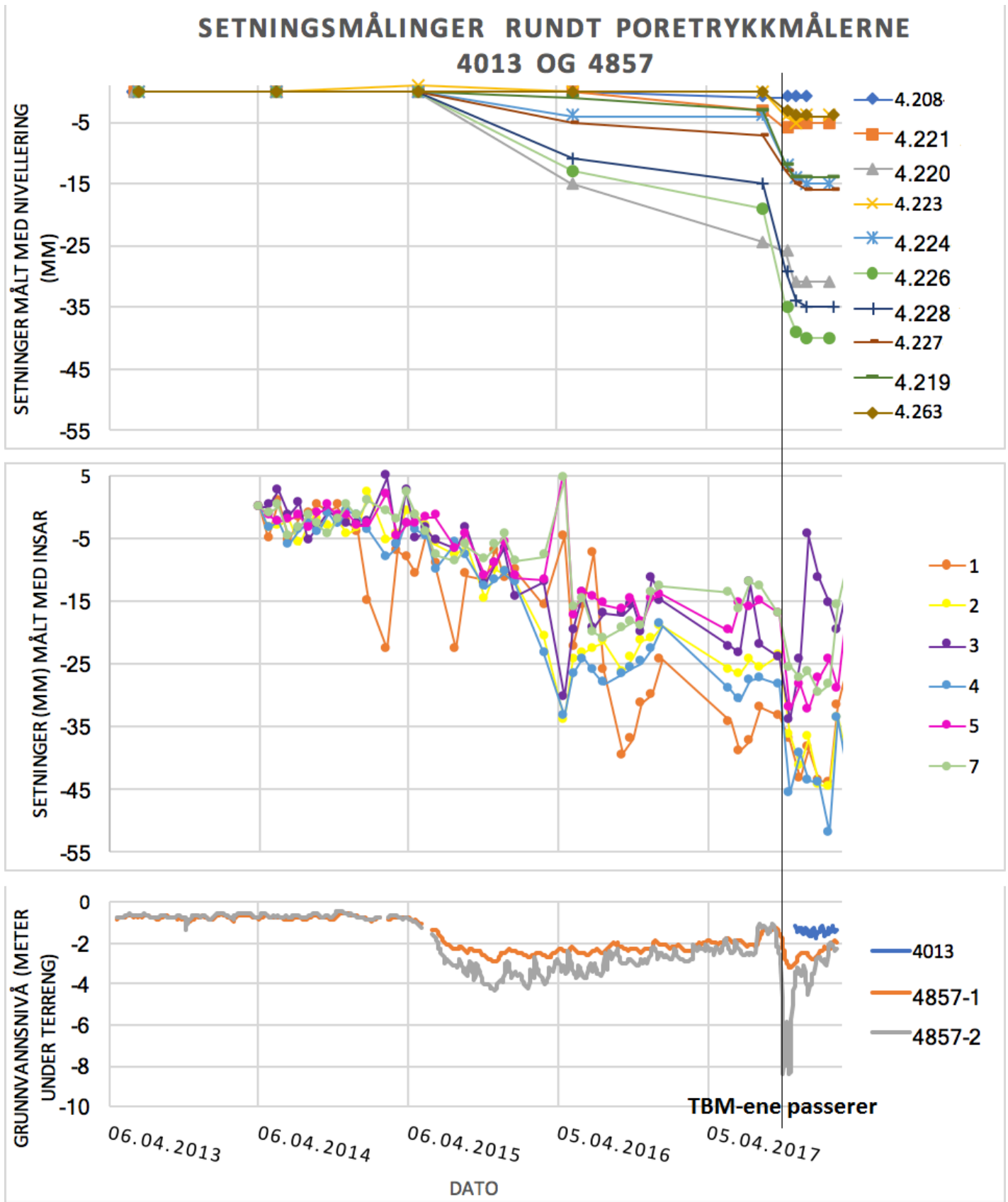


Figur 43. Poretrykkøkning i tidsrommet fra infiltrasjonsbrønnene 2A, 2B, 2C og 3C ble satt i drift, og frem til TBM-ene Ellisiv og Eufemia var 300 meter fra Nordstrandsområdet. Punktene viser målte poretrykkøkninger i poretrykkmålere som funksjon av avstand til TBM. Orange markeringer viser poretrykk i løsmasser, blå viser poretrykk i fjell.

Figur 43 viser ingen tydelige sammenhenger mellom økning i poretrykk og avstand til infiltrasjonsbrønnene. I perioden oppsto det poretrykkøkning i fjell på 1,5 til 2 meter, både rett ved infiltrasjonsbrønnene og 400 meter unna. Alle poretrykkmålerne i løsmasser som ble studert er lokalisert mellom 140 meter 320 meter fra en av infiltrasjonsbrønnene. Målerne innenfor denne avstanden viser økning i poretrykk fra 0 til nesten 1,5 meter.

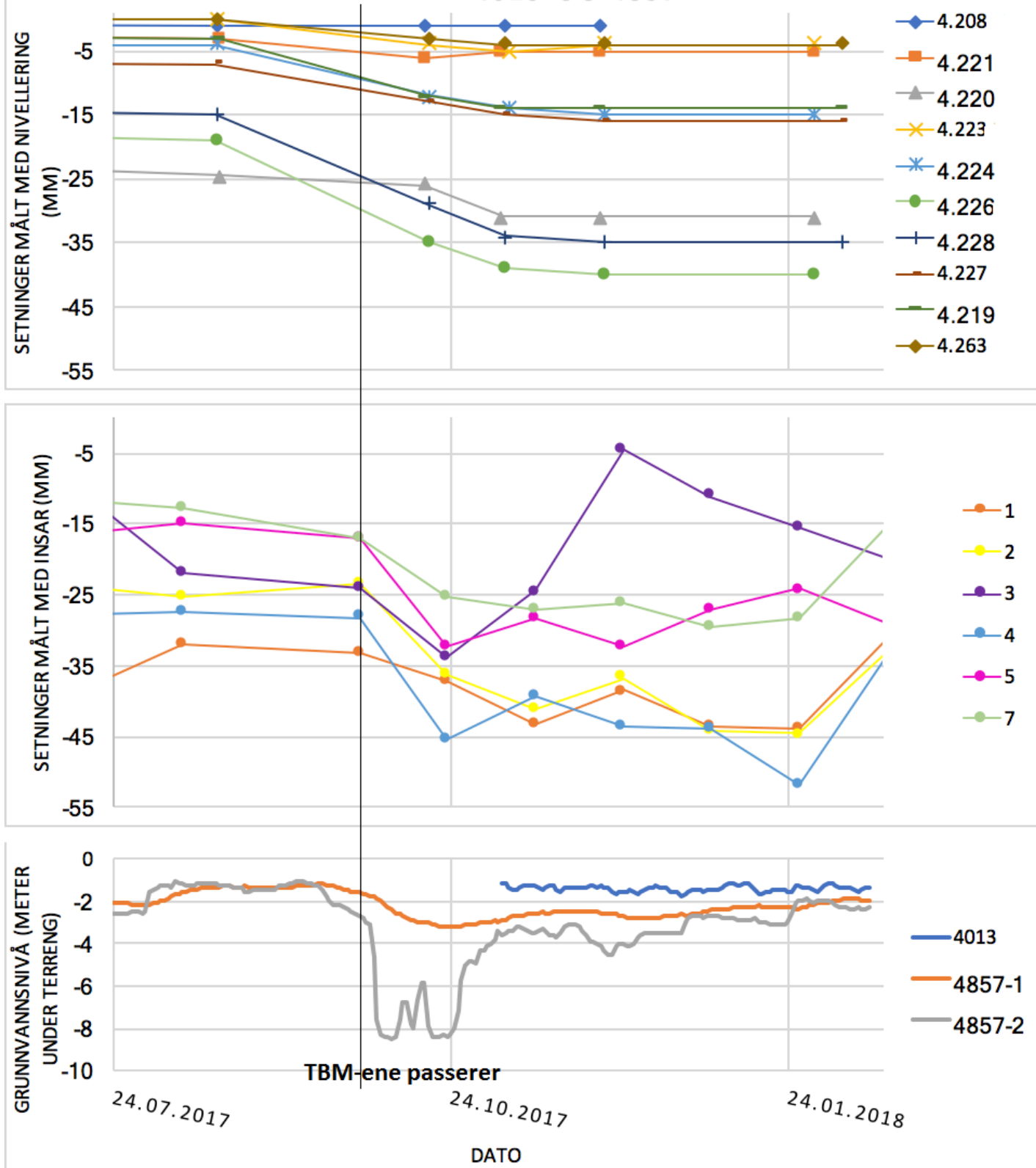
5.5 Setninger i Nordstrandsområdet

Figur 44 viser setningsutvikling rundt poretrykkmålerne 4013 og 4857, i hele overvåkingsperioden (april 2013 til mai 2018). I figur 45 er samme setningsforløp vist, men tidsaksen er fokusert på tiden da TBM-ene passerte området (juli 2017 til mai 2018). Figur 37 viser plasseringen til målepunktene.



Figur 44. Setningsutvikling rundt poretrykkmålerne 4857 og 4013, målt med nivellering (øverst) og InSAR (midten). Poretrykkutviklingen i målerne 4857 og 4013 er gitt i det nederste diagrammet. Den svarte linja viser når TBM-ene passerte.

SETNINGSMÅLINGER RUNDT PORETRYKKMÅLERNE 4013 OG 4857



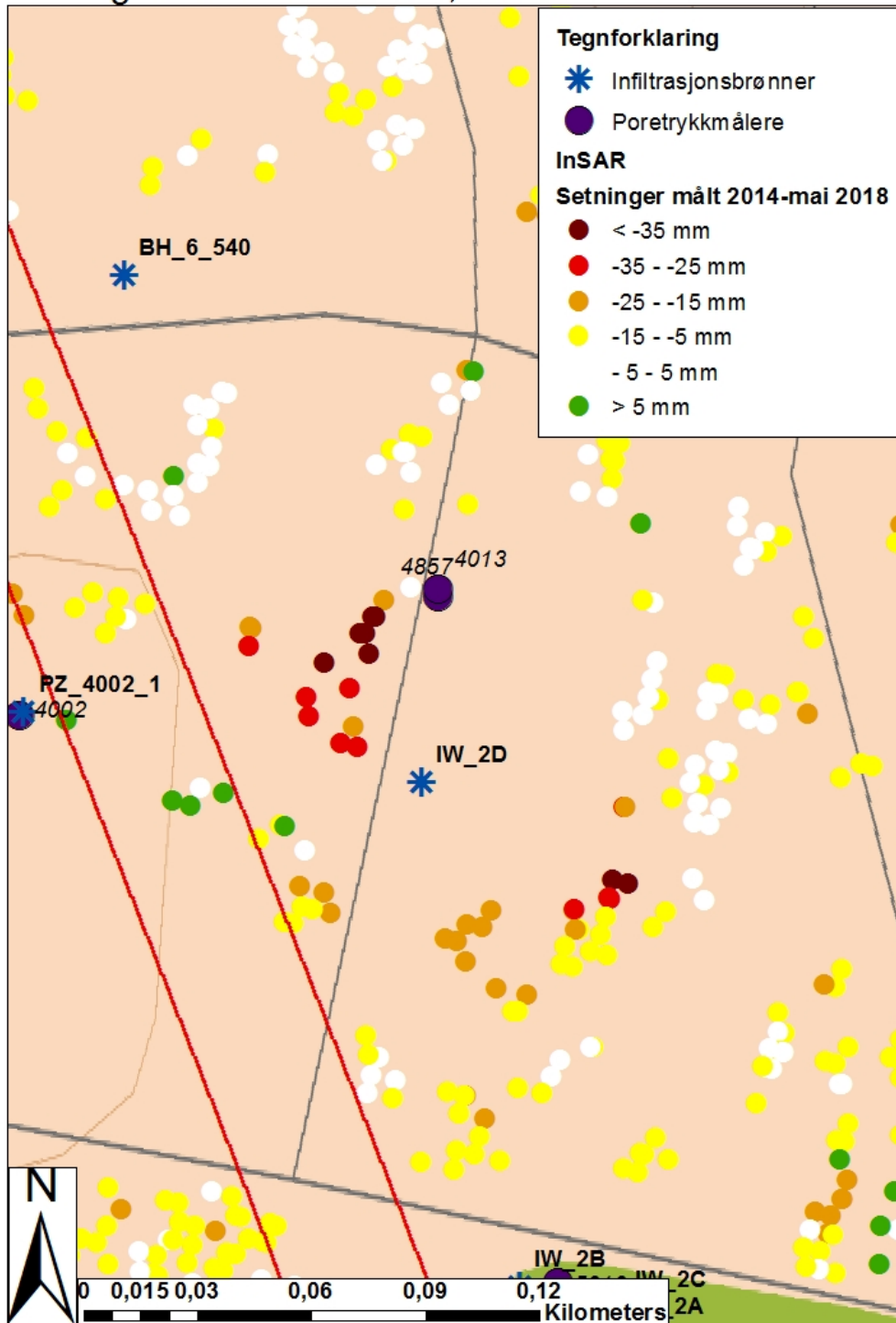
Figur 45. Setningsutvikling rundt poretrykkmålerne 4857 og 4013, målt med nivellering (øverst) og InSAR (midten). Poretrykkutviklingen i målerne 4857 og 4013 er gitt i det nederste diagrammet. Den svarte linja viser når TBM-ene passerte.

Figur 44 viser at det har oppstått poretrykkreduksjoner på Nordstrand før byggingen av Follobanen ble påbegynt. Setningsutviklingen som figuren viser startet over et år før tunnelbyggingen på Follobanen startet, og nesten 2 år før tunnelboremaskinene nådde Nordstrand. Rett etter passeringen til TBM-ene falt poretrykket i måler 4857-1 og 4857-2 (figur 45). Samtidig viser setningsutviklingen fra nivellement-målinger og InSAR-målinger at grunnen har satt seg ytterligere. Da poretrykket steg igjen ser de fleste setningskurvene ut til å ha flatet ut.

InSAR-dataene viser noe større setninger enn målingene utført med nivellering. Mens de største setningene kartlagt med nivellering er 40 mm, finnes det InSAR-målinger på totalt 52 mm. Grunnen ser derimot ut til å ha hevet seg noe etter dette, i følge InSAR-dataene. Som tidligere nevnt viser figur 37 plasseringen til målepunktene.

Figur 46 viser setningsutviklingen målt med InSAR på Nordstrand, rundt poretrykkmålerne 4857 og 4013. Det har oppstått setninger på over 35 mm vest for poretrykkmålerne.

Setninger målt med InSAR, Nordstrand

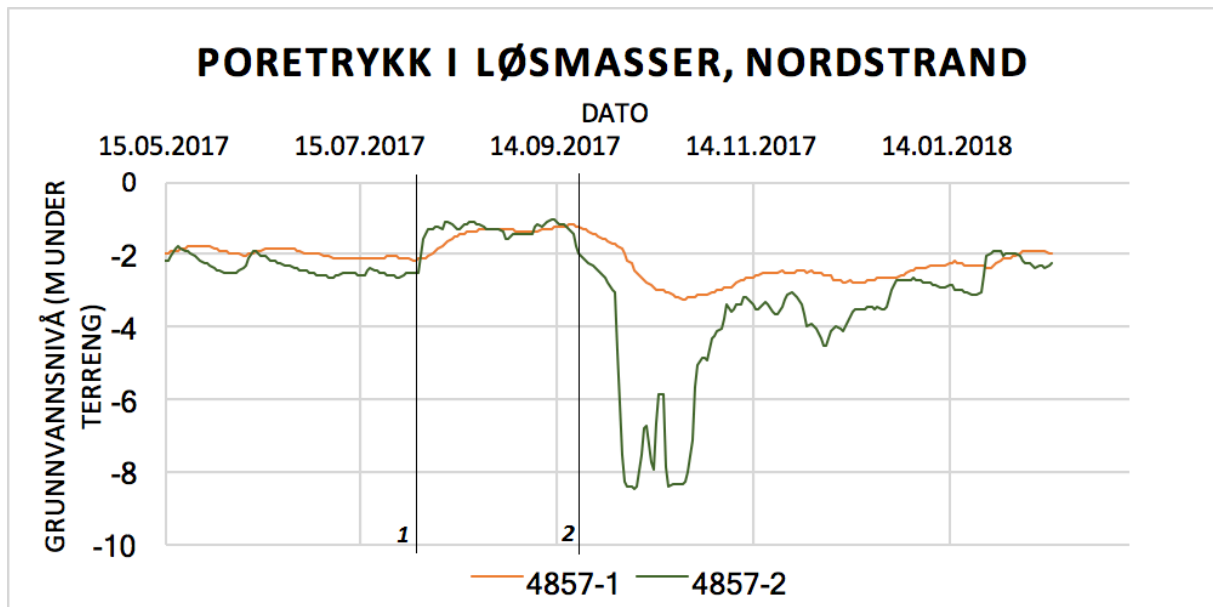


Figur 46. Setningsmålinger målt med InSAR. Setninger fra april 2014 til mai 2018 er vist. Negative verdier er setninger, positive er heving av terreng. Tunneltraséen er vist som røde linjer på kartet. Setningsdataene er prosessert av NGL.

Figur 46 viser at de største setningene er kartlagt vest og sørvest for poretrykkmålerne 4857 og 4013.

5.6 Responstid i løsmasser

Figur 47 viser poretrykkutviklingen i poretrykkmåler 4857-1 og 4857-2 fra 15. mai 2017 til 15. februar 2018. Disse er plassert i samme løsmasseborehull på Nordstrand. Måler 4857-1 er lokalisert i leire, mens 4857-2 er plassert i det permeable morenelaget som ofte finnes ovenfor fjell i Oslo-området.



Figur 47. Poretrykkutvikling i poretrykkmåler 4857-1 og 4857-2. De to målerne er plassert i samme borehull, i løsmasser. 4857-1 er plassert i leire, mens 4857-2 står i det permeable morenelaget i overgangen mellom løsmasser og fjell. Begge målerne er elektriske piezometere av typen Geokon.

Vanninfiltrasjon i brønn 2A, 2B og 2C ble som tidligere beskrevet slått på 2. august 2017 (figur 47, markering 1). Figur 47 viser at poretrykket i målerne 4857-1 og 4857-2 steg kort tid etter dette. 4857-2 viser en poretrykkøkning på 1 meter dagen etter vanninfiltrasjonen i brønn 2B ble slått på. I måler 4857-1 begynte poretrykket å stige 3. august 2017, men nådde ikke toppunktet før 28. august 2017. Poretrykket steg raskere i morenen enn i leira.

TBM-ene var 500 meter unna Nordstrandsområdet omtrent 20. august 2017, mens de var nærmest 27. og 30. september 2017 (figur 38). Poretrykkmåler 4857-2 fikk en markant reduksjon i poretrykk 13. september 2017, og poretrykket falt til 8,5 meter under terrengnivå (figur 47, markering 2). Da var TBM Eufemia omtrent 70 meter forbi poretrykkmåler 4857, mens TBM Ellisiv var omtrent 150 meter forbi (figur 32 og figur 38). Poretrykkmåler 4857-1 viser en noe tregere respons, og poretrykket begynte å falle 20. september 2017. I slutten av perioden hadde poretrykket i begge målerne re-etablert seg på nivået de hadde før infiltrasjonen ble slått på og TBM-ene passerte.

6 DISKUSJON

Kapittelet diskuterer resultatene, i samme rekkefølge som resultatene er presentert i kapittel 5.

6.1 Poretrykkovervåking på Nordstrand

Selv om infiltrasjonsbrønner har vært i drift på Nordstrand, har det blitt målt poretrykkreduksjoner i fjell og løsmasser i perioden da TBM-ene passerte. Bane NOR har startet vanninfiltrasjon før TBM-ene har nådd området for å hindre poretrykkfall i løsmasser. Fordi poretrykkmålerne 4857-1 og 4857-2 viser reaksjon på at vanninfiltrasjonen ble slått på, antas det at det er forbindelse mellom infiltrasjonsbrønnene og poretrykkmålerne. Likevel ble poretrykket redusert med henholdsvis 2 meter og 7 meter da TBM-ene passerte. Dette kan bety at det ikke har vært tilstrekkelige mengder vann som har blitt infiltrert.

Etter at TBM-ene passerte, steg poretrykket i de fleste poretrykkmålerne. Om stigningen skjedde fordi vanninfiltrasjonen i brønnene 2A, 2B og 2C økte, eller fordi tunnelene ble tette, er vanskelig å konkludere med. Mest sannsynlig stiger poretrykket av begge de nevnte grunner. Kun ut fra dataene på Nordstrand er det vanskelig å fastslå om poretrykket ville sunket mer om vanninfiltrasjonen ikke hadde vært tilstede.

Det er rimelig å anta at tverrforbindelsene mellom de to tunnellopene kan bidra til å redusere poretrykket, fordi det ikke etableres vanntett sikring der. Som tidligere beskrevet ble tverrforbindelse CP 12, som er lokalisert på sørenden av Nordstrand kirkegård, åpnet 16. november 2017 (hendelse 5, figur 38). Noen av poretrykkmålerne lokalisert i borehull i fjell, spesielt 4002 og 5010, målte senkede poretrykk mot slutten av november samme år. De øvrige poretrykkmålerne i fjell viser derimot senkede poretrykkurver helt frem til 25. desember 2017. Om dette skyldes tverrforbindelsen er vanskelig å fastslå sikkert. Ved 4003 og 4720 begynte poretrykket å synke før tverrforbindelsen ble åpnet. Poretrykket i disse to målerne, samt i 5004-2, begynte å stige igjen 25. desember 2017, tre dager etter at infiltrasjonsraten økte i infiltrasjonsbrønn 2D. Dette kan bety at infiltrasjonsbrønnen har god kommunikasjon med de tre poretrykkmålerne 4003, 4720 og 5004-2. Poretrykkmåler 4003 og 4720 er lokalisert omtrent 25 meter fra hverandre. Derfor er det naturlig at disse to responderer relativt likt på poretrykkendringer, gitt at de er forbundet gjennom samme sprekkesett. Poretrykkmåler 5004-2, derimot, er plassert omtrent 600 meter fra de to andre.

Forundersøkelsene (figur 33) viste ikke noen svakhetssoner som forbinder disse punktene. Det kan spekuleres i om tverrforbindelsen CP 12 kan ha ført til kommunikasjon mellom målerne, siden alle de tre poretrykkmålerne viser kurver som oppfører seg likt først etter at CP 12 ble åpnet.

I løsmasser er det mulig at tverrforbindelsen som åpnes gjenspeiles i poretrykkmåler 4857-2, som viser en poretrykksenkning fram mot 6. desember 2017. 4857-1 viser også noe redusert poretrykk fram mot 13. desember 2017.

Store nedbørmengder ser ut til å ha noe påvirkning på poretrykket, særlig før infiltrasjonsbrønnene ble satt i drift. Da vanninfiltrasjonen ble slått på kan det derimot se ut til at nedbøren i området fikk mindre betydning. Dette kan skyldes at infiltrasjonsbrønnene tilfører grunnen mye vann i forhold til vannmengdene som skyldes nedbør.

Med unntak av infiltrasjonsbrønn 2D, er det ikke mulig å se endringer i poretrykket som følge av variasjoner i vanninfiltrasjonens infiltrasjonsrater. Denne studien gir derfor ikke nok informasjon til å anbefale hvilke vannmengder som bør benyttes. Det er mulig at mengdevariasjonene som benyttes på Follobanen ikke er store nok til å gi utslag. Trykket er også begrenset av drikkevannsnettet.

6.2 Poretrykkovervåking Snipetjern

Etter at TBM-ene passerte det studerte området ved Snipetjern avtok poretrykket i området i 3-6 måneder. I denne perioden ble det åpnet flere tverrforbindelser, i tillegg til at det ble målt store lekkasjer i tunnelene. På bakgrunn av resultatene antas det at poretrykket ved Snipetjern avtok på grunn av alle disse hendelsene. Med unntak av poretrykkmåler 7150, ser poretrykket i løsmasser ikke ut til å ha variert mye i perioden. Poretrykkmåler 7150 er lokalisert i et peilerør i motsetning til de øvrige målerne i løsmasser ved Snipetjern. Det mulig at variasjoner i poretrykk måles raskere der. Det foreligger ikke nok informasjon om grunnforholdene til å forklare den lave responsen i de øvrige poretrykkmålerne i løsmasser.

Poretrykket i måler 7832 falt med 54 meter i løpet av den studerte perioden. Poretrykkmåler 7112, som er lokalisert i løsmasser omtrent 150 meter fra måler 7832, har ikke målt store variasjoner i poretrykk. Dette kan bety at det ikke er sammenheng mellom løsmassene ved

måler 7112 og den vannførende sonen 7832 er plassert i.

Den 8. desember 2016 traff TBM Anna en vannførende sone. Dette gjenspeiles i poretrykkmåler 7150, der poretrykket falt med 3 meter i løpet av noen dager. Dette kan indikere at den vannførende sonen er i kontakt med måleren. lekkasjen pågikk i noen uker, og i begynnelsen av januar traff TBM Magda den samme sonen. De andre poretrykkmålerne i løsmasser ser ikke ut til å ha reagert på vannlekkasjen.

6.3 Sammenlikning av poretrykk mellom Nordstrand og Snipetjern

Figur 40 viser at poretrykket har brukt lenger tid på re-etableres på et normalt nivå ved Snipetjern enn ved Nordstrand. Dette gjelder spesielt i løsmasser. TBM-ene på Nordstrand har ikke kommet langt nok til at det er mulig å vurdere dette sikkert for poretrykk i fjell. Selv om Snipetjern og Nordstrand ble valgt til sammenlikning på grunn av liknende grunnforhold, kan det være ulikheter i løsmassene og geologi som spiller inn. Det er også mulig at infiltrasjonsbrønnene har en betydning. Likevel er det på Nordstrand de største poretrykkreduksjonene i løsmasse oppstår, på opp til 8 meter. Poretrykkmåler 7150 ved Snipetjern er lokalisert 3,3 meter under terrengnivå. Dermed vil ikke måleren kunne måle poretrykk lavere enn dette. Figur 40 viser at måler 7150 viser et relativt konstant poretrykk på 3,2 meter under terrengnivå, i tiden etter at TBM har passert. Det er derfor sannsynlig at måleren ikke klarer å måle lavere poretrykk, selv om poretrykket kanskje var lavere enn det som har blitt registrert. Det kan derfor bli feilaktig å sammenlikne laveste målte poretrykk i løsmasse ved Nordstrand og Snipetjern. Hvis poretrykket i måler 7150 hadde blitt målt lenger ned i dypet kunne de virkelige verdiene for poretrykket blitt lest av. Det er mulig at poretrykket her faktisk har vært like lavt som ved Nordstrand, men ytteligere konklusjoner om dette er ikke mulig å trekke.

Spørsmålet er om poretrykket ved Snipetjern hadde re-etablert seg raskere hvis det hadde vært infiltrasjonsbrønner i området. Det er mulig at grunnforholdene ved Snipetjern avviker så mye fra Nordstrand at det ikke hadde hatt noen betydning. Likevel ble de to områdene Nordstrand og Snipetjern valgt til sammenlikning fordi forundersøkelsene viste liknende grunnforhold. Det er derfor grunn til å anta at infiltrasjonsbrønnene har en betydning. Det er sannsynlig at tverrforbindelsene ved Snipetjern, samt vannlekkasjene i tunnelene, kan ha vært med på å forsinke at poretrykket steg igjen etter at TBM-ene hadde passert. Det er ikke mulig å se

hvordan dette påvirker poretrykket, annet enn at poretrykkene bruker lang tid på å re-etableres omkring sine opprinnelige nivå. Hvis vannmengdene som lakk inn i tunnelene ved Snipetjern var større enn vannmengdene som eventuelle infiltrasjonsbrønner kunne tilført, antas det at vanninfiltrasjon uansett ikke ville vært tilstrekkelig tiltak for å opprettholde poretrykket i området.

Poretrykkmåler 7832, som er lokalisert i borehull i fjell ved Snipetjern, viste en poretrykkreduksjon fra 0 meter til -55 meter i løpet av tiden TBM-ene passerte. Laveste målte poretrykk i Nordstrandsområdet er -24 meter. Det er kanskje sannsynlig at poretrykket på Nordstrand ville ha fortsatt å synke hvis det ikke hadde vært for infiltrasjonsbrønnene. Det er også mulig at ulike grunnforhold spiller inn.

Det kan være viktig å bemerke at det er større avstand mellom de studerte poretrykkmålerne ved Snipetjern enn på Nordstrand. Dette kan også gjenspeiles i at poretrykkkurvene ved Snipetjern når sine laveste målte verdier på ulike tidspunkt, fordi TBM-ene befant seg ved de ulike poretrykkmålerne til forskjellig tid. Likevel, hvis responsen på forbi-passering av TBM-ene hadde vært liknende som på Nordstrand, burde bunnpunktene til poretrykkkurvene vært forskjøvet i forhold til hverandre. Dette gir ingen grunn til at poretrykkene på hver lokasjon skal bruke så lang tid på å øke igjen. Det antas derfor at infiltrasjonsbrønnene har en betydning.

Det må også gjøres oppmerksom på at det i fremstillingen i figur 40 kun har blitt beregnet avstand til én av TBM-ene i hver retning. De to andre TBM-ene vil også påvirke poretrykket, og avstandsfremstillingen kan derfor være noe misvisende. Det antas likevel at figur 40 viser hovedtrekkene. Det ble plukket ut poretrykkmålere som viste relativt stor reaksjon på forbi-passering av TBM. Det foreligger ikke nok informasjon til å sammenlikne grunnforholdene hvor poretrykkmålerne er plassert. Ideelt sett ville det vært ønskelig å studere poretrykkmålere som er plassert i liknende grunnforhold på de to stedene, så langt det er mulig.

6.4 Influensområder for infiltrasjonsbrønnene på Nordstrand

Poretrykkmålerne i fjell viser lite sammenheng mellom avstand til infiltrasjonsbrønnene og økning i poretrykk (figur 41 og figur 43). I bergmasse begrenses vannstrømming til sprekker

og åpninger. Derfor er det mulig at det er god kommunikasjon mellom infiltrasjonsbrønnene og målerne 4003 og 4720, til tross for at de befinner seg nesten 400 meter unna infiltrasjonsbrønnene. På samme måte kan det være lite kommunikasjon mellom området der poretrykkmåler 5004 er plassert og infiltrasjonsbrønnene. Hvis det er oppsprekking langs tunneltraséen er det også mulig at TBM-ene kan ha påvirket poretrykket ved måler 5004, selv om de var over 300 meter unna området. Resultatene for poretrykkmålere i borehull i fjell ser dermed ut til å stemme overens med teori om vann i berg, og avhenger sterkt av grunnforholdene som er tilstede.

For løsmasser ble det antatt at de største økningene i poretrykk ville oppstå nærme infiltrasjonsbrønnene, med mindre og mindre påvirkning lenger unna. Dette er derimot ikke tilfellet for resultatene som figur 42 og figur 43 viser. Spesielt poretrykkmåler 5007, som befinner seg omtrent 100 meter fra infiltrasjonsbrønn 3C og i underkant av 250 meter fra infiltrasjonsbrønn 2A, ser ikke ut til å ha respondert tydelig på vanninfiltrasjonen. Det samme gjelder måler 5721. Poretrykkmåler 5722 viser ingen poretrykkøkning i perioden. Hvis det er mangelfull forbindelse mellom sprekke i bergmassen under løsmassene og infiltrasjonsbrønnen vil sannsynligvis ikke poretrykket øke i løsmassene på overflaten. Dette stemmer overens med at poretrykket i fjell målt i nærheten øker lite. For å kartlegge infiltrasjonsbrønnenes influensområder i løsmasser bedre kunne det vært etablert flere poretrykkmålere nærmere infiltrasjonsbrønnene.

Poretrykkøkningene skyldes ikke nødvendigvis kun vanninfiltrasjonen. Variasjonen i poretrykk kan også skyldes nedbør, mye fordampning eller andre naturlige variasjoner. Det er også sannsynlig at flere svakhetssoner og sprekker ikke har blitt oppdaget i forundersøkelsene, eller at noen av de kartlagte sonene ikke er vannførende.

Det kan diskuteres hvorvidt tidsperioden fra infiltrasjonsbrønnene ble satt i drift (2. august 2017) til 20. august 2017 gir et representabelt bilde av hvordan vanninfiltrasjon fører til økte poretrykk. Som tidligere beskrevet er det også mulig at TBM-ene kan ha påvirket poretrykket i lenger distanse enn det som ble antatt. En annen faktor er at det kanskje burde det vært sett på prosentvis økning i poretrykk i figur 41, figur 42 og figur 43, i stedet for økning i meter. Dette ville muligens gitt et mer representativt bilde, da noen av poretrykkmålerne viser større naturlige poretrykkvariasjoner enn andre. Figur 43 viser poretrykkøkning som funksjon av avstand til infiltrasjonsbrønnene. På figuren kunne det også vært tilført data fra andre områder

langs Follobanen hvor det er vanninfiltrasjon. Flere data kunne kanskje gitt bedre sammenhenger mellom poretrykk og avstand til infiltrasjonsbrønnene. Dermed kunne det kanskje vært lettere å studere infiltrasjonsbrønnenes influensområder.

6.5 Setninger i det studerte området på Nordstrand

Figur 44 og figur 45 viser at setningsutviklingen sammenfaller med reduksjon av poretrykk. Dette stemmer godt overens med formel 8 i kapittel 2.7, som viser hvordan komprimering av masser kan oppstå ved avtakende poretrykk. Punktene i kurvene i figur 44 og figur 45 viser hvilke datoer målingene er utført. Setningsutviklingen mellom to måletidspunkt er fremstilt lineært i figur 44 og figur 45. Korrekt fremstilling er ikke mulig i dette tilfellet, da setningsutviklingen mellom målepunktene er ukjent. Figurene er derfor noe misvisende, men gir likevel gode indikasjoner.

Follobanen kan ikke ha forårsaket alle setningene som er målt på Nordstrand, da setningsforløpet startet to år før TBM-ene nådde området. Poretrykkfallet målt i juli 2015 henger sammen med setningsmålingene utført med nivellering og InSAR. Dette var over et år før TBM-ene startet å bore Follobanetunnelen. I dette tilfellet kan det derfor konkluderes med at det har oppstått setninger på Nordstrand som ikke skyldes Follobaneprosjektet. Likevel kan det se ut som ytterligere setninger har oppstått når tunnelboremaskinene har nærmet seg området og passert. Figur 45 viser at setninger sammenfaller med poretrykkreduksjonen som oppsto da TBM-ene passerte. Både nivellement-målingene og InSAR-dataene viser setningsutvikling på samme tid. Det er derfor naturlig å anta at noen av setningene kan skyldes tunnelboremaskinens forbipassering.

Figur 46 viser totale setninger rundt poretrykkmålerne 4857 og 4013, i hele måleperioden fra april 2014 til mai 2018. Kartet inkluderer derfor også setningsmålinger fra før TBM-ene nådde området. De største setningene oppstår 20 - 60 meter vest og sør-vest, samt 80 meter sørøst, for poretrykkmålerne 4857 og 4013. Som vist på Figur 33 består dette området av løsmasser med tykkelser over 10 meter. Dette kan være en av grunnene til at de største setningene oppstår her.

InSAR-dataene og målingene med nivellering ser ut til å stemme relativt bra overens. Likevel ser nivellement-målingene ut til å være mer stabile, da målingene utført med InSAR viser

større variasjon i terrengnivå mellom måletidspunktene. Til tross for dette kan det se ut til at begge de to målemetodene viser hovedtrekkene i setningsutviklingen, fordi de viser liknende setningsforløp.

6.6 Responstid i løsmasser

Som tidligere beskrevet er permeabiliteten i leirer lav, mens løsmasser med større kornstørrelser kan ha høyere permeabilitet. Derfor vil det permeable laget i overgangen mellom fjell og løsmasser i Oslo-området mest sannsynlig ha høyere permeabilitet enn den marine leira ovenfor. Dette gjenspeiles i figur 47. Poretrykkmåler 4857-2, som er plassert i løsmassene rett ovenfor fjell, viser svært rask respons på vanninfiltrasjonen og påvirkning av TBM. Tilfellet for 4857-1 er noe annerledes. Måleren er plassert i leire, og fordi slike masser er tettere og mindre permeable, har poretrykkkurven en tregere responstid. Dette viser seg både da vanninfiltrasjonen ble slått på, og da TBM beveget seg forbi området. Responstiden avhenger altså av permeabiliteten til løsmassene som er tilstede. Det er også grunn til å tro at diskontinuiteter i bergmassen påvirker responstiden i løsmasser. Infiltrasjonsbrønnen og løsmassene må være i kontakt via sprekker og åpninger i bergmassen for at infiltrasjonsbrønnen skal kunne ha effekt i løsmassene. Dette sier imidlertid ikke figur 47 noe om.

6.7 Generell diskusjon

Betongelementene som monteres som sikring i tunnelene fører tilsynelatende til at tunnelene blir vanntette. Dette ses fordi poretrykket er på vei opp til sine opprinnelige nivå i alle de studerte poretrykkmålerne, både på Nordstrand og ved Snipetjern, i større eller mindre grad. Om alle poretrykkene vil re-etableres på sine opprinnelige nivå er vanskelig å konkludere med, da det ikke har gått lang nok tid til at alle har stabilisert seg.

Infiltrasjonsbrønn 2D er den eneste infiltrasjonsbrønnen hvor det ble observert på poretrykkmålerne omkring at infiltrasjonsraten økte. Ut fra dataene og resultatene som foreligger er det ikke mulig å konkludere med hvilke infiltrasjonsrater som er best egnet til å øke poretrykket omkring. En av grunnene til dette kan være at vanntrykket i det offentlige vann- og avløpsnett er begrenset.

Det ses indikasjoner på at de drenerte tverrtunnelene mellom TBM-løpene fører til at poretrykkene har avtatt. Dette gjelder særlig poretrykket i fjell ved Nordstrand, og kan også

ses i noen av målerne i løsmasser. I tre av målerne i fjell hadde poretrykket fortsatt ikke re-etablert seg på opprinnelig nivå ved slutten av den studerte perioden. Resultatene antyder at det er grunn til å tro at poretrykket ved Snipetjern hadde steget raskere om tverrforbindelsene ikke hadde blitt åpnet. Bedre informasjon om grunnforholdene, både oppsprekking og løsmasser, kunne ha gitt bedre forståelse av poretrykkutviklingen i grunnen i begge de studerte områdene.

Vanninfiltrasjon i forbindelse med tunneldriving krever store vannmengder. Det kan diskuteres om infiltrasjon for å hindre setningsskader og drenering er en god utnyttelse av drikkevann. En fordel ved å benytte drikkevann i Norge er at drikkevannet har god kvalitet, og dermed er risikoen lav for å forurense grunnvannet. Likevel er rent vann en knapp ressurs. Dette gjelder særlig i andre deler av verden. I områder med lavere vanntilgang enn i Norge er ikke nødvendigvis vanninfiltrasjon et godt bruksområde for rensset drikkevann. Her kan heller andre tiltak for å unngå poretrykkreduksjoner tas i bruk når en tunnel skal drives. Selv om vanninfiltrasjon ikke er ment å være et permanent tiltak, er det eksempler på at vanninfiltrasjonsanlegg har vært i drift i mange år i Norge og Sverige. Til tross for dette kan også setningsskader på hus og infrastruktur føre til store miljøbelastninger. En viktig faktor bør være at tunnelen blir tett, slik at vanninfiltrasjonen kun er i drift i de sårbare periodene. Kanskje er vanninfiltrasjon i forbindelse med dobbeltskjold TBM en fordel, fordi tunnelen blir vanntett når den er ferdig. Dette fører til at vanninfiltrasjonen kun behøves når TBM-ene passerer.

7 KONKLUSJON

Basert på resultatene og litteraturstudiet trekkes følgende konklusjoner om vanninfiltrasjon langs Follobanetraséen:

- Resultatene viser at poretrykket i fjell i områder både med vanninfiltrasjon (Nordstrand) og uten vanninfiltrasjon (Snipetjern) reduseres når tunnelboremaskinene passerer. Likevel kan det se ut til at poretrykket reduseres mer i fjell ved Snipetjern enn ved Nordstrand. Det tar også lenger tid før poretrykket øker tilbake til sine opprinnelige nivå ved Snipetjern enn ved Nordstrand etter at TBM-ene har passert.
- Det ser ut til at dobbeltskjold TBM fører til at tunnelene blir relativt vanntette, da poretrykket øker både i området med vanninfiltrasjon og i området uten vanninfiltrasjon etter at TBM-ene har passert.
- Poretrykket i både fjell og løsmasser bruker lenger tid på å stabilisere seg på normalt nivå ved Snipetjern enn ved Nordstrand etter at TBM-ene har boret forbi. Hendelser i tunnelene og grunnforhold kan forklare dette, men det er også sannsynlig at infiltrasjonsbrønnene har en betydning. Grunnen til dette er at det ble sett økninger i poretrykk i både fjell og løsmasser på Nordstrand da infiltrasjonsbrønnene ble satt i drift.
- Ut fra resultatene er det vanskelig å si hvilken betydning de drenerte tverrforbindelsene mellom tunnellopene har. Det ser ut til at tverrforbindelsene fører til reduksjoner i poretrykk, men likevel er poretrykkene både ved Nordstrand og Snipetjern på vei tilbake mot sine opprinnelige nivå.
- Det ser ut til å være forbindelse mellom mange av poretrykkmålerne og infiltrasjonsbrønnene på Nordstrand. Resultatene viser at vanninfiltrasjon øker poretrykket i både fjell og løsmasser. Det er vanskelig å trekke konklusjoner om infiltrasjonsbrønnenes influensområder ut fra dataene som foreligger. I poretrykkmålere i borehull i fjell viser resultatene ingen sammenheng mellom avstanden mellom brønn og poretrykkmåler og økning i poretrykk. Det var antatt å

finne at poretrykket i løsmasser øker mer i nærhet til infiltrasjonsbrønnene enn lenger fra, men studien klarte ikke å vise dette. Poretrykket i løsmasser vil også avhenge av poretrykket i fjell. Hvis det ikke er kommunikasjon mellom diskontinuiteter under løsmassene og infiltrasjonsbrønnen vil det bli vanskelig for poretrykket i løsmassene å stige. Dette kan være en av grunnene til at noen av poretrykkmålerne i løsmasser ved Nordstrand ikke viser respons på vanninfiltrasjonen.

- Det er kartlagt setninger på opp til 40 mm (med nivellering) og 55 mm (med InSAR) ved det studerte området på Nordstrand. Store deler av disse setningene oppsto før byggingen på Follobanen ble påbegynt. Follobanen ser derimot ut til å ha forårsaket noen ytterlige setninger, selv om vanninfiltrasjon har vært benyttet. Dette kan bety at det kreves svært mye informasjon om grunnforholdene på forhånd av tunneldrivingen for at infiltrasjonsbrønnene skal treffe de mest avgjørende diskontinuitetene i berg. Dette antas viktig for at infiltrasjonsbrønnene skal ha ønsket effekt. Derfor er forundersøkelser viktig for å anslå grunnforholdene best mulig før tunneldrivingen.
- Resultatene gir ikke svar på hvor mye infiltrasjonsbrønnene faktisk hjelper. Det har oppstått setninger på Nordstrand selv om infiltrasjonsbrønner har vært i drift. Likevel viser studien indikasjoner på at vanninfiltrasjon bidrar til raskere re-etablering av poretrykk etter at TBM-ene har passert. Resultatene gir ikke svar på hvilke infiltrasjonsrater som fungerer best til å heve poretrykk.
- Ved Nordstrand endres poretrykket raskere i morene enn i leirmateriale. Dette stemmer overens med teori.

8 VIDERE ARBEID

Som videre arbeid anbefales:

- Videre undersøkelser for å finne ut hvilke infiltrasjonsrater og –trykk som fungerer best til å heve poretrykk i berg og løsmasser.
- Ved å studere setningsdata for Snipetjern kan det sammenliknes setningsforløp i et område med og uten vanninfiltrasjon.
- Masteroppgaven er fokusert rundt områdene Nordstrand og Snipetjern. For et bedre bilde av vanninfiltrasjonens effekt bør også de andre områdene langs traséen studeres.

9 REFERANSER

- Acciona og Ghella (u. å.) *The Follo Line Project. Tender: EPC TBM*. Oslo: Jernbaneverket.
- AGJV (2016) *Follobanen, Tunnel. TBM Tunnels. Infiltration Wells Report*. Oslo: AGJV.
- AGJV (2017) *Infiltration Wells. Construction Method Statement*. Oslo: AGJV.
- AGJV (u. å.) *Follobanen*. Tilgjengelig fra: <http://agjv.no/no/follobanen> (Hentet: 21. apr. 2018).
- BaneNOR (u. å.-a) *Follo tidslinje*. Tilgjengelig fra: http://www.banenor.no/globalassets/global/bilder/follobanen/pressefoto/hoyopploselig/follo_tidslinje_juli-2016_no.jpg (Hentet: 4. juni 2018).
- BaneNOR (u. å.-b) *Vanninfiltrasjonsbrønn. Prinsippskisse*: Bane NOR.
- Bendiksen, E. et al. (2005) *Miljøundersøkelser i Østmarka. Overvåking av vegetasjon i influensområdet til Romeriksporten 1998-2003*. Oslo: Norsk Institutt for Naturforskning.
- Bentzrød, S. B. (2014) *Da alle plutselig snakket om Nordre Puttjern*. Tilgjengelig fra: <https://www.aftenposten.no/norge/i/gPmaa/Da-alle-plutselig-snakket-om-Nordre-Puttjern> (Hentet: 19. des. 2017).
- Boge, K. (2012) *Lørentunnelen - med byggegrop/påhugg, i Hydrogeologi i berganlegg, Sandefjord*.
- Bonsaksen, M. et al. (2017) *Veiledning for måling av grunnvannstand og poretrykk*. Oslo: Norsk Geoteknisk Forening (NGF). Tilgjengelig fra: <http://ngf.no/wp-content/uploads/2015/03/NGF-melding-6-Poretrykksmåling-2017.pdf>.
- Brattli, B. (2009) *Fysisk og kjemisk hydrogeologi*. 3. utg. Trondheim: Tapir Akademisk Forlag.
- Brattli, B. (2014) *Ingeniørgeologi løsmasse*. Trondheim: NTNU, Institutt for geologi og bergteknikk.
- Brennbekken, G. (2012) *OVA - Majorstuen - tetting av gammel tunnel - Krav til tetting, i Hydrogeologi i berganlegg, Sandefjord*.
- Bruland, A. (2013) *Kompendium i anleggsteknikk. Konstansregning av anleggsmaskiner*. Trondheim: NTNU.
- Carlsson, L. og Gustafsson, G. (1984) *Provpumpning som geohydrologisk undersøkingsmetodik*. Stockholm: Statens råd för byggnadsforskning.
- Cengel, Y. A. og Cimbala, J. M. (2010) *Fluid Mechanics. Fundamentals and Applications*. 2. utg. Singapore: McGraw-Hill Higher Education.
- Cuda, V. og Moizo, F. (2017) *TBM - Overall Ground Water Management*. Oslo: AGJV.
- Davik, K. I. et al. (2002) *Berginjeksjon*. Norsk Forening for Fjellsprenningsteknikk (NFF). Tilgjengelig fra: http://nff.no/wp-content/uploads/2014/01/Haandbok_01.pdf.
- Dick, Ø. B. (2018) *Nivellering*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/nivellering> (Hentet: 6. juni 2018).
- DSB (2016) *Temaveiledning om oppbevaring av farlig stoff. Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap*. Tilgjengelig fra: <https://www.dsb.no/lover/farligestoffer/veiledning-til-forskrift/temaveiledning-om-oppbevaring-av-farlig-stoff/-forebyggende-sikkerhetstiltak--15---krav-til-installasjoner> (Hentet: 6. juni 2018).
- Ejdeling, G. (1978) *Beräkningsmodeller för prognos av grundvattenförhållanden*. Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola.
- Elden, G. H. (2017) *Follobanen. Første tverrforbindelse klar*. Tilgjengelig fra: <http://www.banenor.no/Nyheter/Nyhetsarkiv/2017/follobanen-forste-tverrforbindelse-klar/> (Hentet: 7. nov 2017).
- Emdal, A. (1999) *Introduksjon til geoteknikk*. Trondheim: NTNU Institutt for Geoteknikk.

- Emdal, A. (2014) *Introduksjon til geoteknikk*. Trondheim: NTNU.
- Endre, E. og Sørmo, E. (2015) Identifisering og karakterisering av syredannende bergarter
Veileder for Miljødirektoratet M-310 2015. Oslo: NGI.
- Engineering, F. (u. å.) *Site Investigations*. Tilgjengelig fra:
<http://slideplayer.com/slide/1443432/> (Hentet: 17. des 2017).
- Fetter, C. W. (2001) *Applied Hydrogeology*. 4. utg. New Jersey, USA: Prentice Hall.
- Finnøy, A. (2017) Personlig meddelelse 12. des 2017.
- Fosseide, J. (2018) Personlig meddelelse 22. mai 2018.
- FPS (2014) *The Follo Line, Åsland Rig Area. Data report soil investigations*. Oslo: FPS AS.
- Frengstad, B. (2018) Personlig meddelelse 16. mai 2018.
- Gammelsæter, B. (2018) Personlig meddelelse 25. mai 2018.
- Geokon (u.å.) *Piezometers*. Tilgjengelig fra: <http://www.geokon.com/3400> (Hentet: 19. des 2017).
- Goljoh og Graeli (2014a) *Geotechnical Baseline report*. (The Follo Line Project). Oslo: Jernbaneverket.
- Goljoh og Graeli (2014b) *The Follo Line Project. Concept for pore pressure control*. Oslo: Jernbaneverket.
- Grepstad, G. K. (2017) Personlig meddelelse 3. okt. 2017.
- Grøndal, J. (2017) Personlig meddelelse 3. okt. 2017 og 12. des. 2017.
- Grøndal, J. (2018) Personlig meddelelse 8. mai og 8. juni 2018.
- Grøv, E. (2012) Tiltak - injeksjon, frysing, kalksementpeler, dreneringshull, i *Presentasjon på seminaret «Hydrogeologi i berganlegg» 26.-26. sept. 2012, Sandefjord*.
- Hagland, J. (2009) *Frakturering*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/frakturering> (Hentet: 6. des. 2017).
- Hofstad, K. (2014) *Akvifer*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/akvifer> (Hentet: 19. mai 2018).
- Hognestad, H. O. et al. (2010) *Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg. Håndbok nr. 06*. Oslo: Norsk Forening for Fjelsprengningsteknikk.
- Holmøy, K. H. (2012) Åpning - innledning Romeriksporten - kort fra doktorgraden, i *Presentasjon på konferansen «Hydrogeologi i berganlegg» 25.-26. sept. 2012, Sandefjord*.
- Jernbaneverket (2014a) *The Follo Line, Tunnel Section. Summary geological data report*. Oslo: Jernbaneverket.
- Jernbaneverket (2014b) Follobanen, tunnel. Engineering geological map and profile. Soil., i tegning UFB-30-V-30340, U.-.-V.-., UFB-30-V-30342 (red.). Oslo: Jernbaneverket.
- Jernbaneverket (2014c) Follobanen, tunnel. Geotechnical longitudinal section, i tegning UFB-30-V-30330, U.-.-V.-., UFB-30-V-30332 (red.). Oslo: Jernbaneverket.
- Jernbaneverket (2014d) *The Follo Line project. Geotechnical baseline report*. Oslo: Jernbaneverket.
- Johansen, Ø. (2017) Personlig meddelelse 13. des. 2017.
- Karlsrud, K., Kveldsvik, I. og Snilsberg, P. (2003) *Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta det ytre miljø*. (Miljø- og samfunnstjenelige tunneler). Oslo: Vegdirektoratet.
- Karlsrud, K. (2012) En oppsummering med fokus på forebygging av skader som følge av innlekkasje til tunnelanlegg i urbane områder, i *presentasjon på seminaret «Hydrogeologi i berganlegg» 25. - 26. sept. 2012, Sandefjord*.
- Kværner, J. og Snilsberg, P. (2008) The Romeriksporten railway tunnel — Drainage effects on peatlands in the lake Northern Puttjern area, *Engineering Geology*, 101(3), s. 75-88. doi: 10.1016/j.enggeo.2008.04.002.
- Kværner, J. og Snilsberg, P. (2013) *Hydrological Impacts of a railway tunnel in fractured Precambrian gneiss rock (south-eastern Norway)*. Ås: Bioforsk, Asplan Viak.
- Larsen, H. (2017) *Myr, Store Norske Leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/myr> (Hentet: 9.

- des. 2017).
- Lohman, S. W. *et al.* (1972) *Definitions of Selected Ground-Water Terms - Revisions and Conceptual Refinements*. Washington: United States Government Printing Office.
- Løset, F. (2004) *Sammenheng mellom grunnvannsenkning og tunnellekkasjer*. (Miljø- og samfunnstjenelige tunneler). Oslo: Norges Geotekniske Institutt.
- Magnussen, A. W. og Kveldsvik, V. (2003) *Vanninfiltrasjon - erfaringer og anbefalinger*. (Miljø- og samfunnstjenelige tunneler). Oslo: NGI, Statens Vegvesen.
- Millington, R. J. og Quirk, J. P. (1959) Permeability of porous media, *Nature*, 183, s. 387-388.
- Moizo, F. (2017) *Infiltration Wells. Construction Method Statement*. Oslo: AGJV, Acciona, Ghella.
- Multiconsult (u. å.) *Gardemobanen*. Tilgjengelig fra: <https://www.multiconsult.no/prosjekter/gardemobanen/> (Hentet: 17. des. 2017).
- NGI (2015) *Bruk av Q-systemet. Bergmasseklassifisering og bergforsterkning*. Oslo: NGI.
- NGU (2015a) *InSAR*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/emne/insar> (Hentet: 6. nov. 2017).
- NGU (2015b) *Optisk Televiwer (OPTV)*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/emne/optisk-televiwer-optv> (Hentet: 7. nov. 2017).
- NGU (2015c) *Strukturelle og kinematiske analyser*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/emne/strukturelle-og-kinematiske-analyser> (Hentet: 17. des. 2017).
- NGU (2016) *Geoteknikk og grunnvann*. Tilgjengelig fra: http://www.grunnvanninorge.no/geoteknikk_setningsskader.php (Hentet: 18. des. 2017).
- NGU (2017) *Løsmasser. Nasjonal løsmassedatabase*. Tilgjengelig fra: <http://geo.ngu.no/kart/losmasse/> (Hentet: 2. des. 2017).
- NIBIO (2018) Beskyttet nettside for poretrykkovervåking på Follobanen (Hentet: 15. mai 2017).
- Nilsen, B. og Broch, E. (2012) *Ingeniørgeologi - berg, Grunnkurskompendium*. Trondheim: NTNU, Institutt for geologi og bergteknikk.
- Nordgulen, Ø. og Andersen, A. (2013) *Landet blir til - De eldste bergartene dannes*. 2. utg. Trondheim: Norsk Geologisk Forening.
- Olesen, O. og Rønning, J. S. (2018) *Seismiske metoder*. Tilgjengelig fra: <http://www.ngu.no/emne/seismiske-metoder> (Hentet: 4. juni 2018).
- Olsson, R. (2012) *Grunnvann i bergmasse, i presentasjon på seminaret «Hydrogeologi i berganlegg» 25.-26. sept. 2012, Sandeffjord*.
- Pules, A. (2018) Personlig meddelelse 4. juni 2018.
- Ramstad, R. K. (2017) Personlig meddelelse 30. nov. 2017.
- Ramstad, R. K. (2018) Personlig meddelelse 15. mai 2018.
- SebaHydrometrie (u. å.) *Data Logger Dipper-PT Relative Pressure*. Tilgjengelig fra: https://www.seba-hydrometrie.com/products.html?L=1&tx_sebaproducts_sebaproducts%5Bproduct%5D=11&tx_sebaproducts_sebaproducts%5Bprimarycategory%5D=1&tx_sebaproducts_sebaproducts%5Bsecondarycategory%5D=&tx_sebaproducts_sebaproducts%5Baction%5D=show&tx_sebaproducts_sebaproducts%5Bcontroller%5D=Product&cHash=188c4d73679b5dd5ef55064c73b6bf24 (Hentet: 28. mai 2018).
- Skjærstad, E. M. (2013) *Vannbehandling*. Tilgjengelig fra: <https://www.norskvann.no/index.php/vann/vannbehandling> (Hentet: 8. des. 2017).
- Solberg, I. *et al.* (2011) *Veileder for bruk av resistivitetsmålinger i potensielle kvikkleireområder*. Trondheim: NGU.
- Spross, J. (2009) *Mätning av inläckande vatten i bergtunnlarna inom projekt Norra länken*.

- Stockholm: Trafikverket.
- Storrø, G., Elvebakk, H. og Rønning, J. S. (2002) *Tunnelprosjektet: Hydraulisk testing av borehull i fjell i Grualia, Lunner kommune*. Oslo: Statens Vegvesen.
- Sundqvist, U. (2006) *Västlänken - en tågtunnel under Göteborg*. Göteborg: Banverket.
- Syversen, F. (2017) Personlig meddelelse 1. nov. 2017 og 17. des. 2017.
- Tre-Altamira (u. å.) *Measuring surface motion*. Tilgjengelig fra: <http://tre-altamira.com/technology/-insar-and-dinsar> (Hentet: 17. des. 2017).
- Trømborg, D. (2006) *Geologi og landformer i Norge*. Tønsberg: Landbruksforlaget.
- Tuttle, K. (2012) Målinger - i forkant av og under prosjekter, i *presentasjon på seminaret «Hydrogeologi i berganlegg» 25.-26. sept., Sandefjord*.
- Vegdirektoratet (2014) Håndbok R211, Feltundersøkelser 15.213 *Totalsondering*. Oslo: Statens Vegvesen.
- Vegdirektoratet (2016) *Veggtunneler*. Håndbok N500. Oslo: Vegdirektoratet.
- Vegvesen, S. (1997) Feltundersøkelser. Retningslinjer. Håndbok R211. Oslo: Vegdirektoratet.
- Vegvesen, S. (2011) *Slik blir en tunnel bygget*. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/vegprosjekter/ringvegvest/Fakta/Tunnelbygging> (Hentet: 17. des. 2017).
- Vegvesen, S. (2016) *Injeksjon*. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/fag/teknologi/Tunneler/bygging-og-sikring/Injeksjon> (Hentet: 8. des. 2017).
- Veslegard, G. og Simonsen, A. S. (2014) *State of the art Boreteknikk. Begrensning av skader som følger av grunnarbeider*. Oslo: NGI.
- Vorren, T. O. et al. (2007) *Landet blir til - Norge av i dag trer fram*. Trondheim: Norsk Geologisk Forening.
- Vägverket (u.å.) *Södra Länken - en ny trafikled i Stockholm*. Tilgjengelig fra: https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/10525/RelatedFiles/88459_Sodra_lanken_en_ny_trafikled_i_stockholm.pdf.
- Vöge, M. (2018) *InSAR Follobanen. Baseline Data Report*. Oslo: ÅF Engineering.
- Østerås, K. (2012) *Tunnel Lysaker-Sandvika. Oppfølging av poretrykk og setninger*. Skøyen: Multiconsult.
- Ånensen, K.-A. (2012) *Follobanen, Tunnel section. Substructures. Geotechnical evaluations regarding settlements*. Oslo: Aas-Jakobsen.

VEDLEGG

Vedlegg 1: Berggrunnskart over Follobanetraséen.....	2
Vedlegg 2: Løsmassetykkelser langs Follobanetraséen.....	6
Vedlegg 3: Borelogger for infiltrasjonsbrønnene langs Follobanen.....	10
Vedlegg 4: Lugeonmålinger for infiltrasjonsbrønnene langs Follobanen.....	35

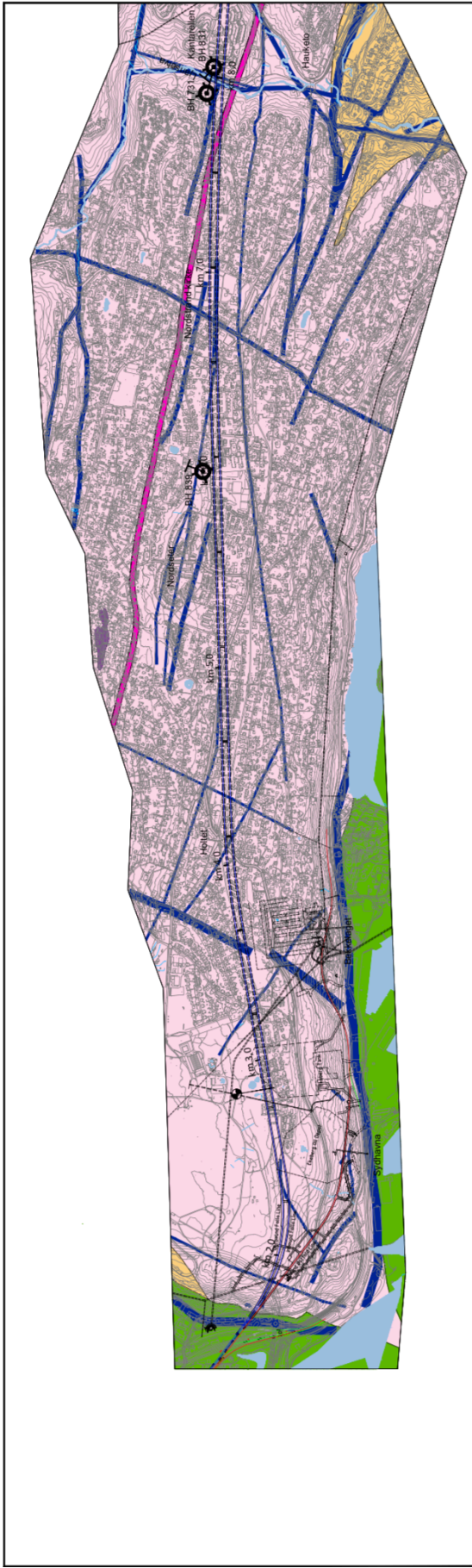
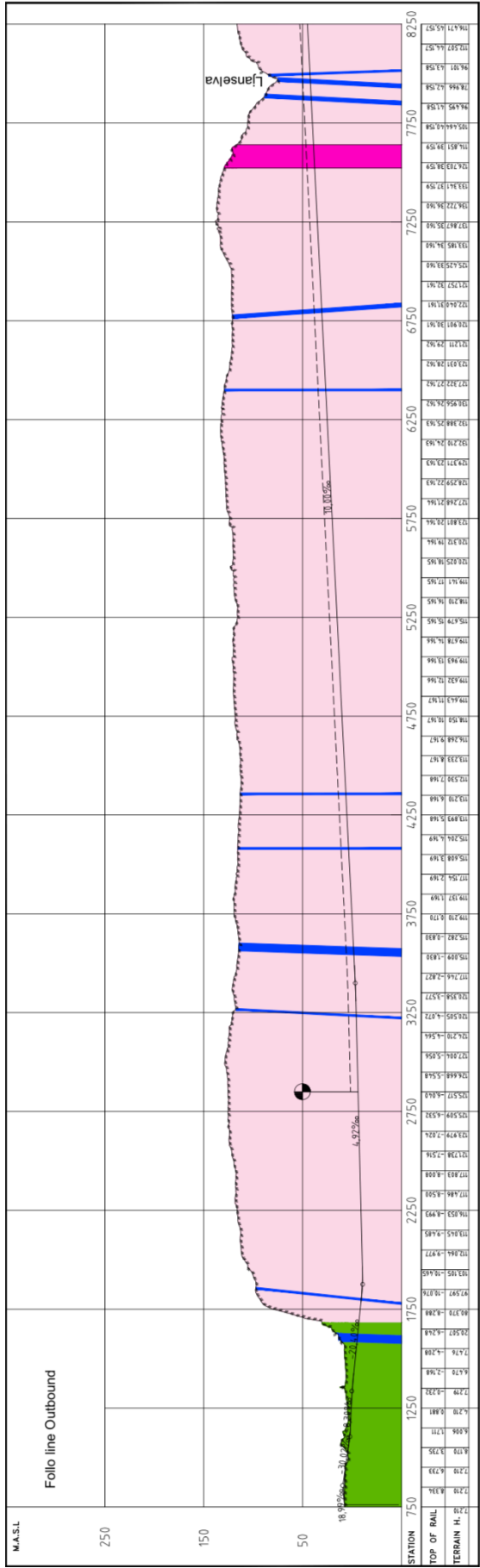
Digitale vedlegg:

- Data benyttet i oppgaven (poretrykk, infiltrasjonsbrønner, fremgang TBM-er, nedbør, åpning av tverrforbindelser, setningsmålinger)
- Koordinater benyttet i oppgaven (TBM, poretrykkmålere, infiltrasjonsbrønner)
- Berggrunnskart over Follobanetraséen
- Løsmassetykkelser langs Follobanetraséen
- Borelogger for infiltrasjonsbrønnene langs Follobanen
- Lugeonmålinger for infiltrasjonsbrønnene langs Follobanen

Vedlegg 1

Berggrunnskart over Follobanetraséen, basert på forundersøkelser (Jernbaneverket, 2014c).

Kartet består av tre deler. Kartet er også lastet opp som digitalt vedlegg for bedre oppløsning.



DEFINED SCALE APPLIES TO ALL FORMATS

138	Revised for tender	18.06.2016	JK	ESS	AKB
139	Issued for tender	27.02.2013	ISS/OSC	PE20	SOA
	Drawn by			Checked by	Approved by
	Drawn for			Checked by	Approved by
	Project	Follo Line, Tunnel			
	Project no.	10420 LAL3			
	Project name	V-13300			
	Project description	Engineering geological map and profile. Bedrock			
	Project location	Kjeller, Oslo, Norway			
	Project scale	1:200			
	Project status	Final			
	Project number	UPB-30-V-30330			
	Project name	The Follo Line Project			
	Project type	Tunnel			
	Project number	UPB-30-V-30330			
	Project name	The Follo Line Project			

Legend

- Core drilling** (Symbol)
- Weakness zones**
 - Width: 1-5 m (Blue line)
 - Width: 5-10 m (Blue line)
 - Width: >10 m (Blue line)

The location, orientation and width of weakness zones are based on interpretation and can differ from drawing.

Weakness zones with assumed width < 1 m are not drawn

Legend

- Rhomb porphyry** (Pink)
- Shale and limestone** (Green)
- Granodioritic gneiss** (Light blue)
- Tonalitic to granitic gneiss** (Light purple)
- Biotite-rich augen gneiss** (Light yellow)
- Quartz-feldspar-rich gneiss** (Light green)
- Amphibolite** (Dark green)

Inclusions of amphibolite and pyroxenite not shown

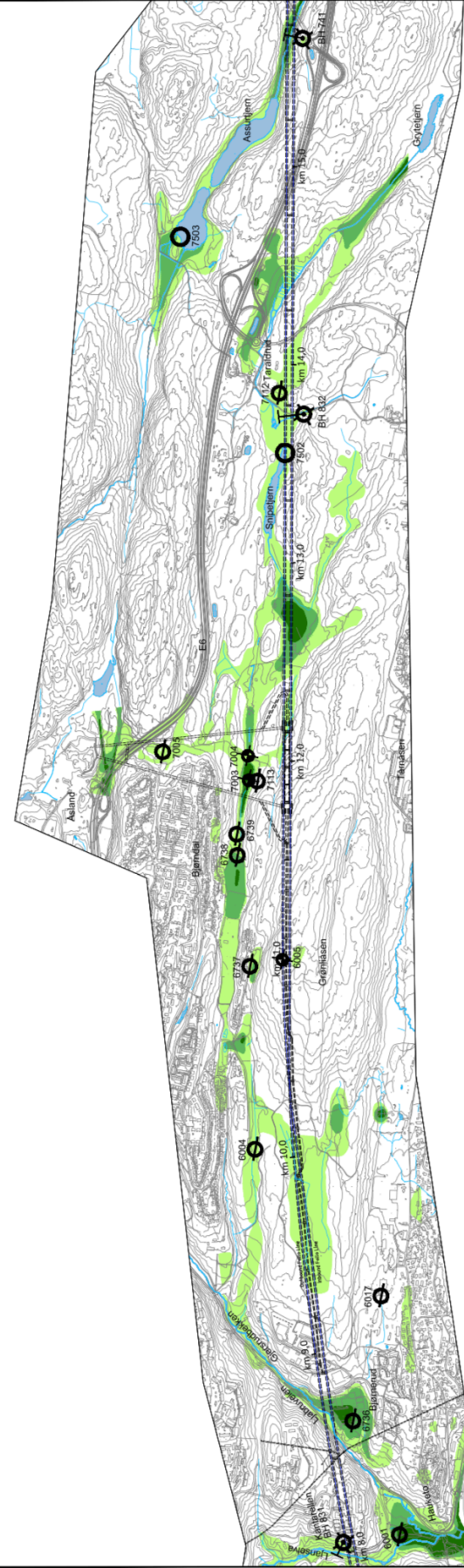
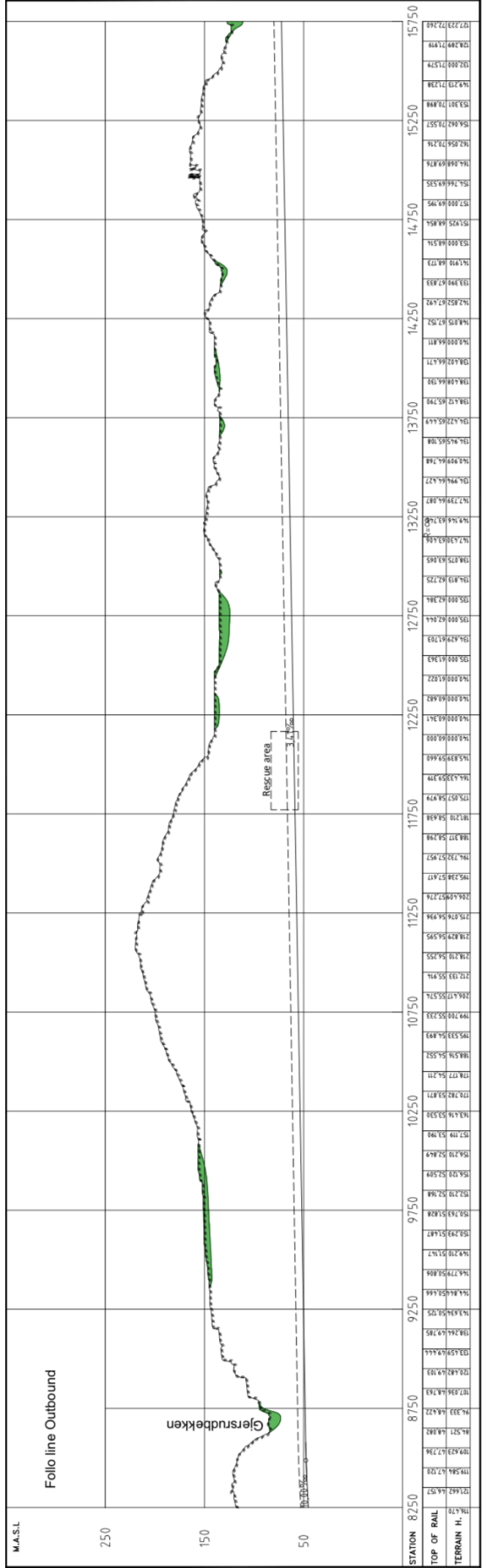
Map source: Oslo kommune og Hørgedigitalt
System of coordinates: Core (89UTM) zone 32 (Nor.)
NAD54 (vert.)

Accepted
Accepted w/ comments
Not accepted (comments)
Revise and resubmit
For information

Sign: _____

Vedlegg 2

Løsmassetykkelser langs Follobanetraséen, basert på forundersøkelser (Jernbaneverket, 2014b). Kartet består av tre deler. Kartet er også lastet opp som digitalt vedlegg for bedre oppløsning.



DEFINED SCALE APPLIES TO A1 FORMAT

Legend

Estimated soil thickness

- Depth <1 m (or no registration)
- Depth: 1-5 m
- Depth: 5-10 m
- Depth >10 m

Accepted
 Accepted w/comments
 Not accepted (comments) Revise and resubmit
 For information

Cone drilling
 Pore pressure gauge
 Well drill hole in rock ("energy well")
 Surface water level observation

Rescaled for tunnel
 Newest for line
 Follo Line, Tunnel
 Engineering geological map and profile. Soil
 K16 8.0 - 15.5
 Project: The Follo Line Project
 Area: Tunnel
Jernbaneetaten

Map source: Oslo kommune og Norge digitalt
 System of coordinates: Euref 89/UTM zone 32 (Nor-
 NIN954, UTM)

The complete list of water level measurements is found on webpage:
http://bioweb7.biforsk.no/folobanen_grunnvann

Vedlegg 3

Borelogger for infiltrasjonsbrønnene langs Follobanen. Brønnene er boret av Østfold Brønnboring. Boreloggene er også lastet opp som digitalt vedlegg.

Etternavn:

Prosjekt:

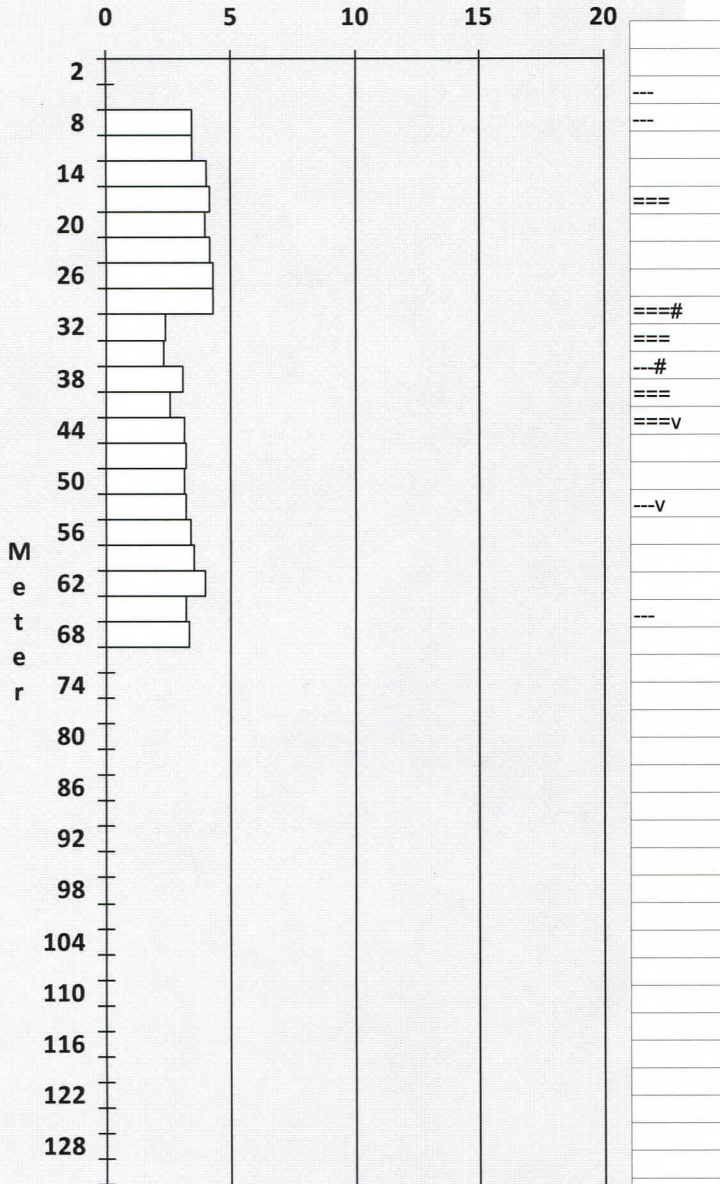
Fornavn:

Prosjekt ansvarlig:

Brønn ID:

Borelogg

Minutter



Dato:

Kartblad:

Rute:

Retning:

Grader:

Brønndybde:

Brønn Ø:

Foring LM:

Foring Ø:

Vannspeil: m.

Merknader:

Brønnen er navnet IW-1B og boret av Robert/Ole Petter. Forholdsvis ujevnt fjell og bore i. Det er registrert rasfarlige områder 89 31 og 38 lm. Vanninnslag på 43 og 52 meter. Brønnen er boret for event. vanninfiltrasjon for å unngå setningsskader.

Etternavn:

Prosjekt:

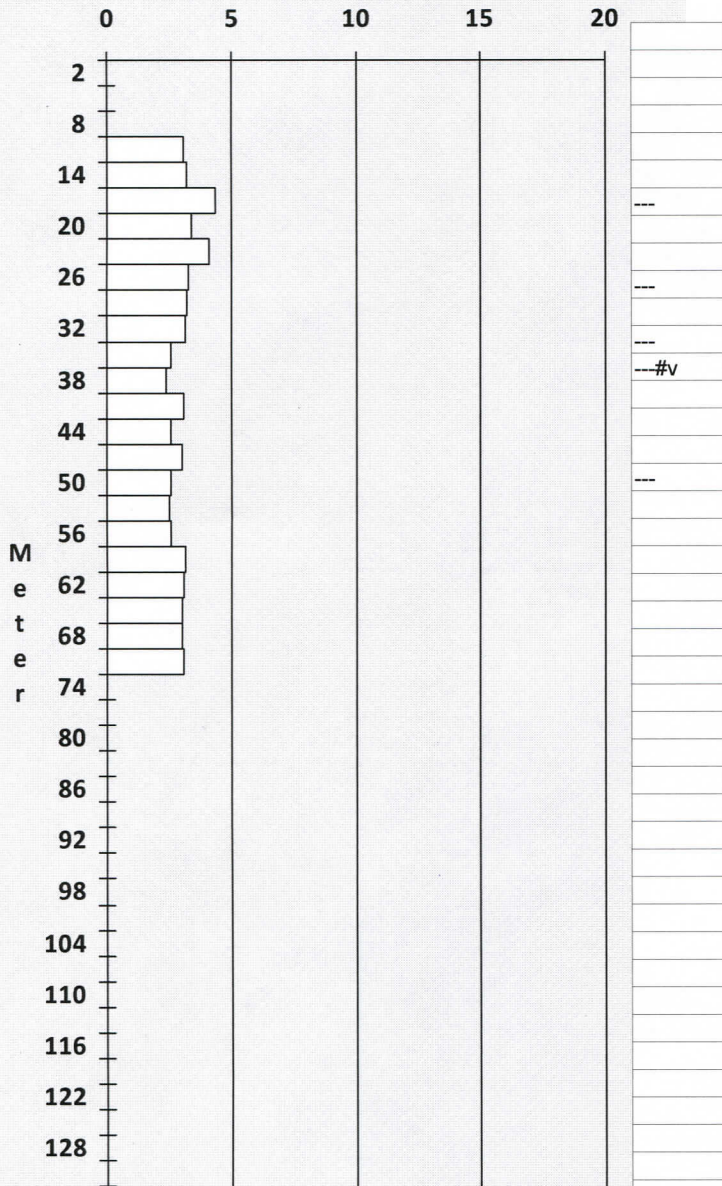
Fornavn:

Prosjekt ansvarlig:

Brønn ID:

Borelogg

Minutter



Dato:

Kartblad:

Rute:

Retning:

Grader:

Brønndybde:

Brønn Ø:

Foring LM:

Foring Ø:

Vannspeil: m.

Merknader:

Brønnen er navnet IW-1C og er boret av Robert/Ole Petter. Forholdsvis homogent berg å bore i, bortsett fra et område på ca 38 lm. Her var det vanninnslag og området er markert som rasfarlig. Brønnen er boret for event. vanninfiltrasjon for å unngå setningsskader.

Etternavn:

Prosjekt:

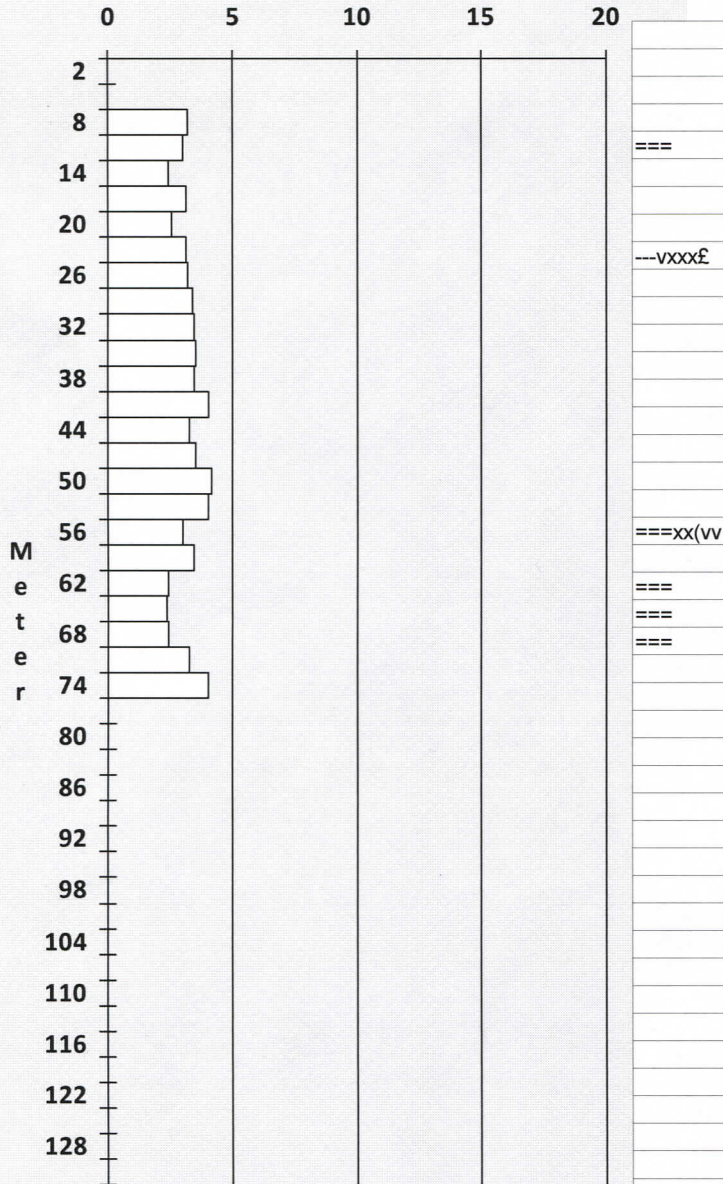
Fornavn:

Prosjekt ansvarlig:

Brønn ID:

Borelogg

Minutter



Dato:

Kartblad:

Rute:

Retning:

Grader:

Brønndybde:

Brønn Ø:

Foring LM:

Foring Ø:

Vannspeil: m.

Merknader:

Brønnen er navnet IW-1D og er boret av Martin/Joachim. Det er registrert vanninnslag og rasfarlig område på ca 25 lm. det er også registrert et område med mere vann og sprekker på ca 55 lm, men dette området er ikke vurdert som rasfarlig. Brønnen er boret for vanninfiltrasjon for å unngå setningskader.

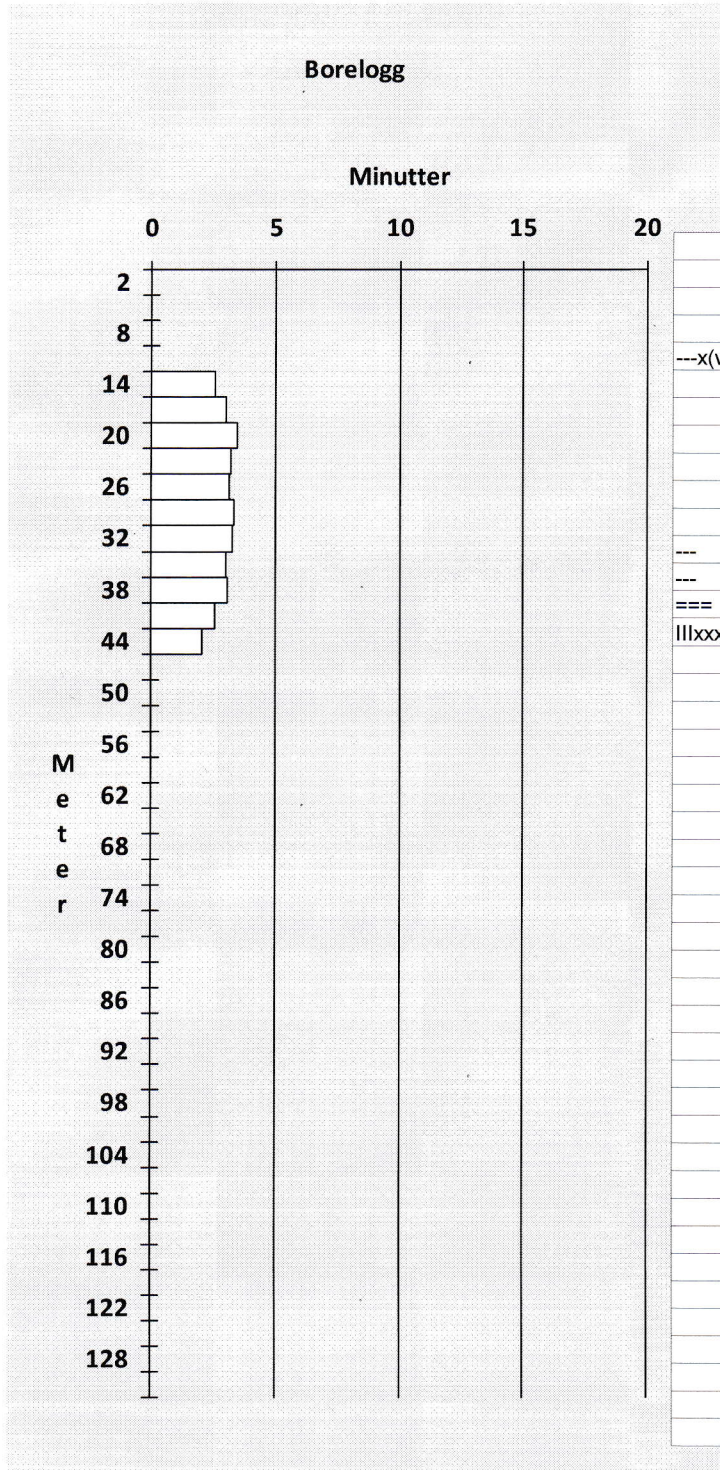
Etternavn:

Prosjekt:

Fornavn:

Prosjekt ansvarlig:

Brønn ID:



Dato:

Kartblad:

Rute:

Retning:

Grader:

Brønndybde:

Brønn Ø:

Foring LM:

Foring Ø:

Vannspeil: m.

Merknader:

Brønn for vanninfiltrasjon IW 2B
 Løsmassene består av ca 7m fast leire. Deretter bløt leire til ca 9,5m, så 1,5m grus/morene. Foringen er boret 1m ned i berg og tettet med Waterplug. Sprekk med fuktighet på ca. 13,5m. Deretter homogent berg ned til ca. 35m. Deretter noe mere sprekker før vi kommer til knusningssone og store vannmengder på 43 til 44m. Vanngiverevnen er anslått til over 10000 l/t. Brønnen er boret av Martin/Kenneth.

Etternavn:

Prosjekt:

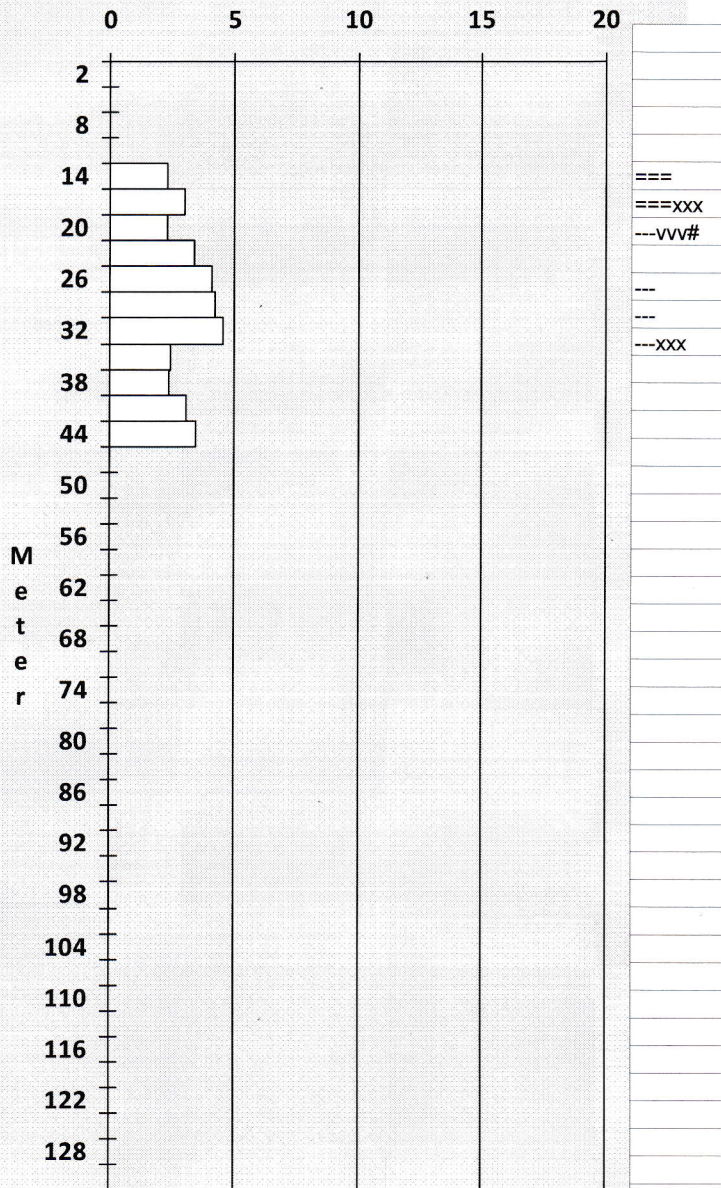
Fornavn:

Prosjekt ansvarlig:

Brønn ID:

Borelogg

Minutter



Dato:

Kartblad:

Rute:

Retning:

Grader:

Brønndybde:

Brønn Ø:

Foring LM:

Foring Ø:

Vannspeil: m.

Merknader:

Brønn for vanninfiltrasjon IW2C
 Løsmassene består av 4m fast leire, så bløt leire til berg som ble truffet på ca 11m. Foringen er boret 1m ned i berg og tettet med Waterplug. Sprekker og vannslag fra 20 til 23m. Deretter nye sprekker og vannslag på ca 35m. Vannmengde er anslått til ca. 3 - 4000 l/t. Brønnen er ikke vurdert som rasfarlig. Boringen er utført av Martin/Kenneth.

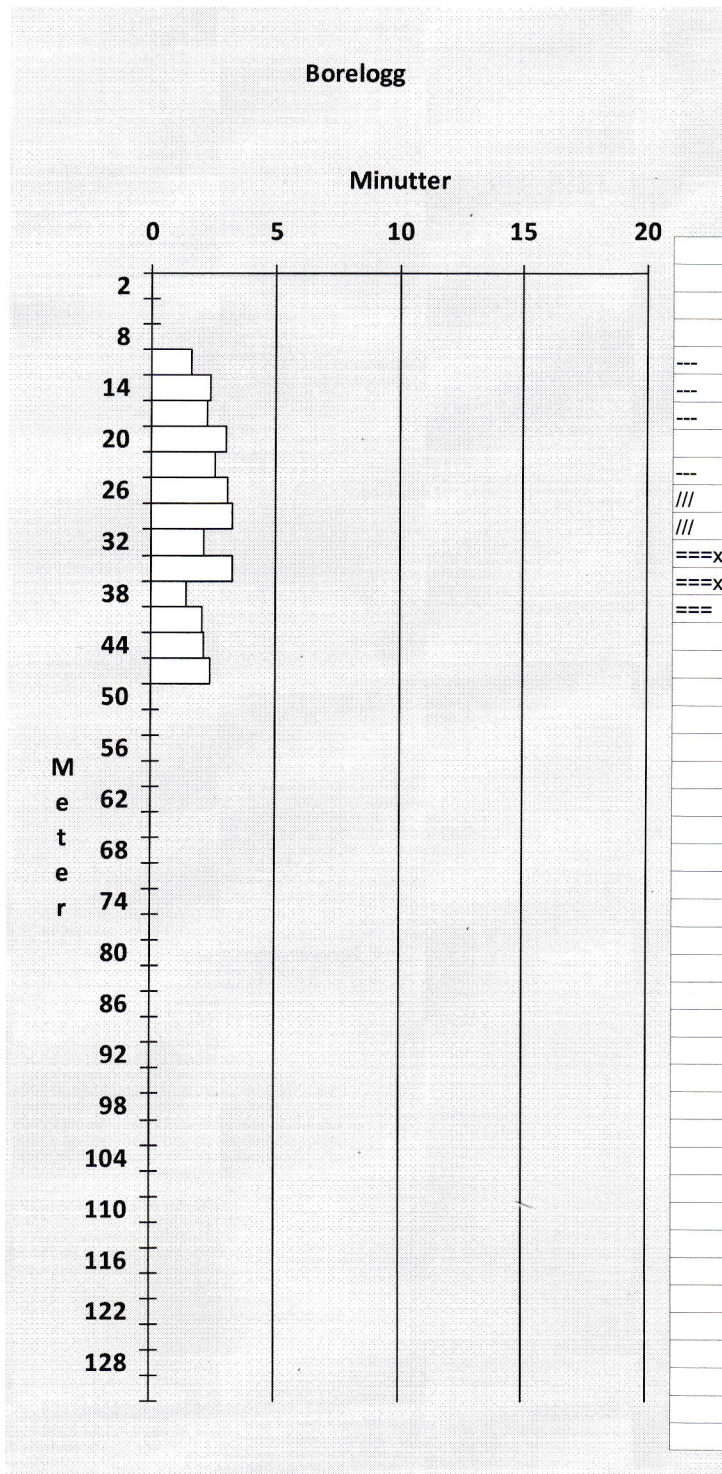
Etternavn:

Prosjekt:

Fornavn:

Prosjekt ansvarlig:

Brønn ID:



Dato:

Kartblad:

Rute:

Retning:

Grader:

Brønndybde:

Brønn Ø:

Foring LM:

Foring Ø:

Vannspeil: m.

Merknader:

Brønn for vanninfiltrasjon IW3A
 Løsmassene består av tilkjørte masser på toppen, deretter leire. Bløtere mot dypet. Foringen er boret ca. 15lm ned i berg og tett med betong (Waterplugg). Grå borekaks ser ut til å være granittisk gneis. Mørkere kaks mot dypet. Noe vann på ca 19m. Svakere soner med rasfarlig område markert på ca 35lm til 38lm. Her var det også mye vann. Mengde ble anslått til ca 1500 l/t. Brønnen er boret av Martin/Kenneth. Kamerainspeksjon utført av Arild/Stian. Brønnen gir ca 1800 l/t på 33m. Her klarte ikke pumpe å senke vannspeil lavere. Brønnen hadde også rast og var tett på 37lm.

ID 1954-12

Østfold Brønnboring AS

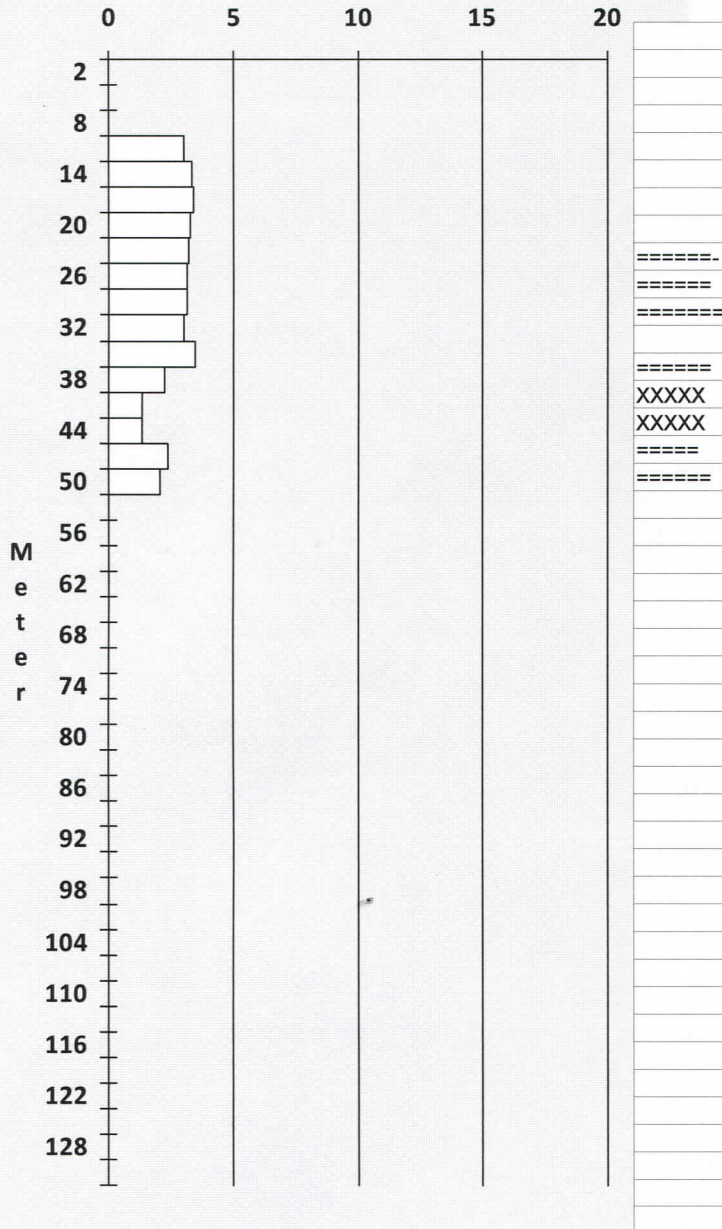
Borelogg

Etternavn:
 Fornavn:
 Brønn ID:

Prosjekt:
 Prosjekt ansvarlig:

Borelogg

Minutter



Dato:

Kartblad:

Rute:

Retning:

Grader:

Brønndybde:

Brønn Ø:

Foring LM:

Foring Ø:

Vannspeil: m.

Merknader:

Brønn for Vanninfiltrasjon IW - 3b
 Løsmassene er tilkjørte masser i
 topplaget. Videre er det leire som blir
 bløtere mot dypet. Noe morene, stein ved
 berg. Foringsrøret er boret ca 1.20 meter
 ned i berg og støpt tett med waterplugg.
 Forholdsvis fast berg ned til 29 meter.
 Svakhetssoner fra dette området og ned
 til 40 meter, men ikke registrert
 vanninnslag og heller ikke vurdert som
 rasfarlig. Fra ca 40 meter til bunnen vil
 det være fare for ras. Markert
 svakhetsone fra 41m til 45m med fare for
 ras, men ikke merkbart vanninnslag, kun
 fuktighet i borekaks. Brønnen er boret av
 martin/ole petter.

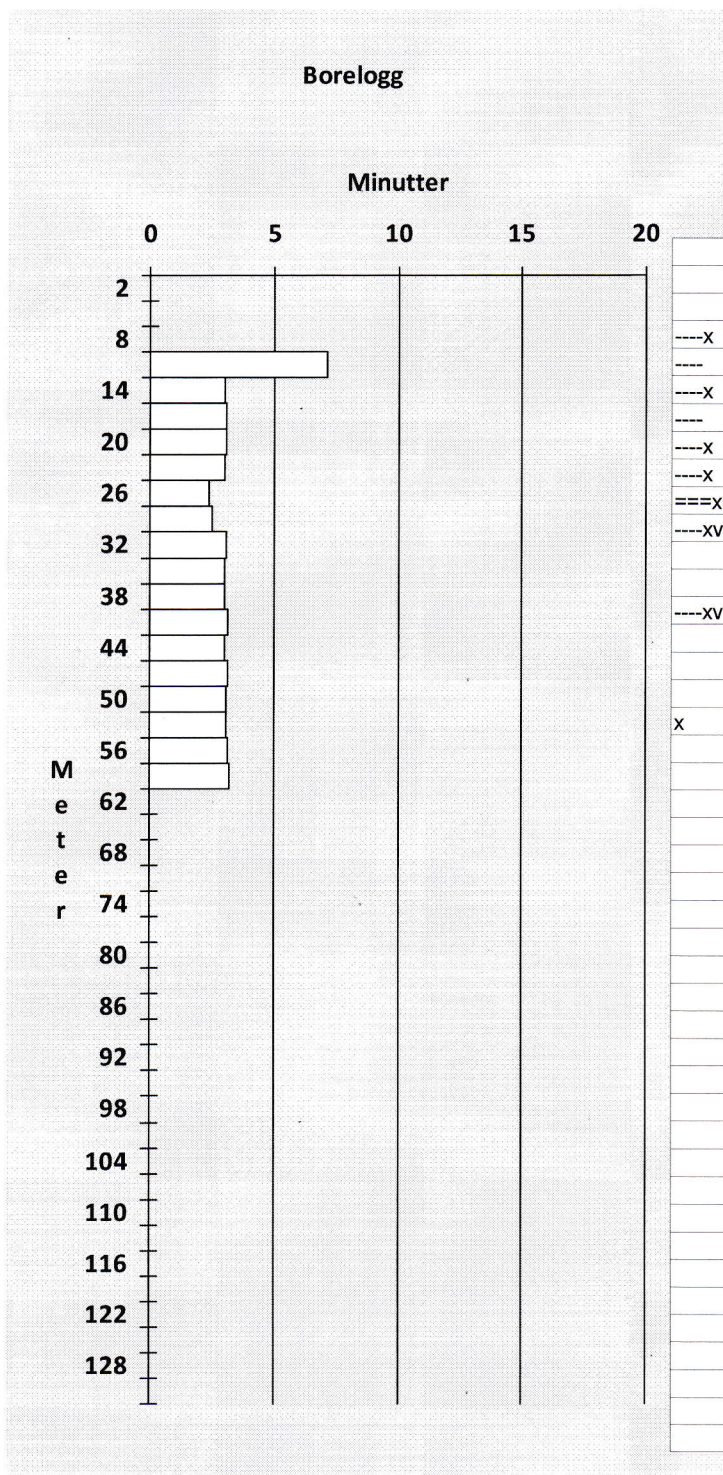
Etternavn:

Prosjekt:

Fornavn:

Prosjekt ansvarlig:

Brønn ID:



Dato:

Kartblad:

Rute:

Retning:

Grader:

Brønndybde:

Brønn Ø:

Foring LM:

Foring Ø:

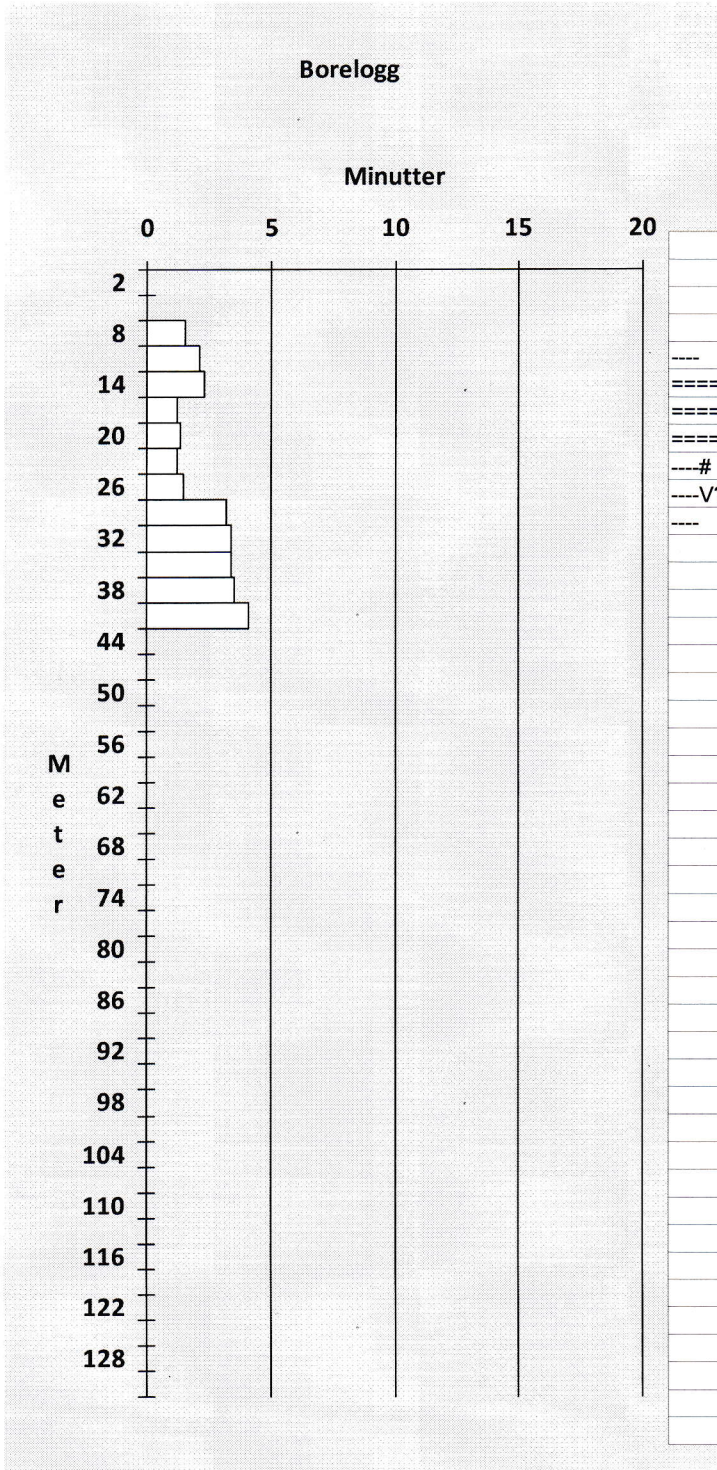
Vannspeil: m.

Merknader:

Brønn for vanninfiltrasjon IW3C
Løsmassene er en blanding av stein og leire. Foringen er boret ca 2m ned i berg og tettet med Waterplugg. Mørk borekaks med innslag av kvarts. Kommer inn noe vann i de øverste sprekkssystemer. Under boringen ble det registrert vanninnslag på ca 28 og 30m, deretter ble det registrert vanninnslag på 41m. Forholdsvis fast fint berg i hele brønnprofilen. Boringen er utført av Martin/Sigurdur. Kamerainspeksjon er foretatt 6/3 og er utført av Arild/Stian.

Etternavn:
 Fornavn:
 Brønn ID:

Prosjekt:
 Prosjekt ansvarlig:



Dato:
 Kartblad:
 Rute:
 Retning:
 Grader:
 Brønndybde:
 Brønn Ø:
 Foring LM:
 Foring Ø:
 Vannspeil: m.

Merknader:

Brønn for vanninfiltrasjon IW5A
 Ca 3 meter med omrørte løsmasser, jord,stein,grus. Foringen er boret 3m ned i fjell, forholdsvis løst. Brønnprofilen og borekaks bærer preg av at vi borer i en svakhetssone, forholdsvis oppsprukket i øvre del av borehullet. Noe fastere berg mot dypet. Det er registrert fuktighet i sprekker like under borsko og vanninnslag på 23 og 29 meter. Vanngiverevne er beregnet til ca 2400 liter pr.t. 15m fra topp foring. Svakhetssoner på 23 og 26meter er det vurdert som ekstra rasfarlige, men hele øvre del av brønnen har områder det kan skje ras. Brønnen er boret av Martin/Kenneth. Filmingen og mansjettmontering på 15,5meter er utført av Stian og Arild.

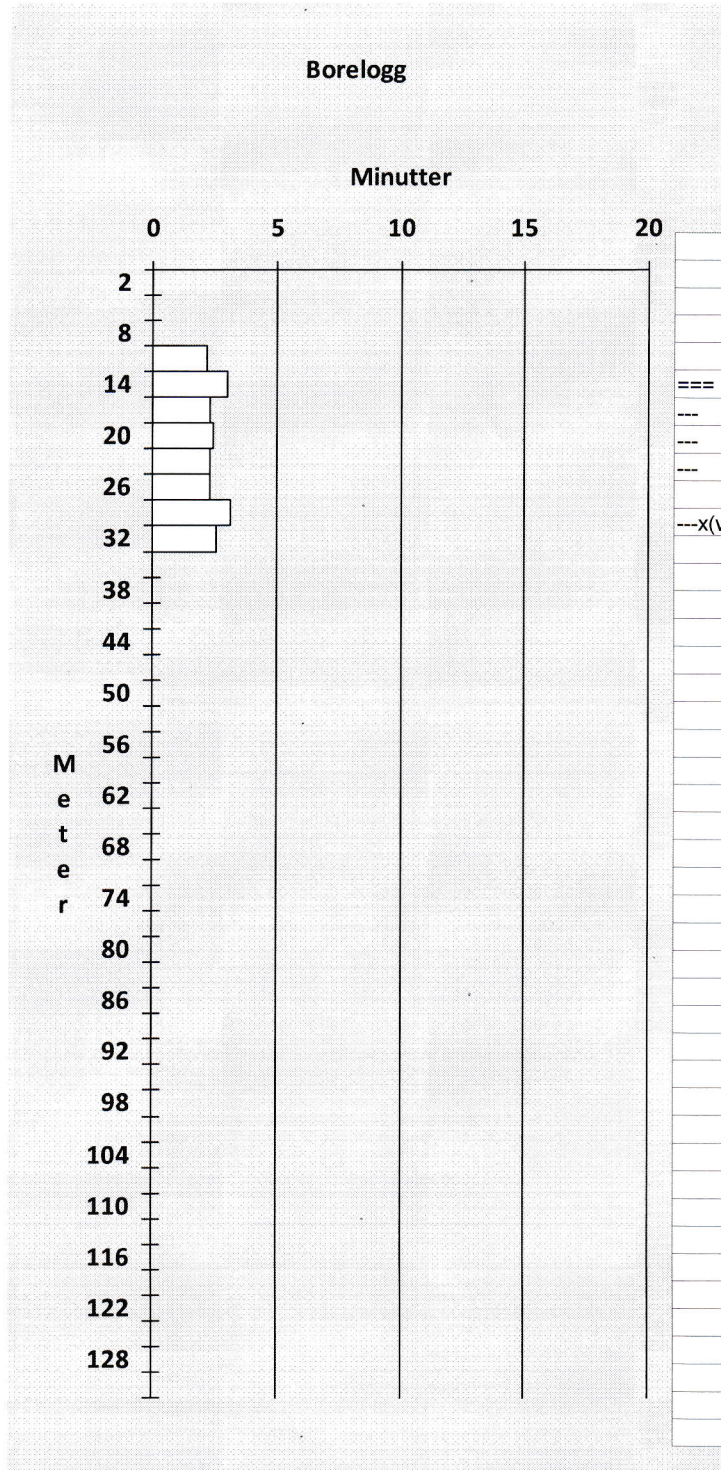
Etternavn:

Prosjekt:

Fornavn:

Prosjekt ansvarlig:

Brønn ID:



Dato:

Kartblad:

Rute:

Retning:

Grader:

Brønndybde:

Brønn Ø:

Foring LM:

Foring Ø:

Vannspeil: m.

Merknader:

Brønn for vanninfiltrasjon IW5B
 Løsmassene har et topplag med tilkjørte
 masser, stein pukk og grus. Deretter
 forholdsvis fast leire, noe bløtere mot fjell.
 Foringsrøret er boret 2m ned i berg og
 tetting utført med Waterplugg.
 Forholdsvis fast tett berg i hele profilet.
 Ser ut til å være granittisk gneis. Noe
 fuktighet i borekaks på ca 20m og
 merkbart vanninnslag på ca 29m.
 Vanngiverevnen er beregnet til ca 500
 liter pr.t. Brønnen er boret av
 Martin/Kenneth. Filming i brønnen og
 montering av mansjett er utført av
 Arild/Stian.

Etternavn:

Prosjekt:

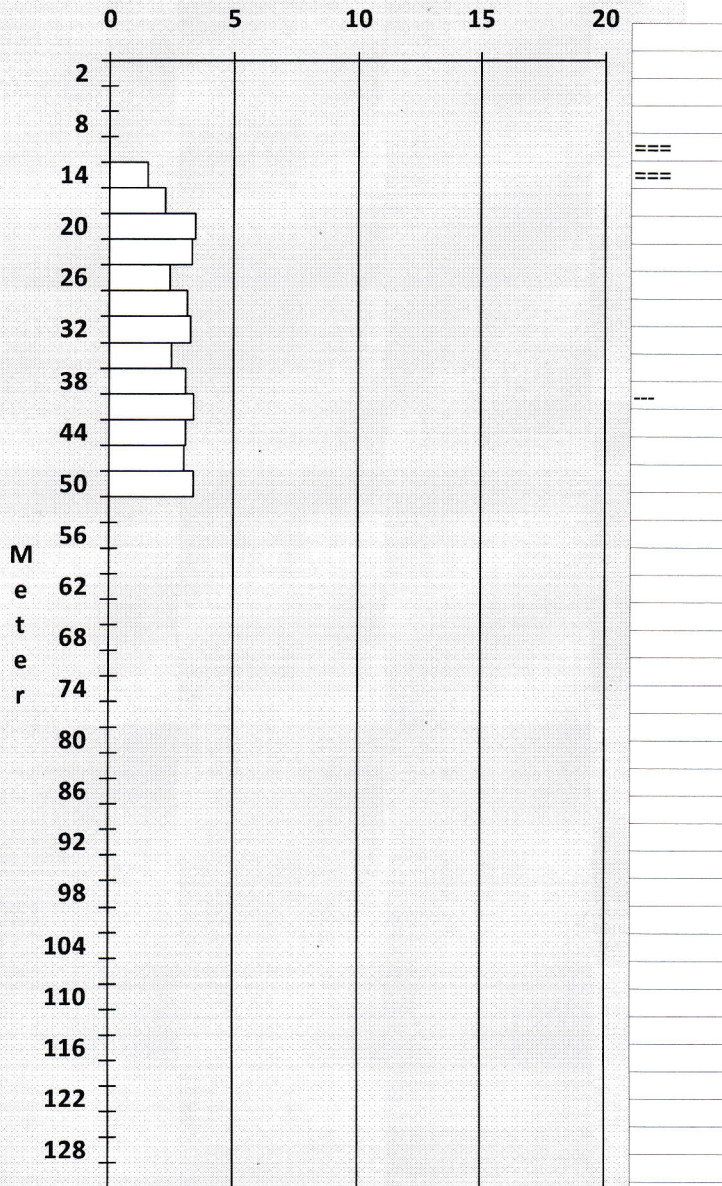
Fornavn:

Prosjekt ansvarlig:

Brønn ID:

Borelogg

Minutter



Dato:

Kartblad:

Rute:

Retning:

Grader:

Brønndybde:

Brønn Ø:

Foring LM:

Foring Ø:

Vannspeil: m.

Merknader:

Brønn for vanninfiltrasjon IW12A
 Når denne brønnen skulle settes an traff vi kulvert for bekkeløp. I samråd med opprdagsgiver ble det besluttet å bore et lite hull for framføring av ledninger til vanninfiltrasjon i IW 12B og IW 12C. Neste ansett resulterte i fastsetting av lodd som tvinger betongmasse inn mellom rørvegg og berg. Foringsrøret er fylt med svelleleire/sandpakninger og kappet under marknivå. Tredje forsøk vellykket og foringsrør boret ca 1,5m ned i berg og tettet med betong. Øverste meter var tilførte masser. Så ca. 2m fast leire, deretter bløtere mot berg. Ca. 1m med grus/stein på fjell. Løser berg og svakhetssoner i begynnelsen av profilet. Fastere berg videre nedover mot bunnen. Boringene er utført av Martin/Ole Petter. Det ble ikke registrert merkbare vanninslag i denne brønnen. Bør mest sannsynlig trykkes hvis den skal brukes til vanninfiltrasjon. Boringen ble startet 22/3-17 og avsluttet 27/3-17.

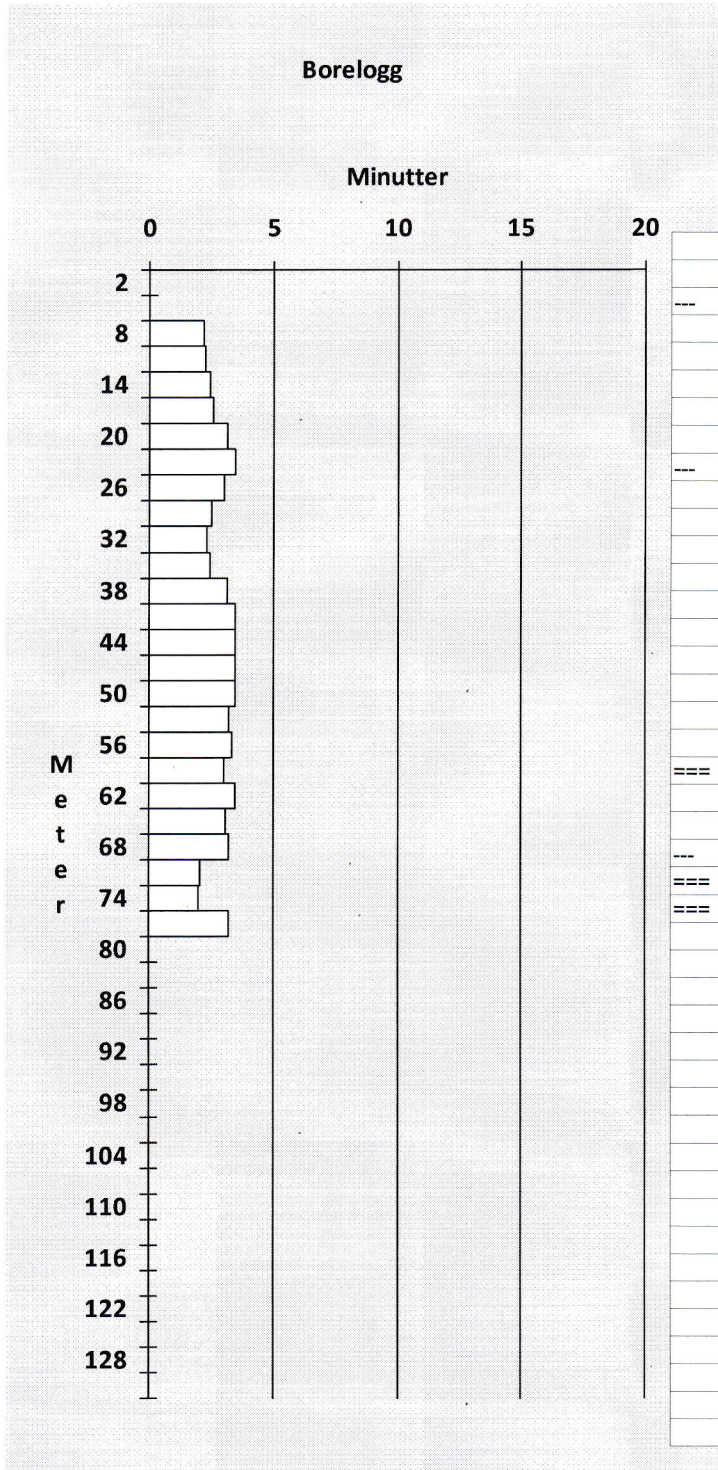
Ettersnavn:

Prosjekt:

Fornavn:

Prosjekt ansvarlig:

Brønn ID:



Dato:

Kartblad:

Rute:

Retning:

Grader:

Brønndybde:

Brønn Ø:

Foring LM:

Foring Ø:

Vannspeil: m.

Merknader:

Brønn for vanninfiltrasjon IW 12B
 Brønnen er plassert på et område med dyrket mark. Ca. 1,5m tørrskorpeleire før fjell. Foring er tett med Waterplug. Berget er granittisk gneis, forholdsvis fast homogent berg ned til ca. 70m. Her er det en svakhetssone på ca 3m. Fast berg igjen når denne er passert. Ingen merkbare vannslag eller fuktighet registrert under boring, men vanngiverevne er beregnet til ca. 10 l/t. Brønnen er boret av Martin/Kenneth. Utpumping av vann og filming i brønnprofil er utført av Arild/Stian

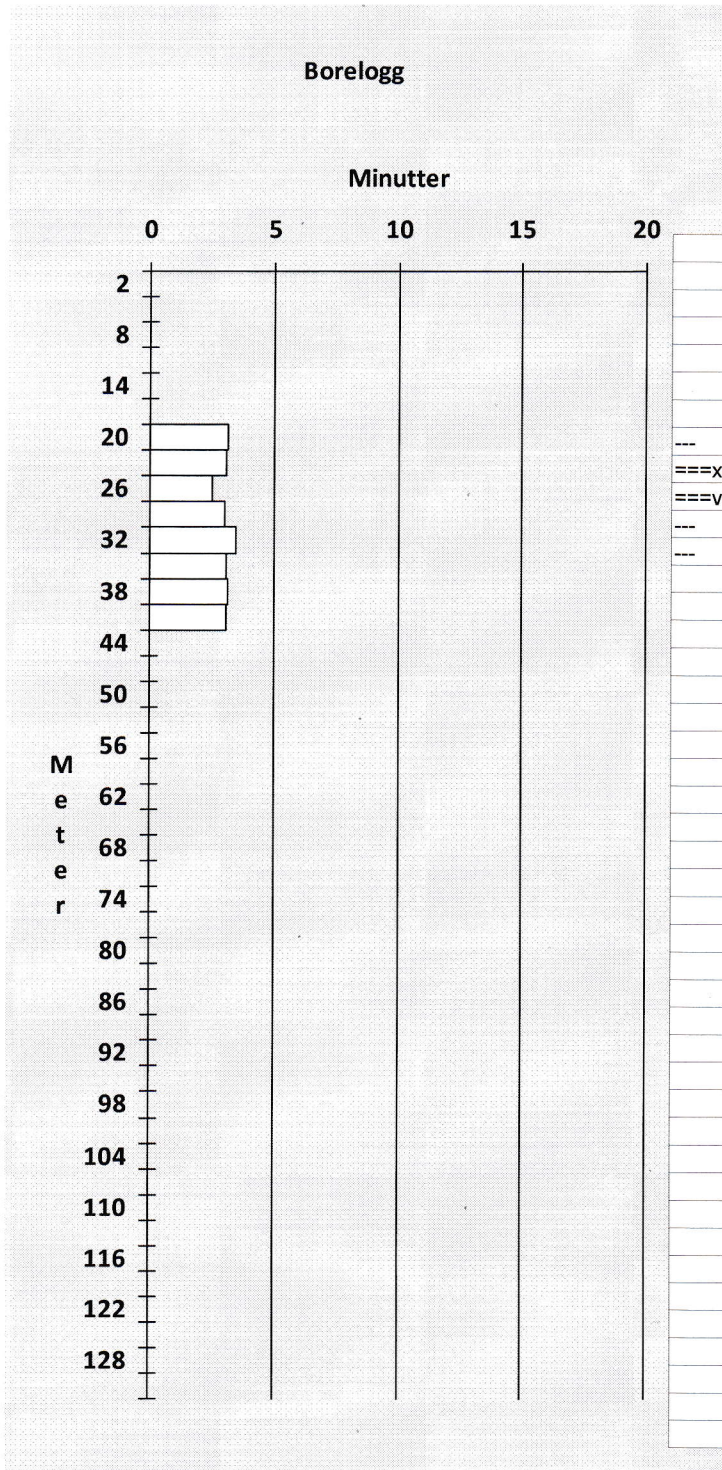
Etternavn:

Prosjekt:

Fornavn:

Prosjekt ansvarlig:

Brønn ID:



Dato:

Kartblad:

Rute:

Retning:

Grader:

Brønndybde:

Brønn Ø:

Foring LM:

Foring Ø:

Vannspeil: m.

Merknader:

Brønn for vanninfiltrasjon IW 12C
Løsmassene består av ca 1,5m tørrskorpe, deretter bløt leire ned til 16,5m hvor vi traff berg. Foringsrør ble boret 1,5m ned i berg og tetting ble gjort med Waterplug. Flere små svakhetssoner registrert under boring. Merkbare vanninslag på ca 25 og 28m. Vannmengde ble anslått til ca 1000 l/t etter boring. Forsøk på tømning av brønn for filming av profilet ble gitt opp da pumpen ikke klarte å senke vannsøyle lenger enn til 16,5m. Med denne avsenking er vanngiverevne 1800 l/t.. Brønnen er artesisk. Boringen er utført av Martin/Kenneth. Brønnen er ikke filmet da vi ikke fikk senket vannspeil ned i berg. Dette ble forsøkt utført av Arild/Stian.

Etternavn:

Prosjekt:

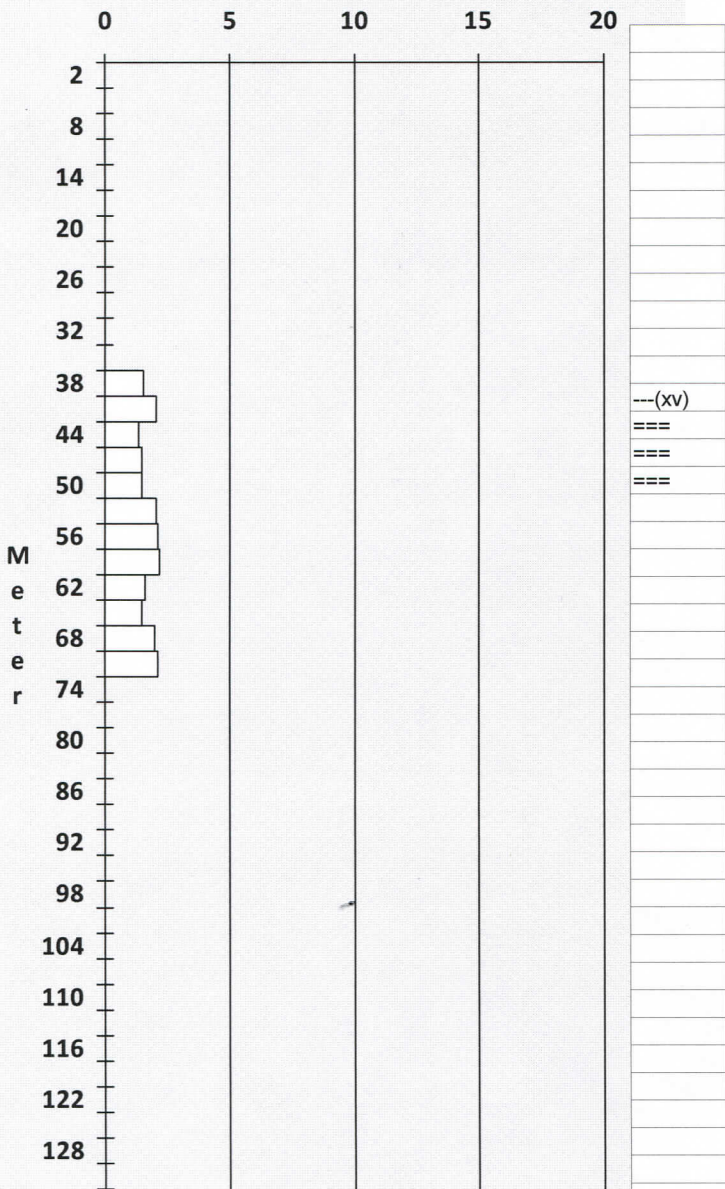
Fornavn:

Prosjekt ansvarlig:

Brønn ID:

Borelogg

Minutter



Dato:

Kartblad:

Rute:

Retning:

Grader:

Brønndybde:

Brønn Ø:

Foring LM:

Foring Ø:

Vannspeil: m.

Merknader:

Brønnen er navngitt IW 13B. Brønnen er boret av Martin/Freddy. Svart, dårlig fjell (grønt) hele veien. Vanninnslag med tydelig sprekk på ca. 44 m. Dårlig fjell med mye sprekker ned til ca. 53 m. Bløt leire med innblanding av silt ned mot fjell. Brønnen er boret til vanninfiltrasjon for å unngå setningsskader.

1D 1954-27

Østfold Brønnboring AS

Borelogg

Etternavn:

Prosjekt:

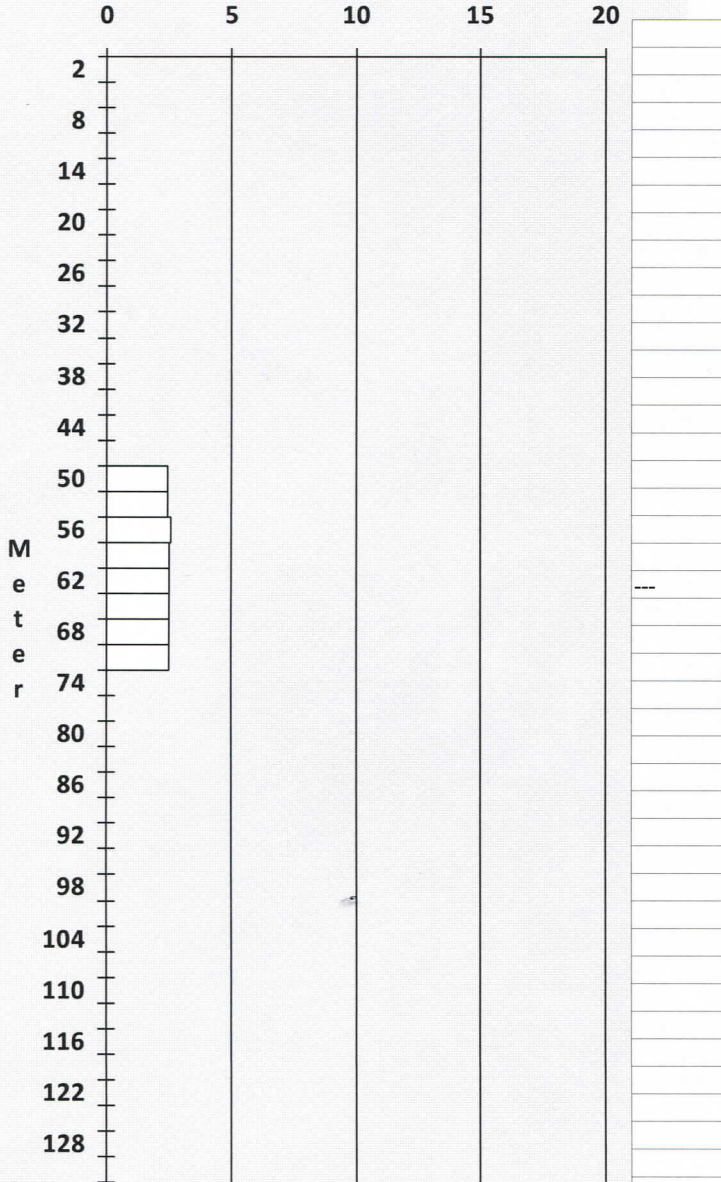
Fornavn:

Prosjekt ansvarlig:

Brønn ID:

Borelogg

Minutter



Dato:

Kartblad:

Rute:

Retning:

Grader:

Brønndybde:

Brønn Ø:

Foring LM:

Foring Ø:

Vannspeil: m.

Merknader:

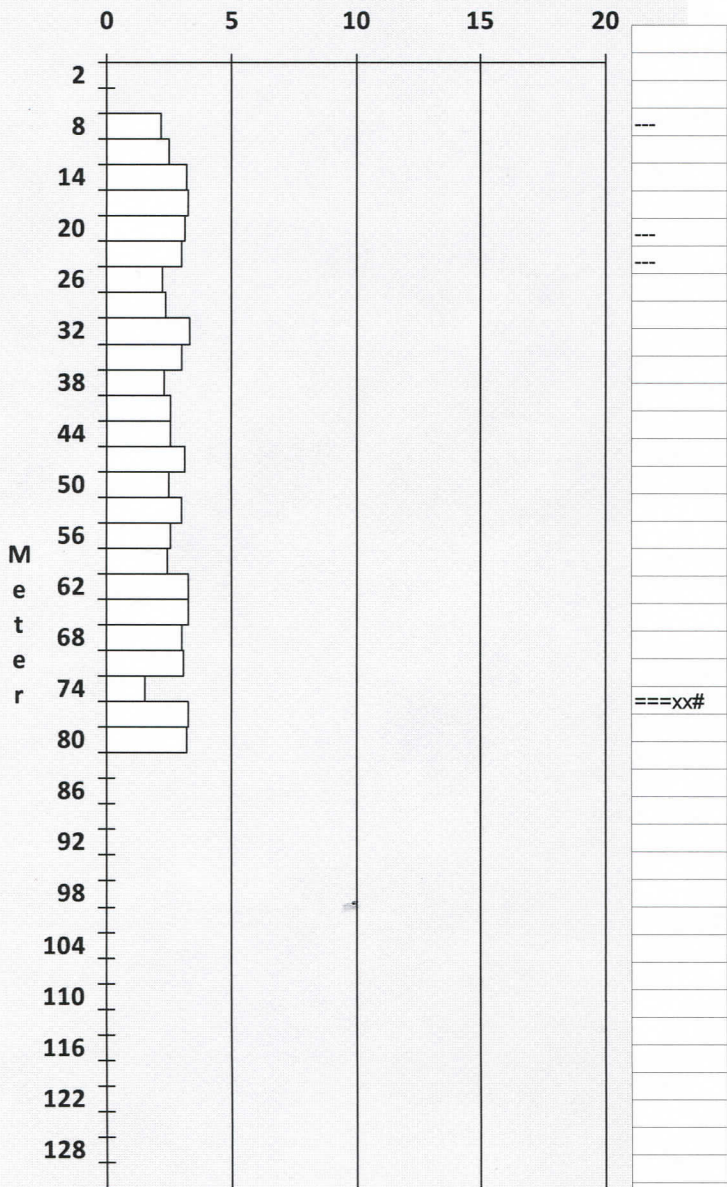
Brønnen er navngitt IW 13C. Brønnen er boret av Ole-Petter/Robert. Jevnt berg i hele boreprofilet uten rasfarlige områder. Heller ingen merkbare vanninnslag. Bløt leire med innblanding av silt ned til berg. Brønnen er boret til vanninfiltrasjon for å unngå setningsskader.

Etternavn:
 Fornavn:
 Brønn ID:

Prosjekt:
 Prosjekt ansvarlig:

Borelogg

Minutter



Dato:

Kartblad:

Rute:

Retning:

Grader:

Brønn dybde:

Brønn Ø:

Foring LM:

Foring Ø:

Vannspeil: m.

Merknader:

Brønnen er navnet IW-13E. Boret av Martin/Joachim. Det er registrert svakhetszoner uten merkbare vanninnslag på 10, 23 og 25 m. Deretter fast, homogent berg ned til 70 m. Fra 70 til 74 m var det svakhetszone med noe vann - og leirmineraler. Området er vurdert som rasfarlig. Brønnen er boret til vanninfiltrasjon for å unngå setningskader.

1D 1954-21

Østfold Brønnboring AS

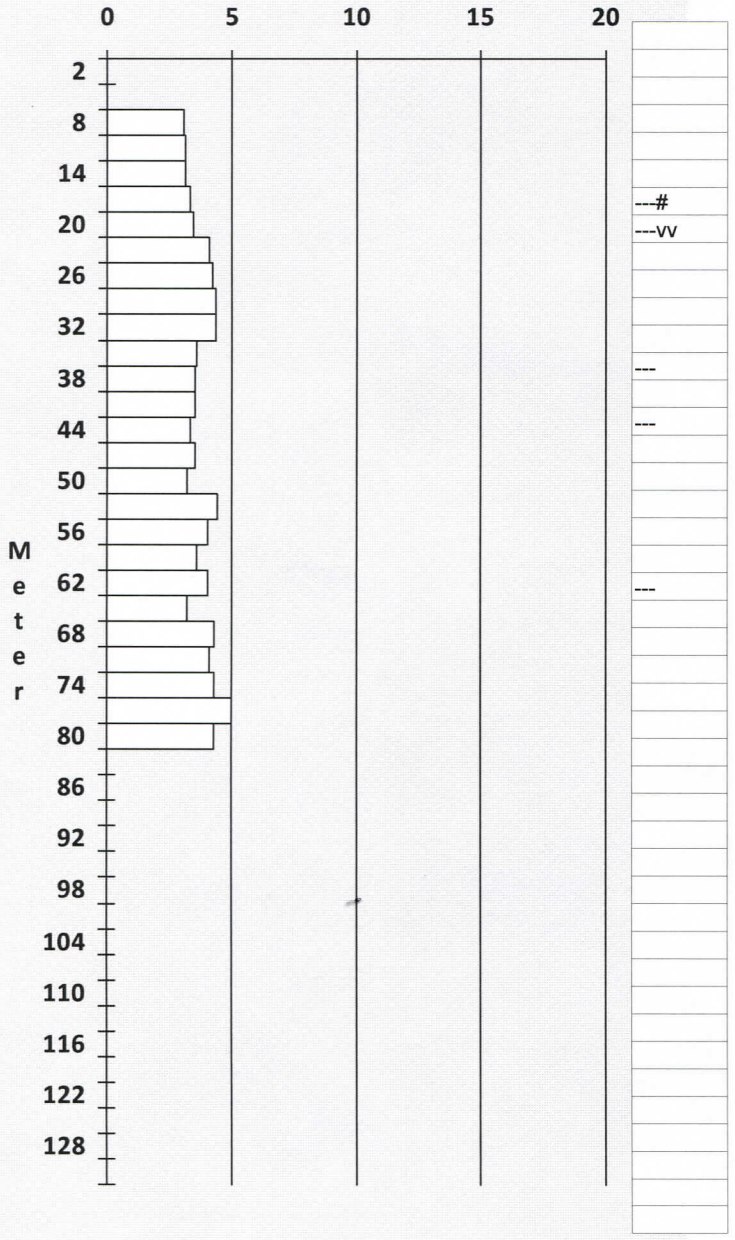
Borelogg

Etternavn:
 Fornavn:
 Brønn ID:

Prosjekt:
 Prosjekt ansvarlig:

Borelogg

Minutter



Dato:

Kartblad:

Rute:

Retning:

Grader:

Brønndybde:

Brønn Ø:

Foring LM:

Foring Ø:

Vannspeil: m.

Merknader:

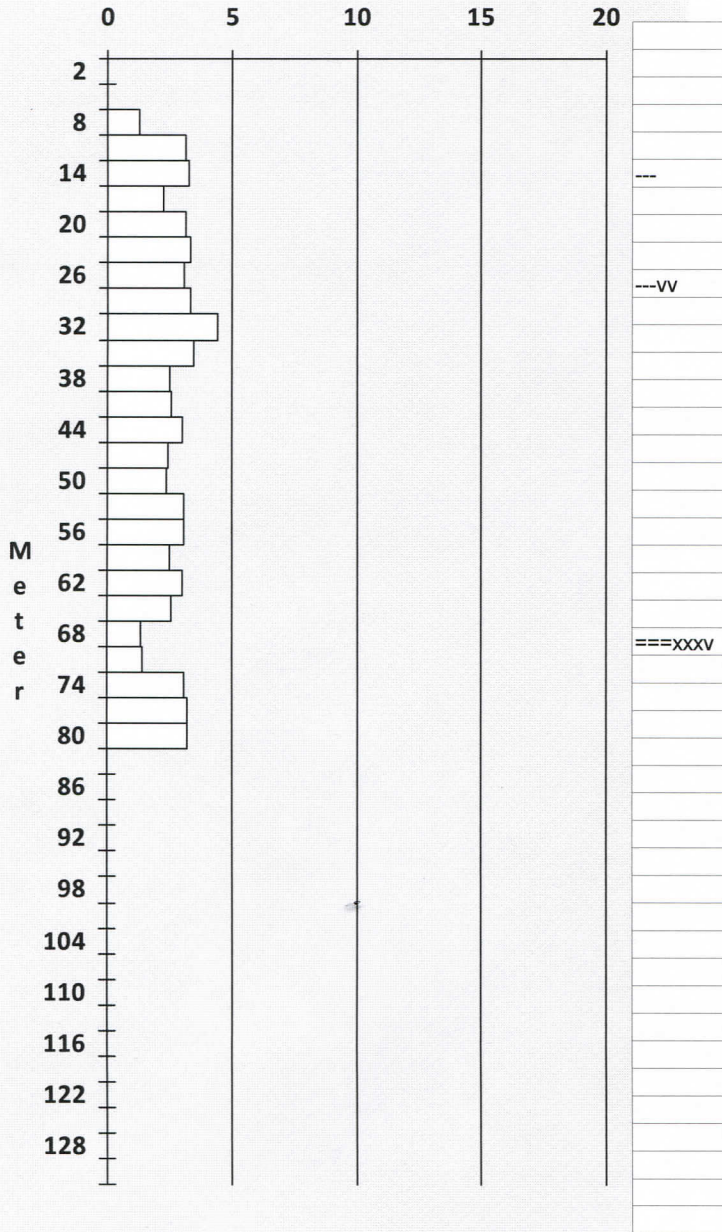
Brønnen er navnet IW- 13F. Boret av Martin/Joachim. Svakhetsone med forholdsvis mye vann fra 18 til 22 m. Markerte svakhetssoner på 38,44 og 61 m, men ikke merkbare vanninnslag. Brønnen er boret til vanninfiltrasjon for å unngå setningskader.

Etternavn:
 Fornavn:
 Brønn ID:

Prosjekt:
 Prosjekt ansvarlig:

Borelogg

Minutter



Dato:

Kartblad:

Rute:

Retning:

Grader:

Brønndybde:

Brønn Ø:

Foring LM:

Foring Ø:

Vannspeil: m.

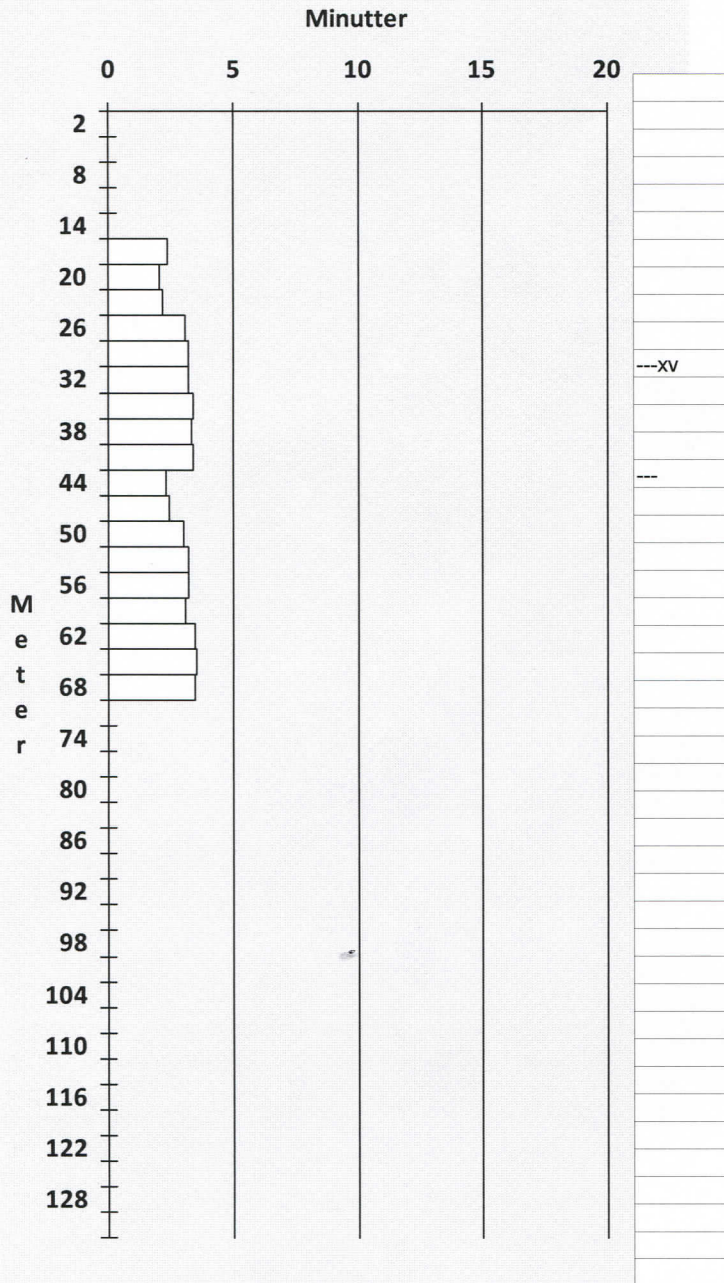
Merknader:

Brønnen er navngitt IW-13G. Boret av Martin og Joachim. Tydelig svakhetssone på ca. 15 m uten merkbart vann. Vanninnslag i sprekker på 27 m. Rasfarlig område med knusningssone, leirmineraler og noe vann fra 66 til 69 m. Brønnen er boret til vanninfiltrasjon for å unngå setningsskader.

Etternavn:
 Fornavn:
 Brønn ID:

Prosjekt:
 Prosjekt ansvarlig:

Borelogg



Dato:
 Kartblad:
 Rute:
 Retning:
 Grader:
 Brønndybde:
 Brønn Ø:
 Foring LM:
 Foring Ø:
 Vannspeil: m.

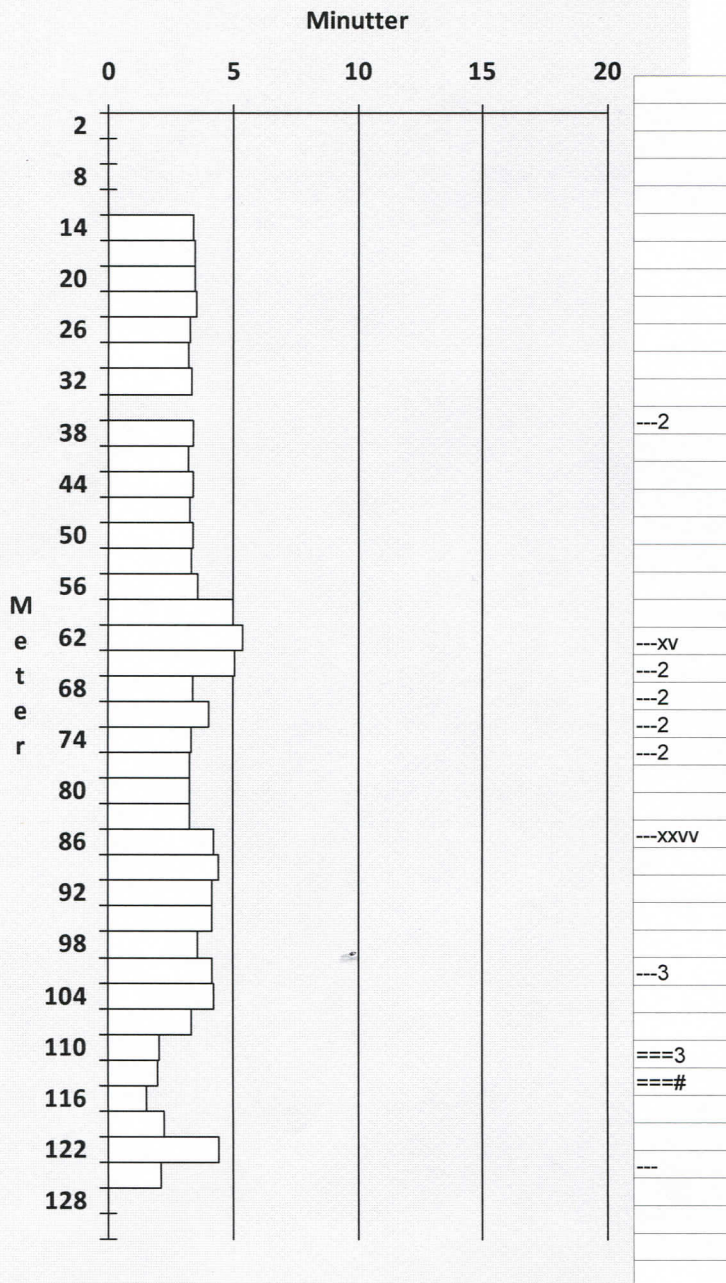
Merknader:

Brønnen er navnet IW-13H. Boret av Martin/Joachim. Sprekkesystem med vanninnslag registrert på 31 m. Svakhetsone uten merkbart vanninnslag på 43 m. Brønnen er boret til vanninfiltrasjon for å unngå setningsskader.

Etternavn:
 Fornavn:
 Brønn ID:

Prosjekt:
 Prosjekt ansvarlig:

Borelogg



Dato:

Kartblad:

Rute:

Retning:

Grader:

Brønndybde:

Brønn Ø:

Foring LM:

Foring Ø:

Vannspeil: m.

Merknader:

Brønnen er navngitt BH 5+400 og ligger i gruppe nord. Brønnen er boret av Martin/Joachim. Svakhetssoner uten merkbare vanninnslag registrert på 37, 61, 64, 66, 71 og 74 m. Stort vanninnslag på 83 m og svakhetszone vurdert som rasfarlig fra 107 til 110 m. Boringen ble avsluttet på 122 m grunnet store vannmengder. Brønnen er boret for undersøkelse av bergets beskaffenhet med sprekkesystemer og vanngiverevne.

---2

---xv

---2

---2

---2

---2

---xxv

---3

===3

===#

Vedlegg 4

Lugeonmålinger utført i infiltrasjonsbrønnene langs traséen. Lugeonmålinger mottatt fra AGJV/Bane NOR. Målingene er også lastet opp som digitalt vedlegg for bedre oppløsning. Der er det også illustrasjoner som viser brønnens lengde og helning for de fleste infiltrasjonsbrønnene.

WELL ID: IW_2A

SECTION	FROM (M)	TO (M)	PRESSURE (BAR)	FLOWMETER READING (L)					FLOW (L/MIN)					LUGEON VALUE*
				0 MIN	5 MIN	10 MIN	15 MIN	20 MIN	0 - 5 MIN	5 - 10 MIN	10 - 15 MIN	15 - 20 MIN	AVERAGE	
1	27	32	1.5	9068	9128	9188			12	12			12	16
2	22	32	1.5	9223	9292	9360			13.8	13.6			13.7	2
3	17	32	1.5	9350	9430	9510			16	16			16	3
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														

COMMENTS:

*Lugeon value is calculated by subtracting the flow of the lower sections. This requires the same pressure for all sections. Lugeon value is corrected to the standard reference pressure of 10 bar.

WELL ID: IW_2B

SECTION	FROM (M)	TO (M)	PRESSURE (BAR)	FLOWMETER READING (L/min)					AVERAGE	LUGEON VALUE*
				0-5 MIN	5 - 10 MIN	10 - 15 MIN	15-20 MIN	20 - 25 MIN		
1	44	39	1	65	64	-	-	-	65	129
2	39	34	1	65	65	-	-	-	65	1
3	34	29	1	65	65	-	-	-	65	0
4	29	24	1	65	65	-	-	-	65	0
5	24	19	1	65	65	-	-	-	65	0
6	19	14	1	65	65	-	-	-	65	0
7										
8										
9										
10										

COMMENTS:

*Lugeon value is calculated by subtracting the flow of the lower sections. This requires the same pressure for all sections. Lugeon value is corrected to the standard reference pressure of 10 bar.

WELL ID: IW_2C

SECTION	FROM (M)	TO (M)	PRESSURE (BAR)	FLOWMETER READING (L)					FLOW (L/MIN)					LUGEON VALUE*
				0 MIN	5 MIN	10 MIN	15 MIN	20 MIN	0 - 5 MIN	5 - 10 MIN	10 - 15 MIN	15 - 20 MIN	AVERAGE	
1	40	45	3	24800	24800	24800			0	0			0	0
2	35	45	3	24800	24800	24800			0	0			0	0
3	30	45	3	Water flowing above packer and out of IW_2C										-
4	29	45	3	Water flowing above packer and out of IW_2C										-
5	27	45	3	Water flowing above packer and out of IW_2C										-
6	25	45	3	Water flowing above packer and out of IW_2C										-
7	20	45	3	Water flowing out of IW_2A**										-
8	20	45	3	26340	26942	27543			120.4	120.2			120.3	27
9	15	45	3	27757	28362	28965			121	120.6			120.8	0
10														

COMMENTS:

*Lugeon value is calculated by subtracting the flow of the lower sections. This requires the same pressure for all sections. Lugeon value is corrected to the standard reference pressure of 10 bar.

**Water was flowing out of nearby well (IW_2A). A packer was placed in IW_2A, successfully stopping the unwanted water flow from IW_2C and out of IW_2A.

WELL ID: IW_3A

SECTION	FROM (M)	TO (M)	PRESSURE (BAR)	FLOWMETER READING (L)					FLOW (L/MIN)					LUGEON VALUE*
				0 MIN	5 MIN	10 MIN	15 MIN	20 MIN	0 - 5 MIN	5 - 10 MIN	10 - 15 MIN	15 - 20 MIN	AVERAGE	
1	33	45	0.8	7413	7576	7739			32.6	32.6			32.6	34
2	28	45	0.8	7766	7929	8094			32.6	33			32.8	0
3	23	45	0.8	8109	8278	8444			33.8	33.2			33.5	2
4	18	45	0.8	8459	8628	8796			33.8	33.6			33.7	1
5	13	45	0.8	8816	8994	9162			35.6	33.6			34.6	2
6														
7														
8														
9														
10														

COMMENTS: Water loss above packer at first section. First section was changed to 12 m length to make sure water loss above packer.

*Lugeon value is calculated by subtracting the flow of the lower sections. This requires the same pressure for all sections. Lugeon value is corrected to the standard reference pressure of 10 bar.

WELL ID: IW_3B

SECTION	FROM (M)	TO (M)	PRESSURE (BAR)	FLOWMETER READING (L)					FLOW (L/MIN)					LUGEON VALUE*
				0 MIN	5 MIN	10 MIN	15 MIN	20 MIN	0 - 5 MIN	5 - 10 MIN	10 - 15 MIN	15 - 20 MIN	AVERAGE	
1	42	47	2	9470	9475	9480			1	1			1	1
2	37	47	2	9500	9510	9520			2	2			2	1
3	32	47	2	9565	9595	9625			6	6			6	4
4	27	47	2	9650	9680	9710			6	6			6	0
5	22	47	2	9750	9780	9810			6	6			6	0
6	17	47	2	9850	9880	9910			6	6			6	0
7	12	47	2	9950	9980	10010			6	6			6	0
8														
9														
10														

COMMENTS: 42 - 47 m, 3 bar: 3 l/min 32 - 47 m, 3 bar: 9 l/min

*Lugeon value is calculated by subtracting the flow of the lower sections. This requires the same pressure for all sections. Lugeon value is corrected to the standard reference pressure of 10 bar.

WELL ID: IW_5A

SECTION	FROM (M)	TO (M)	PRESSURE (BAR)	FLOWMETER READING (L)					FLOW (L/MIN)					LUGEON VALUE
				0 MIN	5 MIN	10 MIN	15 MIN	20 MIN	0 - 5 MIN	5 - 10 MIN	10 - 15 MIN	15 - 20 MIN	AVERAGE	
1	40	16	2	901	1105	1308			40.8	40.6			40.7	8
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														

COMMENTS: The borehole was not sectioned due to a collapse at 23 m. The test was done for only one section from 40 to 16 m.

WELL ID: IW_5A

SECTION	FROM (M)	TO (M)	PRESSURE (BAR)	FLOWMETER READING (L)					FLOW (L/MIN)					LUGEON VALUE
				0 MIN	5 MIN	10 MIN	15 MIN	20 MIN	0 - 5 MIN	5 - 10 MIN	10 - 15 MIN	15 - 20 MIN	AVERAGE	
1	40	16	2	901	1105	1308			40.8	40.6			40.7	34
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														

COMMENTS: The borehole was not sectioned due to a collapse at 23 m. The test was done for only one section from 40 to 16 m.

WELL ID: IW_5B

SECTION	FROM (M)	TO (M)	PRESSURE (BAR)	FLOWMETER READING (L)					FLOW (L/MIN)					LUGEON VALUE*
				0 MIN	5 MIN	10 MIN	15 MIN	20 MIN	0 - 5 MIN	5 - 10 MIN	10 - 15 MIN	15 - 20 MIN	AVERAGE	
1	32	26	4	1970	2197	2420			45.4	44.6			45	19
2	32	21	4	2708	3023	3329			63	61.2			62.1	9
3	32	16	4	3887	4240	4581			70.6	68.2			69.4	4
4	32	11	2	4952	5354	5750			80.4	79.2			79.8	10
5														
6														
7														
8														
9														
10														

COMMENTS: Reduced pressure at last section.

*Lugeon value is calculated by subtracting the flow of the lower sections. This requires the same pressure for all sections. Lugeon value is corrected to the standard reference pressure of 10 bar.

BH ID: 3C Pressure: 1 bar

Section	From (m)	To (m)	Flow (l/5min)				Avg	Deviation (%)	L
			0 - 5 min	5 - 10 min	10 - 15 min	15 - 20 min			
1	60	50	5	5			5	0.0%	1.0
2	50	45	-	-			-	-	-
3	45	40	-	-			-	-	-
4	40	35	81	80			80.5	1.2%	10.1
5	35	30	81	80			80.5	1.2%	0.0
6	30	25	82	82			82	0.0%	0.6
7	25	20	81	82			81.5	1.2%	0.0
8	20	15	83	83			83	0.0%	0.6

BH ID: 13A Pressure: 5 bar

Section	From (m)	To (m)	Flow (l/5min)				Avg	Deviation (%)	L
			0 - 5 min	5 - 10 min	10 - 15 min	15 - 20 min			
1	70	65	0	0			0	0.0%	0.0
2	65	60	0	0			0	0.0%	0.0
3	60	55	0	0			0	0.0%	0.0
4	55	50	0	0			0	0.0%	0.0
5	50	45	0	0			0	0.0%	0.0
6	45	40	0	0			0	0.0%	0.0
7	40	35	0	0			0	0.0%	0.0
8	35	30	72	70			71	2.8%	5.7

9	30	25	70	70			70	0.0%	0.0
10	25	20	70	70			70	0.0%	0.0

BH ID: 13C Pressure: 5 bar

Section	From (m)	To (m)	Flow (l/5min)				Avg	Deviation (%)	L
			0 - 5 min	5 - 10 min	10 - 15 min	15 - 20 min			
1	70	65	0	0			0	0.0%	0.0
2	65	60	0						

BH ID	Flow	Section (m)*	Pressure	L	Date
1A	11.4	40	0.1	28.5	10/04/2018
1B	1	49	1.3	0.2	10/04/2018
1C	69.3	52	0.2	66.6	10/04/2018
1D	27	53	0.1	50.9	24/04/2018

*Packer placed 20 m deep into the borehole, measured from top of casing.

Infiltrasjonsbrønnene 1A, 1B, 1C og 1D kollapset under lugeontestingen ble hele borehullet målt under ett.

Det er ikke utført lugeontester på infiltrasjonsbrønnene

12A

12B

12C

På grunn av tørre brønner.

Det er heller ikke utført lugeontester på brønnene 13B og 13D.