

# Vannkontroll og tettestrategi for TBM-tunneler på Follobanen

**Kristina Amdahl Midthun**

Tekniske geofag

Innlevert: juni 2018

Hovedveileder: Bjørn Nilsen, IGP

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for geovitenskap og petroleum





## MASTEROPPGAVE

### Prosjektbeskrivelse

**Kandidatens navn:** Kristina Amdahl Midthun

**Oppgavens tittel:** VANNKONTROLL OG TETTESTRATEGI FOR TBM-TUNNELER PÅ FOLLOBANEN

**English title:** Groundwater control and sealing strategy for TBM tunnels at the Follo railway line

**Utfyllende tekst:**

1. Under bygging av de ca. 20 km lange tunnelene for Follobanen er det stor fokus på vannkontroll for å redusere innlekkasjen i tunnelen til akseptabelt nivå. Hovedtema for denne masteroppgaven er å gjennomføre en systematisk analyse av lekkasjeforhold og måten innlekkasje er håndtert på i de sørgående TBM-løpene. Masteroppgaven representerer en videreføring av fordypningsprosjekt gjennomført av samme student høsten 2017, med sammenstilling og diskusjon av erfaringer med vannkontroll og tettestrategi for tidligere bygde jernbanetunneler i Oslo-området. Hovedfokus i denne masteroppgaven skal være på ingeniørgeologiske forhold relatert til TBM-løpene på Follobanen, med spesiell vekt på følgende faktorer:

- Beskrivelse av valgt tettestrategi.
- Strategi for sonderboring og beslutningsgrunnlag for injeksjon.
- Evaluering og diskusjon av hvilke geologiske forhold som har gitt størst innlekkasje.
- Beskrivelse og diskusjon av valgte metoder for gjennomføring av tetttingsinjeksjon, og vurdering av mulige alternative metoder.
- Evaluering av effekten av tetttingsinjeksjon, basert på gjennomgang av resultater fra målinger av poretrykk og andre relevante parametre.

For lettere tilgang til grunnlagsmateriale og måleresultater vil det være aktuelt med stasjonering ute på anlegget. Beslutning om avgrensning mht tunnallengder for analyse tas i samråd med veiledere underveis i oppgaven, avhengig av hva tiden tillater og hvilken informasjon som er tilgjengelig.

2. Oppgaven gjennomføres i samarbeid med BaneNor med Fredrikke Syversen i Tunnel TBM teamet i Follobanen som kontaktperson.

**Studieretning:** Ingeniør- og miljøgeologi

**Hovedprofil:** Ingeniørgeologi og bergmekanikk

**Tidsrom:** 15.1.2018-11.6.2018



---

## Forord

Denne masteroppgaven er utført ved institutt for geovitenskap og petroleum ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) innenfor studieprogrammet ”Tekniske geofag” med fordypning innenfor ingeniørgeologi og bergmekanikk. Arbeidet med oppgaven er utført våren 2018 i samarbeid med Bane NOR, Follobanen.

Masteroppgaven bygger videre på en tidligere utført prosjektoppgave av samme forfatter vinteren 2017 og er rettet mot lesere med interesse for vannproblematikk og tettestrategier i jernbanetunneler og da spesielt for TBM-tunnelene på Follobaneprosjektet. Hovedveileder for masteroppgaven er Bjørn Nilsen. Medveileder er Fredrikke Syversen i tunnel TBM teamet på Follobanen.

Jeg vil takke min veileder, Bjørn Nilsen, for alle møter og hjelp med litteratur, utforming av oppgaven og for raske svar på spørsmål. Videre vil jeg takke Fredrikke Syversen for muligheten til å sitte på prosjektet og alle de i tunnel TBM teamet på Follobanen som har vist interesse for arbeidet. Til slutt vil jeg rette en takk til alle nære og kjære som har holdt motivasjonen min oppe.

Tusen takk for hjelpen!

Trondheim, 28. juni 2018



Kristina Amdahl Midthun

---

## Sammendrag

De aller fleste Norske tunnelprosjekter befinner seg under grunnvannsnivå og er derfor utsatt for innlekkasjer i konstruksjonsfasen. Bergarter i Norge har lav porøsitet og er i utgangspunktet en god grunnvannsbarriere i seg selv. Grunnvannstrømningen er av den grunn begrenset til oppsprukne soner i bergmassen.

Den drenerende virkningen av en tunnel kan merkes i store områder i dagen selv ved relativt små lekkasjer, og kan redusere poretrykket i både berg og løsmasse over tunnelen. En poretryksreduksjon vil forstyrre vannbalansen og kan resultere i grunnvannsenkninger, setningskader og tørrlegging av vannkilder på overflaten. Opprettholdelse av poretrykket er spesielt viktig for tunneler bygget i tettbefolkede områder med bebyggelse og infrastruktur fundamentert på setningsømfintlig leire. Det er derfor viktig å identifisere områder som er sensitive for poretryksreduksjoner slik at skader unngås.

På Follobaneprosjektet benyttes et konsept der det forinjiseres basert på vannmålinger fra systematiske sonderboringer i kombinasjon med infiltrasjonsbrønner for å opprettholde poretrykket mens tunnelboremaskinene passerer. Som permanent vannsikring installeres en vanntett betongutforing som sikrer tunnelen mot fremtidig vanninntrenging.

Follobaneprosjektet inkluderer en 20 kilometer lang tunnel mellom Oslo og Ski bestående av to adskilte tunnellop med tverrtunneler for hver 500 meter. Omtrent 18 kilometer av tunnelen drives med fire tunnelboremaskiner i prekambrisk gneis med intrusjoner hovedsakelig av amfibolitt.

Vannlekkasjene konsentreres til sub–horisontale sprekkesoner med åpne sprekker og langsgående intrusjoner som gjerne er mer oppsprukket enn sideberget og som følger tunnelen over lengre partier. Det ble foretatt flest injeksjonsrunder for bergoppsprekkingsfaktorer med verdi mellom 0,5 og 1,25. For lavere eller høyere verdier enn dette er berget trolig intakt eller delvis tettet av finknust materiale.

De sub–horisontale sonene viste seg å være vanskelige å oppdage ved sonderboringene og store innlekkasjer i tunnelen resulterte i en reduksjon av poretrykket mer enn 1,5 kilometer fra tunnelstuppen og vasket ut etterfyllingsmassen mellom betongsegmentene og berget. Dette illustrerer hvor viktig det er at beslutningsgrunnlaget for forinjeksjon og antall sonderborehull og plasseringen av disse er tilpasset forholdene i og over tunnelen slik at de høypermeable sonene oppdages. Konseptet for vannkontroll på Follobaneprosjektet er tilpasset den kartlagte geologien i tunnelen og under konstant utvikling gjennom hele prosjektet for å optimaliseres ytterligere. Per

---

dags dato har konseptet vært tilstrekkelig for midlertidig vannkontroll inntil betongutforingen er montert og tunnelen er permanent forseglet mot vanninntrengning.

---

## Abstract

Tunnel projects in Norway run the risk of high water ingress because most of them are located beneath groundwater level. The rock is a significant water barrier in itself because of the low porosity in Norwegian rock mass. Thus, the flow of groundwater is restricted to discontinuities and conductive zones.

Water ingress into the tunnel can affect large areas above the tunnel and result in pore pressure reduction in both the rock and the soil. A reduction will affect the water balance and may result in a lowering of the groundwater level, settlements and drought damage to vulnerable vegetation above the tunnel. It is especially important to maintain the pore pressure level in urban areas with buildings and infrastructure constructed on settlement sensitive clays. Thus, it is important to identify areas sensitive to pore pressure reductions to avoid such damage.

The Follo Line project uses on demand pre-grouting triggered by water measurements from probe drillings in combination with infiltration wells to maintain the pore pressure level whilst passing with the tunnel boring machines (TBMs). A water tight segmental lining is installed as a permanent solution to obtain the required tightness in the tunnel.

The Follo Line project includes a 20 kilometre double track railway tunnel between Oslo and Ski built as twin tube single track tunnels with cross passages every 500 meters. Approximately 18 kilometres of the tunnels are excavated by four Double Shield TBMs in Precambrian gneisses with intrusions.

The water leakages come from sub-horizontal fractures with high permeability and intrusions with higher fracture intensity than adjacent rock. Most of the pre-grouted sections have a fracturing factor with values between 0,5 and 1,25. Lower or higher values of the fracturing factor may indicate intact rock mass or rock mass that is partly sealed because of fillings.

The sub-horizontal zones were hard to detect with probe drillings and high levels of water ingress led to reduced pore pressure at surface level more than 1,5 kilometres from the tunnel face and wash out of the backfill grouting. Thus, it is crucial to adapt the trigger values, the number of probe holes and the placement to the ground conditions to detect highly conductive zones in front of the tunnel face. The concept for water control at the Follo Line project is customized for the mapped geology in the tunnel and is under constant development throughout the entire project for further optimization. As of today, this has proven to be sufficient for temporary water control until the water tight segmental lining is installed permanently to secure the tunnel from water ingress.



# Innhold

Forord . . . . .	i
Sammendrag . . . . .	ii
Abstract . . . . .	iv
<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn . . . . .	1
1.2 Formål . . . . .	1
1.3 Utforming og begrensninger av masteroppgaven . . . . .	2
<b>2 Grunnlagsmateriale og datakilder</b>	<b>5</b>
<b>3 Generelt om vannlekkasjer ved tunneldrift og driving med TBM</b>	<b>9</b>
3.1 Vann i berg . . . . .	9
3.2 Konsekvenser for indre og ytre miljø . . . . .	16
3.2.1 Indre miljø . . . . .	16
3.2.2 Ytre miljø . . . . .	16
3.3 Målemetoder . . . . .	17
3.3.1 Poretrykk og setninger . . . . .	17
3.3.2 Vanntapsmåling . . . . .	18
3.3.3 Registrering av innlekkasje i tunnel . . . . .	19
3.4 Tunnelboremaskiner . . . . .	19
3.4.1 Typer fullprofilboremaskiner . . . . .	20
<b>4 Regionalgeologi</b>	<b>23</b>
<b>5 Erfaringer fra ferdigstilte tunneler i nærområdet</b>	<b>27</b>
5.1 Romeriksporten . . . . .	28
5.1.1 Geologi og grunnforhold . . . . .	28

5.1.2	Tetthetskrav og utført vannkontroll . . . . .	29
5.1.3	Vannlekkasjer og konsekvenser for ytre miljø . . . . .	30
5.1.4	Etterinjeksjon . . . . .	31
5.1.5	Erfaringer . . . . .	31
5.2	Lysaker – Sandvika . . . . .	32
5.2.1	Geologi og grunnforhold . . . . .	32
5.2.2	Tetthetskrav og utført vannkontroll . . . . .	33
5.2.3	Erfaringer . . . . .	34
5.3	Holmestrandporten . . . . .	34
5.3.1	Geologi og grunnforhold . . . . .	34
5.3.2	Tetthetskrav og utført vannkontroll . . . . .	35
5.3.3	Erfaringer . . . . .	36
5.4	Oppsummering av erfaringer fra Romeriksporten, Lysaker–Sandvika og Holmestrandporten . . . . .	36
<b>6</b>	<b>Follobaneprosjektet og ingeniørgeologiske forhold langs tunnelen</b>	<b>39</b>
6.1	Generelt om Follobanen . . . . .	39
6.2	Tunnelboremaskinene . . . . .	41
6.3	Ingeniørgeologiske forhold langs tunnelen . . . . .	43
6.3.1	Forundersøkelser . . . . .	43
6.3.2	Bergartsfordeling og løsmasser . . . . .	44
6.3.3	Oppsprekking . . . . .	46
<b>7</b>	<b>Hydrogeologi og tetting av tunnelen</b>	<b>49</b>
7.1	Sårbare områder . . . . .	50
7.2	Vannkontroll og tettestrategi for TBM-tunneler på Follobanen . . . . .	51
7.2.1	Krav til innlekkasje . . . . .	52
7.2.2	Overvåkningsprogram . . . . .	52
7.2.3	Infiltrasjonsbrønner . . . . .	53
7.2.4	Tettestrategi . . . . .	53
7.2.5	Injeksjon fra dagen . . . . .	61
<b>8</b>	<b>Registrerte forhold under driving</b>	<b>65</b>
8.1	Injiserte områder . . . . .	65
8.2	Innlekkasje i TBM-tunner på Follobanen . . . . .	67
8.3	Effekt av tettingsinjeksjon . . . . .	70

8.3.1	Mengde injeksjonsmasse og vannlekkasjer . . . . .	70
8.3.2	Oppnådde stoppkriterier . . . . .	71
8.3.3	Poretrykk . . . . .	73
8.3.4	Geologi og vannlekkasjer . . . . .	76
8.4	Sammenligning med tidligere erfaringer . . . . .	83
<b>9</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>85</b>
9.1	Videreføring av arbeidet . . . . .	87
	<b>Bibliografi</b>	<b>88</b>
<b>A</b>	<b>Ingeniørgeologisk kart og profil, bergartsfordeling</b>	<b>A1</b>
A.1	Km. 2,85 – 8,0 . . . . .	A1
A.2	Km. 8,0 – 15,5 . . . . .	A3
A.3	Km 15,5 – 22,7 . . . . .	A5
<b>B</b>	<b>Ingeniørgeologisk kart og profil, løsmassetykkelse og fordeling</b>	<b>B1</b>
B.1	Km. 2,85 – 8,0 . . . . .	B1
B.2	Km. 8,0 – 15,5 . . . . .	B3
B.3	Km 15,5 – 22,7 . . . . .	B5
<b>C</b>	<b>Informasjon om geologiske forhold på stuff etter pelnummer. Hentet fra daglige kart- legginger på TBM 4.</b>	<b>C1</b>



# Figurer

2.1	Data fra injeksjonsrundene . . . . .	6
2.2	Data fra injeksjonsrundene og OTV . . . . .	7
3.1	Prinsippskisse av grunnvannstrømning i en bergmasse . . . . .	10
3.2	Det hydrologiske kretsløpet . . . . .	11
3.3	Hydraulisk konduktivitet i ulike bergarter og løsmasser . . . . .	12
3.4	Bruddsone . . . . .	15
3.5	V-notch målinger . . . . .	19
3.6	Åpen TBM . . . . .	21
3.7	Enkeltskjold TBM . . . . .	22
3.8	Dobbeltkjold TBM . . . . .	22
4.1	Geologisk oversiktskart over Norge . . . . .	24
5.1	Oversiktskart med omtrentlig tunnelplasseringer . . . . .	28
6.1	Follobanen . . . . .	40
6.2	Tidslinje tunnelboring Oslo – Åsland . . . . .	41
6.3	Tidslinje tunnelboring Åsland – Ski . . . . .	41
6.4	TBMene på Follobaneprojektet . . . . .	42
6.5	Klassifisering av UCS-verdier . . . . .	45
7.1	Betongelementer . . . . .	54
7.2	Teknisk tegning av borhodet med hullplasseringer for sonder- og injeksjonshull . . . . .	57
7.3	Boremønster for injeksjon fra dagen mellom Ospelia og Sloraveien . . . . .	62
8.1	Injeksjonsforbruk . . . . .	66
8.2	Vannmengder og injeksjonsforbruk, TBM 4 . . . . .	67
8.3	Vannmengder og injeksjonsforbruk, TBM 3 . . . . .	68

8.4	Vannmålinger for TBM 4, pelnummer 12000 – 15000 . . . . .	68
8.5	Vannmålinger for TBM 4, pelnummer 15000 – 18000 . . . . .	69
8.6	Registrert innlekkasje i sonderborehull plottet mot injeksjonsforbruk for hver injeksjonsrunde i de to sørgående tunnellopene. . . . .	70
8.7	Oppnådde stoppverdier, TBM 4 . . . . .	72
8.8	Oppnådde stoppverdier, TBM 3 . . . . .	72
8.9	Plassering av brønner . . . . .	74
8.10	Poretrykksutvikling i løsmassebrønner fra pelnummer 12000 til 15000. . . . .	77
8.11	Poretrykksutvikling i løsmassebrønner fra pelnummer 15000 til 18000 . . . . .	77
8.12	Poretrykksutvikling i fjellbrønner fra pelnummer 12000 til 15000 . . . . .	78
8.13	Poretrykksutvikling i fjellbrønner fra pelnummer 15000 til 18000 . . . . .	78
8.14	Lengdeprofil med injiserte områder for TBM 4 . . . . .	81
8.15	Lengdeprofil med injiserte områder for TBM 3 . . . . .	81
8.16	Antall injeksjonsrunder sortert etter grad av oppsprekking. . . . .	82

# Tabeller

3.1	Klassifikasjonstabell for vanntap målt i Lugeon-verdier . . . . .	18
5.1	Injeksjonsforbruk i Romeriksporten . . . . .	30
5.2	Konsesjonskrav i Østmarka og oppnådd tetthet for Romeriksporten . . . . .	30
5.3	Oversikt over injeksjonsmengder og tidsbruk på tunnelstrekningen mellom Lysaker og Sandvika. . . . .	33
6.1	Tekniske spesifikasjoner for TBMenne på Follobanen . . . . .	43
7.1	Antall områder innenfor hver sårbarhetsklasse . . . . .	50
7.2	Pelnummer for systematisk forinjeksjon . . . . .	58
7.3	Utløsende verdier for vannmålinger i sonderborehull . . . . .	59
7.4	Grenseverdi for vanninnstrømning på stoff og skjold . . . . .	59
8.1	Oversikt over vannmengder og injeksjonsforbruk i de to tunnellopene. . . . .	66





# Kapittel 1

## Innledning

### 1.1 Bakgrunn

Innlekkasjer i tunneler skaper store utfordringer både under driving og ved senere drift av anlegget. De aller fleste tunneler i Norge vil befinne seg under grunnvannsnivå og er derfor utsatt for innlekkasje i konstruksjonsfasen. Slike innlekkasjer vil, i tillegg til å gi dårlige arbeidsforhold og redusert inndrift, kunne påvirke vannbalansen i tunnelens nærliggende omgivelser. Forstyrrelsene kan redusere poretrykket i både overliggende berg og løsmasser. Endringen i poretrykk kan igjen gi skadevirkninger på miljøet ved å drenere overflatevann eller indusere setninger i sensitiv leire og skade boliger og andre installasjoner. Det er derfor viktig å få oversikt over de ulike problemene vannet kan forårsake, både for tunneldriften selv og tunnelens funksjon, samt for omgivelsene og miljøet på overflaten.

Mange av fremtidens tunnelprosjekter kommer til å ligge i urbane strøk der kravene til tetthet stadig blir strengere fordi opprettholdelse av grunnvannsnivået er kritisk. Det er av den grunn viktig å utvikle kunnskapen om tettestrategier slik at kravene til tetthet tilfredstilles og skader unngås.

### 1.2 Formål

Masteroppgaven er en videreføring av et litteraturstudie om vannkontroll og tettestrategi for tre tidligere ferdigstilte jernbanetunneler i Oslo-området, gjennomført av samme forfatter høsten 2017.

Hovedtema for masteroppgaven er å gjennomføre en systematisk analyse av lekkasjeforhold og måten innlekkasje er håndert på i de ferdigdrevne delene av TBM-tunnelene på Follobanen.

Hovedfokus i denne masteroppgaven skal være på ingeniørgeologiske forhold relatert til TBM-tunnelene på Follobanen.

Formålet med masteroppgaven er å

1. Beskrive valgt tettestrategi for TBM-tunnelene på Follobanen
2. Redegjøre for strategi for sonderboring og beslutningsgrunnlag for injeksjon
3. Beskrive og diskutere valgte metoder for gjennomføring av tetttingsinjeksjon og vurdere alternative metoder
4. Evaluere og diskutere hvilke geologiske forhold som har gitt størst innlekkasje
5. Evaluere effekten av tetttingsinjeksjon, basert på gjennomgang av resultater fra målinger av poretrykk og andre relevante parametre

### 1.3 Utforming og begrensninger av masteroppgaven

Masteroppgaven er gjennomført våren 2018 og omfatter 30 studiepoeng. Den er inndelt i 9 kapitler.

- **Kapittel 1** presenterer bakgrunnen for arbeidet med masteroppgaven. Formålet med oppgaven forklares og det setts arbeidsmål. Det settes også grenser for å begrense omfanget av arbeidet.
- **Kapittel 2** er en oversikt over benyttet grunnlagsmateriale, samt hvordan disse er prioritert.
- **Kapittel 3** gir et teoretisk rammeverk som vil hjelpe leseren i videre forståelse og tolkning av masteroppgaven. Mye av teorien er hentet fra, eller bygger videre på, tidligere prosjekt-oppgave skrevet av forfatteren innenfor samme tema.
- **Kapittel 4** redegjør for regionalgeologien i Oslofeltet og sørøst Norge.
- **Kapittel 5** er et resymé av de tre studerte tunnelprosjektene fra tidligere utført prosjekt-oppgave.

- **Kapittel 6** gir et overblikk over Follobaneprosjektet hvor forfatteren har sittet og arbeidet under store deler av perioden og ingeniørgeologiske forhold langs traséen.
- **Kapittel 7** tar for seg de hydrogeologiske aspektene ved prosjektet og redegjør for valgt tettestrategi for Follobanen.
- **Kapittel 8** er en presentasjon og diskusjon av de registrerte forholdene under driving av TBM-tunnelene på Follobanen.
- **Kapittel 9** er en konklusjon av arbeidet.

Det er valgt å fokusere på de to sørgående tunnellopene mot Ski for å begrense omfanget av tilgjengelig informasjon og data. Av samme grunn er ingen informasjon etter pelnummer 18250 analysert eller studert i masteroppgaven. Det utgående løpet bores av TBM 4, Anna og det inngående løpet bores av TBM 3, Magda. De to sørgående løpene strekker seg fra omtrent pelnummer 12200 – 20600.

Rapportene med registreringer av rundene med forinjeksjon i tunnelen mangler informasjon om mengde injeksjonsmasse i kilogram fra 23.03.2017 til 22.05.2017. Volum i liter injeksjonsmasse er oppgitt.



# Kapittel 2

## Grunnlagsmateriale og datakilder

Masteroppgaven er en videreføring av en prosjektoppgave utført av samme forfatter høsten 2017. Mye av teorien og litteraturen benyttet i masteroppgaven er felles for disse. Av litteratur er rapporter fra prosjektet ”Miljø- og samfunnstjenlige vegtunneler”, Kristin Holmøy sin doktorgrad og NFF sin publikasjon om vannkontroll mye benyttet.

Det er valgt å fokusere på de to sørgående tunnellopene mot Ski. Forfatteren har utført mesteparten av arbeidet i kontorbygningen til Bane NOR på riggområdet til Follobanen på Åsland. Dette har medført muligheten til å opparbeide kunnskap gjennom personlig kommunikasjon med nøkkelpersoner fra Bane NOR. Mye av innholdet i oppgaven bygger derfor på informasjon skaffet fra kommunikasjon med ansatte. Under er en liste med personer på anlegget som har bidratt til masteroppgavens innhold på en eller annen måte:

- Fredrikke Syversen (Assisterende byggeleder, Bane NOR)
- Agnethe Hoff Finnøy
- Guro Isachsen
- Marcus Fritzøe Lawton
- Jørn Harald Grønlund
- Per Schraml

I tillegg har følgende grunnlagsmateriale kommet til nytte:

- Internrapporter fra Bane NOR om ingeniørgeologiske og hydrogeologiske forhold langs traséen, samt prosedyrebeskrivelser.



	A	B	C	D	E	F
1	<b>TBM 4</b>					
2	Start	Slutt	<b>Qty (ton)</b>	<b>Volum tot</b>	<b>Vann tot</b>	<b>Ks-tot</b>
15	14+120	14+150	7,9	9620	257,8	1,51
16	14+150	14+170	16,4	27792,4	60,5	0,8
17	14+280	14+300	13,2	17894	359,2	1,07
18	14+300	14+330	13,5	17458,2	281,8	0,58
19	14+340	14+370	14,4	18297	224,2	0,98
20	14+390	14+420	14,9	19563	74	0,92
21	14+420	14+450	13,2	18584,8	45	0,95
22	14+470	14+500	13,2	22859	60,5	1,33
23	14+500	14+520	21	26620	59,5	0,81
24	14+520	14+540	27,5	38674	439,5	0,93
25	14+540	14+570	15,3	21458	305,2	1
26	16+340	16+360	11,6	15745	248,5	0,64
27	16+380	16+400	3,7	5232	159	0,73
28	16+520	16+550	15,9	21085	247	0,91
29	16+560	16+590	22,1	27643	128,8	0,72
30	16+790	16+820	12,5	16840	56	0,88
31	16+910	16+930	12,2	16987	459	1,63
32	16+940	16+970	27	34420	152	1,19
33	17+070	17+100	45	55264	240	0,68
34	17+100	17+120	28,6	33448	250	1,88
35	17+120	17+140	26	33918	412,5	0,76
36	17+140	17+160	35,8	47151	216	0,55
37	17+180	17+200	28,8	37907	183	0,84
38	17+200	17+220	29,2	37143	125	1,55
39	17+360	17+390	20	23444	78	0,57
40	17+520	17+550	18,7	21537	82	1,01
41	17+720	17+750	8,7	10226	155	0,99

Figur 2.2: Utsnitt fra oppstilling i Excel med innsamlet data fra injeksjonsrundene og fra OTV

Rapporter fra den daglige kartleggingen på stoff er gjennomgått for å få oversikt over den observerte geologien under driving. Vedlegg C oppsummerer et utvalg av disse. Det er fokusert på områdene hvor det har vært mye innlekkasje og der det er injisert i tunnelen.

For å undersøke eventuelle sammenhenger mellom vannlekkasjer/injeksjonsmasse og geologi ble det tenkt at mengden lekkasje og antall injeksjonsrunder per Q-verdi kunne undersøkes. Her kunne det også ha vært interessant og undersøke sprekkeparametere innenfor Q-verdien, for eksempel Ja og sprekkefyll. I teorien vil en tett sprekke gi mindre lekkasjer. Siden det er benyttet dobbeltskjold TBM og betongelementene installeres rett bak kutterhodet, er visuell tolkning av tunnelveggene begrenset til observasjoner gjennom kutterhodet på stoff. Det er derfor ikke estimert Q-verdier for hele tunnelen. For å tilegne seg nok informasjon om forholdene foran stoff benyttes optisk televiwer [OTV] daglig slik at hele tunnelen kan representeres med bil-

der. OTVen genererer et 360 graders utbrettsfoto av veggene inne i sonderborehullene slik at en kan få informasjon om sprekketettheten, sprekkeretninger og bergarter. Bildene prosesseres og analyseres ved hjelp av programvaren WellCAD og Excel for å bestemme bergoppsprekkingsfaktoren  $K_s$ -tot. Siden disse verdiene eksisterer for hele tunnelen ble det valgt å undersøke de representative verdiene for hver utførte injeksjonsrunde i de to sørgående tunnellopene.

Alle resultater presenteres og diskuteres i kapittel 8.



# Kapittel 3

## Generelt om vannlekkasjer ved tunneldrift og driving med TBM

Kapittelet er en kort introduksjon til grunnvannstrømning i berg og er ment som et teorigrunnlag for oppgaven videre. Deler av innholdet er hentet fra prosjektoppgaven skrevet av samme forfatter, andre deler er mer utfyllende og utdypet teori.

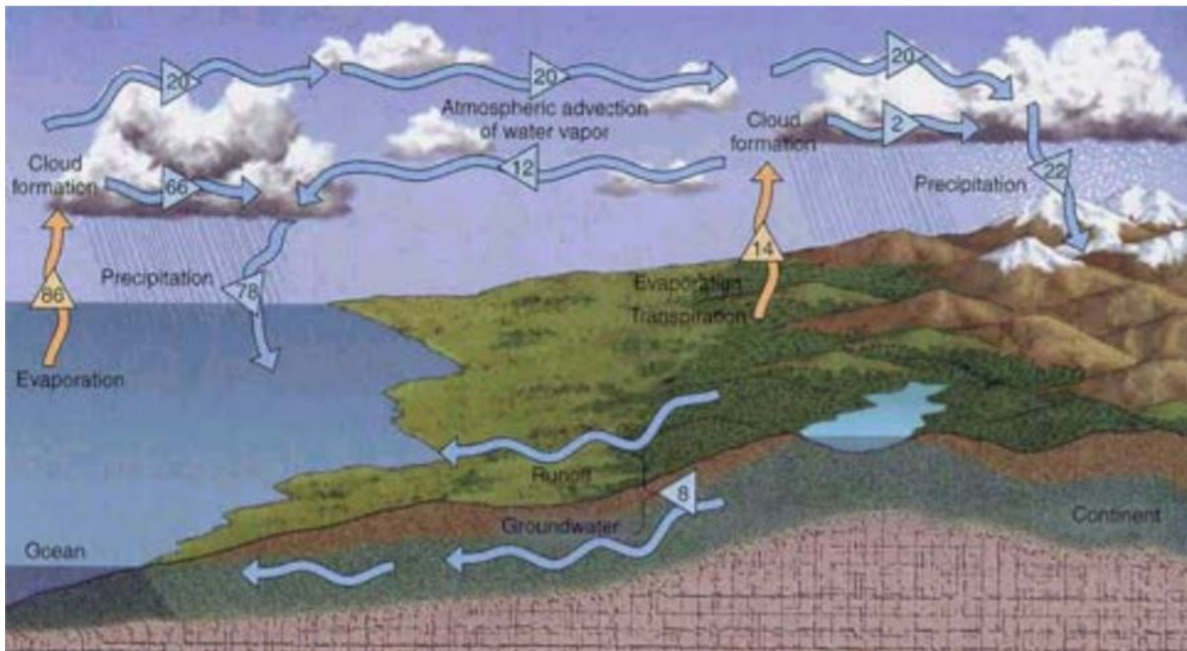
Vann opptrer i bergmassen på ulike måter. Eksempler er overflatebundet vann på mineraloverflater, kjemisk bundet vann i mineraler eller kapillært bundet vann. I masteroppgaven vises det til fritt, bevegelig vann i sprekker og åpninger da dette har størst betydning for driving og senere drift og bruk av tunneler. Figur 3.1 viser grunnvannstrømning i en oppsprukket bergmasse, og hvordan ulike geologiske og hydrogeologiske parametre, samt ulike forhold i overdekningen resulterer i lekkasjer i tunneler og andre bergrom ([Holmøy, 2008](#)).

### 3.1 Vann i berg

Det hydrologiske kretsløpet beskriver vannets sirkulasjon og oppførsel over og under jordoverflaten. Figur 3.2 viser en illustrasjon av syklusen bestående av evapotranspirasjon (summen av fordampning og planteånding), nedbør, overflatevann og grunnvann. Hovedprinsippet er at vannbevegelsen og mengden vann er konstant. Oppholdstiden til vannet i de ulike mediene som er vist i figuren varierer fra få uker i elvene til flere tusen år i dype grunnvannsmagasin.



Figur 3.1: Prinsippskisse av grunnvannstrømning gjennom en oppsprukket bergmasse og inn i en tunnel (Holmøy, 2008).



Figur 3.2: Det hydrologiske kretsløpet (Karlsruud et al., 2003).

På lang sikt er vannbalansen for et nedbørsfelt statistisk. Det betyr at det er en balanse mellom vannmengden som tilføres området og den vannmengden som føres ut av området, enten ved avrenning eller evapotranspirasjon. Balansen beskrives etter vannbalanseligningen, ligning (3.1).

$$P = Q + E + \Delta S \quad (3.1)$$

der  $P$  er nedbør,  $Q$  er avrenning,  $E$  er evapotranspirasjon og  $\Delta S$  er endringen i vannmagasinet i starten og slutten av en gitt periode.

Enhver innlekkasje i tunnelen vil påvirke vannbalansen i et vannmagasin, men avhengig vann-tilførselen vil forskjellige områder påvirkes ulikt ved samme lekkasjeomfang (Grepstad, 2001). Lekkasjen vil kun påvirke mengden vann som lekker ut av magasinet uten å endre mengden tilført vann. Derfor er det en klar sammenheng mellom sårbarheten til et område og tilsiget. Konsekvensene vil være større for områder med lite tilsig fordi selv en liten lekkasje kan gi en stor grunnvannssenkning (Karlsruud et al., 2001).

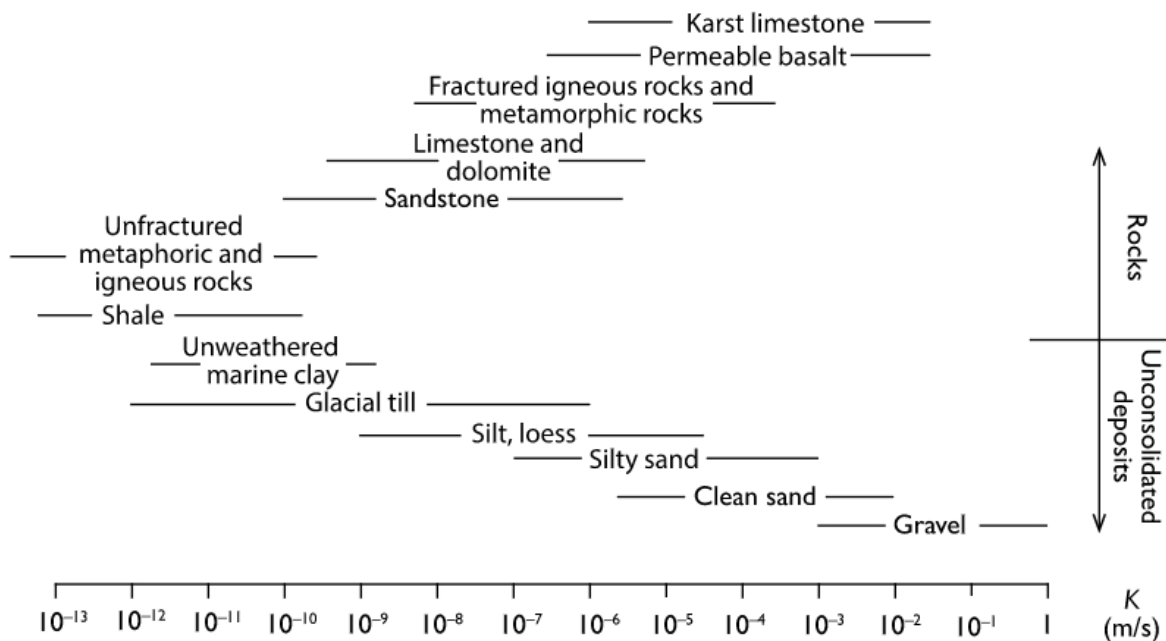
Bergmasse kan i utgangspunktet være en god barriere for innlekkasjer i tunnel i seg selv, men siden det er et diskontinuerlig medium vil de hydrauliske egenskapene kunne variere bredt fra helt ugjennomtrengelig bergmasse til bergmasse med sterkt vannførende soner. I Norge har de fleste bergarter svært lav porøsitet. Grunnvannstrømningen er derfor begrenset til oppspruk-

ne soner i bergmassen. Den hydrauliske konduktiviteten er den mest brukte parameteren for å karakterisere de hydrauliske forholdene til en bergmasse (Tollan, 1977). Parameteren representerer proporsjonalkoeffisienten i Darcy's lov, gitt i ligning (3.2).

$$v = k \times I \quad (3.2)$$

der  $v$  representerer grunnvannets strømningshastighet,  $k$  kalles permeabilitetskonstanten og er et mål på hydraulisk ledningsevne, og  $I$  er helningen på grunnvannet, den hydrauliske gradienten.

I realiteten følger strømningsforholdene sjeldent Darcy's lov om laminær strømming fordi bergmassen er et komplekst og inhomogent strømningsmedium. Den hydrauliske konduktiviteten er avhengig av både naturen til sprekke og forbindelsen i sprekkenettverket for området. Den kan derfor endres på svært korte avstander (Karlsruud et al., 2003). Figur 3.3 gir en oversikt over den hydrauliske konduktiviteten for ulike bergarter og løsmasser.



Figur 3.3: Typiske verdier for hydraulisk konduktivitet i ulike bergarter og løsmasser, modifisert etter Freeze and Cherry (1979).

Det er tydelig at den varierer innenfor vide grenser, der de laveste verdiene på skalaen samsvarer med ingen synlig lekkasje eller små drypp, mens de høyere verdiene er innlekkasje på flere tusen liter per minutt per hundre meter tunnel (Holmøy, 2008).

Kommunikasjonen i et nettverk av sprekker er av stor betydning for vannledningsevnen til bergmassen og avhenger av utholdenhetsgraden og orienteringen til sprekke-ene, samt avstanden mellom dem. Generelt vil vannføringen være større for økt sprekkeintensitet, forutsatt at sprekke-settene er orientert i ulike retninger fremfor å være parallelle (Løset, 2006).

Den hydrauliske konduktiviteten er ofte høyere i sprekkesystemer som har gjennomgående, lange sprekker fremfor kortere sprekker. Dette har vist seg gjeldende også i tilfeller der sprekkesys-temet med stor utholdenhetsgrad har færre antall sprekker (Braathen and Gabrielsen, 2000).

Scesi and Gattinoni (2009) støtter dette og forklarer det med at sprekke-ene i stor grad vil være isolert med få forbindelser for systemer med lav utholdenhetsgrad, mens et sprekkesystem med større utholdenhet gir et sammenhengende nettverk hvor grunnvannet kan strømme fritt. Videre vil sprekker som er åpne lede mer vann enn sprekker som er mer lukket eller som har sprekke-ryll og dermed er fullstendig eller delvis tettet. Samme prinsipp gjør at ru sprekker kan ha høyere hydraulisk konduktivitet fordi ru bruddflater ikke lar seg presses helt sammen ved deformasjon (Braathen and Gabrielsen, 2000).

Svakhetssoner i bergmassen har mye høyere sprekkeintensitet enn sideberget. Dette gir en større sannsynlighet for god kommunikasjon mellom de ulike sprekke-ene slik at sonene kan være sterkt vannførende. I sin doktorgrad studerte Holmøy (2008) sammenhenger mellom ingeni-ørgeologiske forhold og vannlekkasjer i seks norske tunneler. Studiet viste en svak korrelasjon mellom vannlekkasjer og Q-verdien i berg, et klassifiseringssystem for bergmasser utarbeidet av Norges Geologiske Institutt [NGI] for å indikere bergmassekvalitet (NGI, 2015). Studiet viste at de største innlekkasjene i tunnelen forekom på strekninger med Q-verdier mellom 0,6 og 15. Dersom bergmassekvaliteten ble dårligere og Q-verdien ble estimert lavere enn 0,1 minket vannlekkasjene og ble ytterligere redusert med enda lavere Q-verdier.

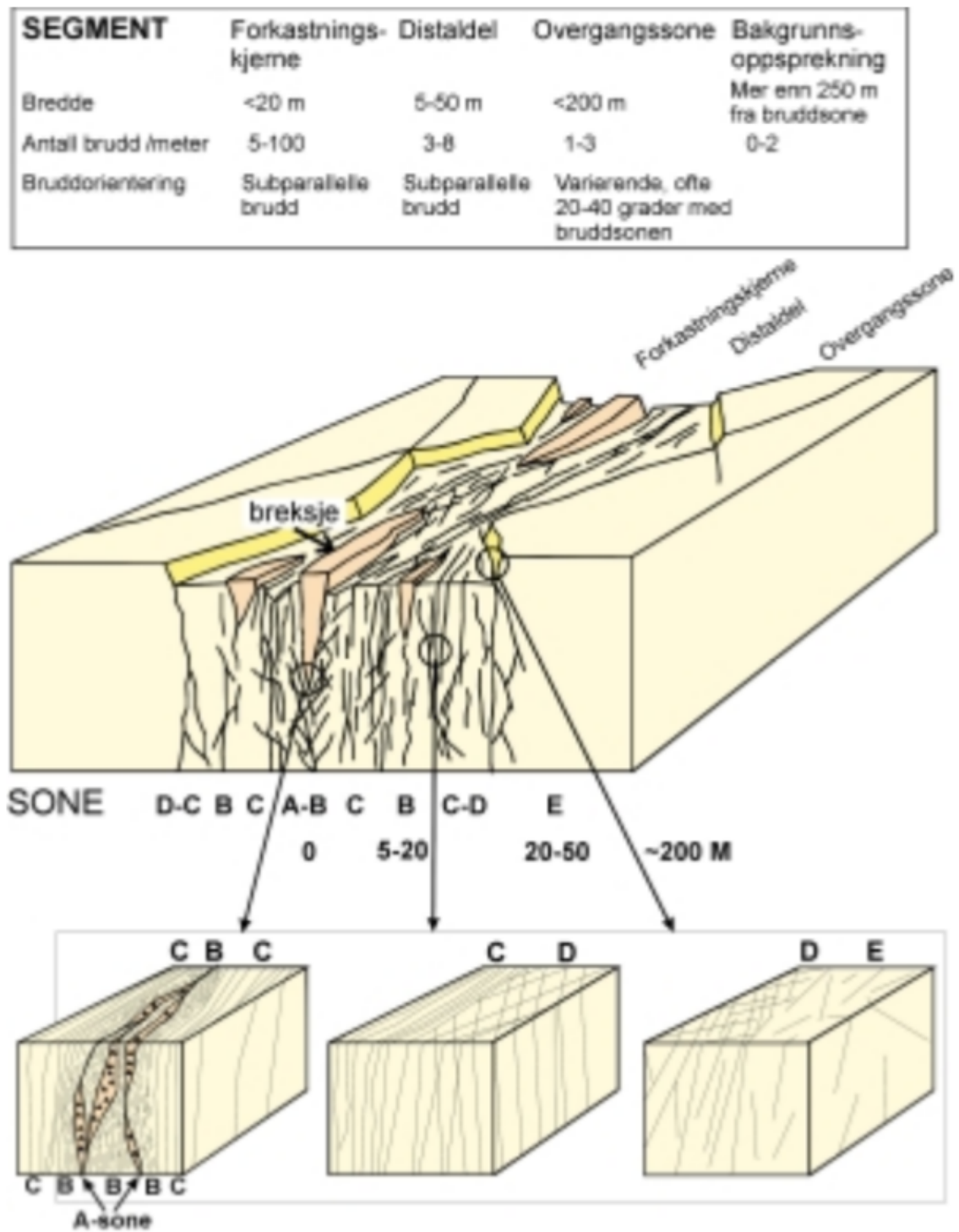
Dette begrunnes med teorien om at kjernemateriale i svakhets- og forkastningssoner består av finmateriale og leire som tetter berget i større eller mindre grad. Av den grunn kan disse sone-ene være både vannførende og forseglende avhengig av hvor store bevegelser og dermed hvor mye finmateriale som er blitt dannet under nedknusingen i sonen. Mye finmateriale kan virke forseglende i forhold til områdene rundt og skape en grunnvannsbarriere (NFF, 2002).

Parallele svakhetssoner er som oftest dannet under samme geologiske forhold og spennings-situasjoner. Dette medfører at forholdene i en sone kan gi en god indikasjon på hvordan forholdene i neste, parallelle sone er siden de er av samme karakter. Dersom det for eksempel er innhold av sleppemateriale i den første påtrufne sonen, er det rimelig å anta at den neste, parallelle også gjør det (Nilsen and Broch, 2012).

Figur 3.4 illustrerer en typisk oppbygging av bruddsoner med forkastningskjerner, distaldel og overgangssone til friskt sideberg. Den gir et godt bilde av oppsprekkingen til bergmassen i slike soner. Forkastningskjernen (navngitt A og B) er kjernen av bruddsonen og er ofte velutviklet og relativt tett i norske bergarter. Distaldelen er navngitt de latinske bokstavene C og D på figuren. I sone C er det gjennomgående, parallelle sprekker uten mineralisering. Denne sonen antas å gi høyest vannlekkasjer. Sone D er distaldelen lenger vekk fra forkastningskjernen og har noe lavere sprekeintensitet enn resten av distaldelen. Den siste sonen, E-sonen, er overgangen til helt friskt sideberg. Bredden på denne delen kan være alt fra noen titalls meter til 200 meter (Braathen and Gabrielsen, 2000).

I studiet til Holmøy ble de minste lekkasjene registrert i forkastningskjerner hvor leirmineraler gjorde bergmassen tilnærmet tett, sone A og B på figur 3.4. De største lekkasjene ble, i samsvar med teorien til Braathen and Gabrielsen (2000), påtruffet i distaldelen omtrent 5–20 meter fra kjernen. Her var bergmassen gjennomsluttet av gjennomgående, åpne sprekker dannet i overgangen mellom friskt sideberg og den oppknuste sonen, illustrert som sone C i figur 3.4. Svakhetssonene sin bredde hadde ikke en sterk betydning for volumet av innlekkasjen (Holmøy, 2008).

Eruptivganger har også stort potensiale til å være vannførende. Når eruptivganger stivner, vil det dannes åpne sprekker mellom eruptivgangen og sideberget på grunn av en volumreduksjon. Effekten forsterkes dersom gangene er orientert vinkelrett på minste hovedspenning. I tillegg vil eruptivganger generelt sprekke opp enklere enn sideberget. Kombinasjonen gjør dem sterkt vannførende slik at de kan forårsake store vannlekkasjer når de krysses under driving (Løset, 2006).



Figur 3.4: Typisk oppbygging av bruddsoner med beskrivelse etter segmenter og soner

## 3.2 Konsekvenser for indre og ytre miljø

Vannlekkasjer inn tunneler kan skape komplikasjoner både under driving, ved bruk av den ferdigstilte tunnelen og for omgivelsene.

### 3.2.1 Indre miljø

Vannlekkasjer på stoff kan føre til stabilitetsproblemer, samt økt slitasje på maskiner og utstyr i tunnelen. Eksempler er økt forvitring av utsatte bergarter, svelling, korrosjon ras og utvasking av sleppemateriale og leire (Nilsen and Broch, 2012).

Store innlekkasjer vil skape et dårligere arbeidsmiljø, som igjen kan påvirke effektiviteten på arbeidene negativt. I kombinasjon med at store vannlekkasjer må tettes før tunnelen kan drives videre, er det trolig at fremdriften reduseres dersom dette viser seg problematisk.

For den ferdigstilte tunnelen kan vannlekkasjer være problematisk fordi elektriske installasjoner kan skades eller det kan oppstå korrosjonsproblemer. Ved kaldere temperaturer kan isdannelse langs tunnelkonturen skape fare for trafikantene.

### 3.2.2 Ytre miljø

Under grunnvannsspeilet, i den mettede sonen, er alle hulrom i løsmasser og fjell fylt med vann. Poretrykket øker med dybden under grunnvannstanden. Grunnvannslekkasjer i tunnelen kan redusere poretrykket og senke grunnvannsnivået i de overliggende massene (Karlsruud et al., 2001).

Reduksjonen av poretrykket er størst nederst ved fjellet og avtar oppover mot overflaten. En senkning av grunnvannstanden vil forstyrre vannbalansen, gitt av ligning (3.1), og kan gi både kjemiske og fysiske endringer av de naturlige forholdene i området (Karlsruud et al., 2003). De mest sårbare områdene inneholder naturtyper med naturlig høy grunnvannstand som myrer, tjern, innsjøer og vassdrag. Skadene skjer fordi naturen er avhengig av den stedlige grunnvannstanden og derfor påvirkes direkte om denne senkes.

For leiravsetninger er det endringen i poretrykket og ikke senkningen av grunnvannstanden i seg selv som er kritisk. Vegetasjonen på slike avsetninger er ikke like avhengig av kontakt med grunnvannet under leiren i tillegg til at leirens lave permeabilitet gjør drenering fra overliggende



vannkilder mindre sannsynlig siden leiren opptrer som et nært impermeabelt lag under (Karlsrud et al., 2001). Poretrykksreduksjonen har derfor ikke stor innvirkning på naturen, men øker effektivspenningene i løsmassen tilsvarende reduksjonen. Dette kan medføre en konsolidering av leiren og resultere i setnings-skader på bygninger og installasjoner. Konsoliderings-hastigheten vil avta ved konstant trykkreduksjon. Den største delen av setningene vil av den grunn skje i den første tiden etter at poretrykksreduksjonen fant sted.

Marin leire og torv har størst setningspotensiale (Karlsrud et al., 2001). Siden det sjeldent er bebyggelse fundamentert direkte på torv, utgjør leiren det reelle problemet med setnings-skader. Som et resultat av den isostatiske oppløftingen av landet etter siste istid, finnes det ofte sensitiv leire i utdypninger i bergoverflaten. Dette er tilfelle i store deler av de tettest befolkede områdene på Østlandet og i Oslo. Problematikken rundt vannlekkasjer i tunnelen og opprettholdelse av grunnvannstanden er derfor et viktig aspekt for alle tunnelene bygget i området (Karlsrud, 2001).

### 3.3 Målemetoder

De hydrogeologiske forholdene langs tunneltraséen må kartlegges for å kunne estimere mulige vannlekkasjer i tunnelen og vurdere sårbarheten til omgivelsene. På bakgrunn av dette kombinert med kunnskap om vannbalansen i området, kan krav til tetthet og tettingstiltak langs tunnelen fastsettes. Det er en fordel at alle registreringer og målinger følges nøye opp underveis i prosjektet slik at prosedyren kan forbedres fortløpende og tilpasses de faktiske forholdene under driving.

#### 3.3.1 Poretrykk og setninger

For å overvåke vannbalansen og registrere eventuelle poretrykksendringer, etableres et nett av grunnvannsbrønner med poretrykksmålere. Grunnvannstanden vil variere med årstidene og fra år til år avhengig av nedbør og tilsiget til områdene. Av den grunn bør målingene foretas over en periode i forkant av anleggstart for å få en oversikt over de naturlige variasjonene i grunnvannet. Målingene bør også opprettholdes i en periode etter prosjektet er ferdigstilt for å registrere eventuelle ettervirkninger (Acciona Ghella Joint Venture, 2017a).

For å måle setninger forårsaket av tunnelprosjektet, er det vanlig å sette opp målebolter på utsatte bygninger innenfor tunnelens influensområde.

### 3.3.2 Vanntapsmåling

For å bestemme permeabiliteten til bergmassen og anslå injeksjonsbehovet i tunnelen, kan en utføre vanntapsmålinger. Pakkere plasseres i et kjerneborhull slik at seksjoner av hullet avgrenses. Deretter pumpes det vann inn i seksjonen i en fem minutters periode med et overtrykk på 10 bar (1 MPa), og vanntapet ut i bergmassen måles i liter. Lugeon-testen avsluttes når to etterfølgende målinger på fem minutter hver gir likt resultat. Utifra dette kan Lugeon-verdien til bergmassen beregnes. Lugeon-verdien defineres som den vannmengde i liter som presses inn i et borhull per minutt per løpemeter borhull ved et overtrykk på 10 bar. En Lugeon-enhet tilsvareer erfaringsmessig, og ved antatte homogene forhold, en permeabilitetskoeffisient på  $k = 1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$  (NFF, 2002).

I følge Quiñones-Rozo (2010) kan Lugeon-verdiene deles inn i seks klasser, presentert i tabell 3.1.

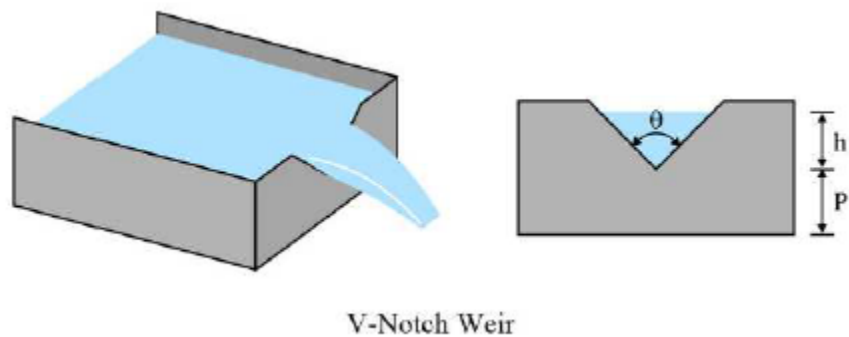
Tabell 3.1: Klassifikasjonstabell for vanntap målt i Lugeon-verdier (Modifisert etter Quiñones-Rozo (2010)).

Lugeon-verdi	Klassifisering	Sprekkeforhold i bergmasse
< 1	Svært lavt	Svært tette sprekker
1 – 5	Lavt	Tette sprekker
5 – 15	Moderat	Få åpne sprekker
15 – 50	Medium	Noen åpne sprekker
50 – 100	Høyt	Mange åpne sprekker
> 100	Svært høyt	Åpne sprekker, tett oppsprukket

En begrensning ved Lugeon testen er at kun et lite volum av bergmasse rundt borehullet påvirkes av testen. Resultatene kan også bli vesentlig påvirket av sprekker som ikke kommuniserer med resten av sprekkenettverket. Dette kan gjøre resultatet misvisende sammenlignet med tunnelens faktiske lekkasjeforhold. Lekkasje gjennom pakkere under utførelse av testen kan være en mulig feilkilde (Nilsen and Palmstrøm, 2000).

### 3.3.3 Registrering av innlekkasje i tunnel

For å avgjøre behovet for tetting av bergmassen ved injeksjon, registreres innlekkasjer av vann under driving. En vanlig måte å gjøre dette på er ved å utføre sonderboringer fra stoff. Sonderboringene vil gi en indikasjon på forholdene foran stoff slik at injeksjonsbehovet og omfanget kan planlegges og også tilpasses underveis. Antall sonderborehull, plassering og lengden på dem avhenger av hvilke bergmasseforhold som er forventet, sårbarheten til omgivelsene over tunnelen, overdekning og tilegnede erfaringer fra drivingen. Vanlig lengde er mellom 20 og 30 meter. Der som det er større risiko for lekkasje eller tetthetskravene er strengere, er det vanlig å øke antall hull for å ha best mulig kontroll på de kommende forholdene. Valg av videre tettestrategi baseres i de fleste tilfeller på målinger av innlekkasje fra sonderborehull. Målingene utføres med bøtte og stoppeklokke.



Figur 3.5: Prinsippskisse for V-notch målinger (Acciona Ghella Joint Venture, 2017a).

Lekkasjen kan også måles ved V-notch målinger. To diker med kjent tverrsnitt er plassert der vannet ledes ut av tunnelen for å bestemme strømningsraten i liter per sekund. Metoden bygger på prinsippet om at denne er direkte relatert til vanddybden over bunnen av V formen, kalt  $h$  på figur 3.5. Designet gjør at selv små endringer i vannmengden som renner igjennom gir utslag på høyden (Acciona Ghella Joint Venture, 2017a).

## 3.4 Tunnelboremaskiner

TBM er en forkortelse for tunnelboremaskin på norsk, og avgrenses i masteroppgaven til fullprofilboremaskiner med sirkulære profil. TBMene som benyttes i hardt berg, bryter berget ved å trykke diskuttere mot stoffen. Diskutterne er fastmontert på et roterende kutterhode fremst

på TBMen som danner konsentrisk sirkulære spor i stoffen slik at en knusningssone med radiell rissdannelse oppstår og steinfragmenter brytes ut av berget. Den knuste bergmassen løftes opp i kutterhodet og transporteres derfra videre bakover i TBMen på et transportbelte. Videre transport fra TBMen og ut i dagen kan skje enten ved bruk av kjøretøy, sporbunden transport eller ved hjelp av kontinuerlig transportbelte ([Jakobsen and Arntsen, 2014](#)).

### 3.4.1 Typer fullprofilboremaskiner

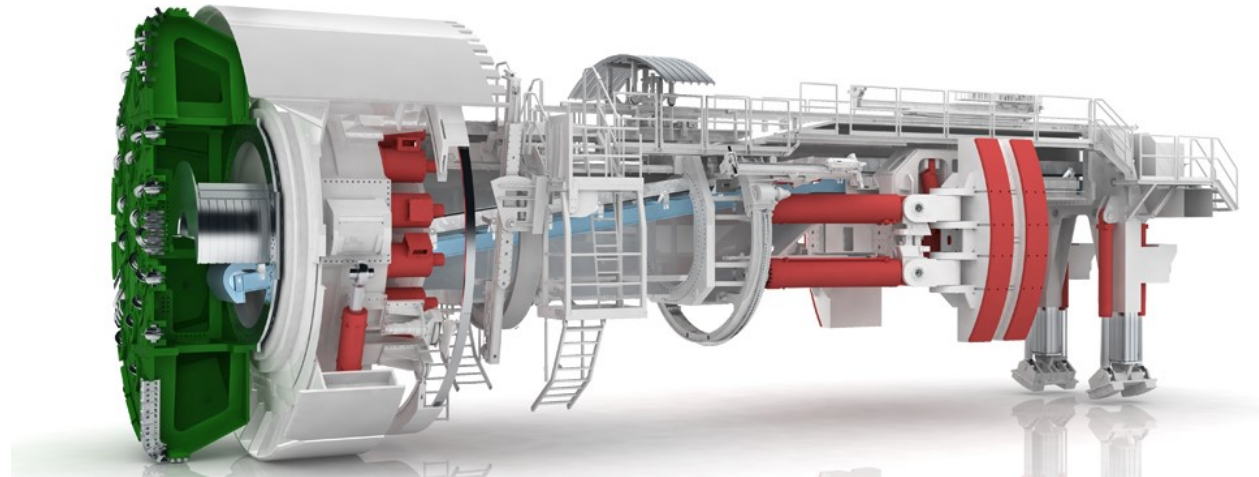
#### Åpen TBM

Frem til i dag, er alle fullprofilborede tunneler i Norge drevet med åpne TBMer, også kalt gripper-TBM. I motsetning til enkelt- og dobbeltskjold TBMer, har ikke åpne TBMer et omsluttende skjold og de ligger derfor åpne i bergmassen. Maskinen avstives mot den ferdigdrevne tunnelen ved hjelp av hydrauliske sylindere som forlenges lateralt og grippersko montert på siden av maskinen. Disse utgjør kjerneelementet på maskintypen og stabiliserer og presser TBMen mot berget rundt. Gripperskoene er igjen montert til matesylindre som skyver kutterhodet fremover under boring. Når matesylindrene er helt utspent, trekkes gripperskoene inn og matesylindrene sammen før en ny syklus igangsettes ([Jakobsen and Arntsen, 2014](#)). Figur 3.6 viser oppbyggingen til en åpen TBM med kutterhode, grippersko og hydrauliske matesylindere.

Maskinentypen har ingen kontinuerlig stabilisering på stoff, utenom muligheten for forinjeksjon, og må av den grunn benyttes ved gode bergforhold der stabiliteten er god nok til at konvensjonell bergsikring kan installeres, for eksempel bolter og sprøytebetong ([NFF, 2015](#)). Der som maskinen er utstyrt med borhammere som kan bore gjennom kutterhodet og området bak, kan TBMen konsolidere på forhånd kjente svakhetssoner ved forinjeksjon før gjennomboring. Maskinen må stå i ro for å gjennomføre en boring for injeksjon ([Jakobsen and Arntsen, 2014](#)).

#### Enkelt- og dobbeltskjold TBM

Enkeltskjoldmaskiner brukes hovedsakelig i dårligere bergmasse, mens dobbeltskjoldmaskiner er godt egnet ved driving av tunnel i bergmasse med varierende kvalitet ([Jakobsen and Arntsen, 2014](#)). Det er sistnevnte, dobbeltskjold TBM, som benyttes på Follobanen, se kapittel 6.



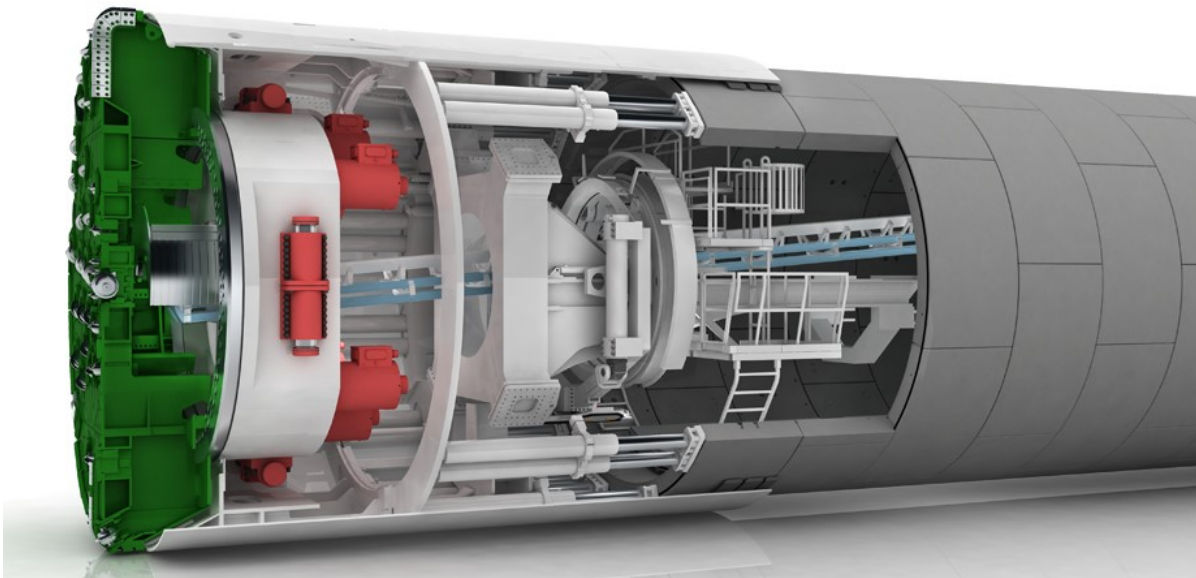
Figur 3.6: Oppbyggingen til en åpen TBM, også kjent som gripper-TBM ([Herrenknecht \(u.å\), b](#)).

Enkelt- og dobbeltskjold TBMer har et omliggende stålskjold som beskytter både maskinen og arbeidere ved å forhindre at ustabil berg faller ned i tunnelen under driving før bergsikring er installert fremfor å ligge åpen i bergmassen. Som bergsikring installeres betongsegmenter i den ferdigborede tunnelen etter hvert som maskinen beveger seg fremover.

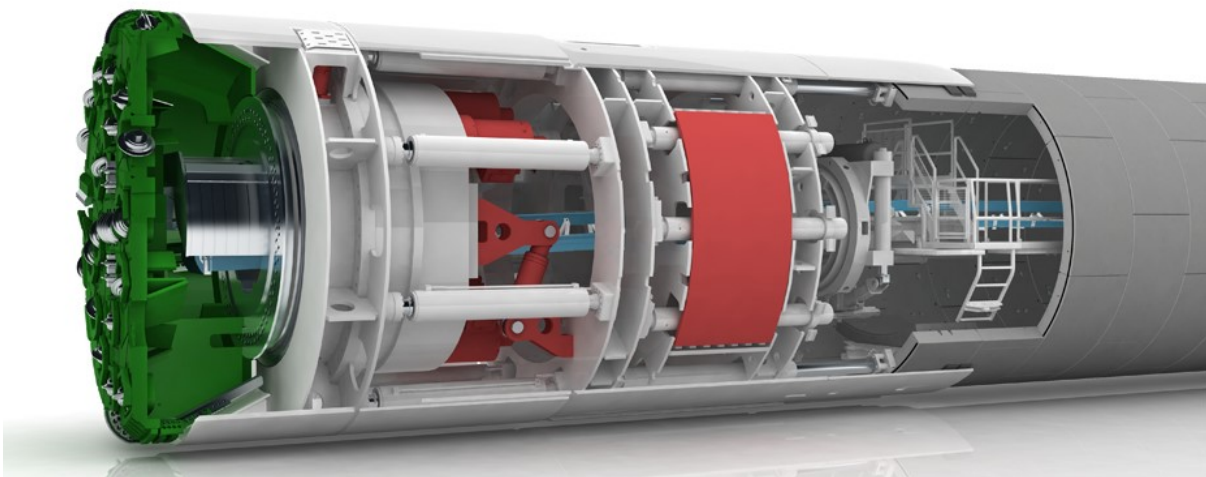
Enkeltskjold TBMer benyttes der berget er svakt eller kan gå til brudd på grunn av trykket gripperskoene ville påført bergmassen. Fremdriften avhenger av den grunn av betongsegmentene siden den baseres på at hydrauliske sylindere skyver TBMen fremover fra disse og overfører matekraften gjennom matesylindrene og frem til kutterhodet ([Jakobsen and Arntsen, 2014](#)). Figur 3.7 viser en illustrasjon av hvordan en enkeltskjold TBM er oppbygget. Her kan man også se hvordan sylindrene skyver fra mot de monterte betongsegmentene.

Dobbeltskjold TBMer kan benyttes i hardt berg til oppsprukket, svakt berg. Figur 3.8 viser oppbyggingen til maskintypen. Skjoldet til dobbeltskjold TBMer er todelt og teleskopisk. I stabil bergmasse avstives maskinen radielt til tunnelveggene med grippersko som befinner seg i det bakre skjoldet. Den fremste delen av skjolden kan avansere uavhengig gripperskjoldet ved hjelp av matesylindre mellom de to delene som overfører kraft til kutterhodet. Betongsegmentene installeres i den bakre delen av maskinen parallelt med drivingen. I svakere eller sterkt oppsprukket bergmasse hvor berget står i fare for å gå i brudd eller deformeres av trykket fra gripperskoene, kan masinen bore i enkeltskjoldmodus. Den vil da avansere ved å skyve fra mot betongsegmentene på samme måte som enkeltskjold TBM. Dersom bergmassekvaliteten er god og det ikke er krav om sikring med betongutforing, kan maskintypen bore uten å installere betongringene ([NFF, 2015](#)).

For dobbeltskjold TBMer muliggjør kombinasjonen av virkemåten til åpne og enkeltskjold TBMer kontinuerlig sikring med betongsegmeneter samtidig som maskinen borer videre i stabil bergmasse. I enkeltskjold TBMer eller dobbeltskjold TBMer som kjører i enkeltskjoldmodus, blir operasjonen sekvensiell. Når maskinen har boret ferdig, må matesylindrene tilbaketrekkes og ringen av betongsegmeneter monteres ferdig før maskinen kan bore på nytt. Utnyttelsesgraden for en enkeltskjold TBM blir av den grunn lavere enn for åpne og dobbeltskjold TBMer siden maskinen må vente med å bore inntil en full ring av betongsegmeneter er ferdig installert (Jakobsen and Arntsen, 2014).



Figur 3.7: Oppbyggingen til enkeltskjold TBM (Herrenknecht (u.å), c).



Figur 3.8: Oppbyggingen til dobbeltskjold TBM (Herrenknecht (u.å), a).

# Kapittel 4

## Regionalgeologi

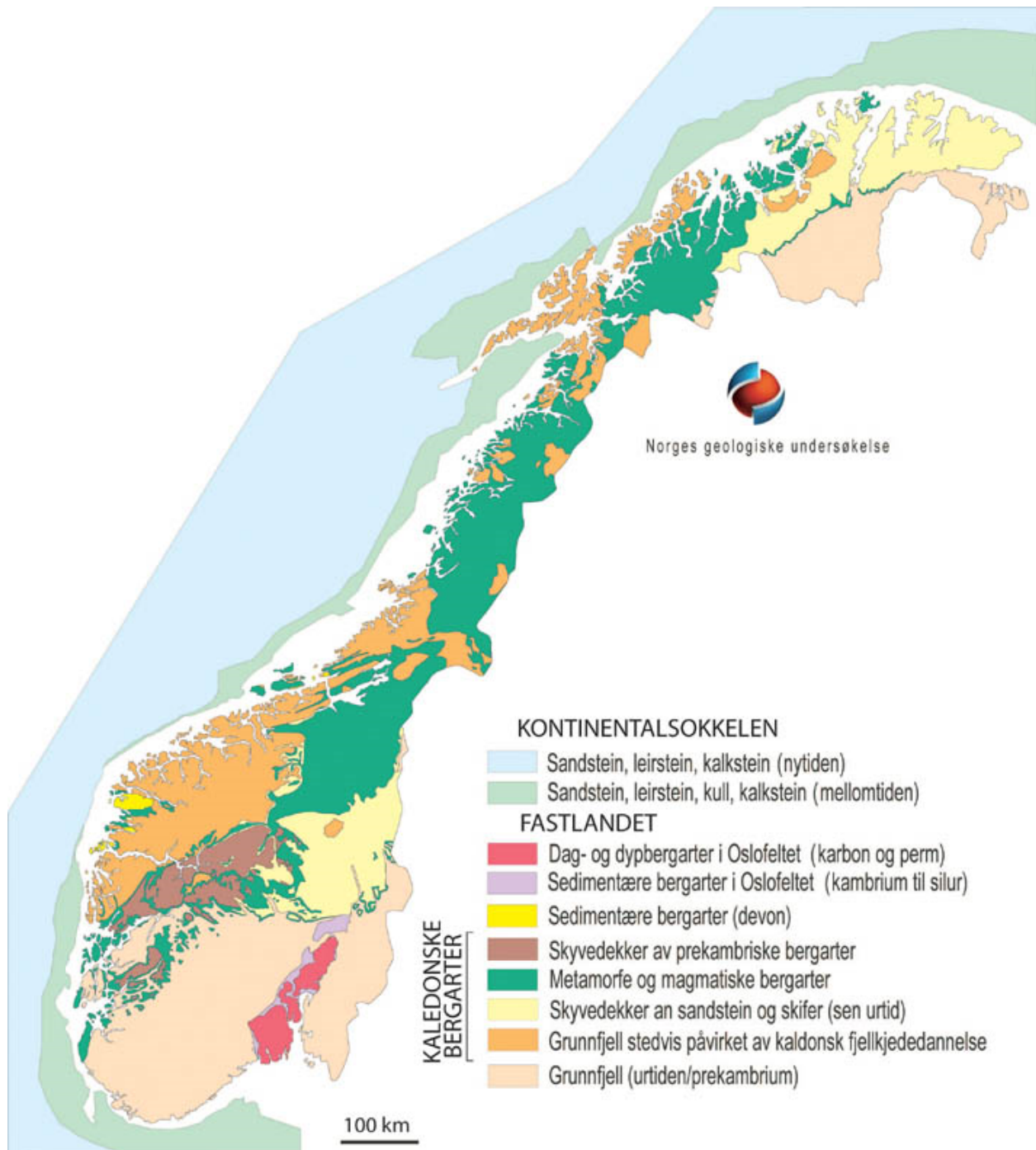
Ingeniørgeologiske egenskaper bestemmes i stor grad av tektonikk og bergarter og det er derfor lurt å få en oversikt over geologien for området. Dette kapittelet redegjør for regionalgeologien i aktuelle områder. Follobanen ligger i området øst for Oslofeltet.

Norge kan deles inn i geologiske områder basert på dannelseshistorie og bergartstype. Figur 4.1 er en oversikt fra [NGU \(2017\)](#) over Norges berggrunnsgeologi med tilhørende tidsepoke for dannelse gitt i parentes i tegnforklaringen.

Området øst for Oslo og Oslofeltet domineres av bergarter fra tre ulike tidsepoker; prekambrium, kambrosilur og perm. Store deler er bygget opp av grunnfjell dannet i jordas urtid, prekambrium. Flere steder har grunnfjellet påhvilende sedimenter fra sent i prekambrium og kambrosiluravleiringer. I Oslofeltet finner man dag- og dypbergarter fra karbon og perm.

Området øst for Oslofeltet består hovedsakelig av prekambrisk grunnfjell bestående av høy-metamorf gneis og granitt av god kvalitet. Bergmassen er inhomogen med uregelmessige ganger og linser bestående av amfibolitt, pegmatitt og gabbro. Området avgrenses av Oslofeltet i vest og en sparagmittregion i nord. Nærmest Oslofeltet, mot vest, kan det forekomme permiske eruptivganger av for eksempel diabas og rombeporfyr. Det finnes større og mindre forkastningssoner i området ([Løset, 2006](#)).

Oslofeltet strekker seg langs Oslofjorden fra Mjøsa i nord og Langesund i sør og er omgitt av prekambrisk grunnfjell både øst og vest. Tykke avleiringer avsatt under oversvømmelsen i kambrosilur er bevart og skjøvet under den kaledonske fjellkjededannelsen. Den sedimentære lagrekken består i hovedsak av skifre, knollekalker, kalksteiner og sandsteiner avsatt oppå prekambrisk grunnfjell. Enkelte steder er lagrekken erodert vekk.



Figur 4.1: Geologisk oversiktskart over Norge (NGU, 2017).



I perm ga store tektoniske bevegelser opphavet til en innsynkning langs store forkastinger orientert nor-sør, slik at en grabenstruktur ble dannet. Oslofeltet er i stor grad avgrenset av disse parallelle forkastningene, der innsynkninger på opptil 1000 meter foregikk. Omfattende vulkansk aktivitet i denne perioden etterlot seg både lavastrømmer av basalt og rombeporfyr, smeltetmasser fra dypet og eruptivganger som gjennomsatte bergartene som var i området fra før ved at vulkansk smeltetmasse har trengt inn i sprekker og deretter størknet til bergarter ([Ramberg et al., 2013](#)). De permiske dypbergartene dekker store deler av Oslofeltet og er av god kvalitet. Eruptivgangene er orientert likt som hovedsprekkeretningene i Oslofeltet, omtrent nord-sør. De varierer i tykkelse, utstrekning og mineralsammensetning. Graden av oppsprekking varierer også, men generelt er eruptivgangene mer oppsprukket enn sideberget, både fordi den har sprukket opp under avkjøling og fordi eruptivgangen lettere sprekker opp enn sideberget. Forenklet kan de deles inn i tre hovedtyper ([Løset, 2006](#)):

- **Diabasganger** bestående av 50 % amfibol eller pyroksen og 50 % Ca-rik plagioklas. Gangene er sorte til mørkegrå i fargen.
- **Porfyriske syenittganger** bestående av hovedsaklig alkalifeltspat. Gangene er røde og gråspraglete.
- **Mæaittganger** bestående av Na-rik plagioklas. Gangene har en lysegrå til hvit farge.

De ingeniørgeologiske forholdene varierer mye fra lag til lag i den kambrosilurske lagrekken. De permiske dypbergartene har jevnt over gode forhold for driving av tunnel, men strømtoppene kan skape problemer. De nord-sør orienterte forkastningssonene øst for Oslofjorden er relativt åpne som følge av at minste hovedspenning står vinkelrett på dem, og kan av den grunn være sterkt vannførende ([NGU, 2017](#)). I tillegg kan eruptivgangene som gjennomsetter de andre bergartene medføre problemer knyttet til stabilitet og vannlekkasjer i tunnelen, se delkapittel 3.1.



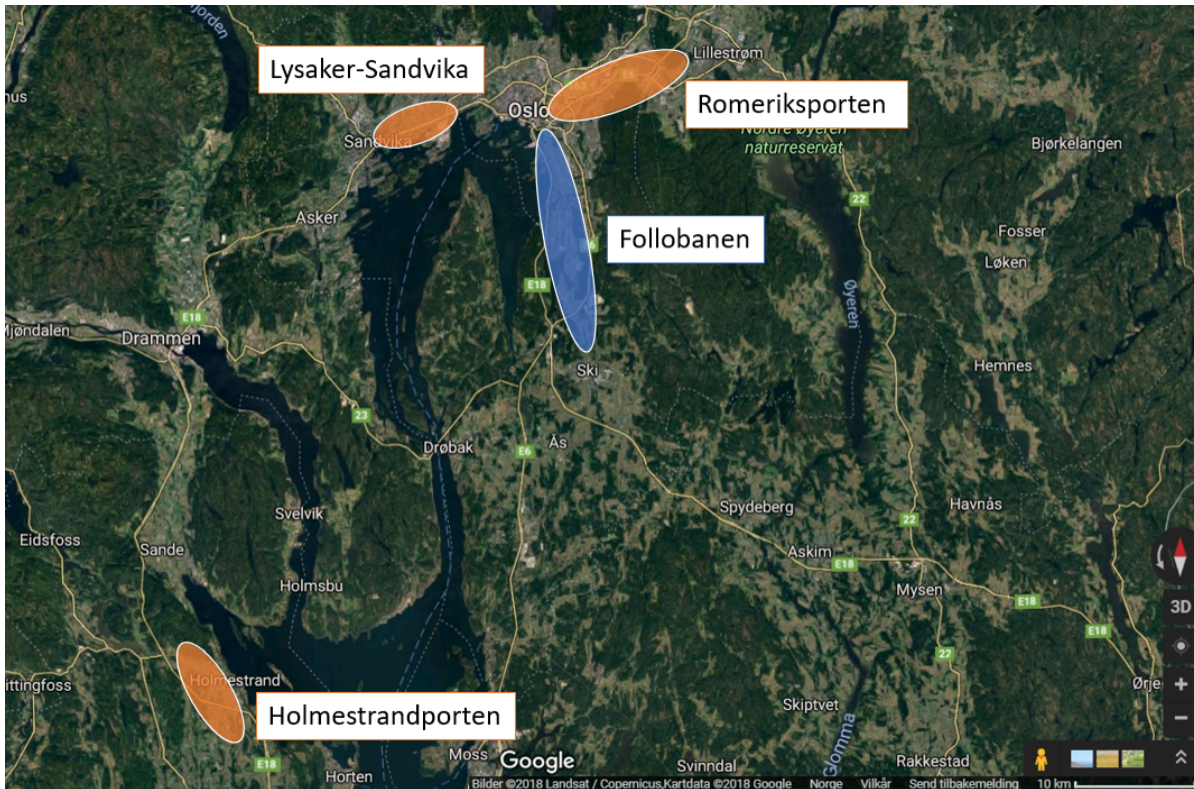
## Kapittel 5

# Erfaringer fra ferdigstilte tunneler i nærområdet

Kapittelet er en oppsummering fra den tidligere utførte prosjektoppgaven av samme forfatter der tre relevante tunnelprosjekter i Oslo-området fra de siste 20 årene ble studert. De studerte prosjektene er Romeriksporten, Lysaker-Sandvika og Holmestrandporten. Det blir gitt en beskrivelse av hvert prosjekt før en oppsummering av erfaringer fra prosjektene gis avslutningsvis i kapittelet.

Alle de tre prosjektene er bygget med konvensjonell tunneldrift og går gjennom sårbare områder, enten forbundet med naturområder eller bebyggelse. For å overholde de gitte tetthetskravene ble det benyttet forinjeksjon. For Holmestrandporten og Lysaker-Sandvika ble det på grunn av strenge tetthetskrav benyttet systematisk forinjeksjon, mens det for Romeriksporten ble foretatt en kontinuerlig vurdering av injeksjonsbehovet på bakgrunn av systematiske sonderboringer.

Figur 5.1 viser et utsnitt av et satellittfoto med omtrentlig plassering av de tre tunnelprosjektene fra dette kapittelet i forhold til plassering av Follobanen.



Figur 5.1: Oversiktskart med omtrentlig plassering av Romeriksporten, Lysaker–Sandvika og Holmestrandporten i forhold til Follobanen. Bakgrunnskartet er hentet fra [Google Maps \(2018\)](#).

## 5.1 Romeriksporten

Romeriksporten er en dobbeltsporet tunnel på 13,8 km som inngår i den 42 km lange høyhastighetsbanen fra Gardermoen til Oslo S. Den ble bygget mellom 1994 og 1999.

### 5.1.1 Geologi og grunnforhold

Traséen til Romeriksporten går fra Etterstad i Oslo til Stalsberg nær Lillestrøm. Tunnelen ligger i sedimentære bergarter fra kambro-silur og grunnfjell av prekambrisk gneis. Overgangen mellom bergartstypene ligger ved Bryn hvor tunnelen krysser en av randforkastningene i Oslofeltet. Den dominerende bergarten på strekningen er grunnfjellsgneis med amfibolitt. Andre bergarter er kalkstein og skifer ([Geoteknisk kontor, Oslo kommune et al., 1999](#)).

Forundersøkelsene fokuserte på geologi, bergmassekvalitet og svakhetssoner. Siden tunnelen

krysser flere svakhetssoner ble det forutsett et stort omfang av forinjeksjon. Flere av svakhetssonene er orientert nord-sør og kjent for å være åpne. I dagen fremstår de som løsmassefylte dypprenner, hovedsakelig av marin leire. Det ble ikke gjennomført noen forundersøkelser for å kartlegge hydrogeologiske systemer. Overdekningen varierer mellom 20 og 230 meter. Området over tunnelen består delvis av bebyggelse i form av hus og infrastruktur fundamentert på bløt leire og delvis av skogområder som er sårbare på grunn av lite jord og et naturlig høyt grunnvannsnivå.

Det ble gjennomført en konsekvensutredning for å få oversikt over hvilken påvirkning prosjektet ville ha på omgivelsene. Denne fastslo at faren for å senke grunnvannet var normal og fullt mulig å motvirke med det store omfanget forinjeksjon som var beskrevet i anbudet (Beitnes, 2001).

### 5.1.2 Tetthetskrav og utført vannkontroll

Sprekkesonene tunnelen krysser gir stor fare for innlekkasje i tunnelen. Mellom Godlia og Hellerud ble tetthetskravet satt til 5 L/min på grunn av bebyggelse fundamentert på setningsømfintlig leire. Fra Hellerud til Ellingsrud er det lite bebyggelse, men mye natur. Her ble det basert på erfaringer fra tidligere prosjekter antatt at en innlekkasje på opptil 10 L/min ved sonderboringer kunne tåles uten av vannbalansen ble påvirket negativt. Den siste delen av strekningen hadde likt tetthetskrav som starten av tunnelen på 5 L/min (Beitnes, 1998).

Det ble utført behovsprøvd injeksjon og systematisk sonderboring med 3–6 hull på 23 meter og med 8 meter overlapp mellom disse. Sonderboringene ble gjort for å oppdage mulige vannførende strukturer foran stoff.

Det ble i alt boret 272 000 meter med sonder- og injeksjonshull, der 5100 meter tilsvarende 37 % av strekningen ble injisert. Hver injeksjonsskjerm bestod av 20–30 hull på 23 meter. Eventuelle supplerende skjermer og antallet av dem varierte med fire skjermer på det meste.

Tabell 5.1 viser mengde av benyttede injeksjonsmidler. Som tabellen viser, ble det primært benyttet industrisement. I vanskelige områder der industrisementen ikke tettet berget tilstrekkelig, ble det først forsøkt tettet med mikrosegment. Dersom injeksjonsarbeidet ikke var tilfredsstillende etter dette, ble det kjemiske injeksjonsmiddelet Rhoca-gil tatt i bruk ved etterinjeksjon.

En total lengde på 200 meter av tunnelen ble tettet med full utstøpning som supplerende vannsikring til injeksjonsarbeidet.

Tabell 5.1: Injeksjonsforbruk i Romeriksporten (Beitnes, 1998).

Injeksjonsmidler	Industrisement	Mikrosement	Rhoca-gil
	5400 tonn	1300 tonn	340 tonn

### 5.1.3 Vannlekkasjer og konsekvenser for ytre miljø

Det viste seg å være et vannførende sprekkesystem også mellom de forventede vannførende svakhetssonene mellom Godlia og Hellerud. Her ble forinjeksjonen utført nærmest systematisk. De største lekkasjene forekom under Østmarka, spesielt under Lutvann og Puttjern. Lekkasjene opptrådte i forbindelse med leirfylte svakhetssoner. Det var vanlig med målinger inntil 1000 L/min for en runde og målinger på 100–200 L/min for et enkelt sonderhull. Under Lutvann ble vanntrykket målt til 13 bar noe som tyder på åpne sprekker med kontakt helt opp til Lutvann. Det høye vanntrykket kombinert med store lekkasjer gjorde tettarbeidet vanskelig. Etter flere mislykkede forsøk med utilfredsstillende resultat, ble det avgjort at restlekkasjer skulle tettes ved etterinjeksjon (Palmstrøm et al., 2003).

Grunnvannstanden ble senket i Østmarka som en konsekvens av de store innlekkasjene. Det ble gitt konsesjon med krav til maksimum lekkasjer på delstrekninger for å reetablere grunnvannsnivået og gjenopprette vannbalansen i området. Tabell 5.2 viser de pålagte konsesjonskravene fra NVE i Østmarka og resultatene oppnådd etter utført etterinjeksjon i 1999 (Melbø, 1999). Det ble også installert et vanninfiltrasjonsanlegg i Puttjernsonen.

Som følge av den omfattende dreneringen, fikk terrenget synlige skader. De skadede myrområdene er robuste systemer med stor evne til tilpasning, men ble antatt til å ikke bli de samme som de var før tunnelen ble drevet. Dagens natur i området er fuktigere og en vegetasjonstype er skiftet ut med en annen (Karlsruud et al., 2001).

Tabell 5.2: Pålagte konsesjonskrav fra NVE i Østmarka og oppnådd tetthetsgrad i 1999 etter omfattende etterinjeksjon (Melbø, 1999).

Sone	Krav i L/min	Lekkasje i L/min
Lutvannsonen	400	341
Puttjernsonen	220	168
Puttjernbekken	300	254

Under Hellerud var innlekkasjen i tunnelen 24 L/min per 100 meter etter forinjeksjon. Til tross for at restlekkasjene var for store til å holde grunnvannsnivået stabilt, ble det unnlatt å reagere på fall i poretrykksmålerne før setningene allerede var godt i gang. Det ble derfor igangsatt et omfattende vanninfiltrasjonsprogram med 25 grunnvannsbrønner for å reetablere grunnvannstanden og hindre videre setningsutvikling. I 1998 fikk man kontroll på disse. Det ble anslått at reparasjonskostnadene ville komme på 90 mill. kr (Melbø, 1999).

### 5.1.4 Etterinjeksjon

Etterinjeksjonen ble utført for å tette restlekkasjene. Arbeidet med etterinjeksjon tok over ett år og medførte en forsinkelse i åpning av tunnelen. Som hovedkonsept ble det benyttet systematisk etterinjeksjon med mikrosement. Prosedyren var tilfredsstillende i vegger og heng, mens tetting av sålen og foten av tunnelveggene var mer problematisk. Rocha-gil ble ikke benyttet etter at konsekvensene ble kjent og all annen bruk av kjemiske injeksjonsmidler måtte godkjennes basert på en risikovurdering av helsefare og belastning på ytre miljø (Beitnes, 2001).

### 5.1.5 Erfaringer

Palmstrøm et al. (2003) mener at forundersøkelsene var noe mangelfulle og trekker frem følgende erfaringer knyttet til omfanget forundersøkelser opp mot de faktiske forholdene:

- De største avvikene knyttes til vannlekkasjer og vanskelighetsgraden av injeksjonsarbeidet. Til tross for dette ble kun 7500 av de 10.000 oppførte timene i kontrakten benyttet til injeksjonsarbeid.
- Bergmassen og vannlekkasjene varierte raskt og det er usikkert om flere undersøkelser, som for eksempel kjerneboring eller refraksjonsseismikk, ville gitt nok informasjon til å avdekke de vannførende sonene.
- En sårbarhetsanalyse kunne påvist områder som er sensitive for grunnvannsendringer. Sårbarhetsanalyser er blitt en vanlig del av forundersøkelser etter Romeriksporten.
- De veiledende grensene for når injeksjon skulle utføres basert på sonderboringer skulle aldri blitt lempet som følge av tidspress. Et krav til maksimal innlekkasje langs tunnelen burde blitt fulgt.

I tillegg ble det erfart følgende:

- Det var på forhånd kartlagt at Romeriksporten kom til å krysse flere sprekkesoner orientert nord-sør. Det viste seg derimot å være betydelig høyere oppsprekking også mellom disse sonene og dermed større utspredelse av vannlekkasjer enn antatt fordi sprekkenes var vannførende hele veien.
- Det omfattende etterarbeidet medførte en overskridelse av totalbudsjettet på 1,3 mrd. kr i tillegg til at ferdigstillingen ble utsatt med nærmere et år. Dårlig dialog mellom entreprenør og byggherre ble utpekt som en hovedårsak til utfordringene.
- Bruken og håndteringen av media blir også trukket frem hvor flere feilbeslutninger ble foretatt som følge av at mange fattet interesse og ble eiere av saken på grunn av store medieoppslag ([Melbø, 1999](#)).

## 5.2 Lysaker – Sandvika

Strekningen mellom Lysaker og Sandvika blir en del av Askerbanen og er et av tre delprosjekter i utbyggingen til fire spor mellom Skøyen og Asker. Prosjektet ble igangsatt for å øke kollektivandelen og redusere reisetiden i tillegg til å bedre punktligheten på Drammensbanen mellom Oslo S og Asker. Av den totale strekningen på 6,7 kilometer, består 5,5 kilometer av en dobbeltsporet fjelltunnel med dagsone i hver enda. Utbyggingen foregikk mellom 2007 og 2011. Informasjonen om tunnelen er hentet fra Jernbaneverket sin sluttrapport for prosjektet ([Jernbaneverket, 2012](#)) og en byggeplan utført av Multiconsult for Jernbaneverket ([Multiconsult, 2006](#)).

### 5.2.1 Geologi og grunnforhold

Berggrunnen består i hovedsak av en 1000 meter tykk lagrekke av sedimentære bergarter fra kambro-silur som knollekalk, skifer og kalkstein. Bergartene er foldet om en akse som sammenfaller med bergartene sin strøkretning mot nordøst-sørvest. Bergartene er gjennomvannet av flere intrusiver av permisk alder som enten følger lagdelingen eller nord-sør orienterte sprekker. De permiske intrusivene varierer av tykkelse fra få desimeter til noen meter, men flere titalls meter tykke intrusiver kan også forekomme. Tunneltraséen krysser flere av eruptivgangene på strekningen. Det er registrert en sterk oppsprekking i både eruptivgangene og i foldeaksene som gjør sonene rundt vannførende.



Området over tunnelen er kupert med forsenkninger mellom åsrygger orientert nordøst-sørvest. Det er to sett med forkastninger der det ene følger strøket til åsryggene. Disse er dannet i forbindelse med framskyvingen av kaledonske dekker. Det andre settet kan relateres til dannelsen av grabenstrukturen i Oslofeltet. De senkaledonske forkastningene og sprekkesonene kan være delvis leirfylt og delvis åpne og danne kanaler hvor vann kan strømme. Svakhetssonene av permisk alder har belegg av kalkspat eller sprekkefyll av kalkspat, leire og kloritt.

### 5.2.2 Tetthetskrav og utført vannkontroll

Tetthetskravet ble satt til 4 L/min per 100 meter for hele tunnelen. På grunn av tett bebyggelse både over og i nærheten av hele strekningen, sårbar natur og enkelte partier med liten overdekning, ble de negative konsekvensene ved en reduksjon av poretrykket vurdert til å være potensielt omfattende.

Av den grunn ble en grundig utredning av konsekvensene drivingen kunne ha for ytre miljø utarbeidet. Sammen med registreringer av grunnvannsnivå, poretrykk, setningsutviklinger og natur samt geologiske data, ble en tettestrategi fastsatt.

[Holsbrekken and Nesje \(2008\)](#) beskriver injeksjonsprosedyren i en statusrapport fra prosjektet. Det ble valgt å tette tunnelen ved systematisk forinjeksjon med sementbaserte injeksjonsmidler. En standart injeksjonsskjerm var 24 meter lang og ble boret for hver 15 meter (tre salvelengder). En skjerm bestod av 75 hull fordelt langs tunnelkonturen. Stoppkriteriet var 80 bar. For injeksjonsrunder der tettheten ikke var tilfredsstillende, ble det boret kontrollskjermer som ble injisert med mikrosement med samme stoppkriterium.

Tetthetskravene ble oppfylt med god margin. Tabell 5.3 gir en oversikt over injeksjonsmengder og tidsbruk på tunnelstrekningen mellom Lysaker og Sandvika.

Tabell 5.3: Oversikt over injeksjonsmengder og tidsbruk på tunnelstrekningen mellom Lysaker og Sandvika.

	<b>Mengde</b>	<b>Mengde/meter</b>
Industrisement	10 701 859 kg	1 945,79 kg/m
Micro-sement	672 299 kg	122,24 kg/m
<b>Total injeksjonsmengde</b>	<b>11 374 157 kg</b>	<b>2 068,03 kg/m</b>
Injeksjonstid	8 401 timer	1,53 timer/m

### 5.2.3 Erfaringer

95% av tunnelen ble vann- og frostsikret med PE-skum og sprøytebetong. Vurderingen ble tatt fortløpende og partiene som utgjorde de siste prosentene var tørre da beslutningen om sikringsbehovet ble tatt. Vannet fra de sikrede partiene migrerte til de område som var usikret slik at det oppstod problemer med is da vinteren kom. Som et resultat måtte de 5% ettersikres, noe som medførte høye ekstrakostnader. Det er derfor anbefalt å sikre hele tunnelen i forkant for fremtidige prosjekter.

Det er viktig å tilpasse injeksjonsskjermene i vanskelige soner, enten på grunn av geologien i området eller spesiell geometri. Ved lav overdekning var det nyttig å bore og injisere en sperreskjerm før hovedskjermen i tillegg til å ha en vakt i terrenget over tunnelen som passet på og varslet om eventuelle utganger av injeksjonsmassene.

## 5.3 Holmestrandporten

Holmestrandporten er en 12,3 km lang, dobbeltsporet tunnel på en totalt 14,2 km lang strekning mellom Holm i Sande kommune og Nykirke i Re kommune lenger sør. Tunnelen inngår som en del av moderniseringen av Vestfoldbanen. Den passerer Holmestrand by hvor den henger sammen med en stor stasjonshall bygget i fjellet. Tunnelen var ferdig drevet i mars 2014 og åpnet for trafikk i utgangen av 2016.

### 5.3.1 Geologi og grunnforhold

Tunnelen befinner seg i Holmestrandsplatået. Plåtået er bygget opp av flere lavastrømmer avsatt over tid og består av bergarten basalt. Lavastrømmene gjør at plåtået består av flere horisontale lag med ulike bergmekaniske egenskaper. Enkelte lag kan ha høyere porøsitet og lavere egenstyrke enn basalt generelt.

Grunnforholdene varierer fra moderat til sterkt oppsprukket bergmasse. Det ble i forkant av tunneldrivingen utført 2D resistivitetsmålinger for å kartlegge sprekemønstre og løsmassemek-tigheter. I tillegg ble det utført detaljert sprekkekartlegging, kjerneboringer og klassifisering av bergmassen. Ut ifra dette ble det antatt at de fleste forkastingene og svakhetssonene var vertikale eller hadde steile fall mot nord eller sør (Undrum, 2011). Plåtået er delvis dekket av vegetasjon

og dyrket jord. Mektigheten av løsmasser varierer og har enkelte partier med tynt og usammenhengende dekke og blottlagt berg. Mye er marine avsetninger.

### 5.3.2 Tetthetskrav og utført vannkontroll

Tetthetskravet er satt ut ifra ytre miljø, levetid og vedlikeholdshensyn. Dersom tunnelen drenerer grunnvannet, vil det ha konsekvenser for sårbare naturområder, tett bebyggelse, dyrket jord og grunnvannsbrønner. Et overvåkningsprogram ble etablert og nøye oppfulgt gjennom hele prosjektet for å vurdere behovet for midlertidig vanninfiltrasjon ([Jernbaneverket, 2008](#)).

Den nordligste tunnelen fikk et tetthetskrav på 5 – 10 L/min per 100 meter tunnel, mens tunnelen sør for stasjonshallen hadde et krav om lekkasjer mindre enn 5 L/min per 100 meter ([Jernbaneverket, 2011](#)).

Også her ble det benyttet forinjeksjon med sementbaserte injeksjonsmidler. Kontroll-, ekstra- og etterinjeksjonsskjermer ble benyttet der forinjeksjonen ikke ga tilstrekkelig tetthet. Vanntett utstøpning var et alternativ til injeksjon ([Jernbaneverket, 2008](#)). Ekstraskjermene ble benyttet fjelloverdekninger lavere enn 12 meter der 5 – 10 hull ble boret og injisert før runden med forinjeksjon ble utført. Ekstraskjermer ble også benyttet ved betydelige lekkasjer, eksempelvis i svakhetssoner ([Jernbaneverket, 2011](#)).

For stasjonshallen var kravet satt til 5 L/min per 100 meter akkurat som for den sydlige tunnelen. På bakgrunn av vanntapsmålinger ble det avgjort at hallen måtte tettes med systematisk forinjeksjon hvor skjermene hadde et høyt antall injeksjonshull og minst en salve overlapp mellom hver injeksjonsskerm. Skjermene var mellom 22 og 24 meter lange. Alle kontrollhull var helt tørre før en ny salve ble sprengt. Alle beslutninger om injeksjon og tilpasning av skjermer i svakhetssoner ble tatt av byggherre i samråd med entreprenøren ([Undrum, 2011](#)).

Injeksjonstrykket ble tilpasset sprekkefrekvens og vanntrykk i tunnelen. Det var satt et veiledende stoppkriterium for de ulike seksjonene av tunnelen basert på hvor stor overdekningen var, men disse kunne reduseres ved problematiske forhold som utgang i dagen ([Jernbaneverket, 2011](#)).

Som vann- og frostsikring ble det installert prefabrikkerte betongelementer utenpå en vanntett membran ([Jernbaneverket, 2014a](#)).

### 5.3.3 Erfaringer

De største lekkasjene er knyttet til eruptive ganger og i overgangen mellom eruptivgangene og sidebergarter.

For vanskeligere områder, enten ved lav overdekning eller høye innlekkasjer, ble det benyttet ekstraskjerm før hovedskjermen i injeksjonsrundene som en slags sperreskjerm.

Den systematiske forinjeksjonen viste seg nyttig da tunnelen nærmet seg et område med lav og delvis manglende fjelloverdekning. På grunn av den systematiske forinjeksjonen ble forholdene kjent flere salver i forveien slik at tunnelen ikke ble sprengt inn i området. Hendelsen illustrerer viktigheten ved å ha best mulig kunnskap om forholdene foran stuff.

## 5.4 Oppsummering av erfaringer fra Romeriksporten, Lysaker–Sandvika og Holmestrandporten

- Bergartene for alle prosjektene er relativt tette slik at grunnvannstrømningen følger sprekkesystemer.
- De største potensielle lekkasjene ble påtruffet i forbindelse med eruptivganger og de nord-sør orienterte forkastningene typisk for Oslofeltet.
- Både for tunnelen på strekningen mellom Lysaker og Sandvika og for Holmestrandporten var det nyttig å injisere en sperreskjerm før hovedskjermen for å ha god kontroll ved vanskeligere forhold som lav overdekning.
- Gode erfaringer fra tidligere prosjekter kan til en viss grad benyttes til å utvikle løsninger for nye prosjekter. Det er viktig med en grundig dokumentasjon av prosjektet knyttet til metodikk og erfaringer. Dette er av den grunn hjulpsomt for senere prosjekter. For å hindre at informasjonstilgangen begrenses, bør dokumentasjonen foregå underveis i prosjektet.
- Flere av skadene på det ytre miljøet over Romeriksporten kunne vært unngått dersom det ikke ble lempet på tetthetskravene da problemene med forinjeksjon oppstod. Etterinjeksjonen demonstrerte at bruken av injeksjon var tilstrekkelig for å oppnå ønsket tetthetsgrad av bergmassen. Restlekkasjene ville derfor vært mindre dersom en tok seg tid til å overholde tetthetskravene med forinjeksjon.

- Stramme tidsfrister kan være en årsak til at ting ikke går etter planen og at en enklere kan ta mindre heldige beslutninger dersom en føler på tidspress.
- Det burde settes krav til maksimum innlekkasje basert på sårbarhetsanalyser fremfor veiledende lekkasjegranser som var tilfellet i Romeriksporten.
- Det er viktig med tett oppfølging og overvåking av grunnvannstanden gjennom hele anleggsperioden og reaksjonstiden må være kort dersom en viss reduksjon av poretrykket registreres.
- Det kan se ut som om det lønner seg å forebygge fremfor å reparere. Både for Romeriksporten og på tunnelen mellom Lysaker og Sandvika førte ettersikring til høye ekstrakostnader. Selv om forebygging av lekkasjer kan medføre økte kostnader der og da, tilsier erfaringene fra tunnelprosjektene at det er lønnsomt sett i et lengre tidsperspektiv.
- Det samme prinsippet om forebygging gjelder også forundersøkelser da utilstrekkelige grunnundersøkelser kan medføre store omkostninger.
- En åpen dialog og god samarbeid mellom byggherre og entreprenør er viktig.



# Kapittel 6

## Follobaneprojektet og ingeniørgeologiske forhold langs tunnelen

Kapittelet er et informasjonskapittel om Follobaneprojektet og tar for seg ingeniørgeologiske forhold langs tunnelen. De hydrogeologiske aspektene ved prosjektet og benyttet tettestrategi blir redegjort for i kapittel 7.

### 6.1 Generelt om Follobanen

Follobaneneprojektet er et pilotprosjekt for en ny kontraktsmodell, samt nye drivemetoder for norske jernbanetunneler. Bruken av EPC kontrakter (Engineering, Procurement and Construction), konvensjonell tunneldrift kombinert med mekanisk brytning av berget og bruken av tunnelboremaskiner gir rom for innovasjon og en kunnskapsoppgradering (Syversen et al., 2018). Prosjektet omfatter blant annet et nytt, moderne kollektivknutepunkt på Ski, omlegging av Østfoldbanen og bygging av ny tunnel. Per dags dato er Follobanen det største landbaserte infrastrukturprosjektet i Norge.

Follobanen blir en 22 kilometer lang dobbeltsporet jernbane mellom Oslo og Ski. Figur 6.1 gir en oversikt over prosjektet og beliggenhet. Togene på Follobanen skal gå direkte mellom Oslo og Ski og vil halvere dagens reisetid fra 22 minutter til 11 minutter. Østfoldbanen vil få tilpasset og forbedret trasé med lokaltog. Prosjektet vil resultere i et bedret, effektivt og miljøvennlig transporttilbud som gir et større bo- og arbeidsområde rundt Oslo.



Figur 6.1: Oversikt over Follobanen (Bane NOR, 2018).

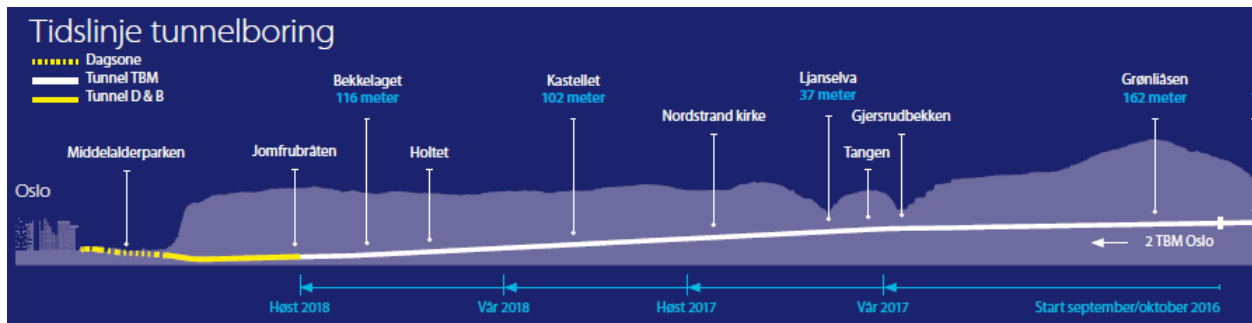
Strekningen vil få en 20 kilometer lang tunnel som bygges med to adskilte tunnellop med tverrtunneler mellom de to løpene for hver 500 meter. Tunnelen starter nær Oslo sentralstasjon med utløp i Ekebergåsen og ender nord for Ski stasjon. Løsningen med to separate løp med tverrtunneler øker sikkerheten for tunnelen fordi det muliggjør evakuering til det parallelle løpet i nødsituasjoner. I tillegg medfører de adskilte løpene at færre personer involveres ved uønskede hendelser siden hendelsene konsentreres til ett av løpene fremfor begge. Nødsituasjoner vil dermed skape forsinkelser fremfor å berøre dobbelt så mange togpassasjerer i ett stort løp.

Omtrent 18 kilometer av tunnelen er drevet i hardt til ekstremt hardt berg ved hjelp av fire dobbeltskjold TBMer. TBmene ble satt sammen i to store berghaller under Granliåsen som ligger omtrent på midten av strekningen ved riggområdet på Åsland. Her startet TBmene å bore tunnel i perioden september–desember 2016, to av maskinene i retning mot Oslo og to mot Ski. De resterende 2 kilometerne, samt tverrtunnelene, redning- og rømningstunneler og adkomsttunnelene fra riggområdene sprenges ut (Jernbaneverket, 2014b). Bane NOR er byggherre og Acciona Ghella Joint Venture [AGJV] er entreprenør. Tunnelen blir Nordens lengste jernbanetunnel per dags dato og bygges for minimum 100 års levetid. Den er prosjektert for tog med hastighet opp til 250 km/t og skal ferdigstilles i 2021.

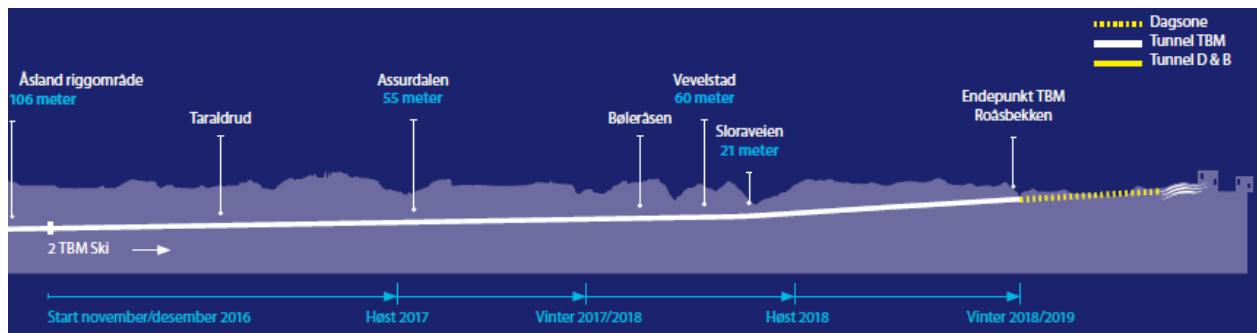
Figur 6.2 og figur 6.3 viser en tidslinje for tunnelboringen og gir en oversikt over områder traséen passerer og enkelte overdekninger. Figur 6.3 fortsetter der figur 6.2 slutter, ved riggområdet på Åsland. Den stiplede, gule linjen viser dagsonene som til sammen utgjør ca. 2 km mens den heltrukke gule og hvite linjen viser den 20 kilometer lange tunnelen. Hvit farge representerer tunnel boret med TBM og gul farge viser tunnel drevet med sprengning eller mekanisk brytning av berget. Møtepunktet mellom tunnelen som er drevet av TBM og den utsprengte delen av tunnelen ligger på km. 2,85 (pelnummer 2850). Punktet er markert i vedlegg A.1. Endepunktet for tunnelen er markert i vedlegg A.3 på km. 22,7 (pelnummer 22700).



## KAPITTEL 6. FOLLOBANEPROSJEKTET OG INGENIØRGEOLOGISKE FORHOLD LANGS TUNNELEN



Figur 6.2: Tidslinje for tunnelboring mellom Oslo og Åsland (Bane NOR, 2018).



Figur 6.3: Tidslinje for tunnelboring mellom Åsland og Ski (Bane NOR, 2018).

### 6.2 Tunnelboremaskinene

Follobaneprosjektet har fire dobbeltskjold tunnelboremaskiner i bruk. Disse er produsert av Herrenknecht AG i Tyskland og deretter transportert og satt sammen på riggområdet på Åsland. De fire TBMene har likt design og er skreddersydd for prosjektet, figur 6.4. TBM 1 og TBM 2 borer nordover mot Oslo mens TBM 3 og TBM 4 borer mot Ski. Byggherre står for de tekniske spesifikasjonene gjengitt i tabell 6.1. Maskinene er designet til å motstå vanntrykk oppmot 12 bar ved nødsituasjoner. Bergsikringen består av en vanntett betongutføring som installeres direkte bak skjoldet. Betongutføringen består av syv separate elementer som installeres i en ring for hver 1,8 meter tunnel og ett betongelement som plasseres i sålen av tunnelen. TBMene har 38 porter i skjoldet og 8 åpninger i kutterhodet hvor sonderboringer og forinjeksjon kan gjennomføres. Transport av masse ut av tunnelen foregår via transportbånd for alle de fire TBMene før det deponeres på anleggsområdet. Dette reduserer både faren ved å bli påkjørt og gir lav trafikkbelastning på hoved- og lokalveier.



Figur 6.4: De fire TBMe på Follobaneprosjektet (Bane NOR, 2018). Fra øverst til venstre til nederst i høyre: TBM 1 "Dronning Eufemia", TBM 2 "Dronning Ellisiv", TBM 4 "Anna fra Kloppa" og TBM 3 "Magda Flåtestad".

Tabell 6.1: Tekniske spesifikasjoner for tunnelboremaskinene

<b>Diameter kutterhode</b>	9,96 m
<b>Innvendig diameter tunnel</b>	8,75 m
<b>Antall kuttere</b>	71 stk
<b>Kutterdiameter</b>	19 " (483 mm)
<b>Vekt kutterhode</b>	265 tonn
<b>Total vekt</b>	2400 tonn
<b>Installert effekt</b>	6900 kW
<b>Matekraft per kutter</b>	280 kN (maks 315 kN)
<b>Lengde TBM</b>	150 m
<b>Lengde skjold</b>	14 415 mm

## 6.3 Ingeniørgeologiske forhold langs tunnelen

Det legges stor vekt på grundig ingeniørgeologisk oppfølging under driving. I tillegg til kontinuerlig overvåking av vannbalansen i området, har byggherren ingeniørgeologer og geologer som er på daglige befaringer i tunnelen. Der blir det utført kartlegging. Siden tunnelen drives med dobbeltskjold TBMer, er det begrenset med synlige bergoverflater i tunnelen. Kartleggingen foregår derfor av stoffen i et 2D perspektiv der det registres bergarter, vann, oppsprekking o.l. For å gjøre opp for den begrensede tilgangen på tilgjengelig berg, benyttes OTV. Bildene blir oppfulgt og tolket kontinuerlig for å se geologiske strukturer og tykkelse på svakhetssoner. MWD data følges også opp slik at man får best mulig oversikt over den kommende geologien. Etter driving registreres den faktiske geologien for de to sør- og nordgående TBMe som har størst fremdrift for å gi en indikasjon på de geologiske forholdene de to andre TBMe kan forvente å møte på ([Acciona Ghella Joint Venture, 2017a](#)).

### 6.3.1 Forundersøkelser

Det er utført flere forundersøkelser av både geologiske og hydrogeologiske forhold for relevante områder for prosjektet. Disse inkluderer:

- Kjerneboringer

- Ingeniørgeologisk kartlegging, både i dagen og i eksisterende tunneler og bergrom
- Hydrogeologisk kartlegging (i dagen, fra borehull og brønner)
- Innmålinger av eksisterende installasjoner
- Geotekniske og bergmekaniske laboratorieundersøkelser
- Refraksjonsseismikk
- Spenningsmålinger
- Resistivitetsmålinger

Resultatene fra forundersøkelsene er dokumentert i en detaljert rapport av Bane NOR. Informasjonen i rapporten regnes for å være representativ for hele tunnelstrekningen ([Jernbaneverket, 2014b](#)).

Forundersøkelsene har fokusert på å kartlegge svakhetssoner, bergarter og sprekkekarakter, i tillegg til de hydrogeologiske forholdene. Hovedhensikten med kjerneboringene har vært å bestemme bredden og karakteren til store svakhetssoner, verifisere dybden til grunnfjelloverflaten og å kartlegge lekkasjeforhold ved hjelp av vanntapsmålinger. De fleste hullene krysser intakt, uforvitret berg utenfor svakhetssonene. Utvalgte kjerner ble testet i laboratoriet for å få kjennskap til de bergmekaniske egenskapene til prøvene.

### 6.3.2 Bergartsfordeling og løsmasser

Bergartene langs tunneltraséen består i hovedsak av prekambrisk gneis med linser av- og båndet amfibolitt og pegmatitt. De prekambriske gneisene deles inn i tre hovedgrupper; tonalittisk til granittisk gneis, kvarts – feltspat gneis og biotittisk gneis. De tre gruppene har liknende mekaniske egenskaper, men noe forskjellig mineralsammensetning og mineralbindinger. Bergmassen er relativt homogen og kompetent med moderat oppsprekking. Enaksiell trykkstyrke varierer mellom 100 og 300 MPa ([Syversen et al., 2018](#)). Ifølge ISRM 1978 tilsvarer disse verdiene høy til ekstremt høy styrke på bergmassen, se figur 6.5. NTNU sin prognosemodell gir en forventet inntrengning på 15,6 meter per dag per TBM.

Den prekambriske gneisen er foldet og viser tydelig foliasjon. Den dominerende planstrukturen er orientert nord–sør til nordvest–sørøst, men nærmest Ski får strukturen en øst–vest orientering. Svakere lag i gneisen har vært mer eksponert for erosjon på grunn av et høyt glimmer- eller

amfibolinnhold. Sammen med forkastninger har dette ført til fremtredende rygger og forsenkninger i terrenget. Flere svakhetssoner krysser gneisstrukturen ([Jernbaneverket, 2014b](#)).

Category	Uniaxial Compressive Strength (ISRM, 1978)
Extremely low	0.25 – 1 MPa
Very low	1 – 5 MPa
Low	5 – 25 MPa
Medium	25 – 50 MPa
High	50 – 100 MPa
Very high	100 – 250 MPa
Extremely high	> 250 MPa

Figur 6.5: Klassifisering av UCS-verdier ([Jernbaneverket, 2014b](#)).

Områdene vest for prosjektområdet og området helt nord i prosjektområdet er innsunket på grunn av dannelsen av Oslo grabenen. Den magmatiske aktiviteten fra denne perioden har gjennomført området med intrusiver med varierende lengde og tykkelse. De eldre intrusivene er av diabaskarakter mens andre er omvandlet til amfibolitt og foldet inn med gneisen. De amfibolittiske gangene utgjør en stor del av intrusivene. De fleste er noen få meter tykke, men enkelte kan være tykkere enn 10 meter. De yngste intrusivene følger svake lag i foliasjonen og svakhetssoner. En spesiell gang av rombeporfyr er mellom 20 og 30 meter tykk og kan følges fra Ekeberg og sørover i 15 kilometer ([Jernbaneverket, 2014b](#)). En oversikt over bergartene langs tunneltraséen finnes i vedlegg A.1 til A.3.

Innsynkingen av Oslo grabenen ga også opphavet til flere normalforkastninger orientert nord-sør. Det er sannsynlig at svakhetssonene som følger planstrukturen til gneisen og samtidig er sub-parallele med strøket til hovedforkastningen i Oslofjorden, har samme egenskaper som disse normalforkastningene. For normalforkastninger er spenningen over forkastningsplanet lav slik at vann kan sirkulere og endre sammensetningen av sprekken og sideliggende berg.

Løsmassene i området er hovedsakelig av marin opprinnelse. Det kan også være morenelag nær bergoverflaten. I tillegg har noen områder organiske avsetninger som torv og myr. Både marine og organiske avsetninger er sensitive for setninger, noe som kan bli et problem dersom grunnvannspeilet senkes. Setninger avhenger av type avsetning, egenskaper, horisontal utbredelse og grunnvannsnivå. Vedlegg B.1 til B.3 gir en tolkning av løsmassetykkelse og fordeling langs tunnelstrekningen. Kartene viser også hvor det er tatt kjerneboringer, observert nivå på overflatevann og plasseringen til brønner og poretrykksmålere.

### 6.3.3 Oppsprekking

Det ble kartlagt to hovedsprekkesett langs hele tunneltraséen ([Jernbaneverket, 2014b](#)):

1. Strøk øst–vest, tilnærmet vertikale sprekker.
2. Strøk nordvest–sørøst til nord–sør, fall  $35^{\circ}$ – $90^{\circ}$  V. Disse følger foliasjonen til den prekambriske gneisen.

De kartlagte sprekkeene er presentert som rosedigram for hvert av de ingeniørgeologiske kartene i vedlegg A.1 til A.3.

Sprekkekarakter og ruhet er kartlagt der det er mulig. Sprekkeavstanden angir gjennomsnittlig avstand mellom to sprekker fra samme sprekkesett og varierer langs traséen. Avstanden mellom to tilfeldige sprekker, som ikke nødvendigvis hører til det samme sprekkesettet, vil derfor avvike. Det er sannsynlig at to tilfeldige sprekker har en lavere sprekkavstand enn gjennomsnittet som gis for de to sprekkesettene.

Det er forventet å treffe på svakhetssoner med tettere oppsprekking enn det som er kartlagt i dagen. Den gjennomsnittlige sprekkavstanden for de to ulike sprekkesettene observert i dagen ser ikke ut til å være påvirket av nærheten til forkastningssonene slik teorien i delkapittel 3.1 tilsier. Det finnes flere mulige forklaringer til dette. En årsak kan være at enkelte blotninger i dagen er for små til å bestemme den generelle sprekkavstanden. En annen er at det er mange tilfeldige sprekker som ikke tilhører et av sprekkesettene, og at disse derfor ikke er inkludert i den gjennomsnittlige sprekkavstanden. En siste forklaring er at områder som er sterkt påvirket av forkastningssoner ofte danner løsmassedekte forsenkninger i terrenget og at det av den grunn ikke er synlige steinblotninger i dagen. Kjerneboringene indikerer mer oppsprukket berg enn det som er registrert i dagen, men sprekkavstanden kan mistolkes fra kjerneboringer siden det er vanskelig å avgjøre om en sprekk har oppstått in-situ eller om den kommer fra mekanisk

brytning under boringen.

De aller fleste sprekkeplanene er plane med sprekkeoverflater som varierer fra glatte til ru. Den gjennomsnittlige sprekkeavstanden for foliasjonssprekkene (sprekkesett nr. 2) er 0,5–1,1 meter. For det andre sprekkesettet (sprekkesett nr. 1) varierer avstanden fra 0,8–1 meter og 0,2–2 meter nærmest Ski. Sprekkemønsteret ligner i ulike seksjoner langs tunneltraséen. En mer detaljert beskrivelse etter områder beskrives under. Områdene er delt inn så de sammenfaller med vedlegg A.1 – A.3. Her kan man se ingeniørgeologiske kart og lengdeprofil for tunnelstrekningen fra km. 2,85–km. 22,7. Vedleggene gir en god oversikt og illustrerer viktig informasjon om prosjektet som bergartsfordeling, svakhetssoner, vannkilder og sprekkeplaner i området i tillegg til å vise tunneltraséen med tilhørende overdekning og plassering av kjerneboringer.

**Km 2.85–8.0 (Se vedlegg A.1 for lengdeprofil og kart)** I området mellom Ekeberg og Nordstrand dominerer sprekkeplanene med strøk øst–vest og bratt fall, i tillegg til foliasjonssprekker orientert nordvest–sørøst. Foliasjonssprekkene faller hovedsakelig mot vest. De fleste sprekkeplanene er plane og karakterisert fra glatte til ru. Foliasjonssprekkene har en gjennomsnittlig sprekkeavstand på 0,5 meter mens avstanden mellom de øst–vest orienterte sprekkeplanene er 0,8 meter.

I området fra Nordstrand til Bjørndal endrer foliasjonssprekkene orientering til nordnordvest–sørøst og faller  $35^{\circ}$ – $80^{\circ}$  mot vest. Gjennomsnittlig sprekkeavstand er 0,6 meter. Sprekkeplanene er plane og varierer fra glatte til ru. For begge foliasjonssprekkene med ulik orientering og de Ø–V orienterte sprekkeplanene, er avstanden minst i området rundt Hauketo på km. 8.0 (pelnummer 8000).

**Km 8.0–15.5 (Se vedlegg A.2 for lengdeprofil og kart)** I Grønliåsen er hovedsprekkesettene lik de for området lenger nord, bortsett fra at det er færre sporadiske sprekker. Sprekkeplanene er ru og varierer fra plane til undulerende. Gjennomsnittlig sprekkeavstand for foliasjonssprekkene er 0,8 meter, mens avstanden for det andre sprekkesettet er 0,9 meter. Sprekkeavstanden for foliasjonssprekkene er lavest lengst sør i området, men her var det også enklere å kartlegge sprekker enn lenger nord siden de fleste observasjonene ble gjort i utsprengt berg.

Fra Snipetjern til Taraldrud, endres det bratt fallende sprekkesettet til et strøk østsørøst–vestnordvest med gjennomsnittlig sprekkeavstand på 1,0 meter. Foliasjonssprekkene er orientert nord–sør og faller  $40^{\circ}$ – $90^{\circ}$  mot vest. Gjennomsnittlig sprekkeavstand for disse er 1,1 meter. Avstanden er kortere ved Taraldrud enn lenger nord i området. Her er forekomsten av sporadiske sprekker høyere enn lenger nord, mange av dem er orientert nordvest–sørøst. De fleste sprekkeplanene er ru og plane.

**Km 15.5–22.7 (Se vedlegg A.3 for lengdeprofil og kart)** I området er det høy tetthet av sporadiske sprekker. Sprekkesettet orientert øst–vest har lokalt veldig kort sprekkeavstand helt ned mot 0,05 meter. Generelt varierer avstanden fra 0,2–2 meter med et gjennomsnitt på 0,9 meter.

Foliasjonssprekkene varierer mye innenfor små områder, men de fleste observasjonene i den nordligste delen av området er orientert nordvest–sørøst til nordnordvest–sørsørøst. Fallet varierer mellom  $40^{\circ}$ – $90^{\circ}$  mot øst og  $70^{\circ}$ – $90^{\circ}$  mot vest, hvor de bratteste fallene dominerer. Sør i området, nærmest Ski, får foliasjonssprekkene en orientering øst-vest. Et tredje sprekkesett er orientert nordøst–sørvest og faller  $60^{\circ}$ – $90^{\circ}$  hovedsakelig mot vest, men også mot øst.

Det ble også observert noen få sub–horisontale sprekker, men ikke tilstrekkelig og jevnt nok fordelt til å definere et horisontalt hovedsprekkesett.

De fleste sprekkene karakteriseres som ru og plane. På Ospelia er det en 20 centimeter tykk, bratt fallende diabasgang orientert nord–sør. Sideliggende berg er tettere oppsprukket, noe som er typisk for intrusiver.



# Kapittel 7

## Hydrogeologi og tetting av tunnelen

Follobanen ligger øst for Oslofjorden under nedbørsfelt som drenerer inn i en arm av Oslofjorden kalt Bunnefjorden. Den gjennomsnittlige årlige nedbøren varierer mellom 705 og 830 millimeter med mest nedbør mellom august og oktober. Den gjennomsnittlige temperaturen er 5,7°C og ligger over 0°C i 9 måneder av året. Evapotranspirasjonen i området er beregnet til omtrent 400 mm/år, men denne avhenger av flere faktorer og vil variere både gjennom året og fra et år til et annet ([Jernbaneverket, 2014b](#)).

Tunnelen kan påvirke omgivelsene negativt enten ved å drenere områdene på grunn av for stor lekkasje til tunnelen eller ved at konstruksjonsaktivitetene forurenses vannkilder. Flere av vannkildene drenerer små nedbørsfelt hvor avrenningen er sterkt avhengig av mengden nedbør. Disse områdene blir av den grunn svært sårbare både med tanke på forurensning og drenasje. Vannkildene med større nedbørsfelt, som de to hovedelvene Ljanselva og Gjersrudbekken, er utsatt for forurensning, men mindre sårbare for drenasje.

Fra Ekeberg og 4–5 km mot sør drives tunnelen under et flatt område kalt Nordstrandplatået. Området drenerer direkte ut i sjøen. Det er flere små, grunne dammer i området, men ingen ligger direkte over tunnelen.

Sør for Nordstrand passerer tunnelen området under Ljanelva i 3–5 km. Elven drenerer omtrent 40 km<sup>2</sup> inkludert store områder av Østmarka, en del av et naturreservat som omgir Oslo. Hovedinnsjøene i området er Nøkle vann og Lutvann. Disse er del av vannsupplementet for Oslo. De to hovedelvene er Ljanselva og Gjersrudbekken. Den siste er ikke regulert. Begge elvene er beskyttet mot vannkraftverktvikling. Vegetasjonen langs den nedre delen av de to nevnte elvene er avhengig av et høyt grunnvannsnivå.

Sør for Ljanselvaområdet passerer tunnelen den nordre delen av området for Gjersjøelva. Dette området er på omtrent 85 km<sup>2</sup> og drenerer sørvest til Gjersjøen. Det er flere små innsjøer i denne delen av prosjektområdet som Snipetjernet, Grytetjernet, Tussetjern og Fosstjern. Verdifull vegetasjon som er avhengig av fuktighet eksisterer i nærheten av de nevnte innsjøene-

Permeabiliteten eller porøsiteten til overliggende bergmasse er ikke kjent i detalj, men for leire er den effektive porøsiteten sjelden større enn 1–10% av leiravsetningen. Normalverdien for hydraulisk konduktivitet i oppsprukket, krystalin bergmasse i Norge ligger mellom 10<sup>-8</sup> og 10<sup>-4</sup> m/s og porøsiteten mindre enn 1–5%. Derfor er grunnvannet lokalisert i sprekker og forkastninger. Den potensielle dreneringen av vannkildene knyttes derfor til sprekkemønsteret og graden av oppsprekking i bergmassen. Lugeon tester er utført i borehullene.

## 7.1 Sårbare områder

For å unngå skade på bygninger, konstruksjoner og/eller ytre miljø, bør en unngå at poretrykket reduseres lavere enn de naturlige variasjonene. Follobaneprosjektet er på bakgrunn av forundersøkelsene delt inn i sensitivitetsklasser fra lav sensitivitet til svært sensitiv. Antallet strekninger innenfor hver sensitivitetsklasse vises i tabell 7.1. Klassifikasjonen avhenger av risiko relatert til poretrykksreduksjon i området over tunnelen og forekomsten av svakhetssoner.

Tabell 7.1: Antall områder innenfor hver sårbarhetsklasse

Lav sensitivitet	Moderat	Sensitiv	Svært sensitiv
3	5	2	1

Risikoen forbundet med poretrykkreduksjoner gjelder både setninger på bygninger fundamentert på løsmasser og sårbare naturområder. For strekningen i sonene som er klassifisert som svært sensitiv, er det strenge krav til forinjeksjon. Det er forutsett omtrent 500 meter med forinjeksjon i hvert av de to sørgående tunnellopene og omtrent 300 meter for hver av de nordgående. Dette tilsvarer omtrent 1,6 kilometer. (Syversen et al., 2018).

## 7.2 Vannkontroll og tettestrategi for TBM-tunneler på Follobanen

Hovedformålet med vannkontrollen er i følge [Acciona Ghella Joint Venture \(2017a\)](#) å unngå innstrømning av vannmengder i tunnelen som kan føre til ett av eller en kombinasjon av de opplistede scenariene:

- en uakseptabel reduksjon av poretrykk og senking av grunnvannsnivået i omliggende områder
- redusert kvalitet på betongutføringen (dårlig etterfylling og redusert tetthet)
- redusert inndrift med TBMe
- uakseptabel påvirkning av kvaliteten på det utførte arbeidet
- høyere total mengde vann (fra både driving og innlekkasje) enn kapasiteten til renseanlegget

Avhengig innstrømningsraten og varigheten av lekkasjen kombinert med de hydrogeologiske forholdene kan de nevnte scenariene ovenfor ha flere konsekvenser:

- reduksjon av poretrykk og senket grunnvannsnivå i nærliggende områder til tunnellopene
- naturskader
- skade på bygninger og infrastruktur
- oversvømmelse av TBM og tunnel
- utvasking av finstoff i svakhetssoner
- ødeleggelser på TBM og transportbånd
- blokkering/tetting av pumpesystemet
- blokkering/tetting av renseanlegget
- høyere total mengde vann enn kapasiteten til renseanlegget
- utvasking av etterfyllingsmassen mellom betongsegmentene og berget
- deformasjon/bevegelse på segmentene
- økt innlekkasje gjennom betongsegmentene

- økt kromforurensning i avløpsvann

Det er av den grunn ønskelig å holde innstrømmingen av vann i tunnelen på et kontrollert og akseptabelt nivå slik at de uheldige konsekvensene av for store lekkasjer unngås. I tillegg kan problemer med mye innlekkasje føre til negativ medieomtale og dermed en risiko for svekket omdømme.

### 7.2.1 Krav til innlekkasje

Siden Follobanetunnelene bygges som udrenerte løsninger, skal sluttresultatet være en helt tett tunnel. Tunnelen skal være så tett at det ikke er tillatt med synlige fuktmerker på betongutforingen som utgjør vannsikringen. Forinjeksjon benyttes for å tette bergmassen tilstrekkelig så TBMen kan bore videre uten å risikere at for store vannmengder overstiger pumpekapasiteten eller vasker ut etterfyllingen mellom betongutforingen og konturen av tunnelen.

### 7.2.2 Overvåkningsprogram

For Bane NOR er det viktig at anleggsarbeidet er til minst mulig sjenanse for omgivelsene, både i forbindelse med miljø og befolkningen. Eiendommer som kan bli berørt av utbyggingen er kartlagt på forhånd og følges opp kontinuerlig gjennom hele byggeprosessen og det er igangsatt omfattende kommunikasjonsiltak for å sikre god kontakt med naboene.

Et hydrogeologisk overvåkningsprogram er etablert for å kontrollere og dokumentere at vannbalansen holdes på et ønsket nivå. Dersom grunnvannsnivået senkes til et uakseptabelt nivå, iverksettes forinjeksjon eller andre tiltak. Overvåkningsprogrammet består av et nettverk av 170 poretrykkssensorer i både løsmasse- og fjellbrønner. Hensikten med sensorene er å registrere eventuelle endringer i poretrykket som følge av lekkasjer inn i tunnelen under drivingen. For å registrere naturlige, sesongbaserte variasjoner av poretrykket, ble poretrykkssensorene etablert før tunnelkonstruksjonen ble igangsatt. Det finnes målinger fra 2014 og frem til begge TBMen i hver retning har passert (Syversen et al., 2018). Overvåkningsprogrammet utvikles gjennom hele prosjektet. Antall sensorer og lokasjoner er oppdatert etter oppstart av drivingen ut ifra tilegnede erfaringer kombinert med geologisk kartlegging og målinger fra de pre-installerte sensorene. Alle sensorene leser av poretrykket automatisk. Registreringene lastes opp til en web-basert GIS portal hvert tiende minutt.

I tillegg til overvåking av poretrykket, er setningsutviklingen under nøye kontroll. Det er installert setningsbolter i fundamentet på over 2500 bygninger (Syversen et al., 2018). Disse registreres manuelt både før og etter TBMen har passert området og målingene lastes opp til en web-portal. Et satellittbasert overvåkningsprogram som benytter seg av inSAR data er under utvikling som et hjelpemiddel til å registrere eventuelle setningsutviklinger. Programmet benytter seg av data fra 2014, før anleggsstart, og til dags dato.

### 7.2.3 Infiltrasjonsbrønner

Prosjektet har 28 midlertidige infiltrasjonsbrønner fordelt på 13 områder. Brønnene er installert og opereres fra overflaten som et ekstra tiltak for grunnvannskontroll når TBMen passerer. Hensikten med brønnene er å opprettholde poretrykket i løsmassene ved å infiltrere vann ned i grunnen. De er boret 20–50 meter ned i berg, helst med en helning (Acciona Ghella Joint Venture, 2017a).

### 7.2.4 Tettestrategi

Tettestrategien på Follobanen skiller seg fra de drenerte metodene for tunnelene oppsummert i kapittel 5 hvor bergmassen kombinert med bergsikring og eventuell vannsikring utgjør en drenert struktur. De to løpene som studeres på Follobanen er drevet med tunnelboremaskiner og vil ha en udrenert løsning for vannsikring konstruert til å tåle høye vanntrykk. Hovedstrategien er å konstruere en udrenert tunnel ved umiddelbar installasjon av et enkelt skall bestående av vanntette betongelementer. Forinjeksjon benyttes i forbidringen for å kontrollere vanninnstrømningen og forhindre en reduksjon av poretrykket med påfølgende konsekvenser (Syversen et al., 2018; Jakobsen and Arntsen, 2014; Acciona Ghella Joint Venture, 2017b,a). Tverrforbindelsene mellom de to tunnellopene er derimot sprengt ut og vil derfor være drenerte løsninger.

Forinjeksjon er den tradisjonelle metoden for vannkontroll under driving av tunnel og ved permanent forsegling mot vanninntrenging, enten injeksjonen gjennomføres systematisk eller behovsprøvd basert på sonderboringer.

Hovedforskjellen i bruken av forinjeksjon ved Follobaneprosjektet og de tidligere omtalte prosjektene, henholdsvis forinjeksjon ved driving med TBM og forinjeksjon ved D&B, er at forinjeksjon brukes som et hovedtiltak mot vanninntrenging i tunnelene bygget med konvensjonell tunneldrift. For TBM-tunnelene på Follobanen benyttes derimot forinjeksjon kun som et tiltak

for midlertidig vannkontroll for å minimere påvirkningen lekkasjen har på overflaten og for å hindre at for store vannlekkasjer sinker fremdriften. I dette prosjektet er segmentpakningene mellom betongelementene hovedtiltaket mot vanninntrenging ([Acciona Ghella Joint Venture, 2017b](#)).

### Betongutforing

I TBM-tunnelene på Follobanen skal en utforing av betongelementer med vanntette pakninger mellom tette tunnelen for fremtidig vanninntrenging. Dette er som sagt en udrenert løsning hvilket innebærer at vann ikke skal trenge inn i tunnelen og at segmentene er designet og dimensjonert for å tåle det lokale ytre vanntrykket. Ingen drypp eller fuktige flekker på betongutforingen godtas. Denne løsningen er motsatt av en drenert løsning hvor det er nødvendig med en kontrollert håndtering av det overflødig vannet som må dreneres vekk fra tunnelperiferien og ut av tunnelen. Utforingen skal opprettholde grunnvannsnivået permanent og fungerer som permanent sikring i anleggsperioden og senere i driftsfasen ([Syversen et al., 2018](#)).



Figur 7.1: Fotografi av et standard betongsegment (til venstre) og et nøkkelsegment (til høyre). En ring av betongutforingen består av flere betongsegmenter og et nøkkelsegment. Foto: [Sandness \(2018\)](#).

Betongutføringen installeres i ringer direkte inne i skjoldet slik at tunnelen er vanntett 15–20 meter bak stuff og de ansatte ikke eksponeres for usikret berg. Hver ring er bygget opp av flere betongsegmenter og et nøkkelsegment som installeres til slutt. En segmentkran løfter betongsegmentene på plass under monteringen ved hjelp av vakuum (NFF, 2015).

Mellom betongsegmentene og fjellet, etterfylles det med en to-komponent injeksjonsmasse. Bruken av slik masse har begrensninger på grunn av risiko for utvasking. Utvasking skjer hvis ikke større vannlekkasjer tettes eller reduseres ved forinjeksjon. Dette var tilfelle på Follobanen i starten. Utvasking påvirker ikke elementenes stabilitet, men medfører problematisk avløpsvann med pH-verdier opptil 14.

Begrensningen for en slik vanntett betongutføring er som oftest overdekningen. Det antas at vanntrykket er tilsvarende overdekningen og siden elementene kun kan dimensjoneres til å tåle et visst vanntrykk, blir overdekningen den begrensende faktoren. Betongutføringen og pakningene på Follobanen er dimensjonert til å tåle en overdekning og tilhørende vanntrykk på omtrent 170 meter.

Det er valgt å benytte MSV [Multi Service Vehicle] fremfor sporbunden transport for å frakte betongelementene ned i tunnelen og frem til segmentkranen som bygger ringene. Disse kjøretøyene er utviklet for å frakte tung last i komplekse og smale miljø som tunneler. Det er flere fordeler ved å benytte seg av denne formen for transport. Det er ikke behov for sporlegging i tunnelen og man slipper å kjøre elementene ut til tunnelåpningen og deretter omlaste dem før de fraktes videre ned i tunnelen. Ved å benytte seg av MSVer kan alt gjennomføres i en operasjon. Betongelementene lastes på kjøretøyet ved fabrikken hvor de lagres før MSVen kjører til tunnelåpningen og videre inn i tunnelen helt frem til kranen som laster dem over på transportbåndet inn til ringbyggeren.

### **Sonderboring og beslutningsgrunnlag for forinjeksjon**

På Follobanen benyttes forinjeksjon til å kontrollere innlekkasjen i tunnelen under driving før betongelementene som gir en vanntett tunnel er ferdig installert. Ved å kontrollere innlekkasjene vil man unngå at større mengder vann under høyt trykk gir problemer med både forseglinger og etterfyllingen i mellomrommet mellom betongsegmentene og berget.

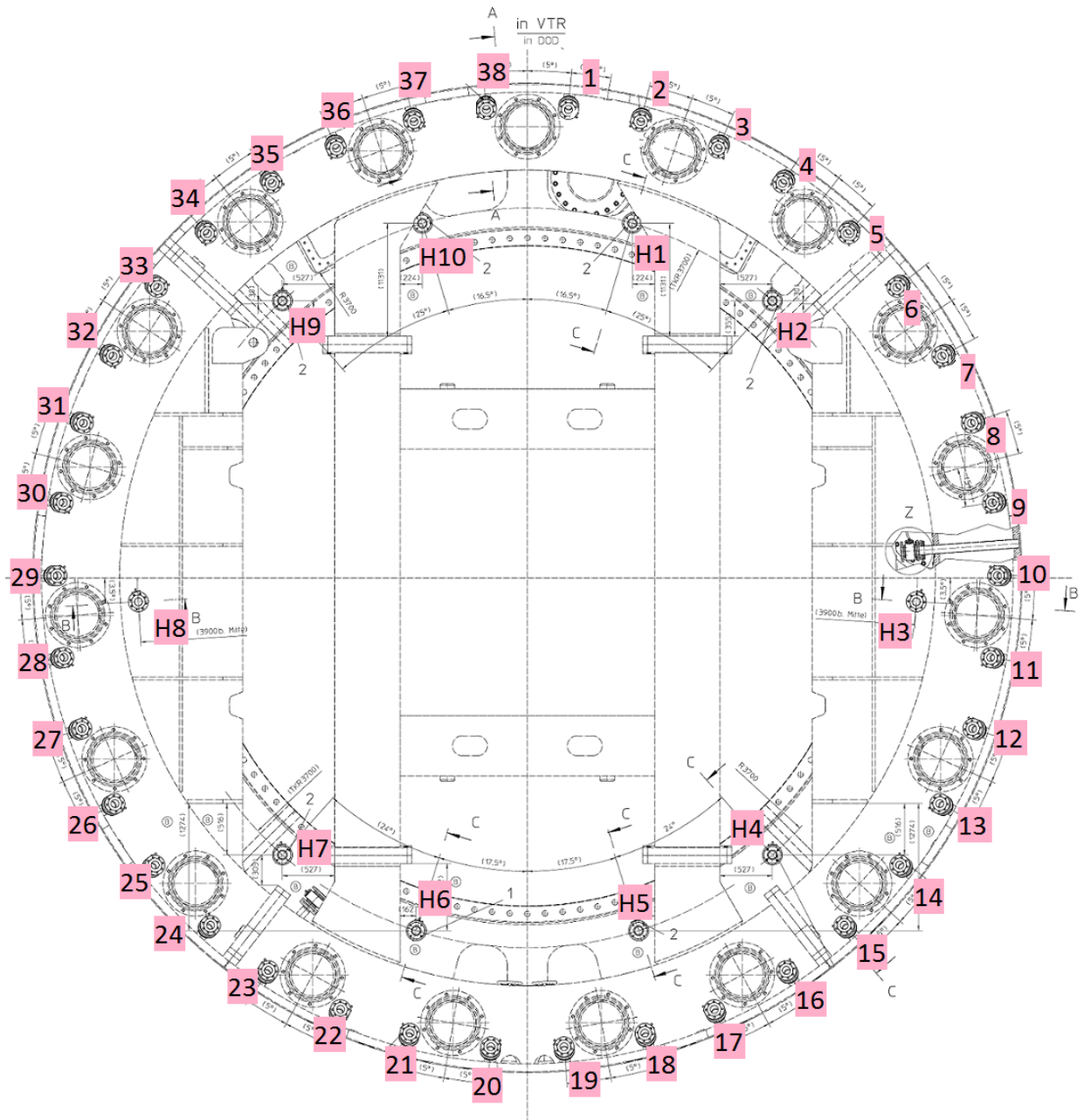
Sonderboringer gir et tidlig varsel om beskaffenheten til bergmassen og grunnforholdene foran maskinen. Disse utføres systematisk siden kontrakten krever at det opprettholdes minimum et kontinuerlig og overlappende sonderborehull til enhver tid under drivingen. Ved hjelp av infor-

masjonen kan nødvendige tiltak iverksettes for vanntetting og stabilisering av bergmassene bak borhodet. Det foretas målinger av vannlekkasjer fra hullene slik at behovet for forinjeksjon kan avgjøres. Antallet sonderborehull og tetthetskriteriet for forinjeksjon bestemmes ut i fra sensitivitetssklassen for det overliggende området og de geologiske forholdene maskinen befinner seg i ([Acciona Ghella Joint Venture, 2017a](#)).

Avstanden fra stoff til enden av sonderborehullene er 35 meter, men siden det er en distanse på 10 meter fra stoffen til boreriggen i skjoldet, blir den faktiske boredistansen på 45 meter. Dette gir utfordringer under boringen fordi potensialet for avvik fra ønsket boreretning øker med lengre boredistanse. Basert på erfaringer, oppgir AGJV at 30 meter er den optimale faktiske drilledistansen. Avviksmålinger og erfarne, kompetente operatører av boret minimerer risikoen for store retningsavvik. Ved vanskelige hydrogeologiske eller geologiske forhold, kan borelengden reduseres ([Acciona Ghella Joint Venture, 2017b](#)). [Syversen et al. \(2018\)](#) oppgir at det i dag bores minimum to hull på 40 meter fra hver TBM i områder klassifisert som lite sårbare.

Siden det ikke er ønskelig å bore sonder- og injeksjonshull gjennom borhodet på TBMen, er plasseringen for slike hull gjennom utsparinger i skjoldet bak borhodet ([NFF, 2010](#)). Skjoldet har 38 ulike hullplasseringer med 11 graders helning og 10 horisontale hullplasseringer for utføring av sonderboringer og injeksjon. Hullene med helning er nummerert fra 1–38 og de horisontale fra H1–H10. Figur 7.2 viser plassering og nummerering av åpningene for sonder- og injeksjonshull ([Acciona Ghella Joint Venture, 2017b](#)). Valg av porter i skjoldet tas på stoff ut fra rådende geologi og vannforhold. Avhengig av disse forholdene, kan det være nødvendig å øke antall sonderborehull for å forsikre seg om at det tilegnes tilstrekkelig informasjon om forholdene foran stoff ([Acciona Ghella Joint Venture, 2017a](#)).





Figur 7.2: Teknisk tegning av borhodet med hullplasseringer for sonder- og injeksjonshull (Bane NOR, 2018).

Beslutningsgrunnlaget for forinjeksjon baseres på erfaringer fra driving og injeksjonsarbeid til-egnet underveis i prosjektet. Tillatt innlekkasje er bestemt ut ifra konsekvensene vannlekkasjer i tunnelen har for både ytre miljø og for selve konstruksjonsarbeidet. Forinjeksjon foretas på bakgrunn av forhåndsbestemte grenseverdier for følgende forhold ([Acciona Ghella Joint Venture, 2017a](#)):

1. Vanninnstrømning i sonderborehull
2. Total vanninnstrømning på stuff og i skjoldområdet (unngå at pumpekapasiteten overskrides)
3. Fall i poretrykk eller senket grunnvannsspeil

For å påse at kravene overholdes blir det foretatt vanntapsmålinger i bergmassen før og etter injeksjon i tillegg til poretrykk- og grunnvannstandsmålinger ([Acciona Ghella Joint Venture, 2017b](#)).

Som tidligere nevnt vil forinjeksjon utføres systematisk uavhengig av grenseverdiene for vannmålingene i enkelte områder. Disse områdene er klassifisert som svært sensitive og presenteres i tabell 7.2 ([Acciona Ghella Joint Venture, 2017a](#)).

Tabell 7.2: Pelnummer for områder hvor det skal utføres systematisk forinjeksjon ([Acciona Ghella Joint Venture, 2017a](#)).

Utgående pelnummer	Innkommende pelnummer
18+900 – 19+000	18+944 – 19+044
19+850 – 20+050	19+900 – 20+100

Tabell 7.3 viser hvor stor lekkasje som tillates i sonderborehull før det skal forinjiseres. Innlekkasjen fra sonderborehullene måles ved at en injeksjonstang med en åpen pakke føres inn i hullet og strammes til så vannet strømmer ut gjennom stangen. Deretter benyttes en stoppeklokke og en 20 L bøtte til å måle innlekkasjen fra borehullene manuelt over et gitt tidsintervall. Vannmålingene finner sted når vannstrømningen har stabilisert seg etter boringen. Alle hull med innlekkasje skal måles. Dersom innlekkasjen er stor, må en verdi antas siden trykket er for høyt til å måle med bøtte. De utløsende verdiene er delt inn etter hvor sensitivt området TBMen befinner seg i er. I kolonnen helt til høyere i tabell 7.3 er områdene svært sensitive for poretryksreduksjoner og konsekvensene blir alvorlige. Det skal av den grunn mindre vannmengder til før forinjeksjon igangsettes. Dersom verdiene for ett eller to borehull forekommer, skal det bores minst et hull til ([Acciona Ghella Joint Venture, 2017b](#)).

Tabell 7.3: Utløsende verdier for vannmålinger i sonderborehull ([Acciona Ghella Joint Venture, 2017a](#)).

Antall sonderborehull med innlekkasje > 10 L/min	Lav - moderat - sensitiv	Svært sensitiv
1	15 l/min	10 l/min
2	25 l/min (totalt)	15 l/min (totalt)
3	33 l/min (totalt)	20 l/min (totalt)
4	40 l/min (totalt)	25 l/min (totalt)

Tillatt innlekkasje i TBM-skjoldet og på stuff er presentert i tabell 7.4. Dersom stoffen er tørr og forinjeksjon ikke vil bidra til å redusere total vanninnstrømning, skal det ikke utføres forinjeksjon. Forinjeksjonsrundene skal fortsette til innlekkasjen i skjoldområdet reduseres til under 3 L/s. For alle verdier over 3 L/s skal påvirkningen vannlekkasjen har på tunneldrivingen, kvaliteten av arbeidet, og håndtering av avløpsvann overvåkes.

Tabell 7.4: Grenseverdier for vanninnstrømning på stuff og skjold for hver enkelt TBM ([Acciona Ghella Joint Venture, 2017a](#)).

TBM	Grenseverdi
1	12 l/s
2	5 l/s
3	3 l/s
4	3 l/s

### Utføring av forinjeksjon

Injeksjonsteknikken er lik anvendt teknikk ved konvensjonell tunneldrift. TBMen stanses og hull bores 25–30 meter foran borhodet i en skjerm etter et bestemt mønster for deretter å injiseres. Dersom forinjeksjonen er systematisk, bores det 6–8 meter frem med TBMen mellom hver injeksjonsrunde slik at skjermene får en overlapp. Injeksjonspakkerne plasseres i tilstrekkelig avstand foran borhodet slik at injeksjonsmassen ikke finner utgang til tunnelen. Miksere og pumper er plassert i bakriggen slik at tilførsel av sement og tilsetningsmidler er enklest mulig ([NFF, 2010](#)).

Boremønsteret består av minimum 20 hull som injiseres per runde. Hullene er så jevnt fordelt rundt TBM-periferien som mulig. Prosedyren for forinjeksjon er designet til å benytte seg av

ulike injeksjonsblandinger med varierende forhold mellom innhold av vann og sement (v/c-forhold). En injeksjonsrunde starter med hullene i bunnen av skjoldet og fortsetter mot kronen av TBMen med en blanding som har v/c-forhold lik 1. Dersom sluttkriteriet for injeksjonsmengde nås uten en tilstrekkelig trykkøkning, skal det benyttes en blanding med redusert v/c-forhold lik 0,8 i injeksjonshullene som ikke nådde sluttrykket i første runde. Det er viktig at prosedyren tilpasses de faktiske forholdene i tunnelen ([Acciona Ghella Joint Venture, 2017b](#)).

### **Sluttkriterium for forinjeksjon**

Det er to sluttkriterier; et for volum injeksjonsmasse og et for trykk. Disse er satt ut fra injeksjonsmønster og tidligere erfaringer. Sluttkriteriet kan endres avhengig av erfaringer eller spesielle forhold for en spesifikk injeksjonsrunde. Sluttkriteriet for første injeksjonsomgang med v/c-forhold lik 1 er 500 L for volum og 50 bar for trykk. For andre omgang er sluttkriteriet for trykk fremdeles 50 bar mens kriteriet for volum er økt til 2000 L. Injeksjonsrunden skal avsluttes dersom injeksjonsmasse presses ut av sideliggende hull eller gjennom skjoldet. For overdekning mindre enn 15 meter vil det benyttes et redusert trykk på 10 bar for å forhindre utgang av injeksjonsmasse i dagen. Det er av den grunn viktig at injeksjonstrykket tilpasses de faktiske, lokale forholdene i tunnelen ([Acciona Ghella Joint Venture, 2017b](#)).

### **Injeksjonsmidler**

Det benyttes i hovedsak et sementbasert injeksjonsmiddel på Follobaneprosjektet. [Acciona Ghella Joint Venture \(2017b\)](#) beskriver hva som ble benyttet i de første rundene med forinjeksjon. Valg av sement og blandingsforhold avhenger av sprekketype og -størrelse, samt størrelsen av vannlekkasjen. Publikasjon nr. 20 om injeksjon i norske tunneler fra NFF ([NFF, 2011](#)) er benyttet som referanse av AGJV ved valg av sementprodukt. Blandingen som ble benyttet for de første injeksjonsrundene ble utviklet for tunnelene som ble drevet med konvensjonell tunneldrift før TBMen begynte å bore. Den er deretter blitt testet og tilpasset kontinuerlig for å optimaliseres etter de gjeldene forholdene i TBM – tunnelene. Dersom TBMen borer på uforutsette og store vannlekkasjer kan polyuretan benyttes for rask forsegling ([Acciona Ghella Joint Venture, 2017b](#)).

Den foretrukne blandingen har følgende egenskaper i følge [Acciona Ghella Joint Venture \(2017b\)](#):

- $v/c\text{-forhold} \leq 1$
- begrenset bleeding, mindre enn 2% på 2 timer
- fullstendig tetting av åpninger og sprekker med sement, unngå bobler på grunn av for mye vann
- redusert krympepotensial for å begrense mikrosprekker i herdet injeksjonsmasse
- god binding til fjelloverflaten

### 7.2.5 Injeksjon fra dagen

Som en alternativ metode til forinjeksjon ble det vurdert å injisere et område fra dagen, delt inn i to soner. Metoden er vurdert i en rapport utarbeidet av AGJV ([Acciona Ghella Joint Venture, 2018](#)).

Den første sonen har moderat sårbarhet og befinner seg mellom Ospelia og Sloraveien. Tunnelen vil gå gjennom gneis og amfibolitt og ha en overdekning på 45–50 meter. Bebyggelsen i nærområdet er delvis fundamentert på løsmasser med tykkelse fra 0–5 meter. To sub–vertikale svakhetssoner orientert nordvest–sørøst og en svakhetszone orientert nordøst–sørvest krysser tunnelen mellom pelnummer 18550 og 18590 for TBM 4 og 18570 og 18655 for TBM 3.

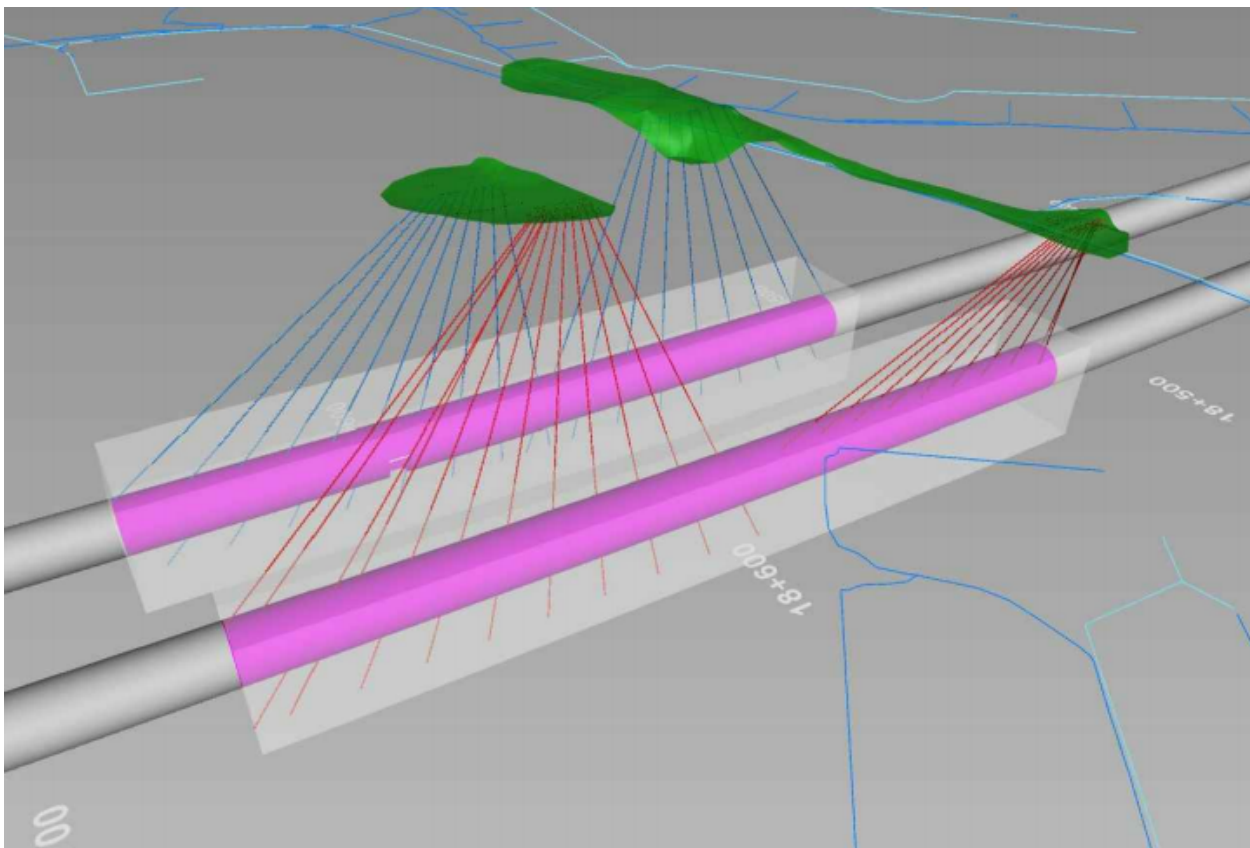
Den andre sonen er ved Sloraveien. Her skal tunnelen drives under en liten dal hvor det renner en elv som mater en innsjø som befinner seg 500 meter lenger øst. Tunnelen vil fremdeles ligge i gneis og amfibolitt, men fra kronen av TBMen er overdekningen kun 12–15 meter. På overflaten er det kartlagt løsmassetykkelser fra 8–10 meter. To sub–vertikale svakhetssoner krysser tunnelen mellom pelnummer 18880 og 18960 for TBM 4 og mellom pelnummer 18960 og 18980 for TBM 3. Kombinasjonen av den lave overdekningen, løsmasseavsetningene og svakhetssonene gir økt risiko for å drenere akviferen og få store vannlekkasjer i tunnelen.

Det er vesentlig å ta hensyn til svakhetssoner og sprekkemønsteret i området når boremønsteret skal bestemmes siden vannstrømningen er begrenset til diskontinuiteter i bergmassen. Fra boringen med TBMer er det oppdaget flere sub–horisontale sprekkesoner. Tunnelen krysser derfor områder som er gjennomslutt av svakhetssoner med tilnærmet vertikale fall som igjen krysses av sub–horisontale og åpne sprekker. Utifra erfaringer fra boringen ser det ut til at krysningen mellom de sub–vertikale og sub–horisontale sprekkesystemene gir god kommunikasjon. Denne

geometrien gjør at det kan være nyttig å lage et boremønster der det injiseres med en helning slik at sprekkesystemene krysses fremfor å bore vertikale borehull.

En ulempe ved metoden er at tilgjengelige arealer på overflaten begrenser arbeidet som kan utføres. Arealene må være store nok til å kunne bore et mønster som danner en tilstrekkelig impermeabel sone rundt tunnelen i tillegg til å romme bore- og injeksjonsutstyret. Dersom området er for lite vil geometrien til boremønsteret og nøyaktigheten av arbeidet reduseres.

Lengste hullengde er 80 meter med en minimum vinkel med horisontalplanet på 10 grader. Målet er å injisere en fem meter tykk impermeabel sone rundt tunnelen. Den første injeksjonsrunden er designet til å ha et boremønster i vifteformasjon med 10 meter spredning mellom borehullene på tunnelnivå. Figur 7.3 er en illustrasjon i 3D som viser boremønsteret for den første injeksjonsrunden for sonen mellom Ospelia og Sloraveien. Den grønne markeringen viser områdene på overflaten hvor injeksjonen skulle utføres fra, de rosa områdene markerer de utsatte sonene i tunnelen og de lysegrå områdene markerer den impermeable sonen. De blå borehullene tilhører TBM 4 mens de røde skal tette tunnellopet til TBM 3.



Figur 7.3: Boremønster for injeksjon fra dagen mellom Ospelia og Sloraveien (Acciona Ghella Joint Venture, 2018).

Dersom borede testhull viser behov for en ny injeksjonsrunde skal boremønsteret forskyves med 5 meter i forhold til første runde. Behovet for en ekstra runde skal vurderes basert på resultatene av de to første rundene. Stopptrykket er på 20 bar for overdekninger < 15 meter og 50 bar for resten av hullene. Det kan injiseres opptil 800 L. Dersom stopptrykket ikke er oppnådd kan v/c-forholdet reduseres før det injiseres opptil 800 L til. Dersom ønsket trykk fremdeles ikke er oppnådd eller hvis det registreres utganger og forskyvninger i dagen, vil injeksjonen av hullet avsluttes.

Injeksjonsarbeidet utført på denne metoden er vurdert til å ha lik eller høyere suksess enn forinjeksjon fra TBMen. De mange mulighetene for helningsvinkler på borehullene og et boremønster som kan dekke større områder gjør at injeksjonsskjermene kan tilpasses de faktiske forholdene i større grad enn det de kan fra TBMen.

Det er viktig å presisere at injeksjonen fra overflaten ville funnet sted før maskinene hadde boret tunnel til området. På den måten vil en ikke risikere at betongutføringen skades i tillegg til at hullene kan plasseres over tunneltraséen slik at sålen også injiseres og en unngår vanninntrengninger her. Tunnelen ville derfor blitt drevet gjennom en impermeabel sone på lik linje som ved forinjeksjon fra TBMen. Det muliggjør også kvalitetssikring av det utførte arbeidet før TBMen passerer slik at risikoen for å bore på uforutsette vannlekkasjer minker.

TBMene har per dags dato ikke nådd området. Det er konkludert med at området skal forinjiseres fra TBMen. Årsaken er at injeksjon fra dagen vil gi et boremønster som er mer tidkrevende å fullføre sammenlignet med boretiden for en injeksjonsskjerm boret fra tunnelen.





# Kapittel 8

## Registrerte forhold under driving

Injeksjonsforbruk og vannlekkasjer i tunnelen for begge de sørgående løpene er registrert kontinuerlig under driving. Informasjonen er samlet inn og bearbeidet. Poretrykkutviklingen i observasjonsbrønnene er undersøkt for å gi en indikasjon på effekten av det utførte tettearbeidet. I kapitlet presenteres resultatene før de knyttes opp mot geologien langs tunneltraséen.

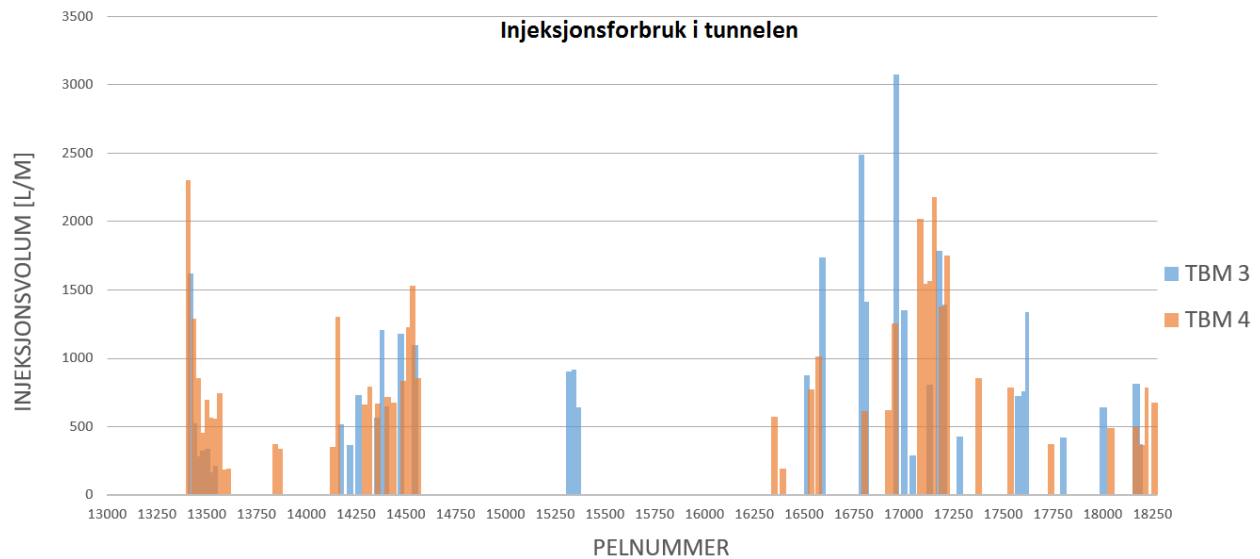
### 8.1 Injiserte områder

Figur 8.1 viser injeksjonsforbruket langs tunneltraséen for de to sørgående TBMe.

Det fremkommer av figur 8.1 at TBM 4 (orange) har flere injeksjonsrunder enn TBM 3. I området nærmest riggområdet på Åsland, den venstre halvdel av figur 8.1, har TBM 4 høyere masseforbruk enn TBM 3. En forklaring kan være at tunnellopet som TBM 4 borer ble drevet før tunnellopet til TBM 3. Siden bergmassen rundt tunnellopet til TBM 4 allerede var injisert ved drivingen av tunnellopet til TBM 3, kan sprekker som i utgangspunktet hadde vært vannførende ha blitt tettet.

For den høyre delen av figur 8.1 er injeksjonsrundene litt mer spredt for begge løpene, men det er fremdeles god sammenheng i hvor det er injisert.

Tabell 8.1 gir en oversikt over målte vannmengder fra sondeborehullene og injeksjonsforbruket i hvert av de to tunnellopene.



Figur 8.1: Sammenligning av injeksjonsforbruk langs tunneltraséen.

Tabell 8.1: Oversikt over vannmengder og injeksjonsforbruk i de to tunneløpene.

	TBM 3	TBM 4
<b>Antall runder</b>	36	44
<b>Antall meter injisert</b>	892,7	1067,4
<b>Injeksjonsforbruk</b>	833 887,6 L	913 495,1 L
	559,9 tonn	573,1 tonn
<b>Total vannmengde fra sondeborehull</b>	5710 L	6616,4 L

Utifra tabell 8.1 kan man se at TBM 4, som begynte å drive tunnel først, har flere injeksjonsomganger enn TBM 3 og høyere verdier for antall meter injisert, injeksjonsforbruk og vannmålinger fra sondeborehullene. At injeksjonsomfanget er større for TBM 4 kan tyde på at injeksjonsrundene i det ene løpet influerer det andre.

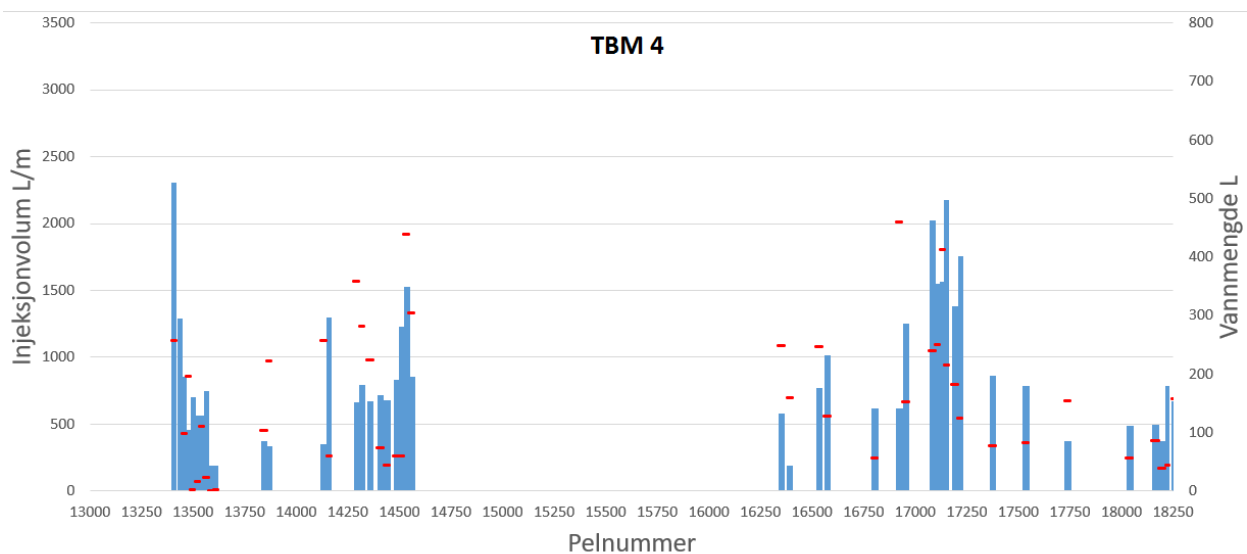
Med unntak av to steder, ett for TBM 4 og ett for TBM 3, er det utført forinjeksjon i samme områder. TBM 4 har to injeksjonsrunder på tilsammen 50 meter mellom pelnummer 13828 og 13878. I følge de geologiske kartleggingene på stoff, se vedlegg C, befinner TBMen seg i ekstremt forvitret gneis og amfibolitt og det er gjort flere observasjoner av leire. Området sammenfaller også med en 5–10 meter tykk svakhetszone som krysser Snipetjern, se vedlegg A.2. TBM 3 har tre injeksjonsrunder på tilsammen 72 meter mellom pelnummer 15302 og 15375. Området består av forvitret gneis med eruptivganger, sub-horisontale sprekker og to øst-vest orienterte sprekkesett

hvor vannet strømmer fra krysningen. Det ingeniørgeologiske kartet, se vedlegg A.2, indikerer at en svakhetssone som går gjennom Assurtjern krysser tunnelen. Svakhetssonen er kartlagt til å være mellom 5 og 10 meter tykk.

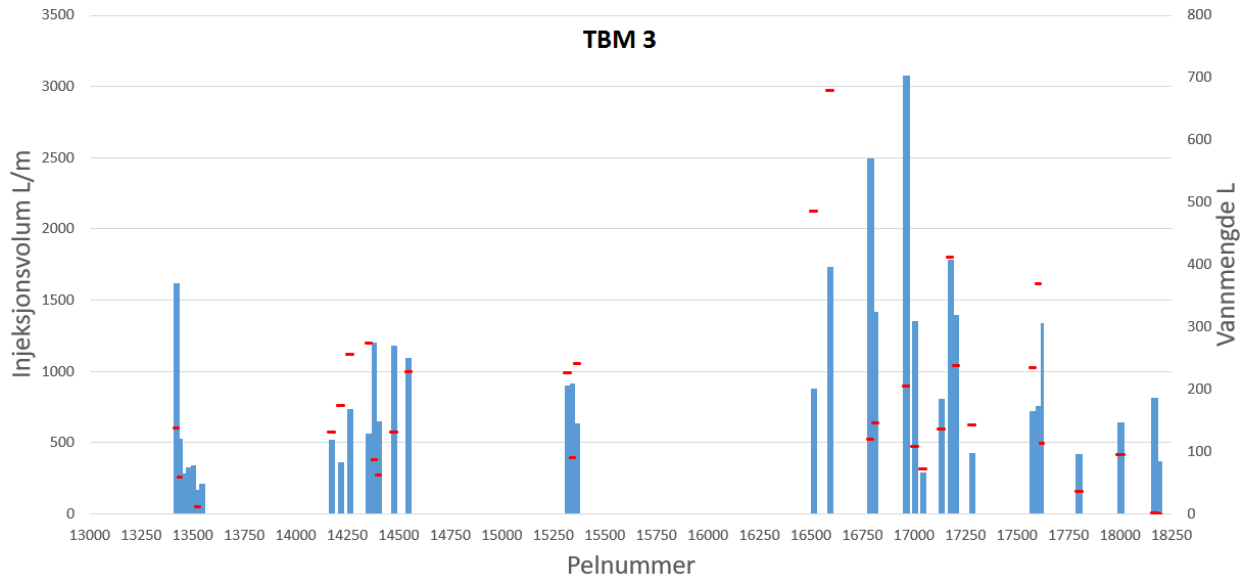
## 8.2 Innlekkasje i TBM-tunner på Follobanen

I figur 8.2 og figur 8.3 vises injeksjonsforbruket langs tunneltraséen for henholdsvis TBM 4 og TBM 3 og tilhørende vannlekkasjer målt fra sondeborehullene markert med rødt. Det fremkommer av figurene at vannlekkasjene ikke er betydelig redusert i tunneløpet som ble drevet sist (TBM 3) til tross for at TBM 4 allerede har injisert sprekker i nærheten. I alt er det målt 1000 L mer vann på TBM 4 enn på TBM 3.

Noen av de høyeste innlekkasjene ble påtruffet da TBM 3 befant seg rundt pelnummer 16500. Her ble det registrert vannmengder opp mot 700 L. Lekkasje for samme område for TBM 4 er mye lavere. For TBM 4 er de høyeste innlekkasjene fra sondeborehullene målt rundt pelnummer 14500 og mellom pelnummer 17000 og 17250. I det første området befinner TBMen seg i et område med massiv, mørk gneis med amfibolittiske ganger. Graden av oppsprekking og forvitring varierer fortløpende, noe vannmålingene i tunnelen også gjør. For området rundt pelnummer 17000 er det beskrevet flere overganger mellom lysere og mørk gneis, samt opptreden av både amfibolitt og pegmatitt. Området inneholder flere svakhetssoner med leirområde over.

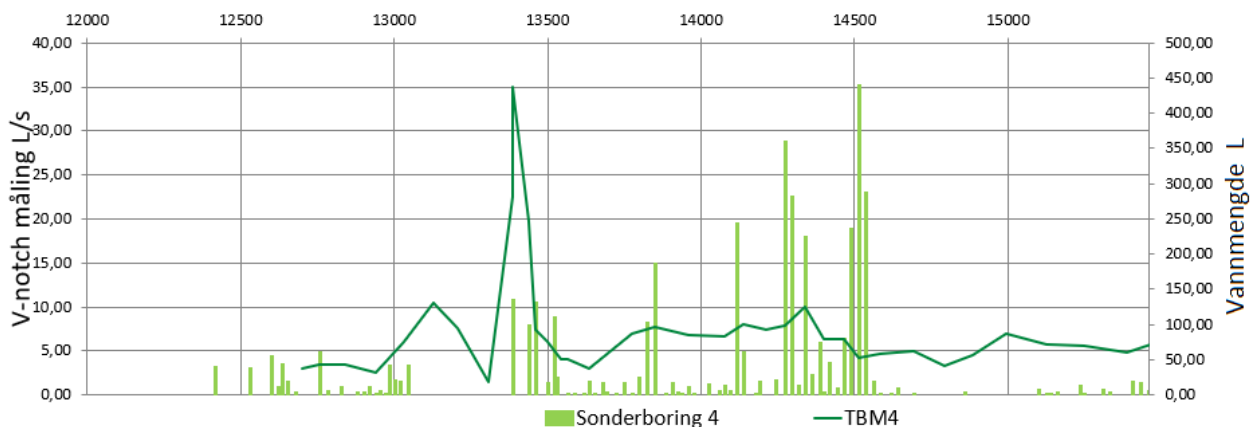


Figur 8.2: Registrerte vannmengder fra sondeborehull og injeksjonsforbruk etter pelnummer for TBM 4.

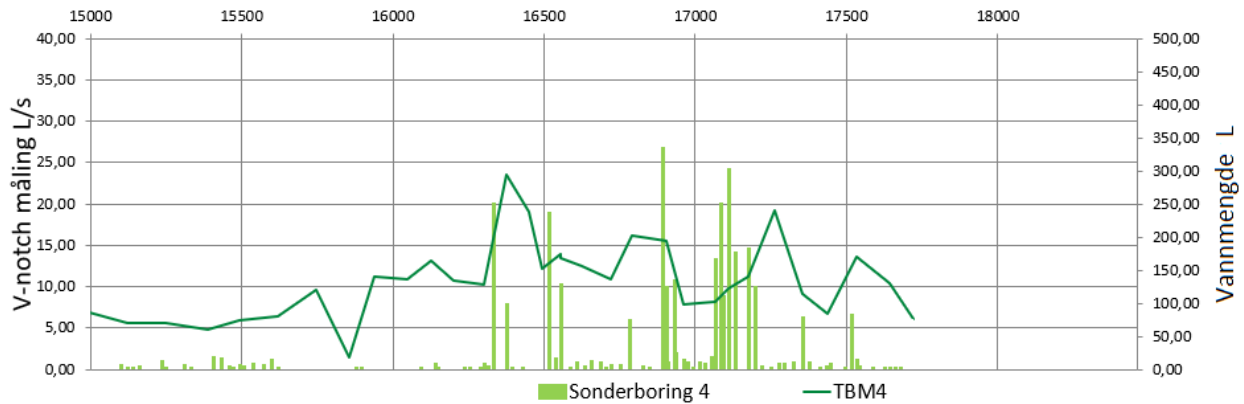


Figur 8.3: Registrerte vannmengder fra sonderborehull og injeksjonsforbruk etter pelnummer for TBM 3.

For TBM 4 er det laget en sammenstilling av målingene fra sonderborehull og V-notch målingene etter pelnummer. Disse er presentert i figur 8.4 og figur 8.5. Sammenstillingen viser vannmålingene i det sørgående tunnellopet til TBM 4 frem til pelnummer 17720. Stolpene representerer vannmålingene fra sonderboringer mens den mørkere grønne linjen viser vannmengdene fra V-notch målingene.



Figur 8.4: Sammenstilling av målte vannmengder i tunnellopet til TBM 4 fra pelnummer 12000–15000. Stolpene er vannmålinger fra sonderboringer mens linjen representerer verdiene fra V-notch målingene.



Figur 8.5: Sammenstilling av målte vannmengder i tunnellopet til TBM 4 fra pelnummer 15000–18000. Stolpene er vannmålinger fra sonderboringer mens linjen representerer verdiene fra V-notch målingene.

V-notch målingene i figur 8.4, fra pelnummer 12000 til 15000, viser en markant topp ved pelnummer 13500 hvor TBM 4 passerer under Snipetjern før målingene er relativt jevne med små variasjoner. Kurven stiger litt når det måles innlekkasjer over 200 L i sonderborehullene, men den ligger stort sett mellom 5 og 10 L/s. I figur 8.5 vises målingene fra pelnummer 15000 og utover. Her er variasjonene for V-notch målingene større, men også her sammenfaller toppene med høyere innlekkasjer fra sonderboringene.

Det har vist seg at vannlekkasjer i sprekker konsentreres til et begrenset antall enkeltpunkter langs sprekken fremfor å fordele seg jevnt over hele (Nilsen and Broch, 2012). Transporten av vann foregår av den grunn gjennom ”rør” eller kanaler langs sprekken. En sidevirkning av dette er at man ved undersøkelser kan få betydelig ulike resultater avhengig av hvor borehullet skjærer samme sprekke. Det er av den grunn svært viktig å ha tilstrekkelig antall borhull ved sonderboring foran stoff for å danne seg et mest mulig realistisk bilde av de ventede forholdene og for å øke sannsynligheten for å treffe på de vannførende delene av sprekken.

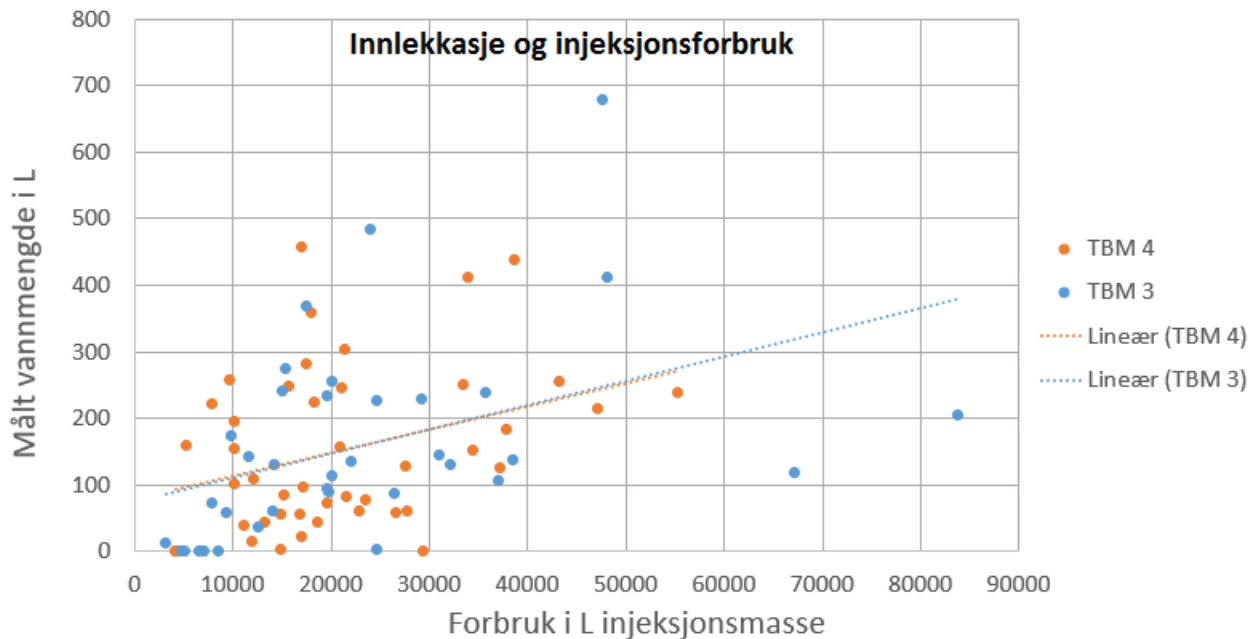
Vannlekkasjer som har oppstått etter at den vanntette betongutforingen er installert, har kommet i injeksjonsporten som benyttes til å fylle mellomrommet mellom betongelementene og tunnelkonturen. De vanntette pakningene mellom elementene har fungert som de skal.

## 8.3 Effekt av tetttingsinjeksjon

### 8.3.1 Mengde injeksjonsmasse og vannlekkasjer

Det ble undersøkt mulige sammenhenger mellom forbruket av injeksjonsmasser og størrelsen på vannlekkasjene. Figur 8.6 presenterer resultatet. Et gjennomsnitt fra innsamlet data viser at 10 000 L injeksjonsmasse tilsvarer omtrent 7,5 tonn. Det er ikke en klar korrelasjon mellom høyere volum av injeksjonsmasse og store vannmengder. Beregnet korrelasjonsverdi er 0,34 for TBM 3 og 0,43 for TBM 4. Dette tilsvarer svak til middels korrelasjon. For det høyeste injeksjonsvolumet er vannmengden betydelig lavere enn den høyeste verdien for vannmengder. TBM 3 har flere sprikende punkter enn TBM 4. Trendenlinjen viser likevel at injeksjonsforbruket øker med større vannmengder for begge tunnellopene.

Et høyt injeksjonsforbruk kan tyde på at sprekken er åpne eller at det er mye sprekker og at det tar lang tid å bygge opp trykket. Den lave korrelasjonen medfører at store vannlekkasjer ikke nødvendigvis indikerer at sprekken er åpne.



Figur 8.6: Registrert innlekkasje i sondeborehull plottet mot injeksjonsforbruk for hver injeksjonsrunde i de to sørgående tunnellopene.

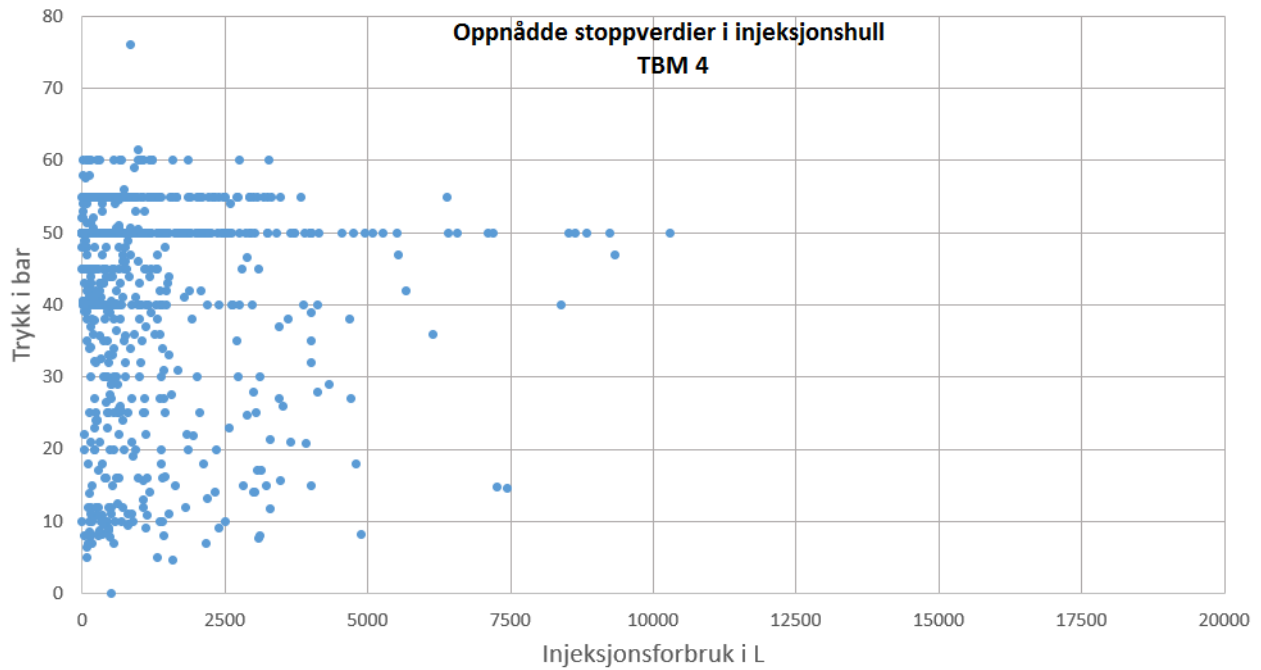
Det er sannsynlig at flere ting innvirker på injeksjonsforbruket og at kompleksiteten av sprekkesystemet gjør det vanskelig å sammenligne dette forholdet. Store vannlekkasjer vil ikke nødvendigvis medføre et større forbruk fordi det ikke er gitt at en sprekk er vanskeligere å tette selvom den er sterkt vannførende. I tillegg er det ingen garanti for at man borer på de mest vannførende sprekke-ene. Sonderboringene er som små nålestikk i en større flate og man treffer ikke alltid de vannbærende sonene. Vannet er ikke jevnt fordelt over hele bergflaten, men følger deler av sprekken. Det hadde vært enklere å bore på vannførende soner dersom vannet var jevnt fordelt og sprekke-ene opptrådte som vannfylte spalter. Siden virkeligheten er mye mer kompleks enn dette, vil ikke en stor vannlekkasje nødvendigvis tilsvare mye oppsprekking eller åpne sprekker som er vanskeligere å tette. Man kan ha vært heldig og truffet på en svært vannførende kanal. Trendlinjen viser likevel en svak tendens til at mengden injeksjonsmasse øker med større vannlekkasjer.

### **8.3.2 Oppnådde stoppkriterier**

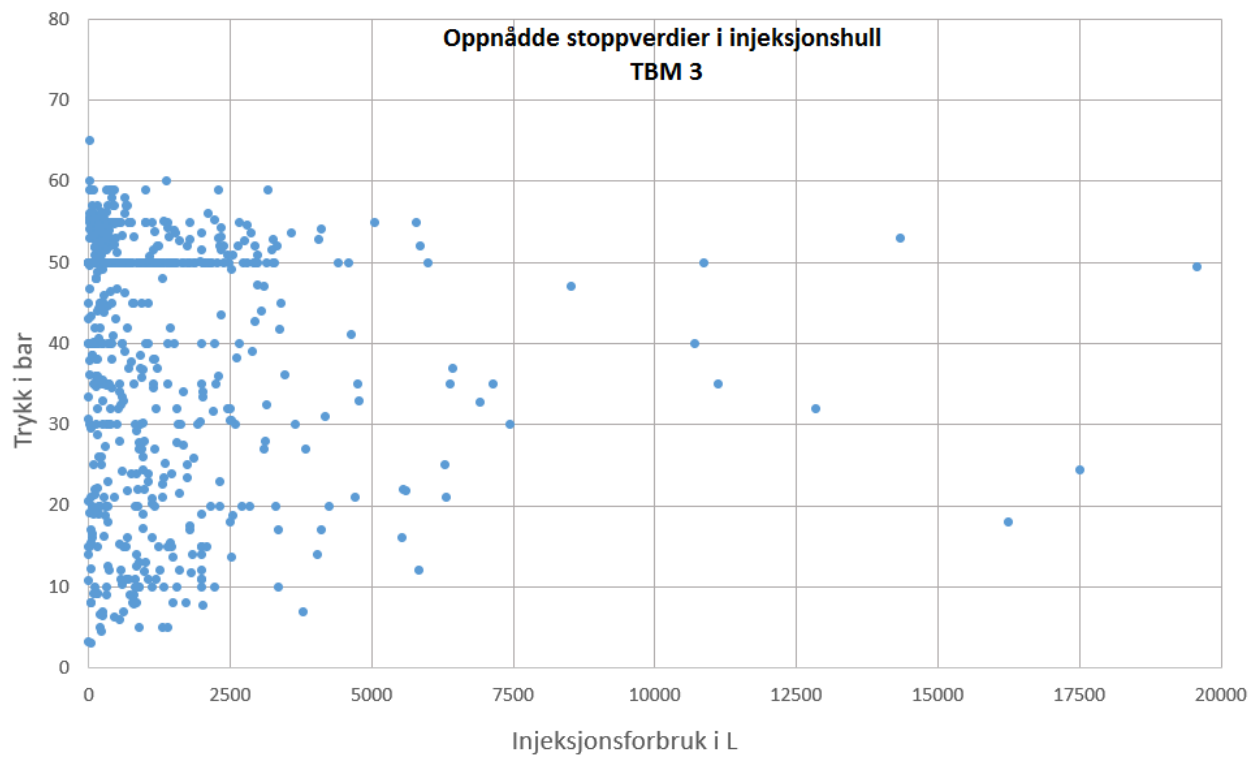
De oppnådde stoppverdiene i injeksjonshullene ble analysert for å gi en indikasjon på sprekke-karakter. Resultatene fra analysen er presentert i figur 8.7 og figur 8.8 som viser punktdiagram over de oppnådde stoppkriteriene i injeksjonsrundene for henholdsvis TBM 3 og TMB 4. Hvert punkt i diagrammene representerer ett hull i en injeksjonsskjerm.

Dersom stopptrykket blir nådd raskt og ved små masseinnganger, kan dette indikere at de fleste sprekke-ene er forholdsvis trange. Dersom sprekke-ene er mer åpne, vil trykkutviklingen gå tregere og voluminngangen er høyere. Anvendt stopptrykk har i flere tilfeller overgått det maksimale tillatte stopptrykket, men i de fleste av disse tilfellene har det skjedd ved små injeksjonsvolum og volum innenfor stoppkriteriet.

Det fremkommer av resultatene at stoppkriteriet for trykk er oppnådd før stoppkriteriet for volum i mange tilfeller for begge tunnellopene. Dette illustreres i figur 8.7 og 8.8 ved at flertallet av punktene er konsentrert til venstre i diagrammet. Det er mer spredning i resultatene for TBM 3, figur 8.8. Her har man i flere hull gått langt over den høyeste masseinngangen for TBM 4 på litt over 10 000 L. I ett enkelt hull har masseinngangen vært nærmere 20 000 L for TBM 3, dobbelt så mye som den høyeste masseinngangen for TBM 4.



Figur 8.7: Oppnådde stoppverdier i injeksjonshull for injeksjonsrunder for TBM 4.



Figur 8.8: Oppnådde stoppverdier i injeksjonshull for injeksjonsrunder for TBM 3.



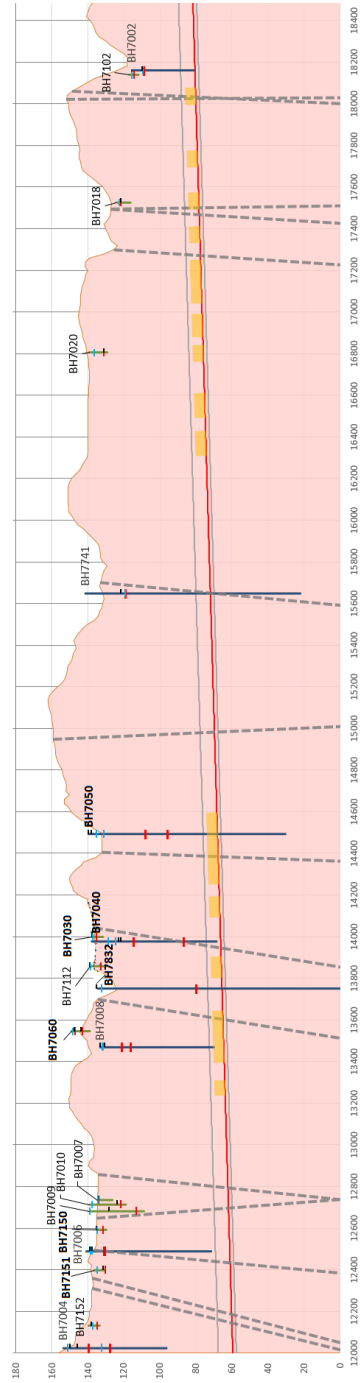
Hvis stoppkriteriene er nådd, men lekkasjen er større enn det som kan aksepteres vil kriteriene vanligvis justeres for hvert enkelt tilfelle i samråd med byggherre. Som oftest økes tillatt inn- gang av injeksjonsmasse. For vannlekkasjer som viser seg vanskelige å tette med sementbasert injeksjonsmiddel, kan tetting med polyuretan vurderes.

For svært mange hull blir hverken stopptrykket eller maksimumvolumet som er angitt i injek- sjonsprosedyren nådd. Årsaken kan være at injeksjonsmassen finner utgang i de sideliggende hullene og at injeksjonen av hullene derfor stanses. Det kan også hende at injeksjonen av hullet stanser før stoppkriteriene er nådd fordi injeksjonsrunden totalt har gitt tilstrekkelig tetthet til å bore videre. For flere av hullene er ikke stopptrykket nådd til tross for at den injiserte massen overstiger maksimumvolumet på 2500 L. Dette kan tyde på problemer med trykkoppbyggingen. Det er mulig at injeksjonsmassene finner utganger i andre hull.

Det kunne vært hensiktsmessig å skille mellom punktene med v/c-forhold lik 1 og punktene med v/c-forhold lik 0,8. Under en runde med injeksjon vil alle hullene først bli forsøkt tettet med en injeksjonsblanding der v/c-forholdet er 1. For hullene som ikke oppnådde det ønskede sluttrykket på 50 bar, blir det forsøkt tettet med en injeksjonsblanding med det reduserte v/c- forholdet. På den måten vil en få en indikasjon på hvor mange hull som oppnådde sluttkriteriet for trykk ved hver omgang, samt om hullene som hverken har nådd sluttkriteriet for trykk eller masse har blitt forsøkt injisert en eller flere ganger. Dette ville også vist fordelingen av hull som var enkle å tette og mer problematiske hull.

### 8.3.3 Poretrykk

Figur 8.9 viser plasseringen og dybden av brønnene langs et lengdeprofil av tunnelen for det sørgående løpet boret av Anna, TBM 4. Profilet har inntegnede svakhetssoner og markerte par- tier der det er utført forinjeksjon. For de brønnene som skjærer tunnelen, ble bunnen av hullet tettet med betongmasser før TBMen boret gjennom området.



Figur 8.9: Figuren viser tunnelprofilen med plassering av de ulike brønnene. De blå brønnene er fjellbrønner mens løsmassebrønnene har en grønn farge. De oransje partiene i tunnelen viser områdene som er injisert. Navnet på brønnene som er spesielt nevnt i delkapittelet er markert med uthevet skrift.

Fjellbrønner er ofte dype og reagerer raskere enn løsmasse. Løsmassebrønnene bores helt ned til fjell for å stå stabilt, hvis det er en reaksjon nederst i røret mot fjellet har senkningen gått for langt. Rundt nyttår i 2017 viste flere målinger en reaksjon over et større område helt fra adkomsttunnelene på Åsland og forbi Snipetjern. Reaksjonen fant sted selv i brønner som TBMen ikke var i nærheten av. Dette tyder på et større sprekkenettverk med god kommunikasjon. Fallet i poretrykk kom som en reaksjon på store innlekkasjer som oppstod fordi sonderboringene ikke ble tatt seriøst nok. Etter et poretrykksfall er det viktig med rask installasjon av betongsegmentene slik at trykket gjenopprettes og restabiliseres innen kort tid.

Det er tydelig at poretrykksfallet i fjellbrønner er raskere enn i løsmassebrønnene. Dette kommer frem i figur 8.12 og figur 8.13 som viser poretrykksutviklingen i fjellbrønnene sammenlignet med figur 8.10 og 8.11 som viser utviklingen i løsmassebrønnene. For fjellbrønnene er poretrykksfallet på opptil 40 meter mens det for løsmassebrønnene er registreringer opptil 5 meter.

To av løsmassebrønnene og en fjellbrønn (brønn 7151, 7150 og 7832) får en reduksjon av poretrykket på slutten av 2016/starten av 2017. TBM 4 nådde brønn 7151 (rett før pelnummer 12500) mellom 5. og 12. desember 2016 mens TBM 3 kom til brønnen 17. januar 2017. Til tross for at brønn 7832 ligger over en kilometer unna de to andre, viste målinger en reaksjon i denne på samme tid som TBMen befant seg ved brønn 7151. Det tyder på et sprekkenettverk med god kommunikasjon og stor utbredelse. Ut ifra det ingeniørgeologiske kartet, se vedlegg A.2 og figur 8.9, ser det ut til å være to svakhetssoner som skjærer tunnelen i området. Den ene er 1–5 meter tykk og den andre er 5–10 meter tykk. Det ser ut til at de to svakhetssonene er koblet opp mot en tykkere svakhetszone på over 10 meter som går gjennom Snipetjern. Bergartene i området er tonalittisk til granittisk gneis. Kartleggingene på stuff, vedlegg C, informerer om amfibolittintrusjoner og store vannlekkasjer fra åpne sub-horisontale sprekker orientert nord-sør.

Siden det ble registrert en reaksjon i en overvåkningsbrønn over en kilometer unna TBMen som et resultat av den høye vanninntrengningen i tunnelen, blir viktigheten av sonderboringer illustrert. Det er essensielt at sonderboringene gjennomføres med tilstrekkelig antall hull og er tilpasset faktiske geologiske forhold og sensitivitetklassifiseringen av strekningen slik at sprekker med høy permeabilitet oppdages og slike situasjoner unngås. Prosjektet startet med ett sonderborehull gjennom porten som er plassert i midten, øverst i TBMen. På grunn av en ugunstig orientering ble ikke de sub-horisontale sonene med høy permeabilitet oppdaget. Strategien for hullene ble revidert for å tilpasses geologien. Det nye konseptet inkluderer minimum to hull; ett som bores fra kronen og ett fra bunnen av borhodet.

Det skjer en ny senkning i brønn 7832 når TBMen er ved pelnummer 13750, altså rett under

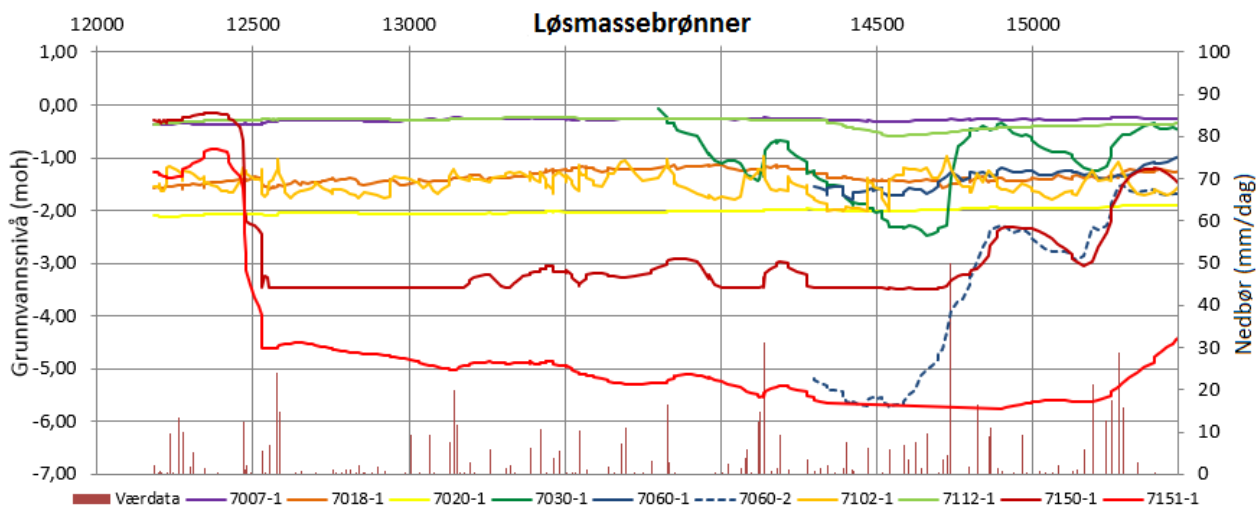
fjellbrønnen. Omtrent på samme tid skjer det en reaksjon i brønn 7040, 7050, 7030 og 7060. Brønn 7050 ligger lengst unna ved pelnummer 14500. Igjen ser det ut til at sprekkene brer seg utover et større område. Kartleggingene i tunnelen har beskrivelser av gneis og amfibolitt med tett opprekking og sub-horisontale sprekker som fører vann. Reduksjonen i poretrykk samsvarer med en stor innlekkasje som vises i figur 8.4 nær pelnummer 13500 som ser ut til å gi utslag på brønnene nevnt i dette avsnittet. Området befinner seg nær Snipetjern og det er trolig at vann herfra lekker inn i tunnelen. Reetableringen av poretrykket er av den grunn kritisk slik at en unngår en lignende situasjon som på Romeriksporten, se kapittel 5. På Sofiemyr, ikke altfor langt unna, er det registrert en setningsutvikling.

Erfaringene førte til en revisjon av beslutningsgrunnlaget for forinjeksjon. I moderate til sensitive områder ble den nye verdien senket til 40 L/min sammenlagt fra minimum to sonderborehull. Det er tydelig at en økning på opptil fire sonderborehull gir et mer helhetlig og realistisk bilde av bergmasseforholdene foran TBMen. I områdene med lav sensitivitet ble en innlekkasje på 80 L/min satt som et maksimum for hvor mye vann som kunne trenge inn i tunnelen uten at det skapte problemer med utvasking av massen som etterfylles mellom tunnelkonturen og betongelementene. Det skal bores minimum seks sonderborehull i de mest sensitive områdene. Så fremt det ikke gjennomføres systematisk forinjeksjon i området, er beslutningsgrunnlaget for forinjeksjon satt til en innlekkasje på 25 L/min sammenlagt fra de seks hullene.

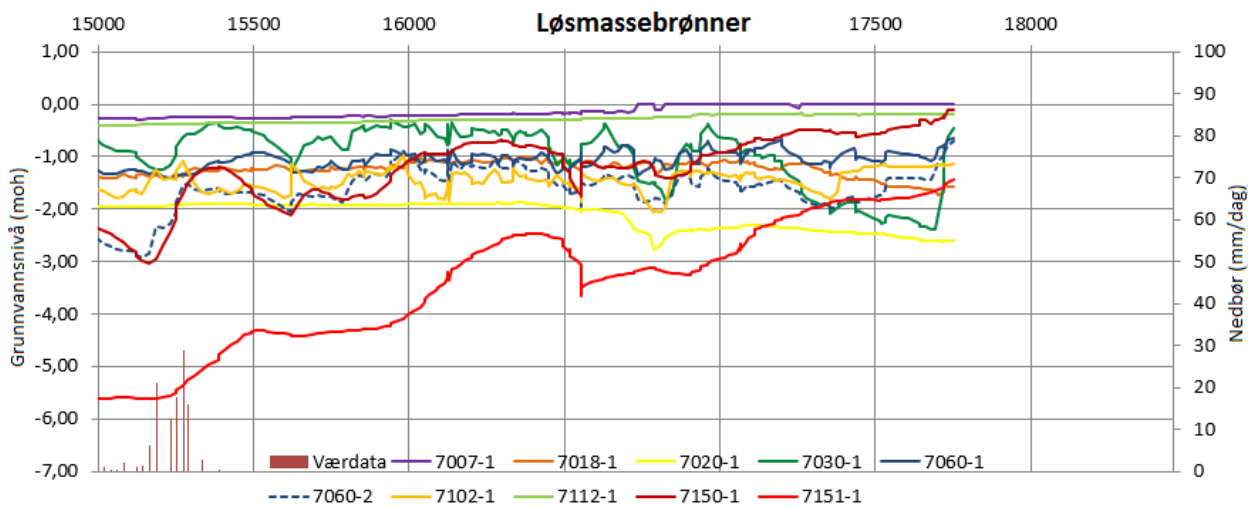
Poretrykket i løsmassene bruker lang tid på å stabilisere seg og reetableres. For brønn 7051 og 7050 tar det nærmere 8 måneder før poretrykket begynner å stige nevneverdig igjen. TBMen har da passert pelnummer 15000. For fjellbrønnene tar reetableringen lenger tid etter innlekkasjen rundt pelnummer 13500 enn den første store innlekkasjen. De små variasjonene i brønnene som ikke er nevnt spesielt, kan komme av årstidsvariasjoner, nedbørsmengder eller mindre og kortvarige lekkasjer i tunnelen. I tillegg vil tverrtunnelene sprenges ut som udrenerte løsninger. Poretrykket kan bruke lenger tid på å stabilisere seg igjen etter at TBMen har boret forbi, avhengig av hvor mye vann som lekker inn i tverrtunnelene og hvor lang tid det tar å få dem helt tette. Det fremkommer av grafene i figur 8.10–8.13 at poretrykket i alle brønnene er reetablert etter at maskinene har boret forbi disse og vannsikringen er kommet på plass.

### **8.3.4 Geologi og vannlekkasjer**

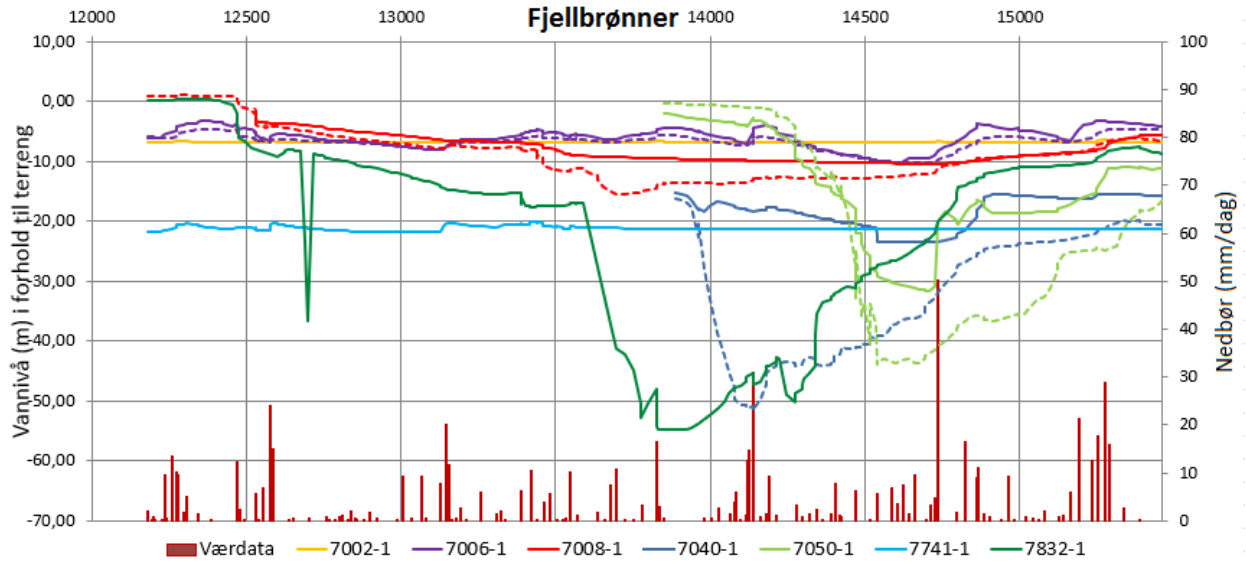
Det er i hovedsak tre geologiske forhold som skiller seg ut i forbindelse med vannlekkasjer i TBM-tunnelene på Follobanen.



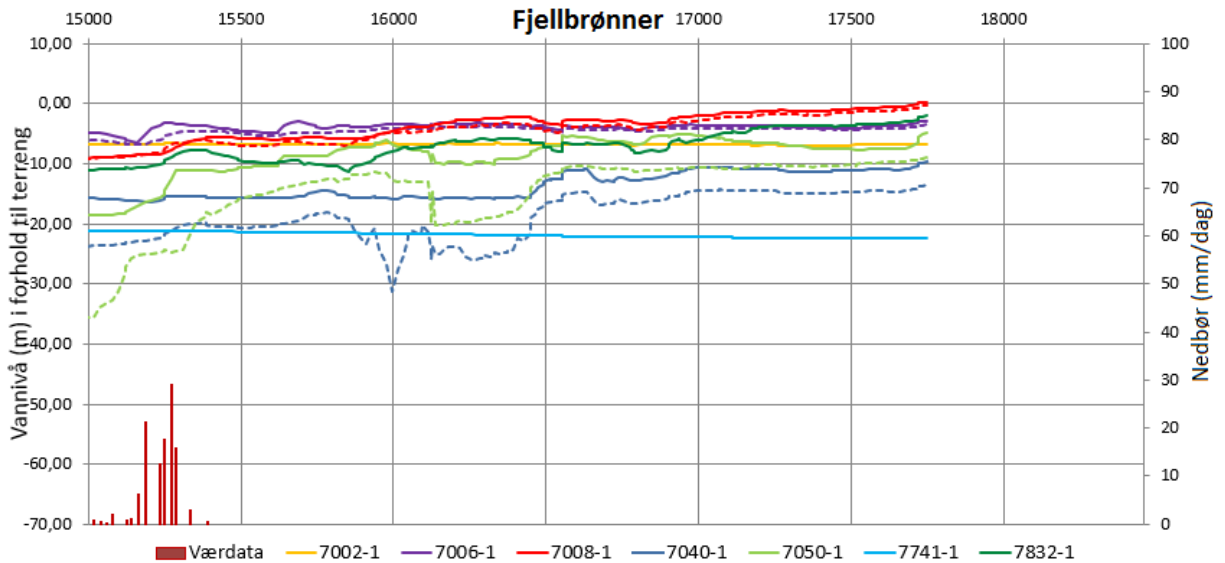
Figur 8.10: Poretrykksutvikling i løsmassebrønner fra pelnummer 12000 til 15000.



Figur 8.11: Poretrykksutvikling i løsmassebrønner fra pelnummer 15000 til 18000



Figur 8.12: Poretrykksutvikling i fjellbrønner fra pelnummer 12000 til 15000



Figur 8.13: Poretrykksutvikling i fjellbrønner fra pelnummer 15000 til 18000

Det ble i kapittel 6 beskrevet to kartlagte sprekesett med ulik orientering. I enkelte områder ble det i tillegg observert noen få sub–horisontale sprekker, men ikke tilstrekkelig til å definere et horisontalt hovedsprekesett. Det har vist seg at opptredenen av disse sprekkene er hyppigere enn det som ble antatt. Av de tre sprekesettene er det de sub–horisontale sprekkene som har vist seg å være mest problematiske i forbindelse med vannlekkasjer, da disse sonene er høypermeable. Årsakene til dette er flere.

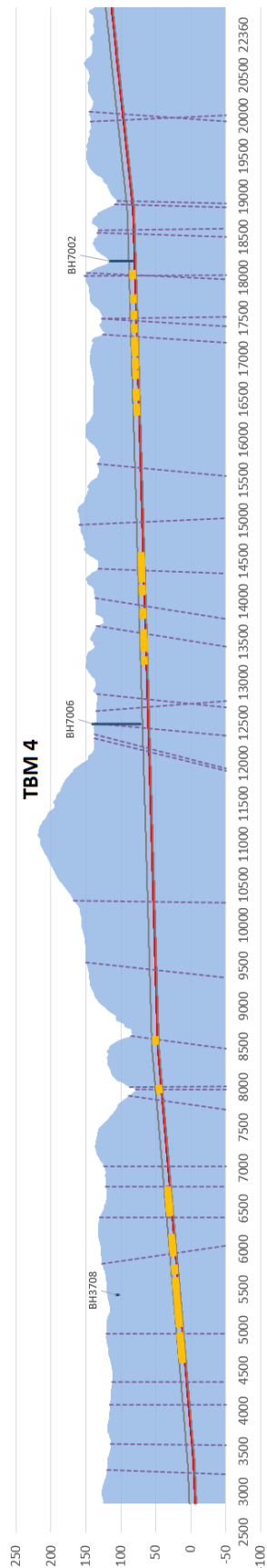
Utbredelsen av de sub–horisontale sprekkene ser ut til å være større enn først antatt basert på de geologiske kartleggingene på stoff (vedlegg C) og registreringene av poretrykksfall i flere brønner med stor avstand (figur 8.10–figur 8.13). Sprekkene er trolig dannet som et resultat av spenningsavlastningen etter siste istid. Til tross for tidvis stor overdekning og at både de vertikale og horisontale spenningene gjerne øker med dypet, er sprekkene likevel åpne på grunn av spenningsavlastningen. Sprekkeåpningen måles fra en side av sprekken til den andre og kan også avhenge av andre forhold. Et av de viktigste er bergmassens mekaniske egenskaper. På Follobanen drives tunnelen hovedsakelig gjennom prekambrisk grunnfjell bestående av sprø, harde bergarter som gneis. I slike bergarter forblir sprekkene ofte åpne og vil av den grunn også ha større potensiale til å være vannførende. I bergmasse som enklere lar seg deformere, vil sprekkene i større grad lukkes. I tillegg er de sub–horisontale sprekkene vanskelige å oppdage under sonderboringene siden borehullene heller 11 grader.

Mye av inntrengning av vann forekommer der det er tilstedeværelse av permiske eruptivganger som amfibolitt. Flere av disse har vært langsgående slik at de følger tunneltraséen et lengre stykke. Slike eruptivganger er typisk for Oslofeltet og området øst for Oslofeltet, se kapittel 4. Gange- ne sprekker ofte enklere opp enn sideberget. I tillegg sprekker de opp under avkjøling og danner gjerne åpne, potensielt vannførende sprekker i kontakflaten til sideberget. Ved siden av de sub–horisontale sprekkene, er det i kontaktflater mellom ulike bergarter og sterkt oppsprukne soner at de fleste observasjonene av vann er gjort. Forklaringen ligger i at det er større sannsynlighet for god kommunikasjon i sprekkenettverket dersom det er flere sprekker. Hvis sprekkene i tillegg er åpne og har stor utholdenhetsgrad, øker sannsynligheten ytterligere for at nettverket er vannførende.

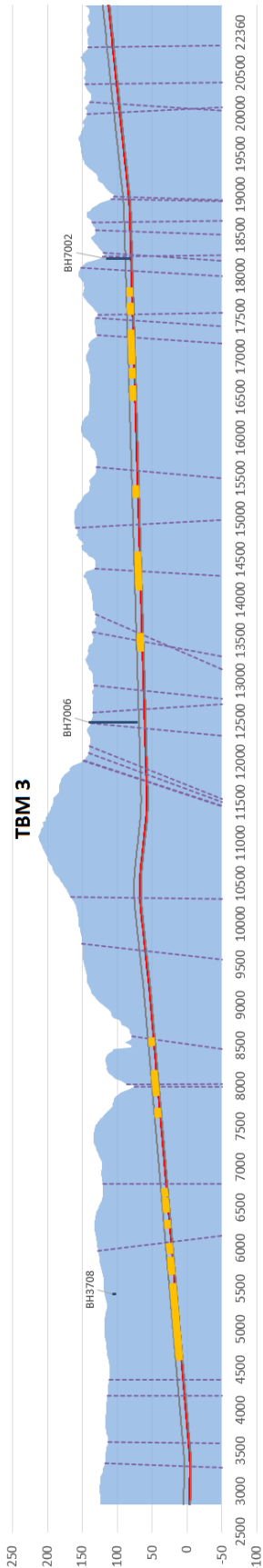
I figur 8.14 og figur 8.15 er lengdeprofil med inntegnede svakhetssoner og injiserte områder presentert. De injiserte områdene sammenfaller med svakhetssonene eller utkanten av disse. Unntaket er den tidligere nevnte sonen på 72 meter for TBM 3 rundt pelnummer 15300 og rundt pelnummer 16500 for begge tunnellopene. Det sistnevnte området har de høyeste innlekkasjene i tunnelen og høyt masseforbruk til tross for at det ikke er noen inntegnede svakhetssoner

her, men disse svakhetssonene er basert på forundersøkelsene og trenger derfor ikke å samsvare med virkeligheten. Fra de geologiske kartleggene på stuff, vedlegg C, er det observert en svakhetszone i området med tett, nærmest kubisk oppsprekking. I tillegg er det utført flere runder injeksjon frem til den allerede nevnte sonen rundt pelnummer 17000 som en visste at hadde flere svakhetssoner og områder med leire på overflaten.

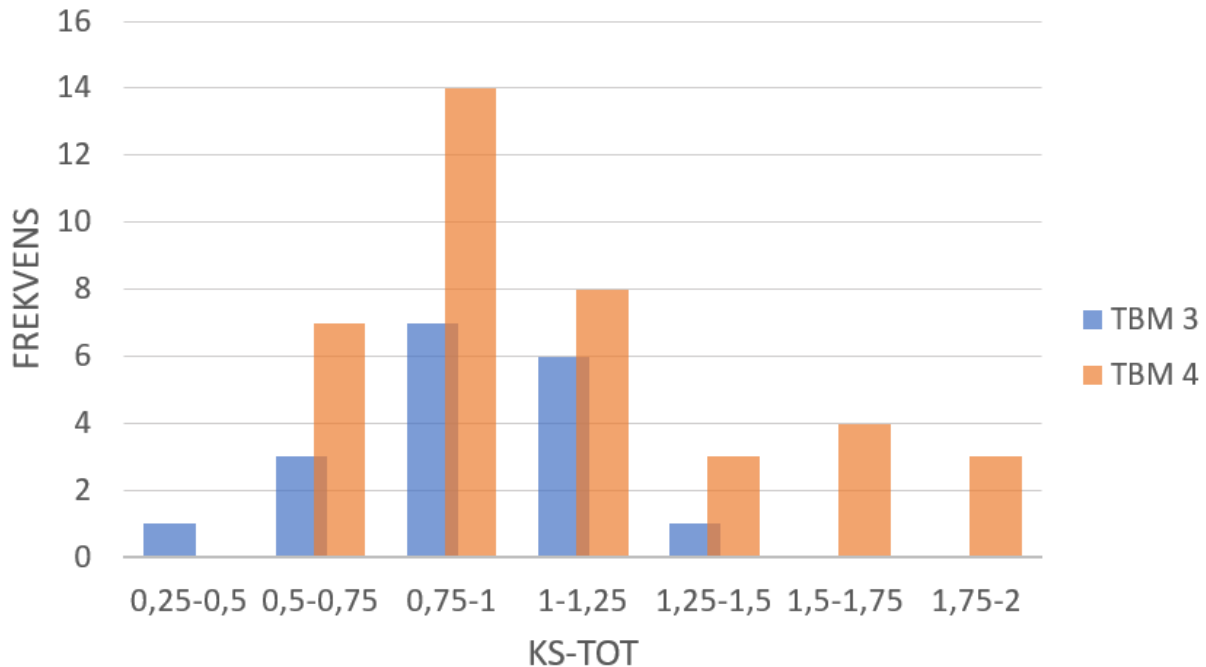




Figur 8.14: Lengdeprofil med injiserte områder for TBM 4.



Figur 8.15: Lengdeprofil med injiserte områder for TBM 3.



Figur 8.16: Antall injeksjonsrunder sortert etter grad av oppsprekking.

Figur 8.16 viser antallet injeksjonsrunder sortert etter ulike intervaller for bergoppsprekkingsfaktoren. En høyere faktor tilsier at bergmassen er sterkere oppsprukket enn en lavere faktor.

Det ble funnet 18 Ks–tot verdier for TBM 3 (omtrent frem til pelnummer 16500) og 39 verdier for TBM 4 (frem til pelnummer 18000). Siden det er gjennomført 36 runder med injeksjon på TBM 3, er informasjonen mangelfull og resultatet kan av den grunn være annerledes enn hvis alle rundene hadde vært inkludert. For TBM 4 mangler det informasjon for 5 runder.

TBM 3 har ingen registrert bergoppsprekkingsfaktor over 1,4. Den laveste verdien er 0,36. Flertallet av rundene ( $\approx 89\%$ ) er utført for verdier mellom 0,5 og 1,25. TBM 4 har større spredning i verdiene, mellom 0,57 og 2. Omtrent 74% av injeksjonsrundene for TBM 4 er utført for samme verdiintervall som TBM 3, mellom 0,5 og 1,25. Utifra figur 8.16 kan det se ut til at behovet for injeksjon minker når bergoppsprekkingsfaktoren blir svært lav og når den blir høyere enn 1,25.

Resultatet kan stemme overens med funnene til [Holmøy \(2008\)](#) presentert i kapittel 3. Generelt vil en høyere sprekkeintensitet gi større sannsynlighet for at det er god kommunikasjon i sprekkenettverket slik at disse kan føre vann. Dersom graden av oppsprekking er svært høy, altså ved høye verdier av Ks–tot, kan bergmassen være av så dårlig kvalitet at sonen blir forseglet i større eller mindre grad av finmateriale og leire og skaper en grunnvannsbarriere. Videre er berget mer intakt desto lavere verdi Ks–tot har slik at bergmassen er mindre vannførende. Det

er derfor å forvente at dataen konsentreres til midlere verdier.

Det er sjeldent observert sprekkefyll i de daglige geologiske kartleggingene, vedlegg C. Unntaket er i senter av svakhetssonene hvor den hydrauliske konduktiviteten er lav fordi bergmassen er så oppsprukket og delvis omdannet til leire at den i stor grad forsegles. Mot ytterkantene av disse sonene er det derimot sterk vannføring og høyere innlekkasjer i tunnelen. Dette stemmer godt overens med teorien presentert i delkapittel kapittel 3.1.

### **8.4 Sammenligning med tidligere erfaringer**

De tidligere studerte prosjektene beskrevet i kapittel 5 og de to sørgående tunnellopene på Follo-baneprosjektet har valgt ulike tettestrategier. På Follobaneprosjektet er det valgt en udrenert løsning for vannsikring. Vannsikringen er konstruert til å tåle høye vanntrykk og består av pre-fabrikkerte betongelementer med vanntette pakninger mellom. Åpningen mellom tunnelkonturen og betongutføringen etterfylles for å sikre en helt vanntett tunnel uten synlige fuktmerker. Løsningen har vist seg å fungere og det er kun portene hvor mellomrommet skal etterfylles som har vært litt problematiske i forbindelse med vannlekkasjer.

Forinjeksjon benyttes kun for å kontrollere vanninntrengningen midlertidig i forbidrivingen fremfor å fungere som permanent forseiling mot fremtidig vanninntrengning slik forinjeksjonen gjør for de drenerte løsningene i de tre fullførte prosjektene. Injeksjonsomfanget er av den grunn lavere for tunnelene på Follobaneprosjektet. Siden TBMen må stanse boringen for hver injeksjonsrunde, hadde det tatt svært lang tid dersom hele tunnelen skulle tettes med systematisk forinjeksjon fremfor den udrenerte løsningen.

I tillegg er tunnellopene på Follobanen drevet med dobbeltskjold TBMer fremfor konvensjonell tunneldrift. Dette gjør at tilgangen på bergoverflater er begrenset til visuelle observasjoner gjennom borhodet. Det er derfor nødvendig med systematiske sonderboringer og kartlegging i borehullene med OTV for hver tunnelmeter slik at en til enhver tid har kjennskap til grunnforholdene foran stuff. Antall sonderborehull og plassering av disse må vurderes fortløpende etter hvilke geologiske forhold maskinen befinner seg i. For de tre andre tunnelprosjektene som er sprengt ut har det også blitt utført systematiske sonderboringer, men her er det enklere å få et visuelt overblikk over forholdene i tunnelen i tillegg til at det er mulig å utføre kartlegginger og tester på alle bergoverflater.

Det er også vanskeligere å lage en tilpasset injeksjonsskjerm for TBM-tunnelene siden åpninge-

ne for sonder- og borehull er fiksert med en fast helning på 11 grader. Med fri tilgang til bergmassen kan hver enkelt skjerm tilpasses vanskelige geologiske forhold i mye større grad, noe som har vært nyttig både på Holmestrandporten og på strekningen mellom Lysaker og Sandvika. På grunn av de fikserte åpningene har det også vært vanskelig å treffe på de sub-horisontale, vannførende sonene i TBM-tunnelene. Det var derfor nødvendig å øke antallet sonerborehull for å identifisere lekkasjeomfanget bedre. Holmestrandporten illustrerte også viktigheten av å ha tilstrekkelig antall borehull for å kjenne forholdene foran stoff da de på grunn av dette fikk tidlig forvarsel om et område med delvis manglende overdekning.

Alle de fire prosjektene har vist at det er viktig å alltid forinjisere soner hvor det kan forventes stor oppsprekking eller stabilitetsproblemer, samt å tette større vannlekkasjer ved hjelp av forinjeksjon før tunnelen drives gjennom området. Dette for å unngå en grunnvannssenkning og skader på miljøet og omgivelsene over tunnelen. Det forhåndsdefinerte tetthetskriteriet burde styre fremdriften av tunnelarbeidet. Tunnelene skal ikke drives videre før tetthetskriteriet er oppnådd, hvilket inkluderer at flere enn en injeksjonsrunde kan være nødvendig. På Romeriksporten ble det motsatte gjort, der en etter flere mislykkede injeksjonsforsøk, bestemte seg for å tette restlekkasjene ved etterinjeksjon. Dette viste seg svært vanskelig og ble kostbart. I tillegg førte alle lekkasjene inn i tunnelen til en senkning av grunnvannsnivået over tunnelen hvor flere vannkilder ble tørrlagt. Mer informasjon om Romeriksporten kan finnes i kapittel 5. Ettersikring ble også dyrt for tunnelen mellom Lysaker og Sandvika.

# Kapittel 9

## Konklusjon

Følgende formål med masteroppgaven ble satt i kapittel 1:

1. Beskrive valgt tettestrategi for TBM-tunnelene på Follobanen
2. Redegjøre for strategi for sonderboring og beslutningsgrunnlag for injeksjon
3. Beskrive og diskutere valgte metoder for gjennomføring av tettingsinjeksjon og vurdere alternative metoder
4. Evaluere og diskutere hvilke geologiske forhold som har gitt størst innlekkasje
5. Evaluere effekten av tettingsinjeksjon, basert på gjennomgang av resultater fra målinger av poretrykk og andre relevante parametre

De tre første punktene er redegjort for i kapittel 7. En sammenligning av den valgte strategien for Follobanen og de tidligere prosjektene er gitt i delkapittel 8.4. Punkt fire og fem er analysert og diskutert i kapittel 8. De viktigste konklusjonene forbundet med tettestrategien, geologiske forhold knyttet til innlekkasje og effekten av injeksjonen er listet opp under.

- Det er begrenset med tilgjengelige overflater i TBM-tunnelene slik at kartlegging må foregå på andre måter enn for de tre andre tunnelprosjektene. På Follobanen utføres kartlegginger gjennom borhodet, i tillegg til at sonderboringer og OTV benyttes.
- Både den udrenerte løsningen på Follobanen og de drenerte løsningene for de tre andre prosjektene har gitt en tilstrekkelig tett tunnel etter de stilte kravene. For den udrenerte løsningen for vannsikring i TBM-tunnelene er det kun nødvendig å benytte forinjeksjon som et midlertidig tiltak for vannkontroll idet TBMen passerer fremfor å bruke forinjek-

sjon som et hovedtiltak mot også fremtidig vanninntrengning.

- En full injeksjonsskjerm bestående av 20 hull fordelt rundt tunnelkonturen er tilstrekkelig for midlertidig vannkontroll inntil ringen med betongelementene er montert og etterfyllingen mellom elementene og fjellet er utført. Tunnelen er da forseglet mot fremtidig vanninntrengning.
- For TBM-tunnelene er det vanskeligere å tilpasse en injeksjonsskjerm enn for de tre andre tunnelene. Sonderboringene blir derfor ekstra viktige.
- Det er viktig med tilstrekkelig antall sondeborehull slik at høypermeable soner og lekkasjeomfanget oppdages. Det er essensielt å etablere et tilpasset konsept som er under konstant utvikling gjennom hele prosjektet. Antall sondeborehull, plassering av dem og beslutningsgrunnlaget for forinjeksjon må bestemmes ut ifra sensitivitetssklassifiseringen til området over tunnelen, forundersøkelser og de rådende geologiske forholdene.
- Som en alternativ metode til tetttingsinjeksjonen i tunnelen ble det vurdert å injisere en del av bergmassen fra dagen. TBMen har ikke nådd området enda, men dette vil ikke bli gjort fordi boremønsteret for denne metoden vil gi for lang boretid sammenlignet med boretiden for en injeksjonsskjerm utført i tunnelen.
- Sub-horisontale sprekker, amfibolittganger og svakhetssoner har gitt de største vannlekkasjene. De sub-horisontale sprekkeene er åpne og følger tunnelen over lengre partier, trolig på grunn av en spenningsavlastning og de bergmekaniske egenskapene til grunnfjellet. Amfibolittgangene og svakhetssoner er generelt mer oppsprukket og har større sannsynlighet for god kontakt mellom vannførende sprekker.
- Injeksjonsomfanget er mindre for høyere og lavere verdier av bergoppsprekkingsfaktoren  $K_s$ -tot. 89% av rundene for TBM 3 og 74% av rundene for TBM 4 er utført for områder med  $K_s$ -tot mellom 0,5 og 1,25. Forklaringen kan være at lave verdier tilhører nærmest intakt berg, mens de høyere verdiene representerer sterkt oppsprukne soner der sprekkeene er delvis tettet av sprekkefyll av leire og og annet finstoff.
- Det ser ut til at injeksjon i det ene tunnellopet influerer det andre.
- Det ble ikke funnet noen klar korrelasjon mellom den benyttede mengden injeksjonsmasse og størrelsen på vannlekkasjene. Trendlinjen viste likevel en svak tendens til at masseforbruket øker med større vannlekkasjer.
- Det er flere forhold som innvirker ved injeksjon og det er derfor vanskelig å finne enty-

dige svar og korrelasjoner ved å se på de store sammenhengene. Det er også vanskelig å kontrollere alle parametere som innvirker på hver runde.

- Store vannlekkasjer i tunnelen kan føre til et redusert poretrykk i mer enn 1,5 kilometer fra tunnelstuppen og medføre at etterfyllingsmassen vaskes ut slik at betongelementene kommer ut av posisjon.
- Poretrykket i observasjonsbrønnene har stabilisert seg etter at vannsikringen kom på plass og tverrtunnelene ble tettet. Det har også blitt brukt infiltrasjonsbrønner.

### 9.1 Videreføring av arbeidet

Follobaneprosjektet skal ikke være ferdigstilt før i 2021. Boringen av TBM-tunnelene vil pågå i en tid fremover, så analyseringen av lekkasjeforholdene og den benyttede tettestrategien kan undersøkes videre om ønskelig. Follobaneprosjektet er på mange måter et pilotprosjekt. En grundig dokumentasjon av erfaringer tilegnet underveis, vil kunne gi nyttig kunnskap for kommende tunnelprosjekter.

Det er svært nyttig å kunne forutsi hvor innlekkasjer vil opptre i tunnelen og hvor store vannmengder som kan forventes. Det kunne derfor vært interessant å undersøke hvorvidt utbredelsen av de sub-horisontale sonene kunne vært oppdaget tidligere, for eksempel ved utvidede forundersøkelser eller ved å videreutvikle prosedyren for kartlegging fra dobbeltskjold TBM. Kartleggingen av oppsprekkingsgraden fra OTV kan sammenstilles med kartleggingen på stoff og kartlegginger på den tilgjengelige overflaten i tverrtunnelene. Dette kan gi et mer nøyaktig og troverdig bilde av oppsprekkingen i tunnelen.

Tverrtunnelene mellom TBM-løpene er sprengt ut som drenerte løsninger mens selve TBM-løpene er udrenerte. Innlekkasjer her kan være en av årsakene til at det tok såpass lang tid før poretrykket i løsmassebrønnene var reetablert. Det hadde derfor vært interessant å studere dette konseptet nærmere og se hvordan tverrtunnelene påvirker poretrykket langs tunneltraséen.

Et siste område som er interessant å studere er influensområdet og hvor mye innlekkasje som kan tåles før setninger induseres på overflaten.





# Bibliografi

Acciona Ghella Joint Venture (2017a). TBM - Overall Ground Water Management. Internrapport fra Bane NOR.

Acciona Ghella Joint Venture (2017b). TBM Probe Drilling and Pregrouting Construction Method Statement. Internrapport fra Bane NOR.

Acciona Ghella Joint Venture (2018). Follobanen, TBM Tunnels. General considerations about grout injection from the ground level. Internrapport fra Bane NOR.

Bane NOR (2018). Anskaffet av personale på Åsland riggområde.

Beitnes, A. (1998). Injeksjonsarbeider i romeriksporten. *Fjellsprengningsdagen, bergmekanikkdagen, geoteknikkdagen*, Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk, Norsk Bergmekanikk-gruppe, Norsk Geoteknisk Forening.

Beitnes, A. (2001). Lessons to be learned from long railway tunnels. *Water control*, NFF 12:51–57.

Braathen, A. and Gabrielsen, R. (2000). Bruddsoner i fjell - oppbygning og definisjoner. *Gråsteinen 7*, Norges geologiske undersøkelse.

Freeze, A. and Cherry, J. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall.

Geoteknisk kontor, Oslo kommune, NGI, NSB Gardemoenbanen AS, and NOTEBY AS (1999). Romeriksporten: Permanent infiltrasjon av vann i løsmasseområder. prinsipper for etablering, driftsovervåking og vedlikehold. Internrapport fra Bane NOR.

Google Maps (2018). Utsnitt av satellittbilde. Tilgjengelig fra: <https://maps.google.com> (Hentet 26.06.2018).

Grepstad, G. K. (2001). The water balance - definition and monitoring. *Water control*, NFF 12:21–26.

- Herrenknecht (u.å). Double Shield TBM - Continuous tunneling at maximum speed. Tilgjengelig fra: <https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/double-shield-tbm.html> (Hentet 27.02.2018).
- Herrenknecht (u.å). Gripper TBM - Experts for tough hard rock. Tilgjengelig fra: <https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/gripper-tbm.html> (Hentet 27.02.2018).
- Herrenknecht (u.å). Single Shield TBM - Fast tunneling in changing rock conditions. Tilgjengelig fra: <https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/single-shield-tbm.html> (Hentet 27.02.2018).
- Holmøy, K. H. (2008). *Significance of Geological Parameters for Predicting Water Leakage*. PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology.
- Holsbrekken, E. and Nesje, L. (2008). Tunneldrift i en moderne jungel - status nytt dobbeltspor Lysaker-Sandvika. *Fjellsprengningsdagen, bergmekanikkdagen, geoteknikkdagen*, Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk, Norsk Bergmekanikkgruppe, Norsk Geoteknisk Forening.
- Jakobsen, P. D. and Arntsen, M. L. (2014). *Bruk av TBM til driving av vegtunneler i Norge*. Rapport nr. 324, Statens vegvesen.
- Jernbaneverket (2008). Program for miljøoppfølging i anleggsperioden. Detaljplan Bygg/Bane. Vestfoldbanen parsell 5 Holm-Nykirke.
- Jernbaneverket (2011). Diverse kontraktsdokumenter og arbeidstegninger.
- Jernbaneverket (2012). Sluttrapport for prosjekt 951150 Lysaker-Sandvika. Tilsendt fra Bane NOR.
- Jernbaneverket (2014a). Informasjonsbrosjyrer fra Jernbaneverket.
- Jernbaneverket (2014b). The Follo Line, Tunnel Section Summary Geological Data Report. Internrapport fra Bane NOR.
- Karlsrud, K. (2001). Control of water leakage when tunneling under urban areas in the oslo region. *Water control*, NFF 12:27–33.
- Karlsrud, K., Erikstad, L., and Snilsberg, P. (2003). Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø. *Miljø- og samfunnstjenlige tunneler*, Vegdirektoratet. Publikasjon nr. 103.

- Karlsrud, K., Kveldevik, V., Snilsberg, P., Søvik, A. K., Erikstad, L., Bendiksen, E., Tuttle, K., and Worsely, R. T. (2001). Konsekvenser av tunnellekkasjer for det ytre miljø. *Miljø- og samfunns-tjenlige tunneler*, Statens Vegvesen. Internrapport.
- Løset, F. (2006). *Norges tunnelgeologi*. Norges geotekniske institutt (NGI), Oslo.
- Melbø, O. (1999). Status romeriksporten. *Fjellsprengningsdagen, bergmekanikkdagen, geoteknikkdagen*, Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk, Norsk Bergmekanikkgruppe, Norsk Geoteknisk Forening.
- Multiconsult (2006). Tunnel Lysaker-Sandvika. Byggeplan. *USA50-6-R-020105 Fagrapport ingeniørgeologi*, Jernbaneverket.
- NFF (2002). *Berginjeksjon*. Håndbok nr. 1, Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk (NFF) i samarbeid med Norsk Bergmekanikkgruppe (NBG).
- NFF (2010). *Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg*. Håndbok nr. 06, Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk (NFF).
- NFF (2011). *Rock Mass Grouting in Norwegian Tunnelling*. Publication No. 20, Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk (NFF).
- NFF (2015). *Kort innføring i bruk av TBM*. Teknisk rapport 17, Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk (NFF).
- NGI (2015). *Bruk av Q-systemet: Bergmasseklassifisering og bergforsterkning*. Norges Geologiske Institutt, Oslo.
- NGU (2017). Berggrunn. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/emne/berggrunn> (Hentet 25.10.2017).
- NGU (2017). *Regionalgeologi*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/emne/regionalgeologi> (Hentet 01.11.2017).
- Nilsen, B. and Broch, E. (2012). *Ingeniørgeologi - Berg: Grunnkurskompendium*. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Institutt for geologi og bergteknikk, Trondheim.
- Nilsen, B. and Palmstrøm, A. (2000). *Engineering Geology and Rock Engineering, Handbook no. 2*. Norsk Bergmekanikkgruppe, Oslo.

- Palmstrøm, A., Nilsen, B., Perdersen, K. B., and Grundt, L. (2003). Riktig omfang av undersøkelser for berganlegg. *Miljø- og samfunnstjenelige tunneler*, Statens vegvesen. Publikasjon nr. 101.
- Quiñones-Rozo, C. (2010). Lugeon test interpretation, revisited.
- Ramberg, I. B., Bryhni, I., Nøttvedt, A., and Rangnes, K. (2013). *Landet blir til - Norges geologi*. Norsk Geologisk Forening (NGF), Trondheim.
- Sandness, B. V. (2018). Fotografi av betongelemter. Tilgjengelig fra: <https://www.oblad.no/follobanen/bane-nor/asland/tunnelboremaskinen-anna-knuser-tunnel-for-follobanen-med-en-fart-av-100-meter-i-uken/g/5-68-428755> (Hentet 18.06.2018).
- Scesi, L. and Gattinoni, P. (2009). *Water Circulation in Rocks*. Springer, Milano, Italy.
- Syversen, F. S. G., Lawton, M., Finnøy, A. H., and Gammelsæter, B. (2018). Water ingress and groundwater control in double shield TBMs at the Follo Line Project - Norway.
- Tollan, A. (1977). *Vann - en naturressurs*. Universitetsforlaget, Oslo.
- Undrum, S. I. (2011). Holmestrand stasjon i fjell fra visjon til virkelighet. *Fjellsprengningsdagen, bergmekanikkdagen, geoteknikkdagen*, Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk, Norsk Bergmekanikkgruppe, Norsk Geoteknisk Forening.

# **Tillegg A**

## **Ingeniørgeologisk kart og profil, bergartsfordeling**

**A.1 Km. 2,85 – 8,0**

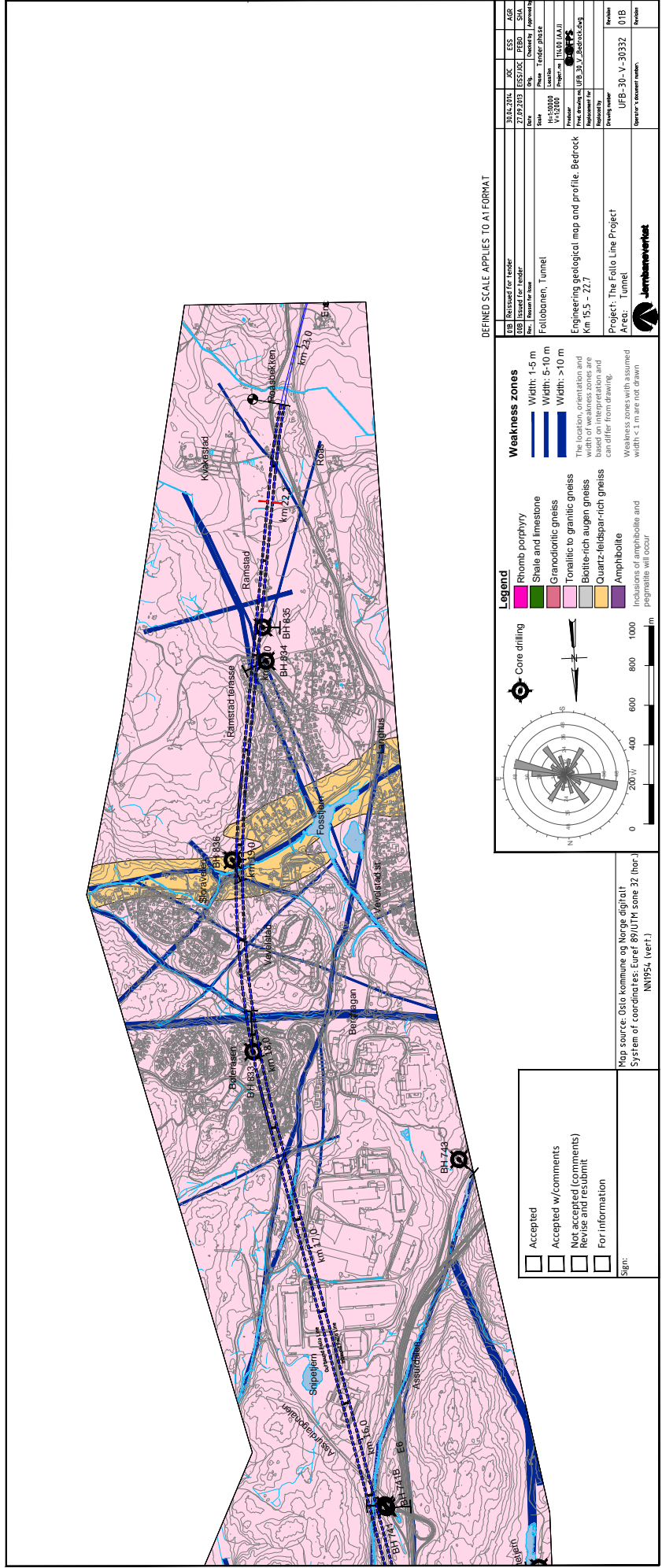
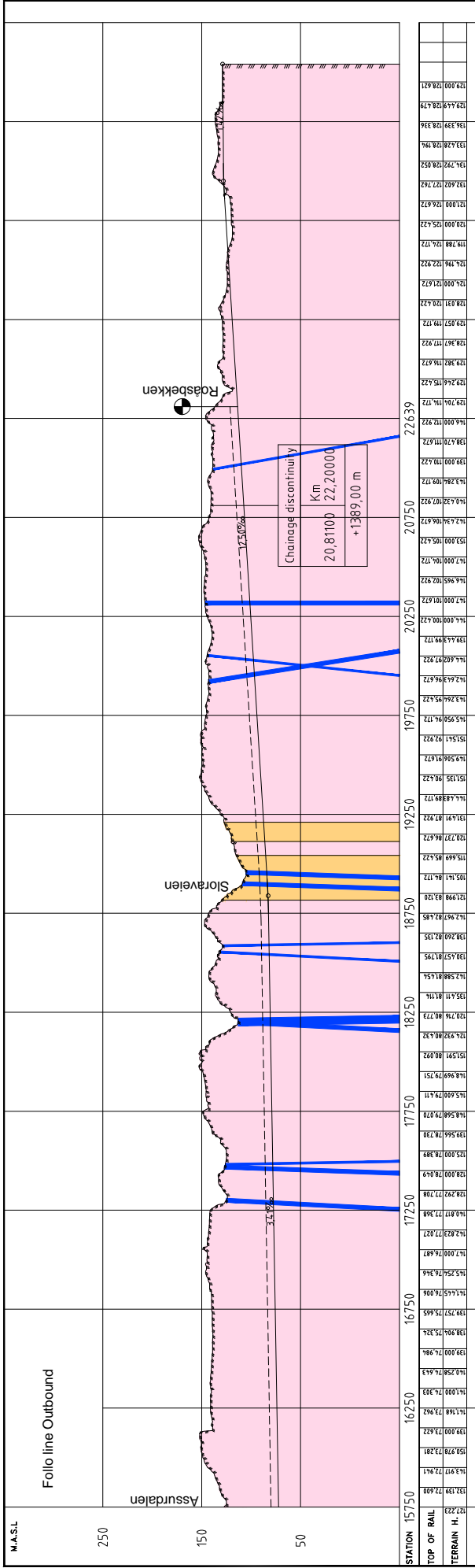


## **A.2 Km. 8,0 – 15,5**





### **A.3 Km 15,5 – 22,7**



DEFINED SCALE APPLIES TO A1 FORMAT

139	Revised for tender	31.03.2016	JOC	ESS	AGS
138	Issue for tender	27.09.2015	SS102	SS102	SS102
137	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
136	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
135	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
134	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
133	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
132	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
131	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
130	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
129	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
128	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
127	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
126	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
125	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
124	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
123	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
122	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
121	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
120	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
119	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
118	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
117	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
116	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
115	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
114	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
113	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
112	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
111	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
110	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
109	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
108	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
107	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
106	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
105	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
104	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
103	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
102	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
101	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
100	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
99	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
98	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
97	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
96	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
95	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
94	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
93	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
92	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
91	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
90	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
89	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
88	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
87	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
86	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
85	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
84	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
83	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
82	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
81	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
80	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
79	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
78	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
77	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
76	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
75	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
74	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
73	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
72	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
71	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
70	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
69	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
68	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
67	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
66	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
65	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
64	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
63	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
62	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
61	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
60	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
59	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
58	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
57	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
56	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
55	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
54	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
53	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
52	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
51	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
50	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
49	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
48	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
47	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
46	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
45	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
44	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
43	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
42	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
41	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
40	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
39	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
38	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
37	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
36	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
35	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
34	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
33	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
32	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
31	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
30	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
29	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
28	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
27	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
26	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
25	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
24	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
23	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
22	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
21	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
20	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
19	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
18	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
17	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
16	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
15	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
14	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
13	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
12	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
11	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
10	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
9	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
8	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
7	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
6	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
5	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
4	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
3	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
2	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102
1	Issue for tender	10.03.2015	SS102	SS102	SS102

<input type="checkbox"/>	Accepted
<input type="checkbox"/>	Accepted w/comments
<input type="checkbox"/>	Not accepted (comments)
<input type="checkbox"/>	Revise and resubmit
<input type="checkbox"/>	For information

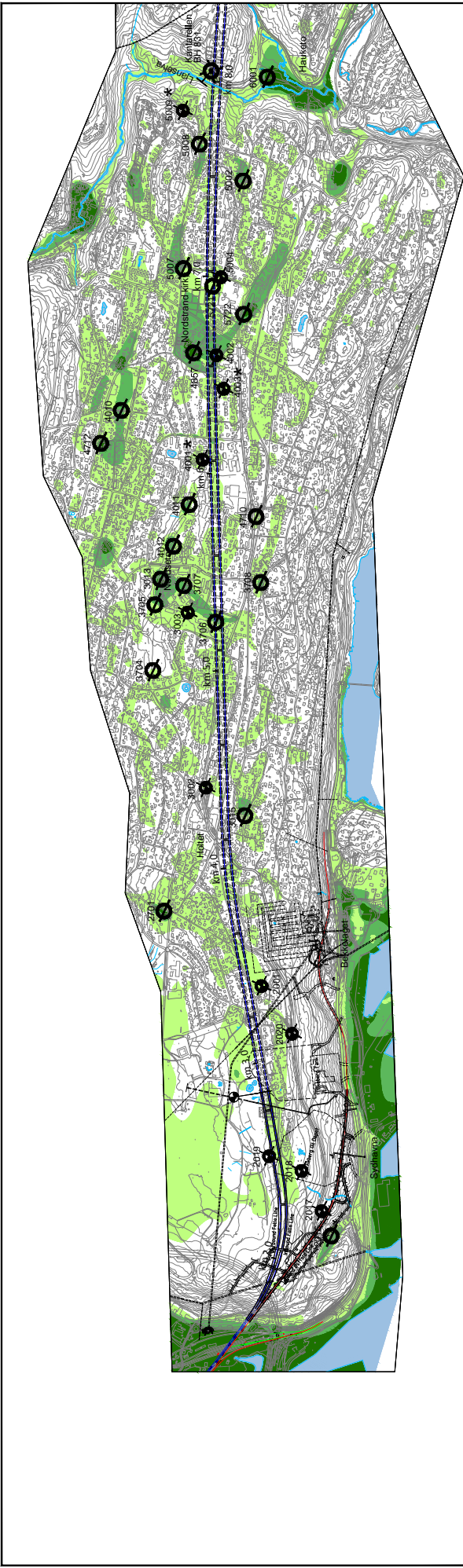
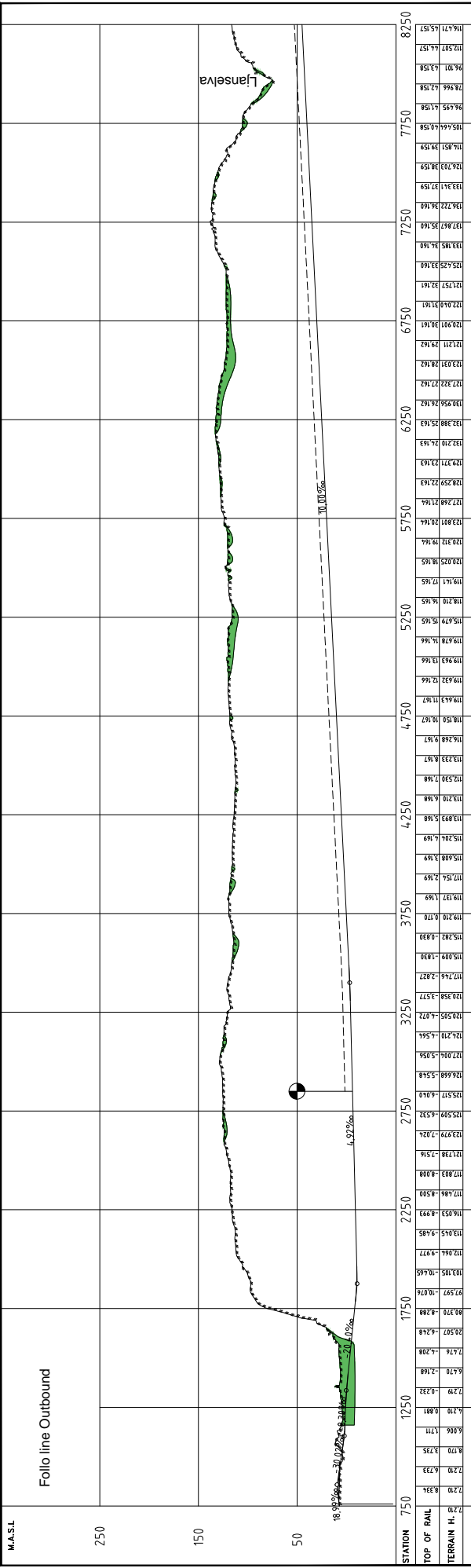
Sign: \_\_\_\_\_



## **Tillegg B**

# **Ingeniørgeologisk kart og profil, løsmassetykkelse og fordeling**

**B.1 Km. 2,85 – 8,0**



DEFINED SCALE APPLIES TO A1 FORMAT

119	Revised for tender	31.03.2016	JRK	ESS	AGS
120	Issue for approval	27.07.2016	ESS/OC	ESS	AGS
121	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
122	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
123	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
124	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
125	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
126	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
127	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
128	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
129	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
130	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
131	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
132	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
133	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
134	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
135	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
136	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
137	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
138	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
139	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
140	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
141	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
142	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
143	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
144	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
145	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
146	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
147	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
148	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
149	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS
150	Issue for construction	10.08.2016	ESS/OC	ESS	AGS

**Legend**

- Core drilling
- Pore pressure gauge
- Well drill hole in rock ("energy well")
- Strata water level observation

**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

Sign:

The complete list of water level measurements is found on webpage: [http://bioweb07.bioborsk.no/folloibanen\\_grunnvann](http://bioweb07.bioborsk.no/folloibanen_grunnvann)

Map source: Utc kommune og Norge digitalt  
System of coordinates: Euref 89/UTM zone 32 (hor.)  
NN1954 (ver1.)

Project: The Follo Line Project  
Area: Tunnel

Operator's contact name:

**B.2 Km. 8,0 – 15,5**



**B.3 Km 15,5 – 22,7**





## **Tillegg C**

**Informasjon om geologiske forhold på stuff  
etter pelnummer. Hentet fra daglige  
kartlegginger på TBM 4.**

TILLEGG C. INFORMASJON OM GEOLOGISKE FORHOLD PÅ STUFF ETTER PELNUMMER.  
HENTET FRA DAGLIGE KARTLEGGINGER PÅ TBM 4.

<b>Pelnummer</b>	<b>Beskrivelse av forhold på stuff</b>
12+383	Massiv gneis. Uforvitret berg. Subhorisontale sprekker orientert nord-sør, vertikale sprekker orientert øst-vest. Vanndrypp.
12+401	Gneis. Lett forvitring langs sprekkeoverflater og lav konsentrasjon av leire. Subhorisontale sprekker orientert nord-sør, vertikale sprekker orientert øst-vest. Vanndrypp.
12+416	Gneis med amfibolittintrusjon. Lett forvitret. Subhorisontale sprekker orientert nord-sør, vertikale sprekker orientert øst-vest. Mye vann som drypper/renner på stuff fra ulike punkter.
12+437	Gneis med amfibolitt på venstre og høyre side. Subhorisontale sprekker orientert nord-sør, vertikale sprekker orientert øst-vest. Drypper fra stuff.
12+473	Gneis og amfibolitt. Subhorisontale sprekker orientert nord-sør med sprekkeåpning > 10 mm, vertikale sprekker orientert øst-vest. Vann renner på stuff. Observert vanninnstrømning fra åpent horisontalplan.
12+481	Gneis og amfibolitt. Subhorisontale sprekker orientert nord-sør, vertikale sprekker orientert øst-vest. Horisontal, oppknust sone krysser stuff horisontalt. Vann renner fra øvre deler av stuff.
12+500	Store vannmengder på stuff
12+538	Gneis og amfibolitt, mye vann.
12+576	Massiv gneis og amfibolittgang. Noen forvitrede soner. Foliasjon og subhorisontale sprekker med vann.
12+585	Lys gneis med amfibolittåre. Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert øst-vest. Vannlekasje på 30-40 L/min fra subhorisontale sprekker.
12+731	Mixed face med amfibolitt til venstre og tonalittisk gneis til høyre. Vertikale sprekker orientert øst-vest til høyre. Tørr på venstre side, våt på høyre side.
12+756	Mørk gneis med amfibolitt og noen pegmatittårer. Massiv med noe oppsprekking. Noen sprekker har litt leirinnhold. Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert øst-vest. Vann renner på stuff fra sprekker.
12+783	Amfibolitt og sterkt oppsprukkne årer av kalsitt og kvarts. Vertikale sprekker orientert øst-vest med sprekkeåpning < 1 mm. Vann renner på stuff, ca. 3 L/min.
12+827	Amfibolitt. Høy konsentrasjon av vertikale sprekker orientert øst-vest. Tørr.
12+859	Lys og mørk gneis, amfibolitt og litt pegmatitt. Uforvitret. Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert øst-vest. Vann fra hele stuff.
12+899	Overgang mellom lys og mørk gneis. Uforvitret. Tørr.
12+954	Amfibolittgang og kvartsårer. Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert øst-vest. Vann i nedre del.

TILLEGG C. INFORMASJON OM GEOLOGISKE FORHOLD PÅ STUFF ETTER PELNUMMER.  
HENTET FRA DAGLIGE KARTLEGGINGER PÅ TBM 4.

<b>Pelnummer</b>	<b>Beskrivelse av forhold på stuff</b>
13+002	Tonalittisk gneis med pegmatittgang på venstre side. Uforvitret og få sprekker. Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert øst-vest. Tørr.
13+047	Amfibolitt. Uforvitret. Moderat oppsprukket. Vertikale sprekker orientert øst-vest. Vann på høyre side 5-10 L/min fra subhorisontal sprekk.
13+094	Mørk gneis med amfibolitt. Lite oppsprekking. Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert øst-vest. Overgang mellom gneis og amfibolitt litt forvitret, vann kommer herfra.
13+160	Amfibolitt og gneis. Uforvitret. Oppsprekking i amfibolitt. Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert øst-vest. Tørr.
13+208	Amfibolitt og lys gneis. Moderat oppsprekking, mest i amfibolitt. Uforvitret. Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert østnordøst-vestsørvest. Tørr.
13+257	Amfibolitt og grovkornet gneis. Uforvitret. Vertikale sprekker orientert øst-vest. Tørr.
13+309	Gneis og amfibolittgang. I kontakten med gneis er det observert forvitret berg. Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert øst-vest. Våt stuff, men ikke innlekkasjer observert.
13+353	Amfibolitt, moderat oppsprukket. Granittisk gneis med liten oppsprekking. Uforvitret. Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert øst-vest. Tørr.
13+402	Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert øst-vest, vertikale sprekker orientert nordøst-sørvest. Svakhetsone på venstre side med knust berg dominert av subhorisontale sprekker og vertikale sprekker orientert nordøst-sørvest. Vannlekkasje på 20-30 L/min. Moderat oppsprukket berg med moderat avstand. Svakhetsone tett oppsprukket.
13+438	Mixed face med amfibolitt og gneis. Gneis sterkt forvitret med leire langs sprekeplan. Stor konsentrasjon av subhorisontale sprekker med åpning på 1-5 mm og vertikale sprekker orientert øst-vest. Leirefyll. Vann på høyre og nedre del av stuff, 15-20 L/min, mye fra subhorisontale sprekker.
13+459	Amfibolitt med tett oppsprekking og litt forvitret. Lys gneis med moderat oppsprekking og moderat forvitring. Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert øst-vest. Vann renner fra nedre del (amfibolitt), 5-10 L/min
13+480	Tett oppsprukket gneis, sone med amfibolitt med løst materiale (svakhetsone). Vann fra amfibolittgangen og den høyt oppsprukkne delen av gneis, 3 L/s.
13+501	Mørk gneis. Uforvitret til lett forvitret langs sprekker. Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert nordøst-sørvest og vertikale sprekker orientert nordvest-sørøst. Tørr.
13+523	Amfibolitt og gneis. Vann fra kontakt mellom amfibolitt og gneis og subvertikale sprekker.

TILLEGG C. INFORMASJON OM GEOLOGISKE FORHOLD PÅ STUFF ETTER PELNUMMER.  
HENTET FRA DAGLIGE KARTLEGGINGER PÅ TBM 4.

<b>Pelnummer</b>	<b>Beskrivelse av forhold på stuff</b>
13+600	Gneis med tett oppsprukket svakhetsone på høyre side. Tynn svakhetsone i midten, 20-30 cm med sterkt forvitret berg og noe leire. Lett forvitret berg utenom svakhetssonene.
13+635	Sterkt oppsprukket gneis til venstre med leire. Moderat forvitret på høyre. Sprekker med mykt og hardt fyll, normalt under 5 mm. Vann renner fra øvre del, 5-10 L/min
13+723	Forvitret gneis og noe pegmatitt. Fylte/forseglede sprekker langs foliasjon, intakt berg. Tørr.
13+849	Moderat til ekstremt forvitret gneis, pegmatitt og amfibolitt. Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert øst-vest. Senter er mest leire. TØRR
13+863	Mørk gneis med amfibolittgang. Høyt forvitret langs plan og i gneisen. Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert øst-vest. Noen subhorisontale sprekker har leirfyll. Vann flyrter på stuff og med trykk på flere sprekker, over 40 L/min.
14+116	Halve stoffen består av gneis og overgang til amfibolitt til høyre. Oppsprukket. Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert øst-vest. Vann renner og dypper, med svak forvitring langs sprekkeplan, omtrent 5 L/min.
14+212	Mørk gneis med pegmatitt. Ikke forvitret. Vertikale sprekker orientert øst-vest. Tørr.
14+244	Mørk gneis, tett oppsprukket. Vann renner med trykk fra nedre, venstre del av stuff, 5-10 L/min.
14+275	Mørk gneis, tett oppsprukket. Ulik grad av forvitring. Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert øst-vest. Mye vann fra overalt, 2 L/sekund.
14+297	Gneis og amfibolitt. Litt forvitring langs sprekker. Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert øst-vest. Renner vann, 10-20 L/min fra ulike steder.
14+361	Mørk gneis og amfibolittiske ganger. Uforvitret og oppsprekking med moderat sprekkavstand. Litt vann fra øvre del (kontakt mellom amfibolitt og gneis?).
14+421	Gneis med amfibolittganger. Amfibolitt er mer oppsprukket. Uforvitret. Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert øst-vest. Tørr.
14+497	Mørk, uforvitret gneis med amfibolittganger. Lite oppsprukket. Vertikale sprekker orientert øst-vest. Litt vanddrypp.
14+515	Massiv, mørk gneis med amfibolittgang. Vertikale sprekker orientert øst-vest. Tørr.

TILLEGG C. INFORMASJON OM GEOLOGISKE FORHOLD PÅ STUFF ETTER PELNUMMER.  
HENTET FRA DAGLIGE KARTLEGGINGER PÅ TBM 4.

<b>Pelnummer</b>	<b>Beskrivelse av forhold på stuff</b>
16+333	Lys gneis med amfibolittgang. Oppsprekking med moderat utholdenhet, tettere oppspreking i amfibolitt enn i gneisen. Tre sprekkeseett, vertikale sprekker orientert nordvest-sørøst og to vertikale sett orientert øst-vest med fall mot nord og sør. Litt forvitring med leire på sprekkesettet orientert nordvest-sørøst. Tørr.
16+374	Hovedsaklig lys gneis med noen kvartsårer. Uforvitrede sprekker. Subhorisontale sprekker og vertikale orientert øst-vest, et sprekkeseett orientert nord-sør. Fuktig stuff.
16+395	Mørk gneis med tett oppspreking. Vertikale sprekker orientert øst-vest, vertikale sprekker orientert nord-sør. Tørr.
16+409	Lys og mørk gneis kuttet av amfibolittgang og pegmatittårer. Et sprekkeseett orientert nord-sør. Vann strømmer med trykk fra ulike steder på stuff, 10 L/min.
16+450	Mørk gneis med pegmatittårer. Lite oppsprekking. Uforvitret. Vertikale sprekker orientert øst-vest. Små vanddrypp.
16+526	Mørkt farget bergmasse. Venstre side er helt oppsprukket (sukkerbit). Svakhetssonen er for det meste tettet ved injeksjon, men noe vann strømmer herfra, 1-2 L/min. Sonen ser ut til å komme langs foliasjonen, orientert nord-sør. Et sprekkeseett orientert nordøst-sørvest med fall mot sør.
16+555	Lys gneis og pegmatittårer. Noe oppsprekking. Vertikale sprekker orientert nord-sør og nordøst-sørvest. Stuff er tørr. Fuktig, brun oksidasjon observert på venstre side.
16+570	Lys gneis. Uforvitret. Lite oppsprekking. Vertikale sprekker orientert øst-vest. Fuktig.
16+606	Lys gneis med liten amfibolitt åre til høyre. Uforvitret, moderat oppsprekking. Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert øst-vest, sprekker orientert nordøst-sørvest. Tørr.
16+687	Eruptivgang av amfibolitt med noen kvartsårer. Uforvitret, lite oppsprekking. Vertikale sprekker orientert øst-vest og nord-sør. Fuktig.
16+738	Amfibolitt. Uforvitret og moderat oppsprekking. Vertikale sprekker orientert øst-vest og nord-sør. Fuktig.
16+784	Mørk gneis med pegmatitt. Moderat oppsprekking og lett forvitring langs noen sprekker. Vertikale sprekker orientert øst-vest. Vanddrypp.
16+807	Massiv, mørk gneis. Uforvitret. Vertikale sprekker orientert øst-vest. Tørr.
16+875	Finkornet, mørk gneis og finkornet, kvartsrik gneis. Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert øst-vest og nordøst-sørvest. Vann strømmer nederst på stuff, 3-5 L/min.

TILLEGG C. INFORMASJON OM GEOLOGISKE FORHOLD PÅ STUFF ETTER PELNUMMER.  
HENTET FRA DAGLIGE KARTLEGGINGER PÅ TBM 4.

<b>Pelnummer</b>	<b>Beskrivelse av forhold på stuff</b>
16+936	Overgang mellom finkornet, mørkegrå og mer grovkornet, lysgrå gneis. Uforvitret. Vertikale sprekker orientert øst-vest. Vann strømmer, over 10 L/min.
16+976	Hovedsaklig amfibolitt, noe pegmatitt. Sterkt oppsprukket. Vertikale sprekker orientert nord-sør og nordvest-sørøst, et sprekkesett orientert nordøst-sørvest med fall mot sør. Vann strømmer fra kontakt mellom amfibolitt og pegmatitt, 10 L/min.
17+066	Lys til mørk gneis med litt foldet pegmatitt. Vann strømmer fra senter, 1-2 L/min.
17+109	Pegmatittgang mellom lys gneis og amfibolitt. Vertikale sprekker orientert øst-vest. Tørr.
17+131	Mørk gneis med kvartsårer. Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert øst-vest, et sprekkesett orientert nord-sør. Vann strømmer fra oppsprukket sone i midten, 2 L/min.
17+197	Massiv gneis til venstre, sterkt oppsprukket svakhetszone med leire til høyre. Vertikale sprekker orientert øst-vest. Flere svakhetssoner av ulik tykkelse. Vann strømmer, 1 L/min.
17+226	Lys gneis, moderat forvitret. Vertikale sprekker orientert øst-vest, foliasjonsprekker orientert nord-sør. Vann strømmer på stuff, 1-2 L/min.
17+262	Mørk gneis med små overganger til lys gneis og amfibolitt. Svakhetszone langs foliasjon med leire og moderat til sterkt forvitret berg. Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert øst-vest, foliasjonsprekker nord-sør. Tørr.
17+356	Massiv granittisk gneis. Uforvitret. Lav oppsprekking. Vertikale sprekker orientert østsørøst-vestnordvest. Det flyter litt vann, < 1 L/min, fra amfibolitt på vestre side med litt opprekking.
17+378	Massiv lys gneis. Lite oppsprekking. Vertikale sprekker orientert øst-vest. Tørr.
17+518	Mørk gneis med moderat oppsprekking. Amfibolittgang og pegmatittåre. Vann strømmer fra disse, 5-10 L/min.
17+606	Lys gneis. Lite oppsprekking. Vertikale sprekker orientert øst-vest. Tørr til fuktig.

TILLEGG C. INFORMASJON OM GEOLOGISKE FORHOLD PÅ STUFF ETTER PELNUMMER.  
HENTET FRA DAGLIGE KARTLEGGINGER PÅ TBM 4.

---

<b>Pelnummer</b>	<b>Beskrivelse av forhold på stuff</b>
17+722	Gneis med pegmatittårer omringet av biotittrik bånding. Vertikale sprekker orientert øst-vest. Fuktig.
17+821	Lys, finkornet gneis. Litt amfibolitt og pegmatitt på venstre side. Tilnærmet vertikale sprekker orientert nor-sør. Tørr.
17+872	Lite oppsprukket gneis kuttet av amfibolittgang og pegmatitt. Subhorisontale sprekker, vertikale sprekker orientert øst-vest. Fuktig.
17+951	Lite oppsprukket gneis. Uforvitret. Foliasjonssprekker orientert nord-sør, vertikale sprekker orientert nordvest-sørøst. Tørr.
18+020	Gneis og to amfibolittganger. To sprekkesett, vertikale sprekker orientert nordøst-sørvest og et sprekkesett orientert nordvest-sørøst med fall mot sør. Tørr.
18+052	Amfibolitt i nedre del av stuff og gneis i øvre del. Noen pegmatissårer i amfibolitt. Uforvitret. Vertikale sprekker orientert øst-vest. Tørr.
18+142	Tonalittisk gneis. Moderat oppsprukket. Et sprekkesett orientert nordvest-sørøst, vertikale sprekker orientert østsørøst-vestnordvest. Fuktig.
18+175	Tett oppsprukket amfibolitt med tonalittisk gneis på hver side. Tre sprekkesett, vertikale sprekkesett orientert nordøst-sørvest og øst-vest, et sprekkesett orientert øst-vest. Vann fra amfibolitt, 5-10 L/min.
18+214	Gneis med noe pegmatitt. Moderat forvitring lang sprekker. Vertikale sprekker orientert nord-sør og østnordøst-vestsørvest, foliasjonssprekker. Flere lekkasjer på stuff, 5-10 L/min.
18+221	Mørk gneis. Tett oppsprukket til venstre og svakhetssone med høyere grad av forvitring på høyre side. Vertikale sprekker orientert øst-vest og nord-sør. Tørr.